

جامعة أبو بكر بلقايد - تلمسان

Université Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen



Faculté de Technologie

Département de Génie Biomédical

**MEMOIRE DE PROJET DE FIN D'ETUDES**

Pour l'obtention du Diplôme de

**MASTER en GENIE BIOMEDICAL**

**Spécialité : Instrumentation Biomédicale**

Présenté par : **BOUALIANE Aicha Nour El Houda**

---

**Mise en œuvre d'un système de télé opération  
pour la chirurgie interventionnelle**

---

Soutenu le 24/09/2020 devant le Jury

Mr.	DJEBBARI Abdelghani	<i>MCA</i>	Université de Tlemcen	Président
Mr.	MALTI Abed	<i>MCA</i>	Université de Tlemcen	Encadreur
Melle	BAAKEK Yettou Nour El Houda	<i>MCB</i>	Université de Tlemcen	Examineur

Année universitaire 2019-2020

---

## *Remerciements*

*J'aimerais tout d'abord remercier Dieu, le tout-puissant, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.*

*Je remercie Mr MALTI Abed mon encadreur pour son suivi, son soutien, ses encouragements ainsi que sa confiance qui m'ont permis d'avancer dans ce travail.*

*Je tiens à remercier très chaleureusement les membres du jury Dr DJEBBARI Abdelghani et Dr BAAKEK Yettou Nour El Houda pour avoir bien voulu examiner et juger ce projet de fin d'études.*

*Je remercie tous mes amis : D. Nour, B. Asma, Z. Linda, T. Aziza, Y. Djazia, B. Amina.*

*Je termine par l'expression de ma plus grande gratitude envers ma famille. D'abord ma grand-mère qui m'a accompagné par ses prières et son amour. Ensuite, mon petit frère Toufik, ma petite-cousine Leila et mon cousin Abdelkader pour leurs encouragements et leur soutien inestimable. Enfin, je termine en remerciant ceux qui sans leur présence, leur patience, leurs sacrifices et leur aide, je ne serai sans doute pas là.*

*Merci mes chers parents.*

## Résumé :

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'assistance robotique pour la chirurgie interventionnelle télé opérée. L'une des principales limitations des systèmes existants concerne l'absence de restitution des efforts au chirurgien lorsqu'il télé opère le robot dans le site distant. Ainsi, une architecture de télé opération force-position avec retour de force est développée. Le système consiste en l'utilisation d'une interface haptique (PHANTOM Omni) à six degrés de liberté télé opérant un robot esclave de la famille Stäubli de six degrés de liberté portant à son extrémité un instrument médical (échographe, une aiguille de biopsie, etc). Ce système de télé opération bilatéral fournit une information d'effort en retour à l'opérateur. Un schéma de contrôle adaptatif d'impédance est proposé pour améliorer la transparence et la stabilité du système en obtenant de bonnes performances de suivi de force, tout en compensant simultanément les perturbations de la main humaine et les bruits des capteurs.

**Mots clés :** télé opération, chirurgie interventionnelle, interface haptique, PHANTOM Omni, Stäubli, bilatéral, contrôle adaptatif d'impédance.

## ملخص:

هذا العمل يصب في مجال المساعدة الروبوتية للجراحة التداخلية عن بعد. أحد القيود الرئيسية للأنظمة الحالية يتمثل في عدم قدرة الجراح على الاحساس بالقوة المطبقة من طرف الروبوت الذي يقوم بالتحكم فيه عن بعد. وبالتالي تم تطوير بنية للتحكم عن بعد (قوة-موضع) مع الاخذ بعين الاعتبار قوة رد الفعل. يحث النظام المعتمد على استخدام الواجهة اللمسية (PHANTOM Omni) الحاملة لست درجات للتحرك والقادرة على التحكم عن بعد في الروبوت الذي ينتمي الى عائلة Stäubli ، المكون من ست درجات للتحرك والذي يحمل في نهايته أداة طبية (الموجات فوق الصوتية، ابرة خزعة، الخ). يوفر نظام التحكم عن بعد الثنائي معلومات عن رد الفعل للعامل. تم اقتراح مخطط للتحكم التكييفي في المعاوقة وذلك لتحسين شفافية واستقرار النظام من خلال تحقيق اداء جيد لتتبع القوة، مع التعويض في الوقت نفسه عن اضطرابات اليد البشرية و تشويش اجهزة الاستشعار.

**كلمات مفتاحية:** التحكم عن بعد- الجراحة التداخلية- الواجهة اللمسية- PHANTOM Omni- Stäubli - ثنائي-التحكم التكييفي في المعاوقة.

## Abstract :

This work concerns robotic assisted teleoperated interventional surgery. Nowadays, dedicated robotized systems do not include force feedback to the surgeon. Here, a force-position architecture with force feedback is developed. The system consists in the use of a haptic interface (PHANTOM Omni) with six degrees of freedom teleoperating a slave Stäubli robot with six degrees of freedom carrying at its end a medical instrument (ultrasound, biopsy needle, etc). This system of tele operation provides effort feedback to the operator. An adaptive impedance control scheme is proposed to improve the transparency and stability of the system obtaining good force following performance, while at the same time compensating for human hand perturbations and sensor noise.

**Keywords :** teleoperation, interventional surgery, haptic interface, PHANTOM Omni, Stäubli, bilateral, adaptive impedance control.

---

# Table des matières

Remerciements .....	I
Liste des figures .....	V
Liste des tableaux .....	VIII
<b>Introduction générale</b> .....	<b>IX</b>
<b>Chapitre 1</b> .....	<b>3</b>
1 Chapitre1 : La robotique médicale et les systèmes de télé opération.....	4
1.1 L'intervention chirurgicale et l'assistance robotique : .....	4
1.1.1 La chirurgie mini-invasive : .....	4
1.1.2 La robotique médicale : .....	6
1.2 Télé-opération avec retour d'effort : .....	11
1.2.1 Le retour haptique : .....	11
1.2.2 L'état de l'art : .....	13
1.3 Cahier de charges du système de télé opération avec retour d'effort : .....	15
<b>Chapitre2</b> .....	<b>19</b>
2 Chapitre2 : Modélisation et simulation de contrôle de dispositif maitre et esclave. ....	20
2.1 Introduction : .....	20
2.2 Description des matrices de transformation : .....	21
2.3 Description d'une structure géométrique du robot : .....	25
2.4 Robot maître : .....	27
2.4.1 Modélisation géométrique du robot PHANTOM Omni : .....	32
2.4.1.1 Modèle géométrique direct : .....	32
2.4.1.2 Modèle géométrique inverse : .....	34
2.4.2 Modélisation cinématique du robot PHANTOM Omni : .....	37
2.4.2.1 Modèle cinématique direct : .....	37
2.4.2.2 Modèle cinématique inverse : .....	37
2.4.3 Le retour de force kinesthésique du robot Phantom Omni : .....	38
2.4.4 La modélisation du dispositif haptique dans le logiciel ADAMS : .....	40
2.4.5 Etude expérimentale du dispositif haptique PHANTOM Omni : .....	43
2.5 Robot esclave : .....	46
2.5.1 Modélisation dynamique du robot esclave : .....	52
2.5.1.1 Modèle dynamique par le formalisme de Lagrange : .....	54

---

2.5.1.2	Calcul du modèle dynamique du robot esclave : .....	60
2.5.2	Comparaison et Modélisation dans ADAMS du système mécanique de deux robots : .....	68
2.6	Conclusion : .....	75
<b>Chapitre3</b>	.....	76
3	Chapitre3 : Transparence et stabilité du schéma de télé opération.....	77
3.1	Introduction :.....	77
3.2	Représentation :.....	78
3.3	La stabilité des systèmes linéaires :.....	78
3.4	L'architecture de contrôle :.....	79
3.5	Le contrôleur d'impédance dans MATLAB/SIMULINK : .....	83
3.6	Résultats et discussions :.....	85
3.7	Conclusion : .....	88
<b>Conclusion générale</b>	.....	89
<b>Bibliographie</b>	.....	92

---

## Liste des figures

Figure 1.1 Principe de la chirurgie mini invasive : <b>(a)</b> une technique novatrice [source : Allodocteurs.fr], <b>(b)</b> vue extérieure de l'emplacement et de la taille des incisions, <b>(c)</b> taille des cicatrices en phase post-opératoire [source:Health Library Encyclopedia]. .....	5
Figure 1.2 Circulation extracorporelle. Machine cœur-poumon et principe de mise en œuvre [source : chirurgien-cardiaque.com]. .....	6
Figure 1.3 Le système ROBODOC [Sugano, 2013]. .....	7
Figure 1.4 Le système MAKO : prothèse totale de hanche [source: www.reseau-chu.org]. ..	7
Figure 1.5 Le système chirurgical Da Vinci[“Le Département projette d’acheter Da Vinci, un robot chirurgical de 1,8 million d’euros,” 2019]. .....	8
Figure 1.6 Robot Zeus [“(PDF) Robotic endoscopic surgery in a porcine model of the infant neck,” n.d.]. .....	9
Figure 1.7 Robot AcuBot [Kettenbach and Kronreif, 2014]. .....	9
Figure 1.8 Le robot Hippocrate[Degoulange et al., 1998]. .....	10
Figure 1.9 Système de télé-échographie de K. MASUDA[Masuda et al., 2001b]. .....	10
Figure 1.10 DA VINCI XI [source : science et avenir.fr]. .....	11
Figure 1.11 Les interfaces haptiques : <b>(a)</b> PHANTOM Premium, <b>(b)</b> PHANTOM Omni, <b>(c)</b> Novint Falcon, <b>(d)</b> EXOS Wrist [source : www.3dsystems.com et www.roadtovr.com]. ...	12
Figure 1.12 Schéma bloc de système de télé opération avec retour d’effort. ....	16
Figure2.1 Rotation autour de l’axe x [Khalil et Dombre, 2012]. .....	23
Figure2.2 Rotation autour de l’axe y [Khalil et Dombre, 2012]. .....	23
Figure2.3 Rotation autour de l’axe z [Khalil et Dombre, 2012]. .....	24
Figure2.4 Transformation d’un repère à translation pure [Khalil et Dombre, 2012]. .....	25
Figure2.5 Robot à structure ouverte simple [Khalil et Dombre, 2012]. .....	26

Figure 2.6 Paramètres géométriques dans le cas d'une structure ouverte simple [Khalil et Dombre, 2012].	26
Figure 2.7 PHANTOM Omni.	28
Figure 2.8 Placement des repères du PHANTOM Omni [Jiang et al., 2016a].	30
Figure 2.9 Le diagramme géométrique direct [Jarillo-Silva et al., 2009].	33
Figure 2.10 Vue du dessus, diagramme géométrique inverse [Jarillo-Silva et al., 2009].	34
Figure 2.11 Vue de côté, diagramme géométrique inverse [Jarillo-Silva et al., 2009].	35
Figure 2.12 Identification des corps du robot dans ADAMS/View.	40
Figure 2.13 Application des mouvements d'articulation au dispositif haptique.	41
Figure 2.14 Simulation de dispositif haptique dans ADAMS.	41
Figure 2.15 Les articulations du PHANTOM Omni.	42
Figure 2.16 La vitesse de l'effecteur terminal.	43
Figure 2.17 l'accélération de l'effecteur terminal.	43
Figure 2.18 Exemple de fonctionnement du PHANTOM Omni avec OpenHaptics.	45
Figure 2.19 Exemple de fonctionnement du PHANTOM Omni avec H3D.	46
Figure 2.20 Stäubli RX-90 [Waiboer et al., 2005].	46
Figure 2.21 Placement des repères du robot esclave.	47
Figure 2.22 Identification du robot Stäubli RX-90.	69
Figure 2.23 Position de l'effecteur terminal du robot RX90.	70
Figure 2.24 La vitesse de l'effecteur terminal du robot RX90.	70
Figure 2.25 L'accélération de l'effecteur terminal du robot RX90.	70
Figure 2.26 La vitesse angulaire de l'effecteur terminal du robot RX90.	71
Figure 2.27 Création des points caractéristiques du robot Stäubli modifié.	72

Figure 2.28 <i>Création des liens d'articulations pour le robot Stäubli modifié.</i> .....	72
Figure 2.29 <i>Sélection du matériel pour le robot Stäubli modifié.</i> .....	73
Figure 2.30 <i>Simulation du robot Stäubli modifié.</i> .....	73
Figure 2.31 <i>Position de l'effecteur terminal du robot Stäubli modifié.</i> .....	74
Figure 2.32 <i>La vitesse de l'effecteur terminal du robot Stäubli modifié.</i> .....	74
Figure 2.33 <i>L'accélération de l'effecteur terminal du robot Stäubli modifié.</i> .....	75
Figure 2.34 <i>La vitesse angulaire de l'effecteur terminal du robot Stäubli modifié.</i> .....	75
Figure 3.1 <i>Architecture de contrôle d'impédance [Behzadpour et al., 2011].</i> .....	81
Figure 3.2 <i>Contrôleur d'impédance avec retour de force en boucle fermée [Carignan and Cleary, 2000].</i> .....	82
Figure 3.3 <i>Contrôleur d'impédance en boucle ouverte [Carignan and Cleary, 2000].</i> .....	83
Figure 3.4 <i>Architecture de contrôle d'impédance développée dans MATLAB/SIMULINK.</i> .....	84
Figure 3.5 <i>configuration de PHANTOM Omni.</i> .....	86
Figure 3.6 <i>configuration du robot esclave.</i> .....	86
Figure 3.7 <i>Trajectoire de dispositif haptique (<math>\theta_1, \theta_2, \theta_3</math>).</i> .....	87
Figure 3.7 <i>Trajectoire du robot esclave (<math>\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6</math>).</i> .....	87
Figure 3.9 <i>Erreurs de poursuite lors d'une télé opération suivant la direction x, suivant la direction y et suivant la direction z.</i> .....	88
Figure 3.10 <i>Efforts mesurés lors d'une télé opération : efforts suivant la direction x, efforts suivant la direction y et efforts suivant la direction z.</i> .....	89

---

## Liste des tableaux

Tableau 1.1 <i>Les caractéristiques de TOUCH<sup>TM</sup> et TOUCH X<sup>TM</sup> (source : www.3dsystems.com).</i> .....	18
Tableau 2.1 <i>Paramètre géométrique du robot PHANTOM Omni</i> [Jiang et al., 2016a].....	29
Tableau 2.2 <i>paramètres géométriques du robot esclave.</i> .....	49
Tableau 2.3 <i>Répartition des amplitudes des angles du RX90.</i> .....	69
Tableau 3.1 <i>Les paramètres de PHANTOM Omni</i> [Cruz-Valverde et al., 2010]. .....	89

---

# *Introduction générale*

### Introduction générale

« *Un robot opère en urgence médicale* » une scène d'un film de science-fiction. La fiction est depuis longtemps une réalité.

La plupart des opérations chirurgicales pratiquées aujourd'hui sont les moins longues et les moins invasives que la science permette. Cette adaptation de la méthodologie chirurgicale est due à l'intégration de la robotique. Les robots dans la salle d'opération fournissent au cadre médical un guidage d'une extrême précision en chirurgie. Ils offrent aussi la possibilité d'opérer dans des zones très petites ou difficiles d'accès, qu'il serait difficile ou impossible d'atteindre. Autrement le robot permet un control des instruments et une dextérité plus précise, ce qui le rend idéal pour certaines procédures.

Lorsque nous comparons la chirurgie robotisée à la chirurgie ouverte traditionnelle, nous constatons que les patients opérés à l'aide d'un robot, bénéficient de moins de douleur, d'un rétablissement rapide et sont souvent en mesure de quitter l'hôpital plus rapidement qu'ils ne l'auraient fait autrement.

La première assistance robotique dans le bloc opératoire a été pratiquée en 1994 avec le robot porte endoscope **Aesop**, ce dernier a ouvert de nouvelles perspectives pour la naissance des systèmes télé opérés, tels le **Zeus** ou le **DaVinci**. Ces découvertes technologiques ont offert au chirurgien la possibilité de retrouver des solutions aux limitations de la chirurgie ouverte pour accroître la qualité de ses gestes.

Néanmoins, les limitations des systèmes de télé opération lors d'une assistance chirurgicale mini invasive sont encore nombreuses à résoudre avant d'arriver aux performances que l'on veut satisfaire au sens de la pratique (retour de force sensoriel, compensation des mouvements de la main du chirurgien, ...).

Actuellement les travaux de recherche en robotique chirurgicale essaient d'apporter des solutions pour augmenter la qualité du geste du chirurgien en améliorant sa sensation au travers un retour des forces appliqués.

## Introduction générale

---

Dans ce contexte, le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire présente nos contributions dans le domaine de la chirurgie mini invasive avec l'étude d'une architecture de télé opération avec retour d'effort. Elles ont pour but principal d'améliorer la perception du chirurgien en chirurgie interventionnelle.

### - L'organisation du mémoire :

Ce mémoire est organisé de la façon suivante :

‡ Le chapitre 1 présente le contexte général des architectures de télé opération à retour d'effort. Nous introduisons tout d'abord l'acte mini invasif avant de détailler la robotique médicale. Nous porterons une attention particulière à l'état de l'art des différentes approches pour les systèmes télé opérés et nous mettrons en avant l'intérêt du retour de force dans la chirurgie interventionnelle. Nous finirons ce chapitre en proposant une architecture de télé opération intégrant un retour d'effort.

‡ Le chapitre 2 décrit la structure proposée par la modélisation géométrique, cinématique et dynamique du robot maître et esclave. Nous détaillerons les différents modèles mathématiques utilisés pour modéliser le système maître et esclave de l'architecture de télé opération. Nous présenterons ensuite le modèle mécanique de deux systèmes maître et esclave dans l'environnement ADAMS.

‡ Le chapitre 3 présente une analyse de la stabilité et la transparence du schéma proposé de télé opération avec retour d'effort. Nous développerons une stratégie de contrôle d'impédance sous MATLAB, pour pallier les limitations présentées au Chapitre 1.

‡ Nous concluons ce mémoire par une conclusion générale et par une présentation de nos perspectives dans le contexte de la chirurgie mini invasive télé opérée avec retour d'effort.

---

# *Chapitre 1*

# 1 Chapitre1 : La robotique médicale et les systèmes de télé opération.

## 1.1 L'intervention chirurgicale et l'assistance robotique :

La pratique de la chirurgie existe depuis longtemps et a considérablement évolué au fil du temps. Cependant, les plus grands développements de cette pratique n'ont pu être éprouvés qu'avec l'approfondissement progressif des connaissances en médecine et plus précisément l'anatomie humaine, et récemment avec la découverte de l'anesthésie et l'asepsie.

À travers une présentation de l'acte chirurgical mini-invasif, nous exposerons l'attribution possible de la robotique pour couvrir les problèmes ainsi les limites posées par la pratique.

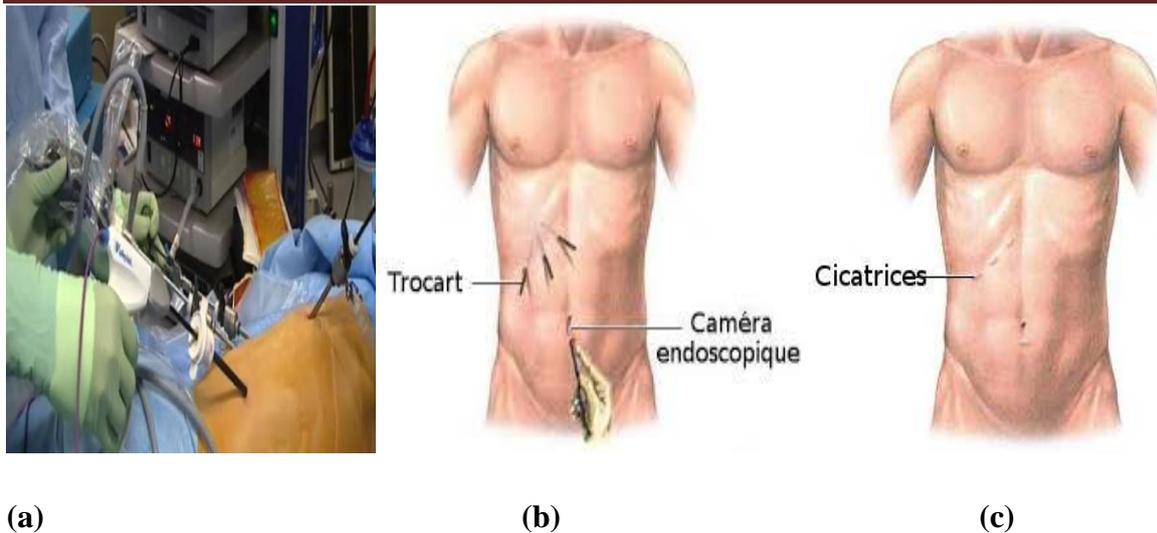
### 1.1.1 La chirurgie mini-invasive :

À l'époque, la chirurgie classique nommée à « ciel ouvert » était la seule modalité possible de la guérison par l'usage de la main suite à l'échec du traitement médical, et qui nécessite une large incision. Les interventions étaient traumatisantes et présentent des douleurs indésirables pour le patient. Avec l'apparition de la chirurgie mini invasive en 1940, le traumatisme chirurgical chez les patients a légèrement diminué. Notamment utilisée en chirurgie de l'appareil digestif et en chirurgie cardiaque, elle impose la réalisation de petites incisions (De l'ordre de 1 à 2[cm]) et l'utilisation d'instruments chirurgicaux spécifiquement conçus.

La chirurgie laparoscopique présente moins de saignements et moins de douleurs, les cicatrices sont plus discrètes et les durées de séjour à l'hôpital sont diminuées.

En chirurgie abdominale, du gaz (généralement du CO<sub>2</sub>) est injecté dans l'abdomen pour le gonfler et ainsi avoir plus de visibilité et de place, pour une éventuelle intervention. Le chirurgien ensuite introduit un endoscope, tube long flexible équipé d'une petite caméra légère fixée à son extrémité, et connectée à un moniteur vidéo puis deux instruments. Ces derniers, dédiés à la chirurgie mini invasive.

À la fin de la laparoscopie, les instruments sont retirés, le gaz évacué puis les incisions refermées à l'aide de points de suture.

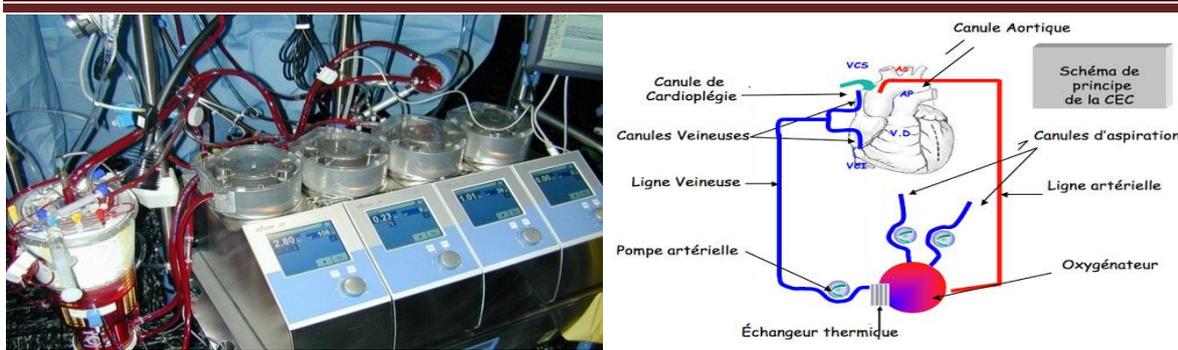


**Figure 1.1** Principe de la chirurgie mini invasive : (a) une technique novatrice [source : *Allodocteurs.fr*], (b) vue extérieure de l'emplacement et de la taille des incisions, (c) taille des cicatrices en phase post-opératoire [source: *Health Library Encyclopedia*].

Mis à part tous les problèmes causés par la chirurgie classique, la cardiologie se caractérise par une difficulté supplémentaire définie par le fait que le cœur est un organe en mouvement. Les séquences respiratoires provoquent des déplacements d'amplitudes importantes par rapport au geste à réaliser par le médecin.

Lorsqu'une artère du cœur est rétrécie ou obstruée par des plaques, l'irrigation du cœur est alors diminuée ce qui peut provoquer certains malaises comme l'essoufflement ou la douleur. Pour rétablir la circulation le chirurgien procédera à une revascularisation par le pontage coronarien, cette chirurgie consiste à contourner le blocage dans l'artère en créant un pont.

Afin de s'affranchir du mouvement du cœur, le chirurgien propose tout d'abord de l'arrêter temporairement et mettre en place une machine cœur-poumon, qui réalise la circulation extracorporelle (CEC). Ensuite, il procède à une sternotomie qui consiste à scier le sternum en deux à la verticale. C'est une chirurgie minimale qui nécessite vraiment beaucoup de précision puisque les sutures sont réalisées sur des artères d'environ 2[mm].



**Figure 1.2** Circulation extracorporelle. Machine cœur-poumon et principe de mise en œuvre [source : chirurgien-cardiaque.com].

Malgré que l'acte mini invasif a présenté une solution incontestable pour le patient, il a pendant plusieurs années compliquée le travail du chirurgien, et limité ces capacités gestuelles et sensorielles. Les petites incisions imposées par cette pratique présentent une obscurité de vision pour le chirurgien.

### 1.1.2 La robotique médicale :

Ces dernières années, l'apparition des robots opératoires apporte aux chirurgiens un moyen de parfaire leurs spécialités. La chirurgie robotique est devenue un domaine d'expertise.

Cette technique d'excellence permet aux chirurgiens de gagner en confort et en précision de mouvement, d'optimiser et d'étendre l'utilisation des habiletés chirurgicales humaines lors de procédures mini-invasives, endoscopiques ou de microchirurgie. Elle permet aussi un accès dans les zones difficiles grâce à une vision en 3D.

Le système télé opéré est constitué généralement d'une station de commande à partir de laquelle le chirurgien peut contrôler un ensemble d'instruments portés par des robots esclaves. Indépendamment de retour visuel, le chirurgien ne peut jamais quantifier les efforts qu'il exerce par ces instruments télé opérés.

Dans le domaine de la robotique médicale, les systèmes réalisés sont des systèmes complexes, qui font appel à plusieurs disciplines (mécanique, électronique, informatique, médecine, communications, etc.).

#### ➤ Assistance au geste chirurgical en orthopédie :

Le système **ROBODOC** [Yu et al, 2018], comprend deux éléments : un poste de travail informatisé équipé d'un logiciel exclusif pour la planification chirurgicale préopératoire

ORTHODOC, tandis que l'exécution chirurgicale est réalisée à l'aide du bras électromécanique à cinq axes ROBODOC.



**Figure 1.3** *Le système ROBODOC [Sugano, 2013].*

Pendant tout le mois de septembre 2019, Frédéric Dalat, chirurgien orthopédique au Centre médico-chirurgical de Tronquées, à Aurillac (Cantal) [des-protheses-de-genou-posees-avec-laide-dun-robot-au-centre-medico-chirurgical], a réalisé des poses de prothèse de genou à l'aide d'un robot **MAKO**. L'incision et la voie d'abord sont faites par le chirurgien de même que la pose de la prothèse. Les coupes osseuses sont réalisées par le chirurgien à l'aide du bras robotisé. La fermeture et le pansement sont également faits par le chirurgien. Ce bras robotisé empêche le chirurgien d'abimer les tissus sains qui l'entourent.



**Figure 1.4** *Le système MAKO : prothèse totale de hanche [source: www.reseau-chu.org].*

#### ➤ Assistance au geste chirurgical mini-invasif :

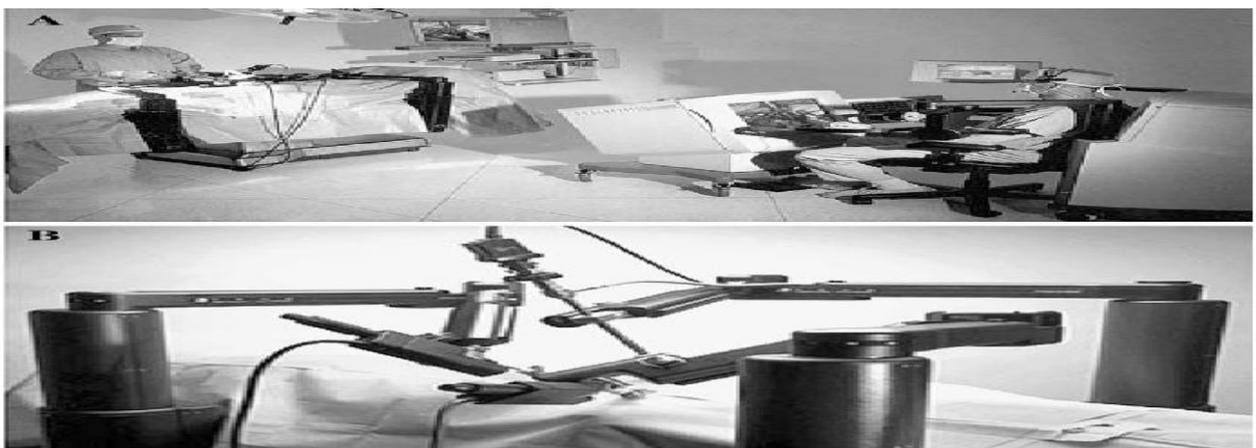
Le système chirurgical **Da Vinci** [Ahmed et al, 2018]: c'est un système à quatre bras, chacun avec sept degrés de liberté, contrôlés par deux bras de travail et une vue stéréoscopique en trois dimensions (3D) du champ que les chirurgiens peuvent utiliser de

manière télé-chirurgicale. Il est composé d'une console pour le chirurgien, d'un bras chirurgical multi-effecteur et de différents outils.



**Figure 1.5** Le système chirurgical Da Vinci [“Le Département projette d’acheter Da Vinci, un robot chirurgical de 1,8 million d’euros,” 2019].

**Zeus** [“Lumni | Enseignement - Zeus, le robot chirurgical,”] : le premier système commercial télé-opéré développé par la société Computer Motion le 7 septembre 2001. Est un système maître-esclave pour réaliser des opérations de chirurgie mini invasive, Inspiré du robot **Aesop** (Robot chirurgicale dont quatre degré de liberté sont motorisés et deux degré de liberté sont passifs). Ce système est fabriqué à partir de trois robot **Aesop** (un robot porte-endoscope et deux porte-outils). Le chirurgien dispose alors d'un poste de travail distant. Le bras porte-endoscope est à commande vocale et les deux autres sont commandés grâce à deux bras maîtres.



**Figure 1.6** Robot Zeus [“(PDF) Robotic endoscopic surgery in a porcine model of the infant neck,” n.d.].

➤ Assistance au geste en imagerie interventionnelle :

**Robot AcuBot**[Stoianovici et al, 2003] : est un robot compact à six degrés de liberté, qui permet de télé manipuler une aiguille ou un autre instrument chirurgical mince pour les procédures percutanées sous guidage scanner. AcuBot se compose de deux composants: un manipulateur robotique et un boîtier de commande.

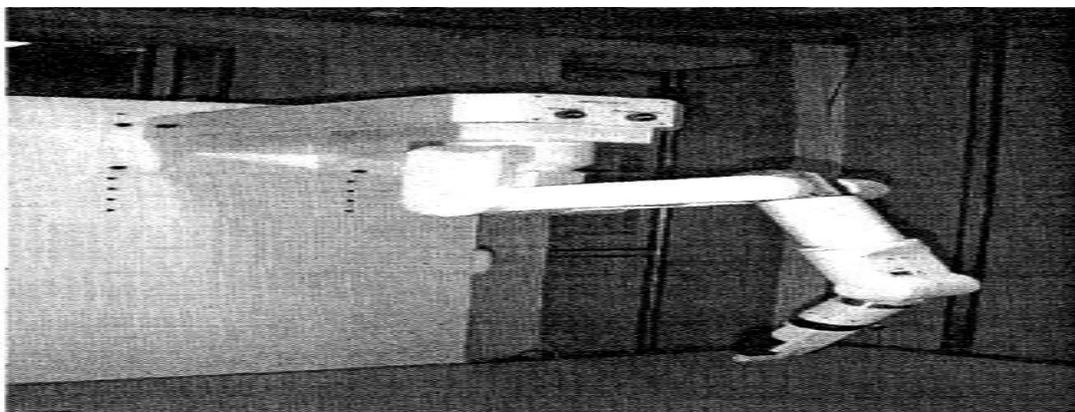


**Figure 1.7** Robot AcuBot [Kettenbach and Kronreif, 2014].

Pour éviter les perturbations dues au mouvement du patient, certaines solutions[Hong et al, 2004] proposent des mécanismes où le capteur et le porte-aiguille sont rigidement couplés et placés directement sur le corps du patient.

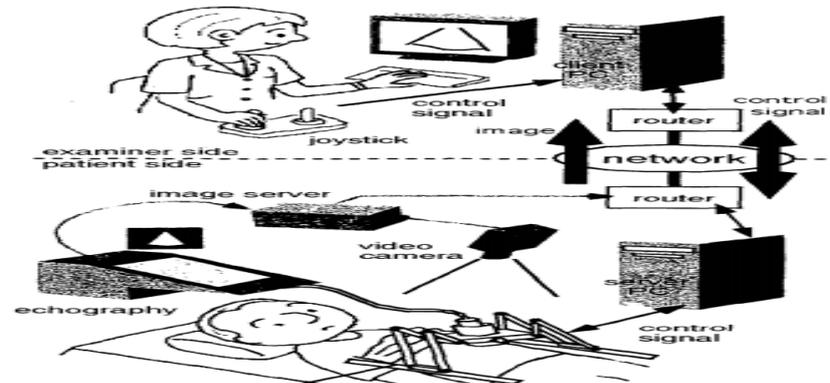
➤ **Assistance au geste en échographie :**

**Le robot Hippocrate**[Troccaz, 2012] : Un robot porte-sonde utilisé lors de la prise en charge de maladies cardiovasculaires. Ce système robotique à six degrés de liberté fonctionne selon deux modes, l'un pour l'apprentissage, l'autre pour la mesure. En mode apprentissage, le médecin guide manuellement le robot par une commande en effort. En mode mesure le robot est synchronisé avec le rythme des battements cardiaques. Le bras du robot déplace une sonde sur la peau du patient pour une prise des images des artères carotide et fémorale.



**Figure 1.8** Le robot Hippocrate[Degoulange et al., 1998].

**Système de télé-échographie de K. MASUDA**[Masuda et al, 2001] : est un robot parallèle à six degrés de liberté pour réaliser des examens échographiques à distance. Durant la phase opératoire, le robot se fixe sur le lit du patient et détecte la force de contact entre la sonde et le corps grâce à quatre capteurs de force. Le robot est contrôlé en utilisant deux joysticks, un contrôle la position, l'autre l'orientation.



**Figure 1.9** *Système de télé-échographie de K. MASUDA*[Masuda et al., 2001b].

**UniHA [UniHA]** : vient de notifier des marchés pour 3 solutions permettant

- une télé assistance en échographie : attribué à Samsung Electronics France.
- une échographe télé opéré : Sonoscanner OrcheoLite proposée par une société française, a été utilisée par l'astronaute Thomas Pesquet lors de son séjour dans l'espace.

➤ **Assistance au geste chirurgical en pédiatrie :**

Une plateforme robotisée **DA VINCI XI**, a été utilisée à l'hôpital Robert-Debré à Paris le 5 avril 2019 [les-robots-chirurgicaux-se-multiplient-en-France] télé opérant un adolescent de 14 ans souffrant d'un rein défaillant à cause d'une malformation rare de ses voies urinaires. Deux chirurgiens assis au fond de la salle, immergés dans des écrans 3D, ils suivent l'action des

instruments qu'ils commandent avec une sorte de joystick et des pédales.



**Figure 1.10** DA VINCI XI [source : science et avenir.fr].

## 1.2 Télé-opération avec retour d'effort :

Comme solution à la plupart des problèmes de la chirurgie et dans le but de réussir les interventions avec le minimum de risques sur le patient et la facilité de travail de chirurgien, les chercheurs ont développé des interfaces haptiques (dispositifs actifs) qui apportent une sensation kinesthésique correspondant à une consigne d'effort au manipulateur qui à son tour réalise des mouvements (contre réaction) dans l'intention de les appliquer au niveau de l'environnement distant. C'est donc une manipulation à distance d'un système esclave à l'aide d'un système maître, le système de télé opération abordé est donc appelé bilatéral.

### 1.2.1 Le retour haptique :

Le mot Haptique est dérivé du verbe grec « Haptein » qui signifie toucher. Il existe deux types de sensations haptiques : tactile et kinesthésique. Le sens tactile correspond à la perception de la gravure d'un objet ou sa texture grâce à des capteurs somatosensoriels situés au niveau de la peau, il nous permet par exemple de percevoir de la température (la sensation de chaud et de froid) par les thermorécepteurs, de la douleur par les nocicepteurs et la pression, la rugosité par les mécanorécepteurs tactiles. C'est une perception passive contrairement au sens kinesthésique. Le sens kinesthésique, quant à lui, il correspond à une perception active des mouvements et les forces appliquées sur et par le corps. Il nous permet par exemple de percevoir le poids, l'inertie et la résistance d'un objet. La sensation d'effort (force et/ou couple) vient des récepteurs situés dans les tendons musculaires.

Une interface haptique est un dispositif permettant de restituer à une personne une perception tactile ou kinesthésique issue d'un élément distant.

Un grand nombre des interfaces haptiques kinesthésiques ont été conçues dans différents buts ces dernières années. Ils ont particulièrement attiré l'attention de nombreux chercheurs dans le domaine médical, ils sont capables de produire des forces à destination de l'utilisateur en télé opération et en réalité virtuelle.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figure 1.11** Les interfaces haptiques : (a) PHANTOM Premium, (b) PHANTOM Omni, (c) Novint Falcon, (d) EXOS Wrist [source : [www.3dsystems.com](http://www.3dsystems.com) et [www.roadtovr.com](http://www.roadtovr.com)].

Nous nous intéressons dans ce projet aux dispositifs haptiques kinesthésiques à retour d'effort pour générer une interaction physique en termes de mouvement et de force entre une personne et un système de télé opération robotique. C'est-à-dire que ces dispositifs permettent de reproduire sur la main de l'opérateur, avec le bras maître, les forces de contact entre le bras esclave et son environnement.

---

### 1.2.2 L'état de l'art :

Différentes architectures de télé opération :

Dans la littérature, il existe plusieurs architectures de télé opération :

a) Architecture position-position

Madhani et al [Madhani et al., 1998] ont été parmi les premiers qui ont développés le modèle de télé-opération dédiée à la chirurgie mini invasive avec un retour d'effort. Ils ont utilisé un robot Black Falcon, un robot esclave à huit degrés de liberté pour réaliser des sutures sur des tissus animales (poulet) et d'une interface haptique de type PHAN TOM, un robot maître à sept degrés de liberté avec une stratégie de télé-opération bilatérale de type position-position et une commande Proportionnel-Dérivée (PD) pour les deux robots. Les positions des effecteurs terminaux des systèmes maîtres et esclave sont asservies ensemble.

L'architecture position-position permet aux mouvements de la main d'un chirurgien de coïncider visuellement avec les mouvements de la pointe de l'outil, il offre des degrés de liberté accrus par rapport aux instruments conventionnels. Cependant, le retour haptique et les efforts perçus par l'opérateur étaient différents de ceux appliqués sur les tissus et estimés à partir des couples moteurs.

Dans [Tadano and Kawashima, 2010a], une architecture de télé-opération position-position est proposée. Un capteur d'effort a été installé au niveau de la station maître, et aucune commande en impédance n'est utilisée pour contrôler le robot esclave. En utilisant ce modèle, les auteurs n'ont pas pu améliorer les performances de l'architecture lors des interactions avec un environnement, alors ils ont proposé dans [Tadano and Kawashima, 2010b] une nouvelle architecture, ils ont utilisé un robot esclave à sept degrés de liberté entraîné par des actionneurs pneumatiques, ils ont adopté un type de contrôle d'impédance basé sur la force sans capteur de force pour le manipulateur pneumatique esclave. Pour le manipulateur maître, ils ont utilisé un type de contrôle d'impédance basé sur le mouvement. Les résultats expérimentaux indiquent que l'opérateur ressent la force du côté esclave avec une incertitude d'environ 1,5N.

Wagner et al [Wagner et al, 2002] ont étudié le manque d'information retournée dans la plupart des stations de commande des robots tel que Da Vinci et Zeus, à l'aide d'une interface haptique PHANToM télé-opérant un robot équipé d'un capteur d'effort et un scalpel chirurgical. Les candidats participant à l'étude ont utilisé un système télé robotique pour

---

exposer une artère dans un modèle synthétique et ont réalisé deux types d'expériences. La première sans retour d'effort. Lors de la deuxième, les efforts exercés par le scalpel sont transmis à l'opérateur au travers l'interface haptique. Après une comparaison entre les deux expériences les étudiants ont constaté que lorsque le retour d'effort n'est pas fourni, les incertitudes des réalisations augmentent, ainsi que les efforts appliqués sont respectivement 50 et 200% supérieurs à ceux appliqués lors de l'expérience avec un retour d'effort.

Dans [Pan et al., 2016], une stratégie de contrôle en temps réel maître-esclave d'un nouveau robot chirurgical est développée. Ce système est constitué de trois manipulateurs esclaves, deux manipulateurs d'instruments chirurgicaux de neuf degrés de liberté et un manipulateur de laparoscopie de six degrés de liberté. En plus, deux robots Omega de sept degrés de liberté ont été utilisés dans le site maître. Tout d'abord, les informations de position et d'orientation de système maître sont transférées au système esclave. Ensuite, le contrôleur acquiert des informations de position et d'orientation du manipulateur d'instruments pour mettre en œuvre un contrôle en boucle fermée. Le principe exige que la position et l'orientation de l'équipement maître correspondent à la position et à l'orientation de manipulateur esclave. Une expérimentation animale a été étudiée et a montré que le système robotique, avec la stratégie de contrôle maître-esclave proposée, peut effectuer des tâches chirurgicales in Vivo. Par conséquent, cette stratégie de contrôle maître-esclave dans l'espace cartésien est correcte et efficace. Les problèmes de recalage peropératoire et des perturbations de la main du chirurgien en temps réel ont été résolus. Cependant, des problèmes de maniabilité et de la sécurité du robot chirurgical pendant l'opération doivent être considérés dans les futurs travaux.

#### b) Architecture position-force

Les auteurs Çavusoğlu et al [Cenk Çavusoğlu et al., 2003] ont développé une station de travail télé chirurgicale UC Berkeley / UCSF de deuxième génération est un système télé robotique maître-esclave, avec deux manipulateurs robotiques à six degrés de liberté. Un schéma de télé-opération position-force est choisi. Dans ce cas, seule la position de la station maîtresse est transmise au manipulateur esclave. À l'inverse, le manipulateur esclave transmet uniquement les efforts qu'il applique sur l'environnement à l'opérateur. Cette réalisation permet d'effectuer des tâches complexes, y compris la suture et le nœud et percevoir les vrais efforts appliqués par le manipulateur esclave. Cependant en déplacement libre, aucune information n'est transmise.

---

Les auteurs [Shin et al., 2017] ont présenté un système maître-esclave pour l'insertion d'aiguille. Un contrôleur bilatéral a été développé dans MATLAB pour contrôler le robot esclave avec le robot maître. Les informations de position du PHANTOM Omni (le robot maître) ont été transmises toutes les 1 ms au contrôleur bilatéral pour contrôler le robot esclave. Comme le robot esclave est à 1 degré de liberté, seules les informations de position sur l'axe X sont utilisées dans le contrôleur bilatéral. La force d'interaction entre le robot esclave et le tissu a été mesurée par le capteur de force et transmise au système de commande. Les résultats expérimentaux démontrent l'efficacité du système proposé. Néanmoins, ce modèle ne peut pas être utilisé pour travailler sur une large gamme d'applications médicales. Une extension de ce système robotique d'un degré de liberté à six degrés de liberté est alors indispensable.

Dans [James et al., 2018], les auteurs ont proposé une architecture de télé opération position-force. Ce système pourrait être utilisé pour télécommander un manipulateur de cinq degrés de liberté Dagu et sentir les objets avec lesquels il interagit. Une interface haptique PHANTOM Omni est utilisée, ce qui permet à l'opérateur humain de piloter intuitivement le manipulateur depuis une station distante. Une telle approche de contrôle offre une solution pratique lorsque le système robotique fonctionne dans des environnements changeant dynamiquement et dans des tâches qui nécessitent une grande dextérité. L'inclusion d'une rétroaction haptique offre la possibilité d'augmenter la tâche de contrôle des opérateurs et de surmonter les limitations de la perception visuelle. Cependant, cette étude reste limitée, les auteurs prévoient à l'avenir de travailler sur un algorithme de retour de force plus réaliste qui améliorera l'expérience avec l'utilisation de grands manipulateurs industriels.

### **1.3 Cahier de charges du système de télé opération avec retour d'effort :**

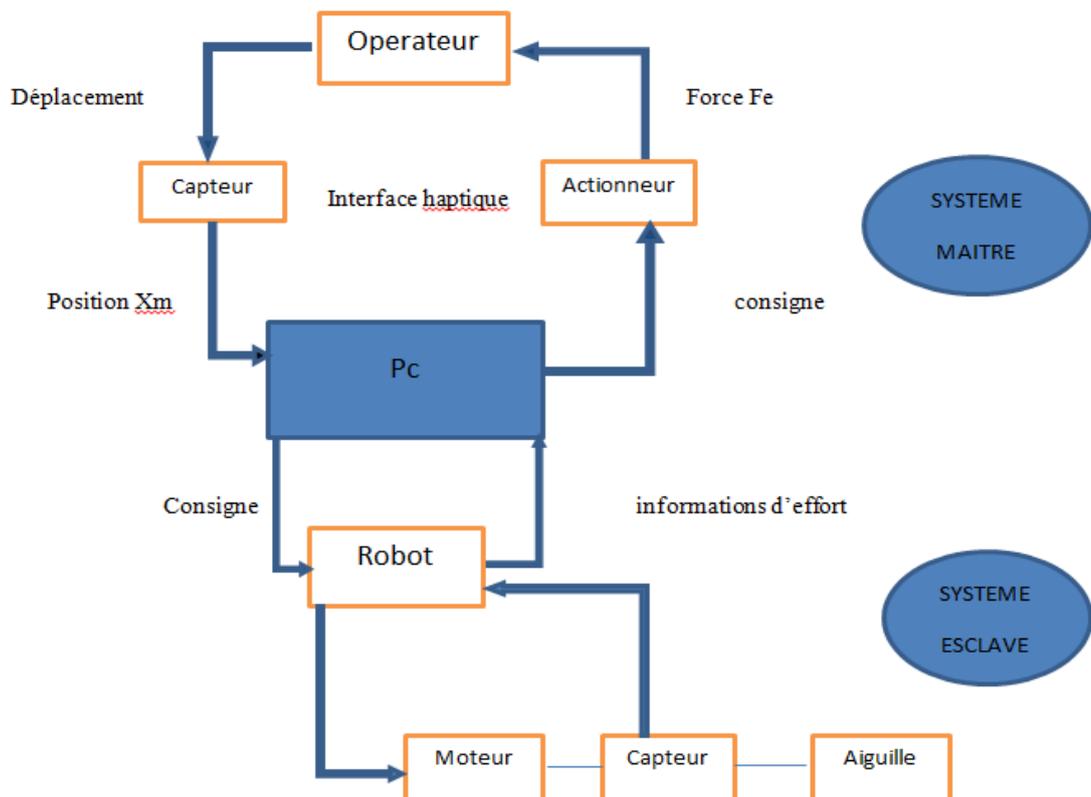
Pour pallier les inconvénients de la télé chirurgie robotique classique, il est nécessaire de permettre à l'expert distant de prendre en compte le contrôle du mouvement à exercer suite à un retour en effort appliqué.

Il est souhaitable que le système de télé opération avec retour d'effort ait les caractéristiques suivantes :

- Compliance, précision et stabilité.
- La force exercée par le robot esclave sur le patient doit être dans un intervalle prédéfini.

- Ses mouvements devraient reproduire aussi fidèlement que possible les ordres d'un manipulateur.
- Doit avoir une meilleure sensibilité.

La contrainte en matière de qualité, force restitué et vitesse du flux des données transmises dans les deux sens est à prendre en compte. Dans la section suivante, l'architecture du système a réalisé sera décrite.



**Figure 1.12** Schéma bloc de système de télé opération avec retour d'effort.

### Description :

\*Le schéma bloc décrit la séquence d'insertion d'aiguille dont les étapes sont les suivantes :

1/Acquisition de la position de l'effecteur par le capteur de position de l'interface haptique et mise à jour de la position de bras de robot esclave et par conséquent l'avancement de l'aiguille.

---

2/Détection des efforts induits par les différentes collisions entre l'aiguille et les tissus.

3/Calcul du retour d'effort. Dans le cas d'une collision, les mesures fournies par le capteur de force de système d'insertion de l'aiguille permettent à l'ordinateur de calculer la force de réaction à appliquer.

4/Envoi des consignes de forces à l'interface haptique pour actionner le moteur.

5/L'opérateur ressent alors un effort sur sa main grâce à ses capteurs cutanés. Il fait bouger donc l'effecteur (contre réaction) et on revient à la première étape.

\*le schéma global peut se décomposer en deux sous-schémas, le premier correspond au système maître, le second au système esclave.

### 1/Le système maître :

Le composant le plus important dans ce système c'est *l'interface haptique* :

L'interface haptique : dans ce projet on utilise le **PHANTOM Omni (TOUCH™)** comme une interface haptique. Robot série permettant l'acquisition des six degrés de liberté et restitue un retour d'effort de six degrés d'action.

Ces interfaces utilisent des moteurs et des capteurs proprioceptifs (encodeurs optiques). Les moteurs permettant de créer des forces qui repoussent la main de l'utilisateur pour simuler le toucher, alors que les capteurs sont utilisés pour la mesure de la position et la vitesse instantanée.

La structure de PHANTOM Omni est fabriquée principalement en fibre de carbone pour garantir une faible inertie.

Voici un tableau qui résume les principales différences entre les caractéristiques de PHANTOM Omni et autre interface :

	TOUCH™	TOUCH X™
Workspace	-6.4 W x 4.8 H x 2.8 D in > 160 W x 120 H x 70 D mm	-6.4 W x 4.8 H x 4.8 D in > 160 W x 120 H x 120 D mm
Range of motion	Hand movement pivoting at wrist	Hand movement pivoting at wrist
Nominal position resolution	> 450 dpi -0.055 mm	> 1100 dpi -0.023 mm
Maximum exertable force and torque at nominal position (orthogonal arms)	0.75 lbf/3.3 N	1.8 lbf/7.9 N
Stiffness	x-axis > 7.3 lb/in (1.26 N/mm) y-axis > 13.4 lb/in (2.31 N/mm) z-axis > 5.9 lb/in (1.02 N/mm)	x-axis > 10.8 lb/in (1.86 N/mm) y-axis > 13.6 lb/in (2.35 N/mm) z-axis > 8.6 lb/in (1.48 N/mm)
Force feedback (6 Degrees of Freedom)	x, y, z	x, y, z
Position sensing/input (6 Degrees of Freedom) [Stylus gimbal]	x, y, z (digital encoders) [Roll, pitch, yaw ( $\pm 5\%$ linearity potentiometers)]	x, y, z (digital encoders) [Roll, pitch, yaw ( $\pm 3\%$ linearity potentiometers)]
Interface	RJ45 Compliant Ethernet Port	RJ45 Compliant Ethernet Port

**Tableau 1.1** Les caractéristiques de TOUCH™ et TOUCH X™ (source : [www.3dsystems.com](http://www.3dsystems.com)).

**2/le système esclave** : composé de :

Robot esclave : c'est un robot à six degrés de liberté, qui se charge de reproduire le comportement et les gestes de l'opérateur. Il doit en plus être capable, de fournir et transmettre les informations nécessaires au site maître et donc à l'opérateur.

Actionneurs : moteurs électriques.

Capteurs internes : dits « proprioceptifs », mesurent l'état interne du robot (positions et vitesses des articulations).

Capteurs externes : dits « extéroceptifs », recueillent des informations sur l'environnement (ensemble des forces qui apparaissent entre l'aiguille et le tissu).

# *Chapitre2*

---

## 2 Chapitre2 : Modélisation et simulation de contrôle de dispositif maitre et esclave.

### 2.1 Introduction :

L'application de la robotique à la chirurgie constitue une avancée technologique majeure. Cette technologie de pointe permet de réaliser des interventions chirurgicales complexes et délicates de manière moins invasive grâce à des petites incisions. Le chirurgien commande des instruments miniaturisés, fixés sur des bras articulés. Grâce à cette stratégie le chirurgien peut contribuer à une meilleure qualité des gestes. Néanmoins, les problèmes liés aux systèmes télé robotisées sont encore nombreux. Nous nous intéresserons plus particulièrement à l'absence de retour d'information et de restitution du contact au chirurgien et au manque d'autonomie face la mobilité des organes. Lors d'une intervention le chirurgien estime la distance entre l'instrument et l'organe visuellement, d'où vient la nécessité des interfaces haptiques.

L'utilisation des systèmes de télé opération à retour d'effort grâce à des dispositifs haptiques au cours des différentes applications de la chirurgie, permettant d'augmenter la perception kinesthésique du chirurgien à travers un retour des efforts appliqués et diminuer l'agressivité des actes. Ce mécanisme de télé opération permettant au robot de suivre ou de compenser les mouvements de l'organe et au chirurgien de se concentrer uniquement sur son geste chirurgical.

Ce chapitre décrit la conception de système de télé opération avec retour d'effort, nous détaillerons les différents modèles mathématiques utilisés pour modéliser le système maître et esclave de l'architecture de télé opération. Nous présenterons ensuite le modèle mécanique du mécanisme robotique dans l'environnement ADAMS (Analyse dynamique automatique des systèmes mécaniques) de MSC Software.

Avant de commencer la modélisation dans ce chapitre nous présenterons les divers outils mathématiques utiles pour modéliser les mouvements des corps des robots maître et esclave dans l'espace.

## 2.2 Description des matrices de transformation :

On note

- $B_j$  : une base orthonormée, de l'espace vectoriel  $R^3$ , associée au corps  $C_j$ .

$$B_j = \{X_j Y_j Z_j\}$$

$Z_j$  : Porté par l'axe de l'articulation  $j$  ;

$X_j$  : Porté par la perpendiculaire commune à  $Z_j$  et  $Z_{j+1}$ .

- $R_j$  : un repère lié au corps  $C_j$ , associant la base  $B_j$  à l'origine  $O_j$ .

$$R_j = \{O_j X_j Y_j Z_j\}$$

Une matrice de transformation homogène notée  ${}^i T_j$  de dimension  $4 \times 4$  représentée dans [Khalil et Dombre, 2012], par les coordonnées homogènes :

- Représentation d'un point : la représentation d'un point se fait par une matrice colonne :

$$p = (X_x \ X_y \ X_z \ 1)^T$$

- Représentation d'une direction : Cette représentation se fait par les quatre composantes suivantes :

$$u = (u_x \ u_y \ u_z \ 0)^T$$

Une matrice de transformation complète définie dans un repère  $R_j$  ayant subi des rotations et des translations par rapport à un repère  $R_i$  s'écrit :

$${}^i T_j = [{}^i s_j, {}^i n_j, {}^i a_j, {}^i P_j] = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & P_x \\ s_y & n_y & a_y & P_y \\ s_z & n_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matrice de transformation complète  ${}^i T_j$  peut se présentée aussi par un vecteur  $(3 \times 1)$  de translation  ${}^i P_j$  et une matrice  $(3 \times 3)$  de rotation  ${}^i A_j$  :

$${}^i T_j = [{}^i s_j, {}^i n_j, {}^i a_j, {}^i p_j] = \begin{bmatrix} {}^i A_j & {}^i P_j \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Où  ${}^i s_j$ ,  ${}^i n_j$  et  ${}^i a_j$  de la matrice  ${}^i A_j$  désignent respectivement les vecteurs unitaires suivant les axes  $x_j$ ,  $y_j$  et  $z_j$  du repère  $R_j$  exprimé dans le repère  $R_i$  et  ${}^i p_j$  est l'origine de repère  $R_j$  exprimé dans le repère  $R_i$ .

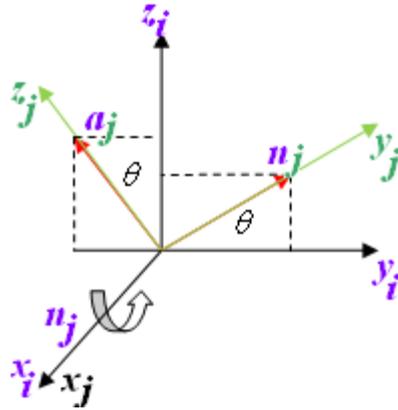
Les éléments de la matrice  ${}^i A_j$  sont appelés **cosinus directeurs**, car ils représentent les coordonnées des trois vecteurs de la base  $R_j$  exprimé dans  $R_i$ .

➤ *Matrice de transformation à rotation pure autour des axes principaux X, Y, Z :*

$\text{Rot}(x, \theta)$ ,  $\text{Rot}(y, \theta)$  et  $\text{Rot}(z, \theta)$  sont Les rotations des composants des vecteurs unitaires  ${}^i s_j$ ,  ${}^i n_j$  et  ${}^i a_j$  portés respectivement par les axes  $x_j$ ,  $y_j$  et  $z_j$  du repère  $R_j$  exprimé dans le repère  $R_i$  [Khalil et Dombre, 2012].

### 1/ Transformation de rotation pure autour de l'axe x:

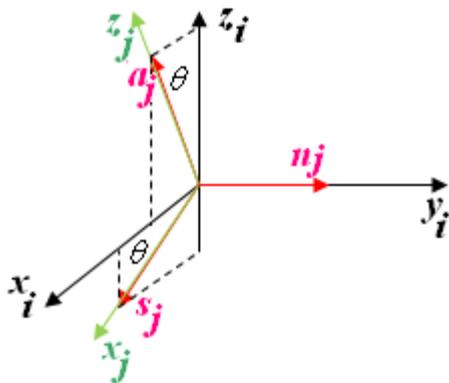
$${}^i T_j = \text{Rot}(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$



**Figure 2.1** Rotation autour de l'axe x [Khalil et Dombre, 2012].

### 2/ Transformation de rotation pure autour de l'axe y:

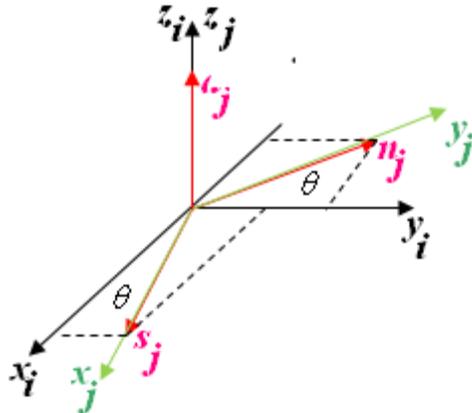
$${}^i\mathbf{T}_j = \text{Rot}(y, \theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$



**Figure 2.2** Rotation autour de l'axe y [Khalil et Dombre, 2012].

### 3/ Transformation de rotation pure autour de l'axe z:

$${}^i\mathbf{T}_j = \text{Rot}(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

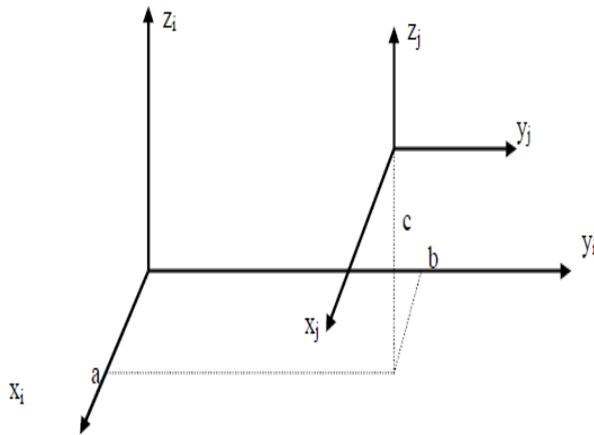


**Figure2.3** Rotation autour de l'axe z [Khalil et Dombre, 2012].

➤ *Matrice de transformation à translation pure :*

La Trans (a, b, c) est une transformation de translation le long des axes x, y, et z.

$${}^i\mathbf{T}_j = \text{Trans}(a, b, c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$



**Figure2.4** Transformation d'un repère à translation pure [Khalil et Dombre, 2012].

### 2.3 Description d'une structure géométrique du robot :

La modélisation et la description de la morphologie d'un robot nécessite l'utilisation d'une méthode adéquate. Dans ce travail on va utiliser la notation de Khalil et Kleinfinger qui est une notation simple et qui permet une description homogène avec un nombre minimum de paramètres.

D'après [Khalil et Dombre, 2012], un robot est constitué d'une chaîne de  $n+1$  corps solide ( $C_0 C_1 \dots C_n$ ). Le corps  $C_0$  est la base du robot et  $C_n$  désigne le corps porteur de l'organe terminal. Ces corps sont liés entre eux par des articulations rotoïdes ou prismatiques. L'articulation  $j$  dont la position est notée  $q_j$  relie le corps  $C_j$  au corps  $C_{j-1}$ .

Les coordonnées articulaires présentent les angles de rotation des différentes articulations.

$$\mathbf{q} = (q_1 \dots q_n)^T$$

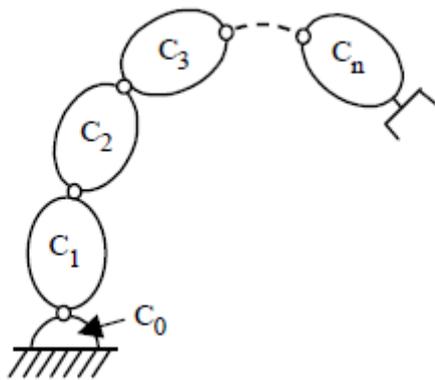
Les coordonnées opérationnelles décrivent la situation de l'OT (l'Organe Terminal) du bras manipulateur dans l'espace opérationnel.

$$\mathbf{P} = (X_1 X_2 \dots X_m)^T. \quad \text{Où } m \leq 6$$

La formalisation de Denavit-Hartenberg (DH) modifiée par Khalil-Kleinfinger est utilisée pour décrire les paramètres géométriques du robot.

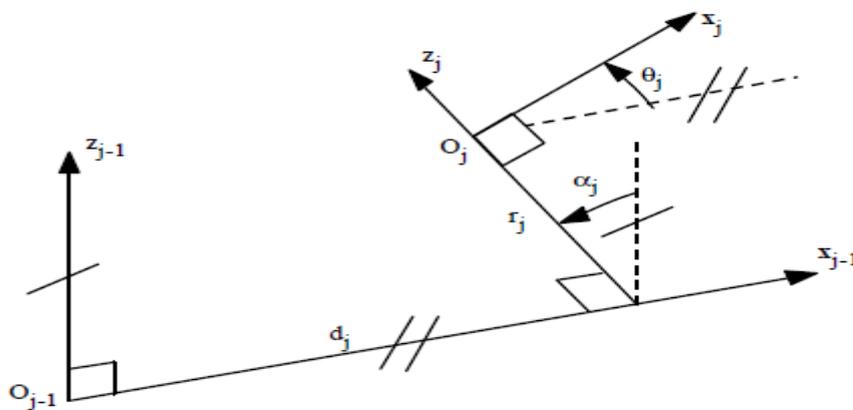
La méthode de description de cette formalisation est fondée sur les règles et conventions suivantes :

- Le repère  $R_j$  est lié au corps  $C_j$ , est défini de telle sorte que :
- L'axe  $Z_j$  du repère  $R_j$  est porté par l'axe de l'articulation  $j$ .
- L'axe  $X_j$  du repère  $R_j$  est porté par la perpendiculaire commune aux axes  $R_j$  et  $R_{j+1}$
- Le passage  $R_{j-1}$  à  $R_j$  est exprimé en fonction des quatre paramètres suivants :



**Figure2.5** Robot à structure ouverte simple [Khalil et Dombre, 2012].

- Rotation autour de  $Z_j$  d'un angle  $\theta_j$  —> angle entre les axes  $X_{j-1}$  et  $X_j$  ;
- Translation le long de  $X_{j-1}$  d'une longueur  $d_j$  entre les axes  $Z_{j-1}$  et  $Z_j$  ;
- Translation le long de  $Z_j$  d'une longueur  $r_j$  entre les axes  $X_{j-1}$  et  $X_j$ ;
- Rotation autour de  $X_{j-1}$  d'un angle  $\alpha_j$  —> angle entre les axes  $Z_{j-1}$  et  $Z_j$ .



**Figure2.6** Paramètres géométriques dans le cas d'une structure ouverte simple [Khalil et Dombre, 2012].

La matrice de transformation définissant le repère  $R_j$  dans le repère  $R_{j-1}$  est donnée par :

$${}^{j-1}\mathbf{T}_j = \text{Rot}(X, \alpha_j) \text{Trans}(X, d_j) \text{Rot}(Z, \theta_j) \text{Trans}(Z, r_j)$$

$${}^{j-1}\mathbf{T}_j = \begin{bmatrix} \cos(\theta_j) & -\sin(\theta_j) & 0 & d_j \\ \cos(\alpha_j)\sin(\theta_j) & \cos(\alpha_j)\cos(\theta_j) & -\sin(\alpha_j) & -r_j\sin(\alpha_j) \\ \sin(\alpha_j)\sin(\theta_j) & \sin(\alpha_j)\cos(\theta_j) & \cos(\alpha_j) & r_j\cos(\alpha_j) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

On associe la variable articulaire  $q_j$  à la  $j^{\text{ème}}$  articulation ( $j = 1 \dots ; 6$ ) :

$$q_j = \sigma_j \theta_j + \sigma_j a_j \quad (2.7)$$

$\sigma_j$  Définit le type de l'articulation  $j$  :

- $\sigma_j=0$  si l'articulation  $j$  est rotoïde.
- $\sigma_j=1$  si l'articulation  $j$  est prismatique.
- $\sigma_j=2$  si l'articulation  $j$  est fixe.

## 2.4 Robot maître :

Ces dernières années, le secteur de la télé médecine s'intéresse beaucoup aux robots télé opérés, car ils sont capables d'effectuer diverses tâches complexes, notamment la chirurgie à distance et la rééducation par télé opération.

Le système de télé opération le plus populaire est un système maître-esclave, alors que le maître agit en tant que contrôleur pour commander l'esclave et fournit une interface d'interaction avec l'opérateur humain, tandis que l'esclave exécute-le dans une tâche de commande à distance importante. Les informations telles que la position, l'orientation, la force et le couple sont échantillonnés par l'esclave et sont transférés au maître pour permettre à l'opérateur humain de réagir en temps réel.

Le dispositif qui sert de contrôleur principal dans notre système est le dispositif haptique PHANTOM Omni produit par SensAble Technologies. C'est une conception d'appareil électromécanique ayant pour but en matière de rétroaction kinesthésique. Un robot a six

degrés de liberté, les trois premières articulations sont utilisées pour positionner l'effecteur terminal et les trois autres articulations servent uniquement à l'orientation. De plus, un stylet est fixé à l'effecteur final et qui comporte deux boutons.

Le dispositif PHANTOM Omni ne contient que trois moteurs d'entraînement. Cela signifie que seule la position du stylet peut être réglée par l'ordinateur.



**Figure 2. 7** PHANTOM Omni.

PHANTOM Omni est un appareil très utilisé dans la littérature. Veras et al [Veras et al., 2009] ont utilisé l'Omni comme dispositif maître dans une installation de télé opération avec un bras robotisé Puma 560 pour former un système d'assistance laser dans un environnement dur en temps réel, pour permettre aux personnes handicapées d'effectuer des tâches quotidiennes. Zhong et al [Zhang et al., 2015] ont utilisé le PHANTOM Omni comme dispositif principal pour contrôler un bras robotisé à six degrés de liberté dans un système de télé réadaptation destiné aux patients victimes d'un accident vasculaire cérébral. Hayn et Schwarzmam [Hayn and Schwarzmam, 2009], ont développé une commande où le PHANTOM Omni est utilisé pour contrôler les segments de la flèche et du manche d'un excavateur couramment utilisé dans la construction d'une machine hydraulique. Cette approche permet une utilisation intuitive de la machine et donne à l'opérateur un retour d'information haptique sur la position de la flèche.

---



---

→ **Spécifications techniques du dispositif haptique :**

Les caractéristiques techniques les plus importantes de l'appareil haptique PHANTOM Omni correspondent à :

- Une résolution spatiale nominale de 0,055 mm.
- Un espace de travail >160w\*120H\*70 D mm.
- Un poids total équivalent de 3lb avec une masse de 5oz (141.7475g ou 0.1417475 kg).
- Force maximale exerçable à position nominale (bras orthogonaux) de 3.3N.
- Une rigidité de 1.26N/mm selon l'axe X ,2.31N/mm selon l'axe Y, 1.02N/mm selon l'axe Z.
- Interface de communication est un port Fire Wire IEEE-1394 ou usb.

La méthode utilisée pour décrire la configuration du robot PHANTOM Omni est celle de Denavit-Hartenberg (DH).

Les paramètres géométriques de PHANTOM Omni sont regroupés dans le tableau suivant :

J	$\sigma_j$	$\alpha_j$ (rad)	$d_j$ (m)	$\Theta_j$	$r_j$ (m)
1	0	0	0	$\Theta_1$	0
2	0	$-\pi/2$	0	$\Theta_2$	0
3	0	0	L1	$\Theta_3$	0
4	0	$-\pi/2$	0	$\Theta_4$	L2
5	0	$-\pi/2$	0	$\Theta_5$	0
6	0	$-\pi/2$	0.030	$\Theta_6$	0

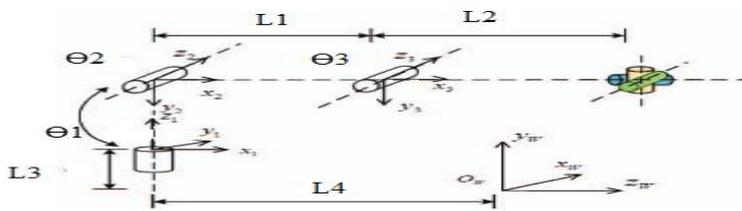
**Tableau 2.1** Paramètre géométrique du robot PHANTOM Omni[Jiang et al., 2016a].

A partir de la table de DH, et en utilisant l'équation (2. 6), nous pouvons calculer la matrice de transformation  ${}^0T_6$  de l'effecteur final à la base à travers la multiplication des matrices suivantes :

$${}^0T_6 = {}^0T_1 * {}^1T_2 * {}^2T_3 * {}^3T_4 * {}^4T_5 * {}^5T_6 \quad (2. 8)$$

Contrairement au modèle cinématique d'un robot dans lequel le repère de coordonnées à référence fixe situé à la base du robot, le fabricant a choisi de placer l'origine  $O_w$  de dispositif PHANTOM Omni à un endroit précis de l'espace de travail au lieu de le placer à la base de mécanisme.

Le placement des repères de dispositif haptique est présenté dans la figure suivante :



**Figure 2. 8** Placement des repères du PHANTOM Omni [Jiang et al., 2016a].

La matrice de transformation du repère de coordonnées  $\{x_0 ; y_0 ; z_0\}$  au repère de coordonnées  $\{x_w ; y_w ; z_w\}$  décrit par [Jiang et al., 2016], peut être calculée comme suit :

$${}^wT_0 = Rot_x(\pi) * Rot_z(-\pi/2) * Rot_y(\pi/2) * Trans_y(L3) * Trans_z(L4) \quad (2. 9)$$

Où  $Rot_x(\bullet)$ ,  $Rot_y(\bullet)$ ,  $Rot_z(\bullet)$  représentent les matrices de rotation homogène le long des axes x, y, z respectivement et  $Trans_y(\bullet)$ ,  $Trans_z(\bullet)$  sont les matrices de translation homogène le long de l'axe y et de l'axe z.

$$Rot_x(\pi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\pi & -s\pi & 0 \\ 0 & s\pi & c\pi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Rot}_z(-\pi/2) = \begin{bmatrix} c(-\pi/2) & -s(-\pi/2) & 0 & 0 \\ s(-\pi/2) & c(-\pi/2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Rot}_y(\pi/2) = \begin{bmatrix} c(\pi/2) & 0 & -s(\pi/2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ s(\pi/2) & 0 & c(\pi/2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Trans}_y(L3) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Trans}_z(L4) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donc :

$${}^wT_0 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & L3 \\ 1 & 0 & 0 & L4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

la matrice de transformation du repère de coordonnées de l'effecteur final au repère de coordonnées {W} décrit par [Jiang et al., 2016], peut être représentée comme :

$${}^wT_6 = {}^wT_0 * {}^0T_6 \quad (2.11)$$

Alors que  ${}^wT_6$  est calculée comme :

$${}^wT_6 = \begin{bmatrix} s1c23 & -c1 & -s1s23 & x \\ -s23 & 0 & -c23 & y \\ c1c23 & s1 & -c1s23 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2. 12)$$

$c_i = \cos \theta_i$ ,  $s_i = \sin \theta_i$  et  $c_{ij} = \cos (\theta_i + \theta_j)$ ,  $s_{ij} = \sin (\theta_i + \theta_j)$

$x$ ,  $y$  et  $z$  décrit la position de l'effecteur final.

Ce résultat nous montre juste les articulations actives motorisées ( $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ ), parce que les articulations passives non motorisés ( $\theta_4$ ,  $\theta_5$ ,  $\theta_6$ ) n'ont aucune influence sur le résultat du modèle géométrique ou cinématique.

La commande de robot PHANTOM Omni nécessite le calcul de certains modèles Mathématiques, explicites pour le développement d'applications haptiques et le contrôle du mouvement tels que :

#### 2.4.1 Modélisation géométrique du robot PHANTOM Omni :

##### 2.4.1.1 *Modèle géométrique direct :*

Le modèle géométrique direct permet d'établir la relation entre les coordonnées opérationnelles (position et orientation de l'effecteur terminal) du robot et les coordonnées articulaires. Jarillo et al [Jarillo-Silva et al., 2009] ont publié un article détaillant la cinématique et la manipulabilité de PHANTOM Omni.

Le modèle géométrique direct du PHANTOM Omni décrit par [Jarillo-Silva et al., 2009], est présenté par la relation suivante :

$$\mathbf{x} = f(\mathbf{q}) \quad (2. 13)$$

Où  $\mathbf{x}$  désigne le vecteur de coordonnées opérationnelles définie par :

$$\mathbf{x} = [x \ y \ z]$$

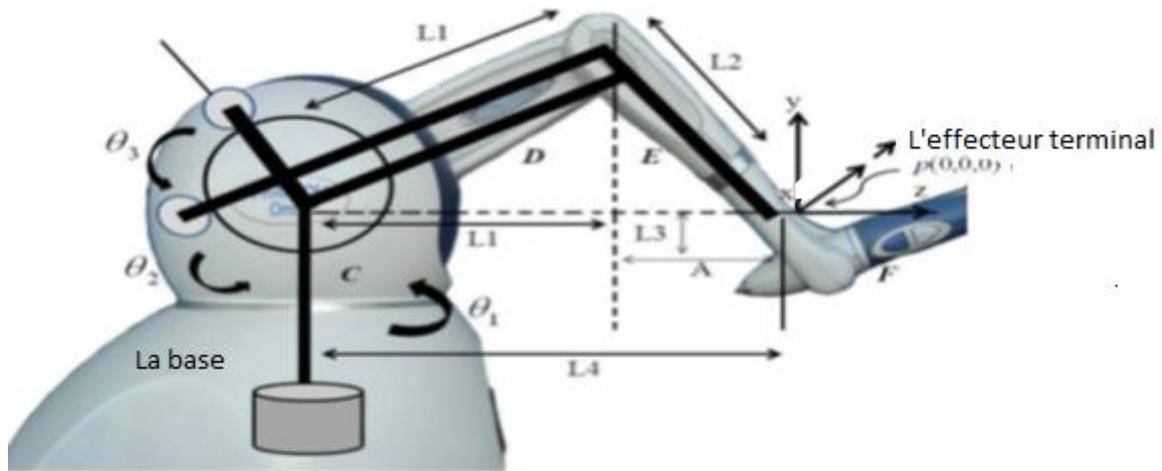
Où  $x$ ,  $y$  et  $z$  décrit la position de l'effecteur final.

Et  $\mathbf{q}$  le vecteur de coordonnées articulaires tel que :

$$\mathbf{q} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]$$

$\theta_1$ ,  $\theta_2$  et  $\theta_3$  représentent les angles de l'articulation 1, 2 et 3 du robot respectivement.

La figure suivante montre la représentation géométrique du manipulateur série PHANTOM Omni :



**Figure 2.9** Le diagramme géométrique direct [Jarillo-Silva et al., 2009].

Les éléments de vecteur de position correspondant au modèle géométrique direct sont calculés à partir de l'équation (2. 12), et sont donnés sous la forme :

$$x = -s_1 (L1c_2 + L2s_3) \quad (2. 14)$$

$$y = L3 - L2c_3 + L1s_2 \quad (2. 15)$$

$$z = -L4 + c_1(L1c_2 + L2s_3) \quad (2. 16)$$

Où  $c_i = \cos \theta_i$  and  $s_i = \sin \theta_i$ .

$L1 = L2 = 0.135\text{m}$ ,  $L3 = 0.025\text{m}$  et  $L4 = 0.170\text{m}$ .

#### 2.4.1.2 Modèle géométrique inverse :

Le problème inverse consiste à calculer les coordonnées  $q$  de l'espace articulaire en fonction de la position de l'effecteur terminal.

Le modèle géométrique inverse décrit par [Jarillo-Silva et al., 2009] est donné par la relation suivante :

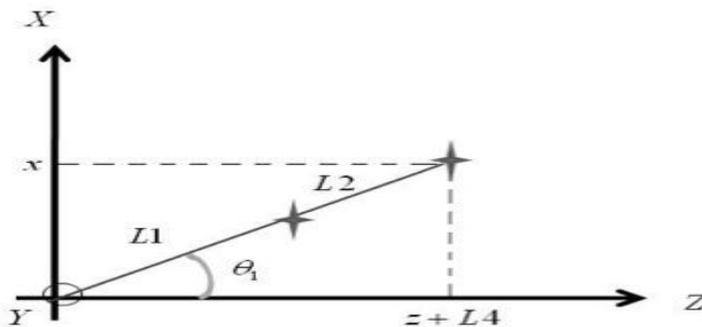
$$\mathbf{q} = \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{x}) \quad (2.17)$$

Où

$$\mathbf{x} = [x \ y \ z]$$

$$\text{Et } \mathbf{q} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]$$

Ici, une approche géométrique est utilisée pour déterminer la modélisation inverse de ce dispositif :

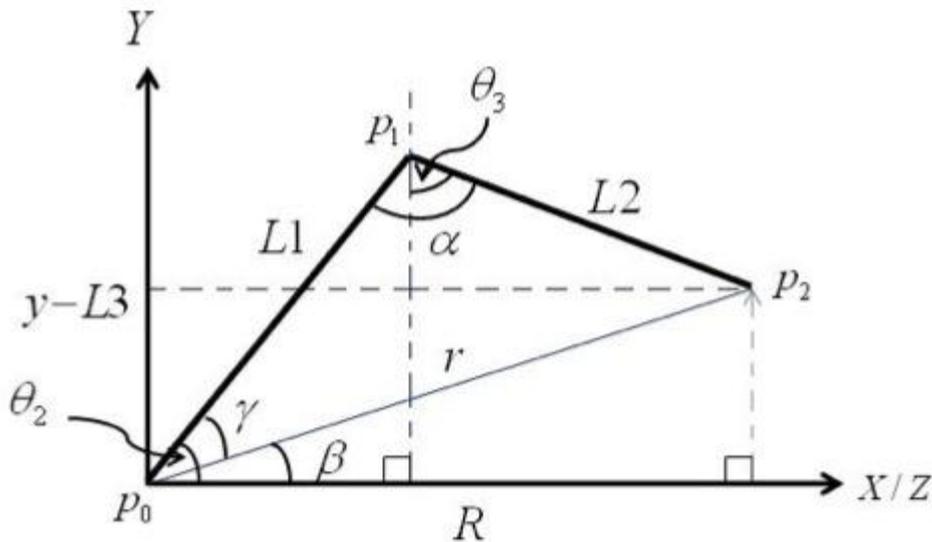


**Figure 2.10** Vue du dessus, diagramme géométrique inverse [Jarillo-Silva et al., 2009].

A partir de la figure  $\theta_1$  s'exprime comme suit :

$$\theta_1 = -\text{atan2}(x; z + L4) \quad (2.18)$$

Ensuite, nous souhaitons trouver les équations de  $\theta_2$  et  $\theta_3$ . Le diagramme suivant sera utilisé pour aider à trouver ces équations :



**Figure 2.11** Vue de côté, diagramme géométrique inverse [Jarillo-Silva et al., 2009].

Où

$$R = \sqrt{x^2 + (z + L4)^2} \quad (2.19)$$

$$r = \sqrt{x^2 + (z + L4)^2 + (y - L3)^2} \quad (2.20)$$

$$\beta = \text{atan2}(y - L3, R) \quad (2.21)$$

L'angle  $\gamma$  est déterminé en appliquant la loi des cosinus au triangle  $\Delta P_0P_1P_2$  :

$$r = \sqrt{x^2 + (z + L4)^2 + (y - L3)^2} \quad (2.22)$$

$$L2^2 = L1^2 + r^2 - 2L1r \cos(\gamma) \quad (2.23)$$

$$\cos(\gamma) = \frac{L1^2 + r^2 - L2^2}{2L1r} \quad (2.24)$$

$$\equiv D1$$

$$\gamma = \arctan2(\sqrt{1 - D1^2}, D1) \quad (2.25)$$

À partir de (2. 21) et (2. 25) :

$$\theta2 = \gamma + \beta \quad (2.26)$$

Pour trouver  $\alpha$  en applique à nouveau la loi des cosinus au triangle  $\Delta P0P1P2$  :

$$r^2 = L1^2 + L2^2 - 2L1L2 \cos(\alpha) \quad (2.27)$$

$$\cos(\alpha) = \frac{L1^2 + L2^2 - r^2}{2L1L2} \equiv D2 \quad (2.28)$$

$$\alpha = \arctan2(\sqrt{1 - D2^2}, D2) \quad (2.29)$$

Et

$$\theta_3 = \theta_2 + \alpha + \frac{\pi}{2} \quad (2.30)$$

## 2.4.2 Modélisation cinématique du robot PHANTOM Omni :

### 2.4.2.1 Modèle cinématique direct :

Le modèle cinématique direct du robot manipulateur PHANTOM Omni décrit par [Jarillo-Silva et al., 2009] est la relation entre les vitesses des coordonnées opérationnelles et les vitesses articulaires.

$$\dot{x} = J(q)\dot{q} \quad (2.31)$$

Où  $\dot{x}$  représente le vecteur de vitesses opérationnelles.

$J(q)$  Désigne la matrice jacobienne<sup>1</sup> de dispositif haptique.

$\dot{q}$  Est le vecteur de vitesses articulaires.

Les éléments du jacobien sont :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{pmatrix} \quad (2.32)$$

Où

$$J_{11} = -(L_1c_1c_2 + L_2s_3c_1), J_{12} = L_1s_1s_2, J_{13} = -L_2c_3s_1, J_{21} = 0,$$

$$J_{22} = L_1c_2, J_{23} = L_2s_3, J_{31} = -L_1c_2s_1 - L_2s_3s_2, J_{32} = -L_1s_2c_1 \text{ Et}$$

$$J_{33} = L_2c_3c_1.$$

### 2.4.2.2 Modèle cinématique inverse :

L'objectif du modèle cinématique inverse selon [Jarillo-Silva et al., 2009], est de calculer les vitesses angulaires comptes tenu de la vitesse de l'effecteur terminal.

$$\dot{q} = J^{-1}\dot{x} \quad (2.33)$$

<sup>1</sup> La matrice jacobienne est l'ensemble des dérivées partielles du premier ordre d'une fonction vectorielle.

Où  $J^{-1}$  correspond à l'inverse de la matrice jacobienne et est donné comme :

$$J^{-1} = \frac{adj(J)}{det(J)} \quad (2. 34)$$

$adj(J)$  Est la matrice adjointe<sup>2</sup> de la matrice jacobienne.

$det(J)$  Le déterminant de la matrice J donné par

$$det(J) = -L1L2(L1c2s2s3 + L1c2^2c3 + L2s2 + d)$$

Où  $d = -L2s2c3^2 + L2s3c2c3$  et

$\theta_3 \neq \theta_2 + \frac{\pi}{2}$  condition d'existence dans l'espace des configurations admissibles.

Et donc :

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{-c1}{L1c2+L2s3} & 0 & \frac{-s1}{L1c2+L2s3} \\ \frac{s1s2}{L1c2-3} & \frac{c3}{L1c2-3} & \frac{c1s3}{L1c2-3} \\ \frac{-c2s1}{L2c2-3} & \frac{c2}{L1c2-3} & \frac{c1c2}{L2c2-3} \end{bmatrix} \quad (2. 35)$$

**Remarque :** Pour une matrice M, l'inverse existe si et seulement si son déterminant est non nul.

### 2.4.3 Le retour de force kinesthésique du robot Phantom Omni :

Le retour de force kinesthésique permet à son utilisateur de ressentir un retour d'informations haptiques issue de dispositif haptique PHANTOM Omni en fonction de ses

<sup>2</sup> La matrice adjointe d'une matrice M est la matrice transposée de la matrice conjuguée de M.

---

mouvements corporels afin de reproduire une interaction physique entre l'environnement distant et l'utilisateur.

Le retour de force du manipulateur est donné par la relation entre les couples appliquées aux actionneurs des articulations et la force externe dans le mécanisme de liaison articulée du dispositif haptique.

selon [Jarillo-Silva et al., 2009] :

$$\tau = J^T F \quad (2.36)$$

$\tau$ : Définit le vecteur couple.

$J^T$ : La transposé de la matrice jacobienne.

$F$  : le vecteur force au point de contact dans l'environnement virtuel définie par

$$\vec{F} = (F_{x_i} + F_{y_i} + F_{z_i}) N \quad (2.37)$$

Et donc :

$$\tau_1 = J_{11}F_x + J_{21}F_y + J_{31}F_z \text{ Nm} \quad (2.38)$$

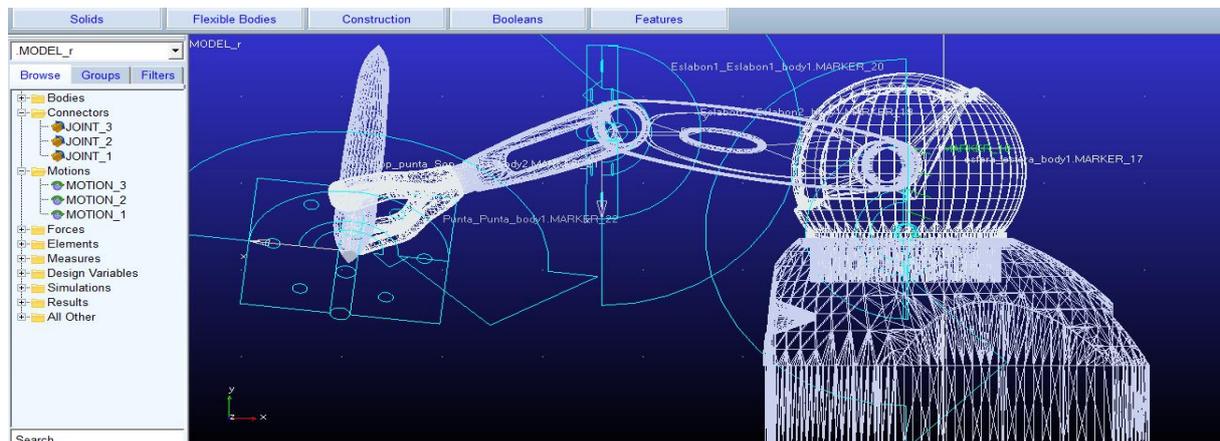
$$\tau_2 = J_{12}F_x + J_{22}F_y + J_{32}F_z \text{ Nm} \quad (2.39)$$

$$\tau_3 = J_{13}F_x + J_{23}F_y + J_{33}F_z \text{ Nm} \quad (2.40)$$

#### 2.4.4 La modélisation du dispositif haptique dans le logiciel ADAMS :

ADAMS est un logiciel de simulation dynamique, qui permet aux ingénieurs d'améliorer la conception des systèmes mécaniques dans le cadre de prototype virtuel et de comprendre comment les charges et les forces sont distribuées dans un modèle pour interpréter les résultats de comportements.

Dans ce travail, on a choisi le système ADAMS pour modéliser le comportement dynamique du dispositif haptique (PHANTOM Omni). En première étape des pièces CAO (Conception Assistée par Ordinateur), (source : [www.grabcad.com](http://www.grabcad.com)) du PHANTOM omni sont transférées à l'environnement ADAMS et sont ensuite rassemblés avec l'application des contraintes mécaniques appropriées.



**Figure 2.12** Identification des corps du robot dans ADAMS/View.

Dans cette simulation, l'analyse cinématique consiste à enregistrer les mouvements articulaires correspondant à la trajectoire souhaitée de l'effecteur final en fonction des mouvements appliqués sur la manette par les générateurs cinématiques, les angles et les vitesses angulaires sont le résultat de la modélisation dynamique et la simulation de contrôle du dispositif haptique.

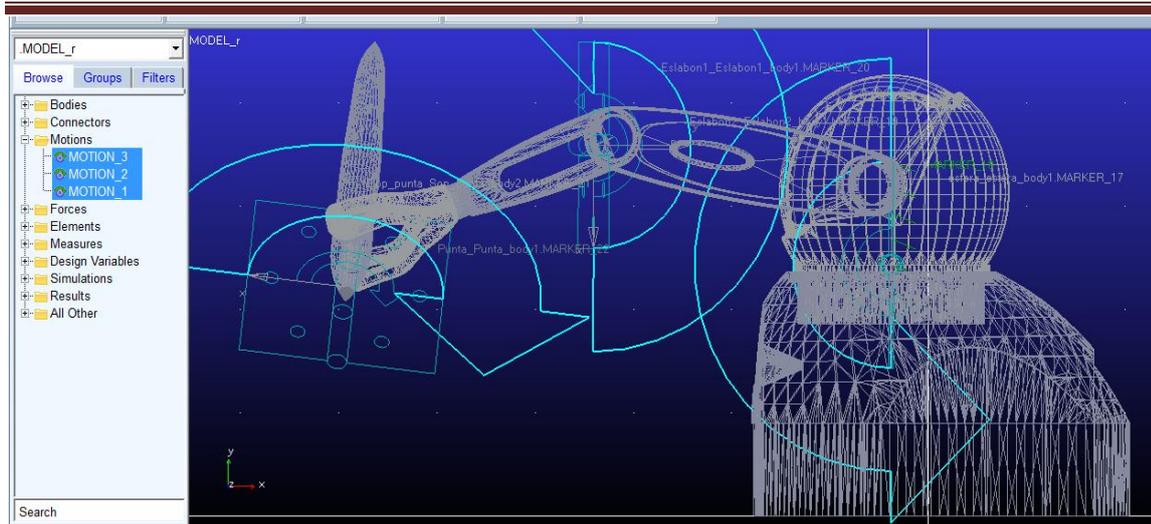


Figure 2.13 Application des mouvements d'articulation au dispositif haptique.

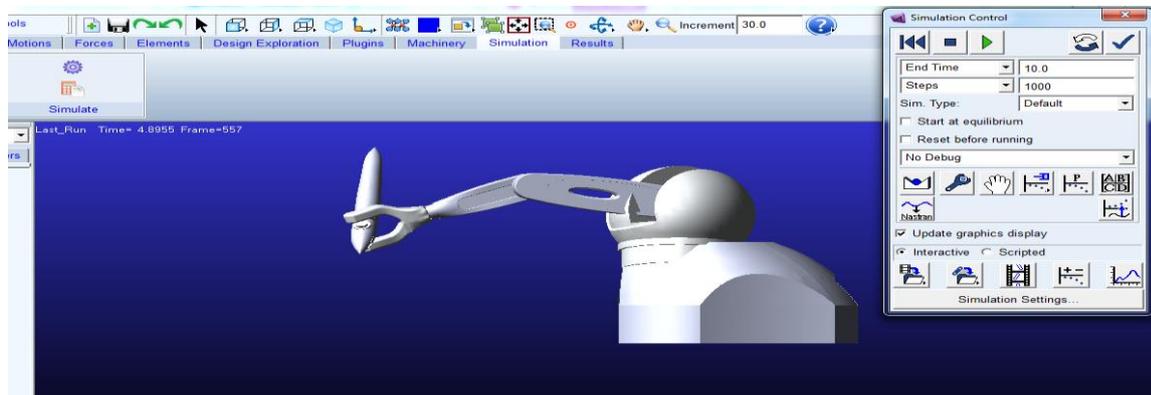
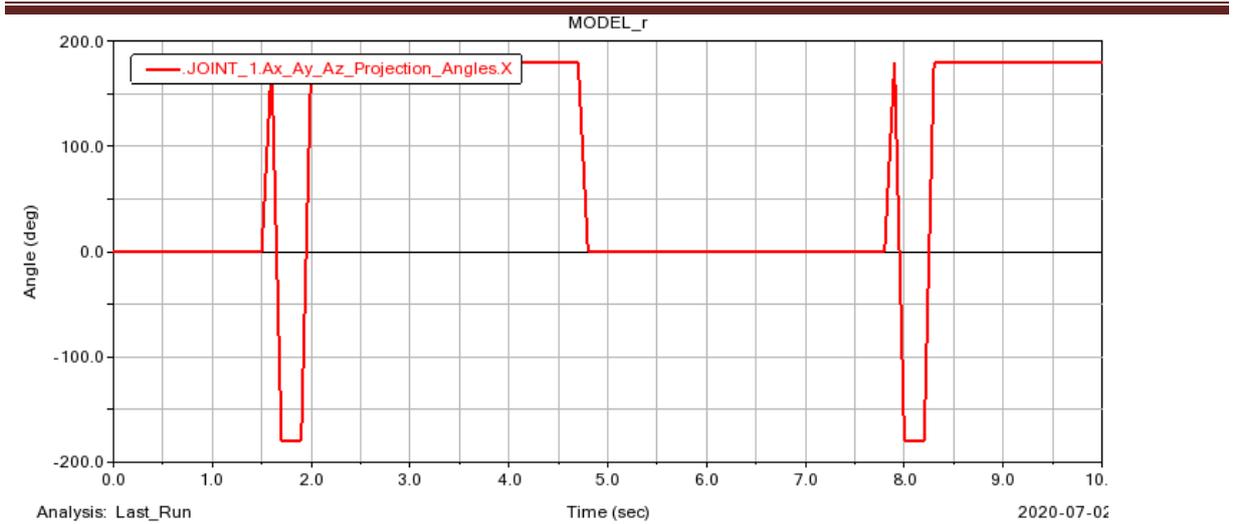
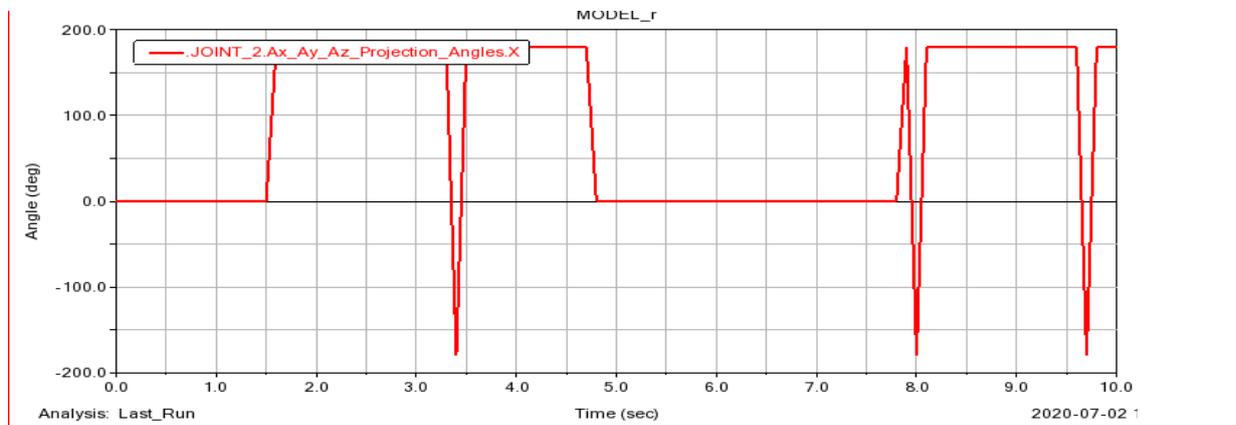


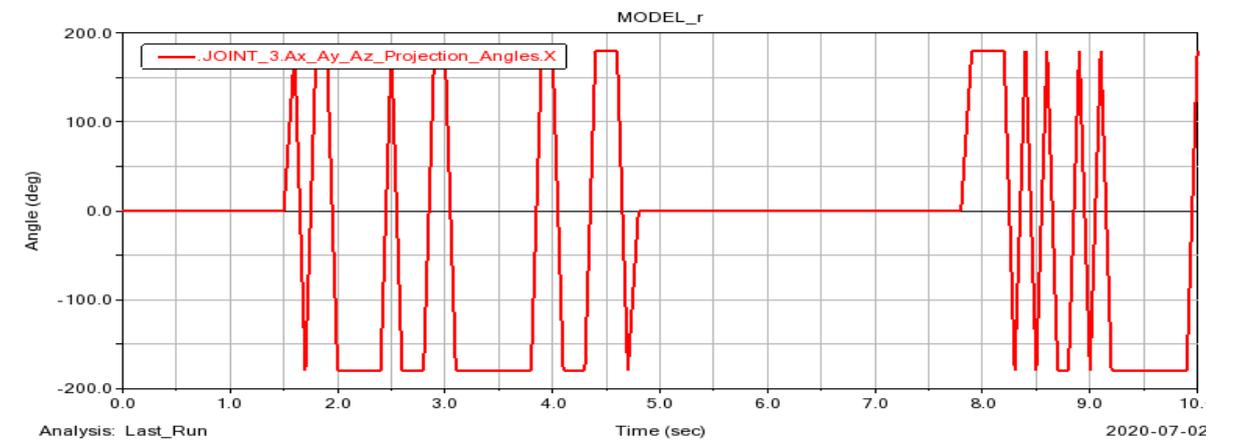
Figure 2.14 Simulation de dispositif haptique dans ADAMS.



Articulation 1



Articulation 2



Articulation 3

Figure2.15 Les articulations du PHANTOM Omni.

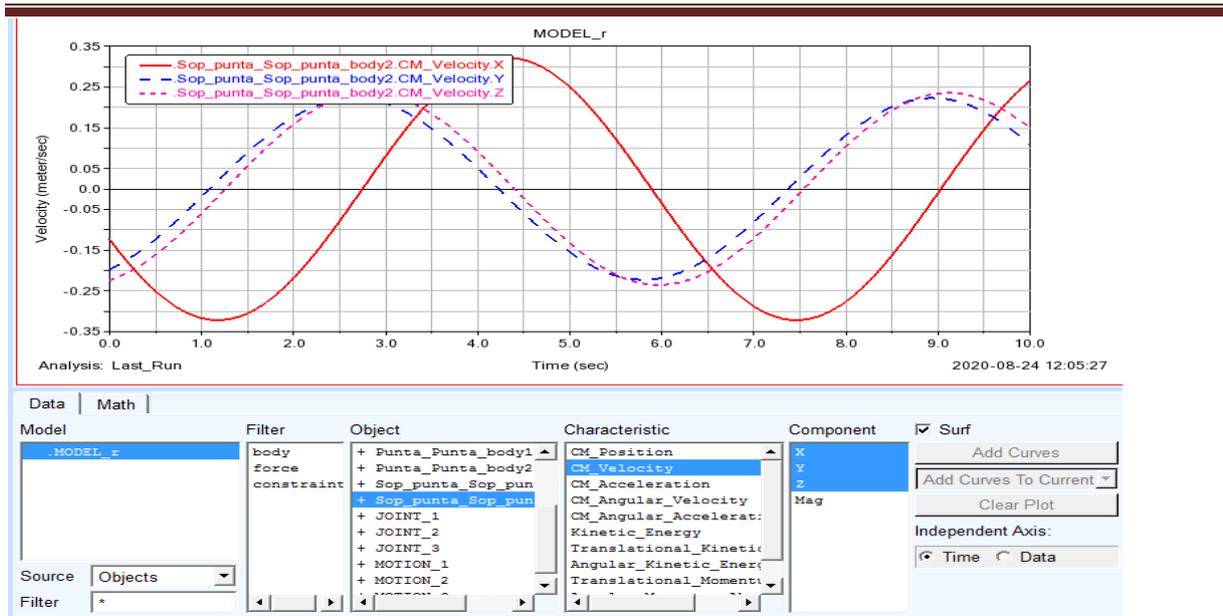


Figure 2.16 La vitesse de l'effecteur terminal.

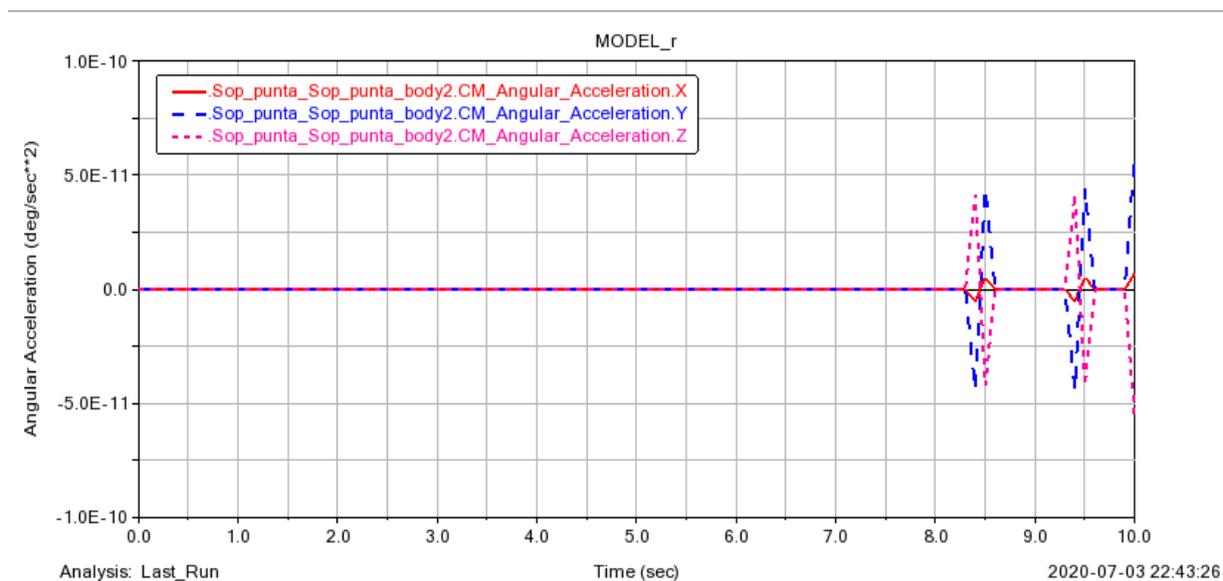


Figure 2.17 L'accélération de l'effecteur terminal.

**2.4.5 Etude expérimentale du dispositif haptique PHANTOM Omni :**

Afin de manipuler le dispositif haptique PHANTOM Omni, les fabricants ont mis à notre disposition des programmeurs, des bibliothèques de programmation spécialisées. Dans ce travail, on a essayé de faire marcher la manette PHANTOM Omni avec quelques bibliothèques répandues pour programmation des dispositifs haptiques.

---

➤ **OpenHaptics** : c'est une boîte à outils proposée par Sensable™, le concepteur des PHANTOMs et qui comprend deux bibliothèques de base HDAPI et HLAPI (pour *Haptic Device API* et *Haptic Library API*). La bibliothèque HDAPI permet de contrôler les paramètres de fonctionnement du dispositif : les positions, orientations et vitesses et gère ainsi le rendu direct des forces pour le dispositif haptique à partir des algorithmes efficaces de rendu de la force/détection des collisions et des structures de données, elle permet aussi un accès direct aux systèmes de coordonnées internes des moteurs et les températures des actionneurs.

La bibliothèque HLAPI permet au développeur de commander le processus de rendu haptique à partir de la boucle de rendu graphique basé sur les variables géométriques, les transformations cinématiques dans une scène 3D décrite en Open GL (Open Graphics Library, multi-plateforme pour les graphiques 3D). Ceci permet un contrôle très précis du dispositif.

➤ **H3D API** développé par SenseGraphics, est une bibliothèque de programmation haptique open-source écrite en C++ et qui utilise Open GL pour le rendu graphique.

Le H3D est construit sur la base de nombreuses normes industrielles, notamment

- X3D - <http://www.web3d.org> - : il s'agit du format de description de formes 3D, basé sur XML, c'est le successeur du VRML.
- XML - <http://www.w3.org/XML> -extensible Markup Language, est le langage de marquage standard utilisé dans une grande variété d'applications. Le H3D est doté d'un analyseur XML complet pour le chargement des définitions de graphiques de scènes.
- Open GL - <http://www.opengl.org> - ...

Comparé à l'OpenHaptics, le H3D autorise beaucoup plus de liberté et de précision lors de la création des effets. Cependant, l'OpenHaptics est plus rapide lors du retour de force.

➤ **CHAI3D** (Computer Haptics and Active Interface) est une bibliothèque C++, python open-source Lancé à l'origine au laboratoire d'intelligence artificielle de l'université de Stanford et conçue pour la visualisation et la simulation interactive en temps réel. Elle prend en charge plusieurs dispositifs haptiques à trois, six et sept degrés de liberté.

CHAI3D permet aux développeurs de créer plus facilement et plus intuitivement des applications combinant la modélisation 3D et les capacités de rendu par retour de force et

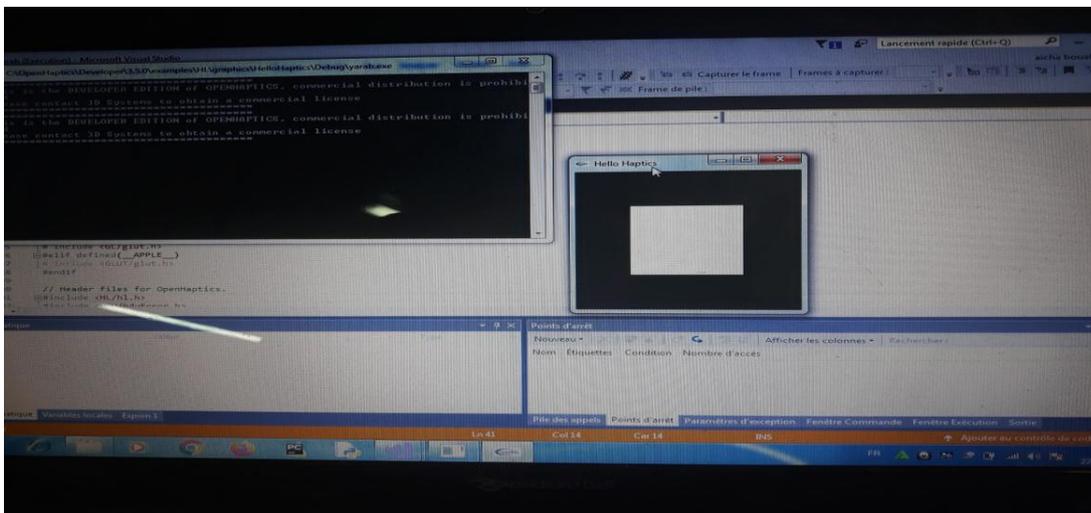
offre une interface unique permettant de concevoir et de déployer facilement des applications informatiques haptiques avancées.

CHAI3D est caractérisé par sa capacité à connecter le dispositif haptique directement avec des différents modules de simulation tel que :

- V-REP (de Coppelia Robotics) : est un simulateur des robots basé sur une architecture de contrôle distribué : chaque objet/modèle peut être contrôlé individuellement via un script intégré, un plugin, un nœud ROS ou BlueZero, cela rend V-REP très polyvalent et idéal pour les applications multi-robots. Les contrôleurs peuvent être écrits en C/C++, Python, Java, Lua, Matlab ou Octave.

CHAI3D connecte directement le dispositif haptique à la scène V-REP à travers un plugin contrôlé par des scripts contenant des fonctions de rendu par retour de force de dispositif haptique.

- Oculus : est un système de réalité virtuelle qui immerge complètement l'utilisateur dans des mondes virtuels. Un module CHAI3D est implémenté pour le rendu de scènes virtuelles dans le dispositif Oculus.



**Figure 2.18** Exemple de fonctionnement du PHANTOM Omni avec OpenHaptics.

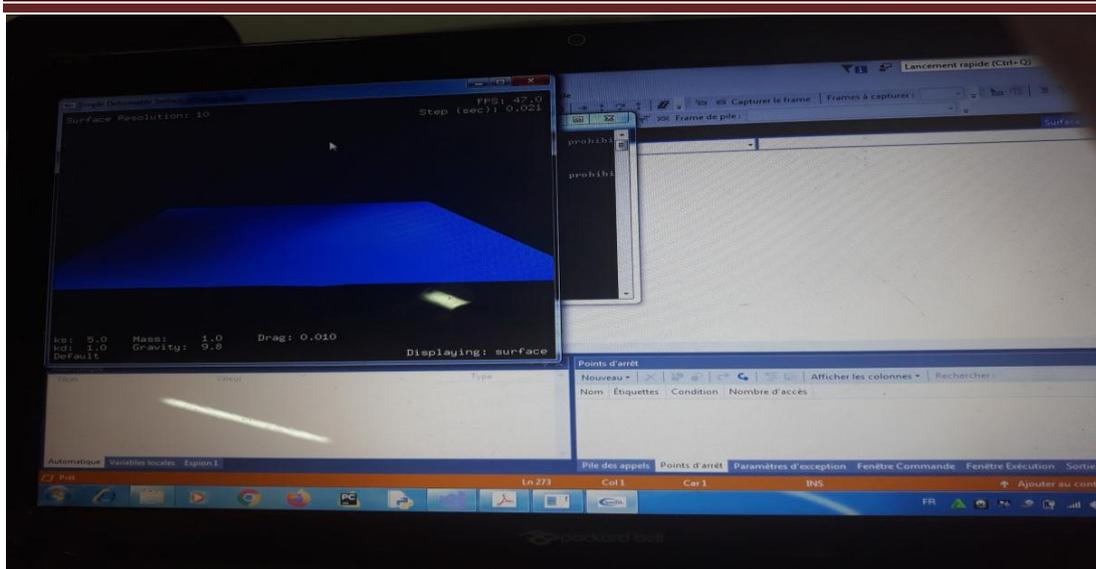


Figure 2.19 Exemple de fonctionnement du PHANTOM Omni avec H3D.

## 2.5 Robot esclave :

Le dispositif esclave utilisé dans ce système est un manipulateur série qui ressemble au robot industriel Stäubli RX-90, de six degrés de liberté. Les trois premiers degrés de liberté forment une architecture anthropomorphe<sup>3</sup> RRR et les trois derniers degrés de liberté sont de type rotoïde.

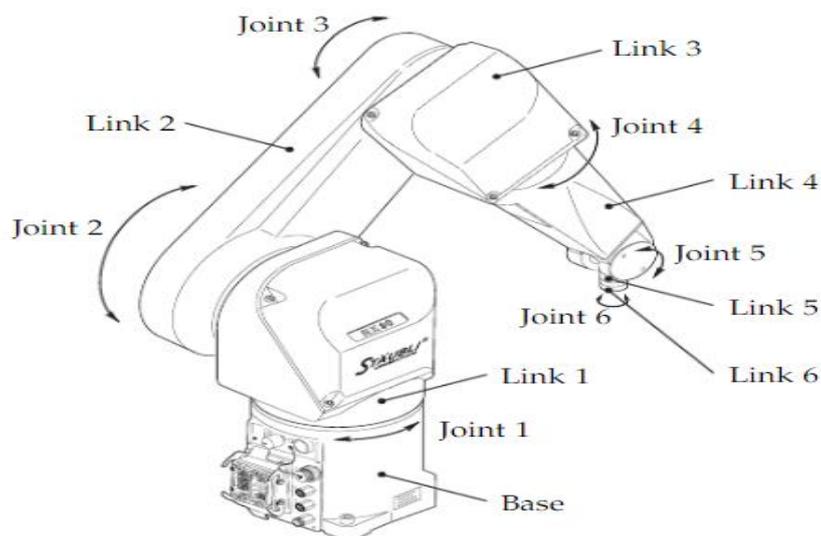


Figure 2.20 Stäubli RX-90 [Waiboer et al., 2005].

<sup>3</sup>

Les porteurs anthropomorphes (RRR) dont les trois axes sont concourants et forme ainsi une rotule.

→ Pour le robot esclave,  $\sigma_j = 0$  car les articulations sont rotoïdes.

Et on note aussi :

$$q = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ \theta_5 \ \theta_6]^T$$

Le tableau suivant montre les paramètres de Denavit-Hartenberg du notre robot esclave :

j	$\sigma_j$	$a_j$ (rad)	$d_j$ (m)	$\Theta_j$	$r_j$ (m)	$\varepsilon_j$ (m)
1	0	0	0.05	$\Theta_1$	0	0
2	0	$-\pi/2$	0.036	$\Theta_2$	0.014	0
3	0	0	0	$\Theta_3$	0.105	0
4	0	$\pi/2$	0.047	$\Theta_4$	0.029	0
5	0	$-\pi/2$	0.027	$\Theta_5$	0	0.051
6	0	$\pi/2$	0.052	$\Theta_6$	0.025	0

Tableau 2.2 paramètres géométriques du robot esclave.

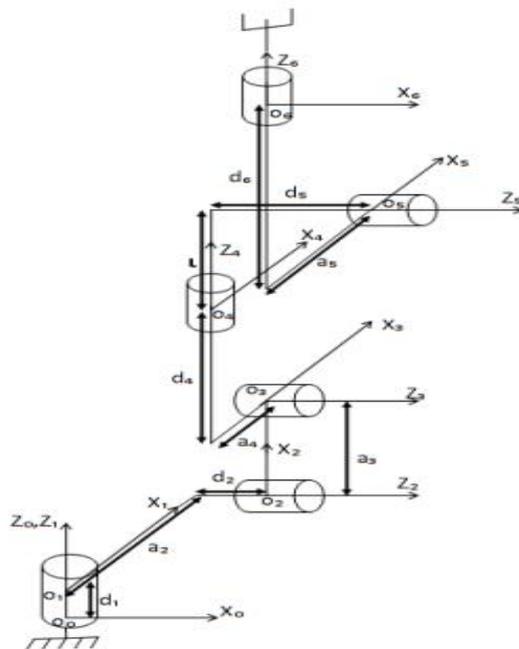


Figure 2.21 Placement des repères du robot esclave.

La détermination du modèle géométrique du robot consiste à calculer la matrice de transformation homogène de l'effecteur terminal dans le repère R0  $\{^0T_6\}$  à partir des matrices de transformation élémentaires  $\{^0T_1\ ^1T_2\ ^2T_3\ ^3T_4\ ^4T_5\ ^5T_6\}$

Dans notre robot, un paramètre d'embranchement «  $\varepsilon$  » est introduit, c'est une translation suivant l'axe Z4 permettant le passage du repère R4 au repère R5.

Cette translation supplémentaire «  $\varepsilon$  » est ajoutée à la matrice de transformation élémentaire  $^4T_5$  qui sera défini comme suit :

$$^4T_5^* = \text{Trans}_z(\varepsilon) * ^4T_5 \tag{2. 41}$$

$$^4T_5^* = \begin{bmatrix} \cos(\theta_5) & -\sin(\theta_5) & 0 & d_5 \\ \cos(\alpha_5)\sin(\theta_5) & \cos(\alpha_5)\cos(\theta_5) & -\sin(\alpha_5) & -r_5\sin(\alpha_5) \\ \sin(\alpha_5)\sin(\theta_5) & \sin(\alpha_5)\cos(\theta_5) & \cos(\alpha_5) & \varepsilon + r_5\cos(\alpha_5) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2. 42}$$

$$^4T_5^* = \begin{bmatrix} \cos(\theta_5) & -\sin(\theta_5) & 0 & d_5 \\ \cos(\alpha_5)\sin(\theta_5) & \cos(\alpha_5)\cos(\theta_5) & -\sin(\alpha_5) & -r_5\sin(\alpha_5) \\ \sin(\alpha_5)\sin(\theta_5) & \sin(\alpha_5)\cos(\theta_5) & \cos(\alpha_5) & \varepsilon + r_5\cos(\alpha_5) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Pour ce faire, on ajoute une articulation virtuelle supplémentaire. Toutefois, la matrice de transformation associée à cette articulation reste constante, comme si elle était figée afin de ne pas introduire un degré de liberté supplémentaire.

La matrice de transformation homogène globale qui permet de passer du repère R6 lié à la pointe de l'instrument au repère R0 lié à la base du robot est donnée par :

$${}^0T_6 = {}^0T_1 * {}^1T_2 * {}^2T_3 * {}^3T_4 * \{ {}^4T_5 * \} * {}^5T_6 = \begin{bmatrix} sx & nx & ax & PX \\ sy & ny & ay & PY \\ sz & nz & az & PZ \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

➤ La matrice de transformation  ${}^0T_1$  (exprime le repère  $\mathbf{R}_1$  dans le repère  $\mathbf{R}_0$ ) :

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0.05 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

➤ La matrice de transformation  ${}^1T_2$  (exprime  $\mathbf{R}_2$  dans  $\mathbf{R}_1$ ) :

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0.036 \\ 0 & 0 & 1 & 0.014 \\ -s\theta_2 & -c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

➤ La matrice de transformation  ${}^2T_3$  (exprime  $\mathbf{R}_3$  dans  $\mathbf{R}_2$ ) :

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & 0 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.105 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

➤ La matrice de transformation  ${}^3T_4$  (exprime  $\mathbf{R}_4$  dans  $\mathbf{R}_3$ ) :

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & 0.047 \\ 0 & 0 & -1 & -0.029 \\ s\theta_4 & c\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

➤ La matrice de transformation  ${}^4T_5^*$  (exprime  $R_5$  dans  $R_4$ ) :

$${}^4T_5^* = \begin{bmatrix} c\theta_5 & -s\theta_5 & 0 & 0.027 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_5 & -c\theta_5 & 0 & 0.051 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

➤ La matrice de transformation  ${}^5T_6$  (exprime  $R_6$  dans  $R_5$ ) :

$${}^5T_6 = \begin{bmatrix} c\theta_6 & -s\theta_6 & 0 & 0.052 \\ 0 & 0 & -1 & -0.025 \\ s\theta_6 & c\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

Avec :

$C\theta_i = \cos(\theta_i)$ .

$S\theta_i = \sin(\theta_i)$ .

Donc les éléments de la matrice de transformation résultant de la multiplication des matrices élémentaires seront donnés par :

$$\begin{aligned} s_x = & -\sin(\theta_6) * (\cos(\theta_4) * \sin(\theta_1) - \sin(\theta_4) * (\cos(\theta_1) * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) - \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3))) \\ & - \cos(\theta_6) * (\cos(\theta_5) * (\sin(\theta_1) * \sin(\theta_4) + \cos(\theta_4) * (\cos(\theta_1) * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) - \\ & \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3))) + \sin(\theta_5) * (\cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) * \sin(\theta_3) + \cos(\theta_1) * \cos(\theta_3) * \sin(\theta_2))) \\ n_x = & \sin(\theta_6) * (\cos(\theta_5) * (\sin(\theta_1) * \sin(\theta_4) + \cos(\theta_4) * (\cos(\theta_1) * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) - \\ & \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3))) + \sin(\theta_5) * (\cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) * \sin(\theta_3) + \cos(\theta_1) * \cos(\theta_3) * \sin(\theta_2))) - \\ & \cos(\theta_6) * (\cos(\theta_4) * \sin(\theta_1) - \sin(\theta_4) * (\cos(\theta_1) * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) - \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3))) \end{aligned}$$

$$ax = \cos(\theta_5) * (\cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) * \sin(\theta_3) + \cos(\theta_1) * \cos(\theta_3) * \sin(\theta_2)) - \sin(\theta_5) * (\sin(\theta_1) * \sin(\theta_4) + \cos(\theta_4) * (\cos(\theta_1) * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) - \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3)))$$

$$sy = \sin(\theta_6) * (\cos(\theta_1) * \cos(\theta_4) + \sin(\theta_4) * (\sin(\theta_1) * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) - \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3) * \sin(\theta_1))) + \cos(\theta_6) * (\cos(\theta_5) * (\cos(\theta_1) * \sin(\theta_4) - \cos(\theta_4) * (\sin(\theta_1) * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) - \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3) * \sin(\theta_1)))) - \sin(\theta_5) * (\cos(\theta_2) * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_3) + \cos(\theta_3) * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2)))$$

$$ny = \cos(\theta_6) * (\cos(\theta_1) * \cos(\theta_4) + \sin(\theta_4) * (\sin(\theta_1) * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) - \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3) * \sin(\theta_1))) - \sin(\theta_6) * (\cos(\theta_5) * (\cos(\theta_1) * \sin(\theta_4) - \cos(\theta_4) * (\sin(\theta_1) * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) - \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3) * \sin(\theta_1)))) - \sin(\theta_5) * (\cos(\theta_2) * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_3) + \cos(\theta_3) * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2)))$$

$$ay = \sin(\theta_5) * (\cos(\theta_1) * \sin(\theta_4) - \cos(\theta_4) * (\sin(\theta_1) * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) - \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3) * \sin(\theta_1))) + \cos(\theta_5) * (\cos(\theta_2) * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_3) + \cos(\theta_3) * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2))$$

$$sz = \sin(\theta_2 + \theta_3) * \sin(\theta_4) * \sin(\theta_6) - \cos(\theta_6) * (\cos(\theta_2 + \theta_3) * \sin(\theta_5) + \sin(\theta_2 + \theta_3) * \cos(\theta_4) * \cos(\theta_5))$$

$$nz = \sin(\theta_6) * (\cos(\theta_2 + \theta_3) * \sin(\theta_5) + \sin(\theta_2 + \theta_3) * \cos(\theta_4) * \cos(\theta_5)) + \sin(\theta_2 + \theta_3) * \cos(\theta_6) * \sin(\theta_4)$$

$$az = \cos(\theta_2 + \theta_3) * \cos(\theta_5) - \sin(\theta_2 + \theta_3) * \cos(\theta_4) * \sin(\theta_5)$$

$$P_x = 0.036 * \cos(\theta_1) - 0.119 * \sin(\theta_1) - 0.027 * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_4) - 0.047 * \cos(\theta_1) * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) - 0.052 * \cos(\theta_5) * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_4) - 0.025 * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_4) * \sin(\theta_5) + 0.027 * \cos(\theta_2 + \theta_3) * \cos(\theta_1) * \cos(\theta_4) + 0.025 * \sin(\theta_2 + \theta_3) * \cos(\theta_1) * \cos(\theta_5) - 0.052 * \sin(\theta_2 + \theta_3) * \cos(\theta_1) * \sin(\theta_5) + 0.047 * \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3) + 0.08 * \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) * \sin(\theta_3) + 0.08 * \cos(\theta_1) * \cos(\theta_3) * \sin(\theta_2) + 0.052 * \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3) * \cos(\theta_4) * \cos(\theta_5) + 0.025 * \cos(\theta_1) * \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3) * \cos(\theta_4) * \sin(\theta_5) - 0.052 * \cos(\theta_1) * \cos(\theta_4) * \cos(\theta_5) * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) - 0.08 * \cos(\theta_1) * \cos(\theta_4) * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) * \sin(\theta_5) + 0.05$$

$$P_y = 0.119 * \cos(\theta_1) + 0.036 * \sin(\theta_1) + 0.027 * \cos(\theta_1) * \sin(\theta_4) + 0.08 * \cos(\theta_2) * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_3) + 0.08 * \cos(\theta_3) * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2) + 0.025 * \cos(\theta_1) * \sin(\theta_4) * \sin(\theta_5) - 0.047 * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_2) * \sin(\theta_3) + 0.027 * \cos(\theta_2 + \theta_3) * \cos(\theta_4) * \sin(\theta_1) + 0.08 * \sin(\theta_2 + \theta_3) * \cos(\theta_5) * \sin(\theta_1) - 0.052 * \sin(\theta_2 + \theta_3) * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_5) + 0.047 * \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3) * \sin(\theta_1) + 0.052 * \cos(\theta_1) * \cos(\theta_5) * \sin(\theta_4) + 0.052 * \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3) * \cos(\theta_4) * \cos(\theta_5) * \sin(\theta_1) + 0.08 * \cos(\theta_2) * \cos(\theta_3) * \cos(\theta_4) * \sin(\theta_1) * \sin(\theta_5) -$$

$$0.052*\cos(\theta_4)*\cos(\theta_5)*\sin(\theta_1)*\sin(\theta_2)*\sin(\theta_3)-$$

$$0.08*\cos(\theta_4)*\sin(\theta_1)*\sin(\theta_2)*\sin(\theta_3)*\sin(\theta_5)$$

$$P_z = 0.08*\cos(\theta_2 + \theta_3) - 0.047*\sin(\theta_2 + \theta_3) + 0.08*\cos(\theta_2 + \theta_3)*\cos(\theta_5) - 0.027*\sin(\theta_2 + \theta_3)*\cos(\theta_4) - 0.052*\cos(\theta_2 + \theta_3)*\sin(\theta_5) - 0.052*\sin(\theta_2 + \theta_3)*\cos(\theta_4)*\cos(\theta_5) - 0.08*\sin(\theta_2 + \theta_3)*\cos(\theta_4)*\sin(\theta_5)$$

Avec

$\theta_j$  : La rotation du corps  $C_j$  par rapport au corps  $C_{j-1}$  suivant l'axe  $\vec{z}_j$ .

➤ La situation de l'organe terminal du robot esclave est donnée par :

-la position décrit par les coordonnées cartésiennes :  ${}^0P_6 = [P_x \ P_y \ P_z]^T$

- l'orientation décrit à travers :

Les cosinus directeurs  ${}^0A_6 = [{}^0s_6 \ {}^0n_6 \ {}^0a_6]$

### 2.5.1 Modélisation dynamique du robot esclave :

L'étude géométrique d'un robot réfère à son comportement statique donné par la position et l'orientation de l'organe terminal de ce dernier. Or, l'accélération et la décélération des moteurs constituant le robot sont nécessaires pour atteindre la vitesse et la position précise lors d'une intervention chirurgicale.

Une application des forces d'accélération ou des forces externes peut entraîner une déformation du robot, puisque les corps constituant ce dernier ne sont pas des solides parfaits. Et ceci peut engendrer aussi de mauvaises articulations : élasticité, frottements secs et visqueux sont souvent présents.

Pour avoir un comportement vélocité du robot, il est nécessaire de procéder à une étude dynamique en tenant compte tous ces éléments.

La modélisation dynamique permet de synthétiser la loi de commande en positions, vitesses et accélérations articulaires du robot par rapport aux couples (et/ou forces) appliqués aux actionneurs.

---

**Modèle dynamique direct** : décrit par [Khalil et Dombre, 2012], est présenté sous la forme suivante

$$\ddot{q} = f(q, \dot{q}, T, fe) \quad (2. 50)$$

**Modèle dynamique inverse** : décrit par [Khalil et Dombre, 2012], est défini par la relation suivante

$$T = g(q, \dot{q}, \ddot{q}, fe) \quad (2. 51)$$

$T$  : Vecteur des couples/forces des actionneurs.

$q$  : Vecteur des positions articulaires.

$\dot{q}$  : Vecteur des vitesses articulaires.

$\ddot{q}$  : Vecteur des accélérations articulaires.

$fe$  : Vecteur représentant les forces et les moments et les paramètres dynamiques (inertiels et de frottement) standard du robot.

Plusieurs formalismes de calcul du modèle dynamique du robot existent dans la littérature [Khalil et Dombre, 2012]. Les formalismes les plus utilisés sont :

**a) - le formalisme de Lagrange**, formalisme simple utile pour le calcul du modèle dynamique direct et très adapté pour la simulation et la commande.

**b) - le formalisme de Newton-Euler**, il est mieux adapté lorsqu'on veut déterminer le modèle dynamique inverse, permettant d'obtenir les dimensions des parties mécaniques du robot et facile à programmer.

Dans ce travail, on utilise le formalisme de Lagrange pour obtenir les fonctions dynamiques de la commande du robot.

### 2.5.1.1 Modèle dynamique par le formalisme de Lagrange :

Le formalisme de Lagrange décrit les équations du mouvement ce qui se traduit, lorsque le robot est supposé en charge (l'effort extérieur sur l'organe terminal est supposé non nul), par l'équation suivante [Khalil et Dombre, 2012] :

$$\mathbf{T}i = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \mathbf{T}e_i \quad i=1 \dots n \quad (2.52)$$

C'est-à-dire :

$$\mathbf{T}i = \frac{d}{dt} \frac{\partial E}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial E}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} + \mathbf{T}e_i \quad (2.53)$$

L : Lagrangien du système E-U

E : Energie cinétique totale du robot.

U : Energie potentielle totale du robot.

$\mathbf{T}i$  : Vecteur de couple d'actionneurs appliqué sur l'articulation i considéré comme celle d'entrée.

$\mathbf{T}e_i$  : Résultat de forces exercées par l'effecteur terminal sur son environnement.

On commence tout d'abord par la détermination de l'expression de l'énergie cinétique, qui dépend principalement des vitesses articulaires des actionneurs du robot, et on calcule l'énergie potentielle, représentant l'action de la pesanteur, Celle-ci est également fonction de la configuration.

➤ *Calcul de l'énergie cinétique :*

L'énergie cinétique est définie par le travail nécessaire pour faire passer un corps de son état de repos à l'état du mouvement.

L'énergie cinétique totale de système est donnée par la relation :

$$E = \sum_{j=1}^n E_j \quad (2.54)$$

Où  $E_j$  désigne l'énergie cinétique de corps  $C_j$ .

L'expression linéaire de l'énergie cinétique du corps  $C_j$  décrit par [Khalil et Dombre, 2012], est donnée par :

(2.55)

$$E_j = 1/2 * ({}^j\omega_j^T * {}^jJ_j * {}^j\omega_j + M_j * {}^jV_j^T * {}^jV_j + 2{}^jV_j^T * ({}^j\omega_j \wedge {}^jMS_j))$$

(2.56)

$${}^j\omega_j = {}^jA_{j-1} * ({}^{j-1}\omega_{j-1} + \bar{\sigma}_j * \dot{q}_j * {}^{j-1}a_j) = ({}^j\omega_{j-1} + \bar{\sigma}_j * \dot{q}_j * {}^ja_j)$$

(2.57)

$${}^jV_j = {}^jA_{j-1} * ({}^{j-1}V_{j-1} + {}^{j-1}\omega_{j-1} \wedge {}^{j-1}P_j) + \sigma_j * \dot{q}_j * {}^ja_j$$

Avec :

${}^j\omega_j$  : vitesse de rotation du corps  $C_j$  exprimé dans repère  $R_j$ .

${}^jV_j$  : vitesse de translation du corps  $C_j$  exprimé dans repère  $R_j$ .

$M_j$  : la masse du corps  $C_j$ .

$S_j$  : vecteur liant l'origine du repère  $R_j$  au centre de masse du corps  $C_j$  est égal à  $O_j G_j$ .

$MS_j$  : premier moment d'inertie du corps  $C_j$  autour de l'origine du repère  $R_j$ , il est égal à

$$M_j * S_j = (MSX_j, MSY_j, MSZ_j)^T$$

$^j a_j$  : vecteur unitaire suivant l'axe  $Z_j$  dans repère  $R_j$ .

$^j J_j$  : les tenseurs d'inertie des corps  $C_j$  par rapport au repère  $R_j$  qui s'expriment par :

$$^j J_j = \begin{bmatrix} I_{XXj} & I_{XYj} & I_{XZj} \\ I_{YXj} & I_{YYj} & I_{YZj} \\ I_{ZXj} & I_{ZYj} & I_{ZZj} \end{bmatrix}$$

Pour un robot dont la base est fixe, les conditions initiales sont telles que :

$${}^0 V_0 = 0 \text{ et } {}^0 \omega_0 = 0.$$

➤ *Calcul de l'énergie potentielle :*

L'énergie potentielle gravitationnelle d'un objet implique le travail fourni pour surmonter la force de gravitation lors du changement de hauteur.

l'énergie potentielle décrit par [Khalil et Dombre, 2012] , s'écrit :

(2. 58)

$$U = - \sum_{j=1}^n M_j {}^0 g_j^T ({}^0 p_j + {}^0 A_j . S_j)$$

$$\text{Où } g = [0, 0, G]^T$$

En appliquant le formalisme de Lagrange, on obtient l'équation suivante :

$$T = A\ddot{q} + B(q, \dot{q}) + G(q) + T_e \quad (2. 59)$$

$A(q)$  : matrice d'inertie de dimension  $(n \times n)$  symétrique et positive.

$B(q, \dot{q})$  : vecteur de dimension  $(n \times 1)$  de l'effet centrifuge et de Coriolis.

$G(q)$  : vecteur de dimension  $(n \times 1)$  spécifiant l'effet gravitationnel.

Le modèle cinématique direct d'un robot manipulateur esclave décrit la relation entre les vitesses des coordonnées opérationnelles et les vitesses articulaires :

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \quad (2. 60)$$

$J(q)$  désigne la matrice jacobéenne du mécanisme.

En dérivant l'équation précédente, on peut obtenir le modèle cinématique du deuxième ordre :

$$\ddot{X} = J(q)\ddot{q} + \frac{dJ(q)}{dt} \dot{q} \quad (2. 61)$$

A partir de l'équation (2. 59), nous déterminons l'accélération articulaire  $\ddot{q}$  :

$$\ddot{q} = A^{-1}(T - B(q, \dot{q}) - G(q) - Te) \quad (2. 62)$$

L'accélération opérationnelle est donnée à partir des 2 équations (2. 61) et (2. 62) :

$$\ddot{X} = J(q)(A^{-1}(T - B(q, \dot{q}) - G(q) - Te)) + \frac{dJ(q)}{dt} \dot{q} \quad (2. 63)$$

Les couples  $T_e$  des articulations sont donnés en fonctions des forces appliquées dans l'espace opérationnel  $F_e$  et s'écrit :

$$T_e = J^T F_e \quad (2.64)$$

En remplaçant dans (2.63), on obtient :

$$\ddot{X} = J(q)(A^{-1}(T - B(q, \dot{q}) - G(q) - J^T F_e)) + \frac{dJ(q)}{dt} \dot{q} \quad (2.65)$$

➤ *Prise en compte du frottement dans les articulations :*

Les frottements secs ou visqueux de la chaîne d'actionnement des articulations sont loin d'être négligeables sur les robots industriels. En effet, les erreurs dues aux frottements non compensés provoquent des retards et des cycles limites.

On peut en tenir compte en ajoutant à l'expression finale du couple (4.62) les termes correctifs décrivent dans [Khalil et Dombre, 2012] :

$$H(\dot{q}_j) = F_{sj} \cdot \text{Sgn}(\dot{q}_j) + F_{vj} \cdot \dot{q}_j \quad (2.66)$$

Avec :  $\text{Sgn}(\dot{q}_j) = 1$  si  $\dot{q}_j > 0$

$\text{Sgn}(\dot{q}_j) = 0$  si  $\dot{q}_j = 0$

$\text{Sgn}(\dot{q}_j) = -1$  si  $\dot{q}_j < 0$

$F_{vj}$  : coefficient des frottements visqueux (=0 si les frottements sont secs).

$F_{sj}$  : coefficient des frottements secs.

➤ *Prise en compte de l'inertie des actionneurs :*

Supposant un moteur défini par un moment d'inertie  $I_{mj}$  et un réducteur de moment  $I_{rj}$ .

L'ensemble moteur - réducteur constitue un actionneur d'un rapport de transmission

$$R_{tj} = q_j / \theta_{aj}$$

Où  $q_j$  est la position de l'articulation  $j$

$\theta_{aj}$  la position angulaire du moteur  $j$ .

L'énergie cinétique moteur-réducteur décrit par [Khalil et Dombre, 2012] est égale :

$$E_{aj} = \frac{1}{2} * I_{aj} * \dot{q}_j^2 \quad (2.67)$$

Avec  $I_{aj} = I_{mj} + I_{rj} / (R_{tj})^2$

$$R_{tj} = \sigma * R_{t_{pj}} + \bar{\sigma} * R_{t_{Rj}} \quad \text{Avec} \begin{cases} [R_{t_{pj}}] = \frac{m}{rad} \text{ pour Articulation prismatique} \\ [R_{t_{Rj}}] = \frac{rad}{rad} \text{ pour Articulation rotoïde} \end{cases}$$

Enfin, l'expression du modèle dynamique opérationnelle et articulaire du robot en fonction des paramètres internes (géométriques, inertie, couple moteur) et externes :

$$\ddot{q} = A^{-1}(T - B(q, \dot{q}) - G(q) - J^T F e - H(\dot{q})) \quad (2.68)$$

$$\ddot{X} = J(q)(A^{-1}(T - B(q, \dot{q}) - G(q) - J^T F e - H(\dot{q}))) + \frac{dJ(q)}{dt} \dot{q} \quad (2.69)$$

À ce moment nous appliquons les expressions dynamiques sur notre robot esclave pour avoir l'équation du mouvement.

### 2.5.1.2 Calcul du modèle dynamique du robot esclave :

Nous commençons le calcul de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique.

➤ *Calcul des éléments d'énergie cinétique :*

Les paramètres des différents corps **j** de la chaîne cinématique du robot esclave :

- $M_j$  : masse du corps **j** du robot esclave.

- $MS_j = [MS_{xj} \ MS_{yj} \ MS_{zj}]^T$  : définit le premier moment d'inertie du corps **j**.

- ${}^jJ_j$ : tenseur d'inertie du corps **j** exprimé dans repère **R<sub>j</sub>**.

$${}^jJ_j = \begin{bmatrix} I_{XXj} & I_{XYj} & I_{XZj} \\ I_{YXj} & I_{YYj} & I_{YZj} \\ I_{ZXj} & I_{ZYj} & I_{ZZj} \end{bmatrix}$$

a.1 Calcul des vitesses de rotation :

$${}^0\omega_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$${}^1\omega_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{pmatrix}$$

$${}^2\omega_2 = \begin{pmatrix} -s_2\dot{\theta}_1 \\ -c_2\dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{pmatrix}$$

$${}^3\omega_3 = \begin{pmatrix} -s_{23}\dot{\theta}_1 \\ -c_{23}\dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 \end{pmatrix}$$

$${}^4\omega_4 = \begin{pmatrix} -C_4.s_{23}.\dot{\theta}_1 + S_4.(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \\ S_4.S_{23}.\dot{\theta}_1 + c_4.(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) \\ c_{23}.\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_4 \end{pmatrix}$$

$${}^5\omega_5 = \begin{pmatrix} c_5.(-C_4.s_{23}.\dot{\theta}_1 + S_4.(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)) - s_5.(c_{23}.\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_4) \\ -s_5.(-c_4.S_{23}.\dot{\theta}_1 + s_4.(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)) - c_5.(c_{23}.\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_4) \\ s_4.s_{23}.\dot{\theta}_1 + c_4.(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) + \dot{\theta}_5 \end{pmatrix}$$

$${}^6\omega_6 =$$

$$\begin{pmatrix} c_6.(c_5.(-C_4.s_{23}.\dot{\theta}_1 + S_4.(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)) - s_5.(c_{23}.\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_4)) + s_6.(s_4.s_{23}.\dot{\theta}_1 + c_4.(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) + \dot{\theta}_5) \\ s_6.(c_5.(c_4.S_{23}.\dot{\theta}_1 + s_4.(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)) - s_5.(c_{23}.\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_4)) + c_6.(s_4.s_{23}.\dot{\theta}_1 + c_4.(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) + \dot{\theta}_5) \\ s_5.(-c_4.s_{23}.\dot{\theta}_1 + s_4.(\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3) + c_5.(c_{23}.\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_4)) + \dot{\theta}_6 \end{pmatrix}$$

a.2 Calcul des vitesses de translation :

$${}^0v_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$${}^1v_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$${}^2V_2 = \begin{pmatrix} -0.014 \cdot c2 \cdot \dot{\theta}1 \\ 0.014 \cdot s2 \cdot \dot{\theta}1 \\ 0.036 \cdot \dot{\theta}1 \end{pmatrix}$$

$${}^3V_3 = \begin{pmatrix} -0.119 \cdot c23 \cdot \dot{\theta}1 \\ 0.119 \cdot s23 \cdot \dot{\theta}1 \\ 0.036 \cdot \dot{\theta}1 \end{pmatrix}$$

$${}^4V_4 =$$

$$\begin{pmatrix} c4 \cdot (-0.119 \cdot c23 \cdot \dot{\theta}1 + 0.029 \cdot (\dot{\theta}2 + \dot{\theta}3)) + s4 \cdot (0.029 \cdot s23 + 0.047 \cdot c23 + 0.036) \cdot \dot{\theta}1 \\ -s4 \cdot (-0.119 \cdot c23 \cdot \dot{\theta}1 + 0.029 \cdot (\dot{\theta}2 + \dot{\theta}3)) + c4 \cdot (0.029 \cdot s23 + 0.047 \cdot c23 + 0.036) \cdot \dot{\theta}1 \\ -0.119 \cdot s23 \cdot \dot{\theta}1 - 0.047 \cdot (\dot{\theta}2 + \dot{\theta}3) \end{pmatrix}$$

$${}^5V_5 = \begin{pmatrix} 5_{v5,1} \\ 5_{v5,2} \\ 5_{v5,3} \end{pmatrix}$$

$${}^5V_{5,1} = c5 \cdot (c4 \cdot (-0.119 \cdot c23 \cdot \dot{\theta}1 + 0.08 \cdot (\dot{\theta}2 + \dot{\theta}3)) + s4 \cdot (0.08 \cdot s23 + 0.047 \cdot c23 + 0.036) \cdot \dot{\theta}1) - s5 \cdot ((-0.119 + 0.027 \cdot s4) \cdot s23 \cdot \dot{\theta}1 + (0.027 \cdot c4 - 0.047) \cdot (\dot{\theta}2 + \dot{\theta}3))$$

$${}^5V_{5,2} = -s5 \cdot (c4 \cdot (-0.119 \cdot c23 \cdot \dot{\theta}1 + 0.08 \cdot (\dot{\theta}2 + \dot{\theta}3)) + s4 \cdot (0.08 \cdot s23 + 0.047 \cdot c23 + 0.036) \cdot \dot{\theta}1) - c5 \cdot ((-0.119 + 0.027 \cdot s4) \cdot s23 \cdot \dot{\theta}1 + (0.027 \cdot c4 - 0.047) \cdot (\dot{\theta}2 + \dot{\theta}3))$$

$${}^5V_{5,3} = 0.027 \cdot c23 \cdot \dot{\theta}1 + 0.027 \cdot \dot{\theta}4 - s4 \cdot (-0.119 \cdot c23 \cdot \dot{\theta}1 + 0.08 \cdot (\dot{\theta}2 + \dot{\theta}3)) + c4 \cdot (0.08 \cdot s23 + 0.047 \cdot c23 + 0.036) \cdot \dot{\theta}1$$

$${}^6V_6 = \begin{pmatrix} 6_{v6,1} \\ 6_{v6,2} \\ 6_{v6,3} \end{pmatrix}$$

$${}^6V_{6,1} = c6. \left( c5. \left( c4. \left( -0.119. c23. \dot{\theta}1 + 0.08. (\dot{\theta}2 + \dot{\theta}3) \right) + s4. \left( 0.08. s23 + 0.047. c23 + 0.036 \right). \dot{\theta}1 \right) - s5. \left( (-0.119 + 0.027. s4). s23. \dot{\theta}1 + (0.027. c4 - 0.047). (\dot{\theta}2 + \dot{\theta}3) \right) - 0.025. (s4. s23. \dot{\theta}1 + c4. (\dot{\theta}2 + \dot{\theta}3) + \dot{\theta}5) \right) + s6. \left( 0.027. c23. \dot{\theta}1 + 0.027. \dot{\theta}4 - s4. \left( -0.119. c23. \dot{\theta}1 + 0.08. (\dot{\theta}2 + \dot{\theta}3) \right) + c4. \left( 0.08. s23 + 0.047. c23 + 0.036 \right). \dot{\theta}1 + c5. \left( 0.025. c4. s23. \dot{\theta}1 - 0.025. s4. (\dot{\theta}2 + \dot{\theta}3) + 0.052. c23. \dot{\theta}1 + 0.052. \dot{\theta}4 \right) + s5. \left( 0.025. c23. \dot{\theta}2 + 0.025. \dot{\theta}4 - 0.052. c4. s23. \dot{\theta}1 + 0.052. s4. (\dot{\theta}2 + \dot{\theta}3) \right) \right)$$

$${}^6V_{6,2} = -s6. \left( c5. \left( c4. \left( -0.119. c23. \dot{\theta}1 + 0.08. (\dot{\theta}2 + \dot{\theta}3) \right) + s4. \left( 0.08. s23 + 0.047. c23 + 0.036 \right). \dot{\theta}1 \right) - s5. \left( (-0.119 + 0.027. s4). s23. \dot{\theta}1 + (0.027. c4 - 0.047). (\dot{\theta}2 + \dot{\theta}3) \right) - 0.025. (s4. s23. \dot{\theta}1 + c4. (\dot{\theta}2 + \dot{\theta}3) + \dot{\theta}5) \right) + c6. \left( 0.027. c23. \dot{\theta}1 + 0.027. \dot{\theta}4 - s4. \left( -0.119. c23. \dot{\theta}1 + 0.08. (\dot{\theta}2 + \dot{\theta}3) \right) + c4. \left( 0.08. s23 + 0.047. c23 + 0.036 \right). \dot{\theta}1 + c5. \left( 0.025. c4. s23. \dot{\theta}1 - 0.025. s4. (\dot{\theta}2 + \dot{\theta}3) + 0.052. c23. \dot{\theta}1 + 0.052. \dot{\theta}4 \right) + s5. \left( 0.025. c23. \dot{\theta}2 + 0.025. \dot{\theta}4 - 0.052. c4. s23. \dot{\theta}1 + 0.052. s4. (\dot{\theta}2 + \dot{\theta}3) \right) \right)$$

$${}^6V_{6,3} = s5. \left( c4. \left( -0.119. c23. \dot{\theta}1 + 0.08. (\dot{\theta}2 + \dot{\theta}3) \right) + s4. \left( 0.08. s23 + 0.047. c23 + 0.036 \right). \dot{\theta}1 \right) + c5. \left( (-0.119 + 0.027. s4). s23. \dot{\theta}1 + (0.027. c4 - 0.047). (\dot{\theta}2 + \dot{\theta}3) \right) - 0.052. (s4. s23. \dot{\theta}1 + c4. (\dot{\theta}2 + \dot{\theta}3) + \dot{\theta}5)$$

➤ Calcule des éléments d'énergie potentielle :

L'énergie potentielle s'écrit :

$$U = \sum_{j=1}^n U_j$$

Où  $U_j = -{}^0g^T (M_j {}^0P_j + {}^0A_j {}^jMS_j)$  avec  $g = [0, 0, G]^T$ .

$$U_1 = -{}^0g^T \begin{pmatrix} 0.05. M1 + C1. MSx1 - S1. MSy1 \\ S1. MSx1 + C1. MSy1 \\ MSz1 \end{pmatrix}$$

$$U2=-^0g^T \begin{pmatrix} c1.(0.036.M2 + c2.MSx2 - s2.MSy2) - s1.(0.014.M2 + MSz2) + 0.05.M2 \\ c1.(0.014.M2 + MSz2) - s1.(c2.MSx2 + s2.MSy2 - 0.036.M2) \\ -s2.MSx2 - c2.MSy2 \end{pmatrix}$$

$$U3=-^0g^T \begin{pmatrix} c1.(0.036.M3 + c23.MSx3 - s23.MSy3) - s1.(0.119.M3 + MSz3) + 0.05.M3 \\ c1.(0.119.M3 + MSz3) + s1.(c23.MSx3 - s23.MSy3 + 0.036.M3) \\ -s23.MSx3 - c23.MSy3 \end{pmatrix}$$

$$U4=-^0g^T \begin{pmatrix} U4,1 \\ U4,2 \\ U4,3 \end{pmatrix}$$

$$U4,1 = c1.(0.036.M4 + 0.047.M4.c23 + 0.029.M4.s23 + c4.c23.MSx4 \\ - s4.c23.MSy4 + s23.MSz4) - s1.(0.199.M4 + S4.MSx4 + C4.MSy4) \\ + 0.05.M4$$

$$U4,2 = s1.(0.036.M4 + 0.047.M4.c23 + 0.029.M4.s23 + c4.c23.MSx4 \\ - s4.c23.MSy4 + s23.MSz4) + c1.(0.199.M4 + S4.MSx4 + C4.MSy4)$$

$$U4,3 = -s23.c4.MSx4 + s23.s4.MSy4 + c23.MSz4 + 0.055.M4.c23,58^\circ$$

$$U5=-^0g^T \begin{pmatrix} U5,1 \\ U5,2 \\ U5,3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
U_{5,1} = & c1. (0.036. M5 + 0.027. c4. c23. M5 + 0.047. c23. M5 + 0.08. s23. M5 \\
& + c23. c4. c5. MSx5 - s253. c5. MSx5 + c23. c4. s5. MSy5 - s23. c5. MSy5 \\
& - s4. c23. MSz5) \\
& - s1. (0.119. M5 + 0.027. s4. M5 + s4. c5. MSx5 + s4. s5. MSy5 \\
& + c4. MSz5) + 0.05. M5
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U_{5,2} = & s1. (0.036. M5 + 0.027. c4. c23. M5 + 0.047. c23. M5 + 0.08. s23. M5 \\
& + c23. c4. c5. MSx5 - s253. c5. MSx5 + c23. c4. s5. MSy5 - s23. c5. MSy5 \\
& - s4. c23. MSz5) \\
& + c1. (0.119. M5 + 0.027. s4. M5 + s4. c5. MSx5 + s4. s5. MSy5 \\
& + c4. MSz5)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U_{5,3} = & c23. (0.08. M5 - s5. MSx5 - c5. MSy5) - s23. (0.047. M5 + 0.027. c4. M5 \\
& + c4. c5. MSx5 - c4. s5. MSy5 - s4. MSz5)
\end{aligned}$$

$$U_{6=0}g^T \begin{pmatrix} M6.PX + sx.MSx6 + nx.MSy6 + ax.MSz6 \\ M6.PY + sy.MSx6 + ny.MSy6 + ay.MSz6 \\ M6.PZ + sz.MSx6 + nz.MSy6 + az.MSz6 \end{pmatrix}$$

Où

${}^0A_6 = [{}^0s_6 \ {}^0n_6 \ {}^0a_6]$  est la matrice de rotation du robot esclave.

$P = [P_x \ P_y \ P_z]^T$  définit la position de l'effecteur terminal.

Les notations étant généralement lourdes, on adopte un certain nombre de conventions. On note, pour  $i, j$  compris entre 1 et 6 :

$$C_i = \cos(\theta_i).$$

$$S_i = \sin(\theta_i).$$

$$C_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$$

$$S_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$$

➤ *Calcul du couple appliqué sur les articulations lors de l'insertion d'aiguille :*

Les forces et les moments appliqués sur l'aiguille sont donnés par :

$$F_e = [F_x \ F_y \ F_z \ n_x \ n_y \ n_z]^T \quad (2.70)$$

Le couple appliqué sur chaque articulation sous l'action de l'environnement est donc :

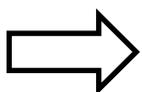
$$\tau_e = J^T F_e = J^T \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} \quad (2.71)$$

➤ *Calcul des forces du frottement :*

$$H(\dot{q}) = \begin{pmatrix} F_{s1}.Sgn(\dot{\theta}1) + F_{v1}.\dot{\theta}1 \\ F_{s2}.Sgn(\dot{\theta}2) + F_{v2}.\dot{\theta}2 \\ F_{s3}.Sgn(\dot{\theta}3) + F_{v3}.\dot{\theta}3 \\ F_{s4}.Sgn(\dot{\theta}4) + F_{v4}.\dot{\theta}4 \\ F_{s5}.Sgn(\dot{\theta}5) + F_{v5}.\dot{\theta}5 \\ F_{s6}.Sgn(\dot{\theta}6) + F_{v6}.\dot{\theta}6 \end{pmatrix} \quad (2.72)$$

➤ *L'inertie des actionneurs :*

$$I_a = \begin{bmatrix} I_{a1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_{a2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{a3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{a4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_{a5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{a6} \end{bmatrix} \quad (2.73)$$



**L'équation du mouvement :**

Après le calcul des éléments de formalisme de Lagrange, les coefficients dynamiques **A**, **B**, **G** et **H** sont donnés par :

➤ La matrice d'inertie  $A$  du robot :

$$A = \begin{bmatrix} A11 & A12 & A13 & A14 & A15 & A16 \\ A21 & A22 & A23 & A24 & A25 & A26 \\ A31 & A32 & A33 & A34 & A35 & A36 \\ A41 & A42 & A43 & A44 & A45 & A46 \\ A51 & A52 & A53 & A54 & A55 & A56 \\ A61 & A62 & A63 & A64 & A65 & A66 \end{bmatrix} \quad (2.74)$$

$A_{ii}$  est égal au coefficient de  $\dot{\theta}_i^2/2$  dans l'expression de l'énergie cinétique ;

$A_{ij}$  est égal au coefficient de  $\dot{\theta}_i\dot{\theta}_j$ .

➤ La matrice de l'effet de centrifuge et de Coriolis  $B$  :

$$B_i = \frac{dA_{ij}}{dt} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \\ \dot{\theta}_5 \\ \dot{\theta}_6 \end{pmatrix} - \frac{dE}{d\theta_i} \quad (2.75)$$

➤ Le vecteur de l'effet gravitationnel est :

$$c = \frac{dU}{d\theta_i} \quad (2.76)$$

L'équation du mouvement est exprimée par :

Soit l'accélération articulaire en fonction  $(T, \theta, \dot{\theta}, H, T_e)$  :

$$\ddot{\theta} = A^{-1}(T - B(\theta, \dot{\theta}) - G(\theta) - J^T F e - H(\dot{\theta})) \quad (2.77)$$

Ou soit l'accélération opérationnelle en fonction  $(T, \theta, \dot{\theta}, H, Te)$  :

$$\ddot{X} = J(\theta)(A^{-1}(T - B(\theta, \dot{\theta}) - G(\theta) - J^T F e - H(\dot{\theta}))) + \frac{dJ(\theta)}{dt} \dot{\theta} \quad (2.78)$$

### 2.5.2 Comparaison et Modélisation dans ADAMS du système mécanique de deux robots :

Dans cette partie, nous allons simuler le mouvement et la dynamique de deux manipulateurs industriels de six degrés de liberté dans le logiciel ADAMS, le premier, c'est le robot Stäubli RX-90 et le deuxième, c'est notre robot esclave utilisé dans ce projet de structure mécanique identique à celle du robot Stäubli RX-90 « Stäubli modifié ».

#### ➤ *Simulation du robot Stäubli RX-90 :*

Le robot Stäubli RX-90 est un manipulateur série de type anthropomorphe RRR, son poignet comporte trois rotations d'axes concourants, équivalentes à une rotule. Le modèle 3D CAO du robot utilisé dans cette étude est identique au modèle réel. Pour importer le modèle conçu dans ADAMS, l'étape initiale consiste à transférer chacune des six parties du robot (source : [www.staubli.com](http://www.staubli.com)) du logiciel "ASSEMBLY" au logiciel "SOLIDWORKS". Ensuite, chaque pièce est enregistrée au format "PARASOLID", car ce format est mieux reconnu dans ADAMS. L'étape suivante consiste à importer le modèle dans ADAMS. Il convient de noter que puisque les pièces sont converties dans un format défini, elles sont donc assemblées avec des positions prédéterminées dans ADAMS. Après le transfert du modèle, les paramètres inertiels des pièces, comme la densité, sont enregistrés dans la base de données du logiciel. Les corps du robot sont identifiés, comme on peut le voir sur la figure :

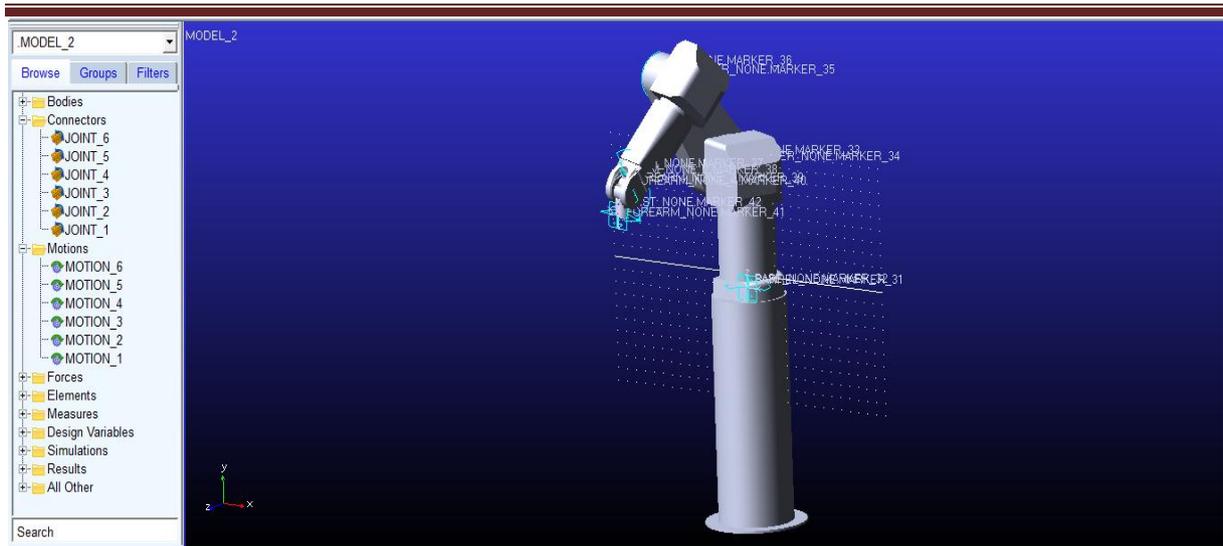


Figure 2.22 Identification du robot Staubli RX-90.

On simule le mouvement du robot, pendant 10 secondes. Une simple analyse cinématique prospective nous permet de tracer la position et l'orientation de l'effecteur terminal, sa vitesse et son accélération en fonction des variables articulaires  $\theta_j$  utilisées comme entrées du modèle.

Articulation $\theta_j$	Intervalle choisi	Intervalle à ne pas dépasser $[\theta_{jmin}(\text{°}) ; \theta_{jmax}(\text{°})]$
$\theta_1$	[0 ; +90]	[-180 ; +180]
$\theta_2$	[0 ; +90]	[-130 ; +147.5]
$\theta_3$	[-35 ; +90]	[-145 ; +145]
$\theta_4$	[-60 ; +60]	[-270 ; +270]
$\theta_5$	[-90 ; +90]	[-115 ; +140]
$\theta_6$	[-60 ; +60]	[-270 ; +270]

Tableau 2.3 Répartition des amplitudes des angles du RX90.

Dans les quatre figures suivantes, nous présentons les graphiques de variation de certains paramètres cinématiques de l'effecteur final : la position (figure.2. 23), la vitesse (figure.2. 24), l'accélération (figure. 2.25), la vitesse angulaire (figure. 2.26) du centre de masse de l'effecteur final.

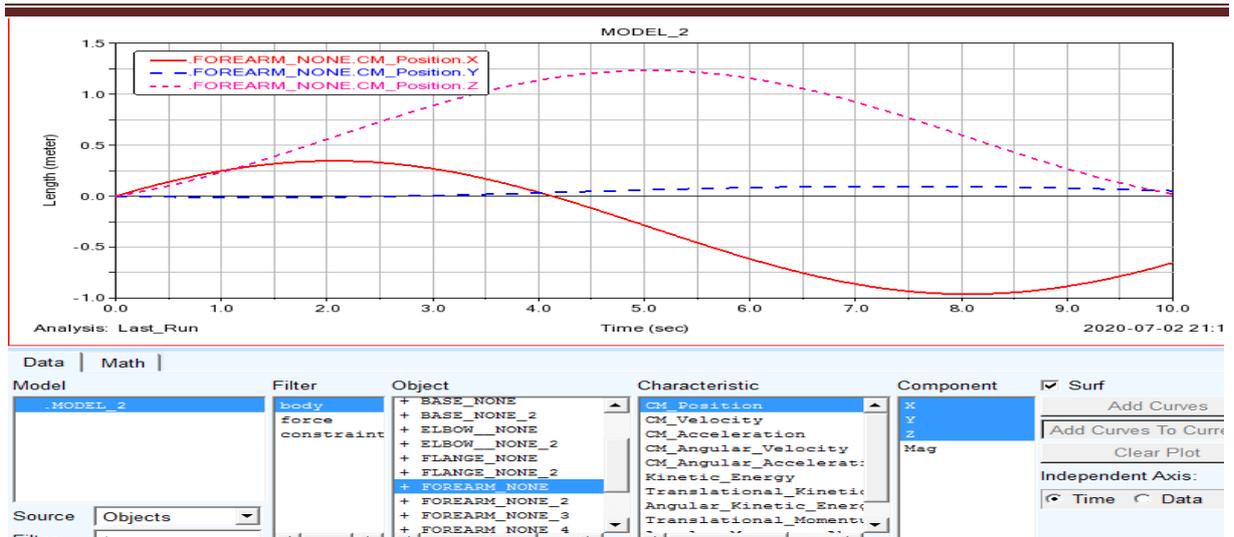


Figure 2.23 Position de l'effecteur terminal du robot RX90.

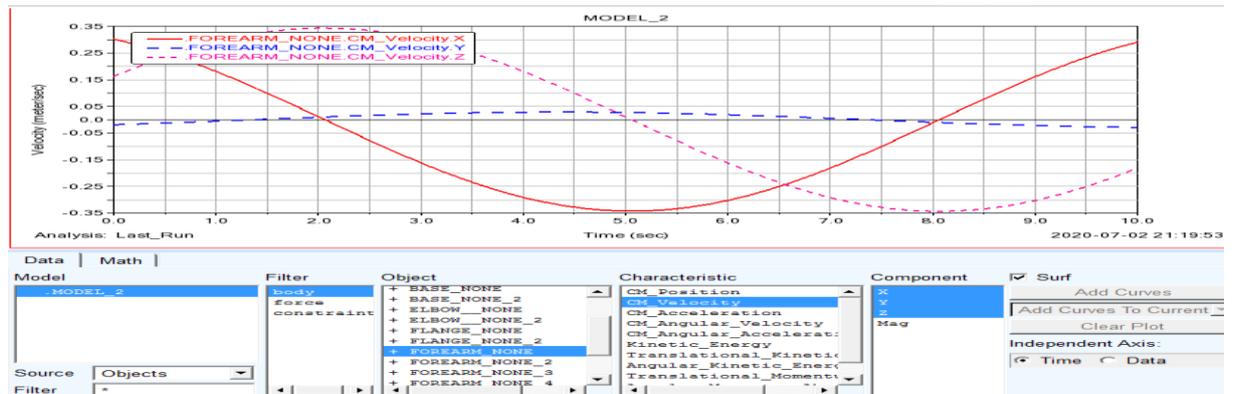


Figure 2.24 La vitesse de l'effecteur terminal du robot RX90.

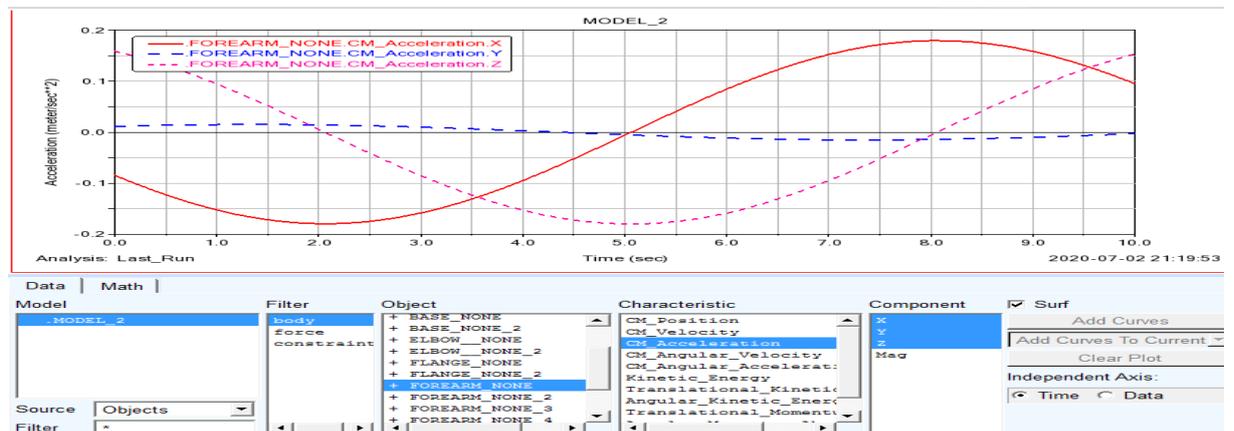
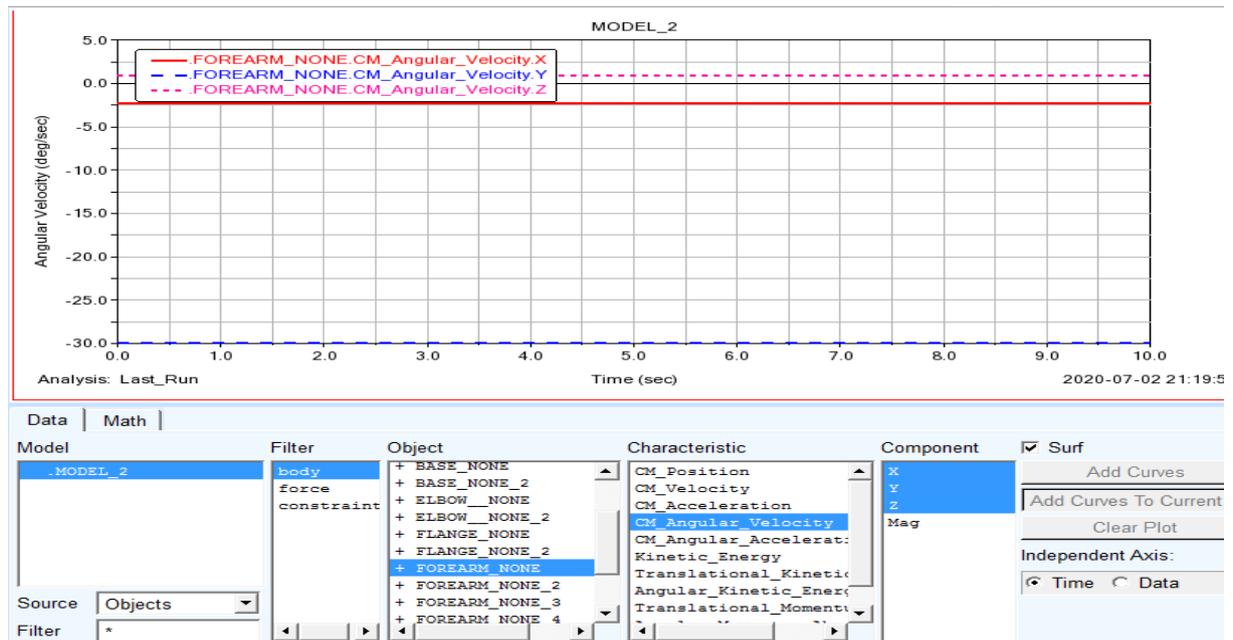


Figure 2.25 L'accélération de l'effecteur terminal du robot RX90.



**Figure 2.26** La vitesse angulaire de l'effecteur terminal du robot RX90.

➤ *Simulation du robot Stäubli modifié :*

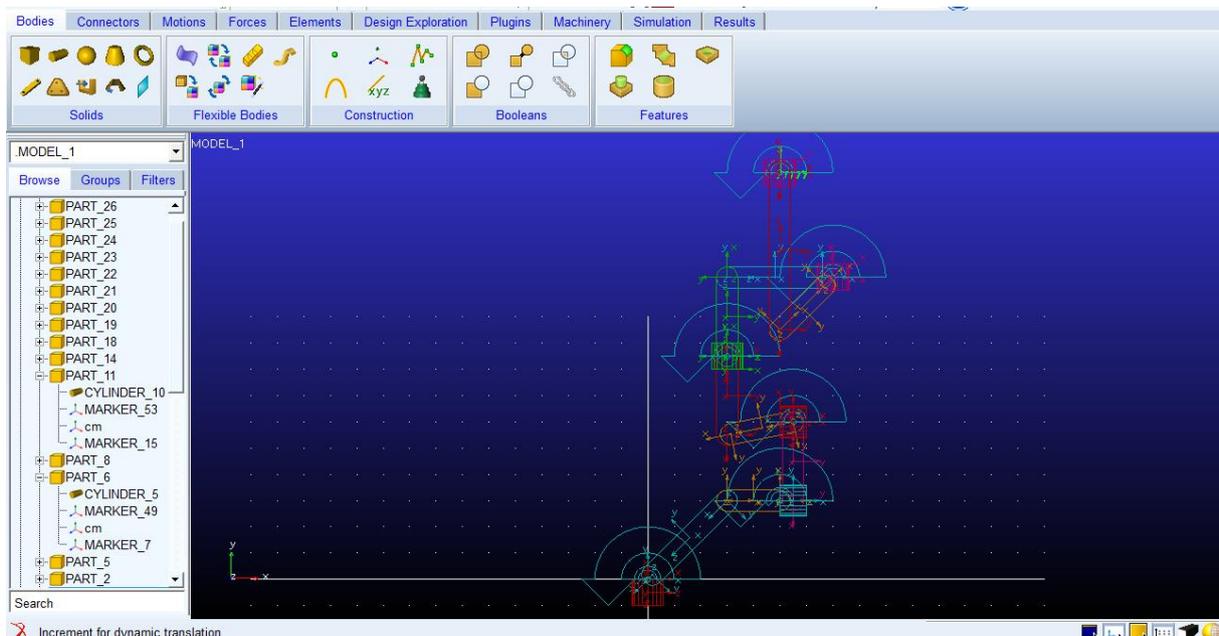
Le processus de prototypage virtuel dans ADAMS du notre robot esclave comprend les étapes suivantes :

- Construction du modèle en utilisant : des corps, des forces, des contacts, des articulations, des générateurs de mouvement.
- Teste du modèle en utilisant : des mesures, des simulations, animations.
- Validation du modèle par : l'importation de données de test, la superposition des données d'essai.
- Itération du modèle par des variations en utilisant : paramétrage, variables de conception.

Tout d'abord, nous allons construire le modèle cinématique du robot, qui contient les corps (également appelés parties ou éléments cinématiques) du robot, connectés par les articulations tournantes et les paramètres géométriques spécifiques au mécanisme, les entrées du modèle correspondent aux restrictions cinématiques provenant des générateurs de mouvement qui contrôlent la position ou la vitesse de l'effecteur terminal. Ensuite, nous effectuerons une

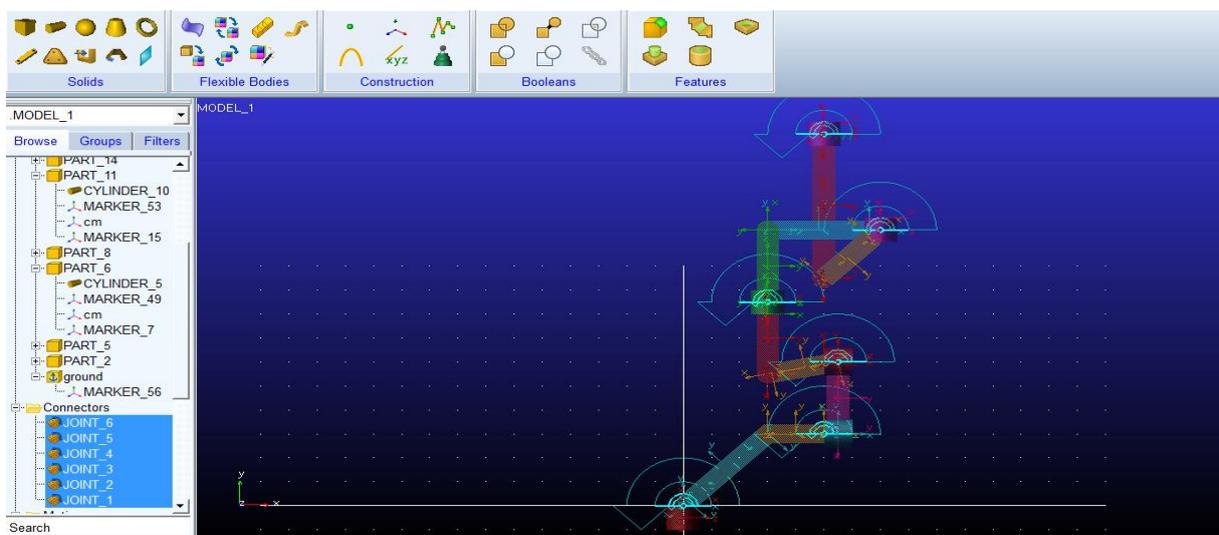
simulation cinématique, nous animerons les résultats de la simulation et nous tracerons les valeurs des résultats de la simulation.

Les corps du robot sont conçus, les points caractéristiques nécessaires (paramètres géométriques spécifiques au mécanisme, les emplacements des joints) sont ensuite créés comme on peut le voir sur la figure 2.27.



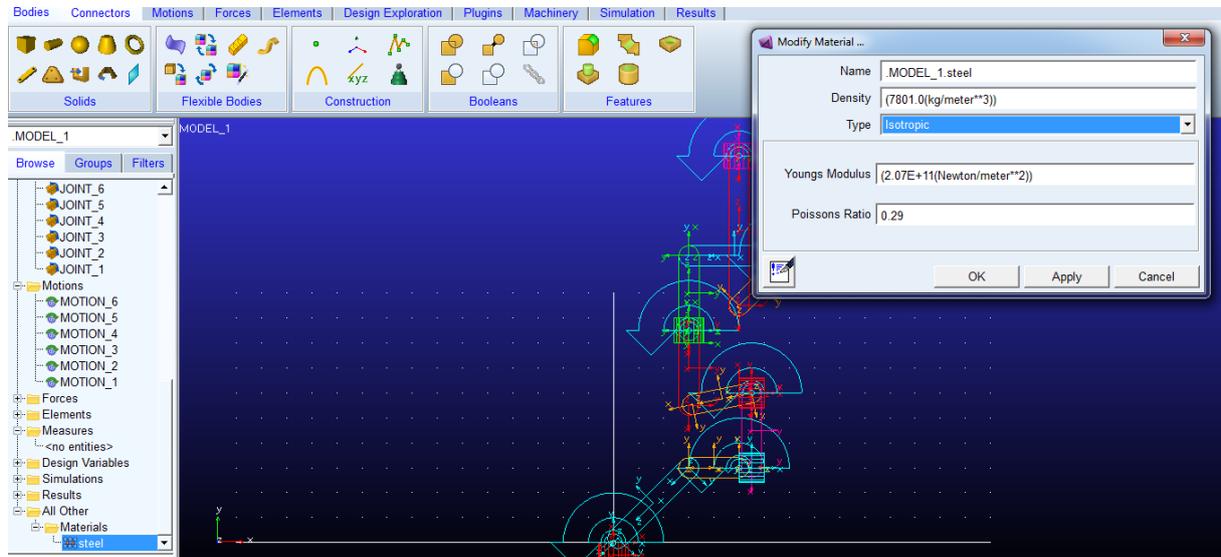
**Figure 2.27** Création des points caractéristiques du robot Staubli modifié.

Ensuite, les éléments cinématiques sont reliés par six articulations tournantes, et le robot est fixé au sol, comme dans la figure 2.28.



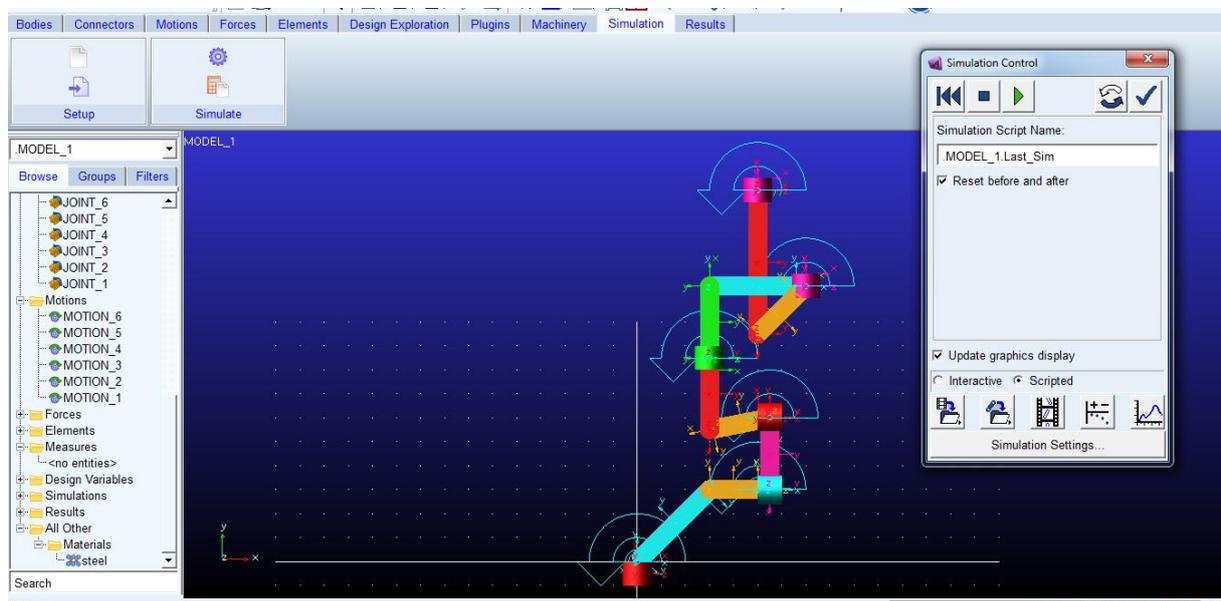
**Figure 2.28** Création des liens d'articulations pour le robot Staubli modifié.

Le matériau à partir duquel le robot est fabriqué est sélectionné (steel), ce qui permet d'obtenir la masse et l'inertie et les propriétés des éléments constitutifs.



**Figure 2.29** Sélection du matériel pour le robot Stäubli modifié.

En utilisant le module d'animation, la trajectoire du « PART 25 », appartenant à l'effecteur final est observée après une simulation de 10s, dans la figure 2.30.



**Figure 2.30** Simulation du robot Stäubli modifié.

➔ Analyse cinématique du robot :

L'objectif de la cinématique est de décrire le mouvement du robot sans prendre en compte les forces et les couples à l'origine du mouvement.

Il existe deux types d'analyse cinématique, l'analyse cinématique directe et l'analyse cinématique inverse. Dans ce travail, nous ferons une analyse cinématique simple directe, dans laquelle nous tracerons la position et l'orientation de l'effecteur final, sa vitesse et son accélération, sous les générateurs de mouvement imposés de ces six articulations révolues.

Dans les quatre figures suivantes, nous présentons les graphiques de variation de certains paramètres cinématiques de l'effecteur final après la simulation, la position (figure 2.31), la vitesse (figure 2.32), l'accélération (figure 2.33), et la vitesse angulaire (figure 2.34) .

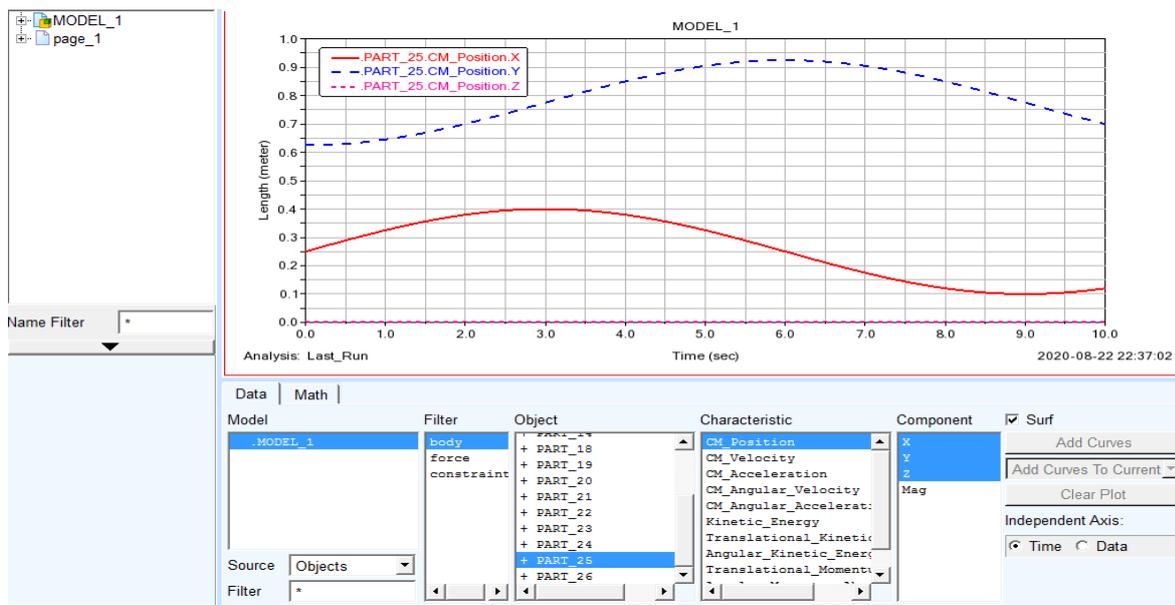


Figure 2.31 Position de l'effecteur terminal du robot Stäubli modifié.

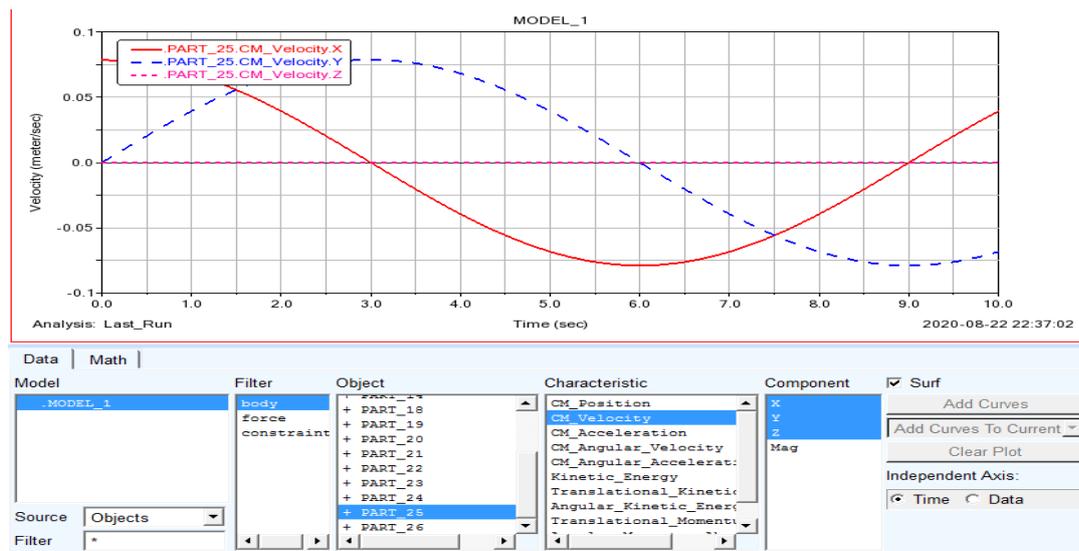


Figure 2.32 La vitesse de l'effecteur terminal du robot Stäubli modifié.

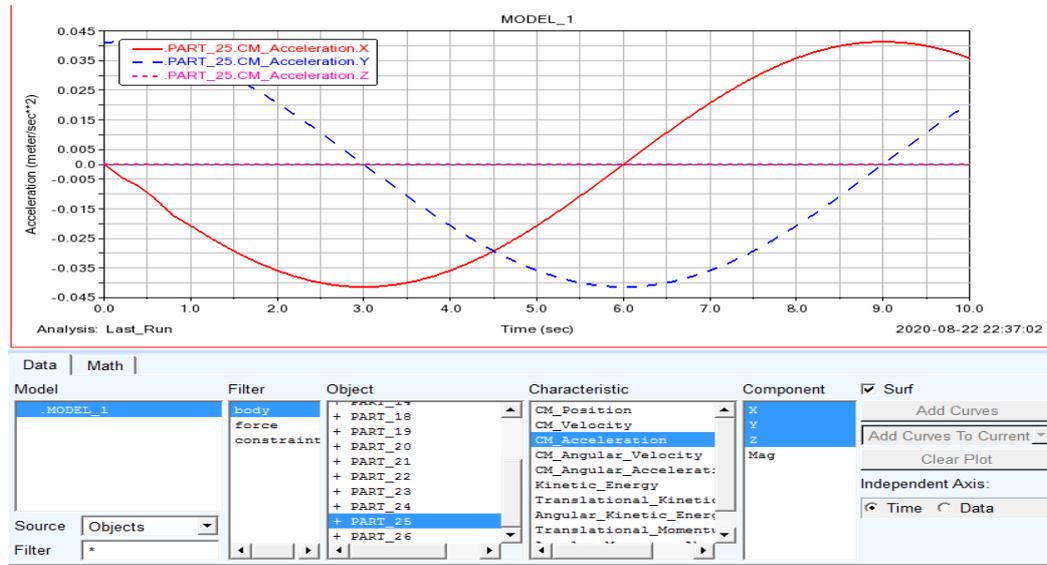


Figure 2.33 L'accélération de l'effecteur terminal du Stäubli modifié.

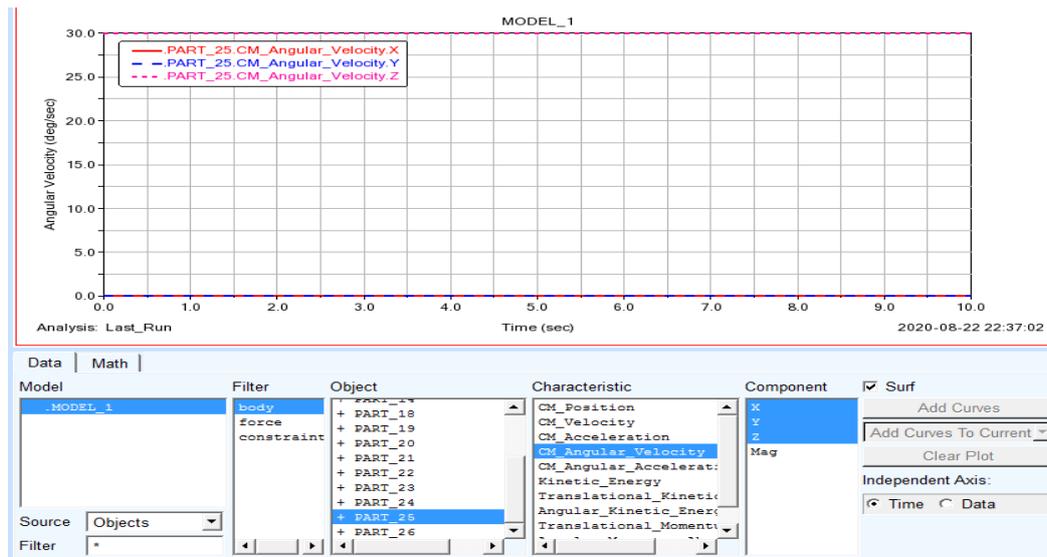


Figure 2.34 La vitesse angulaire de l'effecteur terminal du Stäubli modifié.

## 2.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, la modélisation et la simulation du robot maître et esclave ont été réalisées à l'aide de logiciel ADAMS. Les paramètres de Denavit-Hartenberg et d'inertie du robot esclave Stäubli modifié ainsi une analyse cinématique, géométrique et une optimisation du mouvement du robot PHANTOM Omni ont été exploitées, afin de nous aider dans l'analyse de la stabilité du système de télé opération dans le chapitre suivant.

---

# *Chapitre 3*

### **3 Chapitre3 : Transparence et stabilité du schéma de télé opération.**

#### **3.1 Introduction :**

Le corps humain représente une architecture très compliquée, fine et délicate. Lors d'une intervention chirurgicale invasive, les interactions s'effectuent avec des tissus mous comme les muscles et les veines, etc..., mais aussi avec des tissus rigides comme le sternum, les côtes, etc...

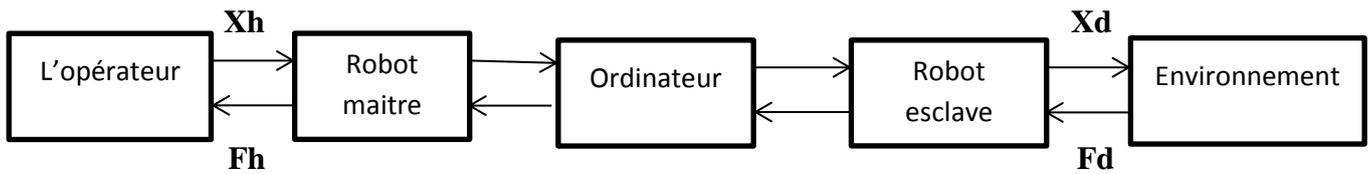
La synthèse d'un système de télé opération doit tenir compte de ces interactions pour garantir plus de précision, fiabilité et de stabilité accrue face à des situations complexes et qui nécessitent une grande agilité.

La stabilité d'un système de télé opération représente un critère de performance et une nécessité de fonctionnement primordiale tant que système dynamique, défini par le fait qu'un mouvement ou bien un effort réalisé par le système maître, résulte un mouvement ou un effort réalisé par le manipulateur esclave au niveau de l'environnement distant.

Dans les systèmes de télé opération, les interfaces haptiques assurent un lien entre les opérateurs humains et l'environnement réel distant. L'opérateur du système de télé opération pilote un dispositif haptique pour fournir les commandes de trajectoire en temps réel pour le robot esclave tandis que le robot esclave interagit avec l'environnement pour renvoyer les forces de rétroaction haptiques à l'opérateur humain. Si le robot esclave suit parfaitement la trajectoire du dispositif haptique maître et le dispositif haptique principal fournit idéalement la force de contact esclave/environnement à l'opérateur humain, le système est dit transparent.

Dans ce chapitre, on va proposer une architecture de contrôle pour améliorer la transparence du système en obtenant une bonne performance de suivi de la force, tout en compensant simultanément les perturbations de la main humaine et les bruits des capteurs du système étudié.

### 3.2 Représentation :



Un système de télé opération peut être modélisé par un réseau à deux ports sous une forme hybride reliant la force de l'opérateur  $Fh$  et sa position  $Xh$  aux variables de force  $Fd$  et position  $Xd$  du robot esclave.

Ce réseau est décrit par la relation [Hannaford, 1989a]

$$\begin{pmatrix} Fh \\ Xh \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h11 & h12 \\ h21 & h22 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Fd \\ Xd \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

$h12$  représente la capacité du schéma de télé opération à transmettre les efforts appliqués par le robot esclave et  $h21$  est la capacité du manipulateur esclave à suivre les mouvements du dispositif haptique. Quant à  $h11$  et  $h22$ , ils représentent respectivement l'impédance mécanique du site maître et l'admittance mécanique du site esclave.

### 3.3 La stabilité des systèmes linéaires :

La stabilité du système de télé opération peut être analysée par l'architecture de contrôle à quatre canaux [Lawrence, 1993], qui comprend les quatre types de transmission de données entre le maître et l'esclave : force et vitesse dans les deux sens. Il est démontré qu'une utilisation correcte des quatre canaux est d'une importance capitale pour obtenir une télé opération de haute performance dans le sens d'une transmission précise des impédances de tâche à l'opérateur. Cependant, ce système de contrôle nécessite des modèles linéaires précis de l'appareil maître, du robot esclave, de l'opérateur humain et de l'environnement pour garantir la transparence, ce qui n'est pas réaliste dans le monde réel. Certains schémas de contrôle ont été proposés pour les systèmes de télé opération linéaires, un schéma de contrôle adaptatif basé sur une architecture de force et de position sans aucune connaissance des paramètres du robot esclave et de la dynamique de l'environnement est proposé par [Lee and Chung, 1998], une autre approche de conception à deux canaux où la transparence est assurée par l'utilisation d'un filtre de mise en forme de boucle incorporé sur la commande de mouvement maître-esclave proposée par [Fite et al., 2001]. Cependant, il existe de nombreux obstacles à surmonter pour maintenir une bonne transparence de la télé opération, tels que les problèmes de stabilité liés au délai de communication, le contact entre le robot esclave et l'environnement et les perturbations de la dynamique de l'appareil haptique, etc. Le retard de communication dans le système de télé opération détériore la stabilité et la transparence [Seo et al., 2011]. Un contrôle du suivi adaptatif peut compenser ce retard [Niemeyer and Slotine, 1991].

Les télé opérations haptiques sont plus efficaces lorsque l'opérateur humain ressent les forces de contact esclave/environnement, et non celles provenant de la structure du dispositif

haptique ou des bruits des capteurs. Deux principales techniques de contrôle de la force peuvent être utilisées pour améliorer la stabilité du système de télé opération, le contrôle d'impédance et le contrôle d'admittance [Abdossalami and Sirouspour, 2008]. Dans la méthode de contrôle de la force d'impédance l'interface haptique est par nature légèrement construite et peut-être fortement rétro conduite. Elle est généralement utilisée lorsque l'environnement simulé est très sensible, comme c'est le cas pour les tissus humains dans les simulateurs chirurgicaux [Frisoli et al., 2004]. Et la méthode de contrôle d'admittance est utilisée pour manipuler des contraintes rigides (contact simulé avec des objets rigides et lourds). La méthode de contrôle d'admittance est adaptée aux systèmes qui sont fortement orientés et qui fournissent des forces élevées aux effecteurs finaux.

Après les premiers travaux sur le contrôle de l'impédance par Hogan (Hag, n.d.), de nombreuses études ont été réalisées dans ce domaine, tels que le contrôle robuste de l'impédance [Lu and Goldenberg, 2016], et le contrôle d'impédance hybride qui dépend fondamentalement des caractéristiques de l'environnement [Anderson and Spong, 1988].

Certaines stratégies de contrôle de l'impédance adaptative ont été proposées pour compenser la dynamique non modélisée des robots et leurs délais et qui utilisent des mesures de position et de force de l'utilisateur pour remplacer la dynamique naturelle de l'interface haptique par celle d'un outil à amortisseur de masse réglable [Abdossalami and Sirouspour, 2009].

### 3.4 L'architecture de contrôle :

Dès que le robot esclave du système de télé opération entre en contact avec un objet situé dans l'environnement distant, l'opérateur doit être renseigné sur la nature du manipulateur distant et celui de l'objet.

L'état de ce dernier est obtenu à travers l'impédance transmise à l'opérateur par le schéma de télé opération. Si cette impédance ne tient pas en compte l'objet de contact, l'opérateur ressent des fausses informations qui peuvent entraîner une mauvaise manipulation.

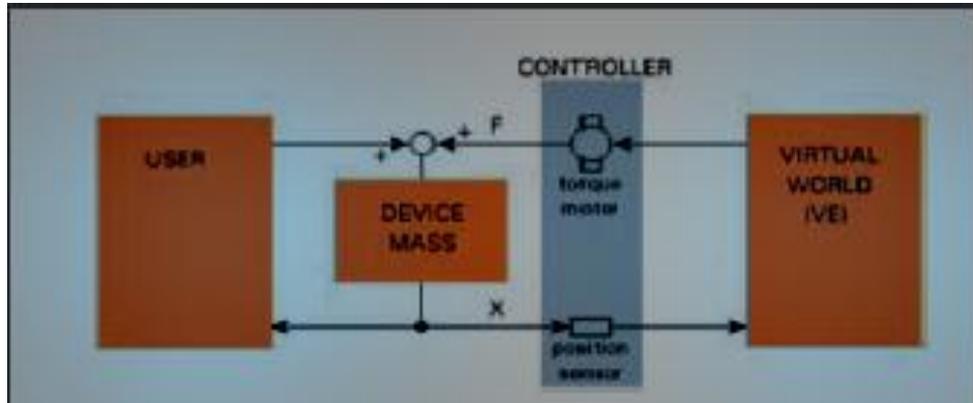
La transparence parfaite d'un schéma de télé opération est définie par une égalité des positions et des efforts [Yokokohji and Yoshikawa, 1994] :

$$\forall t : \begin{cases} Xh(t) = Xd(t) \\ Fh(t) = Fd(t) \end{cases} \quad (3. 2)$$

Dans le cas idéal, l'impédance transmise à l'opérateur doit être égale à l'impédance de l'environnement.

Dans notre travail, un modèle de contrôle d'impédance avec une architecture de retour de force est développé et analysé pour l'étude de la stabilité du système de télé opération.

Dans le schéma de contrôle de l'impédance, le dispositif haptique détecte le mouvement commandé par l'opérateur et contrôle la force générée.



**Figure 3.1** Architecture de contrôle d'impédance [Behzadpour et al., 2011].

Les articulations de dispositif haptique sont tout d'abord envoyées au module cinématique direct du contrôleur maître pour déterminer la position de l'effecteur terminal. La position est ensuite envoyée au contrôleur du bras esclave. Le contrôleur du bras esclave passe les forces détectées dans l'environnement distant, au bras maître. La commande de force est mappée à l'aide d'un Jacobien vers un ensemble de couples souhaités à produire par le dispositif haptique.

Un contrôleur d'impédance avec retour de force est illustré dans la figure 3.2. Dans ce diagramme, la dynamique linéarisée du dispositif haptique est représentée par  $j_{Zh}$  qui est la relation entre les couples et l'ensemble d'articulations.

Selon [Carignan and Cleary, 2000], la matrice d'impédance articulaire  $j_{Zh}$  est donnée par :

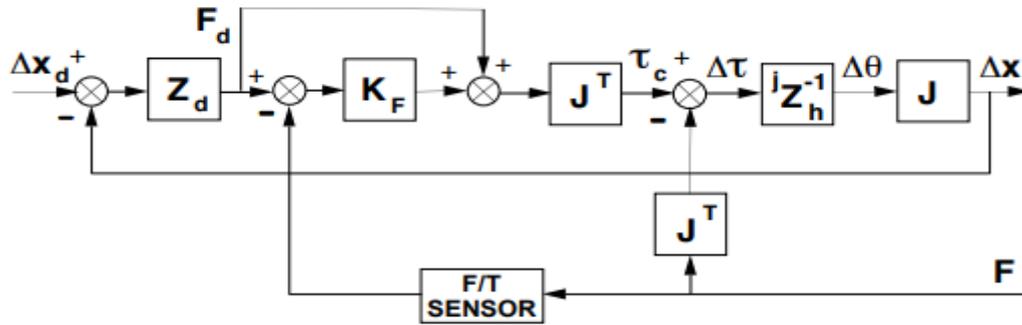
$$j_{Zh} = \frac{\Delta\theta}{\Delta\tau} \quad (3.3)$$

Où  $\Delta\theta = |\theta_c - \theta|$  : est l'écart entre le vecteur d'angle d'articulation commandé  $\theta_c$  et le vecteur d'angle d'articulation de dispositif haptique  $\theta$ .

$\Delta\tau = |\tau_c - \tau_d|$  : indique l'écart entre le vecteur de couple commandé  $\tau_c$  et vecteur du couple souhaité  $\tau_d$ .

Le contrôleur prend la différence entre la position souhaitée  $\Delta x_d \equiv x_d - x_o$ , et la position réelle de l'interface haptique  $\Delta x \equiv x - x_o$ , et la multiplie par l'impédance environnementale souhaitée  $Z_d$ , pour générer une commande de force souhaitée  $F_d$ . La force commandée est ensuite convertie en un ensemble de couples souhaités à l'aide du Jacobien,  $J$ , qui sont ensuite appliquées au dispositif haptique.

Le retour de force est utilisé pour fermer la boucle sur la force souhaitée générée par le contrôleur.



**Figure 3.2** Contrôleur d'impédance avec retour de force en boucle fermée [Carignan and Cleary, 2000].

La dépendance de l'erreur d'impédance par rapport au gain de force peut être trouvée à l'aide du schéma fonctionnel de control d'impédance de la figure 3.2. Les relations suivantes sont obtenues à partir du contrôleur d'impédance :

$$\Delta x = J^j Z_h^{-1} (\tau_c - J^T F) \quad (3.4)$$

$$\tau_c = J^T [F_d + K_F (F_d - F)] \quad (3.5)$$

$$F_d = Z_d (\Delta x_d - \Delta x) \quad (3.6)$$

Fixant  $\Delta x_d = 0$ , à partir des équations précédentes, l'impédance en boucle fermée peut être déterminée comme suit :

$$Z_{h_{cl}} = Z_d + (I + K_F)^{-1} Z_h \quad (3.7)$$

Où P est la dimension de l'espace cartésien et I est la matrice d'identité de dimension P\*P.

Avec

$$Z_h = J^{-T} j Z_h J^{-1} \quad (3.8)$$

J : est la matrice jacobienne du dispositif haptique.

$J^T$  : est la transposé de la matrice jacobienne.

F : le vecteur de force à la sortie du schéma de contrôle.

$F_d$  : le vecteur de force désiré à la sortie du schéma de contrôle.

$Z_d$  : l'impédance environnementale désirée.

$Z_h$  : l'impédance en boucle ouverte.

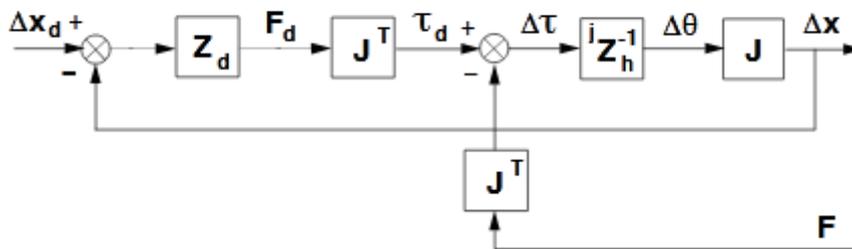
KF : le gain de force.

Les erreurs dues à la dynamique du dispositif haptique sont inversement proportionnelles au gain de force KF.

➤ Si le gain de force est réglé à zéro  $KF=0$ , le contrôleur d'impédance avec retour de force revient à la méthode de calcul d'impédance en boucle ouverte, et l'impédance en boucle fermée sera donc :

$$Z_{h_{cl}} = Z_d + Z_h \quad (3.9)$$

Selon [Carignan and Cleary, 2000], le contrôleur d'impédance en boucle ouverte est présenté dans le schéma fonctionnel suivant :



**Figure 3.3** Contrôleur d'impédance en boucle ouverte [Carignan and Cleary, 2000].

A partir du diagramme on peut déduire les équations suivantes :

$$\Delta x = J^i Z_h^{-1} (J^T F_d - J^T F) \quad (3.10)$$

$$F_d = Z_d (\Delta x_d - \Delta x) \quad (3.11)$$

Remplaçant (3.11) et (3.8) dans (3.10), l'équation de  $\Delta x$  sera donc :

$$\Delta x = Z_h^{-1} (Z_d (\Delta x_d - \Delta x) - F) \quad (3.12)$$

Supposant que  $\Delta x_d = 0$ , alors :

$$[Z_h + Z_d] \Delta x = -F \quad (3.13)$$

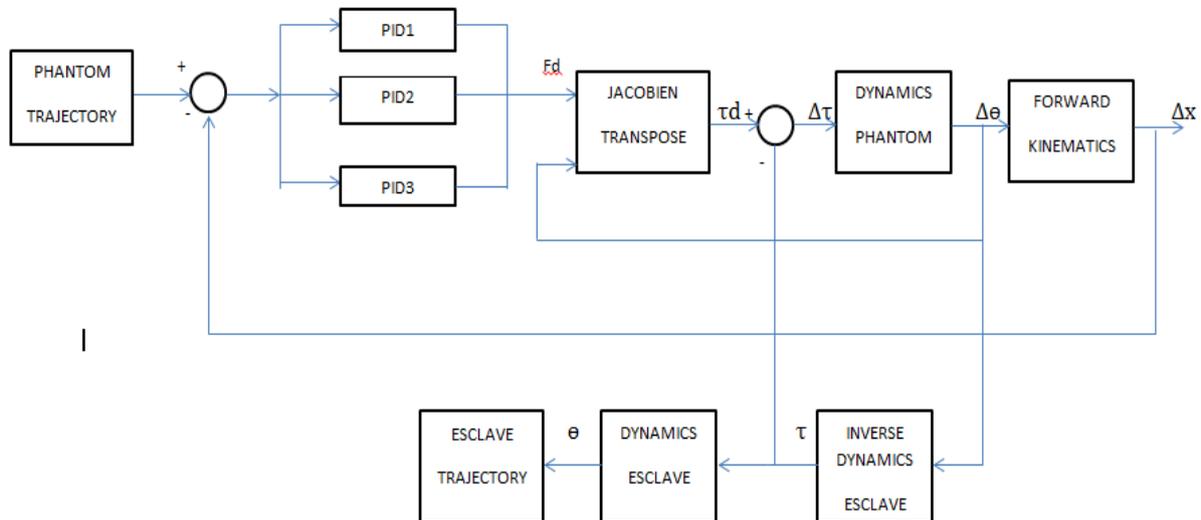
A partir de l'équation (3.9), on peut déduire que l'impédance en boucle ouverte n'est qu'une différence entre l'impédance désirée et l'impédance en boucle fermée.

➤ Si le gain de force est suffisamment important  $KF=\infty$ , l'impédance en boucle fermée ressentie par l'utilisateur sera la suivante :

$$Z_{h_{cl}} = Z_d \quad (3.14)$$

### 3.5 Le contrôleur d'impédance dans MATLAB/SIMULINK :

Basant sur le schéma fonctionnel de contrôle d'impédance, on a pu développer le modèle MATLAB suivant :



**Figure 3.4** Architecture de contrôle d'impédance développée dans MATLAB/SIMULINK.

Ce contrôleur bilatéral a été développé dans MATLAB pour contrôler le robot esclave avec le robot maître. Les informations de position du PHANTOM Omni sont transmises au contrôleur pour contrôler le robot esclave, puis la force est générée, sur la base du modèle environnemental incarné par l'amortissement  $B$ , la rigidité  $K$  et les positions de l'outil dans l'environnement distant. Un contrôleur PID est intégré pour fermer la boucle sur la force souhaitée. Ensuite, la force commandée  $F_d$  est convertie en couple commandé  $\tau_d$  avec la transposée de la matrice jacobienne et le couple généré est appliqué au modèle dynamique de dispositif haptique.

Au début, on suppose que l'effecteur final de dispositif haptique est au point d'équilibre et n'a pas de contact. Lorsque l'opérateur humain commence à faire bouger le PHANTOM Omni, une force d'interaction est générée dans le site esclave et un écart par rapport à la position d'équilibre est observé dans le site maître. Cette relation a la forme d'une impédance mécanique qui dépend directement des propriétés physiques de l'environnement distant. Dans ce cas, la déviation du mouvement par rapport au point d'équilibre est détectée et une force est renvoyée à l'opérateur humain. Ce processus est la première tâche du contrôleur haptique mais, en plus de cela, l'effet dynamique du dispositif haptique doit être pris en compte dans le schéma de contrôle.

Les effets de l'inertie du PHANTOM Omni, de la friction des articulations et des forces de Coriolis/centrifuges peuvent être ignorés dans le cas statique, mais dans le cas dynamique, ces effets peuvent être significatifs et peuvent dissimuler les propriétés physiques de l'environnement distant. Une conception idéale de l'interface haptique devrait transférer à

l'opérateur humain les propriétés physiques exactes de l'environnement et ne pas les combiner avec l'effet de la dynamique du robot.

Le modèle dynamique du manipulateur série PHANTOM Omni, avec toutes les articulations tournantes actionnées décrites dans [Cruz-Valverde et al., 2010] est donné comme suit :

$$H(\theta)\dot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\ddot{\theta} + G(\theta) = \tau \quad (3.15)$$

$\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$  désigne les vecteurs de position, de vitesse et d'accélération articulaires respectivement.  $H(\theta)$  est la matrice d'inertie,  $C(\theta, \dot{\theta})$  représente le vecteur des forces de Coriolis et centrifuges.  $G(\theta)$  vecteur des forces de gravité et  $\tau$  représente le vecteur couple.

$$\begin{bmatrix} h_{11} & 0 & 0 \\ 0 & h_{22} & h_{23} \\ 0 & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & 0 & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \tau g_2 \\ \tau g_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Les éléments de la matrice d'inertie :

$$h_{11} = \{(0.5L_1^2 + 0.125L_2^2)ma + (0.125L_1^2 + 0.5L_3^2)mc\} + 0.125L_1^2(4ma + mc) \cos(2\theta_2) + h_{11}'$$

$$h_{11}' = -0.125(L_2^2ma + 4L_3^2mc) \cos(2\theta_3) + 0.125(L_2ma + L_3mc) \cos(\theta_2) \sin(\theta_3)$$

$$h_{22} = L_1^2(ma + 0.25mc)$$

$$h_{23} = -0.5L_1(L_2ma + L_3mc) \sin(\theta_2 - \theta_3)$$

$$h_{32} = h_{23}$$

$$h_{33} = 0.25L_2^2ma + L_3^2mc$$

Les éléments de la matrice de Coriolis :

$$c_{11} = 0.25\{-2\sin(\theta_2)[L_1^2(4ma + mc) \cos(\theta_2) + 2L_1(L_2ma + L_3mc) \sin(\theta_3)]\dot{\theta}_2\} + c_{11}'$$

$$c_{11}' = 0.25\cos(\theta_3)\{2L_1(L_2ma + L_3mc) \cos(\theta_2) + (L_2^2ma + 4L_3^2mc) \sin(\theta_3)\}\dot{\theta}_3$$

$$c_{12} = -0.25\{L_1^2(4ma + mc) \sin(2\theta_2) + 2L_1(L_2ma + L_3mc) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3)\}\dot{\theta}_1$$

$$c_{13} = -0.125\{-4L_1(L_2ma + L_3mc) \cos(\theta_2) \cos(\theta_3) - (L_2^2ma + 4L_3^2mc) \sin(2\theta_3)\}\dot{\theta}_1$$

$$c_{21} = -c_{12}$$

$$c_{23} = 0.5L_1(L_2ma + L_3mc) \cos(\theta_2 - \theta_3) \dot{\theta}_3$$

$$c_{31} = -c_{13}$$

$$c_{33} = 0.5L_1(L_2ma + L_3mc) \cos(\theta_2 - \theta_3) \dot{\theta}_2$$

Les éléments du vecteur des forces gravitationnelles :

$$\tau g_1 = 0$$

$$\tau g2 = g\{L1(ma + 0.5mc) + L5mbe\}\cos(\theta2)$$

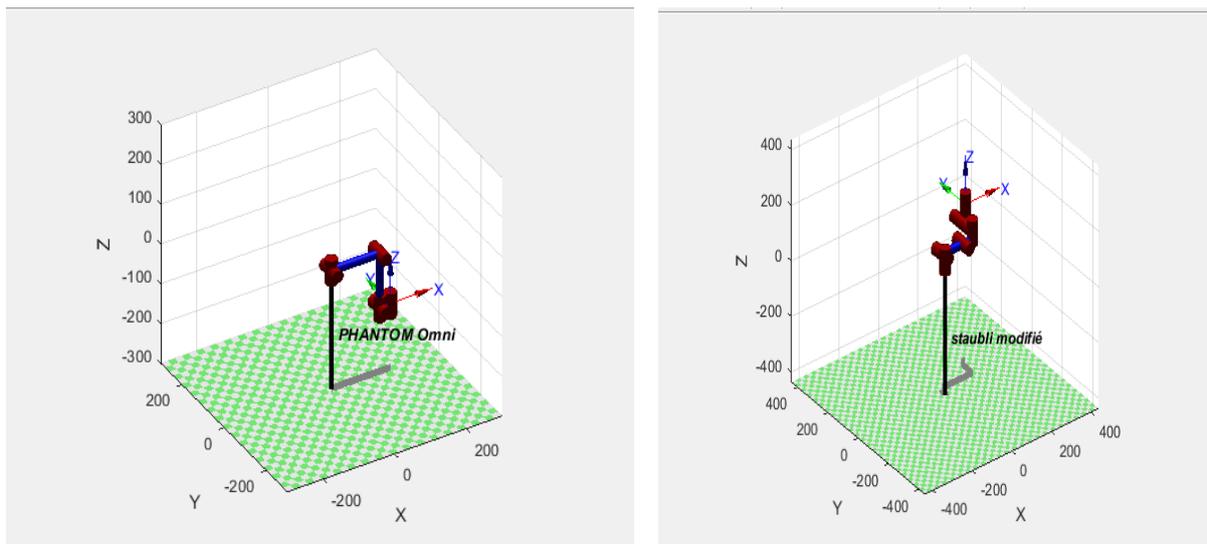
$$\tau g3 = g\{0.5L2ma + L3mc - L5mdf\}\sin(\theta3)$$

Paramètres	Valeurs	Unités
ma	$17.5 \cdot 10^{-3}$	Kg
mc	$10.4 \cdot 10^{-3}$	Kg
mbe	0.2214	Kg
mdf	0.1106	Kg
L1	13.5	cm
L2	13.5	cm
L3	2.5	cm
L4	1.7	cm
L5	0.5	cm
g	9.81	m/s <sup>2</sup>

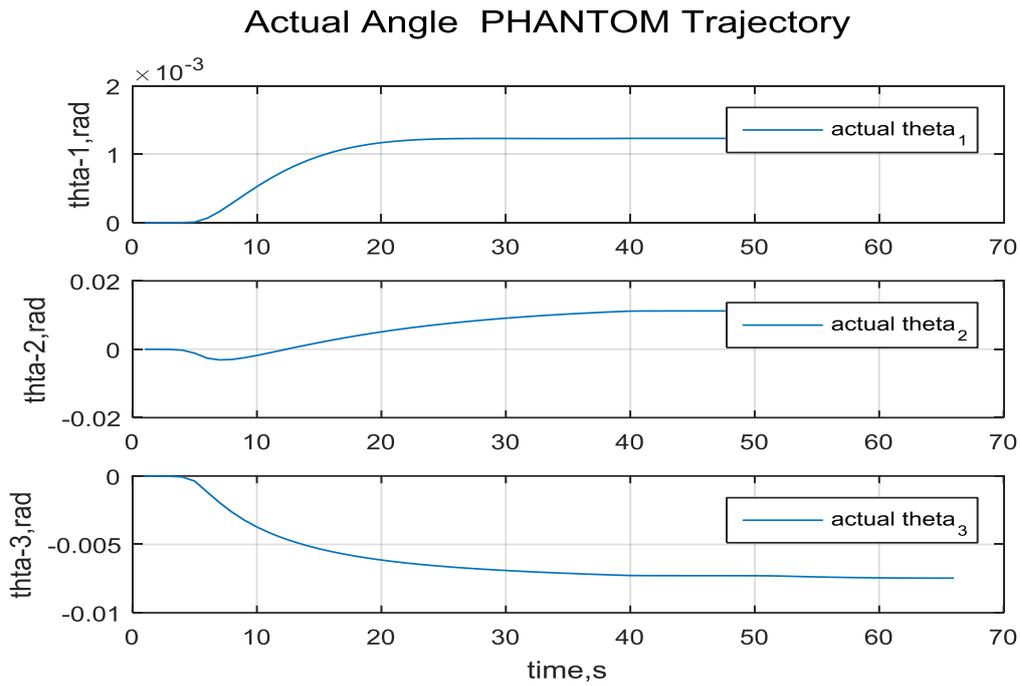
**Tableau 3.1** Les paramètres de PHANTOM Omni [Cruz-Valverde et al., 2010].

### 3.6 Résultats et discussions :

Une conception et une mise en œuvre d'un modèle cinématique pour le bras maître PHANTOM Omni et esclave est développée dans MATLAB.



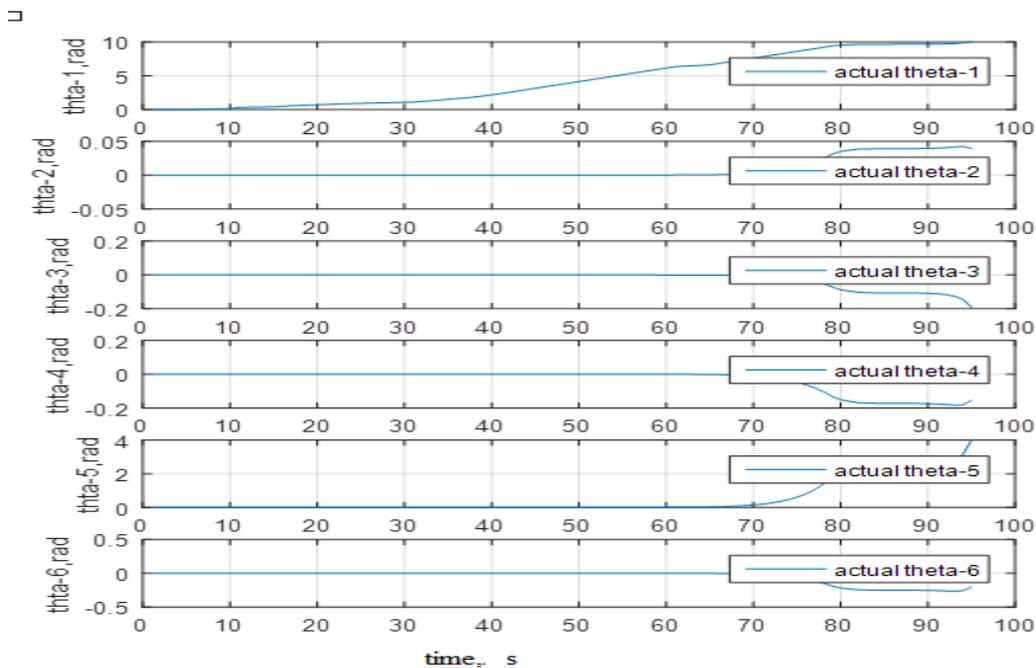
**Figure 3.5** configuration de PHANTOM Omni. **Figure 3.6** configuration du robot esclave.



**Figure 3.7** Trajectoire de dispositif haptique ( $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ).

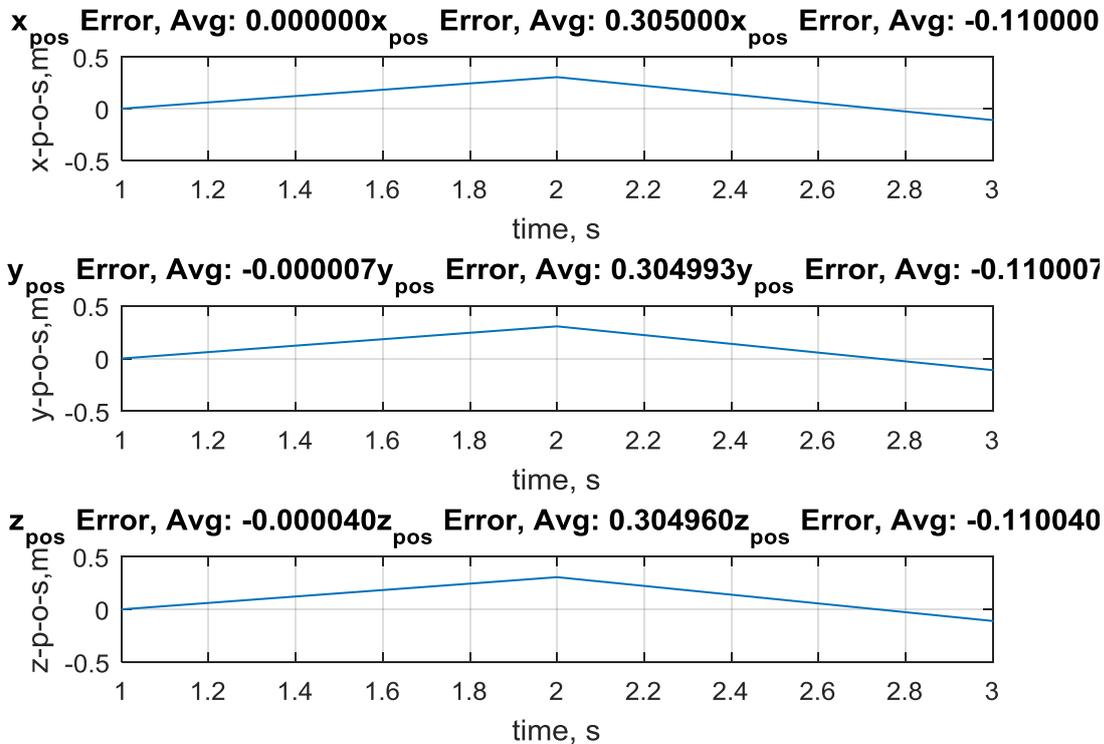
L'objectif de simuler le dispositif haptique est de déterminer la position de l'effecteur final du robot en fonction des angles articulaires, la trajectoire de robot maître (figure 3.7) est utilisée comme entrée du contrôleur du système de télé opération.

La sortie du schéma de contrôle définit la trajectoire du robot esclave simulé dans MATLAB.



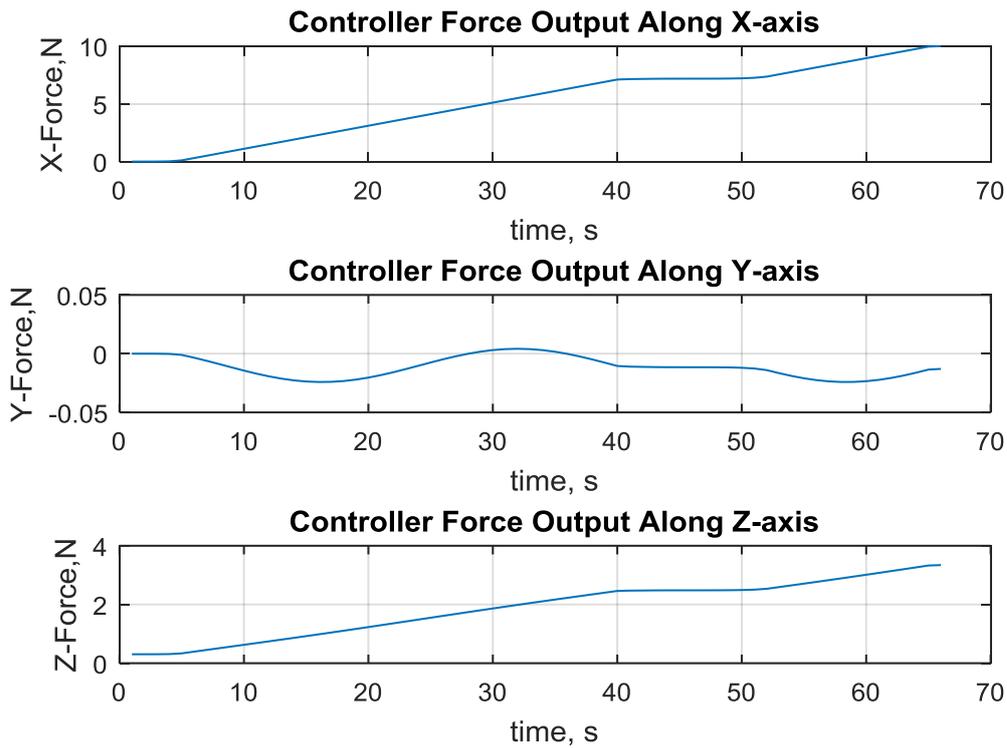
**Figure 3.8** Trajectoire du robot esclave ( $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ ).

Sur la figure3.9, il est possible de constater que le système est stable et le taux d'incertitude moyen est dans les limites, malgré les erreurs structurelles de modélisation.



**Figure 3.9** Erreurs de poursuite lors d'une télé opération suivant la direction  $x$ , suivant la direction  $y$  et suivant la direction  $z$ .

Trois contrôleurs PID ont été conçus dans le modèle où les gains ont été bien réglés et choisis. Dans les développements théoriques exposés précédemment, nous avons considéré que le système esclave à commander était formé d'un robot portant un capteur d'effort et en contact avec un environnement. Lors d'une télé-opération simulée dans MATLAB, le modèle établi ne représente plus exactement le système réel à commander. Ceci explique la mauvaise estimation des efforts mesurés (le graphique de la force de contact de rétroaction ne montre pas beaucoup de vibrations de fréquences).



**Figure 3. 10** Efforts mesurés lors d'une télé-opération : efforts suivant la direction  $x$ , efforts suivant la direction  $y$  et efforts suivant la direction  $z$ .

### 3.7 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre un schéma de control d'impédance dans MATLAB pour l'analyse de la stabilité et la transparence du schéma de télé opération avec retour d'effort.

Cette étude repose sur la réalisation du diagramme de control d'impédance présenté dans la littérature. Les résultats obtenus mettent en évidence un certain nombre de limitations. En effet, d'abord la transparence du schéma de télé opération dépend de la consigne de force d'interaction avec l'environnement distant qui s'ajoute au modèle dynamique du robot esclave. En absence de l'ensemble de forces d'interaction avec l'environnement distant, la stabilité de la commande en effort se dégrade considérablement. De plus, les erreurs d'estimation des paramètres du modèle dynamique du dispositif maitre et esclave.

Ce contrôleur aurait pu être plus précis s'il a été validé sur une plate-forme expérimentale ou un capteur de forces d'interaction d'aiguille avecle tissu est ajouté.

---

# *Conclusion générale*

## Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons proposé un schéma de télé opération avec retour d'effort basé sur une architecture position-force avec une commande en effort pour un robot esclave en contact avec l'environnement distant.

Un dispositif haptique PHANTOM Omni est utilisé comme étant le robot principal dans la station maître et un robot de six degrés de liberté de la famille Staubli est utilisé comme étant le robot esclave qui répond aux contraintes de l'application médicale de la chirurgie mini invasive dans l'environnement distant.

Une étude de différentes possibilités de modélisation du robot maître PHANTOM Omni (géométrique, cinématique ou dynamique) a permis de déterminer les valeurs articulaires de telle façon que la structure robotique puisse s'adapter facilement à la surface du travail.

En plus, un modèle dynamique du robot esclave a été retenu. Ce modèle permet de calculer le couple de forces appliquées dans l'environnement distant.

Plusieurs simulations numériques ont été faites dans le logiciel ADAMS en ayant comme objectif l'évaluation du modèle géométrique et dynamique de robot maître PHANTOM Omni et robot esclave Staubli modifié.

L'étude de la technique de télémanipulation effectuée par le chirurgien lors de l'acte mini invasive a montré que le robot esclave doit reproduire fidèlement les gestes de l'opérateur dans le site maître, c'est pour cette raison une architecture de contrôle d'impédance est proposée afin d'imposer une transparence désirée tout en assurant des marges de stabilité satisfaisantes du système de télé opération. Cette dernière a été établie dans MATLAB. La validation des résultats sur la plate-forme du PHANTOM Omni-Staubli montre les performances de l'approche proposée.

Ce contrôleur de stabilité du système de télé opération n'est évidemment pas complet. Un essai expérimental est souhaité pour évaluer la pertinence de notre approche.

## Perspectives

Il est évident que le travail réalisé dans ce mémoire ne présente qu'une étape dans un projet à très long terme que représente la télé opération avec retour d'effort pour la chirurgie interventionnelle. Les résultats obtenus ouvrent des perspectives importantes pour faire bénéficier à cette pratique de la télé chirurgie avec retour de force parmi lesquelles les plus significatives sont les suivantes :

‡ Une validation de l'architecture de télé opération avec le contrôleur d'impédance sur une plate-forme expérimentale ou un capteur de force sera ajouté.

‡ L'architecture de télé opération devra encore être validée par des chirurgiens en considérant des tissus in-vivo et ex-vivo. Les chirurgiens possèdent une meilleure connaissance des

contacts avec les tissus et peuvent estimer les forces appliquées, leur avis sera important pour régler la transparence désirée du schéma de télé opération.

‡ Une étude et comparaison des différentes architectures utilisées pour le contrôle de la stabilité de système de télé opération.

---

# *Bibliographie*

---

## **Bibliographie :**

[Ahmed et al, 2018]: Ahmed, S.I., Javed, G., Mubeen, B., Bareeqa, S.B., Rasheed, H., Rehman, A., Phulpoto, M.M., Samar, S.S., Aziz, K., 2018. Robotics in neurosurgery: A literature review. *J Pak Med Assoc* 68, 7.

[Cenk Çavuşoğlu et al., 2003]; Cenk Çavuşoğlu, M., Williams, W., Tendick, F., Shankar Sastry, S., 2003. Robotics for telesurgery: second generation Berkeley/UCSF laparoscopic telesurgical workstation and looking towards the future applications. *Ind. Robot Int. J.* 30, 22–29. <https://doi.org/10.1108/01439910310457670>

[Degoulange et al., 1998]: Degoulange, E., Urbain, L., Caron, P., Boudet, S., Gariépy, J., Megnien, J.-L., Pierrot, F., Dombre, E., 1998. HIPPOCRATE: an intrinsically safe robot for medical applications, in: *Proceedings. 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Innovations in Theory, Practice and Applications (Cat. No.98CH36190)*. Presented at the *Proceedings. 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Innovations in Theory, Practice and Applications (Cat. No.98CH36190)*, pp. 959–964 vol.2. <https://doi.org/10.1109/IROS.1998.727423>

[James et al., 2018]: James, J., Davis, D., Gokulnath, K., Rao, R.B., 2018. Bilateral human-in-the-loop tele-haptic interface for controlling a robotic manipulator. *Int. J. Mechatron. Autom.* 6, 104. <https://doi.org/10.1504/IJMA.2018.094487>

[Kettenbach and Kronreif, 2014]: Kettenbach, J., Kronreif, G., 2014. Robotic systems for percutaneous needle-guided interventions. *Minim. Invasive Ther. Allied Technol.* 24, 1–9. <https://doi.org/10.3109/13645706.2014.977299>

Le Département projette d'acheter Da Vinci, un robot chirurgical de 1,8 million d'euros [WWW Document], 2019. . J. Est Éclair Abonné. URL <https://abonne.lest->

---

eclair.fr/id91630/article/2019-09-07/18-million-deuros-pour-lacquisition-dun-robot-chirurgical (accessed 7.13.20).

Lumni | Enseignement - Zeus, le robot chirurgical [WWW Document], n.d. . Lumni Enseign.  
URL <https://enseignants.lumni.fr/fiche-media/00000001007/zeus-le-robot-chirurgical.html>  
(accessed 12.30.19).

[Madhani et al., 1998]: Madhani, A.J., Niemeyer, G., Salisbury, J.K., 1998. The Black Falcon: a teleoperated surgical instrument for minimally invasive surgery, in: Proceedings. 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Innovations in Theory, Practice and Applications (Cat. No.98CH36190). Presented at the Proceedings. 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Innovations in Theory, Practice and Applications, IEEE, Victoria, BC, Canada, pp. 936–944.  
<https://doi.org/10.1109/IROS.1998.727320>

[Masuda et al, 2001]: Masuda, K., Kimura, E., Tateishi, N., Ishihara, K., 2001a. Three dimensional motion mechanism of ultrasound probe and its application for tele-echography system, in: Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (Cat. No.01CH37180). Presented at the RSJ/IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE, Maui, HI, USA, pp. 1112–1116.  
<https://doi.org/10.1109/IROS.2001.976317>

[Masuda et al., 2001b]:Masuda, K., Kimura, E., Tateishi, N., Ishihara, K., 2001b. Three dimensional motion mechanism of ultrasound probe and its application for tele-echography system, in: Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (Cat. No.01CH37180). Presented at the Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next

---

Millennium (Cat. No.01CH37180), pp. 1112–1116 vol.2.

<https://doi.org/10.1109/IROS.2001.976317>

[Pan et al. 2016]: Pan, B., Qu, X., Ai, Y., Fu, Y., Liu, C., 2016. Master–slave real-time control strategy in Cartesian space for a novel surgical robot for minimally invasive surgery. *Comput. Assist. Surg.* 21, 69–77. <https://doi.org/10.1080/24699322.2016.1240316>

(PDF) Robotic endoscopic surgery in a porcine model of the infant neck [WWW Document], n.d. URL

[https://www.researchgate.net/publication/227203277\\_Robotic\\_endoscopic\\_surgery\\_in\\_a\\_por\\_cine\\_model\\_of\\_the\\_infant\\_neck](https://www.researchgate.net/publication/227203277_Robotic_endoscopic_surgery_in_a_por_cine_model_of_the_infant_neck) (accessed 7.13.20).

[Shin et al., 2017]: Shin, J., Zhong, Y., Gu, C., 2017. Master-slave robotic system for needle indentation and insertion. *Comput. Assist. Surg.* 22, 100–105.

<https://doi.org/10.1080/24699322.2017.1379236>

[Stoianovici et al, 2003]: Stoianovici, D., Cleary, K., Patriciu, A., Mazilu, D., Stanimir, A., Craciunoiu, N., Watson, V., Kavoussi, L., 2003. Acubot: a robot for radiological interventions. *IEEE Trans. Robot. Autom.* 19, 927–930.

<https://doi.org/10.1109/TRA.2003.817072>

[Sugano, 2013]: Sugano, N., 2013. Computer-Assisted Orthopaedic Surgery and Robotic Surgery in Total Hip Arthroplasty. *Clin. Orthop. Surg.* 5, 1–9.

<https://doi.org/10.4055/cios.2013.5.1.1>

[Tadano and Kawashima, 2010a]: Tadano, K., Kawashima, K., 2010a. Development of a Master–Slave System with Force-Sensing Abilities using Pneumatic Actuators for

---

Laparoscopic Surgery. *Adv. Robot.* 24, 1763–1783.

<https://doi.org/10.1163/016918610X522559>

[Tadano and Kawashima, 2010b]: Tadano, K., Kawashima, K., 2010b. Development of a Master–Slave System with Force-Sensing Abilities using Pneumatic Actuators for Laparoscopic Surgery. *Adv. Robot.* 24, 1763–1783.

<https://doi.org/10.1163/016918610X522559>

[Troccaz, 2012] : Troccaz, J., 2012. *Robotique médicale*. Lavoisier.

[Yu et al, 2018]: Yu, F., Li, L., Teng, H., Shi, D., Jiang, Q., 2018. Robots in orthopedic surgery. *Ann. Jt.* 3, 15–15. <https://doi.org/10.21037/aoj.2018.02.01>

[Wagner et al, 2002]: Wagner, C.R., Stylopoulos, N., Howe, R.D., 2002. The role of force feedback in surgery: analysis of blunt dissection, in: *Proceedings 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. HAPTICS 2002*. Presented at the 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. HAPTICS 2002, IEEE Comput. Soc, Orlando, FL, USA, pp. 68–74.

<https://doi.org/10.1109/HAPTIC.2002.998943>

[Jiang et al., 2016a]: Jiang, Y., Yang, C., Wang, X., Su, C.-Y., 2016b. Kinematics modeling of Geomagic Touch X haptic device based on adaptive parameter identification, in: *2016 IEEE International Conference on Real-Time Computing and Robotics (RCAR)*. Presented at the 2016 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR), pp. 295–300. <https://doi.org/10.1109/RCAR.2016.7784042>

---

[Khalil et Dombre, 2012]: Modélisation, identification et commande des robots - Etienne Dombre... - Librairie Eyrolles, n.d.

[Hayn and Schwarzmam, 2009]: Hayn, H., Schwarzmam, D., 2009. Control Concept for a Hydraulic Mobile Machine Using a Haptic Operating Device. 2009 Second Int. Conf. Adv. Comput.-Hum. Interact. <https://doi.org/10.1109/ACHI.2009.43>

[Jarillo-Silva et al., 2009]: Jarillo-Silva, A., Domínguez-Ramírez, O., Parra-Vega, V., Ordaz, P., 2009. PHANToM OMNI Haptic Device: Kinematic and Manipulability 193–198. <https://doi.org/10.1109/CERMA.2009.55>

[Veras et al., 2009]: Veras, E., Khokar, K., Alqasemi, R., Dubey, R., 2009. Scaled telerobotic control of a manipulator in real time with laser assistance for ADL tasks, in: 2009 6th International Symposium on Mechatronics and Its Applications. Presented at the 2009 6th International Symposium on Mechatronics and its Applications, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISMA.2009.5164782>

[Waiboer et al., 2005]: Waiboer, R., Aarts, R., Jonker, B., 2005. Modelling and Identification of a Six Axes Industrial Robot. ASME Proc. 5th Int. Conf. Multibody Syst. Nonlinear Dyn. Control. <https://doi.org/10.1115/DETC2005-85088>

[Zhang et al., 2015]: Zhang, S., Guo, S., Gao, B., Hirata, H., Ishihara, H., 2015. Design of a Novel Telerehabilitation System with a Force-Sensing Mechanism. Sensors 15, 11511–11527. <https://doi.org/10.3390/s150511511>

[Abdossalami and Sirouspour, 2008]: Abdossalami, A., Sirouspour, S., 2008. Adaptive Control of Haptic Interaction with Impedance and Admittance Type Virtual Environments, in: Proceedings of the 2008 Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, HAPTICS '08. IEEE Computer Society, USA, pp. 145–152. <https://doi.org/10.1109/HAPTICS.2008.4479935>

---

[Anderson and Spong, 1988]: Anderson, R.J., Spong, M.W., 1988. Hybrid impedance control of robotic manipulators. *IEEE J. Robot. Autom.* 4, 549–556. <https://doi.org/10.1109/56.20440>

[Behzadpour et al., 2011]: Behzadpour, B., Moghaddam, M., Arbabtafti, M., 2011. Dynamic modeling and control simulation of a haptic device, in: 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Presented at the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), IEEE, Karon Beach, Thailand, pp. 2993–2998. <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2011.6181483>

[Carignan and Cleary, 2000]: Carignan, C., Cleary, K., 2000. Closed-loop force control for haptic simulation of virtual environments. *Haptics-E Electron. J Haptics Res* 1.

[Cruz-Valverde et al., 2010] :Cruz-Valverde, C., Dominguez-Ramirez, O.A., Ponce-de-Leon-Sanchez, E.R., Trejo-Mota, I., Sepulveda-Cervantes, G., 2010. Kinematic and Dynamic Modeling of the PHANToM Premium 1.0 Haptic Device: Experimental Validation, in: 2010 IEEE Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference. Presented at the 2010 IEEE Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA), IEEE, Cuernavaca, Mexico, pp. 494–501. <https://doi.org/10.1109/CERMA.2010.119>

[Fite et al., 2001]: Fite, K., Speich, J., Goldfarb, M., 2001. Transparency and Stability Robustness in Two-Channel Bilateral Telemanipulation. *J. Dyn. Syst. Meas. Control-Trans. Asme - J DYN SYST MEAS CONTR* 123. <https://doi.org/10.1115/1.1387018>

[Frisoli et al., 2004]:Frisoli, A., Sotgiu, E., Avizzano, C.A., Checcacci, D., Bergamasco, M., 2004. Force-based impedance control of a haptic master system for teleoperation. *Sens. Rev.* <https://doi.org/10.1108/02602280410515815>

[Lawrence, 1993]: Lawrence, D.A., 1993. Stability and transparency in bilateral teleoperation. *IEEE Trans. Robot. Autom.* 9, 624–637. <https://doi.org/10.1109/70.258054>

[Lee and Chung, 1998]: Lee, H.-K., Chung, M.J., 1998. Adaptive controller of a master–slave system for transparent teleoperation. *J. Robot. Syst.* 15, 465–475. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4563\(199808\)15:8<465::AID-ROB3>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4563(199808)15:8<465::AID-ROB3>3.0.CO;2-J)

---

[Lu and Goldenberg, 2016]:Lu, Z., Goldenberg, A.A., 2016. Robust Impedance Control and Force Regulation: Theory and Experiments: Int. J. Robot. Res. <https://doi.org/10.1177/027836499501400303>

[Niemeyer and Slotine, 1991].:Niemeyer, G., Slotine, J.-J.E., 1991. Stable adaptive teleoperation. IEEE J. Ocean. Eng. 16, 152–162. <https://doi.org/10.1109/48.64895>

[Seo et al., 2011]:Seo, C., Kim, J.-P., Kim, J., Ahn, H.-S., Ryu, J., 2011. Robustly stable bilateral teleoperation under time-varying delays and data losses: An energy-bounding approach. J. Mech. Sci. Technol. 25, 2089–2100. <https://doi.org/10.1007/s12206-011-0523-8>

[Yokokohji and Yoshikawa, 1994]:Yokokohji, Y., Yoshikawa, T., 1994. Bilateral control of master-slave manipulators for ideal kinesthetic coupling--formulation and experiment. IEEE Trans. Robot. Autom. Publ. IEEE Robot. Autom. Soc. 10, 605–620. <https://doi.org/10.1109/70.326566>

[Hannaford, 1989a] : Hannaford,B.(1989a).A design frame work for teleoperators with kinesthetic feedback.IEEETrans.on Robotics and Automation,5(4):426–434.