



HAL
open science

Co-manipulation sûre d'un robot de protonthérapie

Julien Baumeyer

► **To cite this version:**

Julien Baumeyer. Co-manipulation sûre d'un robot de protonthérapie. Autre. Université d'Orléans, 2017. Français. NNT : 2017ORLE2015 . tel-01713107v2

HAL Id: tel-01713107

<https://theses.hal.science/tel-01713107v2>

Submitted on 20 Feb 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

École Doctorale :
MATHÉMATIQUES, INFORMATIQUE, PHYSIQUE
THÉORIQUE et INGÉNIERIE DES SYSTÈMES

Laboratoire : PRISME

THÈSE présentée par :

Julien BAUMEYER

soutenue le : **28 juin 2017**

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'Université d'Orléans**

Discipline/ Spécialité : **Robotique**

Co-manipulation sûre d'un robot de protonthérapie

THÈSE dirigée par :

Gérard Poisson

Professeur des Universités, PRISME Université
d'Orléans

Pierre Vieyres

Professeur des Universités, PRISME Université
d'Orléans

RAPPORTEURS :

Jean-Pierre Gazeau

Ingénieur de recherche CNRS HDR, Institut
PPRIME, Université de Poitiers

Marie-Aude Vitrani

Maître de Conférences HDR, UMPC Sorbonne
Universités

JURY :

Damien Chablat

Directeur de Recherche, IRCCyN, LS2N, École
Centrale de Nantes

Ouidad Labbani-Igbida

Professeur des Universités, XLIM, Université de
Limoges

Sylvain Miossec

Maître de Conférences, PRISME Université
d'Orléans

Samuel Pinault

Responsable de l'activité Innovation, LEONI
CIA

Table des matières

Table des matières	vii
Liste des figures	xvi
Liste des tableaux	xix
Remerciements	xxi
1 Introduction	xxv
Introduction générale	1
Contexte	1
Principe	1
Déroulement du traitement	2
Pré-positionnement	5
Méthode actuelle et solution proposée	7
Problématique	8
Cahier des charges de l'application médicale	9
Enjeux scientifiques	10
Contexte partenarial	13
Contributions	13
Organisation du manuscrit	13

2	Analyse des robots positionneurs, le robot Orion	15
2.1	État de l'art des robots positionneurs de patients utilisés en protonthérapie . . .	17
2.1.1	Caractéristiques des robots positionneurs de patients utilisés en protonthérapie	17
2.1.2	Conclusion et cahier des charges global du robot Orion	18
2.2	Caractéristiques principales du robot Orion	22
2.3	Modélisation mécanique du robot	23
2.3.1	Modèle géométrique direct	23
2.4	Architecture logicielle	26
3	État de l'art sur l'interaction physique Homme-robot	31
3.1	Objectifs de la co-manipulation	33
3.1.1	Programmation par démonstration (<i>Lead-through programming</i>)	33
3.1.2	Filtrage des tremblements	33
3.1.3	Mise à l'échelle de l'effort appliqué	34
3.1.4	Guides et murs virtuels	35
3.2	Historique	36
3.2.1	Commande hybride position/force	36
3.2.2	Commande en force nulle	37
3.2.3	Commande en amortissement	37
3.2.4	Commande en raideur	39
3.2.5	Commande compliant (impédance/admittance)	39
3.2.6	Commande impédance/admittance hybride unifiée	40
3.3	Stabilité	41
3.4	Structures de commande	43
3.5	Boucles internes	44
3.5.1	Boucle interne en position	44
3.5.2	Boucle interne en vitesse	44
3.5.3	Boucle interne en couple	45

3.6	Structures mécaniques utilisées	45
3.7	Rôle et modèle de l'opérateur dans la boucle de commande	45
3.8	Modes d'interaction collaborative	46
3.9	Rôle du capteur d'efforts dans les commandes compliantes	48
3.10	Influence des paramètres de la commande	48
3.11	Projets de recherche	49
3.12	Robots utilisant la co-manipulation	50
3.13	Détection et évitement d'obstacles pour la co-manipulation	50
3.14	Conclusion et résumé des choix	52
4	Commande utilisée pour l'interaction Homme-robot	55
4.1	Modèle de commande en admittance	57
4.2	Implémentation de la commande en admittance	58
4.2.1	Rôle des paramètres M, K et C	63
4.3	Étude du simulateur de commande	65
4.3.1	Objectif	65
4.3.2	Calcul du déplacement théorique avec le simulateur de commande en admittance	65
4.3.3	Mesure du déplacement réel en comanipulation	66
4.3.4	Étude comparative du déplacement théorique et réel de la commande en admittance	67
4.3.5	Identification des paramètres réels	70
4.3.6	Discussion	71
4.4	Conclusion	72
5	Étude et comparaison de dispositifs haptiques	73
5.1	Étude du besoin	75
5.1.1	Approches haptiques proposées	75
5.1.2	Étude du cas personnel non spécialisé en manipulation radio	78
5.1.3	Étude du cas personnel spécialisé en manipulation radio	78

5.2	Preuve de concept de co-manipulation	79
5.2.1	Étude du dispositif haptique barre en U	79
5.2.2	Analyse de la chaîne de mesure du capteur d'efforts ATI Mini-85	86
5.2.3	Modèle du bras humain	89
5.2.4	Valeurs de raideur expérimentales	91
5.3	Co-manipulation avec un capteur localisé entre l'effecteur et la table	92
5.3.1	Modèle du patient	94
5.3.2	Analyse de la chaîne de mesure du capteur d'efforts ATI Omega-190	103
5.4	Comparaison des solutions de co-manipulations	106
5.4.1	Mesure de la transparence	106
5.4.2	Mesure de la justesse	112
5.5	Conclusion	113
6	Gestion de la sécurité autour du robot	115
6.1	Analyse des risques dans l'espace de travail du robot	117
6.2	Étude des normes en vigueur	118
6.3	Cahier des charges	122
6.4	Étude des frottements dans l'espace articulaire	122
6.4.1	État de l'art des modèles de frottements couramment utilisés en robotique	125
6.4.2	Quantification et proposition du modèle de frottements pour le robot Orion	133
6.4.3	Méthodes d'identification	139
6.4.4	Étude de la variation des paramètres A , f et ϕ en fonction de la vitesse angulaire	150
6.4.5	Généralisation et unicité du modèle	151
6.5	Quantification de la précision de détection	155
6.6	Détection de collisions en utilisant un capteur d'efforts	158
6.7	Dispositif de sécurité simplifié basé sur des murs virtuels	160
6.8	Conclusion	161

Conclusion et perspectives	163
6.9 Conclusion	163
6.10 Perspectives	I
6.10.1 Commande en co-manipulation	I
6.10.2 Détection de collisions	I
Annexes	III
7 Liste des acronymes	XVII
8 Glossaire	XIX
Bibliographie	XXI

Liste des figures

1.1	Pic de Bragg représentant la diffusion de la dose en fonction de la profondeur dans les tissus	2
1.2	Exemple de traitement de la tumeur sous plusieurs incidences	3
1.3	Salle de protonthérapie avec le générateur de particule et son support (Gantry) et le robot porteur à 6ddl	4
1.4	Différents types de marquage de la tumeur par tatouage et par billes en or [PINAULT 2008].	4
1.5	Exemple de masque de contention	5
1.6	Erreur de positionnement due à un manque de répétabilité de la contention	5
1.7	exemples d'alignement des lasers avec le tatouage externe de la tumeur	6
1.8	Pupitre de commande (TeachPendant) utilisé par le praticien pour déplacer manuellement le robot lors du pré-positionnement. Le TeachPendant contient deux boutons par axe cartésien de déplacement (un par sens).	7
1.9	Zone de transparence pour les rayons (protons) sur la table médicale	8
1.10	Robot Orion pendant une phase de pré-positionnement en mode de co-manipulation.	9
1.11	Organigramme du protocole de traitement en protonthérapie incluant le positionnement du patient sur la table, son pré-positionnement, le positionnement du patient dans le Gantry, le traitement en mode automatique et l'extraction en urgence du patient si nécessaire.	11
1.12	Représentation des besoins médicaux (à gauche) et axes de travail choisis (à droite).	12

2.1	Robots utilisés pour le positionnement de patients en protonthérapie (partie 1/2).	18
2.2	Robots utilisés pour le positionnement de patients en protonthérapie (partie 2/2).	19
2.3	Robot Orion et sa structure hybride SCARA/Puma.	22
2.4	Charge maximale que peut embarquer le robot Orion.	23
2.5	Représentation de l'espace de travail total du Orion vue de dessus (a) et vue de coté (b).	23
2.6	Volume virtuel représentant la zone de traitement médicale associée au robot Orion	24
2.7	Schéma cinématique du robot Orion.	25
2.8	Notation de Khalil-Kleinfinger utilisée pour la modélisation du robot Orion. . . .	26
2.9	Vue du robot Orion ainsi que sa baie de commande incluant les 4 parties matérielles de commande du robot (SCU, HCU, MCU, ACU)	27
2.10	Architecture de commande simplifiée du robot Orion.	27
3.1	Robot DermaRob permettant de découper une bande de peau d'épaisseur définie en utilisant la programmation par démonstration avec une commande en admittance [DOMBRE et al. 2003].	34
3.2	Robot Micron de l'Université Carnegie Mellon utilisé dans la chirurgie de l'oeil [maclachlan2012-a	34
3.3	IAD de ASE Systems.	35
3.4	Exemples de robots utilisant la réduction d'effort	36
3.5	Exemple de robots utilisant les guides virtuels.	37
3.6	Projet Hardiman de General Electric [CROSHAW 1969].	38
3.7	Exemple de structure de commande en force nulle [SCHUTTER et BRUSSEL 1988].	38
3.8	Exemple de structure de commande en amortissement [VUKOBRATOVIC 2009]. . .	38
3.9	Exemple de structure de commande en raideur [VUKOBRATOVIC 2009].	39
3.10	Chirurgien utilisant une version récente du robot ROBODOC pour la mise en place d'une prothèse de genou.	40
3.11	Exemple de structure de commande en impédance [Xavier LAMY 2011].	41
3.12	Exemple de structure de commande hybride impédance/admittance unifiée [VUKOBRATOVIC 2009].	41
3.13	Structure de commande permettant une co-manipulation en impédance en espace contraint [KOSUGE, FUJISAWA et FUKUDA 1993]	43

3.14	Structure de commande en admittance utilisable en espace libre [DUCHAINE 2010]	43
3.15	Structure de commande en admittance utilisable en espace contraint et en espace libre [LABRECQUE et C. GOSSELIN 2014]	44
3.16	Illustration des trois types d'architectures mécaniques homme-robot : a) parallèle, b) orthétique et c) sérielle [Xavier LAMY 2011].	46
3.17	Robots collaboratifs sur le marché (partie 1/2).	51
3.18	Robots collaboratifs sur le marché (partie 2/2).	52
3.19	Robots collaboratifs utilisés en recherche.	53
4.1	Représentation simplifiée de la commande en admittance en <i>espace libre</i>	57
4.2	Représentation du système mécanique équivalent au robot comanipulé dans le cas d'une commande en admittance en <i>espace libre</i> et sur un axe de translation	58
4.3	Schéma bloc de la commande en admittance du robot Orion.	59
4.4	Vue 2D schématisée du robot Orion lors d'une co-manipulation sur un axe.	59
4.5	Schéma simplifié montrant les parties logicielles et matérielles de la commande en admittance.	60
4.6	Architecture logicielle de l'implémentation de la commande en admittance incluant les drivers, l'interface graphique, le processus d'admittance et la classe de calculs.	61
4.7	Schéma bloc de commande du robot Orion comanipulé	62
4.8	Vitesse simulée de l'effecteur par une commande en admittance implémentée avec une commande bilinéaire en réponse à un échelon de force de 30 N.	64
4.9	Schéma de la commande en admittance utilisant un système masse, ressort et amortisseur	65
4.10	Réponse théorique à un échelon de force du système d'admittance de paramètres $M=100$ kg, $K=0$ N.m et $C=500$ Nms^{-1}	67
4.11	Schéma équivalent du robot en mode co-manipulation en admittance de paramètres M et C ($K=0$).	68
4.12	Comparaison de la position théorique et réelle de l'effecteur robot sur l'axe X lors d'une co-manipulation à force constante simulée ($M=0$ kg, $K=100$ N.m, $C=200$ Ns.m-1)	69
4.13	Comparaison de la position théorique et réelle de l'effecteur robot sur l'axe Y lors d'une co-manipulation à force constante simulée ($M=0$ kg, $K=200$ N.m, $C=200$ Ns.m-1)	69

4.14	Comparaison de la position théorique et réelle de l'effecteur robot sur l'axe Z lors d'une co-manipulation à force constante simulée ($M=0$ kg, $K=300$ N.m, $C=200$ Ns.m ⁻¹	70
5.1	Schéma simplifié de la solution de co-manipulation avec la barre haptique en U .	75
5.2	Vue 3D du dispositif haptique barre en U et exemple de la position de l'opérateur pour la co-manipulation.	76
5.3	Schéma simplifié de la solution de co-manipulation avec la table	76
5.4	Schéma simplifié de la solution de co-manipulation avec le joystick 3D	77
5.5	Joystick 3D positionné dans la zone non transparente aux rayons	77
5.6	Vue 3D (CAO) du dispositif haptique, incluant la barre haptique et le capteur, utilisé pour une co-manipulation en admittance du robot Orion.	80
5.7	Résultats de l'expérience [NASA 2000] ne prenant pas en compte le cas où les deux mains sont utilisées simultanément.	80
5.8	Vecteurs représentant les forces exercées par l'opérateur sur le dispositif haptique dans le cas de la preuve de concept de co-manipulation.	81
5.9	Position utilisée pour l'évaluation statistique de mesure des efforts maximaux exercés par un humain [KROEMER 1969].	81
5.10	Table médicale kVue vue de dessus, position du capteur Omega-190 et les repères associés	82
5.11	Table médicale kVue vue de dessus avec la barre haptique en U, le capteur Mini-85 et les repères associés	83
5.12	Vue de coté du capteur de mesure des efforts de l'opérateur (ATI Omega-190). .	83
5.13	Vue de dessus de la table médicale kVue du robot Orion et position initiale utilisée pour la campagne de mesures des efforts appliqués par l'opérateur sur le robot. .	84
5.14	Relevé des efforts au niveau du capteur ATI Mini-85 exprimé dans le repère du capteur d'un opérateur volontaire de 1,79 m 62 kg en poussant devant lui.	85
5.15	Algorigramme de filtrage par moyenne des valeurs acquises par le capteur d'efforts utilisé pour la co-manipulation.	88
5.16	Représentation mécanique des muscles antagonistes dans le bras humain [RAHMAN, Ryojun IKEURA et MIZUTANI 2002].	89
5.17	Représentation de la trajectoire virtuelle lors d'une tâche de pointage avec le bras humain [Toshio TSUJI et TANAKA 2008].	90
5.18	Représentation de la raideur au niveau de la main sous la forme d'une ellipse dont la forme varie au cours du mouvement [T. TSUJI et al. 1994].	91

5.19 Valeurs expérimentales de raideur obtenues sur un échantillon de 7 personnes [DUCHAINE 2010].	92
5.20 Méthode de co-manipulation 2 dans laquelle le capteur Omega 190 est localisé entre la table médicale et l'effecteur.	93
5.21 Schéma bloc simplifié de la commande en admittance du robot Orion incluant le patient allongé sur la table médicale.	93
5.22 Profil de commande de vitesse utilisé lors du mouvement rectiligne	94
5.23 Force exercée par l'opérateur et par le système table+patient pendant une co-manipulation.	95
5.24 Résidu (force mesurée moins force prédite) du modèle du patient assimilé à une masse purement inertielle.	96
5.25 Schéma du modèle de comportement dynamique du patient.	97
5.26 Schéma mécanique équivalent au robot comanipulé avec le capteur situé sous la table en supposant que le patient allongé sur la table est représenté par un système mécanique masse/ressort/amortisseur.	98
5.27 Force prédite par un modèle en masse purement inertielle, la partie visco-elastique du modèle Kelvin-Voigt ainsi que le modèle Kelvin-Voigt dans son ensemble pour un volontaire de 82 kg et 1,72 m.	101
5.28 Comparaison de la force générée par le mouvement 1D de plusieurs cas de charges et de volontaires allongés	103
5.29 Comparaison de la dérive à froid / à chaud du capteur ATI Omega 190	104
5.30 Relevé du bruit de mesure du capteur ATI Omega-190 sur plusieurs heures.	105
5.31 Test de transparence avec le robot Tripteron imaginé par [DUCHAINE 2010]	107
5.32 Plateforme de test de transparence avec un robot Haption adapté, imaginé par [POQUET 2014]	108
5.33 Test de transparence avec le robot Kuka LWR imaginé par [FICUCIELLO, VILLANI et B. SICILIANO 2015]	109
5.34 Plateforme expérimentale de mesure de transparence avec le robot Orion comanipulé	110
5.35 Illustration du calcul du critère de la LAS sur le spectre de Fourier obtenu entre 0 et 20 Hz, la LAS correspond à l'opposée de la longueur de la ligne noire dans la partie droite de la Figure [BALASUBRAMANIAN, MELENDEZ-CALDERON et E. BURDET 2012]	111
5.36 Comparaison des chemins obtenus avec les différentes solutions haptiques de co-manipulation ainsi que la méthode utilisée actuellement (teachPendant).	111

5.37	Représentation de l'indice DTW comparé à une distance Euclidienne. Le DTW essaie de comparer les échantillons pour des ensembles de données non synchronisés.	112
5.38	Comparaison de la co-manipulation table avec un opérateur expérimenté et un opérateur novice.	113
6.1	Zones du corps considérées par la norme [ISO15066 2016], pour lesquelles des valeurs de forces et pressions maximales existent.	120
6.2	2 types de limites utilisées pour la détection de collisions.	121
6.3	Valeurs de force et pression maximales extrait de la norme ISO 15066 (1/2).	121
6.4	Valeurs de force et pression maximales extrait de la norme ISO 15066 (2/2).	122
6.5	Exemple de limite de forces de collision robot/humain au niveau du Pelvis avec une surface de contact de $7,5 \text{ cm}^2$	123
6.6	Localisation des collisions pouvant se produire dans la salle de protonthérapie sur le robot Orion (vue de dessus).	123
6.7	Représentation de la force de Coulomb [WAIBOER 2007].	126
6.8	Représentation des frottements statiques additionnés des frottements visqueux [WAIBOER 2007].	127
6.9	Représentation des frottements visqueux additionnés aux frottements de Coulomb [WAIBOER 2007].	128
6.10	Représentation de l'effet Stribeck additionné aux frottements visqueux linéaires et aux frottements statiques [WAIBOER 2007].	130
6.11	Représentation de la mémoire frictionnelle (hystérésis) [FERRETTI et al. 2003].	131
6.12	Schéma cinématique du robot Orion.	133
6.13	Position de départ et d'arrivée du robot Orion lors de la quantification des frottements de l'axe 1.	134
6.14	Moteurs des axes 1 à 6 (de gauche à droite) extraits du robot Orion.	134
6.15	Variation du couple de l'axe 1 (ramené à l'articulation après les étages de réduction) en fonction de la position angulaire à température (20° C) et vitesse de rotation constantes ($0,05 \text{ rad.s}^{-1}$).	135
6.16	Variation du couple en fonction de la position pour plusieurs vitesses constantes différentes.	136
6.17	Variation de la moyenne du couple en fonction de la vitesse de rotation	137
6.18	Observation de l'effet de la température sur le couple de frottement à l'axe 1.	138

6.19	Comparaison des modèles ordre 1 et ordre 2 pour la modélisation des frottements secs/visqueux.	140
6.20	Comparaison de l'identification des frottements secs/visqueux entre un modèle symétrique et un modèle non symétrique.	142
6.21	Comparaison de l'erreur entre le couple mesuré et les modèles de frottements secs/visqueux symétrique et non symétrique.	142
6.22	Résultat de l'identification du modèle de frottements secs/visqueux variable avec la température pour le sens anti-horaire.	144
6.23	Comparaison de l'analyse fréquentielle du couple par rapport à la position angulaire avec les méthodes FFT et Lomb-Scargle à vitesse de rotation constante ($0,03 \text{ rad.s}^{-1}$).	145
6.24	Comparaison de l'analyse fréquentielle par la méthode Lomb-Scargle du couple par rapport au temps et du couple par rapport à la position angulaire pour plusieurs vitesses de rotations de l'axe 1.	146
6.25	Exemple d'analyse fréquentielle initiale du couple fonction de la position ainsi que les principales harmoniques identifiées.	147
6.26	Exemple d'identification des harmoniques par fenêtrage.	149
6.27	Variation de l'amplitude de l'harmonique 1060 et 1666 tr^{-1} pour différentes vitesses de rotation de l'axe 1.	151
6.28	Comparaison du résidu de la modélisation des frottements en utilisant le modèle fréquence/amplitude/déphasage et fréquence/A/B.	152
6.29	Influence du nombre de points de contrôle sur la reconstruction des coefficients A et B pour la fréquence 66 rad^{-1}	153
6.30	Influence du nombre de points de contrôle sur la reconstruction des coefficients A et B pour la fréquence 265 rad^{-1}	153
6.31	Influence du nombre de points de contrôle sur la norme de l'erreur et l'erreur maximum du résidu de modélisation du bruit mécanique.	154
6.32	Résidu de la modélisation du bruit mécanique après identification, pour une vitesse angulaire de $0,019 \text{ rad.s}^{-1}$	155
6.33	Couple brut et résidu pour des vitesses de rotation de l'axe 1 de $0,01 \text{ rad.s}^{-1}$ à $0,1 \text{ rad.s}^{-1}$	156
6.34	Couple brut, filtré par le modèle de frottements secs/visqueux uniquement et filtré par le modèle complet	156
6.35	Résidu de la modélisation du couple à l'axe 1 par le modèle complet pour les robots PT2 et 3026.	157

6.36	Mise en place de l'expérience permettant de quantifier le seuil de détection lors d'une collision localisée à 715 mm de l'axe 6.	157
6.37	Force exercée par le robot sur le câble lors d'un essais de collision.	158
6.38	Résultat de mesure de la performance de la détection de collision en utilisant un capteur d'efforts situé entre la table et l'effecteur.	159
6.39	Vue isométrique des murs virtuels utilisés avec le robot Orion.	160
6.40	Vue isométrique et 2D d'une co-manipulation avec mur virtuel sur l'axe Z avec le robot Orion.	161
6.41	Photo de l'interface graphique du driver du capteur d'accélération intégré dans la librairie CoSi.	III
6.42	Screenshot de l'interface utilisateur du module de co-manipulation du robot Orion	IV
6.43	Exemple d'expérience permettant d'évaluer la justesse statique d'un robot co-manipulé en utilisant des cibles à atteindre de forme rectangulaire de différentes épaisseurs [GIJBELS et al. 2014]	VI
6.44	Module Arduino UNO et son capteur d'acquisition de vibrations MPU 6050 . . .	VIII
6.45	Module de communication et capteur d'accélération composé de ses 3 modules. .	IX
6.46	Logigramme du programme principal du driver client.	X
6.47	Histogramme de la fréquence d'acquisition coté client du capteur d'accélération. La fréquence moyenne est de 844 Hz.	XI
6.48	Relevés d'accélération sur X, Y et Z sur 3000 échantillons avec le capteur d'accélération basé sur un module MPU6050.	XI
6.49	Plan CAO de la barre haptique utilisée pour la preuve de concept de comanipulation.	XII
6.50	Extrait de la datasheet du capteur MPU6050.	XIII
6.51	Schéma électronique du capteur d'accélération avec ces 3 modules; module de traitement (Arduino UNO), module de transmission (HC-05) et module d'acquisition (MPU-6050).	XIII
6.52	Logigramme du programme principale du capteur d'accélération avec la partie machine d'état (en rouge) et la partie acquisition/envoi (en bleue).	XIV
6.53	Capteur d'accélération avec sa batterie et son support.	XV

Liste des tableaux

1.1	Résumé des contraintes de la protonthérapie robotisée	8
2.1	Caractéristiques des robots positionneurs de patients en protonthérapie (1/3) . .	20
2.2	Caractéristiques des robots positionneurs de patients en protonthérapie (2/3) . .	21
2.3	Caractéristiques des robots positionneurs de patients en protonthérapie (3/3) . .	29
2.4	Caractéristiques de vitesses, accélérations et précisions du robot Orion.	30
2.5	Paramètres représentant le formalisme de Denavit-Hartenberg modifiée pour le robot Orion.	30
2.6	Les différents éléments de commande du robot Orion.	30
5.1	Résultat du vote sur la solution de co-manipulation la plus intuitive et la plus facile	78
5.2	Résultat du vote sur la solution de co-manipulation la plus intuitive et facile par le personnel spécialisé en manipulation radio.	78
5.3	Efforts relevés en poussant	84
5.4	Efforts relevés en tirant	85
5.5	Efforts relevés en tirant à gauche	85
5.6	Efforts relevés en tirant à droite	85
5.7	Effort en levant	86
5.8	Efforts relevés en poussant vers le bas	86

5.9	Valeurs maximales de mesures du capteur ATI Mini-85	86
5.10	Caractéristiques principales du capteur ATI Mini-85	86
5.11	Résumé des relevés de la fréquence réelle de la Netbox du capteur ATI Mini-85 pour 3 fréquences demandées distinctes	87
5.12	Résumé des relevés de la fréquence réelle de la Netbox du capteur ATI Mini-85 par le driver intégré à CoSi	88
5.13	Comparaison de l'erreur résiduelle pour une modélisation purement inertielle de plusieurs personnes de morphologies différentes.	96
5.14	Identification des paramètres du modèle visco-élastique pour des volontaires de morphologies différentes.	101
5.15	Comparaison de l'erreur résiduelle entre le modèle masse purement inertielle et le modèle visco-élastique.	101
5.16	Morphologie des personnes utilisées dans l'étude de l'influence du corps du patient en mouvement sur l'amplitude des efforts mesurés par le capteur ATI Omega-190.	102
5.17	Caractéristiques principales du capteur ATI Omega 190	104
5.18	Dérive du capteur ATI Omega 190 à froid et à chaud	104
5.19	Temps total et <i>LAS</i> pour chaque méthode de co-manipulation	112
5.20	Indices <i>DTW</i> pour chaque méthode de co-manipulation	113
5.21	Comparaison des différentes solutions haptiques proposées dans laquelle les « o » représentent une méthode peu satisfaisante sur le critère étudié et les « + » une méthode intéressante du point de vue du critère étudié.	114
6.1	Bilan des modèles de frottement et des implémentations logicielles	132
6.2	Écart entre la valeur maximale et la valeur minimale du bruit (ramené à l'articulation après les étages de réduction) pour les moteurs utilisés dans le robot Orion	135
6.3	Récapitulatif de l'amplitude des différents phénomènes tribologiques présents sur le robot Orion	138
6.4	Comparaison de l'erreur globale résultante entre les modèles d'ordre 1 et d'ordre 2 de modélisation des frottements secs/visqueux.	141
6.5	Comparaison de l'erreur globale et de l'écart type pour le modèle de frottements visqueux/secs d'ordre 1 symétrique et non-symétrique.	142
6.6	Paramètres du modèle de frottements secs/visqueux non symétrique d'ordre 1.	143
6.7	Liste non exhaustive des harmoniques identifiées en première approximation pour l'axe 1 pour une vitesse de rotation de $0,05 \text{ rad.s}^{-1}$	148

6.8	Liste non exhaustive des harmoniques identifiées et affinées pour l'axe 1 pour une vitesse de rotation de $0,05 \text{ rad.s}^{-1}$	148
6.9	Fréquences principales identifiées pour 3 vitesses de rotations de l'axe 1 différentes	150
6.10	Résultat des tests de justesse du capteur d'accélération.	XII
6.11	Résumé des caractéristiques principales du capteur d'accélération.	XII

Remerciements

Je remercie Claude BURLLOT, directeur général de la société LEONI CIA Cable Systems pour m'avoir accueilli dans son entreprise afin que je puisse réaliser ma thèse avec un financement CIFRE.

Je remercie Samuel PINAULT, Manager de l'équipe Robotique Médicale à LEONI CIA Cable Systems pour avoir accepté d'être mon tuteur industriel pendant ma thèse.

Je remercie du fond du coeur mes collègues Aurélien JANGOT dit *Jangot*, Thomas RAVASI, Antoine BARNERIAS alias *chafouin* pour sa bonne humeur légendaire, Antoine VAN DE WIELE pour ses découvertes musicales (Metallica et Foo Fighters en tête de liste), Xavier CORNU pour ces références cinématographiques d'un autre siècle, Pauline CHÉRAMY, Elodie CANU et Aurélie GENEAU alias *les qualitiennes*, Cyril MAURIER aka *Momo* pour ses précieux conseils sur les microcontrôleurs, Stéphane Clérembault aka *chouchou* pour son aide en programmation et son dévouement pour le logiciel libre, Peter STEINER (le Parisien) collègue de piscine, Jérôme CHEMOUNY pour avoir développé un outil informatique qui m'a été fort utile. Je remercie aussi Jérémy SUSS, Valentin DELAHAYES, Camille TREMBLEAU, Simon PULIGNY, Thilelly GATHER, Thomas SIMON, Benoit BESSIRARD, Angélique LEGAY. Je remercie les techniciens de l'atelier, Yannick (Yaya), Sacha, Gregory, Thomas et Camille sur qui j'ai pu compter pour mes manipulations avec le robot Orion. Enfin Vincent BESNARD avec qui j'ai pu travailler de nombreuses heures et qui n'a pas compté son temps pour m'aider dans mes recherches et mes manipulations de robots, alors encore une fois merci à vous.

Je remercie le personnel du centre de radiothérapie de Chartres (Corel) qui m'a consacré du temps et avec qui j'ai pu orienter mes choix concernant les dispositifs haptiques. Je remercie aussi Véronique Lacour qui m'a permis de contacter le Corel.

Je remercie Xavier LAMY, docteur au CEA-List qui a eu la gentillesse de me recevoir au CEA-List et me donner quelques conseils pour commencer mes recherches. Son manuscrit de thèse m'a servi de base pour étudier la co-manipulation.

Je remercie Azédine KOURTA directeur du laboratoire Prisme pour m'avoir accueilli dans son établissement.

Je remercie plus particulièrement Gérard POISSON et Pierre VIEYRES mes directeurs de thèse pour avoir guidé mes recherches et avoir consacré un temps non négligeable. Je remercie particulièrement Pierre pour m'avoir aidé pour la rédaction de tous mes articles et du manuscrit que vous tenez entre vos mains.

Je remercie Cyril NOVALES et Sylvain MIOSSEC mes encadrants scientifiques. Sylvain avec qui j'ai travaillé de nombreuses heures sur les parties techniques et plus particulièrement sur la modélisation des frottements axiaux du robot Orion et Cyril NOVALES pour sa connaissance en

robotique, pour m'avoir orienté vers les bonnes méthodes et pour ses conseils. Je le remercie aussi pour les longs échanges que nous avons eu concernant nos différents projets en électronique et en microcontrôleur qui m'ont permis de m'évader un peu de cette thèse.

Je remercie les membres du Jury d'être présent et les rapporteurs pour leur travail de correction.

Je remercie tous mes amis, de longue date, du badminton, de Chartres et d'ailleurs pour avoir été présent et m'avoir diverti.

Enfin je remercie mes parents, ma sœur, mes proches et Anne-Laure pour leur soutien tout au long de la thèse, sans qui je n'aurais jamais commencé ni fini cette thèse.

CHAPITRE 1

Introduction

« L'intuition est l'art, spécifique à l'esprit humain, d'élaborer une réponse correcte à partir de données qui, par elles-mêmes, sont incomplètes, voire trompeuses. »

Isaac ASIMOV

Synthèse :

La protonthérapie est une solution récente de traitement médical en oncologie. Le travail développé dans cette thèse porte sur le développement d'un mode de commande manuel sécurisé pour un robot positionneur de patients, dédié à cette technique médicale. L'étude du contexte médical de la protonthérapie nous permet de comprendre la nécessité de disposer d'une nouvelle méthode de commande manuelle haptique, intuitive pour l'opérateur et confortable pour le patient tout en assurant la sécurité des personnes présentes dans l'espace de travail du robot. Cette commande sera appliquée au robot Orion, qui est un système robotisé dédié à l'application de protonthérapie avec la particularité de posséder une masse importante.

Sommaire

Introduction générale	1
Contexte	1
Principe	1
Déroulement du traitement	2
Pré-positionnement	5

Méthode actuelle et solution proposée	7
Problématique	8
Cahier des charges de l'application médicale	9
Enjeux scientifiques	10
Contexte partenarial	13
Contributions	13
Organisation du manuscrit	13

Introduction générale

Cette thèse s'inscrit dans la thématique de la co-manipulation en robotique médicale portant sur une application de protonthérapie en vue de traitements en oncologie. Il s'agit de commander un robot de grande dimension portant un patient et répondant à l'action d'un opérateur agissant directement sur le robot : nous sommes dans un contexte de co-manipulation. Le robot est sériel de type hybride SCARA/Puma dénommé Orion Robotic Innovation for ONcology (ORION). Le robot est développé par la société LEONI CIA Cable Systems au sein de laquelle se déroule la thèse sous contrat CIFRE. Nous avons ainsi partagé notre temps de recherche entre LEONI CIA Cable Systems et le laboratoire Prisme de l'Université d'Orléans.

Les systèmes actuels de manipulation manuelle des robots positionneurs en protonthérapie ne permettent que des mouvements cartésiens axe par axe peu intuitifs et chronophages. Le travail développé ici porte sur l'amélioration de l'intuitivité de la manipulation en utilisant l'interaction physique homme-robot (ou co-manipulation) ainsi que sur le développement de lois de commande afin de gérer des éventuelles collisions dans l'espace de travail du robot.

Contexte

Traitement des cancers Le but de l'application évoquée ici (protonthérapie) est le traitement des métastases (quelques millimètres de diamètre) et des tumeurs (plusieurs centimètres de côté). Les différentes méthodes de traitement existantes aujourd'hui sont :

- la chirurgie (exérèse) qui consiste à retirer la zone atteinte lors d'une opération ;
- la chimiothérapie qui consiste à utiliser des substances chimiques pour réduire voire supprimer la tumeur ;
- et la thérapie par radiation (radiothérapie et protonthérapie principalement) qui utilise un faisceau de particules (photons, protons ou ions) accélérées et focalisées sur la tumeur afin de réduire voire d'éradiquer complètement celle-ci.

Principe de la protonthérapie

La protonthérapie est une technique médicale particulière de thérapie par radiation, comme l'est la radiothérapie conventionnelle. La thérapie par radiation consiste en l'utilisation d'une source de rayonnement de particules accélérées (photons, électrons ou protons) ionisants dirigées vers la tumeur afin de l'irradier [PINAULT 2008]. Cela a pour effet de modifier l'ADN des cellules irradiées afin de les empêcher de se multiplier. Le nombre de cellules tumorales va donc diminuer et le cancer se réduire voire disparaître.

La radiothérapie conventionnelle est largement diffusée en France contrairement à la protonthérapie qui ne compte que deux centres de traitement en fonctionnement, un à Orsay et un à Nice, et un en cours de construction à Caen. La radiothérapie conventionnelle utilise des particules légères (photons ou électrons) pour ioniser la tumeur. Cependant, la faible précision de la focalisation du faisceau a amené les scientifiques à développer une nouvelle méthode utilisant des

particules lourdes (protons, ions carbonés) pour la génération du faisceau dont la balistique est plus précise afin de cibler plus finement la tumeur et d'épargner les tissus sains avoisinant celle-ci. La Figure 1.1 montre le pic de Bragg qui représente la diffusion de la dose, plus particulièrement la distribution de son énergie, en fonction de la profondeur ; la profondeur de focalisation est modulée suivant l'énergie du faisceau. Ainsi l'utilisation de particules hadroniques (protons et ions carbonés) permet d'obtenir une meilleure précision par une plus faible dispersion et donc une meilleure focalisation que lors de la radiothérapie conventionnelle [GEVAERT et al. 2011, LUNDKVIST et al. 2005, NYSTRÖM 2010] et en particulier en pédiatrie [ST. CLAIR et al. 2004, HUG et al. 2002, MACDONALD et al. 2008] et aussi dans le cas du cancer du colon [TATSUZAKI, URIE et WILLET 1992].

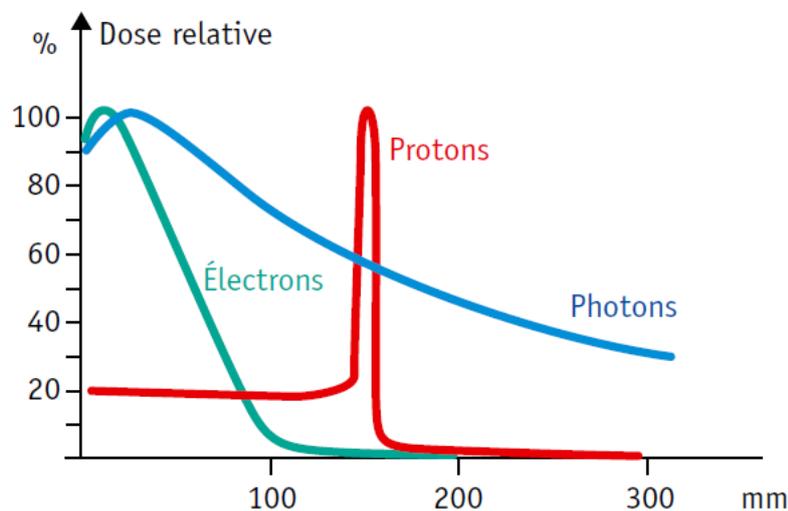


Figure 1.1 – Pic de Bragg représentant la diffusion de la dose en fonction de la profondeur dans les tissus

La contrainte principale réside dans la focalisation précise de la dose ionisante ce qui nécessite un positionnement précis de la tumeur par rapport à ce faisceau afin d'irradier la tumeur et non pas un organe proche. Cela a conduit à l'abandon des tables classiques de positionnement utilisées en radiothérapie conventionnelle au profit des robots positionneurs réputés répétables.

Dans la suite de cette thèse nous nous intéresserons uniquement à la protonthérapie et en particulier aux robots positionneurs de patients dédiés à cette technique.

Déroulement du traitement

Afin de diminuer la délivrance de la dose dans les tissus sains avoisinants la tumeur, celle-ci s'exécute sur plusieurs incidences, toutes focalisées sur la tumeur (Figure 1.2). Chaque séance de traitement comporte environ deux incidences distinctes ; cinq à six incidences différentes sont utilisées lors du traitement complet comportant plusieurs séances.

En protonthérapie, il existe deux types de machines délivrant la dose, associées chacune à des traitements différents, à savoir :

- les lignes fixes consistent en un faisceau fixe de protons dont l'orientation peut être soit verticale soit horizontale mais n'est plus ajustable une fois l'installation faite ;
- et les Gantry qui permettent d'obtenir un faisceau de protons orientable.

L'application à laquelle est destinée pour le moment le robot Orion concerne uniquement les traitements utilisant un Gantry. Le Gantry possède un seul degré de liberté : une rotation sur un axe horizontal (Figure 1.3). Afin de réaliser les différentes incidences sur la tumeur, il faudra déplacer cette tumeur en plus d'utiliser la rotation du Gantry. Le robot Orion dans notre cas d'étude, doit posséder 3 axes de translations afin d'amener la tumeur au point de focalisation du Gantry ainsi que 2 rotations qui seront combinées avec la rotation du Gantry pour réaliser toutes les incidences pour le traitement. Le positionneur de patient doit donc posséder au minimum 5 degrés de liberté. La société LEONI CIA Cable Systems, conceptrice du robot Orion, a choisi d'intégrer un robot sériel à 6 degrés de liberté ayant une architecture hybride SCARA/Puma comme positionneur de patient (Figure 1.3).

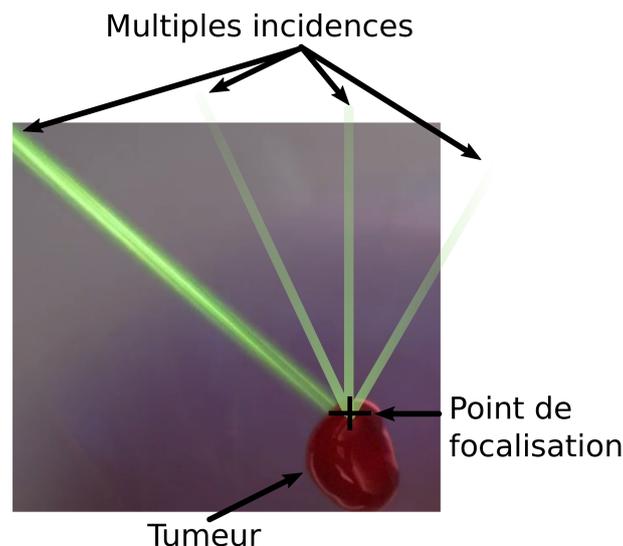


Figure 1.2 – Exemple de traitement de la tumeur sous plusieurs incidences

La tumeur est localisée en phase préopératoire par imagerie médicale (rayon-X, CT-scan et IRM principalement) ; elle est ensuite généralement marquée par deux méthodes (d'autres techniques existent mais ne seront pas développées ici) :

- une par tatouage pour être visible ultérieurement à l'oeil nu sur la peau du patient (Figure 1.4a) ;
- et une par rayons X en utilisant des billes en or implantées à l'intérieur du corps du patient (Figure 1.4b).

Le marquage visuel par tatouage est utilisé dans la phase dite de pré-positionnement (Figure 1.4). Le marquage par billes permet de positionner précisément la tumeur pendant la phase de

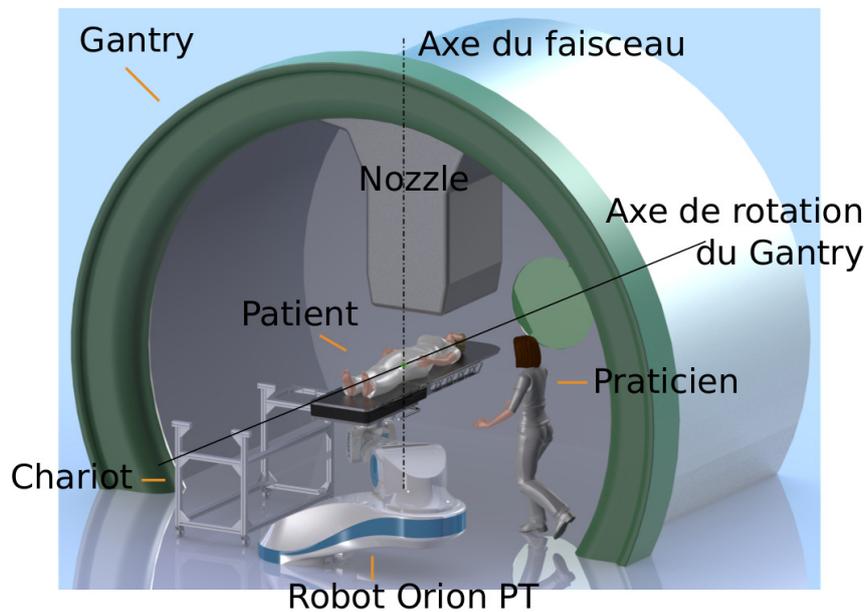


Figure 1.3 – Salle de protonthérapie avec le générateur de particule et son support (Gantry) et le robot porteur à 6ddl

pré-positionnement puis de vérifier le positionnement de la tumeur au point de focalisation lors de la phase de traitement en utilisant les rayons X. La précision du marquage visuel est d'environ 1 centimètre, celle des billes en or d'environ quelques millimètres. Ensuite le traitement consiste à irradier la tumeur avec un rayon ionisant (phase de délivrance de la dose).

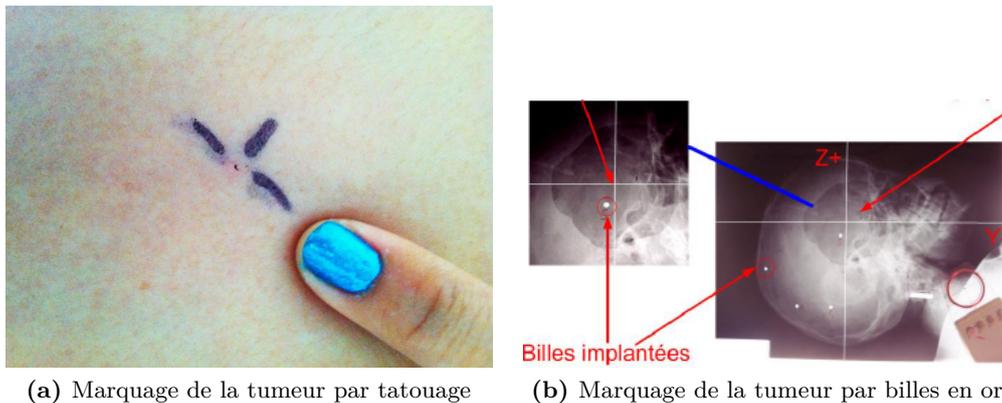


Figure 1.4 – Différents types de marquage de la tumeur par tatouage et par billes en or [PINAULT 2008].

Il existe des appareils qui permettent de se passer du marquage visible par tatouage en utilisant un étalonnage visuel basé sur le repérage anatomique¹ mais cela ne fait pas partie du cadre de la thèse.

1. <http://c-rad.se/product/catalyst-pt/> site web du fabricant suédois (2016)

Fractionnement des doses

La problématique de la thérapie par radiation est de traiter la tumeur tout en épargnant les tissus sains voisins. Á cette fin, le traitement, qui correspond à une dose totale d'environ 40 Gy est réparti en plusieurs séances, de 20 à 40 suivant la pathologie avec une dose unitaire de 1 voire 2 Gy. Du fait de la répétition des séances, le patient est positionné sur la table du robot positionneur autant de fois que son traitement comporte de séances. Celui-ci est maintenu sur la table grâce à un système de contention (Figure 1.5) différent selon la tumeur traitée mais qui ne permet pas, de par sa structure mécanique non rigide et pour le confort du patient, d'atteindre lors du repositionnement du patient sur la table la précision répétable requise de $\pm 0,5$ mm et ± 6 deg (Figure 1.6). Ainsi, à chaque séance, lorsque le patient est mis en position sur la table et sa contention installée, il est nécessaire de réaliser une étape d'étalonnage appelée « pré-positionnement ».



Figure 1.5 – Exemple de masque de contention

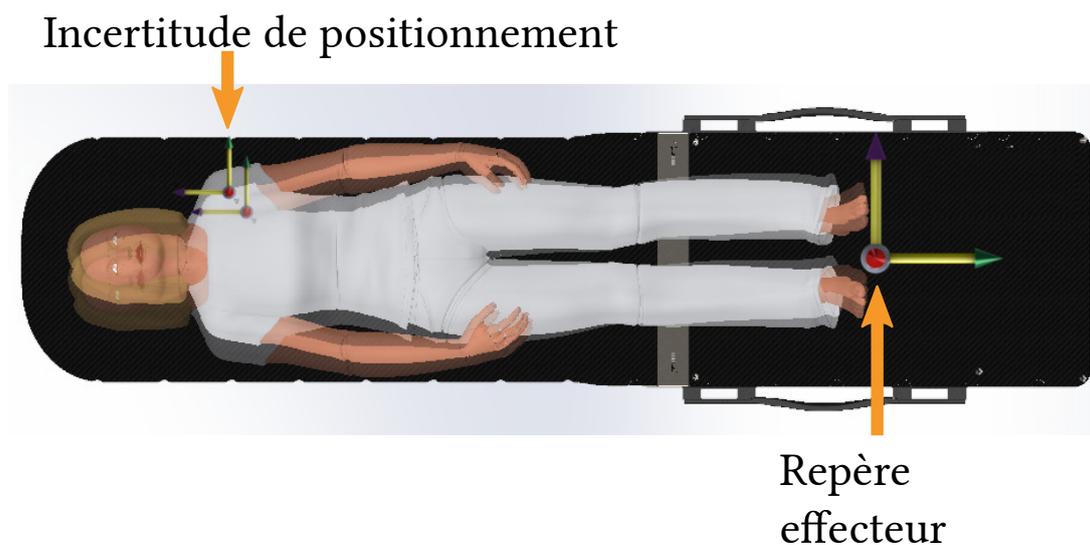


Figure 1.6 – Erreur de positionnement due à un manque de répétabilité de la contention

Pré-positionnement

Les techniques d'imagerie médicale permettent de localiser la position de la tumeur dans un plan (radiographie X) et dans l'espace 3D (IRM, Tomothérapie, scintigraphie, etc.) par rapport à un repère lié au corps du patient (appelé repère patient). Ce repère peut être lié à une partie anatomique osseuse (pelvis, crâne, fémur, etc.) ou un repère anatomique non lié à un os (yeux, nez, oreilles, etc.). La phase de pré-positionnement consiste à aligner le marquage de la tumeur avec les faisceaux Laser. Cela permet de connaître la position de la tumeur dans un repère lié au robot, i.e. repère de l'effecteur (Figure 1.6). Le protocole est le suivant :

- Le praticien prend le contrôle manuel du robot et cherche à faire coïncider les tatouages repérant la tumeur (Figure 1.4) avec les lasers orthogonaux, matérialisant l'isocentre, positionnés dans la salle de traitement (Figures 1.7a, 1.7b). Pour cela, il déplace manuellement la table supportant le patient (i.e. la tumeur) afin de positionner le marquage visuel de la tumeur avec les lasers de la salle de traitement. La précision attendue lors de ce pré-positionnement manuel est de l'ordre du centimètre en translation et de quelques degrés en rotation, ensuite l'erreur résiduelle est corrigée en utilisant le marquage par billes en or.
- Une fois cette étape de positionnement manuel achevée, la position de la tumeur est connue dans le repère de l'effecteur lié au robot (Figure 1.6), le traitement (les différentes incidences) peut se faire en mode automatique : le radiothérapeute définit des incidences qui seront exécutées par le robot en mode automatique par une génération de trajectoires. Lors de cette phase automatique, phase pendant laquelle la dose est délivrée au patient, les billes en or implantées dans le corps aux alentours de la tumeur permettent de repérer la position de celle-ci, donc de vérifier qu'elle est correctement positionnée au point de focalisation du faisceau.

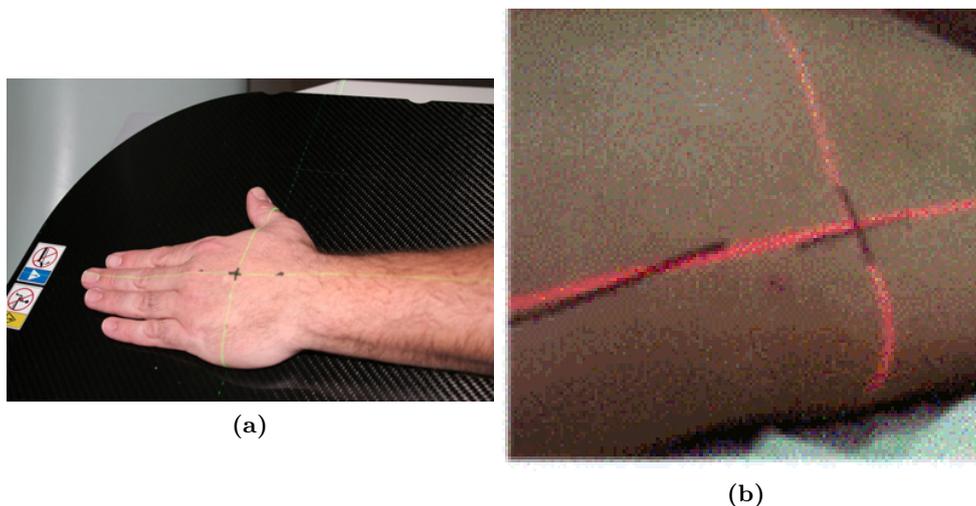


Figure 1.7 – exemples d'alignement des lasers avec le tatouage externe de la tumeur

L'objet d'étude de cette thèse concerne uniquement la phase de pré-positionnement, le mode automatique n'est pas étudié ici.

Pour plus d'informations sur la radiothérapie et la protonthérapie, le lecteur pourra se référer aux états de l'art suivants [JACQUEMIN 2011, PINAULT 2008 et BALAS et al. 2010].

Méthode de pre-positionnement actuelle et approche proposée



Figure 1.8 – Pupitre de commande (TeachPendant) utilisé par le praticien pour déplacer manuellement le robot lors du pré-positionnement. Le TeachPendant contient deux boutons par axe cartésien de déplacement (un par sens).

Actuellement, les praticiens utilisent un pupitre de commande pour déplacer le robot en mode cartésien manuel, axe par axe (Figure 1.8), selon les 3 axes de translation et de rotation par l'intermédiaire de 6 boutons. Cette méthode est fastidieuse et chronophage. La démarche proposée dans cette thèse repose sur le développement d'un contrôle interactif utilisant la mesure des efforts que le praticien exerce sur la table sur laquelle repose le patient, afin de déplacer le robot intuitivement comme s'il déplaçait un objet ordinaire dans un environnement connu.

Contraintes Dans le cadre de cette application médicale, les contraintes sont associées au robot et à son espace de travail, à savoir : le système ionisant (Gantry) et l'ensemble des objets ou personnes présents dans l'environnement de traitement. Le Tableau 1.1 donne un résumé des contraintes cinématiques et dynamiques de l'application.

Précisions Zone de radiotransparence : afin d'éviter des problèmes de réflexion du faisceau il est important que la table ne soit pas réfléchissante au rayon ionisant dans la zone de traitement (Figure 1.9). De plus, la table doit être invisible aux Rayons X utilisés lors du traitement pour vérifier la position de la tumeur par radiographie X.

Nom	Valeur
Charge embarquée maximale (patient)	375 kg à 50 cm de l'effecteur
Vitesse maximale de l'effecteur	0.1 cm.s ⁻¹ / 7 °.s ⁻¹ (norme ISO 60601-1)
Accélération maximale	en translation 0.1 cm.s ⁻² / en rotation 12 °.s ⁻²
Vibrations maximales ressenties sur la table	0.315 m.s ⁻² selon la norme (ISO 5349-1-2001)
Zone de radiotransparence (partie non métallique)	voir Figure 1.9

Tableau 1.1 – Résumé des contraintes de la protonthérapie robotisée

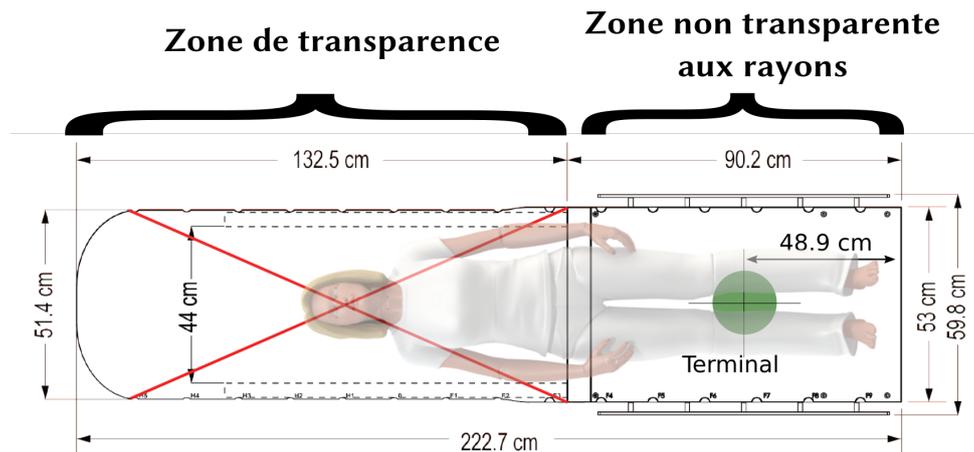


Figure 1.9 – Zone de transparence pour les rayons (protons) sur la table médicale

Problématique

Le robot Orion étudié dans cette thèse est présenté dans la partie 2.2. Une de ses particularités est d'être de masse importante (environ 900kg) par rapport aux robots de co-manipulation développés récemment (Kuka LWR, KBee Franka, UR 10, etc.) qui présentent peu d'inertie. Compte tenu de la forte inertie du robot Orion, une première problématique va être de proposer une commande de comanipulation pour un robot de forte masse. Cette première démarche devra prendre en compte des contraintes d'intuitivité et de précision importante (spécifiées dans le cahier des charges) de la commande manuelle pour la phase de pré-positionnement et pour l'extraction d'urgence.

De plus, le robot supporte la table et le patient en bout d'effecteur. Cette charge influe sur notre commande et devra donc être prise en compte; cet ensemble table et patient ne pourra pas être considéré purement inertiel comme dans les travaux de co-manipulation avec manipulation de charges lourdes [DUMORA 2014 JLASSI, TLIBA et CHITOUR 2014 MÖRTL et al. 2012 LAWITZKY, MORTL et HIRCHE 2010]. Au contraire, il sera nécessaire de prendre en compte la viscosité du corps humain afin de compenser les déformations et les oscillations de celui-ci, provoquées par la dynamique du système.

Afin de fournir un couple moteur suffisant pour déplacer les segments de forte masse composant la structure du robot Orion, celui-ci est pourvu sur chaque articulation de réducteurs à grand rapport de réduction (> 1000) à plusieurs étages et mettant en jeu des technologies différentes. Le système de détection de collisions devra prendre en compte les différents types de frottements induits par les différentes parties des réducteurs. Nous développerons des méthodes de modélisation des frottements et prendront en compte les contraintes de fonctionnement des actionneurs du robot (jeux mécaniques, température, bruit mécanique).

Cahier des charges de l'application médicale

Le cahier des charges est lié au protocole de l'utilisation du système robotisé en environnement de protonthérapie et aux phases de soins (Figure 1.11). La précision attendue du positionnement du marquage de la tumeur au niveau des lasers est de 1 cm avec un temps moyen de mise en pré-positionnement de 5 min . Le niveau de vibration ressenti au niveau de la table par le patient allongé et l'assistant paramédical ne devra pas dépasser $0,315\text{ m.s}^{-2}$ selon la norme ISO-5349 et comme spécifié au Tableau 1.1. Le pré-positionnement se fait toujours avec la table à l'horizontale (Figure 1.10).

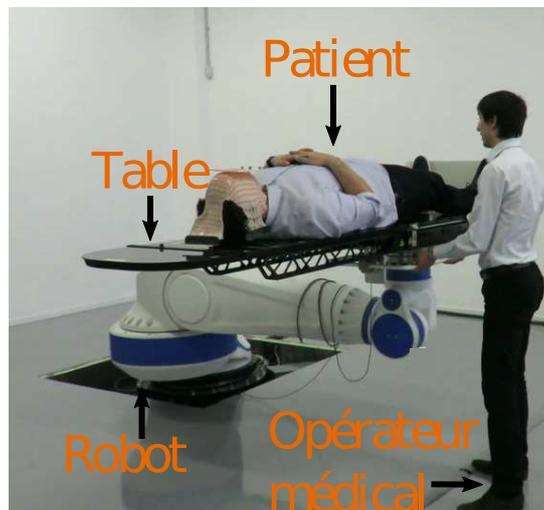


Figure 1.10 – Robot Orion pendant une phase de pré-positionnement en mode de co-manipulation.

De plus, l'environnement de la salle de protonthérapie, dans laquelle évolue le robot, est composé d'un Gantry, de matériels et d'appareils médicaux et du personnel hospitalier. Cet ensemble de matériel représente des obstacles qui peuvent se trouver dans l'espace de travail du robot. Il est donc nécessaire de prendre en compte cet environnement dynamique afin de détecter les collisions qui pourraient se produire entre ces objets ou personnes et le robot positionneur. Ce dispositif de détection de collisions bas-niveau devra arrêter tout déplacement du robot dans le cas d'une collision.

Enfin, nous devons envisager d'utiliser le mode de co-manipulation précédemment décrit dans le cas où il faudrait extraire en urgence le patient du Gantry pendant le traitement. Si le patient est amené à avoir un malaise ou être pris de vomissements, il est nécessaire de ne pas utiliser un mode automatique pour l'extraire : le risque pour le patient est grand, étant donné la proximité avec la structure du Gantry. L'objectif pour le praticien lors de cette phase est de ramener la table à l'extérieur du Gantry en comanipulant manuellement celle-ci (i.e. le robot). L'avantage de cette comanipulation réalisée par le praticien est pour celui-ci de rassurer directement et par sa seule présence le patient situé sur la table médicale.

Les différentes étapes du traitement (mise en position du patient sur la table, positionnement en mode comanipulé, traitement en mode automatique et extraction en urgence du patient de la Gantry si nécessaire) sont présentées dans la Figure 1.11.

Enjeux scientifiques

Afin de répondre au cahier des charges médical et industriel, nous proposons dans cette thèse de développer une commande dédiée permettant la co-manipulation du robot par l'assistant paramédical, ce qui lui fournira un mode de déplacement manuel intuitif. Ce type de commande est étudié depuis 1985 [Neville HOGAN 1985]. Il a été montré par [SCHMIDTLER, HARBAUER et BENGLER 2014] que pour une co-manipulation efficace en terme de vitesse, l'humain avait besoin de ressentir une résistance pendant son mouvement. Notre commande ne doit donc pas masquer totalement l'inertie du robot mais doit associer une partie inertielle et un amortissement afin de fournir une commande naturelle pour l'homme.

De plus, l'Homme (assistant paramédical) doit être modélisé dans la boucle de commande afin de pouvoir étudier les limites de la stabilité du système composé, du robot, de la commande et de l'assistant paramédical. Pour cela nous pourrions nous appuyer sur les travaux de [A. CAMPEAU-LECOURS, OTIS et C. GOSSELIN 2016, ZANCHETTIN et al. 2010, RAHMAN, Ryojun IKEURA et MIZUTANI 2002, Etienne BURDET et al. 2001 et N. HOGAN 1984] pour la modélisation et de [LABRECQUE et C. GOSSELIN 2014] et [A. CAMPEAU-LECOURS, OTIS et C. GOSSELIN 2016] pour l'étude de la stabilité de la commande.

Le patient allongé sur la table, qui est déplacé par l'assistant paramédical avec la commande en admittance, fait partie intégrante du système, et nous allons voir dans la partie 5.3 que son mouvement génère des perturbations sur la mesure des efforts produits par l'assistant paramédical, cela entraînant des vibrations non désirées. Nous allons modéliser le patient, pour cela, nous étudierons les travaux de [PRIDGEN, BAI et SINGHOSE 2010, FEDDEMA et al. 1996 et FRIGOLA et al. 2005].

Une fois notre boucle de commande parfaitement définie et modélisée, nous allons voir dans la partie 4.2 le transfert technologique de la partie théorique vers la mise en application de la commande en admittance ainsi que des modèles précédemment décrits. En effet, la partie appliquée est inhérente à cette thèse CIFRE si bien qu'il nous faut fournir une implémentation de niveau industriel de la commande en admittance, cela pour un robot non encore étudié jusqu'à présent. Nous nous baserons pour cela sur les techniques tenant compte du délai de commande non négligeable (10 ms au minimum).

Dès lors qu'il y a nécessité de valider les concepts présentés dans un cas pratique, nous étudierons donc dans un second temps quantitativement et qualitativement l'intuitivité, la justesse et

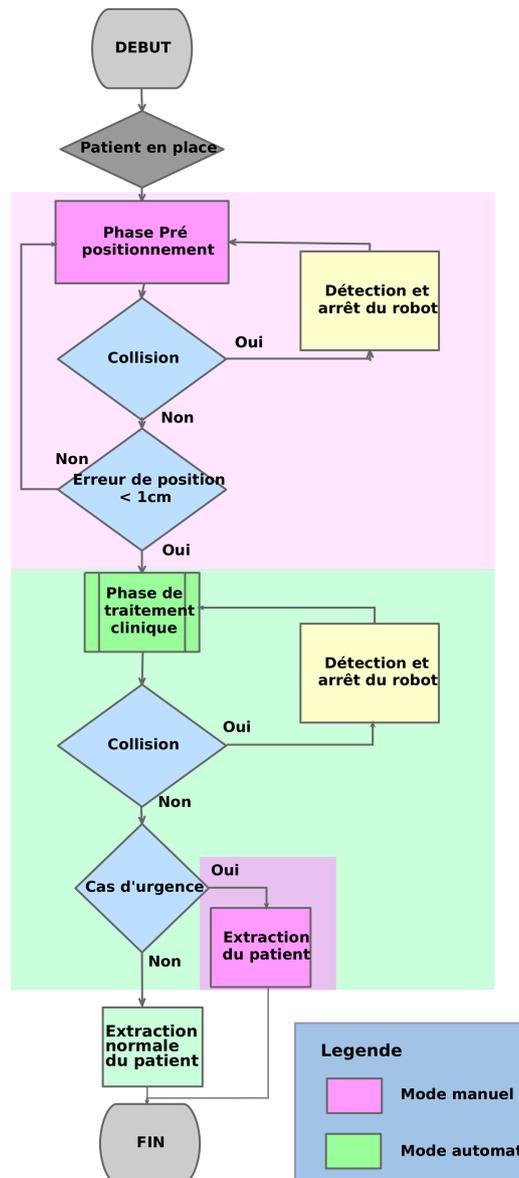


Figure 1.11 – Organigramme du protocole de traitement en protonthérapie incluant le positionnement du patient sur la table, son pré-positionnement, le positionnement du patient dans le Gantry, le traitement en mode automatique et l'extraction en urgence du patient si nécessaire.

le confort du mode comanipulé développé afin qu'il respecte le cahier des charges décrit dans la partie 1. Nous nous baserons sur les travaux de [POQUET 2014, TURNWALD, EGER et WOLLHERR 2015, DUCHAINE et C. GOSSELIN 2011] afin de créer une expérience mettant en jeu le robot Orion muni de sa commande en admittance et des assistants paramédicaux dans laquelle nous mesurerons en condition réelle, la justesse et l'intuitivité de la commande développée.

Le chapitre 6 traite de la détection de collisions. Nous allons dans un premier temps devoir établir un cahier des charges précis tenant compte à la fois de l'analyse de risque et des normes

de sécurité des robots industriels car les normes médicales ne traitent par encore le cas de la co-manipulation.

Par la suite, notre but sera de modéliser le couple théorique que doit fournir chacun des moteurs des axes du robot Orion sachant que nous ne pouvons mesurer le couple qu'en entrée de réducteur (sortie de moteur) et qu'il faudra prendre en compte les rapports de réduction élevés (> 1000) ainsi que les différentes technologies de réducteurs qui entraînent une variation du couple de sortie rendant difficile voire impossible une détection précise. Notre étude se borne aux frottements statiques et dynamiques et n'inclut pas les moments inertiels et les efforts statiques déjà modélisés à LEONI CIA Cable Systems. Nous proposons dans la partie 6.4 de modéliser les frottements secs et visqueux par des méthodes connues et largement utilisées [ARMSTRONG-HÉLOUVRY, DUPONT et CANUDAS DE WIT 1994 SIMONI et al. 2015 NUNINGER, PERRUQUETTI et RICHARD 2006] mais en les adaptant à notre robot de type industriel. Enfin nous proposons une méthode de modélisation fréquentielle des défauts mécaniques des réducteurs, bien qu'ils soient de technologies différentes, ce qui induit plusieurs types de frottements. Comme pour la commande en co-manipulation et pour des raisons de mise en application liée à la thèse CIFRE, nous validerons expérimentalement la méthode proposée de détection de collisions en mesurant quantitativement les efforts résiduels lors d'une collision.

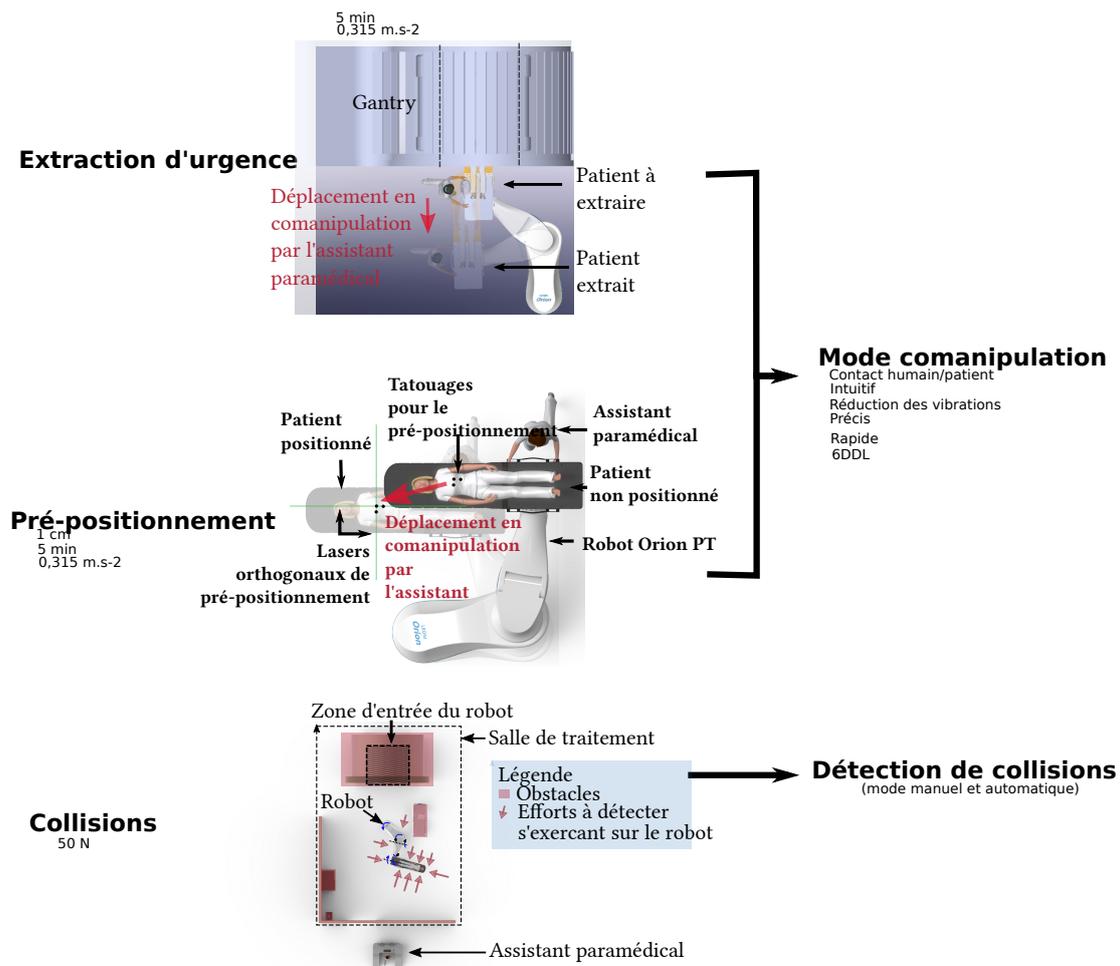


Figure 1.12 – Représentation des besoins médicaux (à gauche) et axes de travail choisis (à droite).

La Figure 1.12 résume les besoins médicaux (à gauche) ainsi que les enjeux scientifiques associés (à droite).

Contexte partenarial

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'un contrat CIFRE 2014-2017 concernant un projet de la société LEONI CIA Cable Systems ayant débuté en 2011 portant sur la conception et la production d'un robot positionneur de patient pour la protonthérapie. Cette thèse regroupe des partenaires des secteurs académique, industriel et clinique.

Le partenaire académique est le laboratoire Prisme de l'université Orléans. Le laboratoire est pluridisciplinaire, et l'axe Robotique impliqué dans cette thèse travaille sur la conception, l'optimisation mécatronique et la commande de robots dans le cadre d'applications médicales. La co-manipulation est un thème abordé par le laboratoire avec plusieurs thèses en cours.

Le partenaire industriel est l'entreprise LEONI CIA Cable Systems basée à Chartres (et Gellainville), elle s'est spécialisée récemment dans la conception et la production du robot Orion étudié dans cette thèse.

Nous avons contacté le centre de radiothérapie de Chartres (COREL) qui nous a guidé sur le cahier des charges et sur le choix des solutions qui conviendraient à leurs yeux le mieux pour une utilisation clinique de la commande développée dans la partie 5.2.

Contributions

Dans le cadre de la co-manipulation sécurisée du robot Orion de forte masse nous avons développé une commande en admittance et implémenté industriellement celle-ci dans le contrôleur existant du robot Orion en tenant compte de la discrétisation et du temps de réponse. Nous avons proposé trois dispositifs haptiques (barre en U, capteur sous la table et joystick 3d) intuitifs s'adaptant à cette commande en admittance et les avons comparés en terme de justesse dynamique et de transparence. Nous avons abordé la sécurisation du robot Orion en développant un mécanisme de détection de collisions basé sur une modélisation des frottements, cela tenant compte de l'inertie importante du robot des grands rapports de réduction qu'il y a sur chaque axe. Une validation expérimentale a été effectuée ainsi qu'une comparaison avec un mécanisme de détection de collisions basé sur l'utilisation d'un capteur d'efforts situé sous la table.

Organisation du manuscrit

Le manuscrit est détaillé de la façon suivante :

Dans le **2^e** chapitre nous présentons un état de l'art des différents robots positionneurs utilisés en protonthérapie puis une description du robot Orion de l'entreprise LEONI CIA Cable Systems que nous utiliserons lors de cette thèse.

Le **3^e chapitre** donne un état de l'art concernant la co-manipulation robotique. Cela nous permettra de développer notre approche d'une commande pour une comanipulation du robot de façon intuitive lors de la phase de pré-positionnement et d'extraction d'urgence.

Le **chapitre 4** porte sur le développement et l'implémentation de la commande en co-manipulation permettant une interaction utilisateur-robot.

Dans le chapitre 5 nous proposons l'étude de plusieurs dispositifs haptiques. Des mesures de performances (transparence et justesse dynamique) sur la plateforme Orion sont présentées à la fin du chapitre afin de quantifier l'apport de la solution de co-manipulation.

L'objectif de sécurité de fonctionnement du robot de protonthérapie est traité dans le **chapitre 6**. Ce chapitre est composé de deux parties. La première partie dresse un état de l'art sur les normes de sécurité robotique, les dispositifs de sécurité utilisés couramment ainsi que sur les systèmes de détection de collisions par mesure de couple (par capteurs proprioceptifs). La seconde partie présente l'approche choisie de modélisation et d'identification des frottements ce qui nous permet d'implémenter sur la plateforme une technique de détection de collisions répondant au cahier des charges dont les mesures quantitatives sont données à la fin de ce chapitre.

Analyse des robots positionneurs, le robot Orion

« L' être humain croira toujours que plus le robot paraît humain, plus il est avancé, complexe et intelligent. »

Isaac ASIMOV

Synthèse :

L'étude dans la littérature de différents robots positionneurs de patients utilisés en protonthérapie nous permet de comprendre la nécessité pour la société LEONI CIA Cable Systems de développer un robot positionneur, possédant une structure originale, dédié spécifiquement à cette application médicale, permettant d'améliorer la justesse de positionnement et son installation dans les salles médicales par rapport aux robot existants.

Sommaire

2.1 État de l'art des robots positionneurs de patients utilisés en protonthérapie	17
2.1.1 Caractéristiques des robots positionneurs de patients utilisés en protonthérapie	17
2.1.2 Conclusion et cahier des charges global du robot Orion	18
2.2 Caractéristiques principales du robot Orion	22
2.3 Modélisation mécanique du robot	23
2.3.1 Modèle géométrique direct	23
2.4 Architecture logicielle	26

2.1 État de l'art des robots positionneurs de patients utilisés en protonthérapie

Cet état de l'art ne se veut pas pleinement exhaustif dans la mesure où une multitude de centres de traitement ont développé des solutions uniques et confidentielles mais a pour objectif de synthétiser les différentes architectures robotiques couramment utilisées pour le positionnement du patient en protonthérapie. Une étude comparative des différents robots positionneurs de patients existant dans les centres de traitement a permis à la société LEONI CIA Cable Systems d'en déduire un cahier des charges pour le robot Orion. En protonthérapie, le positionnement de la tumeur par rapport au faisceau de traitement est effectué à la fois par le Gantry (avec une rotation sur l'axe horizontal) et par le robot positionneur. Les tables de positionnement utilisées en radiothérapie conventionnelle ont évolué vers des robots 6 DDL.

Le début de la protonthérapie (1997) a vu dans un premier temps l'émergence de robots industriels *convertis* à des fins médicales. La société *Forte Automation* développa un produit basé sur un robot industriel Kuka et le mit sur le marché en 2008. Dès lors, certains intégrateurs de salle de traitement de protonthérapie utilisèrent le robot de *Forte Automation* comme positionneur standard, tandis que certains centres de traitement utilisèrent des solutions robotiques développées pour eux en adaptant différents robots sériels industriels. Aujourd'hui d'autres sociétés se sont engagées dans la conception et la fabrication en série de robots positionneurs dédiés à la protonthérapie. C'est le cas de la société LEONI CIA Cable Systems¹ (France) qui débuta son activité de développement de robots positionneurs en 2011 et de *BEC*² (Allemagne) dont le développement du robot est dans une phase de R&D.

L'état de l'art suivant s'appuie sur un premier travail de [PINAULT document interne LEONI CIA Cable Systems]. Il porte sur les positionneurs de patients utilisés en protonthérapie. Cela inclut les robots antropomorphes pour les traitements du corps entier ou d'une partie seulement. Ces traitements sont réalisés avec un Gantry. La seconde partie de cet état de l'art inclut les robots hexapodes pour les traitements de tumeurs positionnées au niveau du crâne, des yeux et du cou. Le robot développé et conçu par LEONI CIA Cable Systems est présenté dans la partie 2.2 et non dans cet état de l'art. Les Figures 2.1 et 2.2 illustrent les différents robots évoqués dans cet état de l'art, tandis que les tableaux 2.1, 2.2 et 2.3 présentent leurs caractéristiques principales.

2.1.1 Caractéristiques des robots positionneurs de patients utilisés en protonthérapie

Les tableaux 2.1, 2.2 et 2.3 résument les caractéristiques des différents robots positionneurs utilisés en protonthérapie.

1. <https://www.leoni-healthcare.com/en/applications/patient-positioning/> site web de la société LEONI CIA Cable Systems (2016)

2. <http://www.exacure.com/a-new-era-of-patient-positioning> site web du fabricant BEC (2016)



(a) Robot hexapode Y2 de traitements assis au centre ICPO (France)



(b) Robot hexapode Optis 2 de traitements assis au centre Paul Scherrer Institute (Suisse)



(c) Robot chaise produite par Schär



(d) Robot Y1 de traitements allongés au centre ICPO (France)



(e) Robot sériel de traitements allongés au centre MPRI (USA)



(f) Robot de traitements allongés du centre iThemba LABS (USA)

Figure 2.1 – Robots utilisés pour le positionnement de patients en protonthérapie (partie 1/2).

Conclusion : d'une manière générale nous pouvons constater que les centres de traitements possèdent à la fois des robots de types hexapodes et anthropomorphes. Cependant, le coût d'un robot anthropomorphe est plus important mais il permet le traitement des tumeurs localisées sur la totalité du corps alors que les robots hexapodes ne sont utilisés que pour les tumeurs localisées au niveau de la tête.

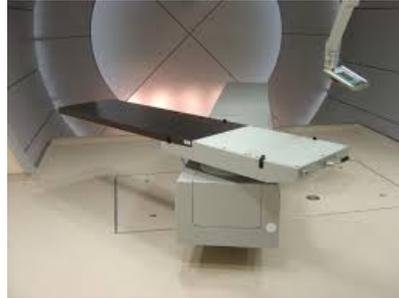
2.1.2 Conclusion et cahier des charges global du robot Orion

La plupart des robots actuellement proposés sur le marché sont des robots industriels 6 DDL (basés pour la majorité sur des bases Kuka ou Fanuc) qui ont été adaptés pour le positionnement de patient en protonthérapie, c'est le cas du robot de *Forte Automation* et de quelques robots de la société Schär-engineering.

2.1. ÉTAT DE L'ART DES ROBOTS POSITIONNEURS DE PATIENTS UTILISÉS EN PROTONTHÉRAPIE



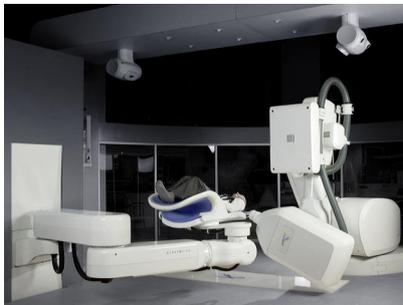
(a) Robot examove 7c de BEC



(b) Robot hybride cartésien/scara construit par Schär-engineering



(c) Robot mobile construit par Schär pour le centre CNAO (Italie)



(d) Positionneur de patients basé sur un robot Kuka pour la radio chirurgie (photons et électrons)



(e) Robot sériel basé sur Kuka construit par Forte Automation

Figure 2.2 – Robots utilisés pour le positionnement de patients en protonthérapie (partie 2/2).

Les caractéristiques principales d'un robot industriel sont :

- une répétabilité élevée ;
- une vitesse de déplacement élevée comparée aux besoins médicaux.

Les robots industriels ont été utilisés comme positionneurs de patients car ils sont largement disponibles sur le marché pour les intégrateurs qui veulent développer leur propre solution de positionnement adaptée au domaine médical sans partir de zéro et développer leur propre positionneur. Cependant, les robots industriels ne sont pas intrinsèquement les meilleurs types de robot pour une application de positionnement de patient en protonthérapie dans laquelle il est nécessaire de disposer d'un dispositif non pas répétable mais juste. En effet, la tumeur doit être correctement positionnée à l'endroit exact de la focalisation du faisceau de protons ce qui nécessite une justesse de pose importante et non pas seulement une forte répétabilité. De plus, la protonthérapie nécessite de disposer d'un positionneur robotique supportant une forte charge embarquée tout en limitant la flexibilité des segments.

Afin de répondre au cahier des charges de l'application médicale (et d'améliorer la justesse de positionnement de la tumeur sous le faisceau de protons), il a été décidé par l'entreprise LEONI CIA Cable Systems de concevoir un robot spécifiquement adapté à l'application de positionnement de patients pour la protonthérapie dont les principales caractéristiques sont :

	Chaises		
			
Structure	héxapode	héxapode	cartésien
Base robotique	Fanuc F200	Fanuc F200	Schär
Nombre d'articulations	N/A	N/A	N/A
Charge embarquée	N/A	N/A	N/A
Justesse	0,5 mm	0,5 mm	N/A
Répétabilité	0,1 mm	0,1 mm	N/A
Centre de traitement	ICPO Orsay ^a		
Tumeurs traitées			
Date de mise en service			
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Plage de rotation relativement grande pour ce type de robot (Tangage $\pm 15^\circ$, roulis $\pm 15^\circ$ et lacet $\pm 190^\circ$) - Compacité - Coût d'installation réduit - Grande rigidité 	<ul style="list-style-type: none"> Plage de rotation relativement grande pour ce type de robot (Tangage $\pm 15^\circ$, roulis $\pm 15^\circ$ et lacet $\pm 40^\circ$) - Compacité (fausse de seulement 0,5m de profondeur) - Coût d'installation réduit - Grande rigidité 	N/A
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Volume de travail réduit Nécessité d'une fosse (0,7m de profondeur) 	<ul style="list-style-type: none"> - Volume de travail réduit - Nécessité d'une fosse (0,5m de profondeur) 	N/A

Tableau 2.1 – Caractéristiques des robots positionneurs de patients en protonthérapie (1/3)

a. <http://protontherapie.curie.fr> site web du centre ICPO (2016)

- une rigidité intrinsèque plus élevée diminuant la flexion de la structure du robot afin de garantir la justesse de positionnement avec une charge embarquée de 300 kg ;
- des vitesses de déplacement plus faibles qu'un robot industriel afin de garantir la sécurité des opérateurs présents dans la salle de traitement ;

2.1. ÉTAT DE L'ART DES ROBOTS POSITIONNEURS DE PATIENTS UTILISÉS EN PROTONTHÉRAPIE

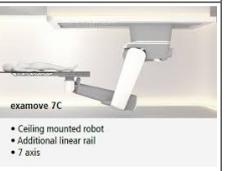
	Tables			
				
Structure	Sériel	Sériel	Sériel	Sériel
Base robotique	Fanuc S900	Motoman	Motoman	Kuka
Nombre d'articulations	6	6	6	7
Charge embarquée	200 kg	130 kg	200 kg	300 kg
Justesse	0,3 mm	0,3 mm	0,2 mm	N/A
Répétabilité	0,3 mm	0,3 mm	0,2 mm	N/A
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Grand volume de travail du robot (2000x1000x1000 mm) - Plage de rotation assez grande pour ce type de robot (Tangage $\pm 20^\circ$, roulis $\pm 20^\circ$ lacet $\pm 210^\circ$) - Prise patient basse (60 cm) 	- N/A	<ul style="list-style-type: none"> - Prise patient basse (60 cm) - Grand volume de travail (1500x1000x1000 mm) - Plage de rotation assez grande pour ce type de robot (tangage $\pm 20^\circ$, roulis $\pm 20^\circ$ et lacet + 200° / -170°) 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de fosse nécessaire (remplacée par un support au plafond)
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessité d'une fosse (1,2m de profondeur) - Nécessité de caractérisations mécaniques importantes pour garantir la répétabilité - Porte à faux et absence de compensation de déformation due à la charge - Problème de dérive lors de rotations isocentriques 	- N/A	<ul style="list-style-type: none"> - Volume de travail peu adapté aux traitements avec une Gantry - Nécessité d'une fosse (1,2m de profondeur) - Porte à faux et absence de compensation de déformation due à la charge 	-

Tableau 2.2 – Caractéristiques des robots positionneurs de patients en protonthérapie (2/3)

— une amélioration de la justesse de positionnement : 0,5 mm en norme euclidienne en 3 dimensions.

2.2 Caractéristiques principales du robot Orion

Le robot positionneur Orion est basé sur les architectures mécaniques des robots industriels tout en étant spécialement adapté pour répondre aux besoins de l'application de positionnement de patient en protonthérapie. Le robot Orion est d'une structure hybride SCARA/Puma et conçue sous la forme d'un exosquelette, dans lequel les câbles et les moteurs sont intégrés à la structure (Figure 2.3).



Figure 2.3 – Robot Orion et sa structure hybride SCARA/Puma.

La charge maximale que peut embarquer le robot Orion dépend du point d'application de celle-ci par rapport à l'effecteur. Elle est de :

- 375 kg à 0,5 m de l'effecteur ;
- ou par exemple, 260 kg à 1 m de l'effecteur (voir Figure 2.4).

Le robot Orion définit deux espaces de travail différents : le volume maximal dans lequel il peut être déplacé (à l'instar des robots industriels) (Figure 2.5) et l'espace réservé à la zone de traitement médical qui est un volume parallélépipédique positionné sur la table médicale par rapport à l'effecteur et dans lequel est localisée la tumeur (Figure 2.6). Les dimensions du volume de traitement représenté dans la Figure 2.6 sont : 100 cm x 50 cm x 40 cm.

Les caractéristiques du robot en termes de vitesses, accélérations et précisions sont données dans le Tableau 2.4.

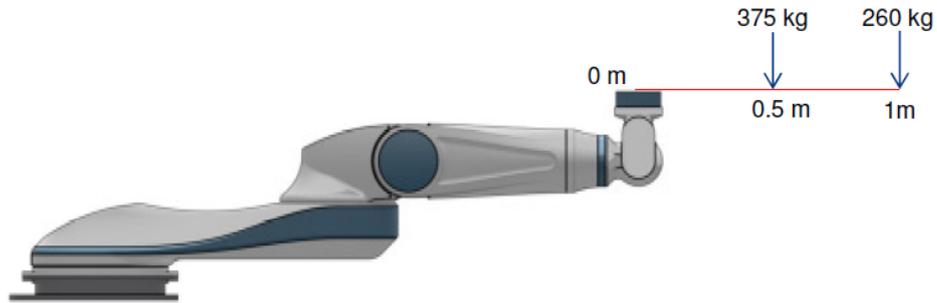
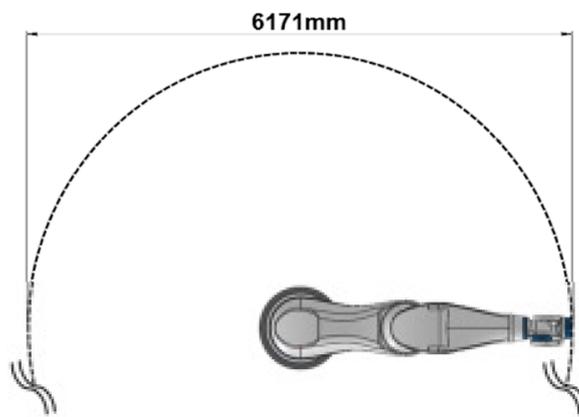
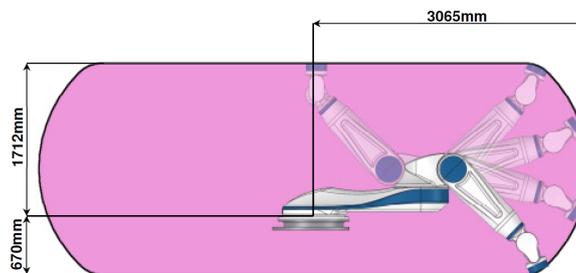


Figure 2.4 – Charge maximale que peut embarquer le robot Orion.



(a) Espace de travail total du robot Orion - vue de dessus



(b) Espace de travail total du robot Orion - vue de côté

Figure 2.5 – Représentation de l'espace de travail total du Orion vue de dessus (a) et vue de côté (b).

2.3 Modélisation mécanique du robot

2.3.1 Modèle géométrique direct

Le schéma cinématique du robot Orion est donné en Figure 2.7.

La modélisation du robot Orion a été faite en utilisant la notation de Khalil et Kleinfinger [KHALIL et KLEINFINGER 1986] dont un exemple est donné en Figure 2.8. La matrice des

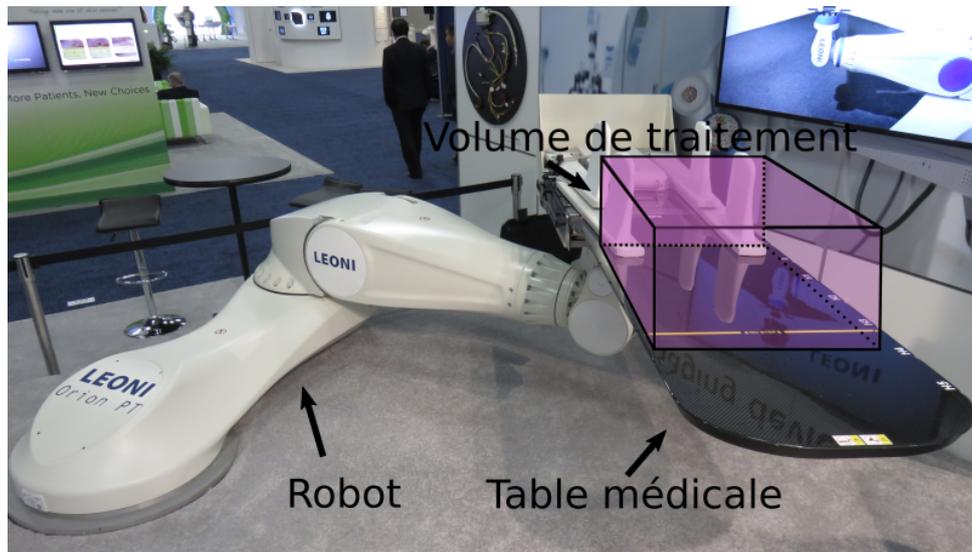


Figure 2.6 – Volume virtuel représentant la zone de traitement médicale associée au robot Orion

paramètres de Denavit-Hartenberg modifiée est donnée dans le tableau 2.5.

D'où on peut en déduire les matrices de transformations homogènes intermédiaires suivantes :

$$T_{01} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{12} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & d_2 \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{23} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{34} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & -\sin(\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r_4 \\ -\sin(\theta_4) & -\cos(\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{45} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_5) & -\sin(\theta_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin(\theta_5) & \cos(\theta_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{56} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_6) & -\sin(\theta_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_6) & -\cos(\theta_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

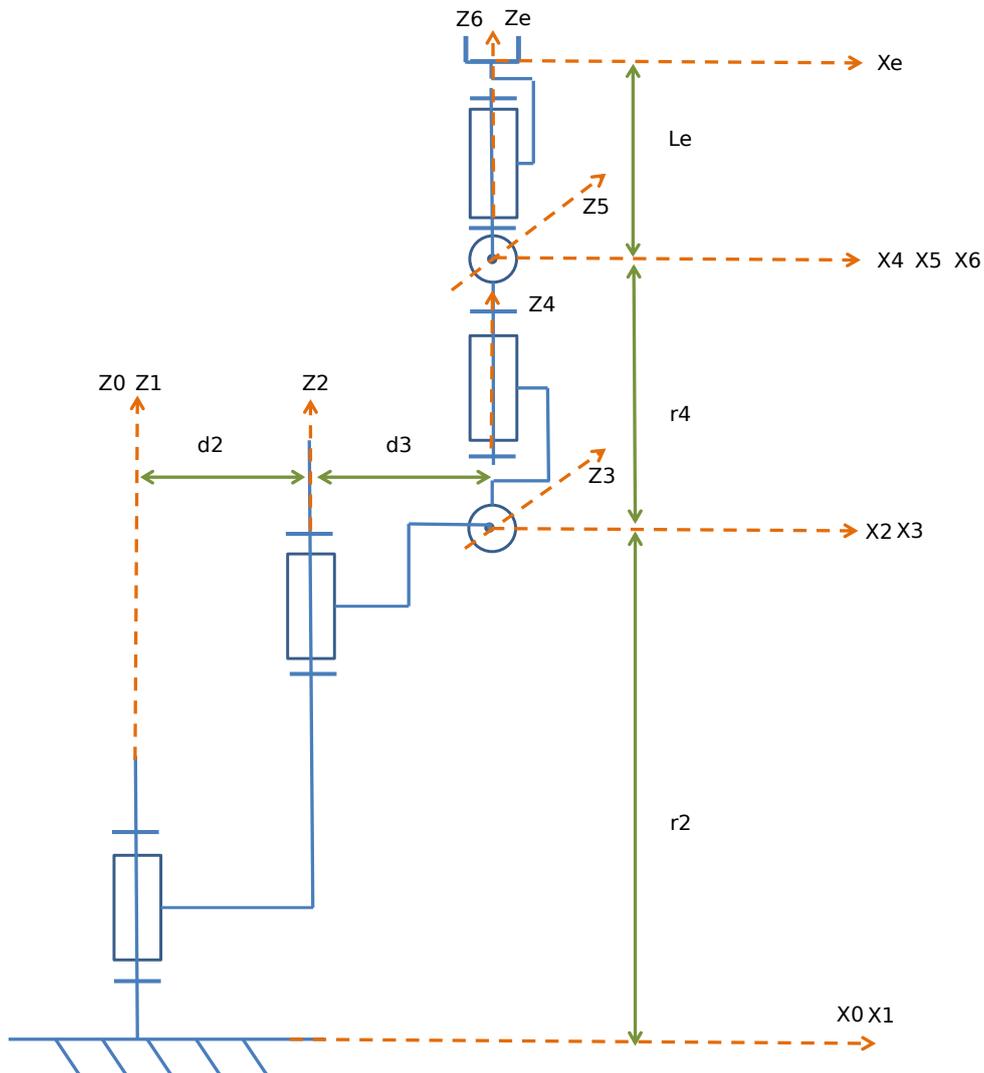


Figure 2.7 – Schéma cinématique du robot Orion.

$$T_{6E} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_E \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

D'après [KHALIL et KLEINFINGER 1986], la matrice de transformations homogènes globale se déduit en multipliant toutes les matrices de transformations homogènes intermédiaires (équation (2.1)), ce qui nous permet d'obtenir l'équation (2.2).

$$T_{0n} = \prod_{i=0}^{n-1} T_{i \ i+1} \quad (2.1)$$

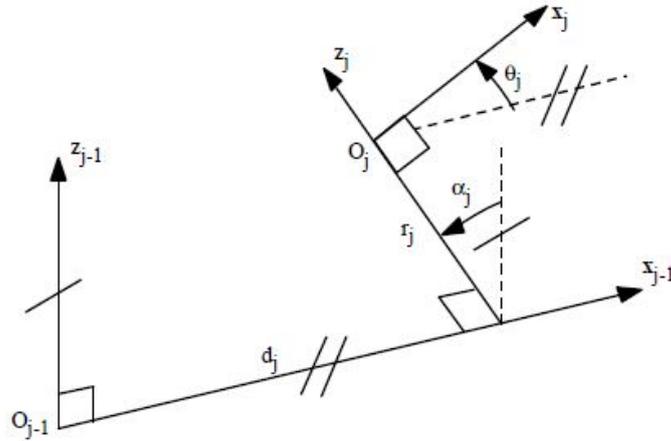


Figure 2.8 – Notation de Khalil-Kleinfinger utilisée pour la modélisation du robot Orion.

$$T_{0E} = T_{01} \cdot T_{12} \cdot T_{23} \cdot T_{34} \cdot T_{45} \cdot T_{56} \cdot T_{6E} \quad (2.2)$$

2.4 Architecture logicielle

l'ensemble des structures logicielles ont été développées par LEONI CIA Cable Systems afin de gérer le pilotage, la maintenance et la commande temps-réel. Elle est constituée de quatre parties principales représentées dans la Figure 2.9 :

- les cartes d'axes permettent de piloter les moteurs actionnant les 6 articulations du robot, cette partie est appelée *Hardware Control Unit (HCU)* ;
- l'automate de sécurité (appelé *Safety Control Unit (SCU)*) est indépendant et autonome, il vérifie que les valeurs de position, vitesse, accélération, etc. ne dépassent pas les valeurs maximales configurées ;
- le *Motion Control Unit (MCU)* contient les modèles (géométrique, cinématique et dynamique) du robot afin de pouvoir déplacer le robot par la librairie CoSi et fonctionne avec un système d'exploitation temps-réel ;
- le *Applicative Control Unit (ACU)* (non utilisé lors de cette thèse) est destiné aux clients qui intègrent le robot dans la salle de traitement ; il est le seul moyen pour eux de le piloter par l'intermédiaire d'une API développée en Ruby. Il utilise un système d'exploitation type UNIX et est non temps-réel. Ce PC est connecté au *MCU*, il commande le robot en utilisant le *MCU*.

Le *SCU* et le *HCU* ne permettent pas de piloter le robot directement. Ils ne seront pas étudiés dans ce travail de thèse.

Les connexions entre les différentes parties détaillées précédemment sont illustrées sur la Figure 2.10 qui détaille les modules de la baie de commande de la Figure 2.9. Le tableau 2.6 résume pour chaque élément la librairie utilisée ainsi que son type de système d'exploitation.

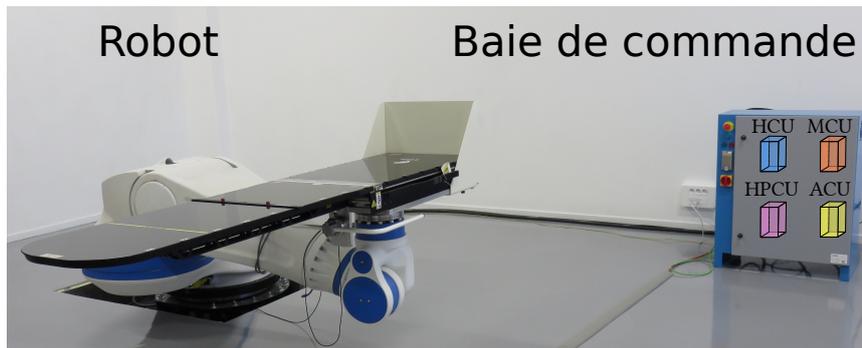


Figure 2.9 – Vue du robot Orion ainsi que sa baie de commande incluant les 4 parties matérielles de commande du robot (SCU, HCU, MCU, ACU)

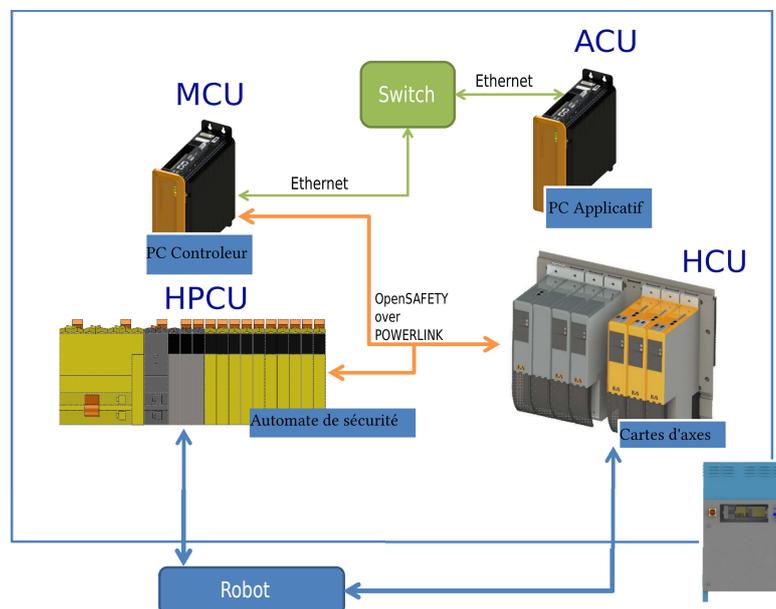


Figure 2.10 – Architecture de commande simplifiée du robot Orion.

D'un point de vue applicatif, pour piloter le robot plusieurs possibilités s'offrent à nous :

- implémenter les lois de commande directement dans le *MCU* avec la librairie CoSi, ce qui impose la condition de temps-réel pour l'application développée ;
- utiliser l'*ACU*, ce qui impose de développer en langage Ruby ;
- utiliser un PC qui sera connecté soit à l'*ACU* (donc nous devons utiliser la librairie Ruby) ou alors connecté au *MCU* (donc nous devons utiliser la librairie CoSi). Cela n'implique pas de développer une application temps-réel car les calculs de notre application seront exécutés par le PC puis les résultats seront envoyés au *MCU* par une liaison Ethernet.

Le *MCU* est un PC temps-réel fonctionnant sous le système d'exploitation VxWorks dont la cyclique principale d'envoi des commandes est fixée à 10 ms. Développer nos lois de commande sur cet ordinateur nécessite de n'utiliser que des librairies tierces compilables pour la cible VxWorks (temps-réel). Dans un premier temps nous préférons nous affranchir de cette contrainte

afin de pouvoir utiliser des bibliothèques de traitement de signal ou des drivers de capteurs ne respectant pas cette contrainte. La solution d'utiliser l'*ACU* ou de communiquer avec lui par la bibliothèque Ruby spécifique a été expérimentée en premier pour sa simplicité d'utilisation et sa rapidité à créer, modifier et expérimenter des commandes simples. Cependant, le manque d'outils mathématiques et les faibles performances en terme de rapidité nous ont amené à nous passer de cette couche haut-niveau et à communiquer directement avec le *MCU*. De ce fait, nous avons accès à la bibliothèque robotique CoSi développée par LEONI CIA Cable Systems et nous communiquons nos commandes en vitesse dans l'espace opérationnel avec le *MCU* qui se charge de les transposer dans l'espace articulaire et de piloter le robot par l'intermédiaire du *HCU*.

Dans la suite de cette thèse, nous implémenterons des algorithmes de commandes qui seront exécutés sur un PC standard avec système d'exploitation non temps-réel (Windows 7 et GNU/Linux Arch). Le PC enverra les commandes de vitesse dans l'espace opérationnel (préalablement calculées sur celui-ci) issues des lois de commandes vers le *MCU* par un réseau Ethernet qui sera chargé de calculer puis envoyer les commandes articulaires au *HCU* (Figure 2.10).

	Tables		
			
Structure	Cartésien	Sériel	Sériel
Base robotique	Schär	Kuka	
Nombre d'articulations	N/A	N/A	6
Charge embarquée	N/A	N/A	220 kg
Justesse	N/A	N/A	1,5 mm
Répétabilité	N/A	N/A	0,2 mm
Avantages	N/A	N/A	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de fosse nécessaire (remplacée par un pilier) - Grand volume de travail (1500x1000x1000 mm) - Plage de rotation assez grande pour ce type de robot (tangage $\pm 20^\circ$, roulis $\pm 20^\circ$ lacet $+ 200^\circ / -170^\circ$)
Inconvénients	N/A	N/A	<ul style="list-style-type: none"> - Volume de travail peu adapté aux traitements - Nécessité d'une fosse (1,2m de profondeur) - Porte à faux et absence de compensation de déformation due à la charge

Tableau 2.3 – Caractéristiques des robots positionneurs de patients en protonthérapie (3/3)

Nom	Valeur
Nombre d'axes	6 axes rotoïdes
Vitesse maximale de l'effecteur en translation	$0,1 \text{ m.s}^{-1}$
Vitesse maximale de l'effecteur en rotation	$0,1 \text{ rad.s}^{-1}$
Précision de positionnement cartésien en translation	0,5 mm
Précision de positionnement cartésien en rotation	$0,2^\circ$
Accélération maximale de l'effecteur en rotation	0.1 cm.s^{-2}
Accélération maximale de l'effecteur en rotation	$12^\circ.\text{s}^{-2}$
Angle de rotation vertical de la table	$\pm 100^\circ$
Angle de tangage et roulis de la table	$\pm 5^\circ$

Tableau 2.4 – Caractéristiques de vitesses, accélérations et précisions du robot Orion.

•	α	r	θ	d
1	0	0	θ_1	0
2	0	r_2	θ_2	d_2
3	$\pi/2$	0	θ_3	d_3
4	$-\pi/2$	r_4	θ_4	0
5	$\pi/2$	0	θ_5	0
6	$-\pi/2$	0	θ_6	0

Tableau 2.5 – Paramètres représentant le formalisme de Denavit-Hartenberg modifiée pour le robot Orion.

PC	Type d'O/S	OS	Librairie utilisée pour piloter le robot
<i>SCU</i>	N/A	N/A	N/A
<i>HCU</i>	N/A	N/A	N/A
<i>MCU</i>	Temps-réel	VxWorks	CoSi
<i>ACU</i>	Non temps-réel	Gnu/Linux Debian	Ruby
PC portable	Non temps-réel	Gnu/Linux Arch	Ruby et CoSi

Tableau 2.6 – Les différents éléments de commande du robot Orion.

État de l'art sur l'interaction physique Homme-robot

« *Un robot n'est pas tout à fait une machine. Un robot est une machine fabriquée pour imiter de son mieux l'être humain.* »

Isaac ASIMOV

Synthèse :

Le robot Orion est un système robotique possédant une masse importante. Les étapes manuelles de pré-positionnement du patient et d'extraction d'urgence nécessitent le développement d'une commande Homme-robot manuelle reposant sur un système haptique dédié et adapté à cette contrainte de forte masse. Nous proposons une revue de la littérature des commandes de co-manipulation robotique afin de comprendre l'intérêt de ces commandes complexes par rapport à des commandes plus simples pour notre cas d'utilisation. Nous accentuons l'étude sur la sécurité (gestion et détection des collisions) de l'interaction physique Homme-robot. À partir de cet état de l'art, nous proposons ici une commande dont les étapes et résultats d'intégration dans la structure robotisée Orion sont présentés dans le chapitre 4.

Sommaire

3.1	Objectifs de la co-manipulation	33
3.1.1	Programmation par démonstration (<i>Lead-through programming</i>)	33
3.1.2	Filtrage des tremblements	33
3.1.3	Mise à l'échelle de l'effort appliqué	34
3.1.3.1	Augmentation d'efforts (aide au transport de charges)	34

3.1.3.2	Réduction des efforts	35
3.1.4	Guides et murs virtuels	35
3.2	Historique	36
3.2.1	Commande hybride position/force	36
3.2.2	Commande en force nulle	37
3.2.3	Commande en amortissement	37
3.2.4	Commande en raideur	39
3.2.5	Commande compliant (impédance/admittance)	39
3.2.6	Commande impédance/admittance hybride unifiée	40
3.3	Stabilité	41
3.3.0.1	Modélisation du système complet homme/robot/patient	42
3.4	Structures de commande	43
3.5	Boucles internes	44
3.5.1	Boucle interne en position	44
3.5.2	Boucle interne en vitesse	44
3.5.3	Boucle interne en couple	45
3.6	Structures mécaniques utilisées	45
3.7	Rôle et modèle de l'opérateur dans la boucle de commande	45
3.8	Modes d'interaction collaborative	46
3.9	Rôle du capteur d'efforts dans les commandes compliantes	48
3.10	Influence des paramètres de la commande	48
3.11	Projets de recherche	49
3.12	Robots utilisant la co-manipulation	50
3.13	Détection et évitement d'obstacles pour la co-manipulation	50
3.14	Conclusion et résumé des choix	52

Nous présentons dans ce chapitre un état de l'art sur la co-manipulation robotique en incluant les aspects relatifs à la sécurité de l'opérateur. Cet état de l'art a pour but de choisir la commande compliant de co-manipulation permettant de respecter le cahier des charges défini en partie 1. Cet état de l'art permet en plus de définir le nombre de capteurs d'efforts nécessaires, la boucle de commande interne à utiliser et les valeurs des paramètres de la commande de co-manipulation. Nous proposons d'étudier en premier lieu les possibilités offertes par les robots comanipulés avant de dresser un historique des recherches effectuées dans ce domaine. Nous détaillons les différentes commandes en co-manipulation étudiées dans la littérature en incluant leurs avantages et inconvénients afin de déterminer la commande la plus adaptée à notre application médicale robotisée. Nous incluons une revue de la littérature concernant les dispositifs logiciels permettant aux robots collaboratifs d'évoluer en présence d'opérateurs humains de façon sécurisée. Nous présentons les différents projets de recherche ayant pour but la sécurité de l'interaction Homme-robot ainsi que les algorithmes d'évitement et de détection de collisions utilisés pour ce type de robots comanipulés. En fin de chapitre, nous donnons quelques exemples de robots industriels et de recherche intégrant une commande en co-manipulation.

Définition La co-manipulation est l'action pendant laquelle plusieurs entités (humains ou robots) participent ensemble afin de réaliser une tâche commune. La co-manipulation considérée ici est la co-manipulation humain-robot, dans ce cas, le robot est appelé un *cobot*.

3.1 Objectifs de la co-manipulation

Nous proposons de classer les objectifs de la co-manipulation en trois grandes catégories.

3.1.1 Programmation par démonstration (*Lead-through programming*)

La programmation par démonstration est utilisée fréquemment en co-manipulation. Dans ce mode d'utilisation, le robot est pourvu d'une assistance qui le rend léger lorsque l'opérateur applique un effort sur l'effecteur. Le robot enregistre la trajectoire effectuée en co-manipulation et rejoue cette trajectoire de façon automatique sans l'intervention de l'opérateur [JR, LIN et LIM 1999]. Par exemple, le robot DermaRob [DOMBRE et al. 2003] (Figure 3.1) permet de prélever une bande de peau sur un corps humain. Cette trajectoire est exécutée une seconde fois par le robot via un générateur de trajectoires automatiques en limitant la force de contact de l'outil découpant la bande de peau d'épaisseur définie.

3.1.2 Filtrage des tremblements

Les robots utilisés pour la chirurgie de l'oeil [TAYLOR et al. 1999] utilisent aussi la co-manipulation (Figure 3.2). Leur but est d'assister le geste du chirurgien pendant la manipulation. Le chirurgien procède à l'insertion d'une aiguille à travers la cornée en manipulant le robot en co-manipulation (Figure 3.4a). Le robot suit le mouvement de la main du chirurgien et supprime les tremblements inhérents au mouvement humain.

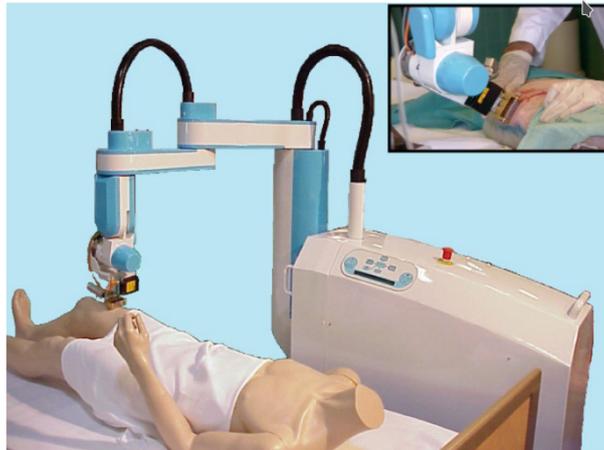


Figure 3.1 – Robot DermaRob permettant de découper une bande de peau d'épaisseur définie en utilisant la programmation par démonstration avec une commande en admittance [DOMBRE et al. 2003].

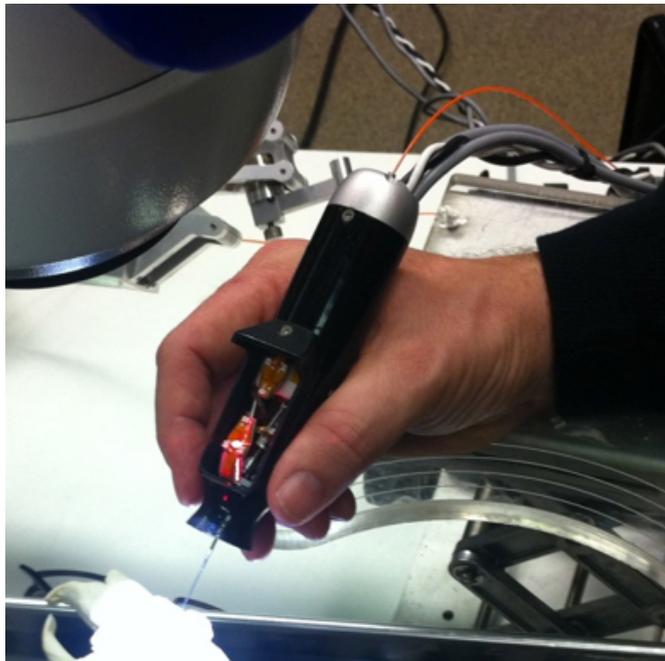


Figure 3.2 – Robot Micron de l'Université Carnegie Mellon utilisé dans la chirurgie de l'oeil [maclachlan2012-a]

3.1.3 Mise à l'échelle de l'effort appliqué

3.1.3.1 Augmentation d'efforts (aide au transport de charges)

Plusieurs dispositifs robotiques comanipulés permettent d'aider l'opérateur à transporter des charges en augmentant les efforts appliqués de celui-ci sur le robot. Nous pouvons citer les Intelligent Assist Devices (IAD) [Alexandre CAMPEAU-LECOURS 2012, JLIASSI 2013 et COLGATE, PESHKIN et KLOSTERMEYER 2003] qui sont des treuils motorisés permettant à un opérateur de

soulever des charges importantes. Nous pouvons faire l'analogie de ce type de robot avec le robot Orion avec lequel l'opérateur doit agir sur le robot pour déplacer le patient qui fait office d'une charge [DUMORA 2014 LAWITZKY, MORTL et HIRCHE 2010 TAKUBO, H. ARAI et TANIE 2001].



Figure 3.3 – IAD de ASE Systems.

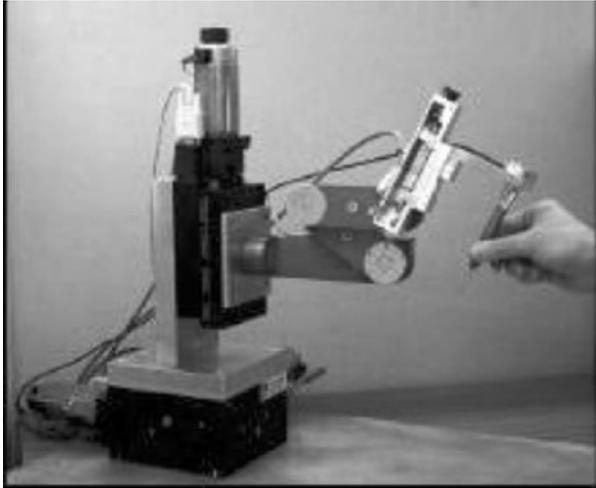
3.1.3.2 Réduction des efforts

Dans le cadre des robots de laparoscopie, il est nécessaire d'implémenter des notions de réductions d'efforts afin de minimiser les risques de l'application des outils sur les organes vitaux et d'améliorer la précision du geste [CAGNEAU et al. 2008] (Figure 3.4b).

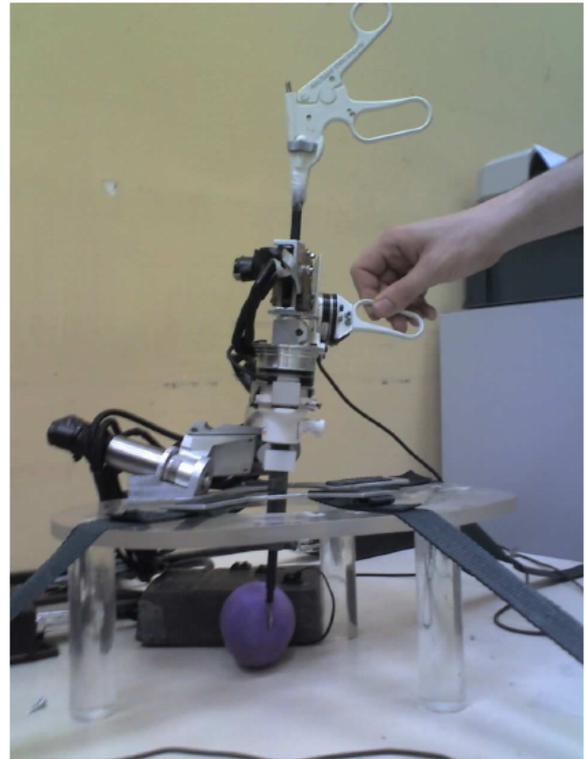
3.1.4 Guides et murs virtuels

Des robots utilisés en chirurgie orthopédique tirent partie de la commande en impédance (ou admittance) en définissant des guides virtuels [ROSENBERG et ADELSTEIN 1993] permettant au chirurgien de manipuler un outil, par exemple une fraise rotative en l'empêchant d'accéder à certaines zones vitales [HOWARD et SZEWCZYK 2014, JOLY 1997 et BOWYER et BAENA 2015] (Figure 3.5). Une commande dédiée rend transparent le robot pour l'opérateur et permet de ne pas perturber le geste de celui-ci.

Conclusion Le robot Orion de grande inertie a pour tâche de déplacer un patient allongé sur la table médicale en bout d'effecteur. Ce patient représente une charge lourde que ne peut pas déplacer un opérateur seul et sans assistance. La commande que nous devons développer à pour but l'assistance à l'opérateur pour le déplacement du patient en augmentant les efforts que celui-ci exerce sur l'effecteur du robot.



(a) Robot SteadyHand pour la chirurgie de l'oeil utilisant la réduction d'effort et le filtrage des tremblements TAYLOR et al. 1999.



(b) Robot de laparoscopie MC2E CAGNEAU et al. 2008.

Figure 3.4 – Exemples de robots utilisant la réduction d'effort

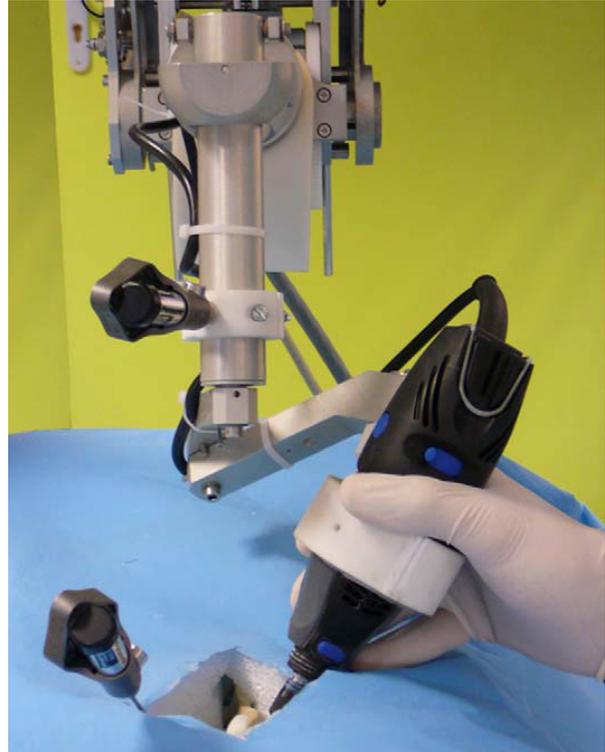
3.2 Historique

3.2.1 Commande hybride position/force

Dès la fin des années 1970 la commande hybride position/force fait son apparition, elle permet de découpler dans l'espace opérationnel du robot le mouvement de l'effort appliqué à l'environnement [RAIBERT et CRAIG 1981 et JOLY 1997]. La commande traditionnelle en position des robots sériels manipulateurs a évolué vers les années 1960 vers de la commande en force. Contrairement à la commande en position qui définit une position que le robot (son effecteur) doit atteindre quelle que soit la force de contact du robot sur l'environnement, la commande en force prend en compte les interactions robot/environnement ou robot/opérateur en les limitant ou en exerçant un effort de valeur défini. La commande en position peut conduire à des efforts très importants exercés par le robot amenant à la détérioration de celui-ci ou de l'environnement sur lequel il interagit.



(a) Robot RIO de Makoplasty utilisé pour la chirurgie du genou HAGAG et al. 2011.



(b) Robot Surgicobot RHIJN et al. 2010.

Figure 3.5 – Exemple de robots utilisant les guides virtuels.

3.2.2 Commande en force nulle

Lors d'une interaction Homme-robot il peut être décidé de rendre la force d'interaction (force exercée par l'opérateur sur le robot) nulle afin d'obtenir une co-manipulation en espace libre [KAZANZIDES 1992]. Lorsque l'opérateur exerce une force sur le robot, mesurée par le capteur d'efforts, la commande en boucle fermée calcule alors une consigne envoyée au robot afin que la force mesurée tende vers 0 [Alexandre CAMPEAU-LECOURS 2012] (Figure 3.7). Un des premiers exemple de robot comanipulé avec une commande en force est probablement le projet **Hardiman** de General Electric [CROSHAW 1969]. Ce robot est un exosquelette qui permet l'augmentation d'un facteur 25 des efforts de l'opérateur situé à l'intérieur du robot (Figure 3.6). Le projet n'a pas abouti et fut abandonné par General Electric car le système était trop complexe et dangereux pour une utilisation commerciale. Ce robot devait permettre à l'opérateur de manipuler des charges lourdes.

3.2.3 Commande en amortissement

La commande en amortissement (Figure 3.8) est une évolution de la commande en force pure, elle rend le comportement du robot équivalent à celui d'un système mécanique composé uniquement d'un amortisseur [Daniel E. WHITNEY 1977]. La vitesse de l'effecteur est proportionnelle



Figure 3.6 – Projet Hardiman de General Electric [CROSHAW 1969].

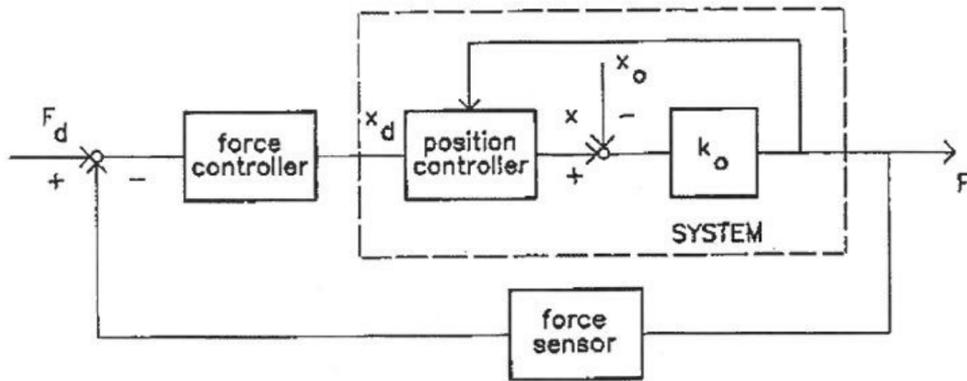


Figure 3.7 – Exemple de structure de commande en force nulle [SCHUTTER et BRUSSEL 1988].

à la force appliquée par le robot sur l'environnement ou à celle appliquée par l'opérateur sur le dispositif haptique le cas échéant.

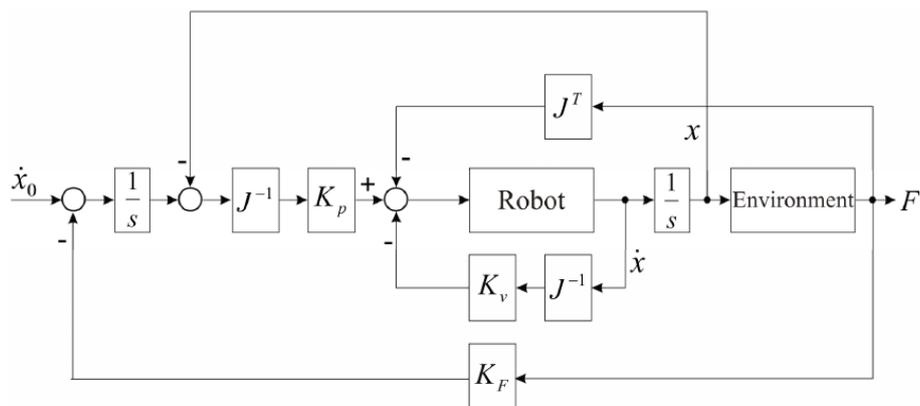


Figure 3.8 – Exemple de structure de commande en amortissement [VUKOBRATOVIC 2009].

3.2.4 Commande en raideur

La commande en raideur (Figure 3.9) [SALISBURY 1980] est le pendant en position de la commande en amortissement. La position de l'effecteur est proportionnelle à la force appliquée par le robot sur l'environnement. Comme la commande en amortissement, cette commande peut s'utiliser dans l'espace articulaire ou opérationnel, en espace libre ou en espace contraint.

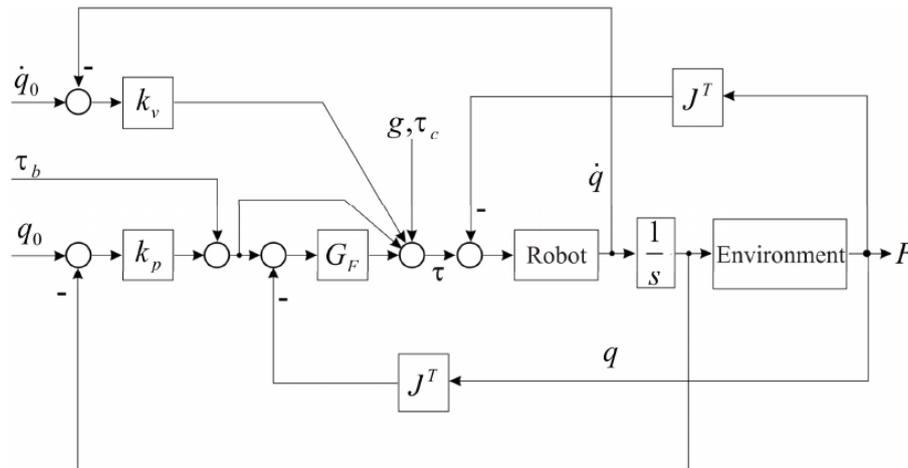


Figure 3.9 – Exemple de structure de commande en raideur [VUKOBRATOVIC 2009].

3.2.5 Commande compliant (impédance/admittance)

En 1985 [Neville HOGAN 1985] publie un article fondateur sur la commande au contact traitant de la commande en impédance (Figure 3.11). Cette commande impose à l'effecteur du robot une relation entre la force appliquée sur l'environnement et son mouvement, de la même façon qu'un système mécanique masse-ressort-amortisseur. [Alexandre CAMPEAU-LECOURS 2012] propose de différencier la commande en impédance de celle en admittance de la façon suivante :

« La commande par impédance accepte un déplacement en entrée et réagit avec une force en sortie, calculée à partir du modèle dynamique désiré. La commande par admittance, au contraire, accepte une force en entrée et réagit avec un déplacement en sortie. » Alexandre Campeau-Lecours.

Pour présenter les avantages et inconvénients de ces deux commandes nous proposons de nous baser sur les travaux de [Alexandre CAMPEAU-LECOURS 2012] portant sur la commande de robots en interaction physique avec un opérateur. Dans le chapitre 1.2 de [Alexandre CAMPEAU-LECOURS 2012] il est expliqué que la commande par impédance est adaptée aux robots de *faible inertie* ayant *peu de frottements dans les articulations*. De plus, un capteur d'efforts n'est pas nécessaire mais cela permet de diminuer l'inertie apparente du robot pendant l'interaction. Dans le cas où le capteur d'efforts n'est pas présent, il est nécessaire de fixer l'inertie virtuelle identique à l'inertie réelle du robot. Précisons enfin que ce type de commande est plus répandu que la commande par admittance. L'inconvénient de la commande en impédance est qu'elle nécessite

une commande en couple du robot. Un des premiers travaux validé expérimentalement de commande en impédance avec interaction avec l'environnement date de 1993 [KAZEROONI 1993].

À contrario, la commande en admittance est instable en environnement rigide et nécessite 1 ou 2 capteurs d'efforts. De plus, cette commande nécessite une boucle interne performante minimisant l'erreur de consigne [LAWRENCE 1988]. Contrairement à la commande en impédance, la commande en admittance permet de donner un rendu de faible masse pour des robots de forte inertie et possédant une friction élevée dans les articulations. Elle est par ailleurs plus robuste car elle ne nécessite pas l'utilisation d'un modèle dynamique, ce qui pourrait introduire des incertitudes de modélisation, bien que celui-ci permet dans certains cas d'augmenter les performances (réduction de l'inertie apparente). Enfin, l'auteur explique qu'un capteur de force, bien que non obligatoire, est cependant préférable. [KOSUGE, FUJISAWA et FUKUDA 1993] propose une validation expérimentale à un degré de liberté de la commande en admittance en contact et ajoute la modélisation du bras de l'opérateur. Par la suite, il a été envisagé d'étudier l'opérateur interagissant avec le robot comanipulé afin de proposer une commande plus intuitive. [KAZANZIDES 1992] publie un article portant sur la commande du robot ROBODOC, un robot SCARA de chirurgie orthopédique. Il s'agit d'un des premiers robots, utilisant une commande compliant avancée, produit industriellement à partir de 1990 et utilisé par la suite pour la mise en place de prothèses de genoux (Figure 3.10).



Figure 3.10 – Chirurgien utilisant une version récente du robot ROBODOC pour la mise en place d'une prothèse de genou.

3.2.6 Commande impédance/admittance hybride unifiée

La commande hybride (Figure 3.12) impédance-admittance a été proposée par [C. OTT, R. MUKHERJEE et Y. NAKAMURA 2010 et Christian OTT, Ranjan MUKHERJEE et Yoshihiko NAKAMURA 2014] afin de tirer parti des avantages des commandes en impédance et admittance afin de les rassembler en une seule commande intégrée appelée *commande hybride impédance/admittance unifiée*. Les deux commandes sont implémentées, un algorithme décide de celle à utiliser en mesurant la raideur de l'environnement. Si l'environnement est rigide la commande

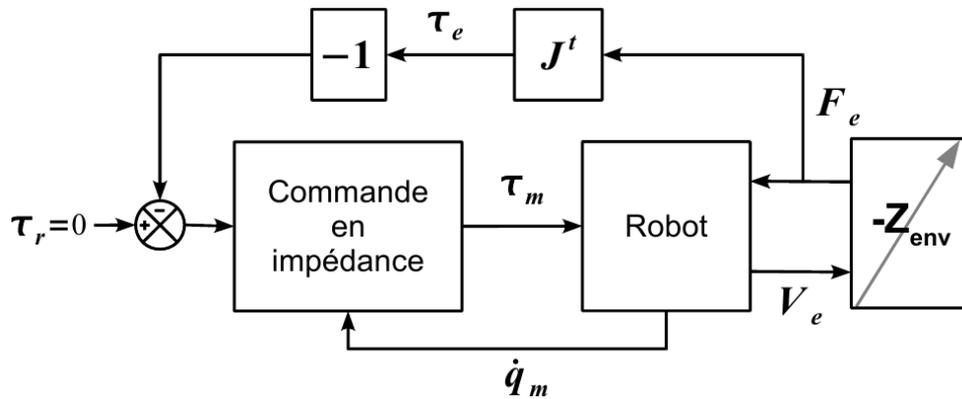


Figure 3.11 – Exemple de structure de commande en impédance [Xavier LAMY 2011].

en impédance est utilisée car elle plus stable dans ce cas. Dans la cas d'un environnement souple ou en espace libre, la commande en admittance est utilisée. Lorsque l'environnement est moyennement rigide, l'algorithme de commande hybride change rapidement alternativement entre la commande en admittance et la commande en impédance.

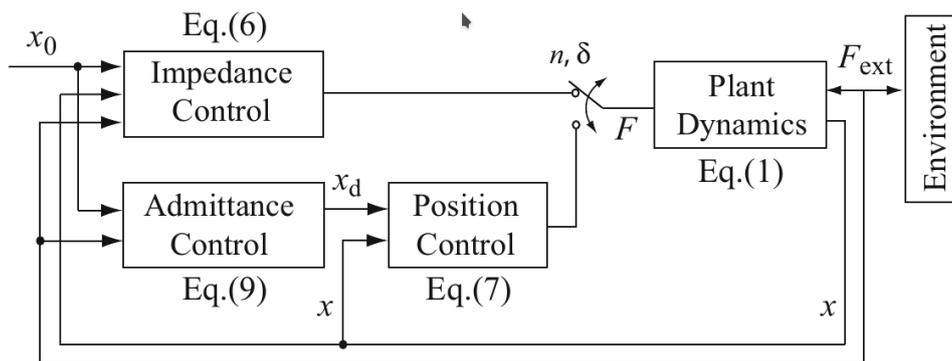


Figure 3.12 – Exemple de structure de commande hybride impédance/admittance unifiée [VUKOBRA-TOVIC 2009].

3.3 Stabilité

À partir des années 1980 beaucoup de recherches se sont focalisées sur l'étude théorique de la stabilité de tels systèmes comanipulés. Par exemple, John Edward Colgate propose une méthode basée sur la *passivité* [colgate1988] qui sera largement utilisé sur les robots comanipulés.

Méthodes utilisables Plusieurs méthodes d'analyse théorique de la stabilité ont été étudiées dans la littérature dans le cadre de la co-manipulation. Nous dressons une liste non exhaustive des méthodes les plus utilisées.

- Valeur propre de la matrice d'état [DUCHAINÉ 2010]
- Critère de Routh [Alexandre CAMPEAU-LECOURS 2012, Chap. 2]

- Couplage virtuel [ADAMS et HANNAFORD 1999]
- Critère de la phase
- Critère de passivité (un système composé uniquement de sous-système passif est forcément passifs et donc stable, cette méthode est très conservatrice pour assurer la stabilité [colgate1988 X. LAMY et al. 2009]).
- Small Gain theorem qui se base sur la passivité mais en moins conservatif [KAZEROONI 1993]
- Fonctions de Lyapunov surestime peu les paramètres pour assurer la stabilité [DUCHAINÉ 2010, Chap. 2]
- Analyse des pôles et des zéros de la fonction de transfert du système complet [A. CAMPEAU-LECOURS, FOUCAULT et al. 2016]
- Méthode de Miller [MILLER, COLGATE et FREEMAN 1999]
- Commande robuste [MAKAROV 2013 SURDILOVIC et RADOJICIC 2007]
- BOWYER et BAENA 2015 Dissipative Control Bowyer et Rodriguez y Baena

De plus, il a été montré par [Etienne BURDET et al. 2001] que l'humain tend à stabiliser l'interaction lorsqu'elle ne l'est pas en adaptant son impédance (bras).

3.3.0.1 Modélisation du système complet homme/robot/patient

Nous n'avons pas eu le temps de valider expérimentalement la stabilité de la commande en admittance proposée. Cependant nous proposons d'expliquer la méthode décrite dans [Alexandre CAMPEAU-LECOURS 2012] permettant de trouver expérimentalement la masse virtuelle et l'amortissement virtuel en limite de stabilité. Cette méthode propose de modifier à la fois les paramètres du contrôleur d'admittance et aussi les paramètres de l'asservissement (PI dans notre cas). L'asservissement par les cartes d'axes B&R est réglé par un mécanisme automatique adaptatif appelé auto-tuning. À l'aide de mouvement pré-enregistré le robot trouve par lui-même les réglages les plus appropriés. Il va falloir modifier temporairement ces réglages pour trouver les paramètres d'admittance en limite de stabilité avec la méthode proposée.

Afin d'obtenir un système stable, la masse virtuelle ne devra pas être trop petite car cela amènerait des accélérations fortes qui générerait des oscillations et de l'instabilité si le bras de l'opérateur est raide. Une masse trop élevée rend difficile voir impossible une manipulation intuitive par l'opérateur car le robot sera très lent à réagir, les accélérations et surtout les décélérations sont très faibles dans ce cas là. D'après [LINDE et al. 2002 et Alexandre CAMPEAU-LECOURS 2012] la masse virtuelle minimale est environ de 6 à 10 fois celle de la masse réelle du robot, cela dépend du système (robot+capteur+boucle de commande).

La méthode pour déterminer la masse minimale pour un amortissement virtuel donné est la suivante :

- Mettre une masse virtuelle faible et réduire les gains de l'asservissement, la commande doit être stable
- Augmenter les gains du contrôleur jusqu'aux vibrations
- Augmenter la masse virtuelle jusqu'à la disparition des vibrations, la masse virtuelle obtenue est la plus faible permettant d'obtenir un système stable.

3.4 Structures de commande

Plusieurs structures de commande adaptées à la commande en impédance/admittance sont présentées dans la littérature. Nous proposons d'en développer quelques unes afin de justifier celle que nous utiliserons sur le robot Orion.

[KOSUGE, FUJISAWA et FUKUDA 1993] (Figure 3.13) propose une structure de commande en impédance permettant au robot d'évoluer en espace contraint ou en espace libre. Ce contrôleur est constitué de deux boucles parallèles (partie commande de l'interaction homme-robot et partie commande de l'interaction robot-environnement) intégrant chacune un capteur d'efforts.

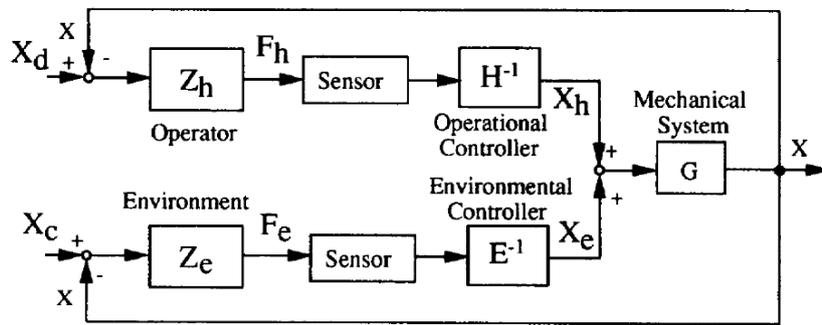


Figure 3.13 – Structure de commande permettant une co-manipulation en impédance en espace contraint [KOSUGE, FUJISAWA et FUKUDA 1993]

[DUCHAINE 2010] proposent une structure de commande en admittance en espace libre. L'algorithme d'admittance calcule une vitesse dans l'espace opérationnel qui est transformée en positions articulaires avant d'être appliqués par le robot. Cette structure intègre un filtre passe-bas afin de diminuer les vibrations de la commande.

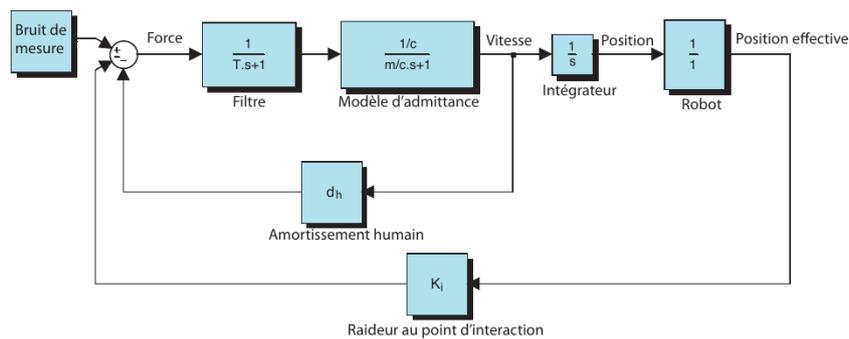


Figure 3.14 – Structure de commande en admittance utilisable en espace libre [DUCHAINE 2010]

[LABRECQUE et C. GOSSELIN 2014] propose une structure de commande en admittance utilisable en espace libre et en espace contraint. L'algorithme d'admittance Y_0 calcule une vitesse dans l'espace opérationnel qui est transformée en vitesses articulaires. Ces vitesses sont additionnées avec la commande en admittance gérant l'interaction avec l'environnement. Le robot possède un asservissement des moteurs en couple avec une consigne d'erreur de position.

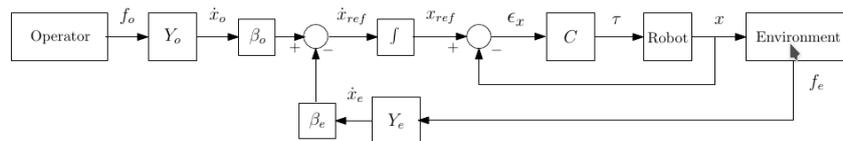


Figure 3.15 – Structure de commande en admittance utilisable en espace contraint et en espace libre [LABRECQUE et C. GOSSELIN 2014]

À partir de ces analyses, nous avons développé notre structure de commande (Figure 4.7) présentée dans la partie 4.2.

3.5 Boucles internes

La plupart des robots comanipulés sont commandés grâce à deux boucles de commandes imbriquées appelées boucle interne et boucle externe [Bruno SICILIANO et KHATIB 2008, p.144, DE SCHUTTER et VAN BRUSSEL 1988]. Le rôle de la boucle interne est de linéariser la commande articulaire en utilisant un asservissement en boucle fermée type PD ou PID. Cette boucle permet de compenser les différents frottements présents dans les articulations qui introduisent des non-linéarités dans la commande. La boucle interne est responsable de la commande de l'actionneur tandis que la boucle externe génère la consigne dans l'espace opérationnel. Les consignes envoyées aux moteurs peuvent être des consignes de positions, de vitesses ou de couples.

3.5.1 Boucle interne en position

L'algorithme de la commande compliant calcule la position puis utilise une boucle d'asservissement du couple prenant en consigne une erreur de position afin de piloter les moteurs. On s'affranchit de la nécessité du modèle dynamique par la boucle d'asservissement mais il faut régler le correcteur PD ou PID, ce qui peut entraîner des problèmes de performance ou de stabilité. [LABRECQUE et C. GOSSELIN 2014] préconisent une commande en position articulaire lors d'une co-manipulation en admittance seulement en présence de contact avec l'environnement. En effet la commande avec boucle interne en position donne de bonnes performances de suivi de consigne si le paramètre de raideur de la commande en admittance/impédance est non nul. De plus, il est difficile de produire une faible impédance car cela nécessite des encodeurs très précis.

3.5.2 Boucle interne en vitesse

Après les moteurs pas à pas, les moteurs à courant continu puis les moteurs brushless ont été utilisés en robotique qui sont des moteurs facilement commandables en vitesse [DUCHAINE et C.M. GOSSELIN 2007 BAUMEYER 2015 Alexandre CAMPEAU-LECOURS 2012]. L'avantage par rapport à la commande en position est un mouvement moins saccadé dans le cas d'une co-manipulation en espace libre.

3.5.3 Boucle interne en couple

Les moteurs à courant continu peuvent être commandés en couple [Bruno SICILIANO et KHATIB 2008, Chap. 2 NEWMAN et N. HOGAN 1987] en gérant le courant envoyé aux moteurs. De plus, les cartes de commande des moteurs récents (synchrones, brushless) permettent une commande en couple des moteurs. Étant donné qu'il n'y a plus de boucle d'asservissement interne en position/vitesse qui corrige les effets dynamiques, il est nécessaire de les déterminer à partir du modèle dynamique du robot. Ce modèle est sensible aux incertitudes des paramètres du modèle et des capteurs de couple, mais cela procure en général une commande très réactive. Cela nécessite un moteur commandable en couple, ce qui n'est pas le cas de tous les moteurs. Pour une analyse détaillée des différentes boucles de commande on pourra consulter [SERAJI 1994 et KOMATI et al. 2013].

Le robot Orion n'est pas commandable en couple par la librairie de commande de B&R Automation. Nous avons décidé de ne pas développer nous-mêmes cette fonctionnalité manquante et de nous concentrer sur le contrôleur d'admittance. Nous utiliserons la commande articulaire en vitesse [NEWMAN et N. HOGAN 1987]. Dans notre cas de manipulation en espace libre, la position finale du mouvement est inconnue par le robot. Cela signifie qu'à chaque pas de calcul une nouvelle position va être déterminée par l'algorithme d'admittance. Lors de faibles vitesses, les incréments de position vont être très petits, voire à la limite de la résolution des encodeurs. La faible résolution produira des mouvements saccadés et le rendu pour l'opérateur sera moins agréable qu'une commande avec une boucle de vitesse [DUCHAINE et C.M. GOSSELIN 2007]. Les frottements présents à faible vitesse vont compliquer encore plus l'asservissement lors de petits déplacements, ce qui va nécessiter un asservissement interne fort pouvant mener à de l'instabilité ou à une erreur de position si l'asservissement n'est pas suffisant.

3.6 Structures mécaniques utilisées

Il existe 3 types d'architectures mécaniques définissant l'interaction entre l'opérateur et le robot comanipulé [JLASSI 2013, Xavier LAMY 2011]. L'architecture du robot comanipulé par l'opérateur peut être parallèle comme le cas de la co-manipulation du robot Orion (Figure 3.16 a)). En effet, la base du robot est fixée au sol et son effecteur est tenu par la main de l'opérateur. Elle peut être orthétique (Figure 3.16 b) comme dans le cas des exosquelettes, ou alors elle peut être sérielle, le robot est le prolongement de l'opérateur (Figure 3.16 c)).

3.7 Rôle et modèle de l'opérateur dans la boucle de commande

Dans les années 1990, des recherches ont été effectuées afin de comprendre les interactions physiques Homme-Homme afin de rendre le comportement dynamique du robot comanipulé semblable à celui d'un opérateur et d'obtenir une interaction intuitive pour celui-ci. Par exemple, [SCHMIDTLER, HARBAUER et BENGLER 2014] montrent que lorsque deux personnes transportent une charge, elles n'ont pas le même rôle, il y a une personne faisant office de maître et l'autre

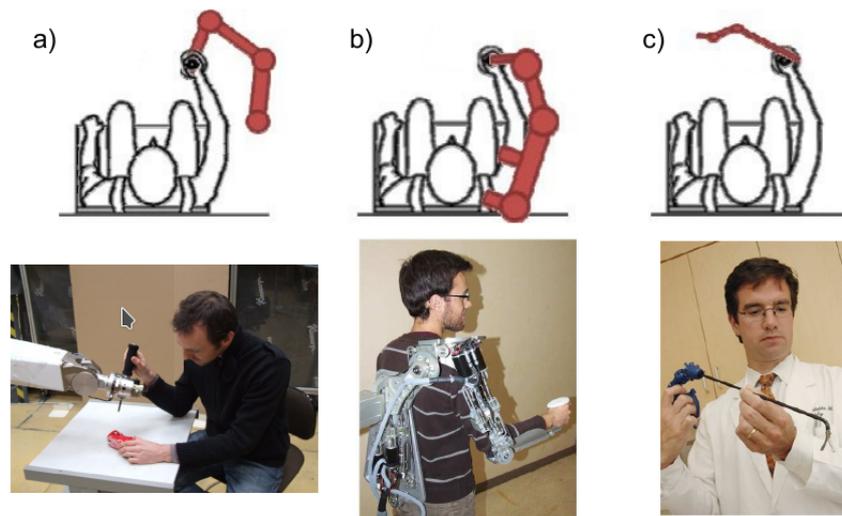


Figure 3.16 – Illustration des trois types d'architectures mécaniques homme-robot : a) parallèle, b) orthétique et c) sérielle [Xavier LAMY 2011].

est le suiveur. De plus, des informations sont échangées par la transmission d'effort entre les deux personnes permettant au suiveur de comprendre les intentions du maître. Dans la co-manipulation Homme-robot, il est courant de donner au robot le comportement de l'esclave pendant que l'opérateur joue le rôle de maître. Afin d'obtenir une co-manipulation intuitive pour l'opérateur humain il est nécessaire que le comportement du robot réagisse selon les mêmes règles qu'un suiveur humain [R. IKEURA, MONDEN et INOOKA 1994, SCHMIDTLER, HARBAUER et BENGLER 2014, R. IKEURA, MONDEN et INOOKA 1994, REED et al. 2006 et R. IKEURA et INOOKA 1995].

L'opérateur peut être modélisé par une impédance passive, fortement variable dans le temps, avec des dynamiques de variation de l'ordre de la seconde [Xavier LAMY 2011]. La force exercée par l'opérateur est composée d'une force volontaire et d'un effort induit par le mouvement de la main et de la co-contraction des muscles du bras. L'effort produit par l'opérateur pendant une co-manipulation est la somme des efforts volontaires et des efforts dus à la co-contraction des muscles et du mouvement de l'effecteur [MÖRTL et al. 2012]. Le système neuromusculaire projette dans l'espace une position à atteindre en fonction du retour haptique ou visuel, ou proprioceptif [Xavier LAMY 2011].

3.8 Modes d'interaction collaborative

Il existe plusieurs modes de commande. Le premier, qui est aussi le plus simple est l'interaction maître-esclave (ou maître-suiveur) [Neville HOGAN 1985].

Mode maître-esclave L'opérateur représente le maître, il pilote un robot qui est le suiveur. Le robot suiveur recopie les mouvements du maître [LECOURS et Clément GOSSELIN 2013, Xavier

LAMY 2011, LABRECQUE et C. GOSSELIN 2014]. L'avantage de cette méthode est la simplicité de fonctionnement et d'implémentation. Par contre, on ne maîtrise pas le profil d'accélération et de vitesse car c'est l'opérateur qui impose la vitesse et l'accélération par l'intermédiaire des efforts qu'il applique sur le dispositif haptique. C'est une commande réactive et non proactive contrairement à celle proposée par la méthode de détection d'intentions.

Détection des intentions Des travaux permettant d'obtenir un comportement du robot anticipatif ont été récemment menés [DUMORA 2014 DE CARLI et al. 2009 KULIĆ et CROFT 2003 CORTEVILLE et al. 2007]. L'objectif des méthodes citées est de prévoir l'intention de l'opérateur, voire de l'anticiper [FLASH et N. HOGAN 1985] et de commander l'effecteur suivant un mouvement type enregistré, semblable à l'intention de l'opérateur [MAEDA, HARA et T. ARAI 2001]. L'avantage est une meilleure précision lors de l'exécution de certains mouvements ainsi que la diminution des efforts à produire par l'opérateur sur le dispositif haptique. Par exemple si l'opérateur décide de générer une ligne droite, le mouvement de l'effecteur sera une ligne parfaitement rectiligne (mouvement enregistré). De plus, les mouvements enregistrés permettent de maîtriser l'accélération et la vitesse, il est donc possible de rendre un mouvement naturel en respectant la contrainte de variation d'accélération minimale décrivant les mouvements de l'opérateur [FLASH et N. HOGAN 1985]. Si les mouvements voulus par l'opérateur ne font pas partie des mouvements types enregistrés le mouvement produit par le robot ne correspondra pas à celui-ci désiré par l'opérateur. C'est pourquoi, pour un fonctionnement optimal il est nécessaire de disposer d'un nombre de mouvements enregistrés très grand.

Génération de trajectoires Une autre méthode développée récemment est l'intégration du contrôleur d'admittance (ou d'impédance) dans un planificateur de trajectoires. La génération de trajectoires est effectuée en boucle avec comme consigne d'entrée la force exercée par l'opérateur sur le dispositif haptique au lieu de la position finale désirée [JLASSI, TLIBA et CHITOUR 2014]. La vitesse calculée est prise colinéaire au vecteur force appliqué par l'opérateur. L'intérêt de cette méthode est de pouvoir contrôler le profil de jerk, d'accélération et de vitesse amenant à une co-manipulation confortable pour l'opérateur sans avoir besoin de mouvements enregistrés comme dans la méthode précédente. De plus, cette méthode permet d'utiliser les algorithmes d'évitement de collisions. L'inconvénient majeur est la faible justesse de positionnement atteignable lors de petits mouvements. De plus cette méthode est plus complexe à mettre en place que la méthode maître-esclave.

Conclusion Nous avons choisi d'utiliser le principe originel de commande maître-esclave qui est la méthode la plus simple à implémenter [LECOURS et Clément GOSSELIN 2013, LABRECQUE et C. GOSSELIN 2014]. Cette solution nous permettra d'obtenir une co-manipulation fonctionnelle et stable sur le robot. Les méthodes plus complexes apportent certes des avantages mais les inconvénients et la difficulté ne rendent pas possible un développement validé expérimentalement dans un contexte industriel.

3.9 Rôle du capteur d'efforts dans les commandes compliantes

Commande en admittance en espace libre Dans une co-manipulation en admittance en espace libre, un capteur d'efforts est nécessaire afin de mesurer les efforts appliqués par l'opérateur sur le robot [KAZEROONI 1993, X. LAMY et al. 2009, DUCHAINE 2010, Alexandre CAMPEAU-LECOURS 2012 et LABRECQUE et C. GOSSELIN 2014]. La force mesurée est transformée en vitesse dans l'espace opérationnel par l'algorithme d'admittance ; cette vitesse transformée en vitesses articulaires par le modèle cinématique inverse est ensuite exécutée par les cartes d'asservissement des moteurs. Cependant certains travaux montrent qu'il est possible de se passer du capteur d'efforts en utilisant la mesure de couple [LICHARDOPOL, WOUW et NIJMEIJER 2009].

Commande en admittance en mouvement contraint par l'environnement Lorsque l'interaction est contrainte avec l'environnement il est nécessaire d'ajouter un second capteur d'efforts associé à un deuxième modèle d'admittance. Le mouvement du robot contre l'environnement crée une force résultante due à l'impédance de l'environnement. Cette force est mesurée par le second capteur d'efforts, et est convertie en vitesses opérationnelles par le deuxième modèle d'admittance puis elle est additionnée avec celles de la commande d'admittance avec l'opérateur. Les vitesses articulaires sommées sont envoyées aux cartes d'asservissement des moteurs.

Commande en impédance contraint par l'environnement (avec un robot réversible) Dans le cas d'une commande en impédance en mouvement contraint avec l'environnement, l'opérateur exerce une force sur le robot qui s'écarte de sa position de référence, l'erreur de position mesurée est convertie en force par l'algorithme d'impédance. Le contrôleur du robot déplace le robot afin que la force exercée par le robot sur l'environnement soit équivalente à la force calculée.

Commande en impédance contraint sans capteur d'efforts Il est possible dans une commande en impédance de se passer de capteur d'efforts mais dans ce cas le paramètre d'inertie virtuelle du modèle d'impédance sera égal à l'inertie du bras manipulateur avec la charge de l'effecteur ce qui n'est pas souvent souhaitable surtout dans le cas d'un bras manipulateur de forte inertie ou support une charge importante.

Conclusion Nous avons choisi d'utiliser une commande en admittance en espace libre. Nous proposons d'utiliser un seul capteur d'efforts qui mesurera les efforts exercés par l'opérateur sur le robot. En effet, le robot étant de forte inertie, nous pensons que la méthode de mesure des efforts appliqués par l'opérateur par les capteurs de couple ne sera pas suffisamment précise pour une co-manipulation confortable pour l'opérateur et le patient.

3.10 Influence des paramètres de la commande

Nous avons vu que la commande en impédance/admittance possédait 3 paramètres M , K et C dénommés respectivement masse virtuelle, raideur virtuelle et amortissement virtuel. Le

paramètre K est, dans certains cas, supprimé pour obtenir un comportement en espace libre. Ces paramètres peuvent être définis constants [Neville HOGAN 1985] ou être variables pendant la co-manipulation [SERAJI 1994 DUCHAINE 2010 Alexandre CAMPEAU-LECOURS 2012]. En effet, dans ces travaux il est montré qu'il est possible d'adapter les paramètres de la co-manipulation (M , K et C) afin de garantir la stabilité alors que l'impédance du bras de l'opérateur varie au cours de la tâche. Les paramètres M , K et C peuvent être choisis de façon à reproduire le comportement du bras de l'opérateur [R. IKEURA, MONDEN et INOOKA 1994] MAEDA, HARA et T. ARAI 2001 RAHMAN, Ryojun IKEURA et MIZUTANI 2002]. Dans le cas de paramètres fixes il est nécessaire de calculer les paramètres M , K et C garantissant la stabilité en se basant sur le pire cas de l'impédance du bras (impédance maximale) mais cela dégrade les performances de la co-manipulation la plupart du temps.

Conclusion Nous proposons une commande en espace libre donc nous choisirons le paramètre K comme nul. Pour les deux paramètres M et C , nous choisissons dans un premier temps de les fixer à des valeurs trouvées expérimentalement dans les travaux similaires.

3.11 Projets de recherche

Plusieurs projets de recherche ont eu pour but de développer la sécurité des robots manipulés. Nous proposons d'en lister quelques uns.

Phriends [phriends 2008] Dès 2006 le projet ANR Phriends¹ propose d'étudier les aspects liés à la sécurité des robots intrinsèquement sûrs à la fois par rapport au design mécanique et aux algorithmes de commande. [HADDADIN et al. 2008] propose de mesurer la dangerosité d'un robot par rapport aux humains en utilisant l'échelle AIS utilisé dans l'automobile. L'algorithme dénommé *skeleton algorithm* développé par De Santis et Albu-Schaeffer permet de faire de l'évitement d'obstacles basé sur un capteur Kinect et une modélisation 3D de l'humain [DE SANTIS, ALBU-SCHÄFFER et al. 2007]. Les personnes souhaitant plus d'informations sur la sécurité pourront s'intéresser à l'article [DE SANTIS, Bruno SICILIANO et al. 2008].

Icaro [icaro 2010] Le projet Icaro a pour but de développer la co-manipulation pour les robots industriels. Le projet comporte une validation expérimentale pour des robots utilisés dans les secteurs automobile et aéronautique.

Saphari [saphari 2011] À la suite du projet Phriends, le projet Saphari propose d'étudier les robots à articulations flexibles, la commande en espace nul (Null-Space) tirant parti des architectures mécaniques comportant plus d'axes actionnables que de degrés de libertés nécessaires pour une tâche donnée. Les axes actionnables restant sont utilisés pour une tâche secondaire, comme par exemple éviter les obstacles.

1. <http://www.phriends.eu/> site web du projet Phriends (2016)

Piros [piros 2013] Le projet Piros développe la commande des actionneurs à raideur variable utilisée pour les bras manipulateurs intrinsèquement sûrs. Ce projet étudie de plus la mesure de la performance de ce type de robot pour des tâches de grasping.

Horse [horse 2015] Le projet Horse propose d'améliorer la productivité des sites de production industriels en utilisant des robots mobiles et la comanipulation. Ce projet se focalise sur le développement d'un framework logiciel flexible, facile à configurer et permettant de garantir la sécurité de l'opérateur.

SME (2016)² Le projet SMERobot concerne principalement la coexistence robot/humain. En effet, le robot travaille en autonomie mais prend en compte la proximité de l'opérateur ou d'un objet dans l'espace de travail du robot pour éviter la collision et arrêter la tâche en cours.

3.12 Robots utilisant la co-manipulation

Les Figures 3.17 et 3.18 présentent quelques robots collaboratifs produits industriellement et vendus sur le marché robotique. Ces figures permettent de retenir les robots qui de par leur commande compliant peuvent être utilisés en co-manipulation. Nous retrouvons des robots sériels à 6 degrés de liberté (Figures 3.17g et 3.17i), des structures redondantes (Figures 3.17a, 3.17c, 3.17d, 3.17e, 3.17f, 3.18a, 3.18b et 3.17h), des robots parallèles (Figures 3.19b, 3.19d et 3.19e) et un robot mobile (Figure 3.19c). Cette liste non exhaustive est donnée à titre indicatif.

La Figure 3.19 présente quelques robots collaboratifs utilisés dans des travaux de recherche.

3.13 Détection et évitement d'obstacles pour la co-manipulation

En 1979 dans une usine Ford, un employé fut tué par un robot. Aujourd'hui pour être commercialisés les robots se doivent de proposer des mécanismes permettant d'empêcher le robot de blesser l'opérateur. Le cas des robots de co-manipulation est plus critique que les robots traditionnels étant donné que l'opérateur se trouve majoritairement dans l'espace de travail du robot, et échange des efforts avec lui.

La détection et l'évitement de collisions pour les robots comanipulés ont été étudiés de plusieurs manières différentes. Dans les années 2010, [DE LUCA et FLACCO 2012] propose d'utiliser un capteur Kinect et une modélisation de l'environnement associé à un moteur physique afin d'empêcher les collisions du robot avec l'opérateur. La même année, [LACEVIC et ROCCO 2010] propose la méthode des champs de potentiels virtuels permettant d'utiliser une commande compliant pour l'évitement d'obstacles. Ces méthodes ont été utilisées à la base pour les robots mobiles mais sont utilisables avec la commande en admittance. Par exemple si l'on implémente la

2. <http://www.smerobotics.org> site web du projet SME (2016)



(a) Robot Yumii à deux bras de ABB



(b) Robot Acrobot vendu à partir des années 1990 pour la chirurgie orthopédique KAZANZIDES 1992



(c) Robot Franka de la société Mika vendu à partir de 2017



(d) Robot Baxter de Rethink Robotics (première version)



(e) Robot Jaco pour la recherche et les personnes tétraplégiques



(f) Robot Kuka LWR 4



(g) Robot médical Rosa de MedTech



(h) Robot industriel de RB3D



(i) Robot de F&P Robotics

Figure 3.17 – Robots collaboratifs sur le marché (partie 1/2).

co-manipulation par génération de trajectoires, il est possible d'utiliser la méthode des tentacules

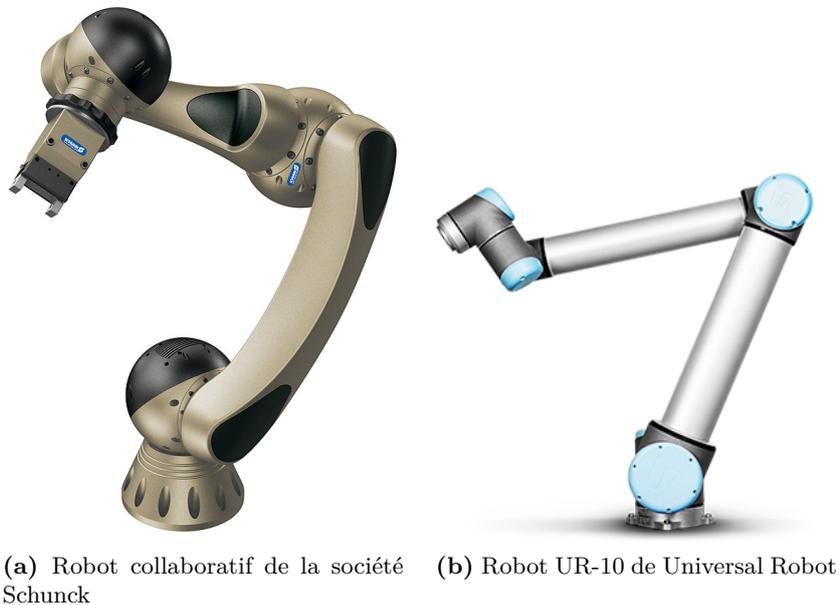


Figure 3.18 – Robots collaboratifs sur le marché (partie 2/2).

[MORETTE 2009]. Le principe est le suivant : dans une scène virtuelle, la salle de traitement dans laquelle évolue le robot est modélisée à l'aide d'un moteur physique (Bullet, Gazebo, Havok), les objets dynamiques (chariots et matériels médicaux) sont ajoutés dans cette scène et localisés par des capteurs types stéréoscopiques [FRIGOLA et al. 2005], par des capteurs à mesure de temps de vol [BARCELLINI et al. 2012] ou par des capteurs de profondeur [DE SANTIS, ALBU-SCHÄFFER et al. 2007] (Kinect, Optotrack, Polaris). Les méthodes de zones virtuelles déformables [AMOURI et al. 2012], celle appelée *skeleton algorithm* [DE SANTIS, ALBU-SCHÄFFER et al. 2007] ou celle des élastiques [SETO, KOSUGE et HIRATA 2005 et NOROUZZADEH, LORENZ et HIRCHE 2012] peuvent être utilisées pour éloigner le robot des obstacles pendant un mouvement. Pour des informations plus détaillées les lecteurs pourront se référer aux états de l'art suivant [BROCK et KHATIB 2002, DE LUCA et FLACCO 2012, DE SANTIS, Bruno SICILIANO et al. 2008, ALAMI et al. 2006].

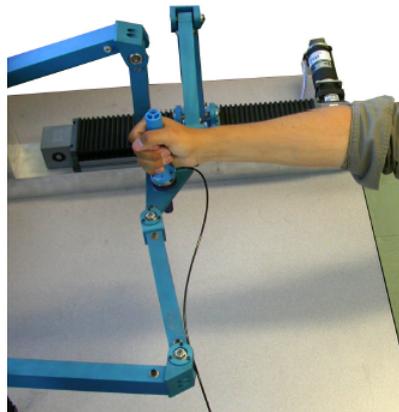
Détection de collisions Nous présentons dans le chapitre 6 un état de l'art ainsi qu'une méthode de détection de collisions adaptés aux robots sériels comanipulés.

3.14 Conclusion et résumé des choix

Le robot Orion est un robot médical de forte masse pour lequel l'objectif est d'ajouter un mode de commande de co-manipulation intuitif pour l'opérateur avec une contrainte de justesse tout en intégrant un niveau de sécurité lors des différentes phases de mouvement ; ceci en mettant en place un dispositif de détection des collisions. Ce robot est déjà développé, et l'état de l'art que nous avons fait nous permet de mettre en avant les limites et valeurs ajoutées liées à ce robot ; ainsi que de justifier les choix que nous avons faits concernant la commande en admittance.



(a) Robot Appollo POQUET 2014 de la société Haption



(b) Robot Tripteron utilisé par DUCHAINE 2010



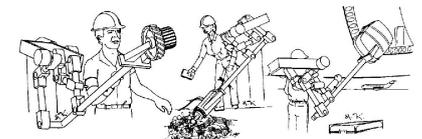
(c) Robot mobile utilisé pour poser des baies vitrées LEE 2010



(d) Robot assistant au transport de charge à câbles Alexandre CAMPEAU-LECOURS 2012



(e) Robot Cartésien utilisé par Alexandre CAMPEAU-LECOURS 2012 pour transporter des charges lourdes



(f) Robot Extender proposé par KAZEROONI 1990

Figure 3.19 – Robots collaboratifs utilisés en recherche.

Contraintes du cahier des charges Au début de la thèse, le robot Orion était déjà conçu par LEONI CIA Cable Systems et des prototypes étaient disponibles. À cette étape de la thèse, la structure de commande existante permettait de commander le robot Orion en position et en vitesse dans l'espace opérationnel ainsi qu'en articulaire. Notre travail s'est orienté sur le développement d'une nouvelle commande. Nous avons choisi d'utiliser la commande en espace opérationnel pour la simplicité de développement et par le fait que la transformation de l'espace opérationnel vers l'espace articulaire était déjà implémentée dans la librairie de commande du robot Orion. Pour la boucle interne, nous nous sommes basés sur les correcteurs du fournisseur de cartes de commande des moteurs (B&R Automation) en utilisant la méthode « réglage automatique » ; cette méthode permet un suivi des consignes de bonne qualité. La contrainte actuelle du temps d'exécution de la boucle de commande principale du contrôleur temps-réel du *MCU* du robot Orion est fixée à 10 ms, ce qui est très supérieur aux 2 ms utilisées habituellement en co-manipulation robotique [R. IKEURA, MONDEN et INOOKA 1994 LECOURS et Clément GOSSELIN 2013 LABRECQUE et C. GOSSELIN 2014 DUCHAINE 2010]. Une solution pour améliorer la réactivité et la stabilité de la commande en admittance développée dans cette thèse serait de diminuer le temps d'exécution de la boucle de commande principale.

Choix effectués Nous avons choisi d'intégrer la commande en admittance pour sa faculté à permettre le ressenti, à l'opérateur, d'une faible masse pour un robot de forte inertie. Cependant, cette approche requiert l'utilisation d'un capteur pour mesurer les efforts produits par l'opérateur sur le robot. Concernant la boucle interne, nous avons utilisé une commande en vitesse associée à une commande en admittance en espace libre. Cette approche permet de générer un mouvement moins saccadé, plus agréable pour l'opérateur qu'une commande par boucle interne en position. La commande en co-manipulation doit permettre un mouvement en espace libre, nous avons fait le choix de définir le paramètre de raideur virtuelle K comme nul [LABRECQUE et C. GOSSELIN 2014]. La contrainte industrielle impose d'intégrer la commande développée dans le contrôleur actuel du robot Orion. Bien que la co-manipulation par détection des intentions de l'opérateur améliore la performance de la co-manipulation [MAEDA, HARA et T. ARAI 2001, RAHMAN, Ryojun IKEURA et MIZUTANI 2002]) nous avons décidé dans un premier temps de ne pas retenir cette méthode mais d'utiliser le principe maître-esclave pour permettre une intégration dans le contrôleur actuel qui soit simple et fonctionnelle. Nous avons choisi d'utiliser des paramètres d'admittance fixes pour des raisons de fiabilité et de contrainte de temps bien que l'admittance à paramètres variables permette une co-manipulation plus efficace [DUCHAINE 2010].

Cas de la téléopération Nous n'avons pas choisi de solutions basées sur la manipulation par un dispositif haptique maître disponible sur le marché comme dans le cas dans de nombreuses applications de systèmes télé-opérés. Des dispositifs comme le bras Virtuoso 6D de Haption ou Omega 7 de Force Dimension n'ont pas été retenus car moins intuitifs et peu dédiés pour l'application visée de protonthérapie et particulièrement pour la partie concernant les deux phases de la co-manipulation : le pré-positionnement et l'extraction d'urgence.

Commande utilisée pour l'interaction Homme-robot

*« Pour réussir, il ne suffit pas de prévoir.
Il faut aussi savoir improviser. »*

Isaac ASIMOV

Synthèse :

La commande choisie par rapport au cahier des charges médical et à la contrainte de forte masse du robot Orion est la commande en admittance. Nous nous intéressons à l'implémentation discrète de celle-ci. Un simulateur nous permet de comprendre l'influence des paramètres conditionnant ses propriétés.

Sommaire

4.1	Modèle de commande en admittance	57
4.2	Implémentation de la commande en admittance	58
4.2.1	Rôle des paramètres M, K et C	63
4.3	Étude du simulateur de commande	65
4.3.1	Objectif	65
4.3.2	Calcul du déplacement théorique avec le simulateur de commande en admittance	65
4.3.3	Mesure du déplacement réel en comanipulation	66
4.3.4	Étude comparative du déplacement théorique et réel de la commande en admittance	67
4.3.5	Identification des paramètres réels	70
4.3.6	Discussion	71
4.4	Conclusion	72

4.1 Modèle de commande en admittance

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 3, il existe plusieurs commandes permettant de rendre un robot comanipulable. Nous pouvons citer par exemple les commandes en impédance et en admittance qui sont les plus couramment utilisées à ce jour. Le robot Orion entre dans la catégorie des robots à forte inertie (voir partie 2.2) et présente des frottements non négligeables dans les articulations (voir partie 6.4). Pour ces raisons, nous avons choisi d'implémenter la commande en admittance sur notre robot. Dans un premier temps nous développons la fonction de transfert d'une telle commande.

La Figure 4.1 montre que la commande en admittance accepte en entrée la force exercée par l'opérateur et produit en sortie un mouvement qui peut soit être un déplacement de position, une vitesse ou une accélération désirée. Le robot Orion sera commandé en vitesse. L'admittance est représentée dans notre cas par un système du 2^e ordre (masse et amortisseur) (Figure 4.2). Dans la littérature, plusieurs systèmes représentent l'admittance, avec dans certains cas un ressort en parallèle de l'amortisseur (modèle de Kelvin-Voigt) [HONDORI 2012, chap. 2]; mais qui ne permet pas d'obtenir un comportement en espace libre (*free-motion*) [LABRECQUE et C. GOSSELIN 2014] comme celui souhaité pour avec le robot Orion.

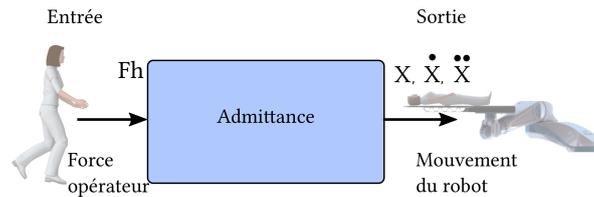


Figure 4.1 – Représentation simplifiée de la commande en admittance en *espace libre*

Le système du 2^e ordre représentant l'admittance est défini dans l'espace de Laplace par l'équation 4.1.

$$F_h = Ms^2X + CsX \quad (4.1)$$

Nous travaillons en vitesse donc nous posons $V = sX$, ce qui nous permet d'obtenir à partir de 4.1 :

$$F_h = MsV + CV \quad (4.2)$$

Avec :

- F_h : Force exercée par l'opérateur
- M : Masse virtuelle de la commande en admittance
- C : Amortissement virtuel de la commande en admittance
- X : Position de l'effecteur
- V : Vitesse de l'effecteur

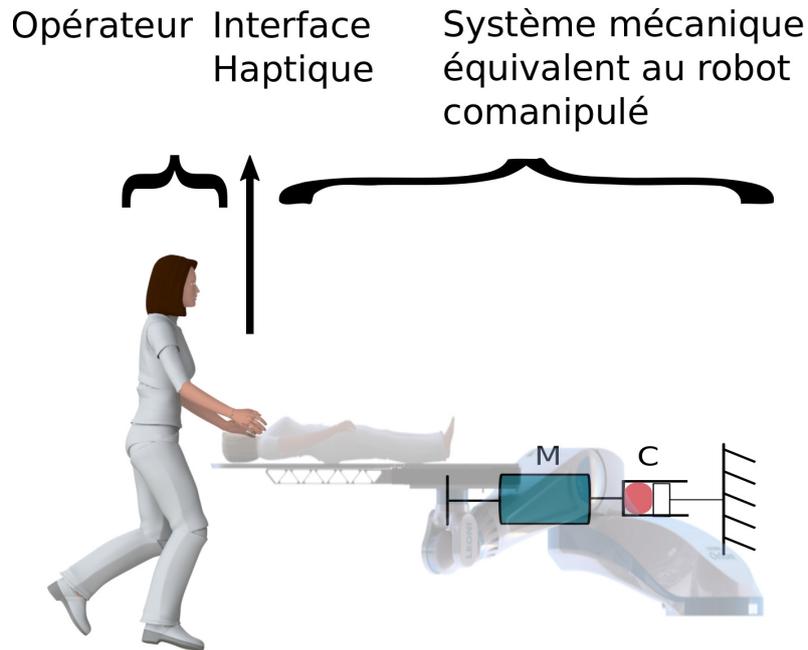


Figure 4.2 – Représentation du système mécanique équivalent au robot comanipulé dans le cas d'une commande en admittance en *espace libre* et sur un axe de translation

À partir de l'équation 4.2 nous exprimons la fonction de transfert en vitesse de la commande en admittance :

$$H_{\text{admittance}} = \frac{V}{F_h} = \frac{1}{Ms + C} \quad (4.3)$$

Le schéma bloc de commande (du robot Orion) inclut la commande en admittance, le robot Orion, le capteur d'efforts et l'opérateur (Figure 4.3). V_c représente la vitesse de consigne dans l'espace opérationnel, F_h représente la force exercée par l'opérateur sur le dispositif haptique, F_m la force mesurée par le capteur d'efforts, \dot{Q}_c les vitesses de consignes articulaires, \dot{Q} les vitesses articulaires réelles et V la vitesse réelle de l'effecteur. Dans ce schéma bloc, on prend en compte une boucle externe composée de la fonction d'admittance et du capteur d'efforts (en rouge) et une boucle interne (en bleue) composée du modèle cinématique inverse et de la boucle d'asservissement interne B&R. C'est une commande en *boucle fermée* avec l'opérateur dans la rétro-action. Celui-ci fait partie du système comanipulé, il va donc interagir sur la commande, donc sur le comportement du robot comanipulé. La figure 4.4 représente un schéma 2D du mouvement en translation sur un seul axe lorsque le robot est comanipulé en admittance par un opérateur.

4.2 Implémentation de la commande en admittance

Le but de la thèse CIFRE est entre autre de rendre un produit fini pré-industrialisable. Pour ce faire nous avons travaillé sur l'architecture logicielle de la co-manipulation afin que celle-ci

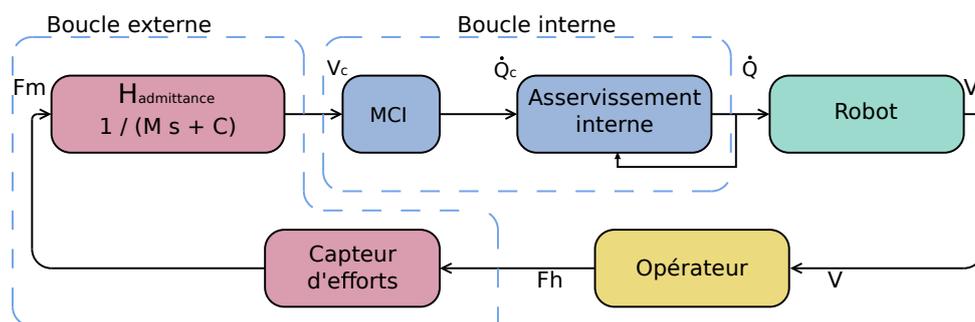


Figure 4.3 – Schéma bloc de la commande en admittance du robot Orion.

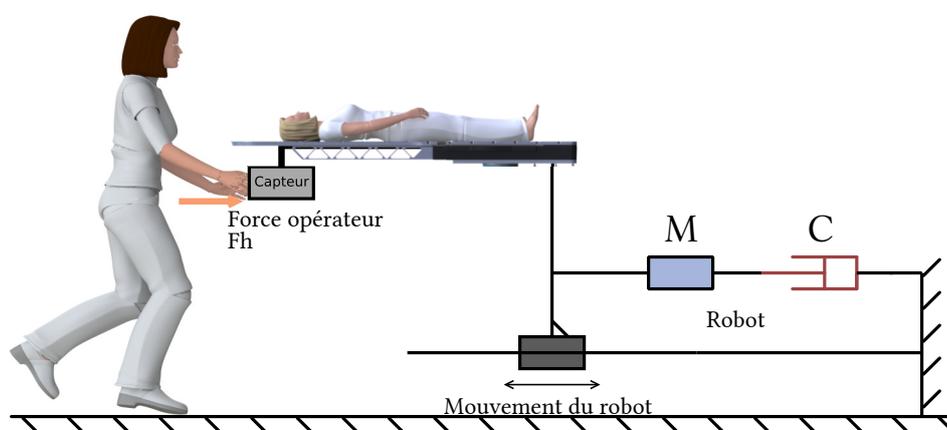


Figure 4.4 – Vue 2D schématisée du robot Orion lors d'une co-manipulation sur un axe.

s'intègre dans la librairie/logiciel de pilotage du robot (CoSi). Nous proposons dans un premier temps de définir un cahier des charges basé sur les contraintes évoquées précédemment puis de définir l'architecture logicielle du module de co-manipulation que nous allons développer.

Comme nous l'avons vu dans la partie 4.1, le principe de la commande en admittance va être de réagir à une entrée en force de l'opérateur par une sortie en vitesse dans l'espace opérationnel du robot. Notre implémentation est divisée en deux parties : le driver C++ acquiert les efforts mesurés par le capteur et le module de co-manipulation calcule les commandes de vitesse dans l'espace opérationnel du robot. Cette commande dans l'espace opérationnel est transmise au *MCU* par la liaison Ethernet, celui-ci la transforme en commande de vitesse articulaire puis l'envoie au *HCU*. La Figure 4.5 montre les 3 blocs (mesure, calcul et envoi de la commande au *MCU*) principaux de la commande en admittance du robot Orion. Nous avons développé la partie *Mesure* et *Calcul*, la partie *Commande du robot* utilisée a été développée par LEONI CIA Cable Systems.

Principes utilisés pour l'architecture logicielle Afin de réaliser une implémentation industrialisable, nous avons respecté les principes suivants :

- programmation orientée objet pour s'intégrer dans la librairie CoSi ;
- séparation de la partie graphique (GUI) de la partie commande ;

- gestion des configurations avec un fichier de paramètres ;
- et dans la partie commande : séparation de la partie calculs mathématiques de la partie processus à l'aide de deux classes héritées.

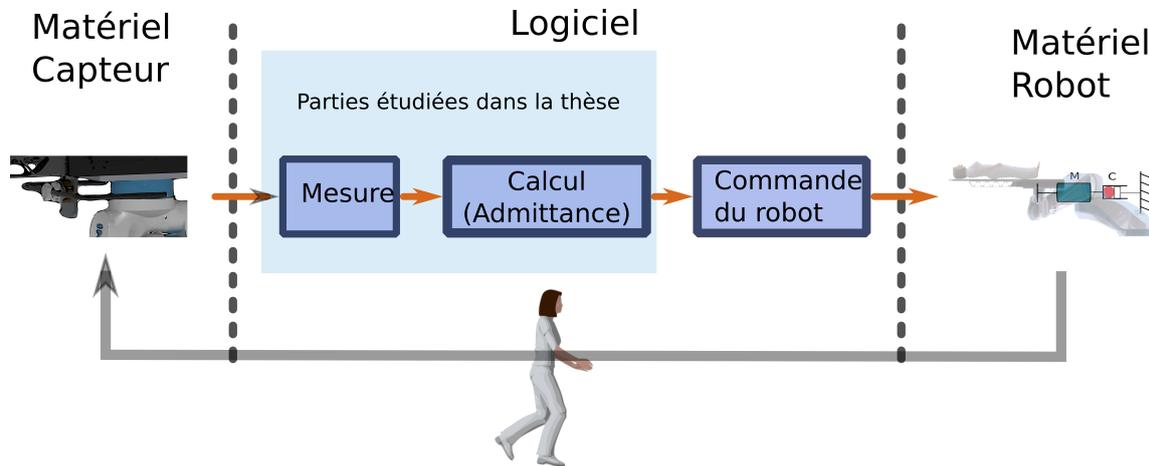


Figure 4.5 – Schéma simplifié montrant les parties logicielles et matérielles de la commande en admittance.

Pour l'architecture logicielle nous proposons le cahier des charges simplifié du module de co-manipulation suivant :

- Mouvement en espace libre (*free motion*)
- Commande sur 6 DDL
- Plusieurs capteurs utilisables
- Admittance paramétrable (M et C)
- Possibilité de filtrage des données capteurs
- Interface utilisateur

Nous avons choisi d'utiliser le paradigme de la programmation événementielle ce qui va permettre à l'algorithme d'admittance d'être exécuté à chaque nouvelle acquisition faite par le capteur d'efforts. La Figure 4.6 montre l'architecture logicielle utilisée.

À partir de l'état de l'art de la partie 3, nous avons développé notre schéma de commande (Figure 4.7). Ce schéma de commande est basé sur les contrôleurs [A. CAMPEAU-LECOURS, OTIS et C. GOSSELIN 2016 et X. LAMY et al. 2009] et est adapté au robot Orion. Ce modèle inclut le modèle de l'opérateur présenté dans la partie 5.2.3, le traitement du signal des capteurs d'efforts par un filtre moyenneur et un filtre de Butterworth, l'algorithme de commande en admittance ainsi que le modèle cinématique inverse et la boucle interne d'asservissement du robot Orion. Le fonctionnement du schéma de commande est le suivant :

- Le système neuromusculaire projète dans l'espace une position virtuelle que doit atteindre le bras en fonction de la tâche à réaliser et de la position courante ;
- Le bras, analogue à un système mécanique MKC, convertit cette position en une force ;

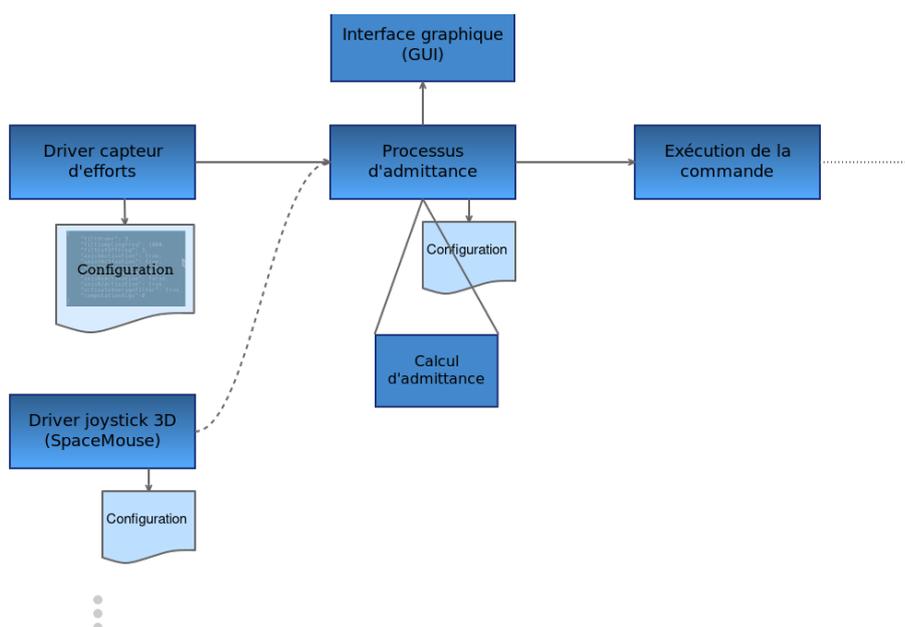


Figure 4.6 – Architecture logicielle de l’implémentation de la commande en admittance incluant les drivers, l’interface graphique, le processus d’admittance et la classe de calculs.

- Le système neuromusculaire adapte l’impédance du bras à cette fin ;
- La force exercée par le bras sur un dispositif haptique est mesurée par le capteur d’efforts ;
- le torseur mesuré est exprimé dans le référentiel de la base du robot et déplacé au niveau de l’effecteur par la matrice de transformation T_{12} ;
- les efforts mesurés sont ensuite filtrés par un filtre passe bas et par un moyennneur sur 10 valeurs pour obtenir une valeur filtrée toutes les 10 ms ;
- Cette valeur de force filtrée est envoyée dans l’algorithme d’admittance qui calcule la vitesse de commande dans l’espace opérationnel ;
- La commande est convertie dans l’espace articulaire par le modèle cinématique inverse (MCI) ;
- La commande articulaire est exécutée par la boucle d’asservissement bas niveau.

- \tilde{X} : Position virtuelle
- X_r : Position de l’effecteur
- $K_h C_h M_h$: Paramètres de raideur, amortissement et masse du bras de l’opérateur
- F_h : Force exercée par l’opérateur sur l’interface haptique
- F_m : Force mesurée par le capteur d’effort de l’interface haptique
- T_{12} : Matrice de transformation homogène du repère capteur d’efforts vers la base du robot
- Moyennneur : Filtre moyennneur sur 10 échantillons des efforts mesurés
- $1/(a_n s^n + \dots + a_0)$: Filtre passe-bas Butterworth d’ordre et fréquence de coupure paramétrable
- $1/(Ms + C)$: Commande en admittance en espace libre de masse virtuelle M et amortissement virtuel C avec commande en vitesse dans l’espace opérationnel
- \dot{V}_c : Vitesse de consigne de l’effecteur dans l’espace opérationnel

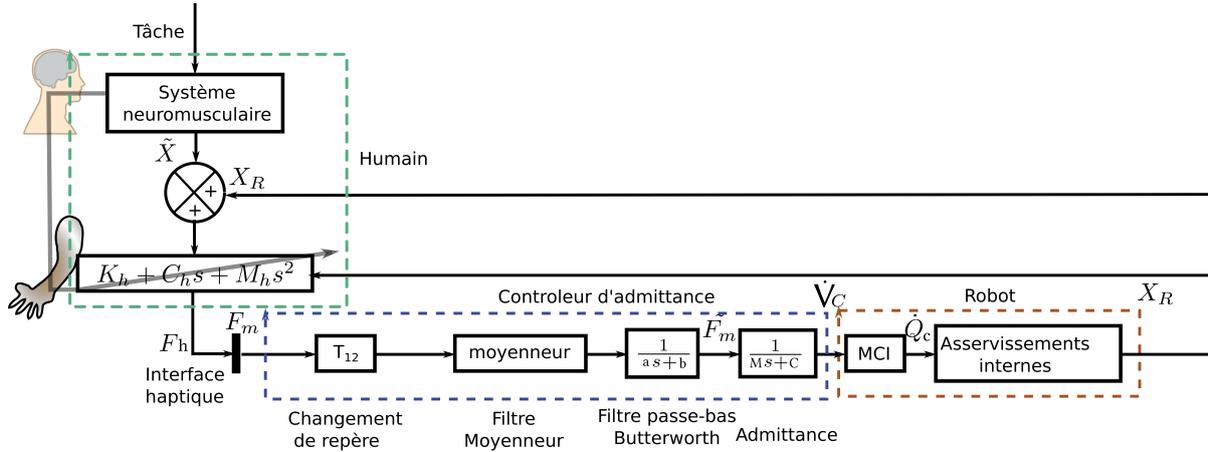


Figure 4.7 – Schéma bloc de commande du robot Orion comanipulé

- MCI : Modèle cinématique inverse
- \dot{Q}_c : Vitesse de consigne articulaire des moteurs

Nous avons développé une interface graphique utilisateur permettant de configurer l'admittance (masse virtuelle, amortissement virtuel), de choisir le capteur à utiliser et de paramétrer les filtres à utiliser.

Nous avons vu dans la partie 4.1 que la fonction de transfert de la commande en admittance dans le domaine continu est $H_{admittance} = \frac{V}{F_h} = \frac{1}{Ms+C}$. Nous souhaitons maintenant implémenter cette commande qui sera donc discrète. Pour cela nous nous appuyons sur la transformée en z et développons la commande bilinéaire afin d'obtenir le comportement masse et amortisseur voulu en tenant compte du retard dû au temps de calcul du MCU et de la fréquence d'acquisition du capteur d'efforts. Le mouvement du système mécanique de la commande en admittance (masse + amortisseur) est régi par l'équation 4.4.

$$F_h = MVs + CV \quad (4.4)$$

Afin d'implémenter notre commande, nous étudions à présent la commande discrétisée. Nous utilisons l'hypothèse de la commande bilinéaire (équation 4.5).

$$s = \frac{2(1 - z^{-1})}{T(1 + z^{-1})} \quad (4.5)$$

Avec T la période d'échantillonnage de notre boucle de commande (celle-ci doit être constante).

Ce qui nous donne :

$$F = MV \frac{2(1 - z^{-1})}{T(1 + z^{-1})} + CV \quad (4.6)$$

$$T(F - CV)(1 + z^{-1}) = 2MV(1 - z^{-1}) \quad (4.7)$$

$$(TF - CVT)(1 + z^{-1}) = 2MV - 2MVz^{-1} \quad (4.8)$$

$$TF + TFz^{-1} - CVT - CVTz^{-1} = 2MV - 2MVz^{-1} \quad (4.9)$$

$$TF + TFz^{-1} + 2MVz^{-1} - CVTz^{-1} = 2MV + CVT \quad (4.10)$$

$$(2M + CT)V = TF + TFz^{-1} + 2MVz^{-1} - CVTz^{-1} \quad (4.11)$$

$$V = \frac{TF + TFz^{-1} + (2M - CT)Vz^{-1}}{2M + CT} \quad (4.12)$$

Passage du monde fréquentiel discret au monde temporel discret, nous savons que multiplier par z^{-1} équivaut à prendre l'échantillon à $t - 1$ donc l'équation (4.12) devient :

$$V_k = \frac{TF_k + TF_{k-1} + (2M - CT)V_{k-1}}{2M + CT} \quad (4.13)$$

Pour $2M + CT \neq 0$, ce qui est valable pour tout C et $M \in \mathbb{R}^+$ car $T > 0$.

Cette équation représente le calcul que va faire la partie *Calcul d'admittance* du *Processus d'admittance* illustré dans la Figure 4.6. La Figure 4.8 donne un exemple de simulation du comportement de la réponse en vitesse à un échelon de force de 30 N pour l'algorithme d'admittance implémenté avec une commande bilinéaire, pour deux couples de paramètres M et C différents. La réponse correspond à celle d'un système du premier ordre, la valeur de la vitesse en régime établi correspond au rapport F_h/C et le temps de réponse du système dépend du rapport M/C . Plus ce rapport M/C est élevé, plus le temps de réponse est grand. L'influence de ces paramètres va être discutée dans la partie suivante.

4.2.1 Rôle des paramètres M , K et C

La commande en impédance/admittance s'appuie sur 3 paramètres M , K et C dénommés respectivement masse virtuelle, raideur virtuelle et amortissement virtuel.

La raideur virtuelle est dans certains cas supprimée pour obtenir un comportement en espace libre (cas de la co-manipulation du robot Orion).

L'inertie virtuelle joue le rôle de filtre passe-bas, plus sa valeur est élevée plus le temps de réponse du robot est élevé pour une variation de force en entrée donnée.

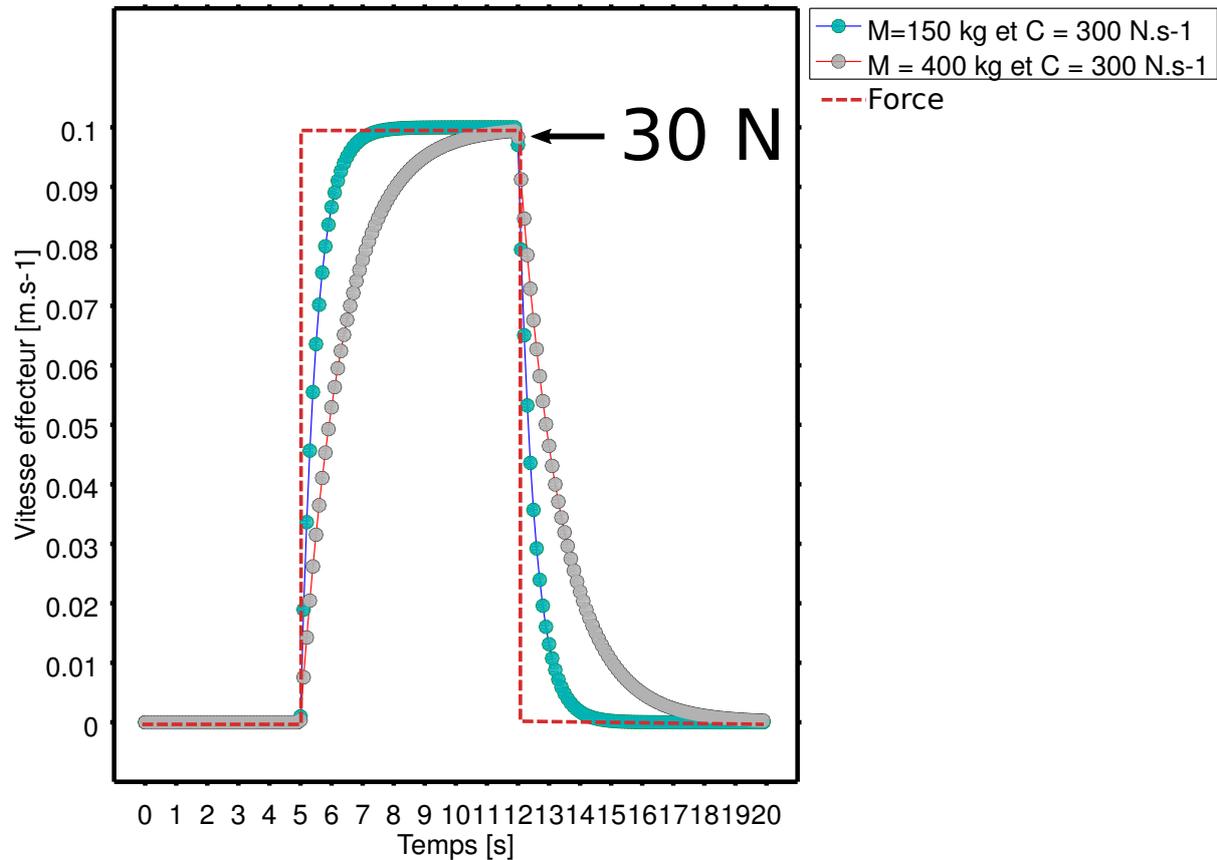


Figure 4.8 – Vitesse simulée de l’effecteur par une commande en admittance implémentée avec une commande bilinéaire en réponse à un échelon de force de 30 N.

Pour l’opérateur, il est difficile, avec une masse virtuelle élevée, de faire varier rapidement la vitesse du robot, comme par exemple faire des aller-retour rapides en translation dans l’espace opérationnel.

La valeur de la masse virtuelle ne peut pas être trop faible pour des raisons de stabilité mais aussi pour des raisons mécaniques. En effet, la masse virtuelle ne peut être inférieure à la masse que peut rendre le robot comanipulé. Nous verrons dans la partie 4.3 que si nous choisissons une masse virtuelle nulle, la masse ressentie par l’opérateur ne sera pas nulle car le système comanipulé ne peut rendre une masse virtuelle en deçà d’une certaine valeur. L’accélération du robot étant bridée, même si l’opérateur demande une variation rapide de la vitesse en faisant varier fortement l’effort qu’il applique sur le capteur d’efforts du robot, le robot ne pourra pas suivre la consigne de vitesse qui lui sera appliquée (partie 4.3).

L’amortissement virtuel influe sur la valeur de vitesse en régime stabilisé, nous observons une relation directe entre la valeur de la force exercée par l’opérateur et la vitesse du robot en régime continu (Figure 4.8).

Plus le paramètre d’amortissement virtuel est faible et plus il est possible d’obtenir une vitesse élevée en sortie du robot pour une même force de l’opérateur en consigne. Le rapport M/C correspond à la constante de temps du système pour atteindre son régime stabilisé.

Le paramètre de raideur virtuelle est utilisée lorsque le robot est piloté par une gestion de trajectoire avec un chemin de référence à suivre. Ce paramètre est le lien entre la force et l’écart

entre la position réelle et le chemin de référence. Dans le cadre d'un mouvement initié par l'opérateur à partir d'une position initiale, le paramètre K permet de revenir à cette position lorsque l'opérateur relâche son effort sur le dispositif haptique.

4.3 Étude du simulateur de commande

4.3.1 Objectif

Nous souhaitons à présent vérifier le comportement de la commande en admittance implémentée sur le robot Orion [BAUMEYER, Sylvain MIOSSEC et al. 2016]; nous désirons quantifier l'erreur entre la commande en admittance voulue (mouvement équivalent d'un système masse+amortisseur Figure 4.4) et le mouvement réel du robot, sur les 3 axes de translation cartésiens X , Y et Z . Pour cela nous n'utilisons pas la mesure du capteur mais nous adressons une force simulée de 20 N en entrée de la commande en admittance. Suite à cette force constante nous mesurons le déplacement (position et vitesse cartésienne) de l'effecteur; et nous le comparons à la réponse théorique d'un système d'admittance utilisant les mêmes paramètres et subissant une force identique en entrée. Il nous faut donc connaître le déplacement théorique (position et vitesse cartésienne) d'un système d'admittance supposé parfait subissant une force constante en entrée (de 20 N sur chaque axe cartésien X , Y et Z). Pour cela, nous avons développé un simulateur en script MatLab/Octave.

4.3.2 Calcul du déplacement théorique avec le simulateur de commande en admittance

Le schéma d'un système mécanique permettant d'obtenir un comportement d'admittance est donné en Figure 4.9.

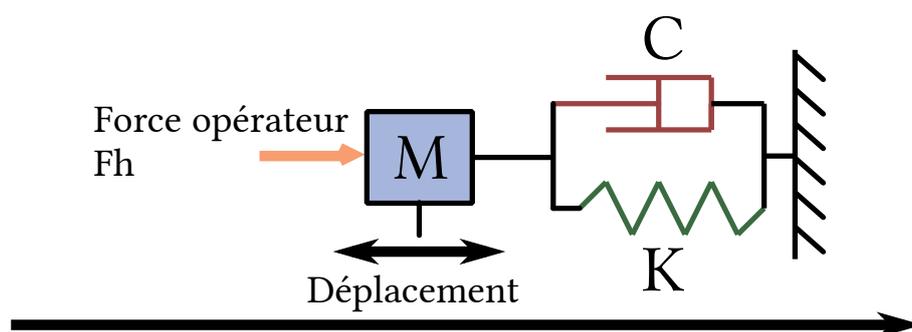


Figure 4.9 – Schéma de la commande en admittance utilisant un système masse, ressort et amortisseur

L'objectif est d'obtenir un déplacement manuel du robot Orion correspondant à un comportement en *espace libre*; dans ce cas le robot ne revient pas à la position initiale du mouvement lorsque la force d'entrée redevient nulle. Pour cela, nous supprimons l'effet de la force de rappel en posant $K = 0$, ce qui revient à considérer un modèle masse/amortisseur.

À partir de cette hypothèse de travail, l'équation différentielle du mouvement du système en *espace libre* est donnée par :

$$F_h = M\ddot{X} + C\dot{X} \quad (4.14)$$

Nous réécrivons l'équation 4.14 en la transposant dans le domaine de Laplace :

$$F_h = Ms^2X + CsX \quad (4.15)$$

Avec :

- F_h : force de l'opérateur en entrée du système
- M : masse virtuelle de la commande en admittance
- C : amortissement virtuel de la commande en admittance
- \dot{X} : vitesse en sortie de l'effecteur du robot
- \ddot{X} : accélération en sortie de l'effecteur du robot
- s : variable de Laplace

La fonction de transfert pour une sortie en position et l'autre pour une sortie en vitesse sont notées respectivement $H_{position}$ et $H_{vitesse}$ à partir de l'équation 4.15 :

$$H_{position} = \frac{X}{F_h} = \frac{1}{Ms^2 + Cs} \quad (4.16)$$

$$H_{vitesse} = \frac{V}{F_h} = \frac{sX}{F_h} = \frac{1}{Ms + C} \quad (4.17)$$

La Figure 4.10 montre la réponse à un échelon sur une seule dimension et avec une entrée de force de 20 N, une masse virtuelle de 100 kg et un amortissement virtuel de 500 N.m.s^{-1} . On observe que la position en sortie ne revient pas au point initial lorsque la consigne en force redevient nulle. Cela correspond à un fonctionnement en *espace libre*. Nous observons la réponse du système du second ordre avec les inflexions à 2 s et 4 s induites par la masse virtuelle. Cette simulation nous montre l'interprétation et l'intérêt physique pour le patient et l'opérateur de la masse virtuelle ; celle-ci permet d'obtenir un comportement doux pour l'opérateur et pour le patient.

4.3.3 Mesure du déplacement réel en comanipulation

Afin de comparer le mouvement du robot commandé en admittance avec un déplacement simulé, nous devons mesurer le déplacement réel du robot lorsque celui-ci est commandé en admittance avec en entrée une force constante de 20 N. Dans ce cas d'étude, la force de consigne ne sera pas celle mesurée par le capteur d'efforts ; elle sera simulée dans la partie commande.

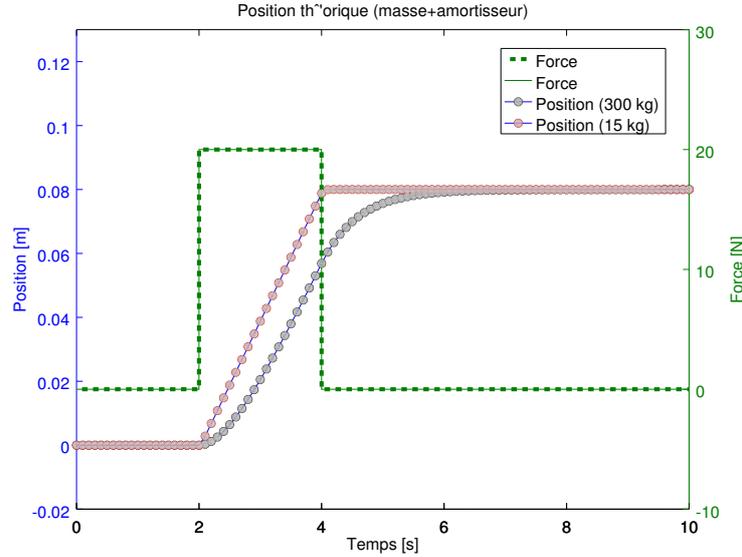


Figure 4.10 – Réponse théorique à un échelon de force du système d'admittance de paramètres $M=100$ kg, $K=0$ N.m et $C=500$ Nms^{-1}

En effet, les paramètres et la consigne de force doivent correspondre exactement à ceux utilisés avec le simulateur afin de pouvoir comparer la position du système théorique et celle du système réel.

Nous proposons dans un premier temps de tester le comportement du robot pour une commande en translation sur les 3 axes cartésiens X, Y et Z. Nous considérons le comportement du robot isotrope suivant les 3 axes X, Y et Z. Chaque axe reçoit la même consigne de force de 20 N mais avec le paramètre K différent. Lors du déplacement de l'effecteur du robot, nous mesurons par les capteurs proprioceptifs les positions et les vitesses articulaires ; elles sont converties en positions et vitesses dans l'espace opérationnel par le *MCU*. Nous nommons respectivement les *positions et vitesses mesurées* de l'axe i : \tilde{P}_i et \tilde{V}_i ; par exemple, la position mesurée sur l'axe X se nomme \tilde{P}_x et la vitesse mesurée sur l'axe Z \tilde{V}_z . La Figure 4.11 présente le dispositif de l'expérience qui nous permet de simuler une co-manipulation avec une force constante en consigne sur chacun des axes X, Y et Z.

4.3.4 Étude comparative du déplacement théorique et réel de la commande en admittance

Nous posons un critère permettant de quantifier l'erreur globale de position entre le déplacement simulé par le système mécanique masse-amortisseur et le déplacement réel du robot Orion commandé en admittance. Pour chaque composante de l'espace cartésien (X, Y, Z), l'erreur se calcule comme suit :

$$E_{P_i} = \frac{\sqrt{(P_i - \tilde{P}_i)^T \times (P_i - \tilde{P}_i)}}{nbPoints} \quad (4.18)$$

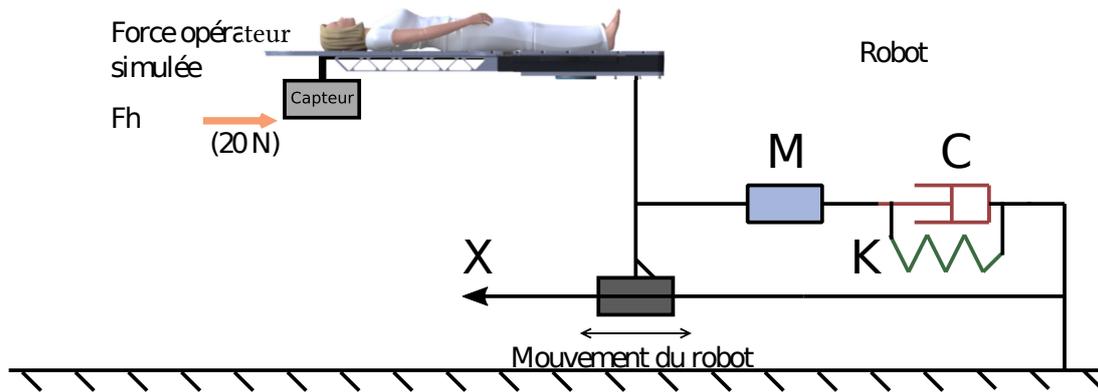


Figure 4.11 – Schéma équivalent du robot en mode co-manipulation en admittance de paramètres M et C ($K=0$).

Avec :

- E_{P_i} : Erreur en position sur l'axe i
- P_i : Position théorique de l'effecteur sur l'axe i
- \tilde{P}_i : Position mesurée de l'effecteur sur l'axe i
- $nbPoints$: Nombre de mesures sur l'axe i

Un des objectifs de ce test est de mettre en évidence la nécessité du robot à disposer d'une accélération suffisante correspondante à une masse virtuelle définie. Pour une masse virtuelle définie, il faut s'assurer que le robot dispose d'une capacité d'accélération suffisante pour satisfaire la demande de vitesse induite par l'algorithme d'admittance. Dans le cas contraire, le robot présentera une erreur de suivi de vitesse. Nous nous plaçons dans un cas générique pour lequel le paramètre de raideur K diffère de zéro. L'ensemble des comparaisons est réalisé avec une force de consigne constante de 20 N, une masse virtuelle M nulle, une raideur K variable et un amortissement C de valeur empirique de $200 \text{ N.m}^{-1}.s$. Cette hypothèse de masse virtuelle nulle nous permet d'observer les performances du robot en terme de temps de réponse pour les accélérations. Le robot ne pourra probablement pas suivre la demande de vitesse car elle correspond à une accélération infinie lors d'une variation de la force de consigne. Les trois Figures 4.12, 4.13, 4.14 présentent les variations de positions de l'effecteur du robot Orion sur les trois axes X , Y et Z pour une consigne en force correspondant à un échelon en force de 20 N. Nous pouvons remarquer que la position réelle converge vers la position théorique en régime permanent. Cependant, sur chaque axe l'erreur de position réelle et la position théorique diffèrent entre 0,5 s et 2 s, là où la variation de vitesse de consigne correspond à une accélération très forte que le robot ne peut pas produire. Cela fausse le comportement désiré de commande en admittance et donc par conséquent le ressenti de l'opérateur.

Le ressenti utilisateur est une certaine lourdeur (inertie) produite par une masse virtuelle équivalente lors du mouvement en co-manipulation. Pour vérifier cela nous proposons dans un second temps d'identifier sur ces essais les paramètres \tilde{M} , \tilde{K} et \tilde{C} qui justifient au mieux au sens des moindres carrés la position réelle obtenue de l'effecteur du robot. L'identification des paramètres est réalisée à l'aide d'un algorithme d'identification linéaire basé sur les moindres carrés.

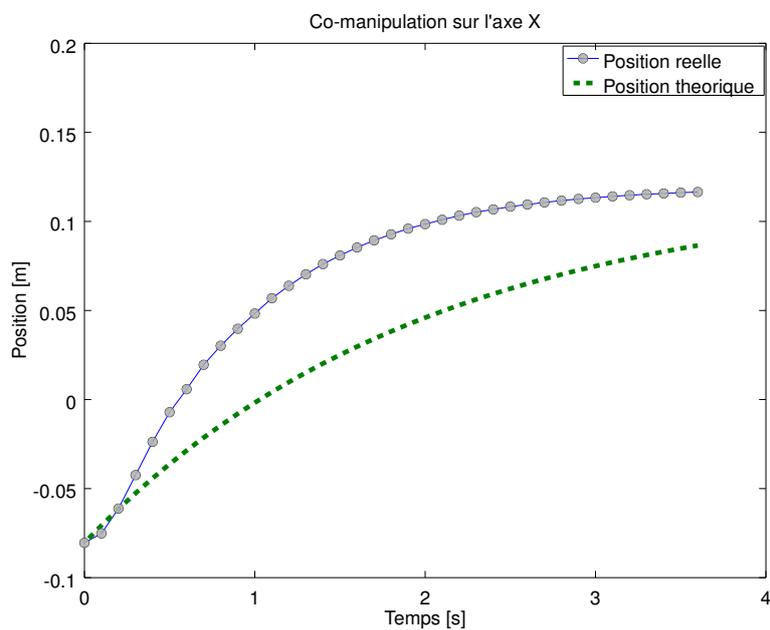


Figure 4.12 – Comparaison de la position théorique et réelle de l'effecteur robot sur l'axe X lors d'une co-manipulation à force constante simulée ($M=0$ kg, $K=100$ N.m, $C=200$ Ns.m⁻¹)

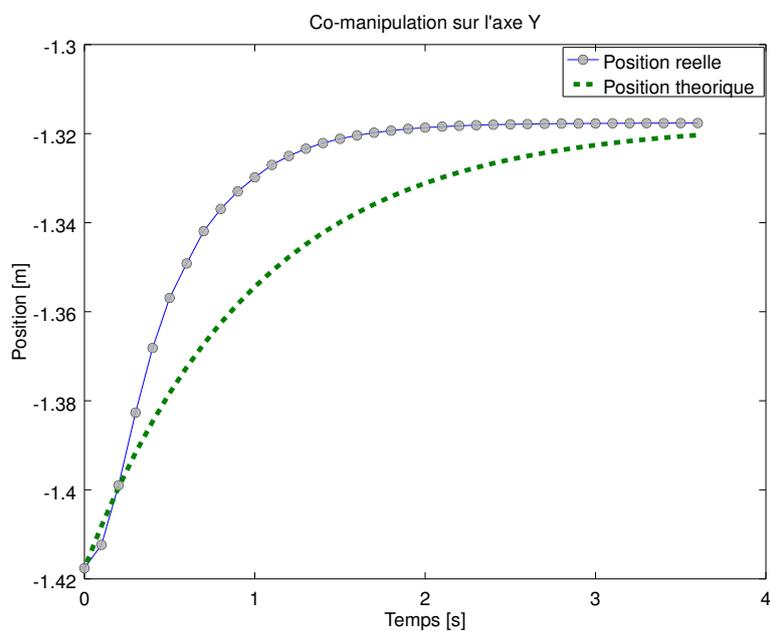


Figure 4.13 – Comparaison de la position théorique et réelle de l'effecteur robot sur l'axe Y lors d'une co-manipulation à force constante simulée ($M=0$ kg, $K=200$ N.m, $C=200$ Ns.m⁻¹)

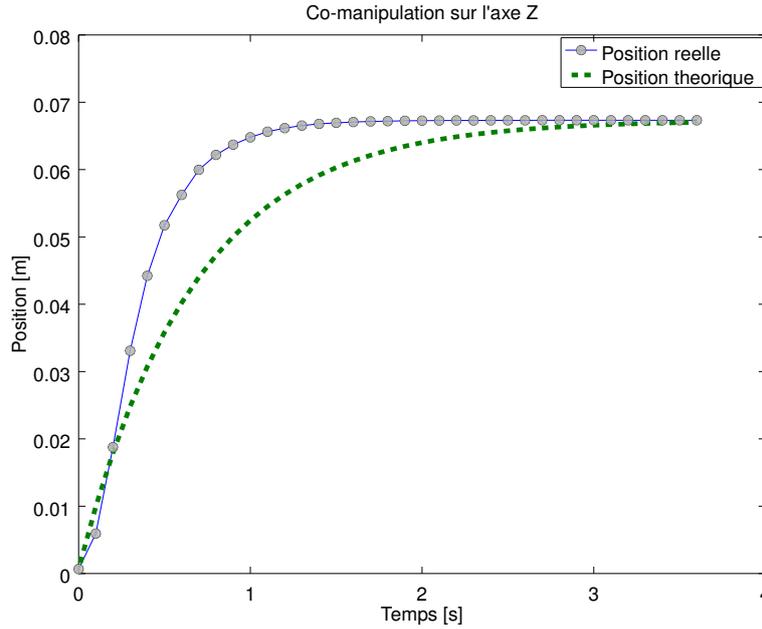


Figure 4.14 – Comparaison de la position théorique et réelle de l'effecteur robot sur l'axe Z lors d'une co-manipulation à force constante simulée ($M=0$ kg, $K=300$ N.m, $C=200$ Ns.m-1)

4.3.5 Identification des paramètres réels

L'objectif ici est de retrouver les paramètres \tilde{M} , \tilde{K} et \tilde{C} réels du système masse-ressort-amortisseur (Kelvin-Voigt Figure 4.9) qui permettrait d'expliquer la position réelle mesurée de l'effecteur du robot commandé en admittance et observable sur les figures 4.12, 4.13, 4.14.

Pour chaque composante X, Y et Z nous connaissons F_i , \tilde{P}_i , \tilde{V}_i et \tilde{A}_i et nous souhaitons identifier \tilde{M} , \tilde{K} et \tilde{C} correspondant à la position mesurée \tilde{P}_i et à la consigne de force simulée de 20 N tels que :

$$F_i = \tilde{M}\tilde{A}_i + \tilde{C}\tilde{V}_i + \tilde{K}\tilde{P}_i \quad (4.19)$$

Avec :

- \tilde{M} , \tilde{K} et \tilde{C} : les paramètres de la commande en admittance à identifier
- F_i : la force en consigne de la commande en admittance
- \tilde{P}_i : la position mesurée de l'effecteur du robot
- \tilde{V}_i : la vitesse mesurée de l'effecteur du robot
- \tilde{A}_i : l'accélération calculée à partir de la vitesse mesurée de l'effecteur du robot

Méthode d'identification Nous posons :

$$\tilde{Q} = \begin{bmatrix} \tilde{M} \\ \tilde{C} \\ \tilde{K} \end{bmatrix}$$

$$B = [\tilde{F}]$$

$$A = \begin{bmatrix} \tilde{A}_i \\ \tilde{V}_i \\ \tilde{X}_i \end{bmatrix}$$

L'équation 4.19 peut s'écrire sous la forme linéaire :

$$A\tilde{Q} = B \quad (4.20)$$

D'après la méthode d'identification des paramètres par les moindres carrés linéaires [BITTENCOURT et GUNNARSSON 2012], nous pouvons calculer les paramètres à identifier (\tilde{M} , \tilde{K} et \tilde{C}) contenus dans le vecteur \tilde{Q} de la façon suivante :

$$\tilde{Q} = pinv(A) \times B \quad (4.21)$$

Les résultats de l'identification des paramètres réels sont mis sous la forme :

$$\tilde{M} = \begin{bmatrix} \tilde{M}_x \\ \tilde{M}_y \\ \tilde{M}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 17.23 \\ 15.65 \\ 14.74 \end{bmatrix} \text{ kg}$$

$$\tilde{K} = \begin{bmatrix} \tilde{K}_x \\ \tilde{K}_y \\ \tilde{K}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 100.19 \\ 200.09 \\ 299.88 \end{bmatrix} \text{ N.m}$$

$$\tilde{C} = \begin{bmatrix} \tilde{C}_x \\ \tilde{C}_y \\ \tilde{C}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 212.18 \\ 227.06 \\ 238.16 \end{bmatrix} \text{ N.m.s}^{-1}$$

4.3.6 Discussion

Nous remarquons que la masse virtuelle identifiée n'est pas nulle (environ 15 kg pour chacun des axes) contrairement au paramètre de masse virtuelle que nous avons choisi ($M=0$ kg sur les 3 axes X, Y et Z). Cela peut s'expliquer par le fait qu'une masse virtuelle nulle engendre des accélérations infinies que ne peut pas générer le robot. Le ressenti de l'utilisateur manipulant le robot par la commande en admittance est celle associée à une certaine inertie proportionnelle à la valeur de masse virtuelle identifiée. Cette masse virtuelle non-nulle est nécessaire pour obtenir un comportement fluide de l'effecteur du robot. De plus, nous remarquons que nous retrouvons les valeurs de C (amortissement virtuel) et de K (raideur virtuelle) que nous avons programmées.

4.4 Conclusion

La commande en admittance est celle qui satisfait le mieux le cahier des charges de l'application médicale (mouvement en espace libre, transparence pour l'opérateur) compte tenu des propriétés particulières d'inertie forte du robot Orion. Les paramètres de cette commande doivent être réglés finement afin d'obtenir le comportement intuitif désiré. En effet, la raideur virtuelle doit être nulle afin d'obtenir un comportement en espace libre, la masse virtuelle ne peut être inférieure à la masse virtuelle minimale identifiée dans la partie 4.3.5. Par ailleurs, les résultats de la simulation nous ont montrés que la valeur de la masse virtuelle ne devait pas être non plus trop élevée afin d'obtenir un comportement suffisamment réactif du robot. Le contrôleur robotique utilisé, propre au robot Orion, nous impose d'implémenter notre commande dans un module de ce contrôleur. Ce module génère la commande en admittance ; l'outil mathématique de transformée en Z nous a permis de prendre en compte la contrainte de discrétisation et de retard dans l'implémentation logicielle de cette commande, cela afin que le comportement du robot commandé en admittance soit similaire à celui d'un système reposant sur un modèle d'admittance théorique.

Étude et comparaison de dispositifs haptiques

*« Savez-vous quel est le point commun
entre un robot et une sauce napolitaine ?
J'ose à peine le dire tellement c'est nul.
Ils sont tous les deux automates. »*

Philippe GELUCK

Synthèse :

Afin de rendre cette commande intuitive et transparente pour l'opérateur manipulant le robot, plusieurs dispositifs haptiques ont été mis en place et proposés à des opérateurs du domaine médical ou non. Les résultats de leurs choix nous oriente sur trois dispositifs haptiques que nous développons et comparons en fin de chapitre. Nous présentons la preuve de concept des systèmes haptiques que nous avons développée pour cette co-manipulation, avant de concevoir la solution a priori la plus intuitive pour l'opérateur. Enfin, nous menons des campagnes de mesures permettant de valider expérimentalement la solution développée.

Sommaire

5.1	Étude du besoin	75
5.1.1	Approches haptiques proposées	75
5.1.1.1	Comanipulation avec barre haptique en U (méthode 1)	75
5.1.1.2	Comanipulation table (méthode 2)	75
5.1.1.3	Comanipulation avec joystick 3D (méthode 3)	76
5.1.2	Étude du cas personnel non spécialisé en manipulation radio	78
5.1.3	Étude du cas personnel spécialisé en manipulation radio	78

5.2	Preuve de concept de co-manipulation	79
5.2.1	Étude du dispositif haptique barre en U	79
5.2.1.1	Validation du dimensionnement du capteur ATI Mini-85 . . .	79
5.2.1.2	Barre haptique en U	80
5.2.1.3	Mesure des efforts de l'humain en position de co-manipulation	81
5.2.2	Analyse de la chaîne de mesure du capteur d'efforts ATI Mini-85	86
5.2.2.1	Communication capteur/PC	87
5.2.2.2	Fréquence d'acquisition par le driver C++	87
5.2.3	Modèle du bras humain	89
5.2.3.1	Objectifs	89
5.2.3.2	Modèle équivalent général	89
5.2.3.3	Trajectoire virtuelle	90
5.2.3.4	Raideur	90
5.2.4	Valeurs de raideur expérimentales	91
5.2.4.1	Amortissement	92
5.3	Co-manipulation avec un capteur localisé entre l'effecteur et la table	92
5.3.1	Modèle du patient	94
5.3.1.1	Quantification de l'influence du mouvement du corps du patient sur la mesure de force de co-manipulation	94
5.3.1.2	Modélisation du patient par une charge purement inertielle . .	95
5.3.1.3	Approche visco-élastique pour la modélisation du corps du patient	97
5.3.1.4	Étude comparative du corps du patient en mouvement avec un système de masses rigides et liquides	102
5.3.2	Analyse de la chaîne de mesure du capteur d'efforts ATI Omega-190 . .	103
5.3.2.1	Caractéristiques principales	103
5.3.2.2	Étude de la dérive de la mesure	103
5.3.2.3	Étude du bruit de mesure	105
5.4	Comparaison des solutions de co-manipulations	106
5.4.1	Mesure de la transparence	106
5.4.1.1	Étude du protocole proposé par [DUCHAINÉ 2010]	107
5.4.1.2	Étude du protocole proposé par [POQUET 2014]	108
5.4.1.3	Étude du protocole proposé par [FICUCIELLO, VILLANI et B. SICILIANO 2015]	108
5.4.1.4	Protocole de mesure de la transparence du robot Orion comanipulé	109
5.4.2	Mesure de la justesse	112
5.5	Conclusion	113

5.1 Étude du besoin

Dans le chapitre précédent, nous nous sommes intéressés à l'algorithme de commande en admittance. Cette commande est utilisée conjointement avec un dispositif haptique intégrant un capteur d'effort mesurant les efforts appliqués par l'opérateur. Nous étudions à présent les différents dispositifs haptiques proposés.

5.1.1 Approches haptiques proposées

À partir de l'état de l'art du chapitre 3, nous avons isolé pour le robot Orion trois dispositifs haptiques d'aide à la co-manipulation et adaptés au pré-positionnement et à l'extraction d'urgence. Afin de nous aider à choisir le dispositif haptique le plus adapté aux opérateurs médicaux, ceux-ci ont été proposés à deux groupes de personnes, un spécialiste et un non spécialiste de la radiothérapie. Nous choisirons la solution qui deviendra celle disponible sur le produit final d'abord par un vote des personnes auxquelles nous soumettons nos trois propositions qui choisissent *a priori* la solution la plus intuitive (la plus adaptée à la gestuelle) et la plus adaptée à l'objectif clinique ; nous validerons expérimentalement ce choix par des tests sur le robot.

5.1.1.1 Comanipulation avec barre haptique en U (méthode 1)

La première solution que nous proposons utilise un capteur d'efforts situé entre la table médicale et un dispositif haptique (barre en U en métal) que doit tenir l'opérateur (Figure 5.1).

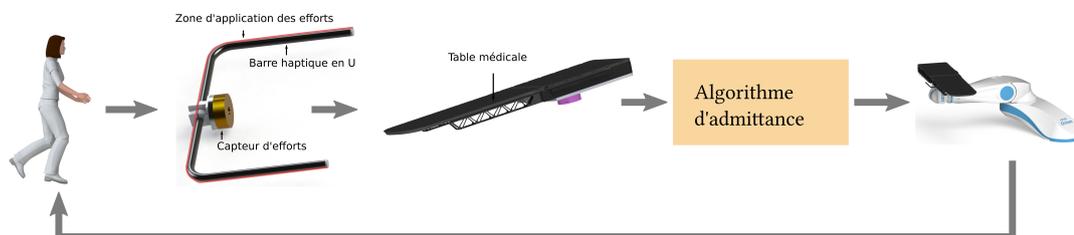


Figure 5.1 – Schéma simplifié de la solution de co-manipulation avec la barre haptique en U

Lorsque l'opérateur exerce des efforts sur la barre haptique en U, ceux-ci sont mesurés par le capteur d'efforts situé entre celle-ci et la table médicale (Figure 5.2a). Un algorithme d'admittance lit puis convertit cette mesure d'efforts cartésienne en une commande de vitesse dans l'espace opérationnel du robot ayant la même direction vectorielle que l'effort exercé ; elle sera par la suite convertie dans l'espace articulaire par le modèle cinématique inverse. Par exemple, un effort de poussée du praticien sera converti en une vitesse éloignant le robot de l'opérateur (Figure 5.2b).

5.1.1.2 Comanipulation table (méthode 2)

Pour la deuxième solution l'opérateur a la possibilité d'exercer des efforts sur la totalité de la périphérie de la table au lieu qu'ils soient limités sur la barre haptique en U. Cela lui permet

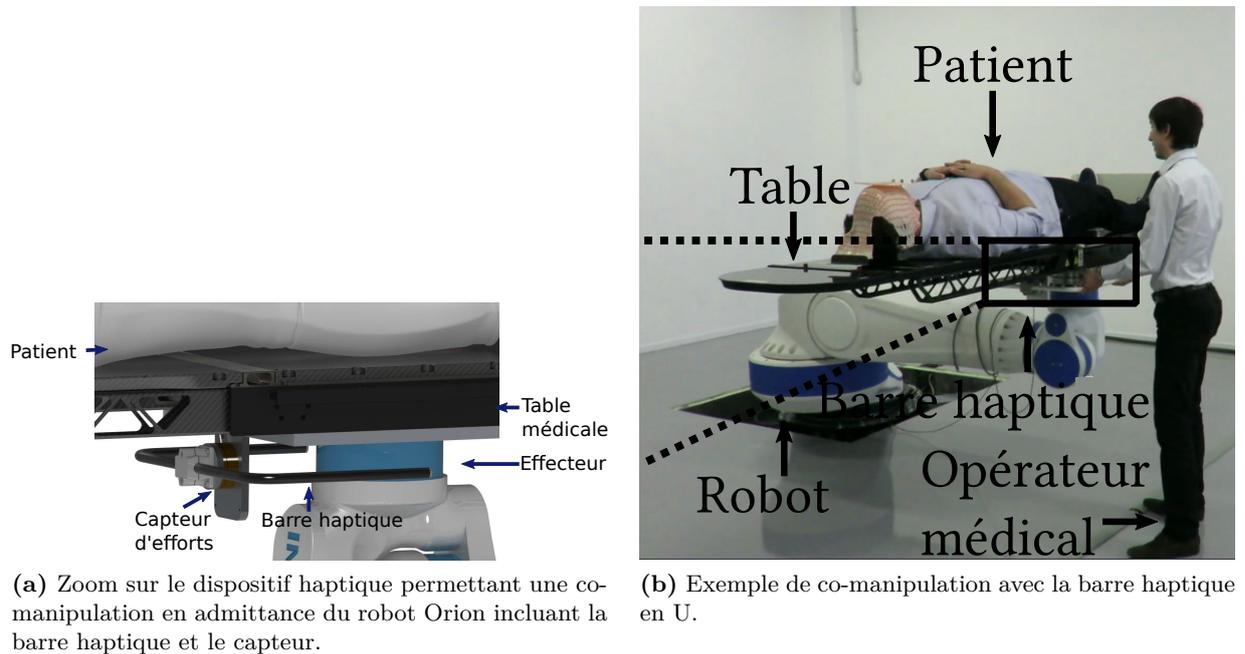


Figure 5.2 – Vue 3D du dispositif haptique barre en U et exemple de la position de l’opérateur pour la co-manipulation.

d’aligner le patient avec les Lasers de pré-positionnement en se déplaçant autour de la table pour une meilleur préhension de celle-ci et de se rapprocher du point de focalisation tout en manipulant manuellement le robot (Figure 5.3).

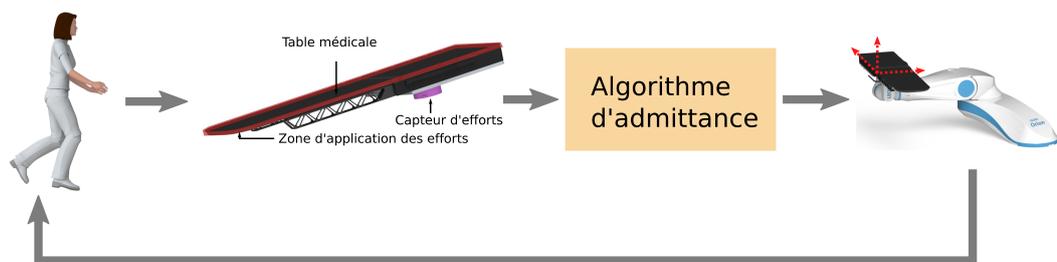


Figure 5.3 – Schéma simplifié de la solution de co-manipulation avec la table

5.1.1.3 Comanipulation avec joystick 3D (méthode 3)

Nous avons proposé une troisième solution de co-manipulation utilisant un joystick 3D SpaceMouse Pro de 3DConnexion¹ comme dispositif haptique (Figure 5.4). Le joystick 3D possède trois degrés de liberté en rotation et trois autres en translation et est solidaire de la table, la partie mobile de ce joystick mesure l’intention de déplacement de l’opérateur (Figure 5.5).

1. <http://www.3dconnexion.fr/index.php?id=271&redirect2=www.3dconnexion.fr> site web du fabricant 3DConnexion (2016)

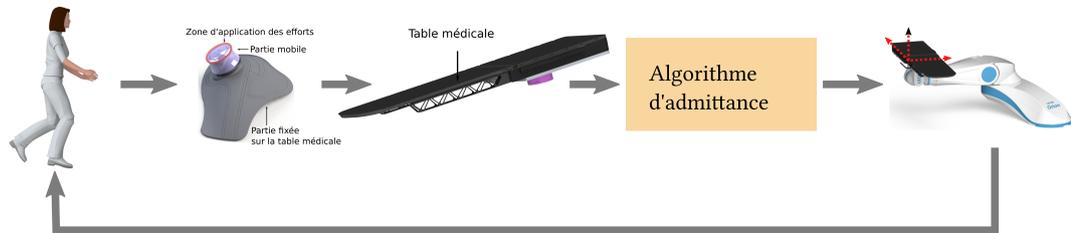


Figure 5.4 – Schéma simplifié de la solution de co-manipulation avec le joystick 3D

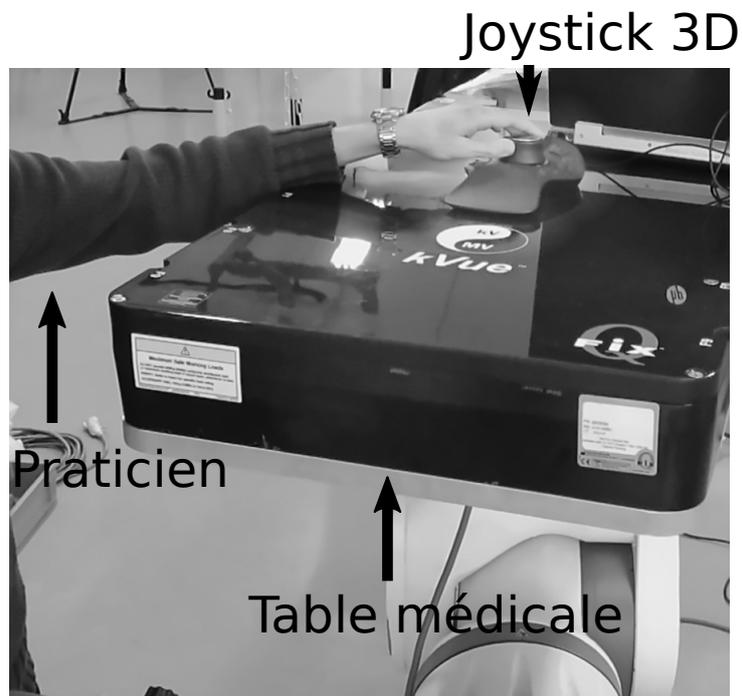


Figure 5.5 – Joystick 3D positionné dans la zone non transparente aux rayons

5.1.2 Étude du cas personnel non spécialisé en manipulation radio

Nous avons proposé les trois solutions précédentes à l'équipe de LEONI CIA Cable Systems travaillant sur le projet du robot Orion. Nous résumons dans le tableau 5.1 leur avis sur la solution la plus adaptée *a priori* à l'objectif médical.

Approche proposée	Avis
Comanipulation table (méthode 2)	4
Comanipulation barre (méthode 1)	3
Joystick 3D (méthode 3)	1

Tableau 5.1 – Résultat du vote sur la solution de co-manipulation la plus intuitive et la plus facile

Une majorité de personnes ont voté pour la solution de co-manipulation par la table directement (i.e avec le capteur d'efforts localisé sous la table) suivie de près par la comanipulation avec la barre en U. Suite à cette démarche qualitative, nous validerons expérimentalement (quantitativement) les trois solutions dans la partie 5.4.

5.1.3 Étude du cas personnel spécialisé en manipulation radio

Nous avons proposé les trois solutions à 5 manipulateurs du centre de radiothérapie de Chartres. Nous leur avons présenté le robot ainsi que les trois solutions en leur montrant des vidéos de chacune des trois solutions proposées. Les manipulateurs devaient choisir *a priori* celle qui leur convenait le mieux. Les réponses sont recensées dans le tableau 5.2.

Approche proposée	Avis
Comanipulation table (méthode 2)	5
Comanipulation barre (méthode 1)	0
Joystick 3D (méthode 3)	0

Tableau 5.2 – Résultat du vote sur la solution de co-manipulation la plus intuitive et facile par le personnel spécialisé en manipulation radio.

Les manipulateurs préfèrent *a priori* la co-manipulation avec le capteur sous la table (méthode 2). Les deux raisons principales évoquées sont :

- « cela ressemble plus aux tables actuelles de radiothérapie », ce qui ne peut pas vraiment être retenu comme argument en faveur de la méthode 2 car les manipulateurs de protonthérapie sont pour la plupart adaptés aux robots 6 DDL ;
- qu'« il est plus pratique de faire un pré-positionnement sans être restreint à manipuler la table en étant éloigné du point cible de focalisation ». Il est plus facile de le faire en étant à la hauteur de la tête ou du haut du corps du patient, ce qu'il est impossible de faire avec la barre en U (méthode 1) qui ne peut pas être située à cet endroit car cela nuirait à la transparence aux rayons X, ce qui est néfaste pour l'imagerie et le traitement.

Les manipulateurs nous ont donné d'autres renseignements qui permettent d'élaborer un premier cahier des charges :

- Table légère à manipuler (plus légère que la table actuelle)
- Réduire l'effort à exercer pour la mise en mouvement de la table
- Faible temps de réponse pour un déplacement donné lors d'un effort exercé par un opérateur
- 5 min maximum pour la totalité de la phase de pré-positionnement
- 2 mm de justesse de pose (entre le marqueur sur la peau du patient et le point cible de focalisation) sur la phase de pré-positionnement.

5.2 Preuve de concept de co-manipulation

5.2.1 Étude du dispositif haptique barre en U

5.2.1.1 Validation du dimensionnement du capteur ATI Mini-85

L'opérateur utilisant la commande en co-manipulation exerce un effort sur un dispositif haptique qui est relié mécaniquement au capteur d'efforts. Le capteur et la barre haptique en U ayant été préalablement choisis, nous souhaitons valider le dimensionnement et la tenue mécanique du capteur Figure 5.6 permettant la mesure des efforts exercés par l'opérateur sur le robot. En effet, les efforts appliqués par l'opérateur au niveau de la barre en U vont créer des forces ainsi que des couples au niveau du capteur d'efforts par l'intermédiaire du bras de levier existant entre le point d'application des efforts et le centre du capteur ATI Mini-85.

Différents travaux de la littérature [NASA 2000 et KROEMER 1969] traitent des efforts appliqués par des opérateurs humains selon différentes configurations ainsi que sur l'étude des efforts appliqués par un opérateur sur le dispositif haptique. Cependant ces travaux ne sont pas directement adaptable à notre cas d'utilisation de co-manipulation par une barre haptique. En effet, l'étude [NASA 2000] ne concerne que les cas où l'opérateur utilise son bras droit ou son bras gauche, mais ne prend pas en compte le cas avec les deux en même temps. Dans notre cas, l'opérateur aura les deux mains sur le dispositif haptique (Figure 5.13), les résultats ne peuvent donc pas être pris en compte directement. Une autre étude existe dans la littérature [KROEMER 1969] qui prend en compte le cas avec les deux mains sur le dispositif haptique (Figure 5.9), cependant seul le cas *poussée vers l'avant* est étudié (F_{front} sur la Figure 5.8). De plus, l'opérateur prend appui à l'arrière de son pied (Figure 5.9) ce qui n'est pas le cas pendant une co-manipulation avec le robot Orion. Étant donné le manque de données dans la littérature nous avons décidé de mener notre propre campagne de mesures d'un opérateur exerçant son effort avec deux bras. Une fois les efforts appliqués par l'opérateur sur le dispositif, nous calculons les efforts induits au niveau du centre du capteur à dimensionner que nous comparons avec les efforts maximaux admissibles du capteur ATI Mini-85 fournis dans la documentation technique.

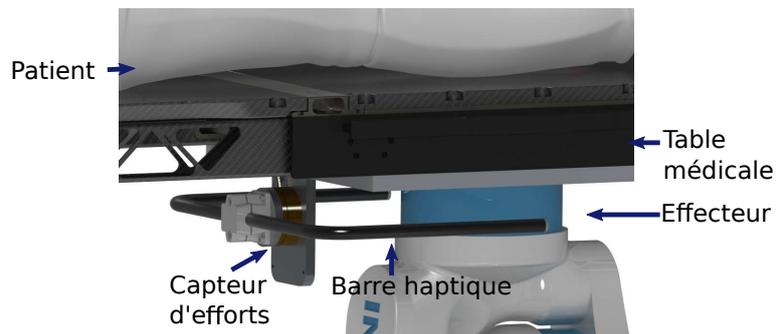


Figure 5.6 – Vue 3D (CAO) du dispositif haptique, incluant la barre haptique et le capteur, utilisé pour une co-manipulation en admittance du robot Orion.

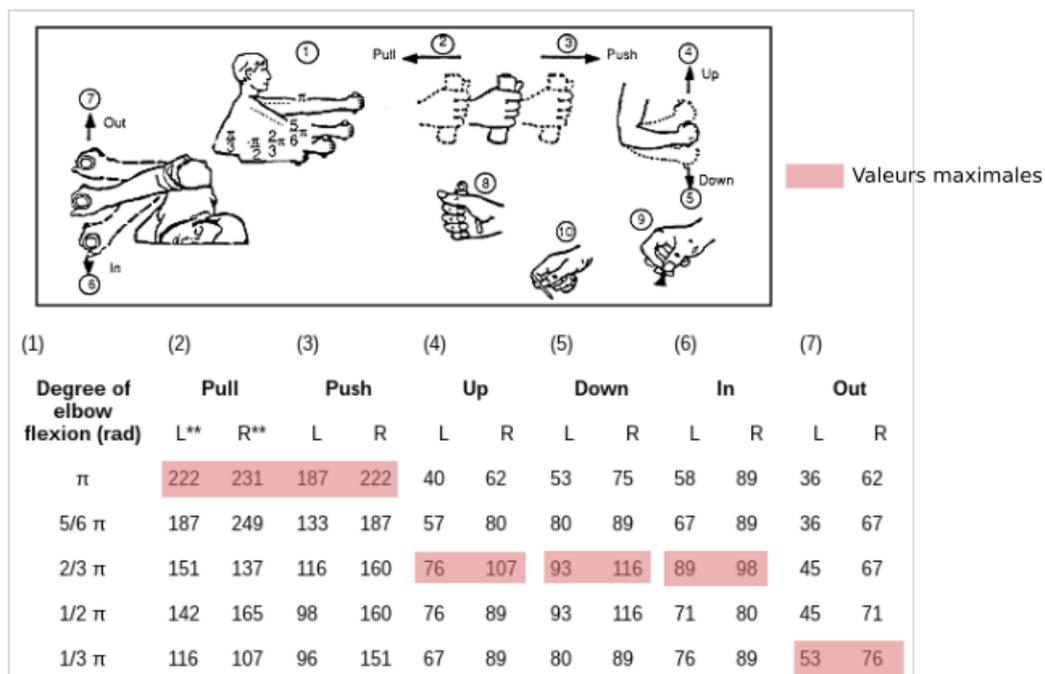


Figure 5.7 – Résultats de l'expérience [NASA 2000] ne prenant pas en compte le cas où les deux mains sont utilisées simultanément.

5.2.1.2 Barre haptique en U

La barre haptique a été conçue par l'équipe mécanique de LEONI CIA Cable Systems, avec le cahier des charges de départ suivant :

- deux cotés pour autoriser une co-manipulation de part et d'autre de la table ;
- une largeur suffisante pour pouvoir placer les deux mains cote à cote ;
- une compacité maximale afin ne pas entrer dans la zone de transparence (Figure 1.9) de la table.

La barre en U est formée à partir d'un tube de 20 mm. Le plan est donné en Annexe 6.49.

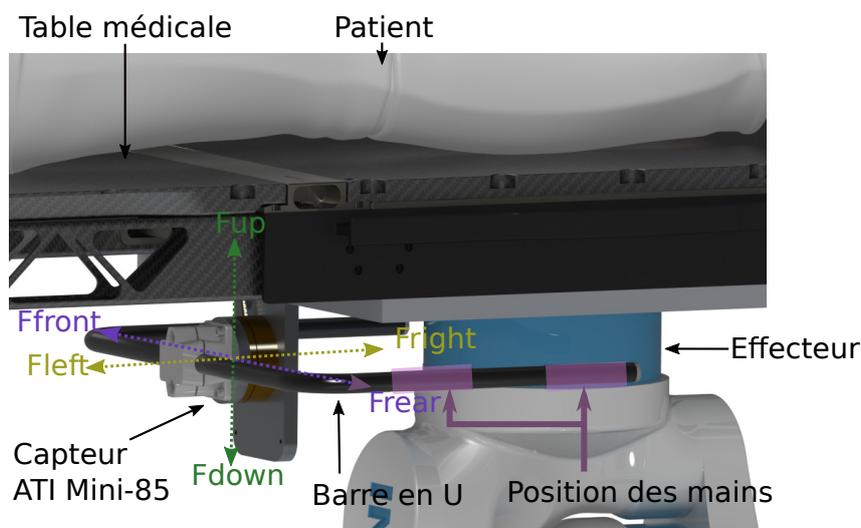


Figure 5.8 – Vecteurs représentant les forces exercées par l’opérateur sur le dispositif haptique dans le cas de la preuve de concept de co-manipulation.

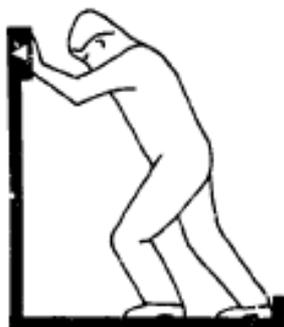


Figure 5.9 – Position utilisée pour l’évaluation statistique de mesure des efforts maximaux exercés par un humain [KROEMER 1969].

5.2.1.3 Mesure des efforts de l’humain en position de co-manipulation

La démarche proposée se compose de deux parties. La première va être de mener une campagne de mesures des efforts exercés sur la table par un opérateur humain dans les conditions d’une co-manipulation. Nous étudions les efforts sur les 3 composantes F_x , F_y et F_z ; cela nous donne les 6 configurations singulières suivantes (Figure 5.8) :

- l’opérateur pousse devant lui F_{front} ;
- l’opérateur tire en arrière F_{rear} ;
- l’opérateur effectue un effort latéral à gauche F_{left} ;
- l’opérateur effectue un effort latéral à droite F_{right} ;
- l’opérateur lève vers le haut F_{up} ;
- et enfin, l’opérateur pousse vers le bas F_{down} .

Une phase d'étude sur l'étendue de mesure des efforts est mise en place pour valider l'utilisation du capteur ATI Mini-85. Pour la mesure des efforts nous utilisons le capteur ATI Omega-190 situé entre la table médicale et l'effecteur (Figure 5.12). Dans une deuxième étape à partir de ces mesures nous exprimons les efforts mesurés au centre du capteur ATI Mini-85 et exprimés dans le repère de celui-ci Figure 5.11 (point S1 et repère RS1 sur le schéma Figure 5.11).

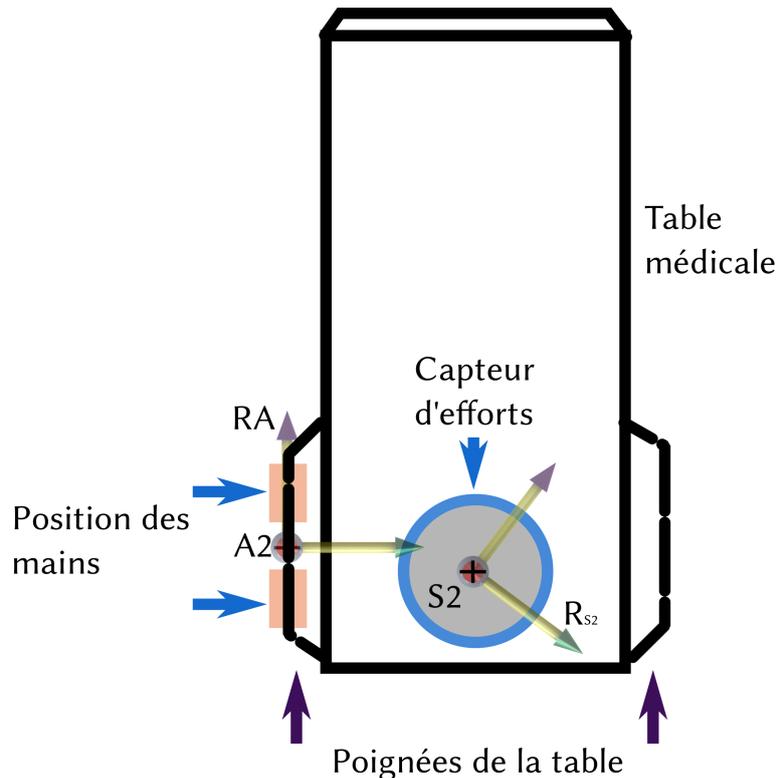


Figure 5.10 – Table médicale kVue vue de dessus, position du capteur Omega-190 et les repères associés

Le robot est positionné avec sa table dans une position initiale qui correspond à celle la plus couramment utilisée en co-manipulation Figure 5.13. Tous les axes du robot sont bloqués dans cette position, l'opérateur exerce, tour à tour, les 6 cas d'efforts définis précédemment en positionnant ses deux mains de part et d'autre du point A2 (Figure 5.10).

- Pour chaque cas d'effort considéré, F_x , F_y et F_z sont mesurées au point S_2 à partir du capteur ATI Omega-190 installé entre la table et l'effecteur (Figure 5.12), référentiel R_{S_2} .
- Nous changeons de référentiel; du repère R_{S_2} (du capteur Omega 190) vers le repère opérateur R_A (Figure 5.10).
- Les efforts de l'opérateur sont appliqués au point A2 mais les mesures sont effectuées en S_2 . Nous déplaçons le torseur des efforts du point S_2 vers le point A_2 exprimé dans le repère R_A (Figure 5.10).
- Les efforts appliqués par l'opérateur sur la table médicale en A1 sont considérés identiques à ceux qu'il exercerait sur la barre en U en A2 (Figure 5.11).
- Nous changeons de référentiel en passant du repère Opérateur R_A vers le repère R_{S_1} afin d'exprimer les efforts dans le repère du capteur Mini-85.

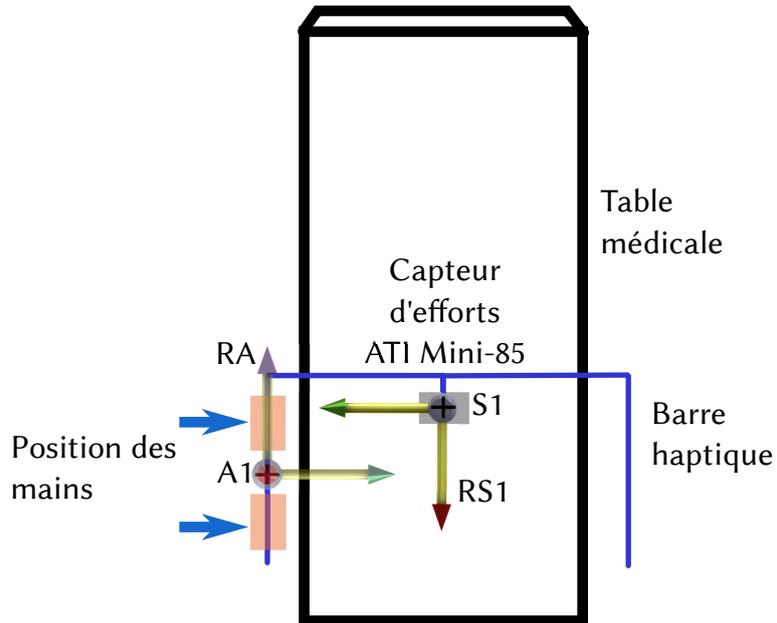


Figure 5.11 – Table médicale kVue vue de dessus avec la barre haptique en U, le capteur Mini-85 et les repères associés

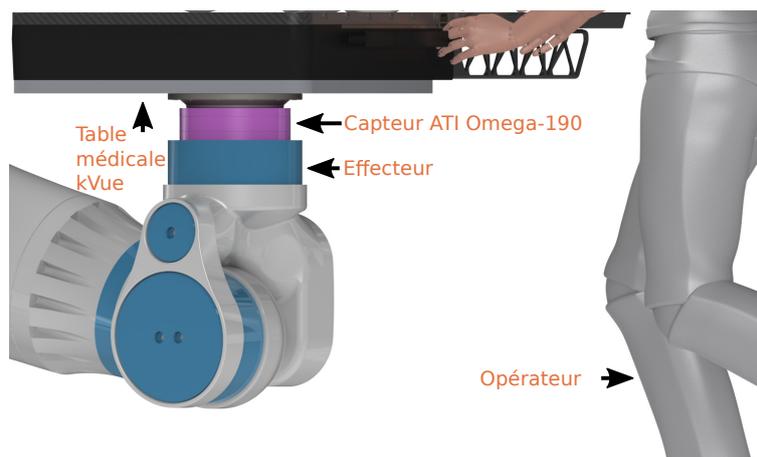


Figure 5.12 – Vue de coté du capteur de mesure des efforts de l'opérateur (ATI Omega-190).

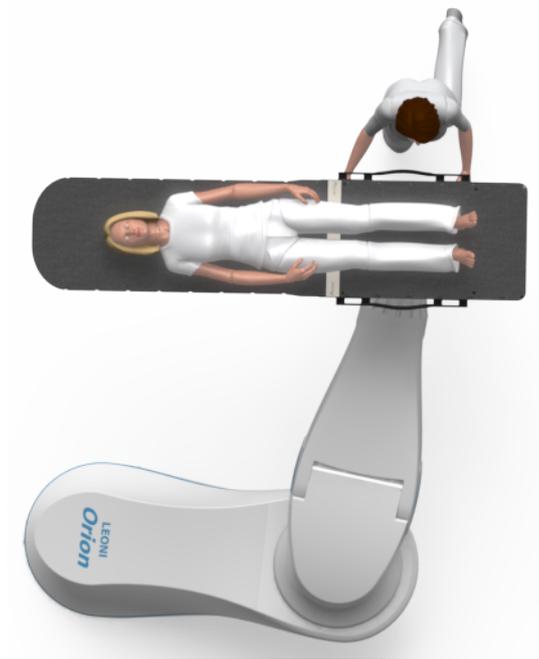


Figure 5.13 – Vue de dessus de la table médicale kVue du robot Orion et position initiale utilisée pour la campagne de mesures des efforts appliqués par l’opérateur sur le robot.

- Nous comparons les valeurs des efforts appliqués par l’opérateur au niveau du capteur Mini-85 dans le référentiel R_{S1} avec les efforts maximaux admissibles par le capteur Mini-85 donnés dans la documentation technique.

Nous avons effectué les mesures avec un volontaire de sexe masculin, de taille 1,79 m et masse 62 kg. Les efforts mesurés au point d’interaction (point A2 Figure 5.10) exprimés dans le repère RS2 sont transcrits au point du capteur ATI Mini-85 et exprimés dans le repère du capteur RS1. La Figure 5.14 montre un exemple de mesure des efforts (forces et couples) de l’opérateur en poussant sur le dispositif haptique (Figure 5.10). Nous constatons que l’opérateur exerce son effort principal sur l’axe Y mais que des efforts résiduels existent suivant les axes X et Z (tableau 5.3 à 5.8).

Axe	Forces (N)	Moments (N.m)
X	52	40
Y	220	9
Z	20	13

Tableau 5.3 – Efforts relevés en poussant

Conclusion Les valeurs mesurées sont toutes inférieures aux valeurs maximales de mesures acceptables par le capteur ATI Mini-85 (Tableau 5.9) ce qui nous permet de valider son utilisation pour une co-manipulation sans craindre de la détérioration de la mesure due à des efforts excessifs

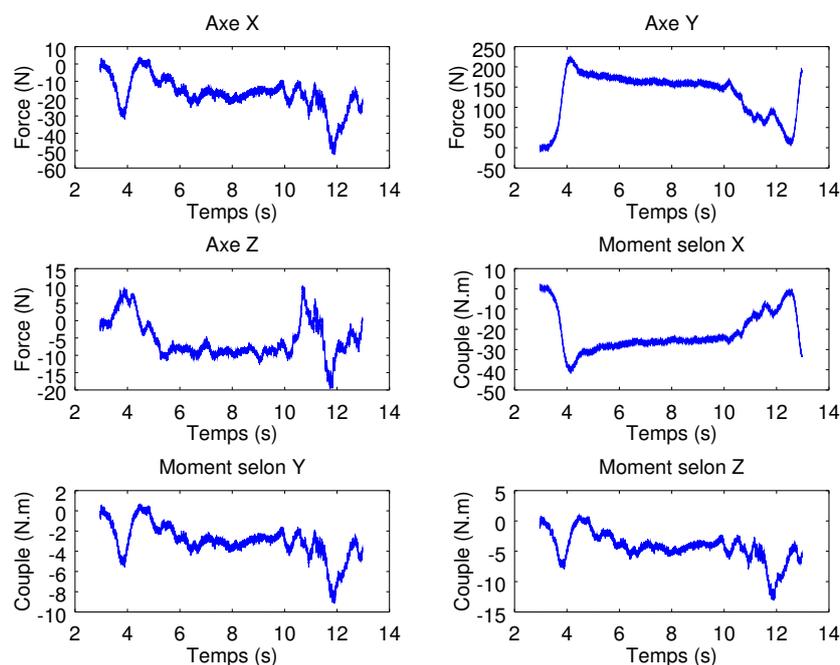


Figure 5.14 – Relevé des efforts au niveau du capteur ATI Mini-85 exprimé dans le repère du capteur d'un opérateur volontaire de 1,79 m 62 kg en poussant devant lui.

Axe	Forces (N)	Moments (N.m)
X	74	44
Y	252	13
Z	44	18

Tableau 5.4 – Efforts relevés en tirant

Axe	Forces (N)	Moments (N.m)
X	111	42
Y	90	19
Z	211	28

Tableau 5.5 – Efforts relevés en tirant à gauche

Axe	Forces (N)	Moments (N.m)
X	59	67
Y	108	10
Z	202	15

Tableau 5.6 – Efforts relevés en tirant à droite

appliqués sur celui-ci. Des mesures supplémentaires incluant d'autres personnes de morphologies différentes permettraient d'obtenir des valeurs d'efforts appliqués plus proches de la réalité.

Axe	Forces (N)	Moments (N.m)
X	383	19
Y	108	67
Z	16	96

Tableau 5.7 – Effort en levant

Axe	Forces (N)	Moments (N.m)
X	300	4
Y	28	52
Z	21	75

Tableau 5.8 – Efforts relevés en poussant vers le bas

Axe	Forces (N)	Moments (N.m)
X	1900	80
Y	1900	80
Z	3800	80

Tableau 5.9 – Valeurs maximales de mesures du capteur ATI Mini-85

5.2.2 Analyse de la chaîne de mesure du capteur d'efforts ATI Mini-85

Les caractéristiques techniques principales du capteur ATI Mini-85 sont données dans le tableau 5.10. Les efforts maximaux applicables avant détérioration correspondent à 6 fois la plage de mesures.

Caractéristiques	Axe	Valeur	Unité
Plage de mesures	F _x , F _y	1900	N
	F _z	3800	N
	T _x , T _y	80	N.m
	T _z	80	N.m
Sensibilité	F _x , F _y	0,33	N
	F _z	0,43	N
	T _x , T _y	0,014	N.m
	T _z	0,01	N.m

Tableau 5.10 – Caractéristiques principales du capteur ATI Mini-85

Le capteur ATI Mini-85 est composé de jauges de contraintes et d'un instrument électronique appelé *Netbox* qui fait l'acquisition, le conditionnement et l'envoi sur le réseau des efforts mesurés par le capteur. Nous nous intéressons à la chaîne de mesures des données fournies par le capteur (intégré dans la boucle de commande Figure 4.3) afin d'étudier la fréquence d'acquisition maximale.

5.2.2.1 Communication capteur/PC

La Netbox du capteur ATI Mini-85 est reliée au PC utilisant le capteur par un câble Ethernet et communique en protocole UDP. La fréquence d'acquisition peut être paramétrée dans la Netbox de 1 à 7000 Hz. Nous voulons vérifier que la fréquence maximale théorique de 7000 Hz est bien atteignable en pratique. Pour cela nous paramétrons la Netbox à 7000 Hz et faisons une acquisition en continu avec un script créé pour l'occasion. En parallèle, nous observons les trames UDP envoyées par la Netbox à l'aide du logiciel Wireshark et calculons le nombre de trames reçues par seconde correspondant à la fréquence réelle d'acquisition de la Netbox. Les résultats sont donnés dans le Tableau 5.11. Les essais réalisés sur un PC GNU/Linux (distribution Arch Linux) avec un processeur i7-3740QM et 8Go de RAM.

Fréquence demandée (Hz)	Paquets reçus	Temps d'acquisition (s)	Fréquence réelle (Hz)	Erreur relative (%)
5	51	10,00	5,1	0,02
1000	10009	10,00	1000,9	0,0
7000	70040	10,00	7004,0	0,0

Tableau 5.11 – Résumé des relevés de la fréquence réelle de la Netbox du capteur ATI Mini-85 pour 3 fréquences demandées distinctes

Conclusion Nous remarquons que la fréquence maximale théorique de 7000 Hz est atteinte en pratique avec une erreur de 0,13%, ce que nous considérons négligeable pour notre application.

5.2.2.2 Fréquence d'acquisition par le driver C++

Le driver C++ que nous avons développé est intégré dans la librairie CoSi. Il permet à l'algorithme d'admittance de recevoir et décoder les données transmises par le capteur ATI Mini-85. La fréquence maximale de lecture des valeurs de la Netbox par le driver C++ définit la fréquence maximale de commande du robot par le module de co-manipulation. Cependant, le programme de commande temps-réel du robot *MCU* fonctionne à une fréquence F_{MCU} de 100 Hz, nous ne pouvons ni devons commander le robot à une fréquence supérieure.

Pour ce qui concerne le capteur, une fréquence de lecture des valeurs acquises par le capteur supérieure à 100 Hz permet de faire une moyenne de plusieurs valeurs mesurées pour chaque commande de vitesse calculée (Figure 5.15), cela permet de diminuer le bruit de mesure, donc augmenter la qualité de la commande. Nous mesurons la fréquence maximale d'acquisition (N) par le driver C++ afin de vérifier qu'elle est supérieure à 100 Hz et afin de calculer le nombre d'échantillons que nous pourrions utiliser pour faire la moyenne des valeurs mesurées (équation 5.1, $N \in \mathbb{N}$).

$$N = \frac{F_{DriverMax}}{F_{MCU}} \quad (5.1)$$

Avec :

- $F_{DriverMax}$: la fréquence maximale de la Netbox par le driver C++
- F_{MCU} : la fréquence de la boucle de commande du *MCU*

Fréquence demandée (Hz)	Réelle (Hz)	Nombre d'échantillon	Erreur relative (%)
5	5	110	0
100	100	5341	0
1000	1000	10000	0
2333	2333,3	10000	0,013
3500	3436,4	10000	1,8
7000	3493,4	10000	50,1

Tableau 5.12 – Résumé des relevés de la fréquence réelle de la Netbox du capteur ATI Mini-85 par le driver intégré à CoSi

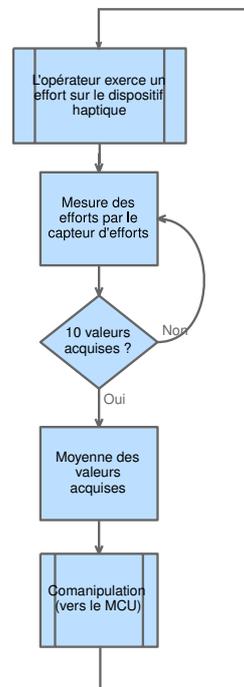


Figure 5.15 – Algorithme de filtrage par moyenne des valeurs acquises par le capteur d'efforts utilisé pour la co-manipulation.

Conclusion Les résultats du test sont donnés dans le tableau 5.12. Nous observons que la fréquence d'acquisition maximale obtenue en pratique avec le driver C++ est d'environ 3500 Hz. Cette fréquence est supérieure à celle de la commande bas-niveau du *MCU* (100 Hz) ce qui nous permet de faire une moyenne des valeurs mesurées sur plusieurs échantillons. Le nombre d'échantillons à moyenner si nous configurons la Netbox à 3500 Hz est de $3500/100 = 35$. Pour la suite nous décidons de fixer la fréquence d'acquisition à 1000 Hz afin de limiter la charge d'utilisation du processeur. Nous prendrons donc 10 valeurs d'efforts mesurés à chaque calcul de commande par l'algorithme d'admittance.

5.2.3 Modèle du bras humain

5.2.3.1 Objectifs

L'objectif de cette partie est de faire la synthèse des modèles de bras humain existant dans la littérature. Pendant une co-manipulation, les efforts générés par le bras humain sont de deux types : les efforts volontaires ordonnés par le système neuromusculaire permettant le mouvement pour atteindre la position voulue ; et les efforts parasites induits par le mouvement du robot [KAZEROONI 1990 et Xavier LAMY 2011].

5.2.3.2 Modèle équivalent général

Les modèles trouvés dans la littérature [A. CAMPEAU-LECOURS, OTIS et C. GOSSELIN 2016, ZANCHETTIN et al. 2010, RAHMAN, Ryojun IKEURA et MIZUTANI 2002, Etienne BURDET et al. 2001 et N. HOGAN 1984] se basent sur une représentation du bras sous forme d'une impédance. Dans [DUCHAINE 2010] l'auteur explique que les propriétés de la peau ne sont pas incluses dans le modèle car elles n'entrent en compte que lorsque la peau est légèrement comprimée, or dans le cas d'une co-manipulation la peau sera la plus part du temps totalement comprimée.

Une représentation mécanique équivalente du bras humain au niveau des articulations est donnée en Figure 5.16. La variation simultanée de l'activation des muscles permet à l'Homme de faire varier sa raideur au point d'interaction (la main généralement) [RAHMAN, Ryojun IKEURA et MIZUTANI 2002]. La raideur est maximale en début et fin de mouvement afin de stabiliser la position qu'elle diminue pendant le mouvement grâce au relâchement des muscles agonistes et antagonistes.

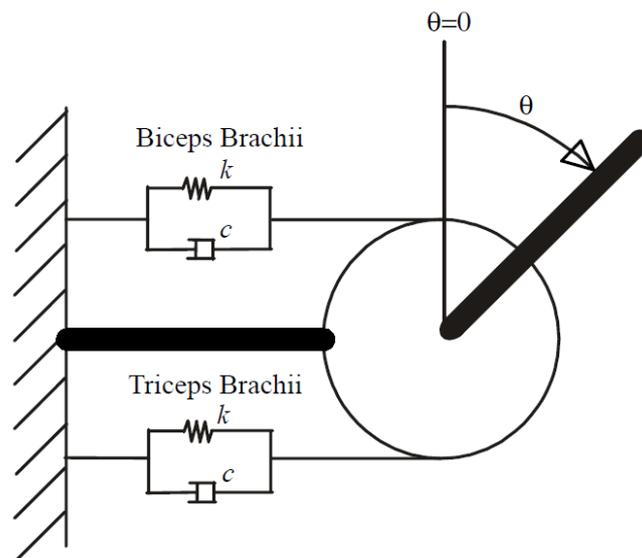


Figure 5.16 – Représentation mécanique des muscles antagonistes dans le bras humain [RAHMAN, Ryojun IKEURA et MIZUTANI 2002].

5.2.3.3 Trajectoire virtuelle

Il a été prouvé que l'Homme agit par projection de modèle direct pour générer des mouvements. Il projette dans l'espace opérationnel, la position possible de sa main et choisit celle qui correspond le plus à sa volonté. Ce phénomène fonctionne en boucle fermée, l'Homme utilise ses capteurs proprioceptifs tels que la vue, le toucher et l'ouïe pour ajuster cette position virtuelle appelée X_v (Figure 5.17) [Toshio TSUJI et TANAKA 2008 N. HOGAN 1984 et GOMI, KOIKE et KAWATO 1992].

L'équation de ce modèle est donnée par :

$$M_e \ddot{X}_e(t) + B_e \dot{X}_e(t) + K_e(X_e(t) - X_v(t)) = -F_e(t) \quad (5.2)$$

Avec :

- X_v : position virtuelle projetée
- X_e : position réelle de la main
- \dot{X}_e : vitesse réelle de la main
- \ddot{X}_e : accélération réelle de la main
- F_e : force produite par la main sur l'environnement
- M_e : masse du bras
- B_e : amortissement du bras
- K_e : raideur du bras

Lorsque l'humain a atteint la position voulue nous obtenons l'égalité suivante :

$$X_v = X_e \quad (5.3)$$

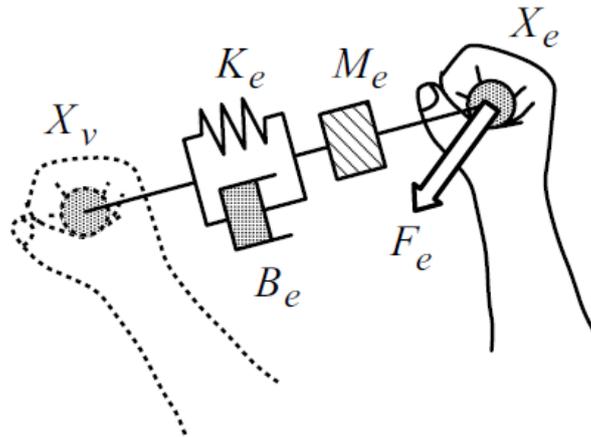


Figure 5.17 – Représentation de la trajectoire virtuelle lors d'une tâche de pointage avec le bras humain [Toshio TSUJI et TANAKA 2008].

5.2.3.4 Raideur

Les premiers modèles d'impédance équivalents au bras humain étudiés furent ceux ne considérant que la raideur [MUSSA-IVALDI, N. HOGAN et BIZZI 1985 et GOMI, KOIKE et KAWATO

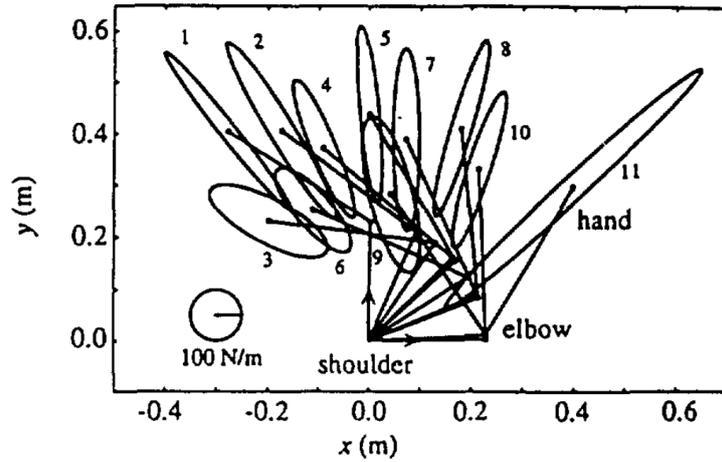


Figure 5.18 – Représentation de la raideur au niveau de la main sous la forme d’une ellipse dont la forme varie au cours du mouvement [T. TSUJI et al. 1994].

1992]. La raideur dépend de la posture [MUSSA-IVALDI, N. HOGAN et BIZZI 1985], la variation est rendue possible grâce à la co-contraction provenant des muscles antagonistes [RAHMAN, Ryojun IKEURA et MIZUTANI 2002]. La raideur cartésienne est représentée :

- en 2D par une ellipse (Figure 5.18)
- en 3D par une forme ovoïde en 3D.

À posture fixe, l’humain fait varier :

- la taille uniquement ;
- l’orientation et la forme restent inchangés [MUSSA-IVALDI, N. HOGAN et BIZZI 1985].

La raideur varie au cours du mouvement [GOMI, KOIKE et KAWATO 1992 et T. TSUJI et al. 1994] (Figure 5.18) et il a été montré que l’Homme peut adapter son impédance à une fréquence d’environ 1 Hz [Xavier LAMY 2011]. Miossec [S. MIOSSEC et KHEDDAR 2009] invalide le modèle de Hogan [FLASH et N. HOGAN 1985] pour des mouvements points à points et propose un modèle différent. L’équation d’impédance de la raideur s’exprime par l’équation 5.4 [DUCHAINE 2010].

$$K_h = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial x} & \frac{\partial f_x}{\partial y} \\ \frac{\partial f_y}{\partial x} & \frac{\partial f_y}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

5.2.4 Valeurs de raideur expérimentales

Dans [DUCHAINE 2010] les valeurs expérimentales trouvées sont :

- en moyenne de 3884 N.m ;
- avec un fort écart-type de 1202 N.m.

Les essais ont été faits sur un échantillon de 7 volontaires (Figure 5.19).

Afin de calculer la stabilité théorique, le modèle du bras en raideur uniquement n’est pas suffisant [Etienne BURDET et al. 2001] ; il faut prendre en compte les propriétés d’amortissement du bras humain qui jouent un rôle important dans la stabilisation du système Homme/robot en co-manipulation.

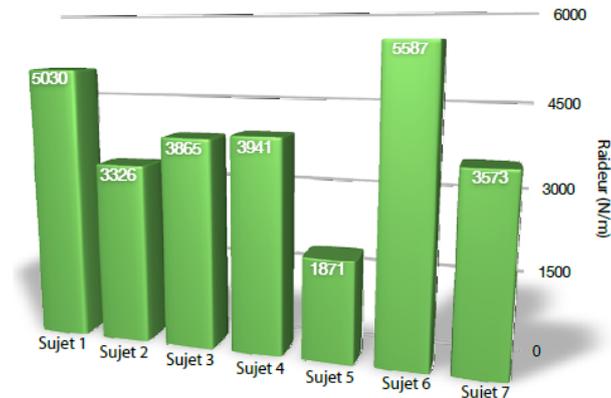


Figure 5.19 – Valeurs expérimentales de raideur obtenues sur un échantillon de 7 personnes [DUCHAINE 2010].

5.2.4.1 Amortissement

- Il a été montré dans [Etienne BURDET et al. 2001] que l’amortissement varie au cours du mouvement. De plus, dans [Toshio TSUJI, MORITANI et al. 1996] il est montré que l’amortissement varie avec la posture.
- Dans [DOLAN, FRIEDMAN et NAGURKA 1993] il est montré qu’il existe une analogie entre l’amortissement et la raideur au niveau des muscles, les comportements (propriétés de l’ellipse caractéristique, variation au cours du mouvement, etc.) sont semblables.
- Enfin, il existe un *lien entre raideur et amortissement* (équation 5.5). Ceci a été démontré dans [LACQUANITI, LICATA et SOECHTING 1982 et KEARNEY et HUNTER 1990].

$$B_h = \beta K_h^{-1/2} \quad (5.5)$$

Par exemples des valeurs d’amortissement virtuels identifiés sont données dans [LABRECQUE et C. GOSSELIN 2014 DUCHAINE 2010].

5.3 Co-manipulation avec un capteur localisé entre l’effecteur et la table

Après avoir conçu et testé la méthode 1 de co-manipulation du robot Orion utilisant la barre haptique en U et le capteur mini-85, nous voulons développer la méthode 2, dans laquelle le capteur d’efforts est localisé entre la table médicale et l’effecteur (Figure 5.20), qui d’après les études auprès des opérateurs spécialistes et surtout des non spécialistes, semble être la plus intuitive (partie 5.1). Cependant, cette méthode engendre des problèmes techniques supplémentaires par rapport à la co-manipulation avec la méthode 1 dans laquelle le capteur permet de découpler les efforts générés par la charge embarquée (table médicale et patient) de ceux générés par l’opérateur [LAWITZKY, MORTL et HIRCHE 2010, MÖRTL et al. 2012, A. CAMPEAU-LECOURS, OTIS et C. GOSSELIN 2016]. Dans notre cas, le patient situé sur la table ainsi que la table elle-même

constituent une charge supportée par le capteur d'efforts mesurant aussi les efforts de l'opérateur. En statique comme en dynamique, le système constitué par la table et le patient joue donc un rôle sur les efforts mesurés par le capteur (Figure 5.21). Ces efforts parasites additionnés aux efforts volontaires de l'opérateur entrent comme consignes dans l'algorithme d'admittance. Notre premier objectif est de modéliser les efforts parasites afin de les soustraire aux efforts mesurés par le capteur afin de ne prendre en compte dans la commande que les efforts appliqués par l'opérateur sur la table. Pour identifier quel modèle convient le mieux, pour modéliser les efforts induits par le mouvement du patient, nous étudierons les systèmes purement inertiels et visco-élastiques, puis nous étudierons les travaux portant sur la commande de robots manipulateurs supportant une cuve à eau à l'extrémité de l'effecteur [PRIDGEN, BAI et SINGHOSE 2010, DUBOIS, PETIT et ROUCHON 1999 et FEDDEMA et al. 1996]. Notre second objectif est d'étudier le capteur Omega-190 utilisé pour mesurer les efforts appliqués par l'opérateur sur la table médicale. Pour cela nous nous intéresserons à la plage de mesure, la fréquence d'acquisition des valeurs d'efforts ainsi qu'à la dérive dans le temps de ce capteur.

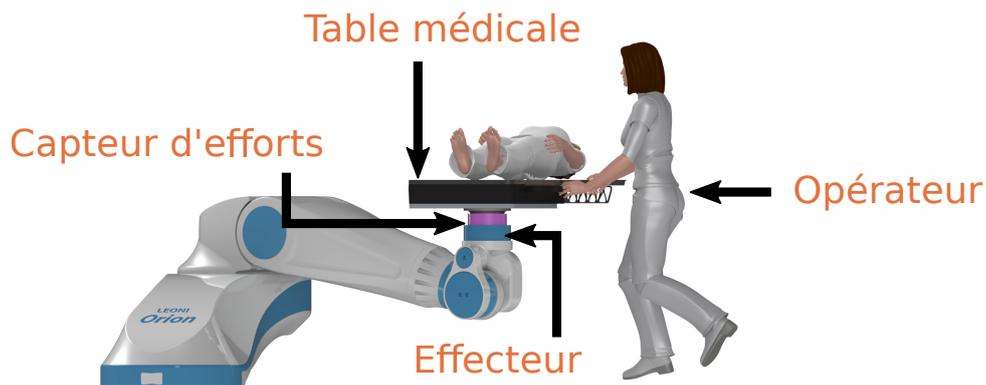


Figure 5.20 – Méthode de co-manipulation 2 dans laquelle le capteur Omega 190 est localisé entre la table médicale et l'effecteur.

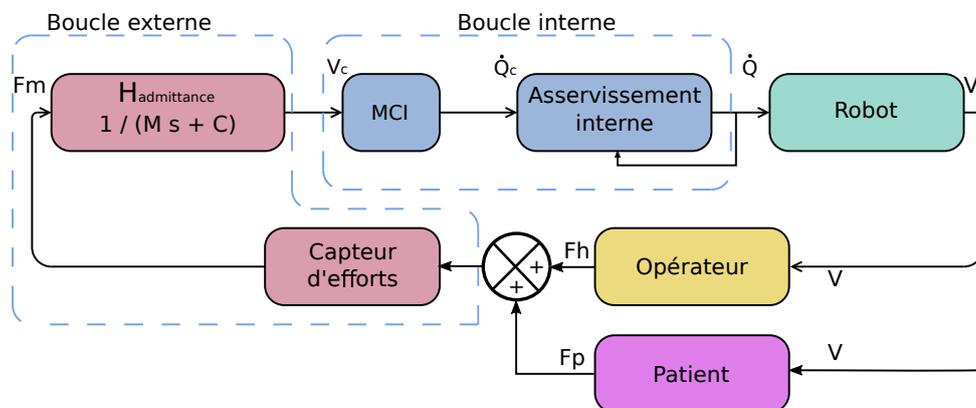


Figure 5.21 – Schéma bloc simplifié de la commande en admittance du robot Orion incluant le patient allongé sur la table médicale.

5.3.1 Modèle du patient

5.3.1.1 Quantification de l'influence du mouvement du corps du patient sur la mesure de force de co-manipulation

Cette partie a pour objectif de quantifier les efforts induits par le patient allongé sur la table pendant des mouvements caractéristiques du robot Orion comanipulé, afin d'évaluer ses effets sur la co-manipulation. Pour cela nous mesurons les efforts induits par le mouvement du robot seul (sans opérateur) supportant un volontaire sur la table médicale et nous les comparons aux efforts moyens qu'applique un opérateur pendant une co-manipulation. Nous avons choisi comme premier essai un mouvement simple mono-dimensionnel dans l'espace opérationnel en aller-retour (Figure 5.22).

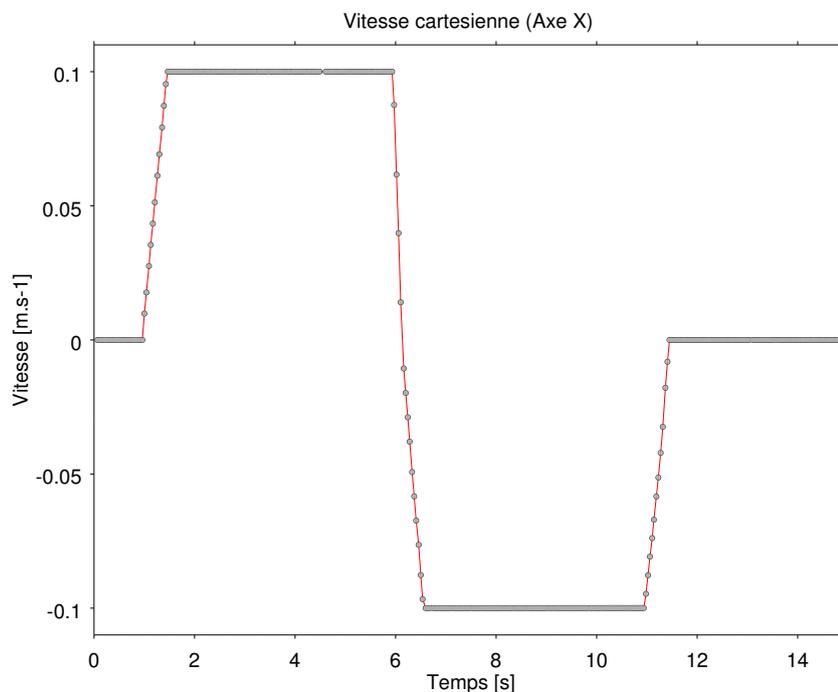
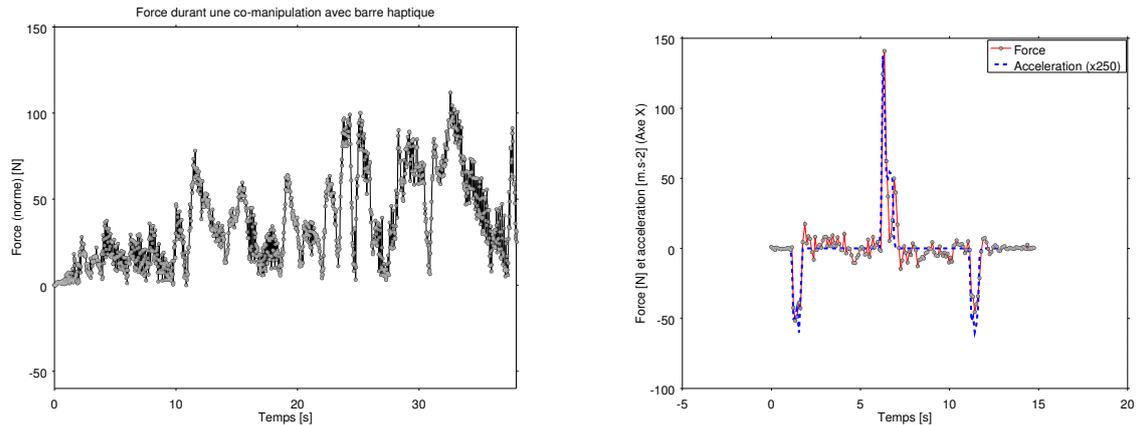


Figure 5.22 – Profil de commande de vitesse utilisé lors du mouvement rectiligne

Sur la Figure 5.23b, nous observons que les efforts générés par le corps du volontaire en mouvement varient en fonction des phases d'accélération mais oscillent aussi pendant les phases où l'accélération est nulle. De plus, sur la Figure 5.23a, les efforts produits par l'opérateur lorsqu'il effectue un mouvement avec le robot Orion comanipulé sont en moyenne égaux en norme à 35 N, mais peuvent atteindre une valeur maximale de 100 N. Cette moyenne représente la force moyenne qu'exerce un opérateur sur le dispositif haptique pendant une co-manipulation en espace libre. Pendant les phases d'accélération nulle, l'amplitude des perturbations produites par le corps en mouvement est d'environ 40 N (Figure 5.23b) ce qui est très proche de celle des efforts appliqués par l'opérateur. De plus, pendant les phases d'accélération (à 1 s, 6 s et 11 s) l'amplitude des perturbations est supérieure à 50 N. Lorsque le robot est comanipulé par la table

(méthode 2) nous mesurons la somme de ces deux efforts avec le capteur localisé entre la table médicale et l'effecteur. La commande en admittance génère une vitesse de consigne à partir de cette mesure (par l'intermédiaire d'un filtre passe-bas) ; elle prend donc en compte les efforts produits par le corps du volontaire (oscillations) en mouvement ce qui génère un mouvement saccadé et oscillant.



(a) Relevé de la force (norme euclidienne) pendant un exemple de co-manipulation utilisant la barre haptique.

(b) Accélération du robot Orion sur l'axe X et force générée par le mouvement aller-retour d'un volontaire de 119 kg et 1,80 m.

Figure 5.23 – Force exercée par l'opérateur et par le système table+patient pendant une co-manipulation.

Conclusion Nous voyons qu'il est nécessaire de prendre en compte les efforts générés par le mouvement du patient car cela engendre des efforts sur le capteur utilisé pour la co-manipulation environ deux fois supérieurs à ceux exercés par un opérateur. Nous nous intéressons maintenant à la modélisation de ces efforts parasites par plusieurs approches.

5.3.1.2 Modélisation du patient par une charge purement inertielle

Nous supposons, dans un premier temps, que l'ensemble table et patient allongé peut être représenté par un modèle purement inertielle. Nous souhaitons identifier la valeur de la masse correspondant à ce système et vérifier que ce modèle nous permet de prédire précisément les efforts mesurés par le capteur d'efforts situé entre la table et l'effecteur pendant un mouvement du robot. La Figure 5.24 montre que la modélisation d'un patient de 82 kg par un modèle purement inertielle ne permet pas de prédire totalement les efforts mesurés car des oscillations résiduelles d'une amplitude de 20 à 60 N sont présentes lorsque nous soustrayons des efforts mesurés les efforts prédits par le modèle.

Nous utilisons un critère d'erreur quadratique moyenne (équation 5.6) afin de quantifier l'erreur résiduelle du modèle purement inertielle.

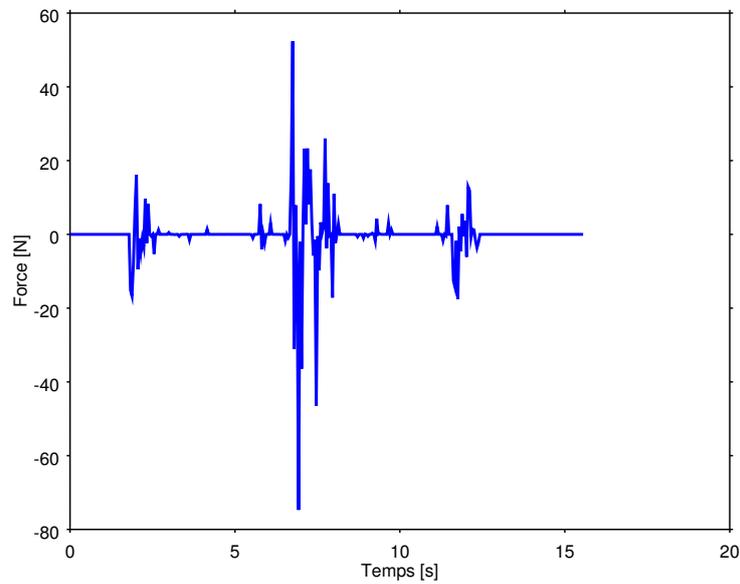


Figure 5.24 – Résidu (force mesurée moins force prédite) du modèle du patient assimilé à une masse purement inertielle.

$$\epsilon = \frac{\sqrt{\sum_{i=0}^n (F_{mes} - F_{mod})^2}}{nbPoints} \quad (5.6)$$

Nous avons identifié la masse du modèle purement inertielle pour différents volontaires de morphologies différentes (Tableau 5.13) et donnons l’erreur quadratique moyenne pour chaque volontaire.

Masse (kg)	Taille (m)	Erreur quadratique moyenne (N)
89	1,78 m	0,5125
62	1,79 m	0,4704
82	1,72 m	0,3913
80	1,87 m	0,3634
119	1,80 m	0,5155

Tableau 5.13 – Comparaison de l’erreur résiduelle pour une modélisation purement inertielle de plusieurs personnes de morphologies différentes.

Conclusion L’identification par le modèle purement inertielle n’est pas pleinement satisfaisante, en effet nous observons Figure 5.24 que la différence entre les efforts mesurés et les efforts prédits par le modèle n’est pas nulle. Des efforts parasites d’amplitude maximale de 40 N ne sont pas pris en compte (Figure 5.24).

5.3.1.3 Approche visco-élastique pour la modélisation du corps du patient

Afin de diminuer cette erreur résiduelle de modélisation, nous représentons le corps du patient par un modèle mécanique visco-élastique composé d'un ressort et d'un amortisseur en parallèle (représentation Kelvin-Voigt [MOREIRA 2012]) associé à une masse fixée à l'effecteur du robot et une masse mobile par rapport à l'effecteur (Figure 5.25a et Figure 5.25b). De plus, les études [ISO15066 2016, HONDORI 2012, RAHMAN, Ryojun IKEURA et MIZUTANI 2002] que nous avons prises en compte jusqu'à présent modélisent certaines parties du corps par des systèmes masse/ressort/amortisseur. La charge située au dessus du capteur d'efforts est composée de la table supposée purement rigide (M_1) ainsi que du corps humain supposé partiellement visco-élastique (M_2). Dans notre étude, nous considérons que le patient est immobile sur la table car il est maintenu par un système de contention.

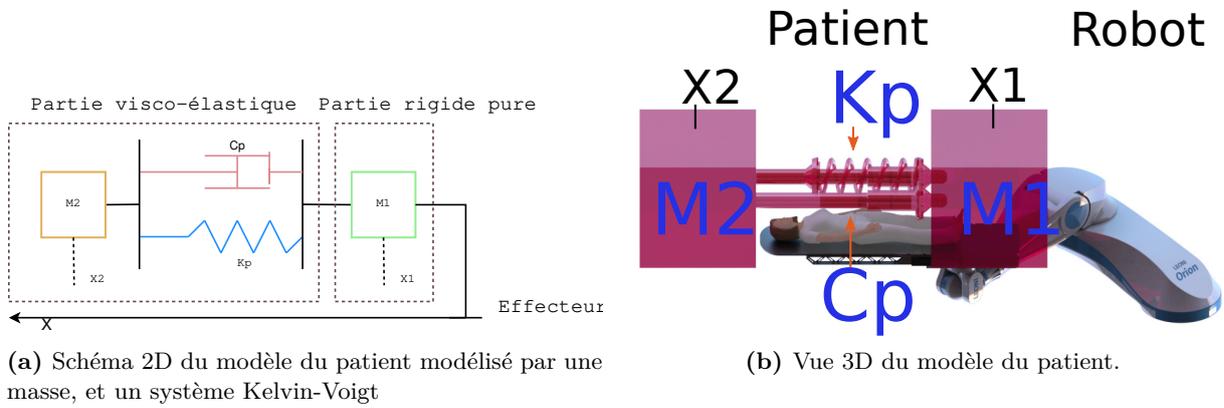


Figure 5.25 – Schéma du modèle de comportement dynamique du patient.

Le schéma incluant le robot Orion comanipulé, le patient et les efforts de l'opérateur est donné Figure 5.26.

Nous développons l'équation différentielle du mouvement de la partie visco-élastique seule (Figure 5.25a) afin d'obtenir la relation entre X_1 et X_2 . X_1 représente la position de la partie rigide pure et X_2 la position de la partie visco-élastique par rapport à l'axe du robot. Nous considérons pour cela la masse M_1 fixe, la masse M_2 est mobile.

D'après la seconde loi de Newton nous avons :

$$\begin{aligned} \sum F &= M_2 \ddot{X}_2 \\ -K_p(X_2 - X_1) - C_p(\dot{X}_2 - \dot{X}_1) &= M_2 \ddot{X}_2 \\ K_p(X_1 - X_2) + C_p(\dot{X}_1 - \dot{X}_2) &= M_2 \ddot{X}_2 \end{aligned}$$

La relation entre X_2 et X_1 est donc :

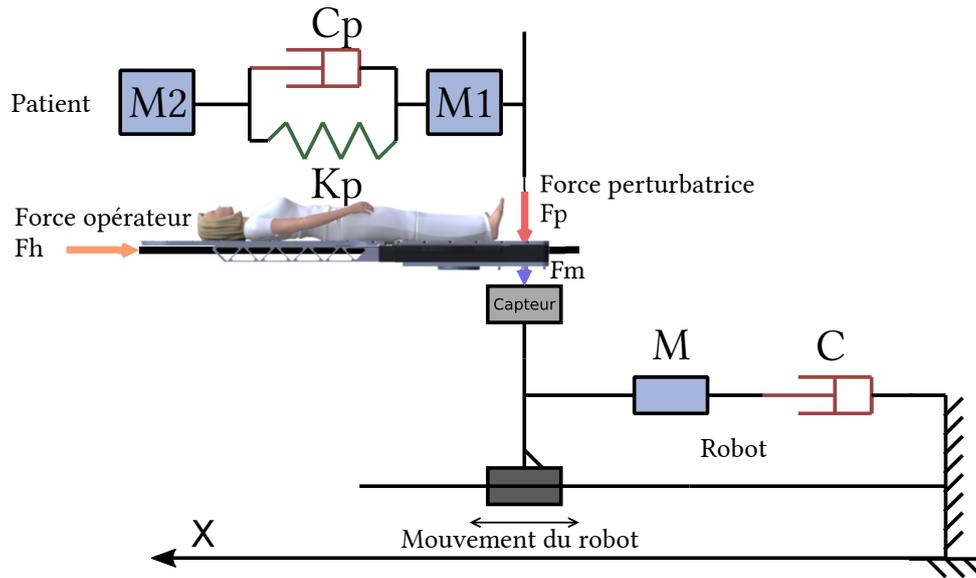


Figure 5.26 – Schéma mécanique équivalent au robot comanipulé avec le capteur situé sous la table en supposant que le patient allongé sur la table est représenté par un système mécanique masse/ressort/a-mortisseur.

$$\begin{aligned}
 M_2 \ddot{X}_2 &= C_p(\dot{X}_1 - \dot{X}_2) + K_p(X_1 - X_2) \\
 M_2 X_2 s^2 &= s C_p X_1 - C_p X_2 s + K_p X_1 - K_p X_2 \\
 (M_2 s^2 + C_p s + K_p) X_2 &= X_1 (C_p s + K_p)
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

$$X_2 = \frac{(C_p s + K_p)}{(M_2 s^2 + C_p s + K_p)} X_1 \tag{5.8}$$

D'après la Figure 5.25a et la seconde loi de Newton nous obtenons :

$$M_1 \ddot{X}_1 = F_p - K_p(X_1 - X_2) - C_p(\dot{X}_1 - \dot{X}_2)$$

En utilisant les équations 5.7 et 5.8 nous obtenons l'équation différentielle du mouvement par rapport à X_1 (i.e. mouvement de l'effecteur) :

$$\begin{aligned}
 M_1 \ddot{X}_1 &= F_p - M_2 \ddot{X}_2 \\
 F_p &= M_1 X_1 s^2 + \frac{M_2 s^2 (C_p s + K_p) X_1}{(M_2 s^2 + C_p s + K_p)}
 \end{aligned} \tag{5.9}$$

Nous construisons maintenant l'équation d'état du système comportant le patient et la table.

$$\begin{aligned}
 \dot{X}_2 &= AX + Bu \\
 Y &= CX + Du
 \end{aligned}$$

Nous voulons obtenir F_p , nous posons Y tel que :

$$Y = F_p$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{-K_p}{M_2} & \frac{-C_p}{M_2} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} -K_p \\ -C_p \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M_1 \end{bmatrix}$$

Les paramètres à identifier sont : M_1 , M_2 , K_p et C_p . D'après l'équation 5.9 nous pouvons écrire :

$$(M_2s^2 + C_p s + K_p)F_p = M_1 X_1 (M_2s^2 + C_p s + K_p)s^2 + M_2s^2(C_p s + K_p)X_1$$

$$(M_2s^2 + C_p s + K_p)F_p = [M_1(M_2s^2 + C_p s + K_p) + M_2(C_p s + K_p)]s^2 X_1$$

$$(M_2s^2 + C_p s + K_p)F_p = [M_1M_2s^2 + M_1C_p s + M_1K_p + M_2C_p s + M_2K_p]s^2 X_1$$

$$(M_2s^2 + C_p s + K_p)F_p = [(M_1 + M_2)(K_p + C_p s) + M_1M_2s^2]s^2 X_1$$

Nous supposons $M_1 + M_2$ (la masse du système table+patient) connue :

$$s^2 + \left(\frac{C_p s}{M_2}\right) + \frac{K_p}{M_2} F_p = \left[\left(\frac{K_p}{M_2} + \frac{C_p s}{M_2}\right)(M_1 + M_2) + M_1s^2\right]s^2 X_1$$

$$s^2 + \left(\frac{C_p s}{M_2}\right) + \frac{K_p}{M_2} F_p = \left[\left(\frac{K_p}{M_2} + \frac{C_p s}{M_2}\right) + \left(\frac{M_1}{M_1 + M_2}\right)s^2\right]s^2 (M_1 + M_2) X_1$$

L'équation est de la forme :

$$(a + bs + s^2)F_p = (a + bs + cs^2)(M_1 + M_2)X_1s^2$$

Les paramètres à identifier sont :

$$a = \frac{K_p}{M_2}$$

$$b = \frac{C_p}{M_2}$$

$$c = \frac{M_1}{M_1 + M_2}$$

Nous réécrivons l'équation sous la forme $AX = B$. En utilisant une double intégration nous obtenons :

$$\left(\frac{a}{s^2} + \frac{b}{s} + 1\right)F_p = (a + bs + cs^2)(M_1 + M_2)X_1$$

$$\frac{F_p}{s^2}a + \frac{F_p}{s}b + F_p = [a(M_1 + M_2) + bs(M_1 + M_2) + cs^2(M_1 + M_2)]X_1$$

$$a((M_1 + M_2)X_1 - \frac{F_p}{s^2}) + b(s(M_1 + M_2)X_1 - \frac{F_p}{s}) + c(s^2(M_1 + M_2)X_1) = F_p$$

Avec :

$$\begin{aligned} s^2 X_1 &= \ddot{X}_1 \\ s X_1 &= \dot{X}_1 \end{aligned}$$

Donc :

$$a((M_1 + M_2)X_1 - \iint F_p + b(M_1 + M_2)\dot{X}_1 - \int F_p + c((M_1 + M_2)\ddot{X}_1) = F_p$$

Ce qui est de la forme $AX = B$

$$\begin{aligned} B &= \begin{bmatrix} F_{p0} \\ F_{p1} \\ \dots \\ F_{pn} \end{bmatrix} \\ X &= \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_p}{M_2} \\ \frac{C_p}{M_2} \\ \frac{M_2}{M_1 + M_2} \end{bmatrix} \\ A &= \begin{bmatrix} (M_1 + M_2)X_1 - \iint F_0 & (M_1 + M_2)X_1 - \int F_0 & (M_1 + M_2)\ddot{X}_1 \\ (M_1 + M_2)X_1 - \iint F_1 & (M_1 + M_2)X_1 - \int F_1 & (M_1 + M_2)\dot{X}_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ (M_1 + M_2)X_1 - \iint F_n & (M_1 + M_2)X_1 - \int F_n & (M_1 + M_2)\dot{X}_1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

A n'est pas carrée, sa dimension est $N \times 3$ (N : nombre d'échantillons acquis). Nous utilisons la minimisation par les moindres carrés pour trouver X [D. E. WHITNEY, LOZINSKI et ROURKE 1986], ce qui donne :

$$\min((AX * B)^2) = 0 \quad (5.10)$$

Finalement nous obtenons :

$$\begin{aligned} X &= (A^T A)^{-1} A^T B \\ &= \text{pinv}(A) \times B \end{aligned} \quad (5.11)$$

Afin d'identifier les paramètres du modèle du patient pour des corps de différentes morphologies, nous avons effectué un mouvement aller-retour mono-dimensionnel du robot (Figure 5.22) et avons relevé la position, la vitesse et l'accélération de l'effecteur ainsi que la force exercée par la table sur le capteur d'efforts situé entre celle-ci et l'effecteur.

La taille, la masse des volontaires présents ainsi que les paramètres du modèle visco-élastique et l'erreur résiduelle sont répertoriés dans le tableau 5.14. La masse de la table avec ses interfaces mécaniques est de 78 kg.

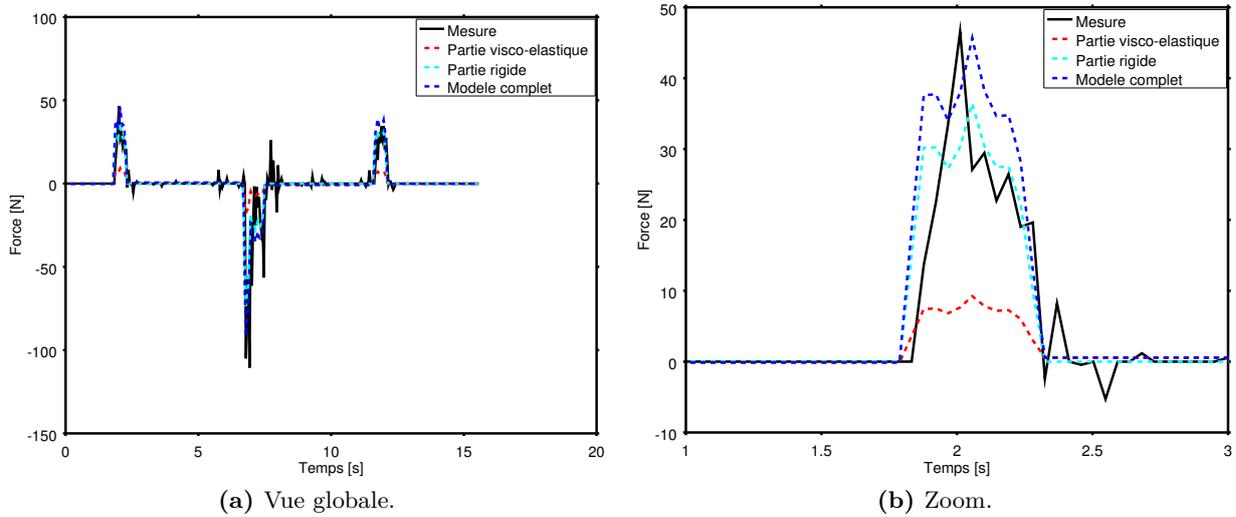


Figure 5.27 – Force prédite par un modèle en masse purement inertielle, la partie visco-elastique du modèle Kelvin-Voigt ainsi que le modèle Kelvin-Voigt dans son ensemble pour un volontaire de 82 kg et 1,72 m.

Masse (kg)	Taille (m)	M_1 (kg)	M_2 (kg)	C_p ($N.m.s^{-1}$)	K_p ($N.m^{-1}$)	Erreur résiduelle (N)
89	1,78 m	125,3	41,70	14,38	0,21	0,5108
62	1,79 m	137,52	2,47	0,51	0,01	0,4703
82	1,72 m	128,28	31,72	6,77	0,09	0,3911
80	1,87 m	121,49	36,51	8,43	-0,05	0,3625
119	1,80 m	168,96	27,04	14,52	0,009	0,5128

Tableau 5.14 – Identification des paramètres du modèle visco-élastique pour des volontaires de morphologies différentes.

Conclusion Le modèle complet Kelvin-Voigt n'améliore pas significativement la modélisation des efforts. Ce modèle permet une meilleure prédiction des efforts sur tous les cas considérés mais cet apport est inférieur à 1%; ce qui est négligeable pour l'objectif de co-manipulation considéré (Tableau 5.15 et Figure 5.27). Cela nous montre que les modèles (purement inertielle et visco-élastique) ne conviennent pas pour la modélisation des efforts avec le système table et patient allongé. Nous proposons par la suite de modéliser le système table+patient par une cuve à eau de volume et de rapport air/eau qu'il faudra déterminer.

Masse (kg)	Taille (m)	Erreur (modèle M)	Erreur (modèle M1M2KC)	Gain (%)
89	1,78	0,5125	0,5108	0,52
62	1,79	0,4704	0,4703	0,02
82	1,72	0,3913	0,3911	0,05
80	1,87	0,3634	0,3625	0,25
119	1,80	0,5155	0,5128	0,33

Tableau 5.15 – Comparaison de l'erreur résiduelle entre le modèle masse purement inertielle et le modèle visco-élastique.

5.3.1.4 Étude comparative du corps du patient en mouvement avec un système de masses rigides et liquides

Nous proposons de tester un modèle différent qui ne soit pas basé sur des éléments mécaniques classiques (masse, ressort, etc.) afin de modéliser plus fidèlement les efforts parasites. Nous proposons de modéliser le corps du patient par une cuve à eau de paramètres (volume total, rapport du volume eau/air, forme, etc.) qu'il faudra identifier. Nous nous basons sur les travaux liés à la commande de robots sériels supportant des cuves à eau en bout d'effecteur [PRIDGEN, BAI et SINGHOSE 2010, DUBOIS, PETIT et ROUCHON 1999 et FEDDEMA et al. 1996]. Notre objectif est de trouver une équivalence sur la force générée lors du déplacement entre le corps allongé sur la table et des cuves d'eau fermées afin de modéliser par la suite le corps humain par une cuve à eau en utilisant les travaux existants dans ce domaine.

Nous supposons dans un premier temps que le corps humain en mouvement va générer une force, au niveau du capteur entre la table et l'effecteur, équivalente à celle d'une cuve à eau fermée plus ou moins remplie. Nous allons par la suite vérifier cette hypothèse en mesurant les efforts au niveau du capteur situé entre la table et l'effecteur produits par le corps du patient pendant un mouvement prédéfini et en les comparant aux efforts produits par des cuves à eau soumises au même mouvement.

Nous avons choisi d'utiliser un mouvement rectiligne aller-retour mono-dimensionnel dans l'espace opérationnel (Figure 5.22).

Afin d'étudier l'influence de la morphologie des corps (Tableau 5.16) sur les efforts mesurés par le capteur situé sous la table nous avons demandé à deux volontaires de morphologies différentes de se positionner allongés sur la table pendant les mouvements décrits précédemment. Nous utilisons différentes cuves à eau plus ou moins remplies associées à des masses rigides positionnées sous les cuves à eau afin de garder constante la masse totale de l'ensemble table, cuves à eau et masses rigides.

Masse (kg)	Taille (m)
119	1,80 m
62	1,79 m

Tableau 5.16 – Morphologie des personnes utilisées dans l'étude de l'influence du corps du patient en mouvement sur l'amplitude des efforts mesurés par le capteur ATI Omega-190.

Nous observons de fortes oscillations sur la fin du mouvement lors des essais avec les cuves à eau. Pendant le mouvement, les oscillations semblent plus fortes avec les cuves à eau qu'avec les volontaires allongés. La différence de comportement d'un système composé de masses liquides et rigides et le mouvement des corps humains étant importante par rapport aux efforts moyens exercés par un opérateur pendant une co-manipulation, nous observons que les cuves à eau associées aux masses rigides ne permettent pas de modéliser le corps du patient allongé. Un modèle constitué d'un liquide et d'un solide ne convient donc pas comme modèle de patient en mouvement.

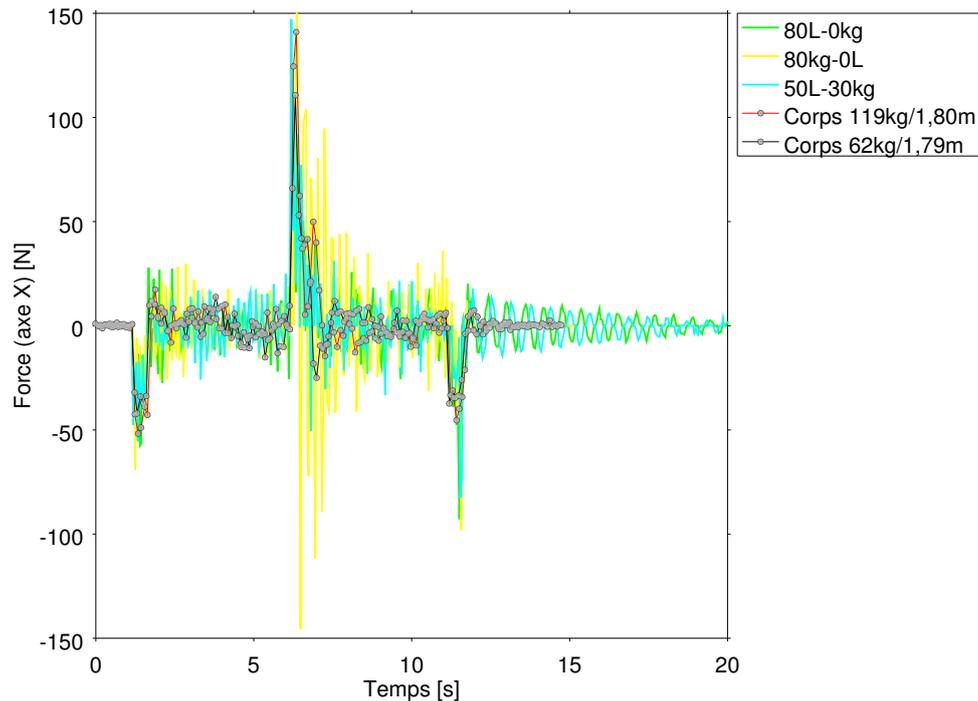


Figure 5.28 – Comparaison de la force générée par le mouvement 1D de plusieurs cas de charges et de volontaires allongés

5.3.2 Analyse de la chaîne de mesure du capteur d'efforts ATI Omega-190

5.3.2.1 Caractéristiques principales

Les caractéristiques principales du capteur ATI Omega 190 sont données dans le tableau 5.17. Ce capteur possède une plage de mesure beaucoup plus étendue que celle de l'ATI Mini-85 (Tableau 5.10). La sensibilité sur les axes F_x et F_y est environ 5 fois inférieure et sur F_z 7 fois inférieure à celle de l'ATI Mini-85. Les efforts maximaux admissibles sont environ égaux à 5 fois la plage de mesures. Les performances du capteur ATI Omega-190 en terme de fréquence d'acquisition sont considérées identiques à celles trouvées pour le capteur ATI Mini-85 dans la partie 5.2.2 car la Netbox, élément conditionnant et envoyant le signal, est identique pour les deux capteurs, seul le transducteur est différent.

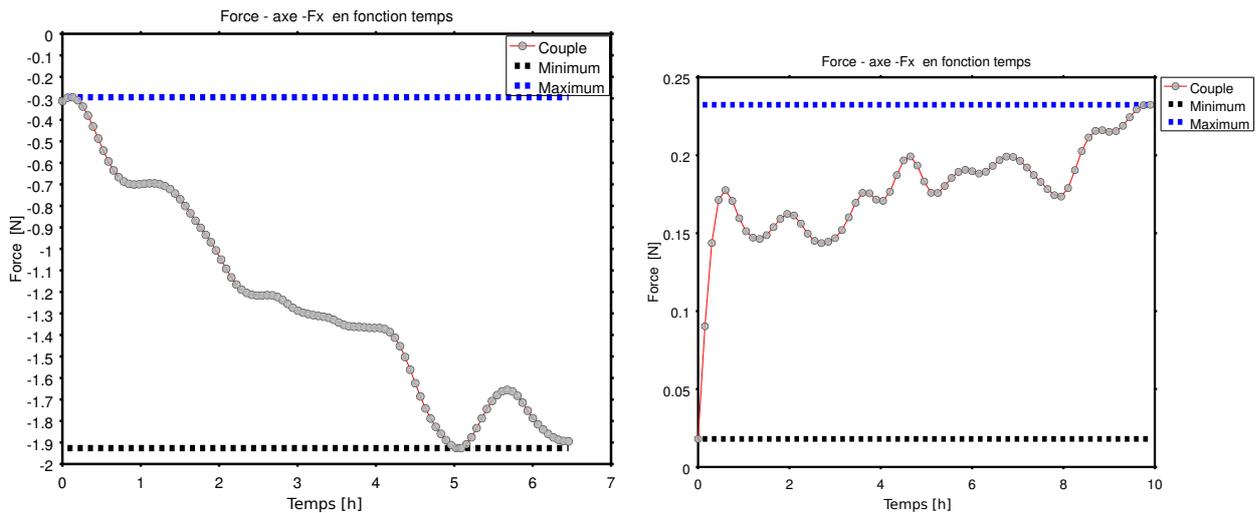
5.3.2.2 Étude de la dérive de la mesure

Nous avons observé que pour un effort appliqué constant les valeurs mesurées évoluent avec le temps. Nous pouvons contrer ce phénomène en effectuant une remise à zéro (bias) lorsqu'aucun effort n'est appliqué sur le capteur. Nous proposons de quantifier l'amplitude de cette dérive, pour cela nous considérons deux cas d'utilisation différents. Dans un premier temps, nous avons fixé horizontalement un capteur ATI Omega-190 seul (démonté du robot) et avons mesuré les efforts pendant plusieurs heures (Figure 5.29a), celui-ci étant non alimenté depuis plus d'un jour. Ensuite nous avons effectué la même opération après que le capteur est été alimenté pendant

Caractéristique	Axe	Valeur	Unité
Plage de mesures	Fx et Fy	7200	N
	Fz	18000	N
	Tx et Ty	1400	N.m
	Tz	1400	N.m
Sensibilité	Fx et Fy	1,5	N
	Fz	3	N
	Tx et Ty	5/24	N.m
	Tz	5/36	N.m

Tableau 5.17 – Caractéristiques principales du capteur ATI Omega 190

1 journée (Figure 5.29b). Nous répertorions dans le tableau 5.18 l'écart entre le minimum et le maximum des efforts mesurés sur chaque relevé (chaud et froid) pour tous les axes de mesure du capteur (Fx, Fy, Fz, Tx, Ty, Tz).



(a) Dérive à froid du capteur ATI Omega 190 (axe Fx) (b) Dérive à chaud du capteur ATI Omega 190 (axe Fx)

Figure 5.29 – Comparaison de la dérive à froid / à chaud du capteur ATI Omega 190

Axe du capteur	Écart min-max à froid (N)	Écart min-max à chaud (N)	Rapport à froid/à chaud
Fx	1,63	0,21	7,76
Fy	5,34	0,53	10,1
Fz	7,78	0,71	10,9
Tx	1,06	0,06	17,7
Ty	0,38	0,07	5,4
Tz	0,07	0,03	2,3

Tableau 5.18 – Dérive du capteur ATI Omega 190 à froid et à chaud

Conclusion Nous remarquons que la dérive du capteur à chaud est beaucoup plus faible qu'à froid (tableau 5.18) d'un rapport moyen de 9. Nous proposons donc de laisser le capteur sous tension en permanence lorsque le robot Orion sera utilisé en situation clinique en co-manipulation afin de diminuer la dérive.

5.3.2.3 Étude du bruit de mesure

Nous souhaitons maintenant quantifier le bruit de mesure du capteur ATI Omega-190 qui influencera le ressenti de l'opérateur. En effet, lorsque l'opérateur appliquera un effort sur la table médicale, celui-ci sera mesuré par le capteur ATI Omega-190 mais cette mesure peut être entachée de bruit, la valeur mesurée oscillera autour d'une valeur moyenne. La commande en co-manipulation calcule une vitesse de consigne qui dépend de ces oscillations ce qui nuit au ressenti de l'opérateur en produisant une vitesse de l'effecteur du robot qui ne correspond pas à sa force générée. Nous comparons le bruit de mesure à la valeur moyenne des efforts appliqués par un opérateur afin de savoir si ces oscillations sont significatives par rapport aux efforts appliqués par l'opérateur.

Nous avons procédé à un enregistrement des valeurs mesurées par le capteur pendant plusieurs heures sur un capteur n'ayant pas été utilisé pendant plus d'une journée. Nous observons l'amplitude min-max des valeurs (l'enveloppe des valeurs mesurées Figure 5.30). Le bruit de mesure est constant suivant le temps d'utilisation car l'amplitude min-max du bruit de mesure reste constante. La valeur de l'amplitude du bruit de mesure est d'environ **0,30 N** (Figure 5.30) ce qui est négligeable par rapport aux efforts moyens de 35 N appliqués par un opérateur pendant une co-manipulation (Figure 5.23a).

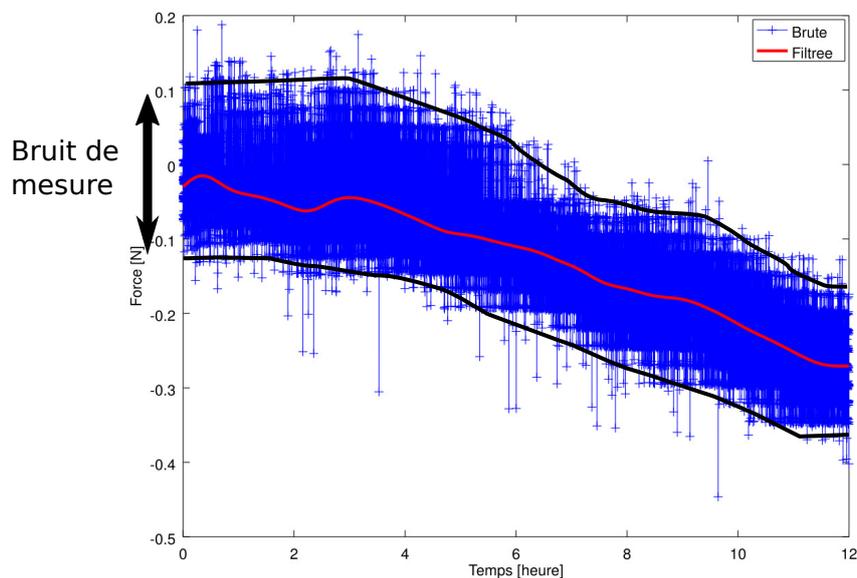


Figure 5.30 – Relevé du bruit de mesure du capteur ATI Omega-190 sur plusieurs heures.

Conclusion Nous ne considérons pas l'amplitude du bruit de mesure comme étant significative par rapport aux efforts moyens appliqués par un opérateur. De plus, les valeurs mesurées sont

filtrées par un filtre moyenneur sur 10 échantillons (partie 5.2.2 et Figure 5.15) ce qui diminue l'amplitude du bruit de mesure.

5.4 Comparaison des solutions de co-manipulations

La commande en co-manipulation présentée dans les parties précédentes doit être utilisée par les manipulateurs radio pour la phase de pré-positionnement et la phase d'extraction d'urgence. L'ensemble, commande en admittance associée à l'outil haptique choisi, doit permettre une utilisation intuitive, transparente, rapide, juste et confortable comme nous l'avons défini dans le cahier des charges de l'application (partie Cahier des charges de l'application médicale, voir chapitre 1). Nous comparons les différentes méthodes de co-manipulation présentées dans la partie 5.1.1 afin de choisir la mieux adaptée aux différentes phases de la protonthérapie. La mesure de transparence et la mesure de justesse de pose dynamique ont été mises en place avec seulement un opérateur novice et un opérateur expérimenté. Nous définissons par la suite les différents termes que nous allons étudier dans les expériences réalisées.

Quelques définitions

1. Transparence : Faculté qu'à un robot comanipulé à ne pas perturber le geste généré par l'opérateur. En d'autres termes, un robot comanipulé est considéré totalement transparent si le robot n'interfère pas avec le geste de l'opérateur.
2. Justesse : Lors de plusieurs essais de pointage Cartésien il s'agit de la distance entre le barycentre des positions réellement atteintes et la position à atteindre (norme ISO 9283).
3. Intuitivité : Facilité pour une personne novice à utiliser le robot commandé en co-manipulation. Cela est lié à la courbe d'apprentissage de la personne novice.
4. Rapidité : Temps mis pour le pré-positionnement et pour extraire un patient du Gantry.
5. Confort : Intensité des vibrations ressenties par le praticien et par le patient selon la norme ISO 1549.

5.4.1 Mesure de la transparence

Nous voulons quantifier la faculté qu'a le robot comanipulé à ne pas perturber le geste généré par l'opérateur. Lorsque le robot est comanipulé par l'opérateur, celui-ci est défini comme le « maître » et le robot comme « l'esclave » [Neville HOGAN 1985]. C'est l'opérateur qui génère la consigne de vitesse selon une direction quelconque pour l'effecteur du robot. Cette vitesse est définie à partir de la force mesurée par le capteur d'efforts. Nous étudions quantitativement la transparence des différentes solutions haptiques de co-manipulation.

Les trois méthodes évaluées décrites dans la partie 5.1.1 sont dénommées :

- co-manipulation avec la barre en U ;
- co-manipulation avec le capteur situé sous la table ;
- et joystick 3D (Spacemouse).

Nous avons construit cette expérience en nous basant sur les travaux de [DUCHAINE 2010] qui évalue la commande en admittance d'un robot cartésien dans un plan horizontal, sur ceux de [FICUCIELLO, VILLANI et B. SICILIANO 2015] portant sur la mesure de transparence d'un robot sériel compliant (Kuka LBR) ainsi que sur ceux de [POQUET 2014] qui évalue la même commande sur un robot sériel Haption portant une sonde échographique en bout d'effecteur. Nous expliquons dans la suite de ce document les avantages et inconvénients des méthodes citées, ainsi que la méthode que nous proposons, basée sur ces travaux mais adaptée au robot Orion. Afin d'évaluer d'évaluer la courbe d'apprentissage d'un tel système dans les conditions réelles d'utilisation, les utilisateurs sont des opérateurs novices et expérimentés.

5.4.1.1 Étude du protocole proposé par [Duchaine 2010]

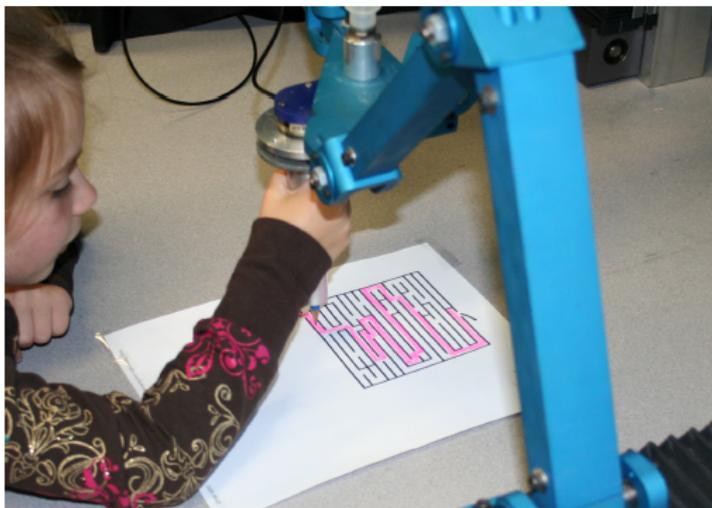


Figure 5.31 – Test de transparence avec le robot Tripteron imaginé par [DUCHAINE 2010]

[DUCHAINE 2010] a utilisé une méthode visuelle pour évaluer au sens de la transparence un robot cartésien plan comanipulé. Le robot tripteron utilisé (Figure 5.31) possède à l'effecteur un capteur d'efforts et un stylo tenu verticalement. L'opérateur peut déplacer le stylo (i.e le robot) grâce au capteur d'efforts et à la commande en admittance associée. L'objectif pour l'opérateur est de suivre un labyrinthe de la même façon qu'il le ferait avec un simple stylo, mais en utilisant le stylo relié au robot comanipulé par la commande en admittance. L'auteur mesure le nombre de dépassements hors des murs du labyrinthe ; plus il est élevé moins le robot est considéré comme transparent. Dans le cadre du protocole l'opérateur se doit d'aller le plus rapidement possible de l'entrée vers la sortie du labyrinthe. Le critère utilisé pour mesurer la performance est le temps total mis pour atteindre la sortie du labyrinthe en pondérant ce temps avec des pénalités pour chaque dépassement hors des murs de celui-ci. Ce protocole est simple et fonctionnel ; cependant l'expérience n'est pas automatisée car elle requiert une analyse à l'œil nu du tracé effectué pour connaître le nombre de dépassements. De plus, la largeur du chemin du labyrinthe est définie arbitrairement. Cela génère une métrique qui évolue en tout ou rien mais qui n'est pas une métrique qui évalue un écart par rapport à un chemin de référence. Ce protocole manque dans

le cadre de notre approche de pertinence quand à la mesure de la précision et rend difficile la comparaison des différentes solutions haptiques proposées.

$$t_N = t + \frac{N_0}{2}, \quad (5.12)$$

t_N représente le temps pondéré, t est le temps total pour parcourir le labyrinthe et N_0 est le nombre de dépassement.

5.4.1.2 Étude du protocole proposé par [Poquet 2014]

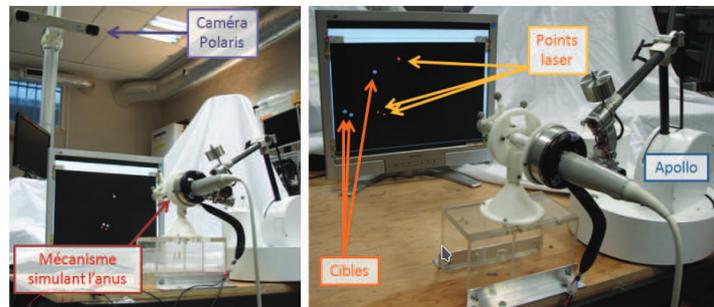


Figure 5.32 – Plateforme de test de transparence avec un robot Haption adapté, imaginé par [POQUET 2014]

Dans l'expérience de [POQUET 2014], le robot Virtuose6D (Figure 5.32) de la société Haption est utilisé en co-manipulation avec une sonde échographique fixée à l'effecteur. Celui-ci est équipé d'un pointeur laser dans le prolongement de la sonde. Un écran situé devant le robot affiche des points représentant des cibles que l'opérateur doit pointer (atteindre) à l'aide du robot comanipulé. Les cibles à pointer par l'opérateur à l'aide du robot équipé du laser apparaissent au fur et à mesure par un logiciel développé pour l'expérience. L'auteure étudie les trajectoires de l'effecteur du robot et en déduit un critère représentant la *douceur* (smoothness) des mouvements réalisés. Plus les mouvements sont *doux*, plus le robot est considéré comme transparent. L'intérêt de cette approche est qu'elle prend en compte le geste en lui-même [BALASUBRAMANIAN, MELENDEZ-CALDERON et E. BURDET 2012]; plus le geste effectué pour atteindre la position désirée est doux et souple plus la commande est considérée transparente. Dans notre cas, les opérateurs utilisant le robot souhaitent un comportement du même type. Cependant nous souhaitons adapter cette expérience afin qu'elle rende compte d'un mouvement typique de la phase de pré-positionnement puis de la phase d'extraction du patient plutôt qu'une tâche de pointage de cible.

5.4.1.3 Étude du protocole proposé par [Ficuciello, Villani et B. Siciliano 2015]

Le principe utilisé par [FICUCIELLO, VILLANI et B. SICILIANO 2015] est similaire à l'expérience de [DUCHAINE 2010] mais en utilisant un robot différent. Les sujets manipulant le robot doivent

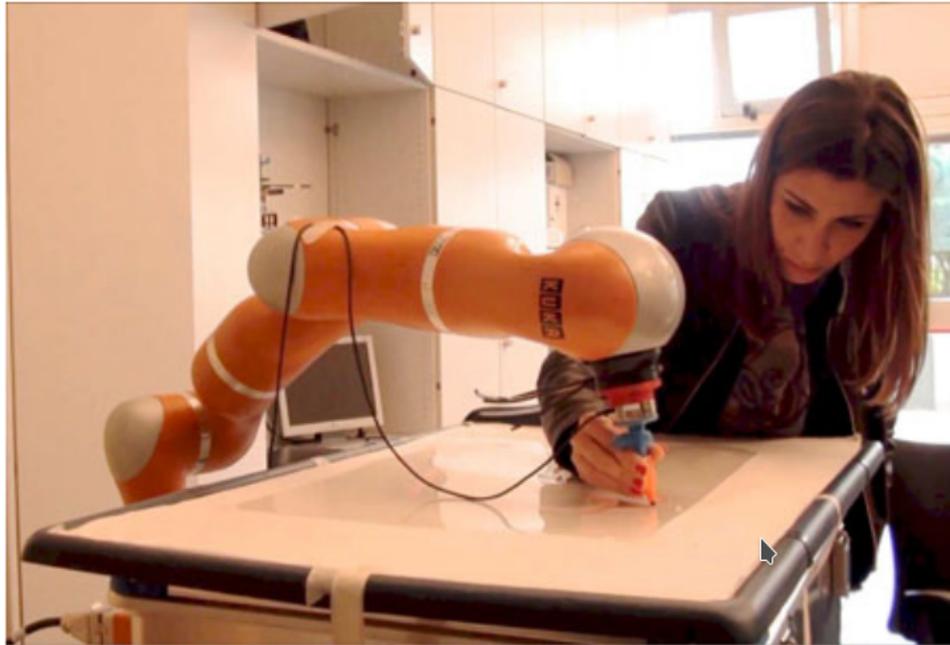


Figure 5.33 – Test de transparence avec le robot Kuka LWR imaginé par [FICUCIELLO, VILLANI et B. SICILIANO 2015]

suivre un tracé sur un plan horizontal. Les deux critères utilisés sont : le temps mis pour arriver jusqu'à la fin du tracé et la différence entre la longueur du tracé à suivre et la longueur du tracé réalisé. Dans notre démarche, le fait de comparer la longueur du tracé réalisé et celle du tracé à suivre ne nous semble pas judicieux. En effet il existe une infinité de tracés ayant la même longueur, donc amenant à un critère optimal, mais ne suivant pas du tout le tracé de référence. Cela ne rend donc pas compte de la capacité pour un opérateur médical à suivre un chemin de référence en co-manipulation et donc de la transparence de la solution haptique.

5.4.1.4 Protocole de mesure de la transparence du robot Orion comanipulé

Nous souhaitons quantifier l'apport des 3 solutions de co-manipulation proposées pour comparer entre-elles les 3 solutions haptiques afin de choisir la plus adaptée dans l'application de pré-positionnement et d'extraction d'urgence. De plus, nous comparons ces trois solutions avec le système actuel utilisant le TeachPendant présenté Figure 1.8. Enfin, nous évaluons l'influence des paramètres de la commande en admittance (M et C Figure 4.2) afin d'obtenir ceux permettant la co-manipulation la plus transparente pour le praticien. Notre démarche est d'évaluer les trois solutions haptiques lorsque l'effecteur effectue une translation dans un plan horizontal. Cela représente le mouvement typique du pré-positionnement. Sur la base des protocoles précédemment détaillés, nous avons développé une démarche expérimentale permettant de quantifier la transparence de la co-manipulation dans un plan horizontal avec le robot Orion. Nous avons réalisé deux expériences différentes permettant d'évaluer la transparence du robot comanipulé. Notre première expérience [BAUMEYER, BESNARD et al. 2016] repose sur le principe du suivi de chemin en utilisant un tracé en ligne droite diagonale.

Nous avons utilisé pour cette première expérience :

- Un robot Orion commandé en admittance avec les 3 solutions haptiques développées
- Un tracker de position Polaris² permettant de mesurer la position Cartésienne de l'effecteur, donc par calcul la position actuelle dans le tracé de référence
- Un pointeur Laser matérialisant par un point la position courante dans le tracé de référence
- Une calque de tracé avec une ligne diagonale représentant le chemin à suivre

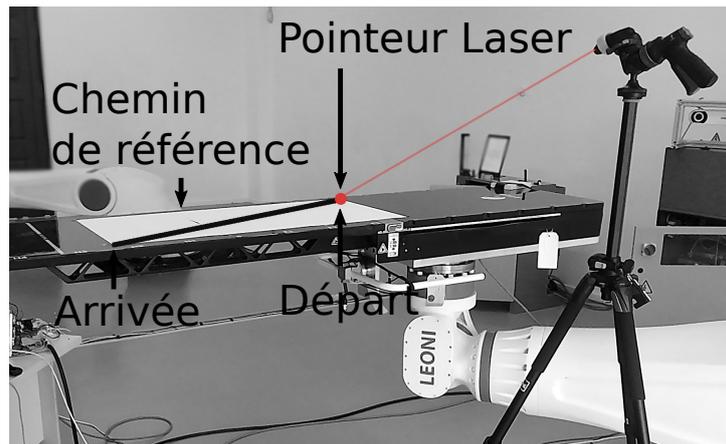


Figure 5.34 – Plateforme expérimentale de mesure de transparence avec le robot Orion comanipulé

Nous nous basons sur l'expérience de [DUCHAINE 2010] et FICUCIELLO, VILLANI et B. SICILIANO 2015] en réalisant un labyrinthe dont les dimensions sont en rapport avec le robot Orion. Sur la base des travaux [DUCHAINE 2010 et FICUCIELLO, VILLANI et B. SICILIANO 2015], nous définissons un chemin de référence sur la table médicale. Ce chemin de référence est déplacé par rapport à un point fixe de l'environnement matérialisé par un pointeur Laser (Figure 5.34). Ce chemin de référence sera uniquement un chemin dénué de murs [FICUCIELLO, VILLANI et B. SICILIANO 2015]. Les opérateurs ont pour objectif de partir d'une extrémité du tracé diagonal et d'utiliser le robot comanipulé pour aller jusqu'à l'autre extrémité en suivant la ligne diagonale au plus près (Figure 5.34) et le plus rapidement possible. Nous mesurons à chaque instant l'écart entre la position réelle et le chemin de référence.

Basé sur les expériences de [POQUET 2014 et DUCHAINE 2010], nous mesurerons :

- le temps mis pour parcourir le chemin de référence ;
- et la douceur du mouvement (à l'aide du critère de longueur d'arc spectral de [BALASUBRAMANIAN, MELENDEZ-CALDERON et E. BURDET 2012] utilisé dans [POQUET 2014]) ;

La Longueur d'Arc Spectrale (LAS) correspond à l'opposée de la longueur de la courbe de spectre de Fourier défini entre 0 Hz et 20 Hz. La valeur de sortie est donc négative et comprise entre 0 et $-\infty$. Plus la LAS est grande plus le mouvement étudié comporte de fortes variations de vitesse. Dans notre cas d'utilisation, plus le mouvement effectué sera limpide et exempté de brusques variations de vitesse plus la LAS sera faible.

2. <http://www.ndigital.com/medical/products/polaris-family/> site web du fabricant NDI (2016)

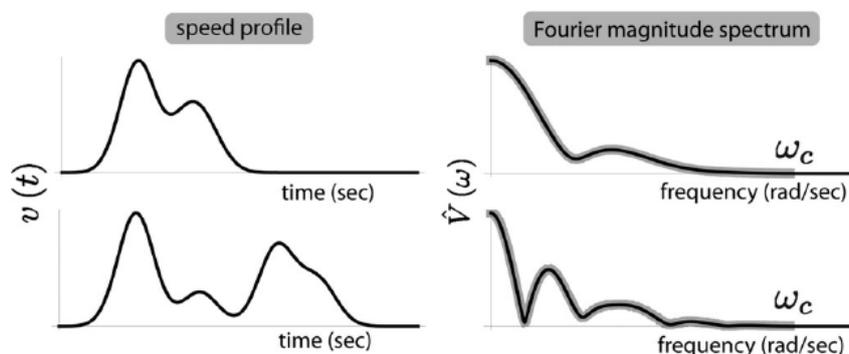
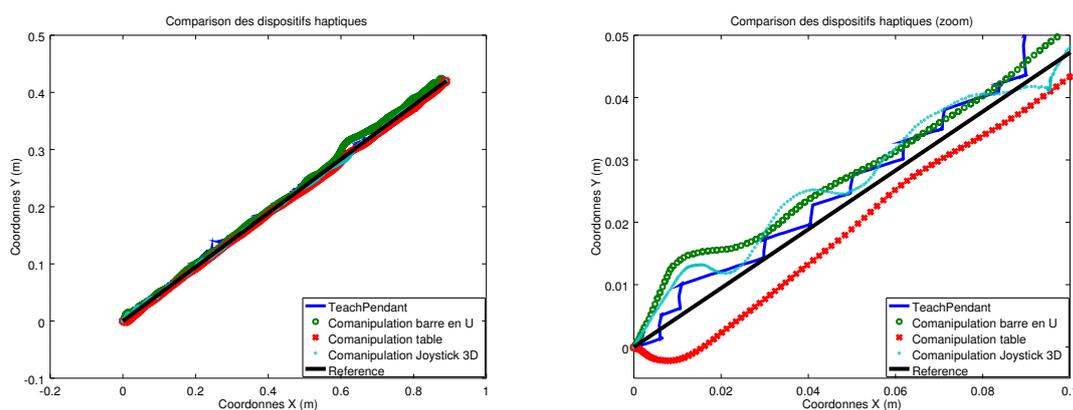


Figure 5.35 – Illustration du calcul du critère de la LAS sur le spectre de Fourier obtenu entre 0 et 20 Hz, la LAS correspond à l’opposée de la longueur de la ligne noire dans la partie droite de la Figure [BALASUBRAMANIAN, MELENDEZ-CALDERON et E. BURDET 2012]

Seul un opérateur expérimenté et un opérateur novice ont participé à cette évaluation de la transparence. Pour le sujet expérimenté, le résultat est donné Figure 5.36a. Le temps d’exécution et la (*LAS*) sont donnés pour chaque méthode dans le tableau 5.19. Nous constatons, dans le tableau 5.19, l’apport des solutions développées sur le temps total d’exécution qui a été divisé par deux avec les méthodes de co-manipulation *table* et *barre haptique*. De plus, la valeur de l’indice LAS obtenu pour la méthode *TeachPendant* utilisée actuellement est nettement plus faible que celui des autres approches haptiques proposées. Cela indique que les solutions proposées ont un comportement beaucoup plus souple et doux pour ce type de trajectoire, ce qui apporte un confort d’utilisation pour l’opérateur et de ressenti pour le patient.



(a) Comparaison des chemins obtenus avec les différentes solutions haptiques de co-manipulation ainsi que la méthode utilisée actuellement (teachPendant). (b) Zoom sur le début des chemins obtenus avec les différentes solutions haptiques.

Figure 5.36 – Comparaison des chemins obtenus avec les différentes solutions haptiques de co-manipulation ainsi que la méthode utilisée actuellement (teachPendant).

	Temps total (s)	LAS
Teach	111	-30,197
U-Bar	53	-1,8261
Table	51	-1,8793
Joystick	69	-2,7903

Tableau 5.19 – Temps total et *LAS* pour chaque méthode de co-manipulation

5.4.2 Mesure de la justesse

Nous considérons la justesse dynamique (pendant un mouvement) que nous définissons ci-après :

- Justesse dynamique : faculté du robot comanipulé à suivre un chemin déterminé à l’avance. Nous nous intéressons à l’écart entre le parcours réalisé et celui de référence.

Une caractéristique importante de notre commande en co-manipulation est le suivi d’un chemin de référence. En d’autres termes, la faculté du robot comanipulé à suivre un chemin défini à l’avance. Nous évaluons cette caractéristique en nous basant sur les travaux de [FICUCIELLO, VILLANI et B. SICILIANO 2015] que nous adaptons. Pour cela, nous utilisons le critère *Dynamic Time Warping* défini dans [KEOGH et RATANAMAHATANA 2004] et utilisé à cette fin dans [TURNWALD, EGER et WOLLHERR 2015] afin d’obtenir un critère relatif à l’écart entre le chemin de la trajectoire réalisée en co-manipulation et le chemin à suivre. Le DTW correspond à une distance moyenne entre deux ensembles de données qui ne sont pas forcément synchronisées sur la même base de temps (Figure 5.37). Dans notre cas, plus le DTW sera proche de zéro plus le tracé obtenu sera proche du tracé de référence.

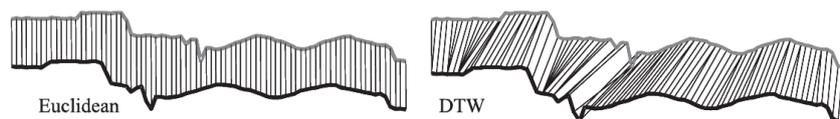


Figure 5.37 – Représentation de l’indice DTW comparé à une distance Euclidienne. Le DTW essaie de comparer les échantillons pour des ensembles de données non synchronisés.

Le principe est identique à la mesure de transparence de la partie 5.4.1 dans laquelle, l’opérateur doit suivre au plus près un chemin rectiligne horizontal en déplaçant le chemin par l’intermédiaire du robot comanipulé. Nous mesurons la position courante matérialisée par le Laser fixe dans la salle avec le tracker stéréoscopique.

Nous remarquons que le critère DTW est nettement en faveur de la méthode TeachPendant au détriment des autres solutions testées (Figure 5.36b et Tableau 5.20) contrairement à ce que nous pouvions espérer. Cela peut s’expliquer par le fait que les paramètres des méthodes de co-manipulation ne sont pas encore suffisamment réglés et qu’un filtrage des mesures de force

	DTW
Teach	4.59
U-Bar	11.52
Table	7.89
Joystick	8.56

Tableau 5.20 – Indices *DTW* pour chaque méthode de co-manipulation

(nécessaire pour le moment) entraîne un retard qui produit une sensation de lourdeur pour le praticien rendant difficile le suivi précis d'un chemin.

Nous avons ensuite comparé les résultats entre un opérateur expérimenté et un opérateur novice pour la méthode de co-manipulation table (Figure 5.38) afin de mesurer l'intuitivité de cette solution. Une similitude sur le tracé obtenu aurait montré une méthode intuitive car un opérateur novice arriverait tout aussi bien à utiliser la solution qu'un opérateur expérimenté. Cependant, nous observons que la co-manipulation table nécessite un certain entraînement. Cela peut s'expliquer encore une fois par un réglage non optimisé des paramètres M et C de la commande en admittance, et par le filtrage passe-bas de la mesure de force.

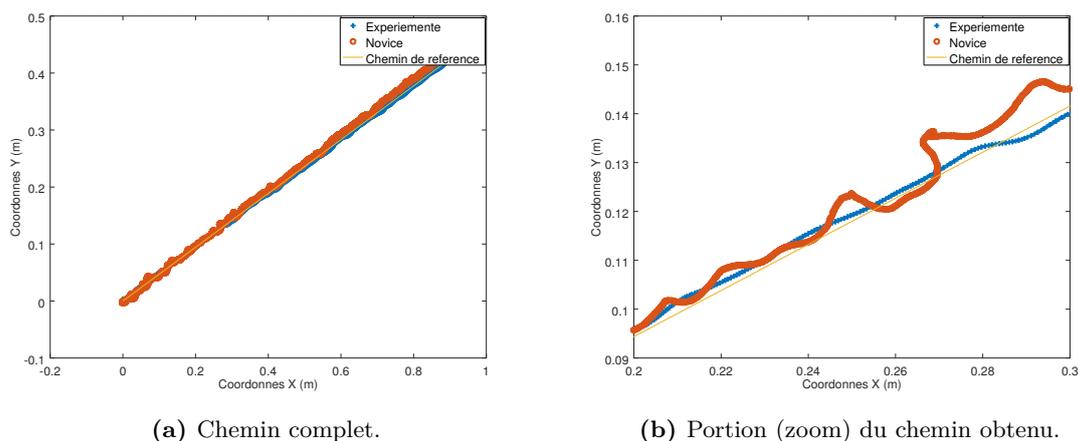


Figure 5.38 – Comparaison de la co-manipulation table avec un opérateur expérimenté et un opérateur novice.

5.5 Conclusion

Une étude effectuée auprès de différents groupes d'opérateurs, un spécialiste et un non spécialiste nous a amené à isoler 3 solutions haptiques tirant parti de la commande en admittance, cela pour un robot à forte masse. Ces 3 solutions se différencient de la méthode actuelle (Teach-Pendant) par le fait qu'elles permettent un déplacement progressif et continu ; contrairement à la méthode avec le TeachPendant dont le déplacement produit est un mode en tout ou rien itératif. Ces trois solutions permettent d'éviter ce type de déplacement ; cela permet également de diminuer les variations brutales de la vitesse pendant le déplacement et donc d'améliorer le confort pour le patient et l'opérateur. Cela est mis en évidence par les valeurs de l'indice LAS lors

des deux expériences haptiques. Le produit industriel proposé à ce jour utilise le TeachPendant, la mise en place de ces méthodes représente un coût significatif et augmentent la complexité du contrôleur du robot. Par exemple, les méthodes 1 (barre en U) et 2 (capteur sous la table) nécessitent l'achat et la prise en charge d'un capteur d'efforts qui comporte une bande passante limitée et une dérive à froid non négligeable (voir partie 5.2.2). De plus, la méthode 1 nécessite un dispositif haptique qu'il convient de positionner au niveau de la table, dans une zone correspondant à la partie non irradiée ; cela limite sa taille, et son positionnement à des zones moins ergonomiques que dans le cas de la méthode 2. Bien que la commande en admittance soit plus complexe à intégrer dans le contrôleur du robot que la méthode TeachPendant, la méthode 2 est, d'après les avis des opérateurs, celle qui présente des avantages non négligeables, surtout en termes de praticité pour l'opérateur manipulant le robot. De plus, les résultats (évolution du coefficient LAS) montrent une amélioration du temps de pré-positionnement et du confort. Un réglage mieux optimisé des paramètres de cette commande permettrait d'améliorer le comportement du robot comanipulé. La comparaison des outils haptiques nous montre que les méthodes 1 (barre en U) et 2 (capteur sous la table) sont relativement similaires sur les deux expériences proposées. Cependant, ces tests ne mettent pas en jeu des cas où l'opérateur doit manipuler le robot à partir de différentes zones autour de la table. Par exemple, dans certains cas cliniques, il peut arriver que le positionnement de la tumeur soit associé à une zone située à l'extrémité de la table. Cette situation peut contraindre l'opérateur à se rapprocher physiquement au plus près de la tumeur afin de bien la pré-positionner vis à vis des repères laser. Cela est permis avec la méthode 2 contrairement à la méthode 1 qui limite ce type de déplacement de l'opérateur. La méthode 2 sera donc, dans le contexte de l'application médicale, plus pratique à manipuler pour l'opérateur ; mais elle soulève un verrou technique important : la prise en compte de la dynamique de la masse du patient lors du déplacement de la table. Le tableau 5.21 résume les avantages et inconvénients des différentes solutions haptiques étudiées ainsi que de la méthode actuelle basée sur un TeachPendant.

	Coût	Point de vue du clinicien	Complexité	Rapidité	Rendu haptique
TeachPeandant	+++	o	+++	o	o
Méthode 1	+	++	+	++	+++
Méthode 2	o	+++	o	++	+++
Méthode 3	++	+	+	+	++

Tableau 5.21 – Comparaison des différentes solutions haptiques proposées dans laquelle les « o » représentent une méthode peu satisfaisante sur le critère étudié et les « + » une méthode intéressante du point de vue du critère étudié.

Gestion de la sécurité autour du robot

« Le progrès : trop robot pour être vrai »

Jacques PRÉVERT

Synthèse :

L'application médicale, dans laquelle le robot évolue en présence du personnel paramédical ou non, de matériels mobiles et du Gantry nous impose d'ajouter une dimension sécurité de fonctionnement au robot Orion de forte masse et possédant à chaque articulation plusieurs étages de fort rapport de réduction et de technologies différentes. L'objectif est d'arrêter le robot en cas de détection de collision. Un cahier des charges de départ est établi sur la base des dernières normes en vigueur traitant de la co-manipulation robotique et des dispositifs médicaux. À partir d'une étude de la littérature, nous construisons un modèle prédictif des frottements axiaux et construisons un modèle de couple articulaire théorique. La comparaison de ce modèle et de la mesure du couple en temps-réel nous renseigne sur la présence d'une collision ; le robot est alors arrêté par sécurité. Enfin, nous validons expérimentalement cette méthode de détection de collisions et proposons une seconde solution améliorant dans certains cas le seuil de détection.

Sommaire

6.1	Analyse des risques dans l'espace de travail du robot	117
6.2	Étude des normes en vigueur	118
6.3	Cahier des charges	122
6.4	Étude des frottements dans l'espace articulaire	122
6.4.1	État de l'art des modèles de frottements couramment utilisés en robotique	125

6.4.1.1	Modèle de Coulomb	125
6.4.1.2	Frottement statique - Stiction	126
6.4.1.3	Frottements visqueux	127
6.4.1.4	Effet Stribeck	128
6.4.1.5	Hystérésis / Mémoire frictionnelle	130
6.4.1.6	Modèle de frottements dépendant de la position angulaire . . .	131
6.4.1.7	Modèle de température	131
6.4.1.8	Autres modèles non utilisés	132
6.4.1.9	Implémentations des modèles de frottements	132
6.4.2	Quantification et proposition du modèle de frottements pour le robot Orion	133
6.4.2.1	Protocole de test	133
6.4.2.2	Bruit de mesure	134
6.4.2.3	Variation du couple en fonction de la position angulaire	134
6.4.2.4	Frottements secs/visqueux	136
6.4.2.5	Température	136
6.4.2.6	Récapitulatif des frottements affectant le robot Orion et conclusion	138
6.4.3	Méthodes d'identification	139
6.4.3.1	Identification des frottements secs et visqueux	139
6.4.3.2	Conclusion	142
6.4.3.3	Effets de la température	143
6.4.3.4	Variation fréquentielle du couple en fonction de la position . .	145
6.4.3.5	1 ^{re} approximation des harmoniques principales	147
6.4.3.6	Affinement des harmoniques	148
6.4.3.7	Identification des amplitudes et des déphasages	148
6.4.4	Étude de la variation des paramètres A , f et ϕ en fonction de la vitesse angulaire	150
6.4.4.1	Fréquences	150
6.4.4.2	Amplitude et déphasage	150
6.4.5	Généralisation et unicité du modèle	151
6.4.5.1	Identification d'un ensemble de fréquences communes	151
6.4.5.2	Identification des splines de variation de l'amplitude et de la phase	152
6.4.5.3	Résultats obtenus en pratique	154
6.4.5.4	Modèle complet	154
6.4.5.5	Automatisation de l'identification	154
6.5	Quantification de la précision de détection	155
6.6	Détection de collisions en utilisant un capteur d'efforts	158
6.7	Dispositif de sécurité simplifié basé sur des murs virtuels	160
6.8	Conclusion	161

6.1 Analyse des risques dans l'espace de travail du robot

Dans l'application de protonthérapie, le robot Orion est piloté par la commande en admittance (partie 4.1) pour le pré-positionnement de la table et du patient ainsi que pour son extraction du Gantry en cas d'urgence. Le robot sera aussi piloté par une gestion de trajectoires automatiques permettant le positionnement de la tumeur aux différentes incidences lors du traitement (positionnement final pour la délivrance de la dose). Le pilotage du robot s'effectue selon deux modes :

- le mode comanipulé par l'opérateur ;
- et le mode automatique par gestion de trajectoires pour l'irradiation de la tumeur, non étudié dans cette thèse.

Pendant l'utilisation des deux modes, il est primordial de garantir la sécurité de l'opérateur et des personnels présent dans l'espace de travail du robot. Comme expliqué dans [Alexandre CAMPEAU-LECOURS 2012] plusieurs stratégies sont envisageables et peuvent être classées dans deux grandes catégories différentes, à savoir :

- l'évitement de collisions ; le robot contourne ou s'écarte d'un danger pouvant amener à une collision avant le contact ;
- et la détection de collisions qui stoppe le robot lorsque celui-ci entre en contact non désiré avec l'opérateur ou un objet.

Le robot Orion est aujourd'hui pourvu d'une nappe Laser qui permet de travailler sur une stratégie d'évitement de collisions grâce à un module de sécurité arrêtant le robot si un obstacle ou l'opérateur entrent dans une zone partiellement circulaire définie par rapport à la base du robot. Cela garantit que l'opérateur ne soit pas « cisailé » entre le premier et le deuxième segment en partant de la base. Une seconde solution basée sur des caméras 3D et un modèle physique de l'environnement est en cours de développement par LEONI CIA Cable Systems. Dans le cadre de cette thèse nous avons choisi de développer un mécanisme de sécurité bas-niveau de détection de collisions qui arrêtera le robot lorsque celui-ci exercera des efforts trop importants sur un objet de la salle de traitement ou sur l'opérateur.

Plusieurs méthodes dédiées aux robots sériels existent. Étant donné la présence de capteurs de courant donnant une image du couple dans les moteurs utilisés dans le robot Orion, nous considérons la détection de collisions par comparaison d'un modèle théorique de couple et du couple réel mesuré. La différence, appelée résidu, est significative d'une collision. Cette méthode par prédiction nécessite de connaître le couple théorique que doit fournir à chaque instant chaque moteur du robot pour vaincre l'inertie, les frottements secs/visqueux, etc. En réalité, le couple théorique dépend de nombreux paramètres : vitesse angulaire, inertie, position angulaire, température, types de réducteurs utilisés dans la chaîne de transmission, etc. Notre modèle théorique du couple doit prendre en compte tous ces paramètres afin de modéliser et prédire fidèlement le couple à fournir par chaque moteur. Cela conditionnera la performance (le seuil) de la détection des collisions.

Le robot Orion étant classé dans la catégorie des dispositifs médicaux, une analyse de risque conforme à la norme ISO 14971 a été menée par le service qualité de l'entreprise LEONI CIA

Cable Systems afin d'identifier les risques potentiels et les dangers liés à l'utilisation de ce robot. À partir de ce travail, nous avons extrait les risques liés à des collisions entre le robot et son environnement, ou le robot et un humain. Cette analyse de risque ne fait pas de distinction entre une collision robot/opérateur, robot/patient ou robot/environnement. De plus, il est considéré qu'une collision peut se produire sur toutes les parties du corps de l'opérateur ou du patient. L'analyse de risques prévoit trois dispositifs pour prévenir le risque d'une collision entre le robot et l'environnement ou une personne (patient ou opérateur) lors d'un mouvement de celui-ci.

- Capteur laser horizontal au niveau du sol pour arrêter le robot dès qu'un élément entre dans la zone couverte par le capteur Laser. Ce dispositif ne pourra pas être utilisé pendant une co-manipulation car soit l'opérateur se trouve systématiquement dans la zone du Laser soit la zone couverte par le Laser est très réduite et ne prévient pas d'une collision.
- Capteur d'efforts situé entre l'effecteur et la table qui détecte les efforts trop importants appliqués par le robot sur l'environnement au niveau de la table médicale. Ce dispositif ne peut détecter un cisaillement de l'opérateur lorsque celui-ci est situé entre les deux premiers segments du robot car aucun effort ne sera appliqué par la table.
- Mesure du courant absorbé par les moteurs donnant une image du couple fourni par le moteur. Si le couple fourni est trop important, cette information sera significative d'une collision.

Dans la suite de ce chapitre nous développons la dernière solution, les deux autres sont traitées par le reste de l'équipe LEONI CIA Cable Systems.

6.2 Étude des normes en vigueur

La norme principale régissant les aspects sécurité du robot Orion est la norme [ISO 60601-1 :2006] portant sur les dispositifs médicaux. Cette norme très vaste (appareil médicaux) n'est pas entièrement adaptée au robot Orion car ce type d'appareil est très récent par rapport à la date de mise en place de la norme (2006). Par exemple, elle ne couvre pas l'utilisation d'un robot comanipulé. Un paragraphe [ISO 60601-1 :2006 partie 8.10.4] définit néanmoins les limites maximales de tension de tout appareil médical tenu à la main (ce qui entre dans le cadre de la poignée de co-manipulation) et la partie 9.6.3 de la norme [ISO 60601-1 :2006] définit les vibrations acceptables transmises aux opérateurs (et au patient dans notre cas) par l'appareil médical étudié. Cependant, tous les cas d'utilisation du robot Orion ne sont pas couverts par la norme ISO 60601-1 :2006, les dispositifs de sécurité nécessaires dans le cas d'un dispositif médical avec un robot comanipulé ne sont pas traités (hormis la partie câblage électrique [ISO 60601-1 :2006 partie 8.10.4]).

Nous nous sommes intéressés aux normes du secteur industriel car la co-manipulation Homme-robot est de plus en plus présente dans ce domaine. Les normes dédiées aux robots collaboratifs traitaient jusqu'à présent uniquement les cas où l'opérateur est exclu de la zone de travail du robot (ISO 10218-1 :2011). Cependant l'accroissement du besoin de l'expertise de l'opérateur humain pour réaliser certaines tâches complexes (emboîtement, vissage, etc.) rend nécessaire la présence et la collaboration de l'opérateur au côté du robot pour assister la tâche à réaliser à

l'intérieur même de son espace de travail. Pour combler ce manque, l'Organisation Internationale de Normalisation (OIN ou ISO en anglais) propose une nouvelle norme (mars 2016) traitant le cas de la sécurité des robots dit *collaboratifs*. La norme [ISO15066 2016] porte sur la gestion de la sécurité, nécessaire lors de l'utilisation d'un robot travaillant, en présence ou avec, un opérateur. Cette norme est un ensemble de règles et guides pour la sécurité mais ne traite que le cas des robots *industriels*, mais peut être étendue à d'autres domaines (médical par exemple). Cette norme se place *au dessus* de la norme [ISO10218 2011] à laquelle elle ajoute des règles à suivre. Nous avons donc décidé de nous baser sur cette norme afin d'établir un premier cahier des charges bien que celle-ci ne soit applicable qu'aux robots industriels et non aux robots médicaux comme l'est le robot Orion. Nous allons dans un premier temps faire une synthèse des exigences de la norme [ISO15066 2016] puis nous construirons le cahier des charges qui nous semble le plus adapté à partir des besoins du personnel médical et des obligations de la norme [ISO15066 2016].

Plusieurs cas d'utilisation sont considérés par la normes :

- Le robot est arrêté si l'opérateur entre dans l'espace de travail du robot [DE LUCA et FLACCO 2012]. Ce qui ne correspond pas réellement à une co-manipulation mais plus à une *co-existence* ;
- le robot est comanipulé par un dispositif haptique [BAUMEYER 2015] (cas du robot Orion) ;
- le robot évite l'opérateur et permet de garder une distance de sécurité entre le robot (effecteur) et l'opérateur [DE LUCA et FLACCO 2012] ;
- ou alors le robot est pourvu d'une détection de collision sur toutes les articulations (comme l'est le robot Orion) [GERAVAND, FLACCO et DE LUCA 2013, BAUMEYER, BERNARD et al. 2016].

La norme [ISO15066 2016] stipule de plus :

- qu'une identification des dangers et une analyse de risque (tel décrit dans la norme ISO dédiée aux machines industrielles ISO-12100) sont indispensables et doivent définir les risques et les dommages probables dans les utilisations du robot (voir ISO 10218-2 :2011 4.3 et 4.4 pour plus de détails).
- qu'il est conseillé d'utiliser des murs virtuels (voir la partie 6.7) et des saturations de position (articulaires et Cartésiennes) afin de restreindre le mode haptique uniquement dans la zone prévue à cet effet (voir la partie 6.7 et ISO10218 2011, p. 5.8.11).
- que si une collision est détectée, un arrêt d'urgence (conforme à [ISO10218-2 2011]) doit être enclenché suivi d'une réactivation manuelle de la part de l'utilisateur.
- et qu'enfin, l'opérateur doit pouvoir arrêter le robot (arrêt d'urgence, homme-mort, etc.) quand il veut, ou alors pouvoir sortir de l'espace de travail.

Le robot peut ne pas disposer d'un système d'homme-mort si l'analyse de risque le permet, dans ce cas un mécanisme de détection de collisions (ou une structure mécanique compliant) doit être actif dès le démarrage du robot et pendant toutes les phases d'utilisation. De plus, une indication qui stipule qu'un système d'homme-mort n'est pas disponible doit être présent sur le

robot. Nous nous intéressons à présent aux deux cas qui concernent le robot Orion à savoir : le mode co-manipulation et la détection de collisions.

Concernant la détection de collisions, la norme définit les valeurs maximales des efforts et des pressions exercées par le robot sur chaque partie du corps en contact avec celui-ci (Figure 6.1).

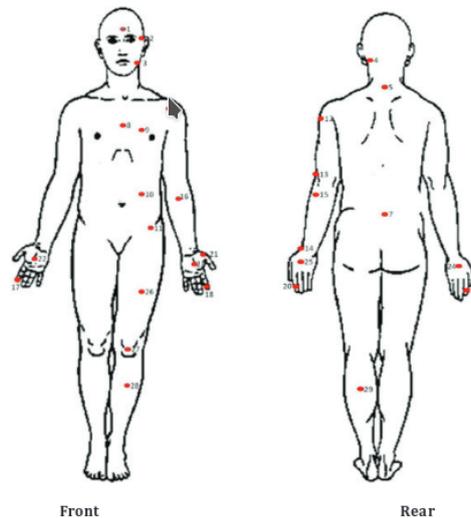


Figure A.1 — Body model

Figure 6.1 – Zones du corps considérées par la norme [ISO15066 2016], pour lesquelles des valeurs de forces et pressions maximales existent.

Cependant, pour chaque valeur (force et pression), il y a deux cas à considérer :

- le régime transitoire (entre 0 et 500 *ms* après le contact entre le robot et l’humain);
- et le régime continu (=> 500 *ms* après le contact).

La limite en régime transitoire est supérieure à la limite en régime continu pour certaines parties du corps (Figure 6.2) ou est égale pour d’autres. Pour connaître la valeur maximale de force ou de pression acceptable en régime transitoire il faut multiplier les valeurs limites du régime continu par le coefficient de régime transitoire associé à la partie du corps concernée (Figure 6.3).

Pour chaque partie du corps exposée potentiellement aux collisions (d’après l’analyse de risque), il faut prendre en compte les limites données par les Figures 6.3 et 6.4. Pour chaque partie du corps il y a *deux conditions* à respecter : la valeur maximale de force **et** la valeur maximale de pression. La pression correspond à la force exercée par le robot sur l’opérateur divisée par la surface de contact entre le robot et la partie du corps humain concernée (par exemple la tranche de la table médicale).

Nous considérons par exemple la collision entre la tranche de la table médicale, d’épaisseur 5 mm sur la surface de contact sur une longueur de 15 cm, avec le pelvis. La surface de contact est de 7,5 *cm*². D’après le tableau Figure 6.3 la valeur de pression admissible pour le pelvis est

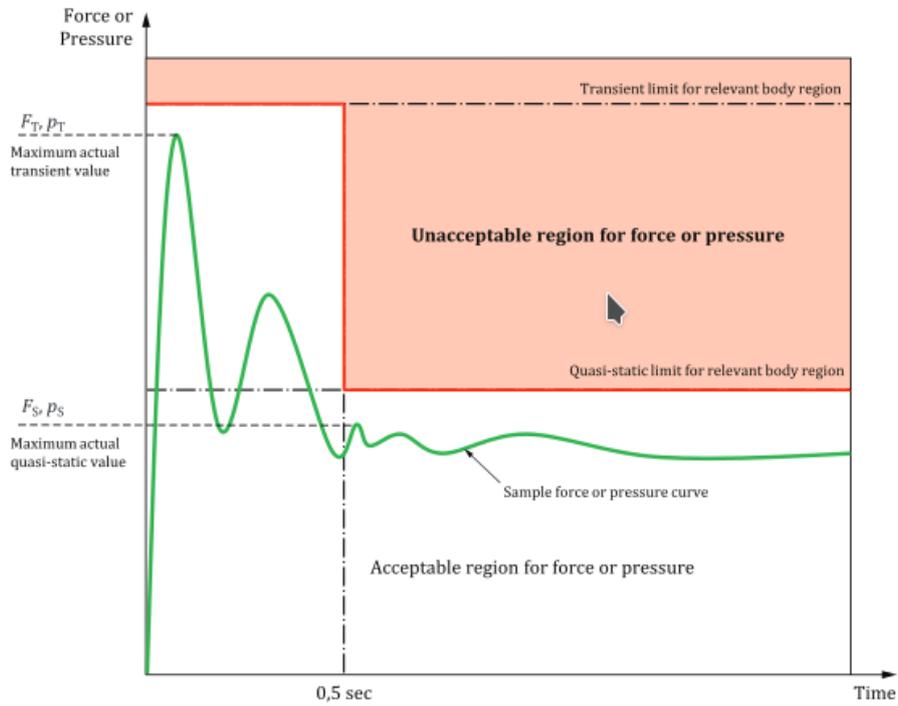


Figure 4 — Graphical representation of acceptable and unacceptable forces or pressures

Figure 6.2 – 2 types de limites utilisées pour la détection de collisions.

Table A.2 (continued)

Body region	Specific body area	Quasi-static contact		Transient contact	
		Maximum permissible pressure ^a p_s N/cm ²	Maximum permissible force ^b N	Maximum permissible pressure multiplier ^c P_T	Maximum permissible force multiplier ^c F_T
Hands and fingers	17 Forefinger pad D	300	140	2	2
	18 Forefinger pad ND	270		2	
	19 Forefinger end joint D	280		2	
	20 Forefinger end joint ND	220		2	
	21 Thenar eminence	200		2	
	22 Palm D	260		2	
	23 Palm ND	260		2	
	24 Back of the hand D	200		2	
	25 Back of the hand ND	190		2	
Thighs and knees	26 Thigh muscle	250	220	2	2
	27 Kneecap	220		2	
Lower legs	28 Middle of shin	220	130	2	2
	29 Calf muscle	210		2	

Figure 6.3 – Valeurs de force et pression maximales extrait de la norme ISO 15066 (1/2).

de 110 N/cm^2 et la force maximale admissible est 65 N. Le coefficient multiplicateur pour le régime transitoire est de 2 pour cette partie du corps (Figure 6.4). La pression maximale de 110 N/cm^2 est équivalente à une force de 825 N sur la surface de 7.5 cm^2 considérée, ce qui est bien supérieure à la force limite de 65 N. La limite à prendre en compte dans le cahier des

Table A.2 — Biomechanical limits

Body region	Specific body area		Quasi-static contact		Transient contact	
			Maximum permissible pressure ^a p_s N/cm ²	Maximum permissible force ^b N	Maximum permissible pressure multiplier ^c P_T	Maximum permissible force multiplier ^c F_T
Skull and forehead ^d	1	Middle of forehead	130	130	not applicable	not applicable
	2	Temple	110		not applicable	
Face ^d	3	Masticatory muscle	110	65	not applicable	not applicable
Neck	4	Neck muscle	140	150	2	2
	5	Seventh neck muscle	210		2	
Back and shoulders	6	Shoulder joint	160	210	2	2
	7	Fifth lumbar vertebra	210		2	2
Chest	8	Sternum	120	140	2	2
	9	Pectoral muscle	170		2	
Abdomen	10	Abdominal muscle	140	110	2	2
Pelvis	11	Pelvic bone	210	180	2	2
Upper arms and elbow joints	12	Deltoid muscle	190	150	2	2
	13	Humerus	220		2	
Lower arms and wrist joints	14	Radial bone	190	160	2	2
	15	Forearm muscle	180		2	
	16	Arm nerve	180		2	

Figure 6.4 – Valeurs de force et pression maximales extrait de la norme ISO 15066 (2/2).

charges est la plus faible des deux valeurs, à savoir 65 N. Pour le régime transitoire, la limite est multipliée par deux soit 130 N (Figures 6.5 et 6.4). Nous pouvons conclure que si l'analyse de risque met en évidence une collision possible entre la table médicale et le pelvis de l'opérateur, l'effort résultant ne devra pas dépasser 130 N pour une durée maximale de 0,5 s puis 65 N pour une durée supérieure à 0,5 s.

6.3 Cahier des charges

Nous avons vu dans l'analyse de risque de la partie 6.1 que celle-ci considère les collisions sur toutes les parties du corps; de ce fait nous décidons de considérer le cas le plus contraignant et donc de prendre pour notre cahier des charges les valeurs minimales de pression et de force données par la norme [ISO15066 2016] et détaillées dans les Figures 6.3 et 6.4 :

- Pression maximale acceptable : 110 N/cm² (*Temple*)
- Force maximale acceptable : 65 N (*Masticatory Muscle*)

La Figure 6.6 détaille les zones potentielles de collisions sur le robot Orion dans l'environnement de travail. Cela inclut les collisions robot/environnement et robot/humain.

6.4 Étude des frottements dans l'espace articulaire

Le cahier des charges de la partie précédente nous a permis de définir des valeurs maximales pour les efforts de pressions et forces exercées par le robot sur l'opérateur et les obstacles environnants.

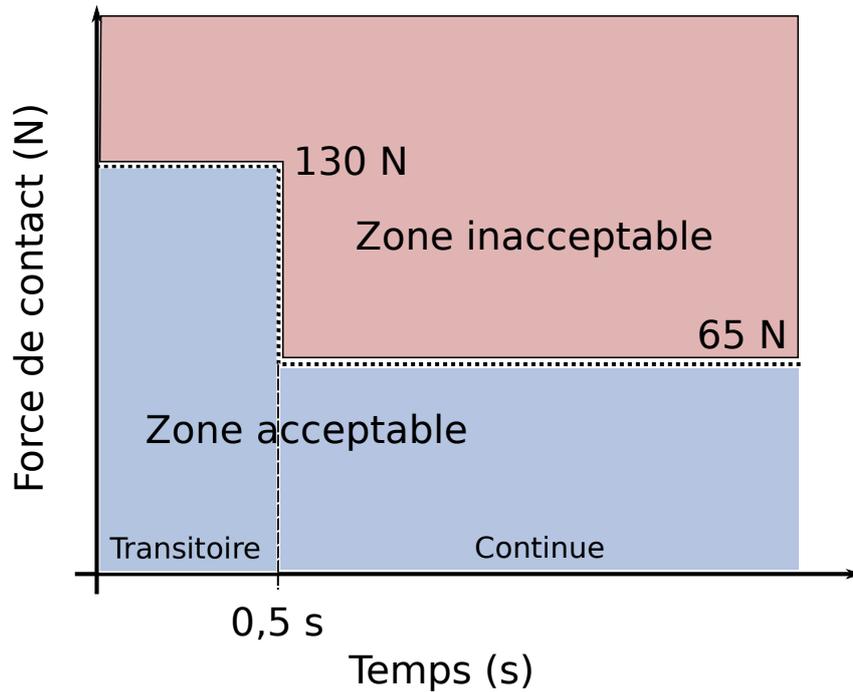


Figure 6.5 – Exemple de limite de forces de collision robot/humain au niveau du Pelvis avec une surface de contact de $7,5 \text{ cm}^2$.

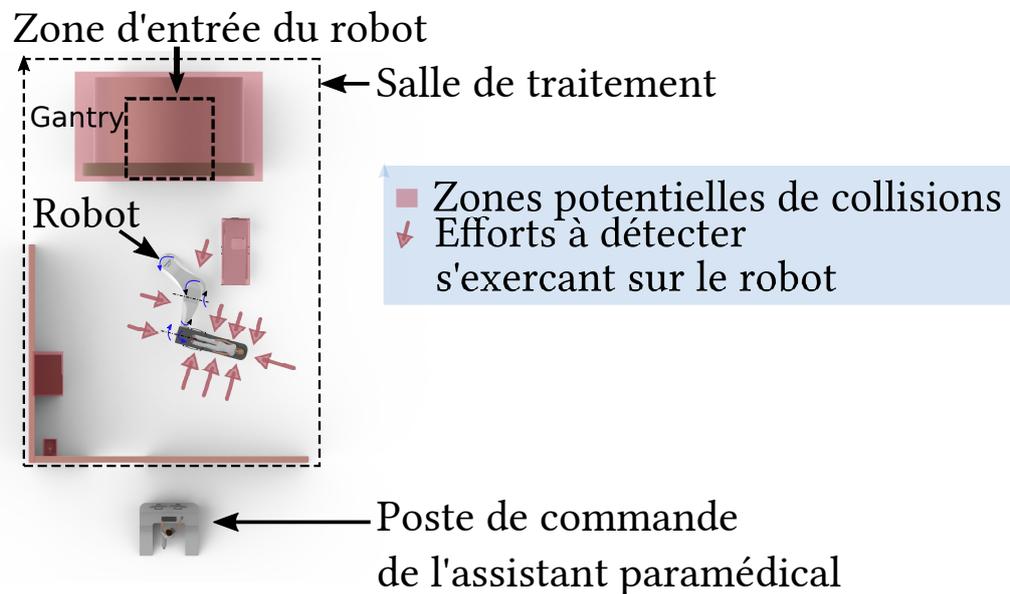


Figure 6.6 – Localisation des collisions pouvant se produire dans la salle de protonthérapie sur le robot Orion (vue de dessus).

Le but de cette partie est de développer un modèle exprimant les frottements présents dans les articulations du robot Orion qui sera utilisé pour la détection de collisions. Nous nous focalisons sur la modélisation des frottements dépendant de la position, de la vitesse et de la température. En effet, les effets inertiels induit par l'accélération et les efforts statiques ont déjà été modélisés

par LEONI CIA Cable Systems. L'objectif est d'évaluer la différence entre le couple mesuré et le couple donné par le modèle de frottements afin de conclure sur la présence ou non d'une collision. En effet, plus la différence entre le couple mesuré et le couple théorique (modèle) est élevée, plus la probabilité qu'il y ait une collision est grande. Une différence entre le modèle et le couple mesuré sera toujours présente du fait des incertitudes de modélisation (approximation du modèle, erreurs sur les paramètres identifiés, etc.).

Nous utiliserons un seuil en dessous duquel nous considérerons que cette différence ne provient pas de la présence d'une collision mais soit due aux incertitudes de modélisation. La difficulté est d'obtenir une valeur de seuil ni trop faible, pour éviter de fausses détections à cause des erreurs de notre modèle, mais ni trop élevée pour obtenir une précision de détection suffisante pour détecter les collisions sans danger pour l'opérateur. De plus, le modèle du couple articulaire prenant en compte les frottements devra être suffisamment détaillé afin de permettre une détection suffisamment sensible des collisions. La précision de modélisation dépend à la fois d'un choix pertinent du modèle, couplé à une identification précise des paramètres. Il faut donc choisir un modèle suffisamment précis pour modéliser les frottements présents dans les articulations mais qui soit en même temps suffisamment simple pour permettre une identification viable et robuste des paramètres du modèle. Ce modèle devra prendre en compte les frottements provenant des réducteurs à fort rapport de réduction (environ 1500) utilisé dans le robot Orion. Il nous faut de plus développer une méthode d'identification permettant d'obtenir des paramètres fiables qui soit automatisée afin d'être utilisable dans un contexte industriel dans le processus de production du robot Orion. Nous avons constitué le chapitre en deux parties ; la première décrit les phénomènes tribologiques principaux existants dans la littérature ce qui nous permet de construire le modèle de frottements le plus approprié ; la seconde partie étudie les méthodes d'identifications associées au modèle choisi.

Contrairement aux modèles de frottements utilisés classiquement en robotique, nous avons travaillé sur la modélisation et l'identification des frottements induits par la pignonerie à fort rapport de réduction. En effet, le robot Orion comporte dans chaque articulation différents types de réducteurs de rapport de réduction d'environ 1500 suivant l'articulation considérée. De plus, chaque articulation possède des réducteurs différents et pour une articulation donnée, le réducteur est composé de plusieurs étages de réduction (3 ou 4 suivant l'axe du robot considéré) de technologies différentes (cycloidal, épicycloidale, roue/pignon, etc.)

Afin de comparer le couple fourni par les moteurs et le modèle, nous avons besoin de mesurer à chaque instant le couple fourni par le moteur. Pour cela, nous avons décidé d'utiliser la mesure de couple par lecture du courant moteur fournie par le fabricant des moteurs et des cartes d'axes (B&R Automation). Cette méthode nous permet de connaître le couple fourni par le moteur par une mesure du courant absorbé par le moteur et un algorithme propre au fabricant. Nous supposons que cette mesure est suffisamment sensible pour notre application. En effet, la justesse de mesure n'est pas une caractéristique nécessaire dans notre cas, car nous utilisons la différence entre notre modèle (dont les paramètres sont identifiés avec la mesure par lecture de courant moteurs) et la mesure par lecture de courant moteur. La mesure doit par contre être répétable entre la phase d'identification et l'utilisation de la méthode de détection de collisions.

Nous négligeons de plus la flexibilité des articulations et nous plaçons dans le cas d'un robot infiniment rigide bien que les articulations 1 et 2 du robot possèdent un réducteur à rattrapage de jeu qui est par nature relativement flexible.

6.4.1 État de l'art des modèles de frottements couramment utilisés en robotique

Nous détaillons dans cette partie un état de l'art sur la modélisation des frottements utilisée dans les robot sériels afin de construire notre modèle de couple articulaire utilisé par notre module logiciel de détection de collisions. Les articles [ARMSTRONG-HÉLOUVRY, DUPONT et CANUDAS DE WIT 1994 BOGDAN 2010 HAMON 2011 NUNINGER, PERRUQUETTI et RICHARD 2006 WAIBOER 2007 WOJEWODA et al. 2008] présentent des états de l'art concernant l'étude des modèles de frottements dans les robots sériels et servent de base à ce travail. De plus, une approche historique de l'étude des frottements et de la tribologie est donnée dans [HAMON 2011]. Pour chaque modèle de frottements présenté ci-après, il peut exister une asymétrie qui n'est pas détaillée dans ce document. De ce fait, les frottements présents dans le sens horaire sont différents de ceux présents dans le sens anti-horaire, il faut utiliser un modèle de frottement pour le sens horaire et un autre pour le sens anti-horaire.

6.4.1.1 Modèle de Coulomb

La force de Coulomb est la force requise pour mettre en mouvement un corps en contact sec avec un autre. Ce phénomène apparaît entre deux surfaces en contact sec mais aussi lors de la présence de lubrification. Dans notre cas du robot Orion nous considérons un mouvement de rotation des différents axes. Comme précisé dans [C. DE WIT et al. 1989] une asymétrie est souvent présente, la force de Coulomb dans le sens de rotation horaire est différente de celle présente en rotation dans le sens anti-horaire. En effet, nous avons observé que la force de Coulomb (couple) présente sur l'axe 1 du robot Orion était asymétrique.

L'équation du couple τ de ce modèle de frottement dans le cas symétrique (Figure 6.7) est [C. DE WIT et al. 1989] :

$$\tau = \mu_c \times \text{sign}(\dot{q}) \quad (6.1)$$

Avec :

- μ_c : Coefficient de frottement de Coulomb
- \dot{q} : Vitesse angulaire

Pour obtenir une fonction continue (supprimer la discontinuité aux alentours de \dot{q} égale à zéro, il est possible d'utiliser une fonction exponentielle [LECOURS et Clément GOSSELIN 2013] telle que :

$$\tau = \mu_c \times \text{sign}(\dot{q}) \times (1 - \exp(-\alpha|\dot{q}|)) \quad (6.2)$$

Avec :

- μ_c : Coefficient de frottement de Coulomb (sec)

- \dot{q} : Vitesse angulaire
- α : Paramètre permettant de régler la pente aux alentours de zéro

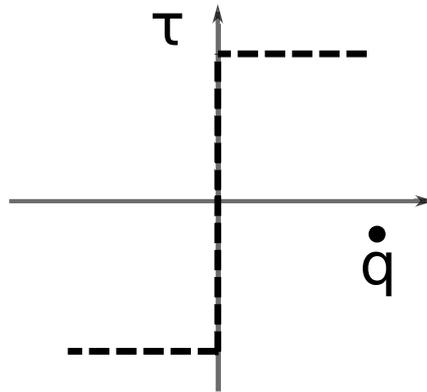


Figure 6.7 – Représentation de la force de Coulomb [WAIBOER 2007].

6.4.1.2 Frottement statique - Stiction

Il arrive que la force requise pour mettre en mouvement un corps en contact avec un autre soit plus importante que la force nécessaire pour le maintenir en mouvement. La force nécessaire pour mettre en mouvement le corps est appelée frottement statique.

Les frottements statiques sont non-linéaires et présents à vitesse nulle uniquement (Figure 6.8), l'équation est donnée en 6.3 [C. DE WIT et al. 1989] :

$$\left\{ \begin{array}{l} -\mu_s < \tau < \mu_s \\ \dot{q} = 0 \end{array} \right. \quad (6.3)$$

Avec :

- μ_s : Coefficient de frottement statique
- μ_c : Coefficient de frottement de Coulomb
- \dot{q} : Vitesse angulaire

Généralement les frottements statiques sont supérieurs aux frottements à vitesse non nulle : $\mu_s > \mu_c$.

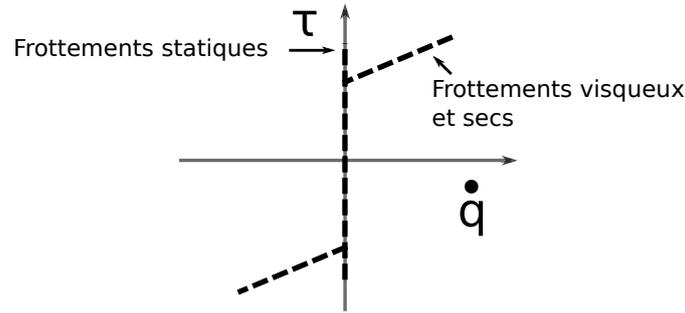


Figure 6.8 – Représentation des frottements statiques additionnés des frottements visqueux [WAIBOER 2007].

6.4.1.3 Frottements visqueux

Les frottements visqueux sont souvent étudiés en robotique, le modèle le plus simple (souvent utilisé) est linéaire mais des modèles plus complexes non-linéaires permettent de compenser plus efficacement les frottements dans certains robots sériels. Ce phénomène est présents lors de la présence de contacts lubrifiés.

Modèle linéaire de frottements visqueux L'équation des frottements secs/visqueux d'ordre 1 est [C. DE WIT et al. 1989] :

$$\tau = \mu_d \times \text{sign}(\dot{q}) + \mu_v \times \dot{q} \quad (6.4)$$

Avec :

- \dot{q} : Vitesse angulaire
- μ_d : Coefficient de frottements secs
- μ_v : Coefficient de frottements visqueux

Frottements visqueux quadratiques

$$\tau = \mu_d \times \text{sign}(\dot{q}) + \mu_{v1} \times \dot{q} + \text{sign}(\dot{q}) \times \mu_{v2} \times \dot{q}^2 \quad (6.5)$$

Avec :

- μ_d : Coefficient de frottements secs
- μ_{v1} : Coefficient de frottements visqueux d'ordre 1
- μ_{v2} : Coefficient de frottements visqueux d'ordre 2
- \dot{q} : Vitesse angulaire

Frottements visqueux d'ordre 3 L'équation des frottements secs/visqueux d'ordre 3 est [BONA, INDRI et SMALDONE 2003 SIMONI et al. 2015] :

$$\tau = \mu_d \times \text{sign}(\dot{q}) + \mu_{v1} \times \dot{q} + \mu_{v2} \times \text{sign}(\dot{q}) \times \dot{q}^2 + \mu_{v3} \times \dot{q}^3 \quad (6.6)$$

Avec :

- α_1 : Coefficient de frottement visqueux d'ordre 1
- α_2 : Coefficient de frottement visqueux d'ordre 2
- α_3 : Coefficient de frottement visqueux d'ordre 3

Un exemple de frottement secs/visqueux linéaire symétrique est donné en Figure 6.9.

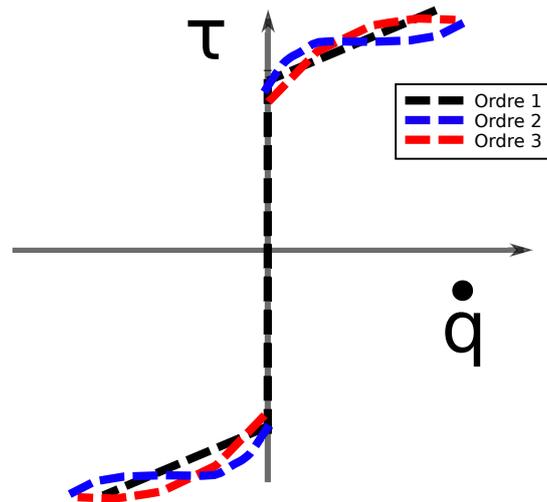


Figure 6.9 – Représentation des frottements visqueux additionnés aux frottements de Coulomb [WAI-BOER 2007].

6.4.1.4 Effet Stribeck

Ce phénomène concerne les contacts lubrifiés. L'effet Stribeck est lié aux frottements statiques. Stribeck a montré que lors de la mise en mouvement d'un corps, la transition entre les frottements statiques et les frottements visqueux/secs n'était pas discontinue (Figure 6.8) mais suivait une loi exponentielle décroissante (Figure 6.10) [WOJEWODA et al. 2008 GARCIA, SANTOS et C. C. d. DE WIT 2002] donnée par :

$$\tau = N \times \mu_c \times \left(1 + \frac{\mu_d - \mu_c}{\mu_c} \times g(\dot{q})\right) \times \text{sign}(\dot{q}) \quad (6.7)$$

Avec :

- N : Charge normale
- μ_s : Coefficient de frottement statique
- μ_c : Coefficient de frottement de Coulomb
- $g(\dot{q})$: Fonction de Stribeck
- \dot{q} : Vitesse axiale

La fonction de Stribeck $g(\dot{q})$ peut être écrite sous différentes formes, par exemple :

Modèle de [BO et PAVELESCU 1982] :

$$g(\dot{q}) = e^{-\alpha|\dot{q}|^\delta} \quad (6.8)$$

Avec :

- \dot{q} : Vitesse angulaire
- α : Paramètre constant
- δ : Paramètre constant

Modèle de [TUSTIN 1947] :

$$g(\dot{q}) = e^{-\dot{q}/\dot{q}_s} \quad (6.9)$$

Avec :

- \dot{q} : Vitesse angulaire
- \dot{q}_s : Vitesse de Stribeck (vitesse maximale dans laquelle l'effet Stribeck est présent [WAIBOER, AARTS et JONKER 2005])

Modèle de [ARMSTRONG-HÉLOUVRY, DUPONT et CANUDAS DE WIT 1994] :

$$g(\dot{q}) = \exp(-\dot{q}/\dot{q}_s)^\delta \quad (6.10)$$

Avec :

- \dot{q} : Vitesse angulaire
- \dot{q}_s : Vitesse de Stribeck (vitesse maximale dans laquelle l'effet Stribeck est présent, [ARMSTRONG-HÉLOUVRY, DUPONT et CANUDAS DE WIT 1994])
- δ : Paramètre constant compris entre 0,5 et 2 généralement [BITTENCOURT et GUNNARSSON 2012].

Modèle de [HESS et SOOM 1990] :

$$g(\dot{q}) = \frac{1}{1 + (\dot{q}/\dot{q}_s)^2} \quad (6.11)$$

Un exemple d'identification des paramètres de Stribeck est donné dans [WAIBOER, AARTS et JONKER 2005].

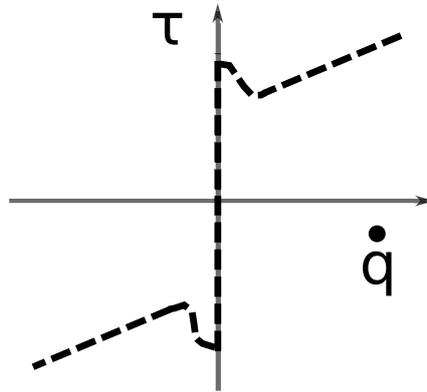


Figure 6.10 – Représentation de l’effet Stribeck additionné aux frottements visqueux linéaires et aux frottements statiques [WAIBOER 2007].

6.4.1.5 Hystérésis / Mémoire frictionnelle

Comme indiqué dans [ARMSTRONG-HÉLOUVRY, DUPONT et CANUDAS DE WIT 1994 HESS et SOOM 1990 SWEVERS et al. 2000] une hystérésis de frottement peut exister (Figure 6.11). Plusieurs cas peuvent exister :

- Hystérésis avec mémoire locale (symétrie)
- Hystérésis avec mémoire non locale

Il n’existe pas de fonction temporelle simple décrivant le phénomène d’hystérésis, cependant l’hystérésis peut être modélisée par des fonctions d’état (équation 6.12). Certains modèles numériques prennent en compte l’hystérésis :

- le modèle LuGre [BOGDAN 2010 NUNINGER, PERRUQUETTI et RICHARD 2006 BONA, INDRI et SMALDONE 2003 SIMONI et al. 2015]
- et le modèle Dahl.

$$\begin{aligned} \frac{dz}{dt} &= \dot{q} - k_s \frac{|\dot{q}|}{g(\dot{q})} z \\ F_f &= k_s z + c_s \frac{dz}{dt} + c\dot{q} \end{aligned} \tag{6.12}$$

Avec :

- z : Variable d’état
- k_s : Raideur
- c_s : Amortissement
- $g(\dot{q})$: Fonction de Stribeck
- c : Frottement visqueux

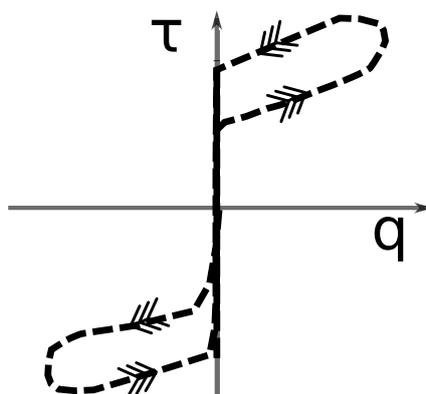


Figure 6.11 – Représentation de la mémoire frictionnelle (hystérésis) [FERRETTI et al. 2003].

6.4.1.6 Modèle de frottements dépendant de la position angulaire

Dans certains cas, le couple de frottement peut être dépendant de la position angulaire, dû à des défauts mécaniques des engrenages par exemple [WAIBOER 2007 C. DE WIT et al. 1989 GARCIA, SANTOS et C. C. d. DE WIT 2002].

Un modèle sinusoïdal simple à coefficients constants peut être utilisé [WAIBOER 2007, C. DE WIT et al. 1989, JABBOUR 2010] :

$$\tau = K_f \times \sin(\omega_0 \times q + \phi) \quad (6.13)$$

Avec :

- K_f : Amplitude des oscillations
- ω_0 : Pulsation angulaire des oscillations
- q : Position angulaire de l'axe étudié
- ϕ : Décalage de position angulaire

Cependant nous proposons dans la partie 6.4.3 un modèle plus complexe permettant de modéliser les frottements dans les axes du robot de forte inertie Orion.

6.4.1.7 Modèle de température

La température a une influence sur la viscosité des huiles et graisses utilisées pour lubrifier les engrenages. La variation de viscosité entraîne une variation des efforts de frottements à l'intérieur des engrenages. Comme analysé dans [WAIBOER 2007], le couple varie avec la température ambiante, l'auteur préconise de préchauffer les axes étudiés. D'après [SIMONI et al. 2015] le couple de frottements diminue avec l'augmentation de la température. [SEYFFERTH, MAGHZAL et ANGELES 1995] étudie les effets de la température. L'effet de la température sur les coefficients de frottements secs/visqueux peut être considéré linéaire [SIMONI et al. 2015]. L'équation du couple en prenant en compte les frottements secs/visqueux et la température s'écrit sous la forme :

$$\tau = \mu_d + \mu_{d0}(T - T_0) + \mu_v \times \dot{q} + \mu_{v0}(T - T_0) \times \dot{q} \quad (6.14)$$

Avec :

- T : Température de l'engrenage
- T_0 : Température ambiante
- μ_{d0} : Coefficient de frottements secs à température ambiante
- μ_{v0} : Coefficient de frottements visqueux à température ambiante

6.4.1.8 Autres modèles non utilisés

Dans un engrenage il peut exister un jeu mécanique. Ce jeu peut être modélisé par le modèle de Ruderman [RUDERMAN, HOFFMANN et BERTRAM 2009]. L'axe 1 du robot est pourvu d'un système élastique de rattrapage de jeu, donc nous supposons par la suite le jeu inexistant. Les réducteurs Harmonic Drives peuvent être modélisés par le modèle proposé par [SEYFFERTH, MAGHZAL et ANGELES 1995] mais aucun réducteur de ce type n'est présent sur le robot Orion.

6.4.1.9 Implémentations des modèles de frottements

Afin de modéliser les différents phénomènes étudiés précédemment, il existe plusieurs implémentations prenant en compte certains ou la totalité des phénomènes précédents [HAMON 2011] récapitulés dans le Tableau 6.1 :

- modèle de Dahl [BOGDAN 2010 NUNINGER, PERRUQUETTI et RICHARD 2006];
- modèle de Bliman et Sorine;
- modèle LuGre [SIMONI et al. 2015 MUVENGEI, KIHU et IKUA 2012 BONA, INDRI et SMALDONE 2003 DUPONT et al. 2002];
- modèle Leuven;
- modèle Bristle;
- et le modèle Al-Bender.

•	Dahl	Bliman-Sorine	LuGre	Bogdan2010
Nombre de paramètres	3	2/4	7	4
Frottements statiques	X	X	X	
Frottements de Coulomb	X	X	X	X
Frottements Secs/visqueux			X	X
Frottements de Stribeck		X	X	X
Hystérésis	X	X	X	X

Tableau 6.1 – Bilan des modèles de frottement et des implémentations logicielles

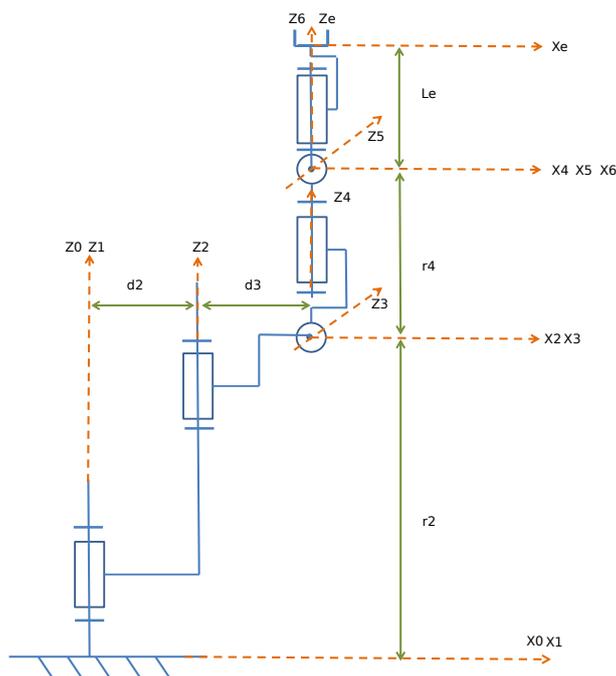


Figure 6.12 – Schéma cinématique du robot Orion.

6.4.2 Quantification et proposition du modèle de frottements pour le robot Orion

Après avoir passé en revue les modèles de frottements principaux présents dans la littérature nous quantifions par amplitude décroissante les phénomènes de frottements présents sur l'axe 1 du robot Orion (dénommé Z1 Figure 6.12). Nous détaillons les essais menés sur le robot Orion en version PT3 puis nous montrons en fin de partie les résultats obtenus sur d'autres robots. Pour cela, nous observons le couple fourni par le moteur de l'axe 1 en faisant varier un seul paramètre à la fois (position angulaire, vitesse angulaire, température) lors de mouvements en aller-retour. Cela nous permet de classer les phénomènes influant sur le couple articulaire en prenant comme critère l'écart maximal de couple lorsque ce phénomène varie. Par exemple, pour le cas des frottements secs/visqueux, nous faisons varier la vitesse angulaire et mesurons l'écart maximal du couple moyen mesuré pour les différentes vitesses étudiées. Par la suite nous modélisons les phénomènes dont l'influence est la plus importante, puis nous affinerons notre modèle en prenant en compte les phénomènes influant le moins.

6.4.2.1 Protocole de test

Pour tous les mouvements de rotation considérés nous avons placé le robot dans une configuration initiale (Figure 6.13) et avons effectué un mouvement de rotation sur un tour complet sur cet axe. Les autres axes restent immobiles.

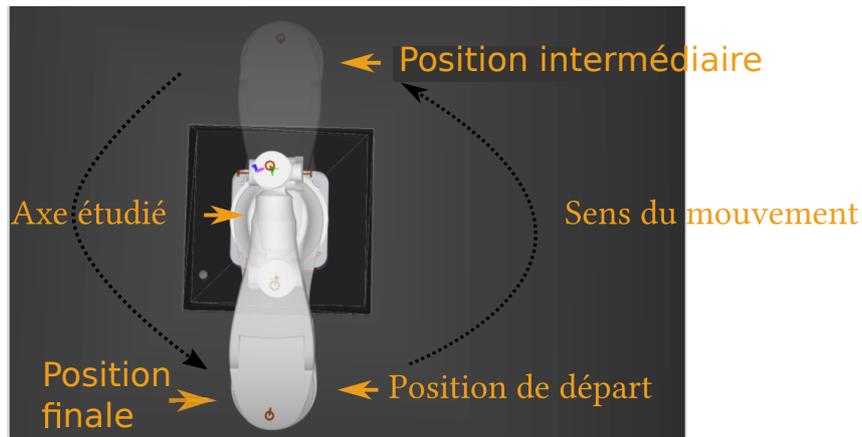


Figure 6.13 – Position de départ et d'arrivée du robot Orion lors de la quantification des frottements de l'axe 1.

6.4.2.2 Bruit de mesure

Nous proposons dans un premier temps de mesurer le couple d'un moteur à l'arrêt lorsque celui-ci est démonté du robot (Figure 6.14), donc à vide, afin de quantifier le bruit de mesure provenant du capteur de couple par lecture du courant. Nous commandons au moteur une vitesse nulle et mesurons le couple lu par le capteur de couple. Nous multiplions le couple mesuré par le rapport de réduction de l'axe considéré afin de connaître le couple au niveau de l'axe, après les étages de réduction.



Figure 6.14 – Moteurs des axes 1 à 6 (de gauche à droite) extraits du robot Orion.

L'amplitude du bruit de mesure de chaque moteur (des axes 1 à 6 du robot Orion) est donnée dans le tableau 6.2. Nous observons un bruit de mesure au niveau de la sortie de l'axe différent suivant l'axe considéré pourtant les rapports de réduction et les moteurs utilisés pour les axes 4, 5 et 6 sont identiques.

6.4.2.3 Variation du couple en fonction de la position angulaire

Nous avons observé que le couple variait en fonction de la position angulaire lorsque la vitesse de rotation et la température étaient constantes et l'accélération nulle. L'amplitude de cette variation est supérieure à l'amplitude du bruit de mesure identifiée précédemment (Figure 6.15).

Axe	Amplitude du bruit (N.m)
1	145
2	72
3	92
4	162
5	105
6	71

Tableau 6.2 – Écart entre la valeur maximale et la valeur minimale du bruit (ramené à l'articulation après les étages de réduction) pour les moteurs utilisés dans le robot Orion

L'influence de la position angulaire (seul paramètre variable) sur le couple mesuré est d'environ 400 N.m pour cet essai à la vitesse de $0,05 \text{ rad.s}^{-1}$ dans le sens anti-horaire.

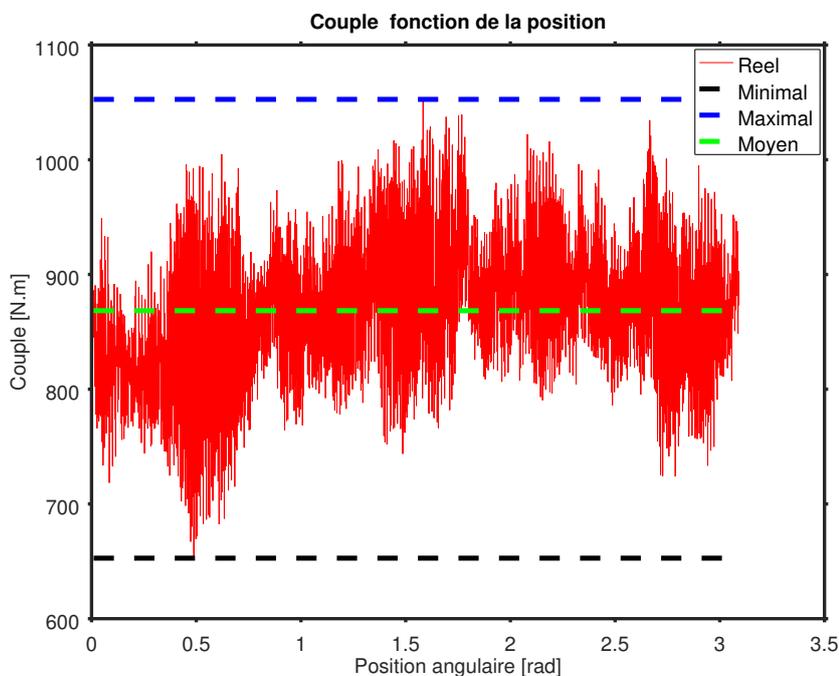


Figure 6.15 – Variation du couple de l'axe 1 (ramené à l'articulation après les étages de réduction) en fonction de la position angulaire à température (20° C) et vitesse de rotation constantes ($0,05 \text{ rad.s}^{-1}$).

Nous reproduisons la mesure précédente pour différentes vitesses de rotation et traçons l'amplitude maximale de la variation (écart minimal-maximal Figure 6.15) du couple en fonction de la position angulaire pour chacune de ces vitesses de rotations. L'amplitude (minimale-maximale) n'est pas constante, elle varie avec la vitesse de rotation (Figure 6.16). La valeur maximale de la variation du couple est de 460 N.m pour la vitesse de $0,001 \text{ rad.s}^{-1}$.

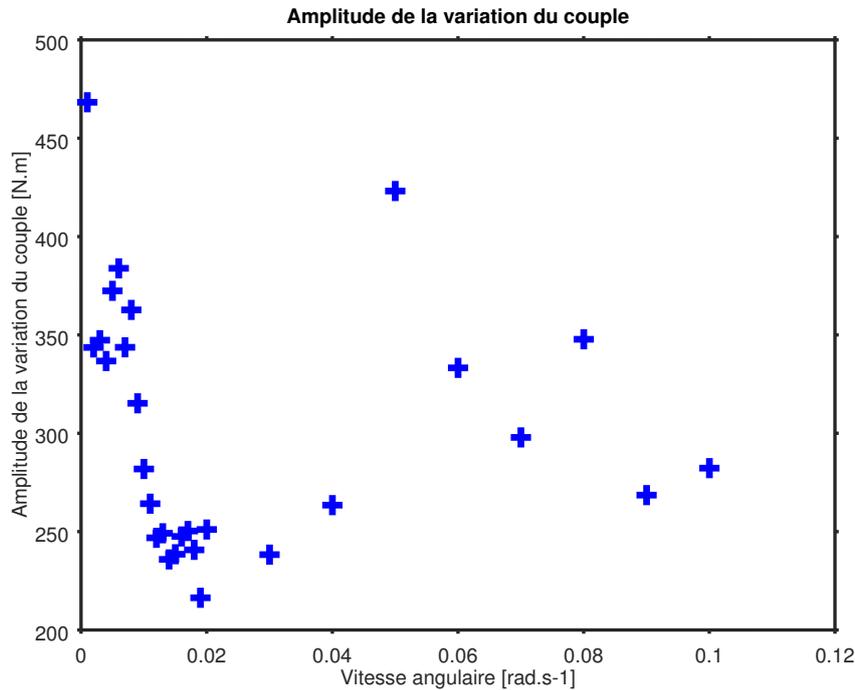


Figure 6.16 – Variation du couple en fonction de la position pour plusieurs vitesses constantes différentes.

6.4.2.4 Frottements secs/visqueux

Afin de mesurer l'influence des frottements visqueux et secs nous mesurons la moyenne du couple sur 1 tour de l'axe 1 pour différentes vitesses de rotation de $0,001 \text{ rad.s}^{-1}$ jusqu'à la vitesse maximale en traitement médicale de $0,1 \text{ rad.s}^{-1}$ en gardant la température constante (Figure 6.17). Nous considérons que l'influence de ce phénomène sur la mesure de couple correspond à la différence entre le couple moyen maximal et le couple moyen minimal sur l'ensemble des essais réalisés à vitesse constante car le couple moyen minimal (à vitesse de rotation très faible) est caractéristique des frottements de Coulomb. Seule la différence entre le couple moyen minimal et le couple moyen maximal est donc significatif des frottements secs/visqueux. L'influence mesurée de la variation de la vitesse de rotation sur les frottements secs/visqueux est de $(1100-680) 420 \text{ N.m}$ (Figure 6.17).

6.4.2.5 Température

Nous avons constaté que le couple mesuré variait suivant le temps d'utilisation du robot. Notre hypothèse est que plus le robot est utilisé, plus la température des pièces mécaniques augmente ce qui entraîne une liquéfaction de la graisse entraînant une variation des coefficients de frottements. Les frottements à température élevée sont moins élevés que ceux à température ambiante car la graisse à l'état liquide oppose moins de résistance que celle à l'état solide. Les moteurs disposent de capteurs de température interne, cependant nous ne pouvons pas acquérir cette information dans l'architecture logicielle actuelle. Dans un premier temps nous

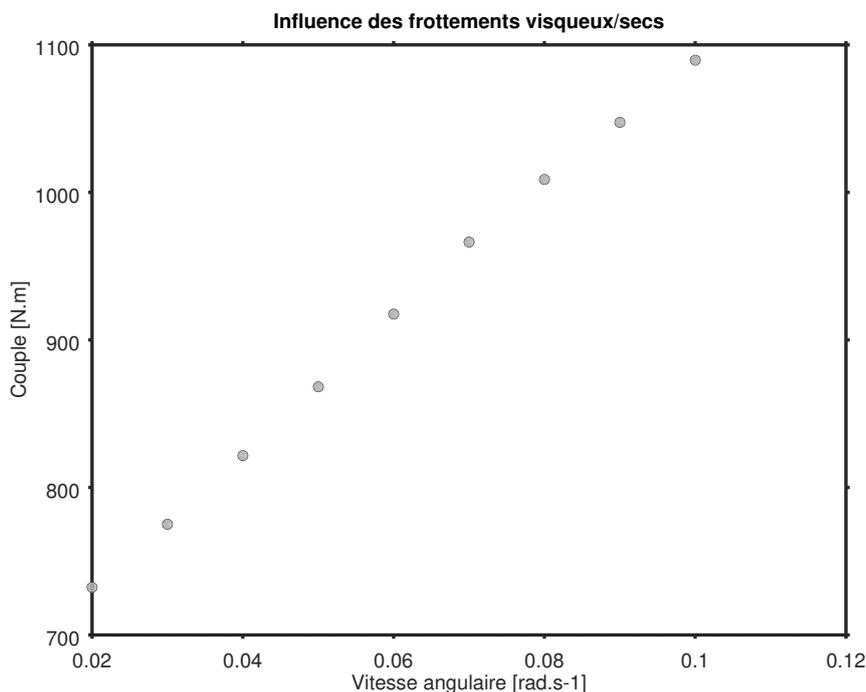


Figure 6.17 – Variation de la moyenne du couple en fonction de la vitesse de rotation

avons décidé d'utiliser un thermomètre infrarouge à main pointé sur le bâti du premier réducteur (le seul accessible facilement) afin de mesurer la température du réducteur. Par la suite si la modélisation est efficace nous envisageons d'implémenter la lecture de la température par les capteurs du moteur dans l'architecture logicielle du robot.

Afin de quantifier l'effet de la température sur les frottements nous décidons de mesurer le couple moyen au niveau de l'axe 1 lors de plusieurs essais à vitesse constante pour différentes températures (température ambiante et température maximale des engrenages du robot). Pour mesurer le couple à température élevée nous mettons en place une procédure d'échauffement du robot permettant de garantir une température maximale stabilisée pendant les mesures au niveau des engrenages de l'axe 1. L'axe 1 du robot effectue des aller-retours à vitesse maximale ($0,1 \text{ rad.s}^{-1}$) pendant 30 minutes, à la fin de ces mouvements nous considérons la température maximale atteinte au niveau des réducteurs.

La procédure de relevé à différentes températures commence par les très basses vitesses à 20° C , puis nous effectuons la mise en chauffe du robot et les acquisitions à vitesse élevée. Nous effectuons des mesures à très basses vitesses constantes de $0,001 \text{ rad.s}^{-1}$ à $0,01 \text{ rad.s}^{-1}$ (robot à température ambiante 20° C environ). Enfin, nous mesurons le couple pour des moyennes et hautes vitesses constantes. Les vitesses utilisées sont suffisamment élevées pour nous garantir que la température restera constante pendant les mouvements. Afin d'être sûr que pendant les mesures à température élevée la température soit constante, nous n'effectuons que des mesures à vitesse élevée. Dans le cas contraire, les réducteurs pourraient refroidir pendant l'essai. De la même manière, nous n'effectuons que des mesures à vitesse faible pour les mesures à température

ambiante.

Nous approximons linéairement les frottements à très basses vitesses et ceux à moyennes et hautes vitesses. Grâce à la différence entre les deux approximations précédentes nous déduisons la variation du couple due uniquement à la température (Figure 6.18). L'écart mesuré est d'environ 100 N.m.

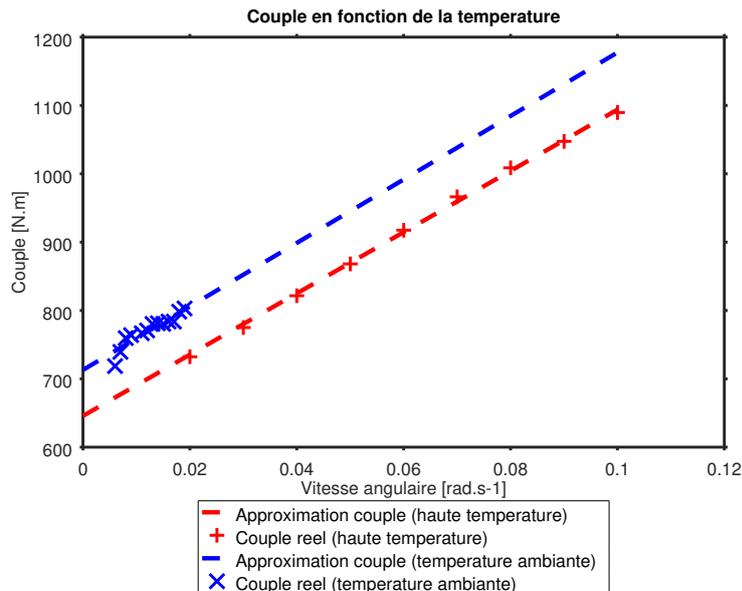


Figure 6.18 – Observation de l'effet de la température sur le couple de frottement à l'axe 1.

6.4.2.6 Récapitulatif des frottements affectant le robot Orion et conclusion

Le tableau 6.3 résume l'influence des différents phénomènes tribologiques sur l'amplitude des frottements mesurés.

Phénomène	Amplitude des frottements (N.m)
Frottements variables avec la position	460
Frottements secs/visqueux	$(1100-680) = 420$
Bruit de mesure	140
Température	100

Tableau 6.3 – Récapitulatif de l'amplitude des différents phénomènes tribologiques présents sur le robot Orion

Afin d'obtenir une détection respectant le cahier des charges nous modélisons les trois phénomènes quantifiés précédemment : les frottements secs/visqueux, l'influence de la température et la variation du couple en fonction de la position.

6.4.3 Méthodes d'identification

Nous avons vu dans la partie précédente que notre modèle devait prendre en compte :

- les frottements secs et visqueux (variation du couple mesuré en fonction de la vitesse de rotation de l'axe considéré) ;
- la variation du couple en fonction de la température des engrenages ;
- et la variation du couple en fonction de la position angulaire.

Les frottements induits par les efforts statiques dus à la masse des segments du robot et à la masse supportée en bout d'effecteur ainsi que les efforts dynamiques induits par l'inertie ne sont pas modélisés dans cette partie car ils ont déjà fait l'objet d'une étude par LEONI CIA Cable Systems.

Notre objectif dans cette partie est de choisir le modèle à utiliser pour chaque phénomène, à partir de l'état de l'art de la partie 6.4.1 et d'en déduire un modèle complet modélisant les trois phénomènes que nous voulons modéliser. Notre modèle complet s'écrit de la façon suivante :

$$\tau_{model}(q, \dot{q}, T) = \tau_{VD}(\dot{q}, T) + \tau_P(q, \dot{q}) \quad (6.15)$$

Avec :

- $\tau_{model}(q, \dot{q}, T)$: le modèle complet du couple modélisé
- $\tau_{VD}(\dot{q}, T)$: le modèle des frottements secs/visqueux variables avec la température
- $\tau_P(q, \dot{q})$: le modèle du couple variant avec la position angulaire et la vitesse angulaire

6.4.3.1 Identification des frottements secs et visqueux

Nous nous focalisons dans un premier temps sur l'étude du modèle des frottements secs/visqueux. Nous avons vu dans l'état de l'art des modèles de frottements de la partie 6.4.1 que pour choisir le modèle de frottements secs/visqueux approprié à notre application nous devons :

- choisir l'ordre nécessaire pour modéliser les frottements secs/visqueux ;
- choisir si un modèle symétrique est suffisant ou si nous devons traiter différemment les vitesses de rotation négatives des vitesses positives.

Afin de nous affranchir de l'effet de la température (qui sera étudié par la suite) nous procédons à des mesures à température du robot constante. Pour cela, nous avons préchauffé le robot avec la méthode décrite dans la partie 6.4.1. Durant les essais suivants, nous avons considéré que la température ne variait pas car nous mesurons le couple pour des vitesses élevées. Nous avons étudié dans un premier temps un seul sens de rotation afin de nous affranchir pour le moment de l'influence de celui-ci sur l'analyse des frottements secs et visqueux. Nous étudierons la symétrie du modèle une fois l'ordre du modèle déterminée.

Nous avons effectués plusieurs mouvements de rotation de l'axe 1 à vitesses constantes. Nous mesurons le couple lorsque l'accélération est nulle pour ne pas prendre en compte les effets inertiels.

Obtention de l'ordre du modèle de frottements secs/visqueux Nous avons décidé de comparer dans un premier temps le modèle de frottements secs/visqueux d'ordre 1 (couramment utilisé en robotique sérielle) et celui d'ordre 2 afin de quantifier l'apport de l'ordre 2 par rapport à l'ordre 1 pour un seul sens de rotation. Si l'erreur résultante reste élevée avec un modèle d'ordre 2 nous envisagerons d'étudier des modèles d'ordre plus élevés.

Afin d'identifier les paramètres des modèles d'ordre 1 et 2 nous mesurons le couple pendant plusieurs mouvements à vitesse et température constante pour des vitesses allant de 0,01 à 0,1 $rad.s^{-1}$. Nous calculons les paramètres des polynômes (ordre 1 et ordre 2) permettant de minimiser l'erreur au sens des moindres carrés entre les valeurs mesurées et le modèle à identifier (Figure 6.19).

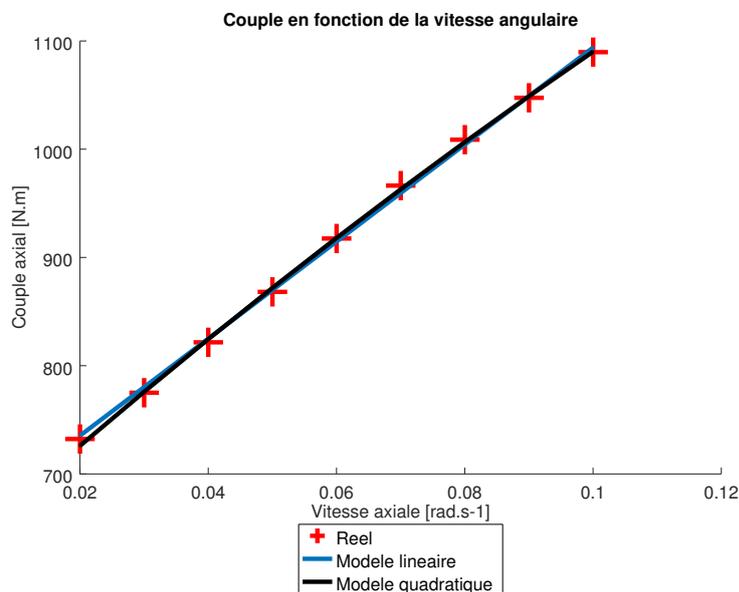


Figure 6.19 – Comparaison des modèles ordre 1 et ordre 2 pour la modélisation des frottements secs/visqueux.

Nous définissons le critère d'erreur suivant permettant de quantifier l'erreur de modélisation pour chaque modèle :

$$E = \frac{\sqrt{(\tau_r - \tau_m)^T \times (\tau_r - \tau_m)}}{nbPoints} \quad (6.16)$$

Avec :

- E : erreur globale
- τ_r : moyenne du couple réel mesuré
- τ_m : couple du modèle
- nbPoints : nombre de valeurs mesurées

	Erreur sens horaire (N.m)	Erreur sens anti-horaire (N.m)
Modèle ordre 1	2,8	3,1
Modèle ordre 2	2,1	3,0

Tableau 6.4 – Comparaison de l'erreur globale résultante entre les modèles d'ordre 1 et d'ordre 2 de modélisation des frottements secs/visqueux.

Nous considérons que la différence entre les modèles d'ordre 1 et celui d'ordre 2 n'est pas suffisamment significative pour justifier l'emploi du modèle d'ordre 2 qui introduit un paramètre supplémentaire pour un modèle symétrique et deux pour modèle non-symétrique ce qui complexifie l'identification du modèle complet. Nous choisissons donc d'utiliser un modèle de frottements secs/visqueux d'ordre 1.

Étude de la symétrie Nous proposons d'étudier la possibilité d'utiliser un modèle de frottements secs/visqueux (ordre 1) symétrique. Afin de quantifier l'apport d'un modèle non symétrique nous proposons de comparer un modèle symétrique d'ordre 1 et un modèle non symétrique du même ordre. À partir des essais de mesures du couple dans le sens horaire et dans le sens anti-horaire à différentes vitesses de rotation mais température constante nous identifions les paramètres :

- d'un modèle de frottements secs/visqueux symétrique d'ordre 1

$$\tau_{VD}(\dot{q}) = \mu_d \times \text{sign}(\dot{q}) + \mu_v \times \dot{q} \quad (6.17)$$

- d'un modèle de frottements secs/visqueux non-symétrique d'ordre 1

$$\tau_{VDcw} = (\mu_{dcw}) + \mu_{vcw} \times \dot{q} \quad (6.18)$$

$$\tau_{VDccw} = (\mu_{dccw}) + \mu_{vccw} \times \dot{q} \quad (6.19)$$

Avec :

- τ_{VD} : le couple modélisé dans le cas d'un modèle symétrique
- μ_d : le coefficient de frottement secs dans le cas d'un modèle symétrique ;
- μ_v : le coefficient de frottement visqueux dans le cas d'un modèle symétrique ;
- τ_{VDcw} : le couple modélisé pour les rotations dans le sens horaire ;
- τ_{VDccw} : le couple modélisé pour les rotations dans le sens anti-horaire ;
- μ_{dcw} : le coefficient de frottements secs pour le sens horaire ;
- μ_{vcw} : le coefficient de frottements visqueux pour le sens horaire ;
- μ_{dccw} : le coefficient de frottements secs pour le sens anti-horaire ;
- μ_{vccw} : le coefficient de frottements visqueux pour le sens anti-horaire ;

Nous comparons l'erreur entre chaque modèle(symétrique et non-symétrique) en utilisant le critère d'erreur de l'équation 6.16 (Figure 6.20, 6.21 et tableau 6.5).

Étant donné la réduction de l'erreur globale et de l'écart type d'un coefficient environ 3 (Tableau 6.5) nous adoptons le modèle non-symétrique défini par les équation 6.18 et 6.19.

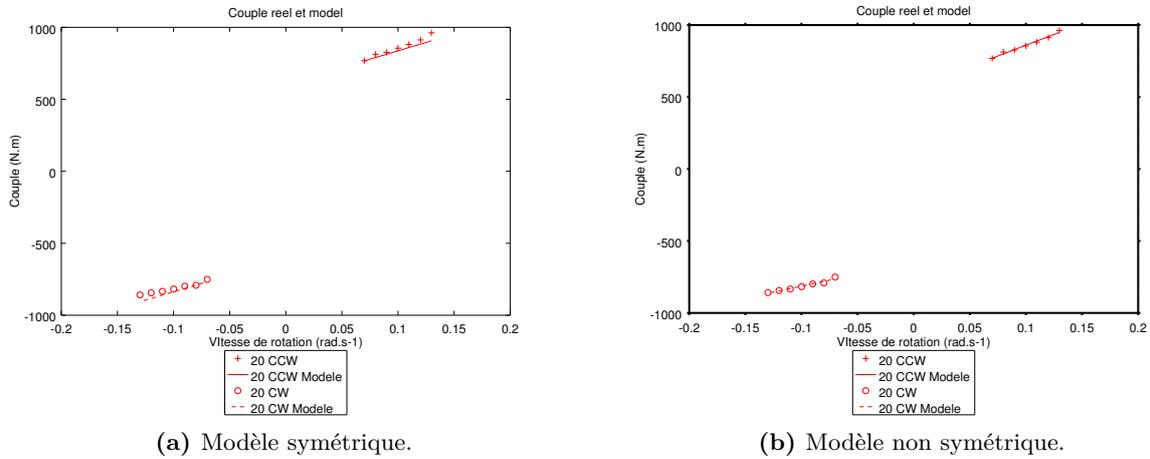


Figure 6.20 – Comparaison de l’identification des frottements secs/visqueux entre un modèle symétrique et un modèle non symétrique.

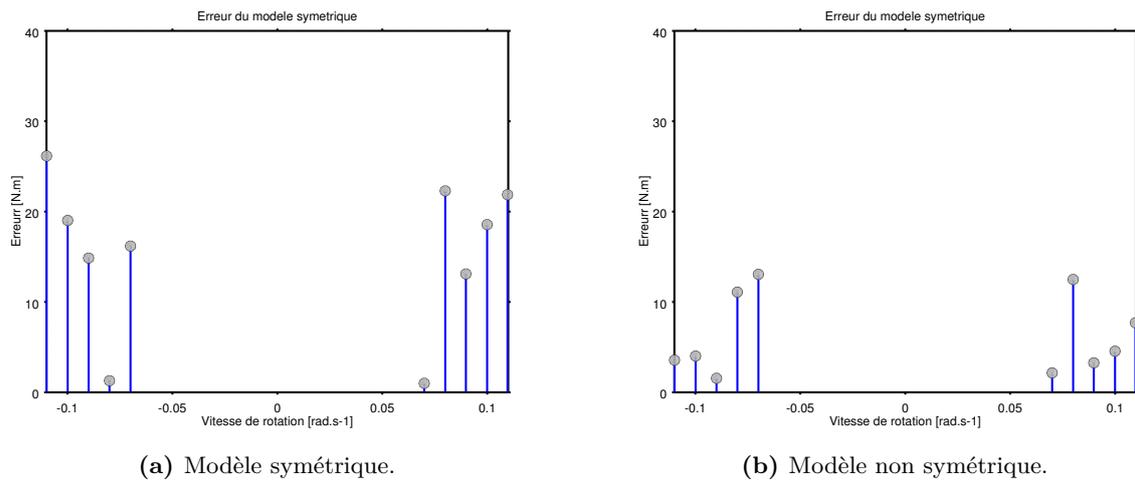


Figure 6.21 – Comparaison de l’erreur entre le couple mesuré et les modèles de frottements secs/visqueux symétrique et non symétrique.

	Modèle symétrique	Modèle non-symétrique
Erreur globale (N.m) (critère équation 6.16)	7,4	2,0
Écart type (N.m)	15,6	4,2

Tableau 6.5 – Comparaison de l’erreur globale et de l’écart type pour le modèle de frottements visqueux/secs d’ordre 1 symétrique et non-symétrique.

6.4.3.2 Conclusion

L’équation du modèle de couple modélisant les frottements secs/visqueux est d’ordre 1 et non-symétrique. Le modèle théorique des frottements secs/visqueux dans le sens horaire est donné

Paramètre	Valeur
μ_{dcw} (N.m)	647,7
μ_{vcw} (N.m.s.rad ⁻¹)	-1661,3
μ_{dccw} (N.m)	560,8
μ_{vccw} (N.m.s.rad ⁻¹)	-2992,8

Tableau 6.6 – Paramètres du modèle de frottements secs/visqueux non symétrique d'ordre 1.

équation 6.20, celle du modèle de couple pour le sens anti-horaire est donnée par l'équation 6.21. Les paramètres du modèle de frottements secs/visqueux non symétrique identifiés pour le robot Orion PT2 à température élevée sont donnés dans le tableau 6.6. Nous évaluons par la suite les frottements secs/visqueux en fonction de la température.

— pour les vitesses en sens horaire :

$$\tau_{VDcw} = \mu_{dcw} + \mu_{vcw} \times \dot{q} \quad (6.20)$$

— pour les vitesses en sens anti-horaire :

$$\tau_{VDccw} = \mu_{dccw} + \mu_{vccw} \times \dot{q} \quad (6.21)$$

6.4.3.3 Effets de la température

Nous considérons à présent la variation du couple en fonction de la température. D'après [SIMONI et al. 2015] nous considérons un modèle de variation des coefficients de frottements secs/visqueux en fonction de la température d'ordre 1. Nous avons choisis un modèle de frottements secs/visqueux linéaire non-symétrique, donc nous devons obtenir un modèle pour les vitesses positives et un pour les vitesses négatives. Nous effectuons des mesures de la moyenne du couple sur un tour complet d'axe 1 une première fois à température ambiante à faibles vitesses puis une fois le robot préchauffé à vitesses élevées. Étant donné que la mesure de la température est pour le moment effectuée avec un thermomètre infra-rouge extéroceptif sans contact pointé sur le premier engrenage nous nous restreignons aux températures extrêmes : robot à température ambiante (20 °C) et robot préchauffé à son maximum (60 °C) qui sont les seules mesures fiables que nous pouvons faire. Nous intégrons le modèle de la température dans le modèle identifié précédemment des frottements secs/visqueux de la façon suivante :

— pour les vitesses en sens horaire :

$$\tau_{Tcw} = \mu_{d0cw} + \mu_{dcw}(T - T_0) + \mu_{v0cw} \times \dot{q} + \mu_{vcw}(T - T_0) \times \dot{q} \quad (6.22)$$

— pour les vitesses en sens anti-horaire :

$$\tau_{Tccw} = \mu_{d0ccw} + \mu_{dccw}(T - T_0) + \mu_{v0ccw} \times \dot{q} + \mu_{vccw}(T - T_0) \times \dot{q} \quad (6.23)$$

Avec :

— τ_{Tcw} : le modèle de couple prenant en compte les frottements secs/visqueux variables avec la température dans le sens horaire

- τ_{Tccw} : le modèle de couple prenant en compte les frottements secs/visqueux variables avec la température dans le sens anti-horaire
- μ_{d0cw} : le coefficient de frottements secs à température ambiante pour le sens de rotation horaire
- μ_{dcw} : le coefficient de frottements secs variable avec la température température pour le sens de rotation horaire
- μ_{v0cw} : le coefficient de frottements visqueux à température ambiante pour le sens de rotation horaire
- μ_{vcw} : le coefficient de frottements visqueux variable avec la température température pour le sens de rotation horaire
- T : Température du premier engrenage de l'axe 1 du robot
- T_0 : Température ambiante
- μ_{d0cw} : le coefficient de frottements secs à température ambiante pour le sens de rotation anti-horaire
- μ_{dcw} : le coefficient de frottements secs variable avec la température température pour le sens de rotation anti-horaire
- μ_{v0cw} : le coefficient de frottements visqueux à température ambiante pour le sens de rotation anti-horaire
- μ_{vcw} : le coefficient de frottements visqueux variable avec la température température pour le sens de rotation anti-horaire

Résultats Les résultats de l'identification des frottements secs/visqueux variables avec la température pour les sens horaire et anti-horaire sont donnés dans la Figure 6.22.

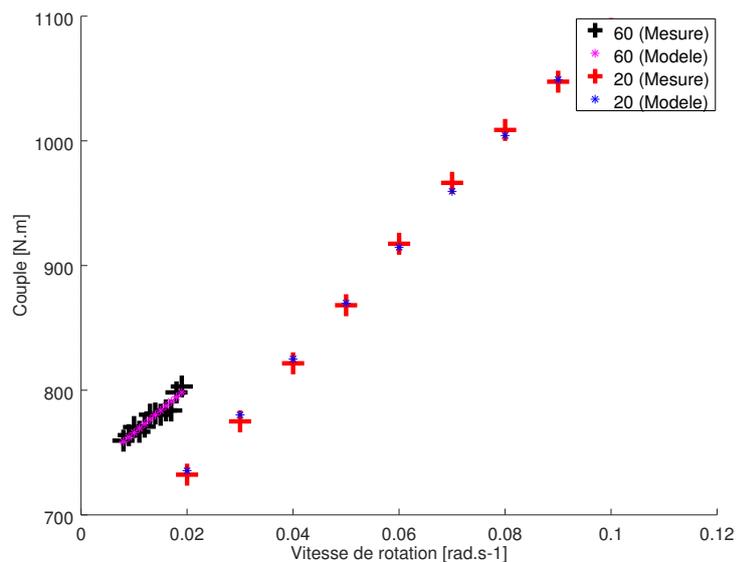


Figure 6.22 – Résultat de l'identification du modèle de frottements secs/visqueux variable avec la température pour le sens anti-horaire.

6.4.3.4 Variation fréquentielle du couple en fonction de la position

Notre objectif est maintenant d'obtenir un modèle de la variation du couple en fonction de la position angulaire (Figure 6.15) ainsi que la méthode permettant d'identifier tous les paramètres de ce modèle. Les mesures de couple s'effectuent à travers l'*ACU* (non-temps réel) qui reçoit les mesures effectuées par le *MCU* (temps-réel). Les mesures sont reçues par l'*ACU* retardées par rapport à l'acquisition faite par le *MCU*, mais afin de compenser ce problème chaque mesure possède un horodatage (timestamp). Le problème est que certaines trames acquises par le *MCU* ne sont pas transmises à l'*ACU* car celui-ci (non temps réel) peut être occupé pendant plus d'une cyclique du *MCU*. Cela pose problème pour les analyses fréquentielles que nous faisons par la suite. En effet, les outils d'analyse classique type FFT ne nous ont pas données de résultats suffisamment précis (Figure 6.23), cela peut s'expliquer par le fait que certaines trames de mesures sont manquantes, les mesures ne sont donc pas régulièrement espacées au niveau temporel. Afin de compenser ce problème et de réaliser une analyse fréquentielle suffisamment précise nous donnant les fréquences principales et les harmoniques du signal de couple mesuré nous utilisons la méthode des périodogrammes de Lomb-Scargle en lieu et place de la FFT (Figure 6.23).

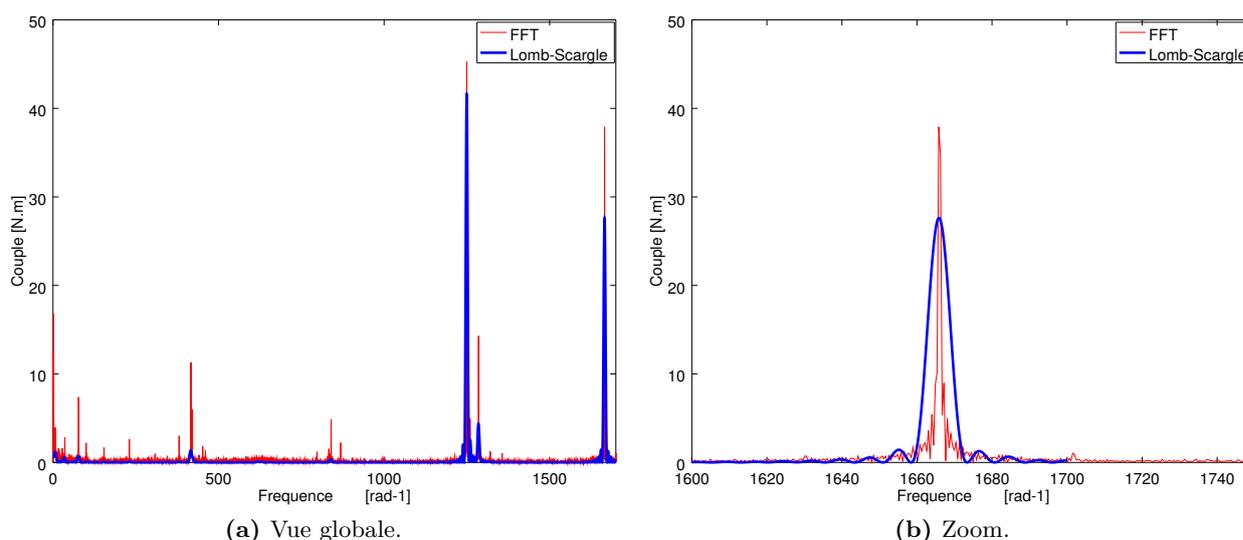


Figure 6.23 – Comparaison de l'analyse fréquentielle du couple par rapport à la position angulaire avec les méthodes FFT et Lomb-Scargle à vitesse de rotation constante ($0,03 \text{ rad.s}^{-1}$).

Nous proposons de vérifier notre hypothèse de départ qui suppose que la variation du couple sur un tour d'axe à vitesse constante provient des systèmes de réduction et est donc liée à la position angulaire et non au temps. Pour cela nous comparons une analyse fréquentielle du couple par rapport au temps et une analyse fréquentielle du couple par rapport à la position angulaire. Nous observons que les harmoniques composants le couple mesuré pour différentes vitesses de rotation se superposent sur l'analyse fréquentielle du couple rapport à la position alors qu'elles varient suivant la vitesse de rotation sur l'analyse fréquentielle du couple en fonction du temps (Figure 6.24). Cela signifie que les fréquences principales et les harmoniques sont liées à la position angulaire et non au temps. Cela nous permet de conclure sur le fait que ce « bruit » est

d'origine mécanique (lié à la position angulaire) et non temporel, nous l'appelons par la suite : bruit mécanique.

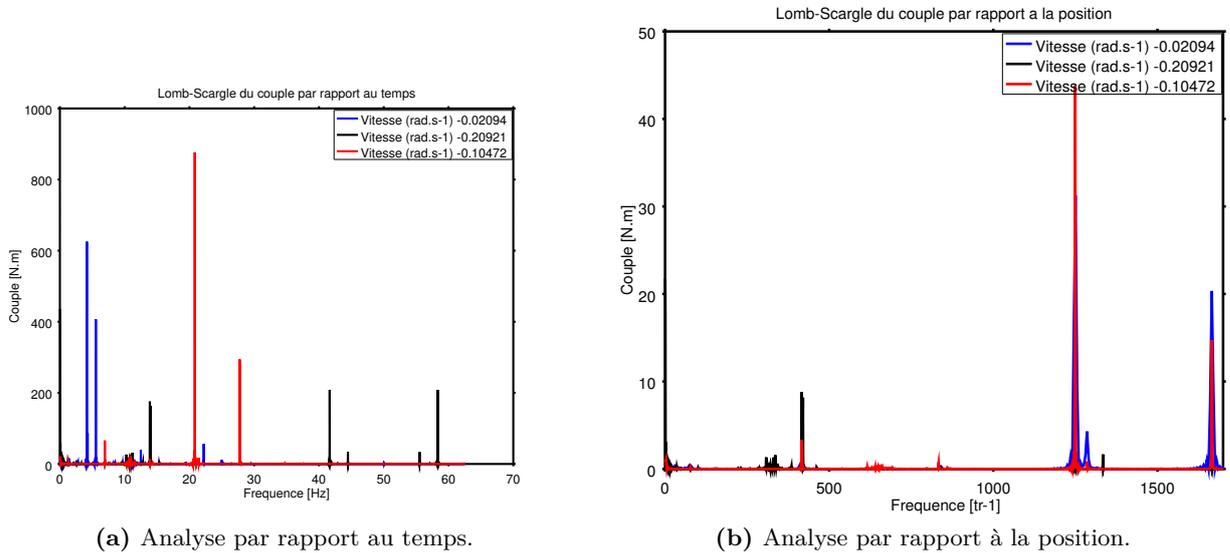


Figure 6.24 – Comparaison de l'analyse fréquentielle par la méthode Lomb-Scargle du couple par rapport au temps et du couple par rapport à la position angulaire pour plusieurs vitesses de rotations de l'axe 1.

Nous modélisons maintenant ce bruit par un modèle qui nous permettra de le réduire voire le supprimer en soustrayant à la mesure du couple le modèle que nous allons déterminer. Pour cela nous faisons l'hypothèse qu'il s'agit d'un *signal périodique sinusoïdal* composé de plusieurs harmoniques [GARCIA, SANTOS et C. C. d. DE WIT 2002]. Le modèle du bruit mécanique $\tau_m(q)$ peut s'écrire sous la forme :

$$\tau_P(q) = \sum_{i=0}^n A_i \times \cos(2 \times \pi \times f_i \times q + \phi_i) \quad (6.24)$$

Avec :

- n : nombre d'harmoniques composant le bruit mécanique sinusoïdal
- A_i : amplitude de l'harmonique i
- f_i : fréquence de l'harmonique i
- q : position angulaire de l'axe étudié
- ϕ_i : déphasage angulaire de l'axe étudié pour l'harmonique i

Nous proposons maintenant d'identifier les paramètres du modèle du bruit mécanique :

- le nombre d'harmoniques N que nous considérons ;
- la fréquence f_i de chaque harmonique ;
- l'amplitude A_i et la phase ϕ_i de chaque harmonique.

Nous utilisons la méthode Lomb-Scargle pour identifier les harmoniques présentes dans la mesure du couple. Cependant, cette méthode bien que précise pour l'obtention de la fréquence, ne permet pas de connaître de façon précise l'amplitude et la phase des harmoniques du signal observé. Nous les déterminerons dans un second temps à l'aide d'une méthode d'optimisation linéaire présentée par la suite basée sur les moindres carrés. Le nombre d'harmoniques à prendre en compte est arbitraire, nous nous intéressons aux harmoniques dont l'amplitude est la plus élevée.

6.4.3.5 1^{re} approximation des harmoniques principales

Nous avons choisi d'utiliser le logiciel *Octave* en version 4.2.1, un logiciel libre semblable à MatLab. L'implémentation choisie de Lomb-Scargle nous permet de traiter au maximum 6000 points d'un signal pour en trouver les harmoniques principales sur notre PC GNU/Linux équipé de 8 Go de RAM et d'un processeur Intel i7-3740. Les mesures de couple que nous avons acquises contiennent bien plus que 6000 points, nous avons choisi dans un premier temps de tronquer les mesures aux 6000 premiers points afin d'obtenir une première analyse fréquentielle grossière nous donnant approximativement les harmoniques principales puis de faire une deuxième analyse sur l'ensemble des points en bornant l'analyse autour de chaque fréquence identifiée par l'analyse grossière. Nous avons modifié pour cela, la fonction de Lomb-Scargle afin de limiter l'analyse fréquentielle à une fenêtre de fréquence que nous donnons en entrée.

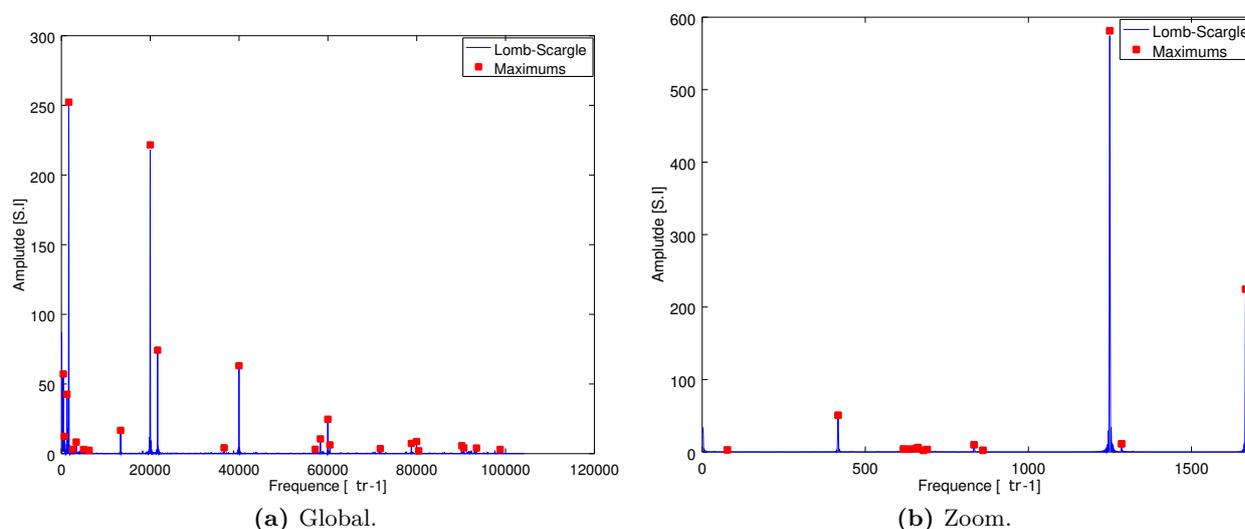


Figure 6.25 – Exemple d'analyse fréquentielle initiale du couple fonction de la position ainsi que les principales harmoniques identifiées.

La figure 6.25 nous montre le résultat de l'identification des harmoniques contenues dans le bruit mécanique du couple à partir des 6000 premiers points de mesure du signal de couple. Nous observons que certaines harmoniques principales identifiées correspondent aux rapports de réduction des réducteurs (416,5 et 1666) situés entre la sortie du moteur et l'axe mécanique du robot ainsi qu'aux harmoniques troisièmes des rapports de réduction (1249,5 correspond à trois fois 416,5). Les harmoniques identifiées sont répertoriées dans le Tableau 6.7.

Harmoniques identifiées (tr^{-1})
14,283
28,677
77,535
416,243
420,324
1247,648
1667,012
...

Tableau 6.7 – Liste non exhaustive des harmoniques identifiées en première approximation pour l’axe 1 pour une vitesse de rotation de $0,05 \text{ rad.s}^{-1}$.

6.4.3.6 Affinement des harmoniques

Après avoir obtenu une première approximation des harmoniques à partir des 6000 premiers points de mesure nous avons mis en place une méthode permettant d’affiner ces harmoniques en prenant en compte tous les points des mesures effectuées. Pour chaque harmonique identifiée (Figure 6.25 et Tableau 6.7) nous définissons une fenêtre de fréquence autour d’elle sur laquelle nous allons utiliser l’analyse fréquentielle Lomb-Scargle en incluant tous les points de mesure. Le fenêtrage associé à une fonction Lomb-Scargle particulière nous permet de nous affranchir de la limite des 6000 points. Cela nous donne les valeurs précises des harmoniques composant le signal de couple mesuré. Un exemple d’analyse fenêtrée autour de la fréquence 1666 rad^{-1} est donné Figure 6.26. Les valeurs précises des harmoniques sont données dans le Tableau 6.8.

Harmoniques identifiées (tr^{-1})
13,939
28,410
76,940
416,087
1249,129
1666,039
...

Tableau 6.8 – Liste non exhaustive des harmoniques identifiées et affinées pour l’axe 1 pour une vitesse de rotation de $0,05 \text{ rad.s}^{-1}$.

6.4.3.7 Identification des amplitudes et des déphasages

Nous identifions maintenant l’amplitude A_i et la phase ϕ_i de chaque harmonique précédemment identifiées grâce à la résolution linéaire par les moindres carrés [BITTENCOURT et GUNNARSSON 2012 et DAEMI et HEIMANN 1997]. Nous supposons que nous connaissons précisément les harmoniques principales de notre bruit mécanique contenu dans le couple mesuré grâce à la méthode précédente.

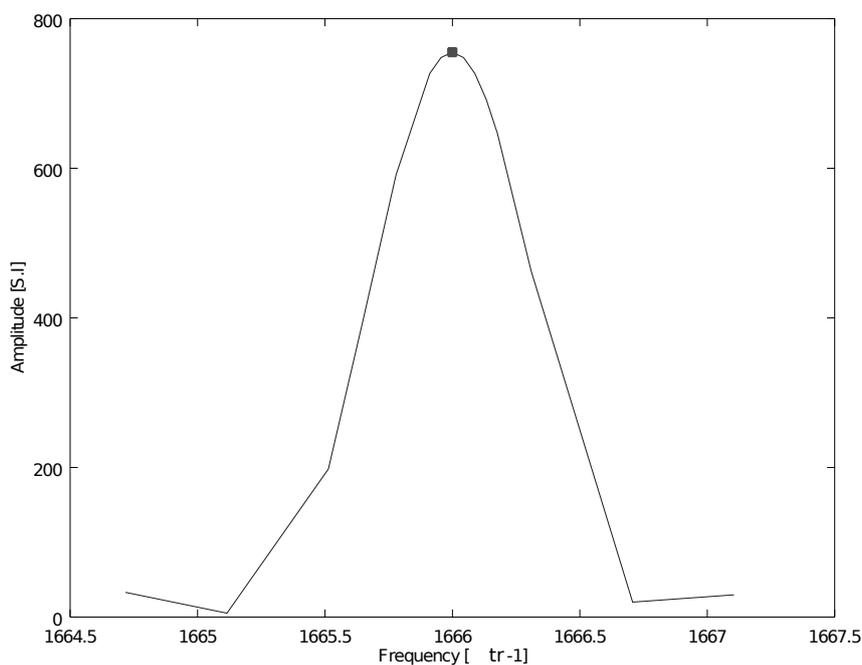


Figure 6.26 – Exemple d'identification des harmoniques par fenêtrage.

Nous réécrivons l'équation du modèle du bruit mécanique de façon à obtenir une équation linéaire en paramètre ϕ_i et A_i à partir de l'équation 6.24.

$$\tau_P(q) = \sum_{i=0}^n (K1_i \times \cos(2 \times \pi \times f_i \times q) + K2_i \times \sin(2 \times \pi \times f_i \times q)) \quad (6.25)$$

Avec :

$$\tau_P(q) = \sqrt{K1_i^2 + K2_i^2} \left(\frac{K1_i}{\sqrt{K1_i^2 + K2_i^2}} \cos(2 \times \pi \times f_i \times q) + \frac{K2_i}{\sqrt{K1_i^2 + K2_i^2}} \sin(2 \times \pi \times f_i \times q) \right) \quad (6.26)$$

Donc :

$$\cos(\phi_i) = \frac{K1_i}{\sqrt{K1_i^2 + K2_i^2}}$$

$$\sin(\phi_i) = \frac{K2_i}{\sqrt{K1_i^2 + K2_i^2}}$$

Donc nous trouvons ϕ_i :

$$\phi = \text{atan2}(\cos(\phi_i), \sin(\phi_i)) \quad (6.27)$$

Ainsi que A_i :

$$A_i = \text{sqrt}(K1_i^2 + K2_i^2) \quad (6.28)$$

Nous identifions l'amplitude avec la formule 6.28 et le déphasage avec la formule 6.27.

6.4.4 Étude de la variation des paramètres A , f et ϕ en fonction de la vitesse angulaire

Nous venons de proposer une méthode permettant d'identifier les fréquences, les amplitudes et les déphasages caractéristiques du bruit mécanique pour une vitesse constante donnée. Dans le cas d'utilisation considéré du robot Orion, la vitesse angulaire sera mesurée et le modèle du couple sera calculé en temps-réel à partir des paramètres A , f et ϕ identifiés hors-ligne. Il est nécessaire de vérifier que les paramètres identifiés ne varient pas en fonction de la vitesse, ou s'ils varient que cette variation soit prédictible et modélisée.

6.4.4.1 Fréquences

La méthode d'identification des fréquences principales présentes dans le signal de couple mesuré a été utilisée pour chaque acquisition à vitesse constante. Le tableau 6.9 donne les 15 fréquences principales identifiées pour trois vitesses angulaires distinctes. Nous observons que les fréquences principales ne sont pas identiques pour toutes les vitesses de rotation. Nous devons donc choisir les fréquences à prendre en compte dans le modèle final à partir de l'étude de l'identification des fréquences principales de chaque vitesse.

	0,1 rad.s-1	0,05 rad.s-1	0,02 rad.s-1
1	1,1236	1,1642	2,1110
2	2,1972	2,2184	5,5017
3	2,9055	4,5216	7,4553
4	6,7582	12,2454	10,1336
5	12,2713	66,2223	12,2570
6	15,9796	66,9018	36,7572
7	66,2121	198,4070	66,8453
8	66,8753	198,7865	133,6906
9	73,5634	199,6807	200,5308
10	99,6574	200,5450	265,1652
11	132,945	201,9739	267,3499
12	198,7981	204,4818	530,2940
13	200,5238	265,1583	534,7946
14	265,1498	530,2967	2801,849
15	0,3000	0,2900	0,3062

Tableau 6.9 – Fréquences principales identifiées pour 3 vitesses de rotations de l'axe 1 différentes

6.4.4.2 Amplitude et déphasage

Dans la partie 6.4.2.3 nous avons vu que l'amplitude de la variation du couple en fonction de la position variait suivant la vitesse angulaire. Cela peut signifier que les amplitudes ou

les déphasages des harmoniques identifiées précédemment ne sont pas constantes suivant la vitesse de rotation. La Figure 6.27 nous montre pour les deux fréquences 1060 tr-1 et 1666 tr-1, la variation de l'amplitude associée à ces fréquences pour les différentes vitesses de rotation étudiées. Nous constatons que l'amplitude n'est pas constante suivant la vitesse angulaire, et aussi qu'il y a un phénomène de résonance à la vitesse $0,05 \text{ rad.s}^{-1}$.

Le modèle décrit par l'équation 6.24 peut être écrit de sorte que les paramètres A_n et ϕ_n ne soient pas constants. Nous réécrivons le modèle sous la forme :

$$\tau_b(q, \dot{q}) = \sum_{i=0}^n A_i(\dot{q}) \times \cos(2 \times \pi \times f_i \times q + \Phi_i(\dot{q})) \quad (6.29)$$

Avec $A_i(\dot{q})$ et $\Phi_i(\dot{q})$ des fonctions à identifier.

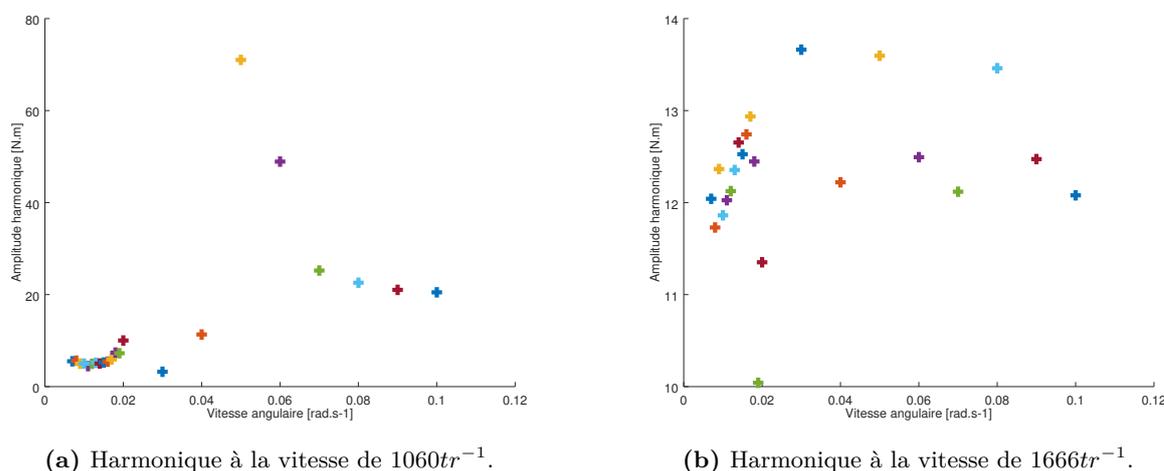


Figure 6.27 – Variation de l'amplitude de l'harmonique 1060 et 1666 tr^{-1} pour différentes vitesses de rotation de l'axe 1.

6.4.5 Généralisation et unicité du modèle

Après avoir démontré les variations des paramètres A , f et ϕ en fonction de la vitesse angulaire, nous donnons une méthode permettant d'en tenir compte lors de l'utilisation du modèle.

6.4.5.1 Identification d'un ensemble de fréquences communes

La méthode utilisée pour définir un ensemble de fréquence composant le signal de bruit mécanique communes à toutes les vitesses de rotations, utilise l'identification des fréquences principales présentes dans chacune des mesures à vitesse constante. Nous utilisons un algorithme développé spécifiquement pour cette application, qui consiste à identifier toutes les fréquences proches (ne différant pas de plus de 0,1 rad-1) et, à ne garder pour le modèle, que les groupes de

fréquences proches comportant au moins 3 détections à des vitesses différentes, pour ensuite en calculer la moyenne. Nous obtenons un ensemble de fréquences représentatif des différentes fréquences identifiées pour chaque vitesse. Nous réutilisons ensuite notre méthode d'identification des amplitudes et des déphasages pour chaque vitesse et ce, pour chaque fréquence identifiée par cet algorithme.

6.4.5.2 Identification des splines de variation de l'amplitude et de la phase

Les amplitudes et les déphasages de chaque fréquence diffèrent pour chaque vitesse de rotation. Notre but est d'identifier la fonction permettant, pour une fréquence donnée, de lier l'amplitude de celle-ci à la vitesse angulaire, de même pour le déphasage. Nous utilisons une modélisation par spline, de nombre de point de contrôle à déterminer, car une modélisation par polynôme fait intervenir un ordre élevé qui produit des oscillations fortes entre les vitesses angulaires identifiées. Nous avons ensuite comparé la modélisation du signal par sa fréquence, son amplitude et sa phase (équation 6.24) à sa modélisation par sa fréquence, son amplitude de cosinus et son amplitude de sinus (équation 6.25) en utilisant des splines cubiques à 5 points de contrôle (Figure 6.28). Nous observons une amélioration de la modélisation lorsque nous utilisons le modèle fréquence/Acos/Bsin.

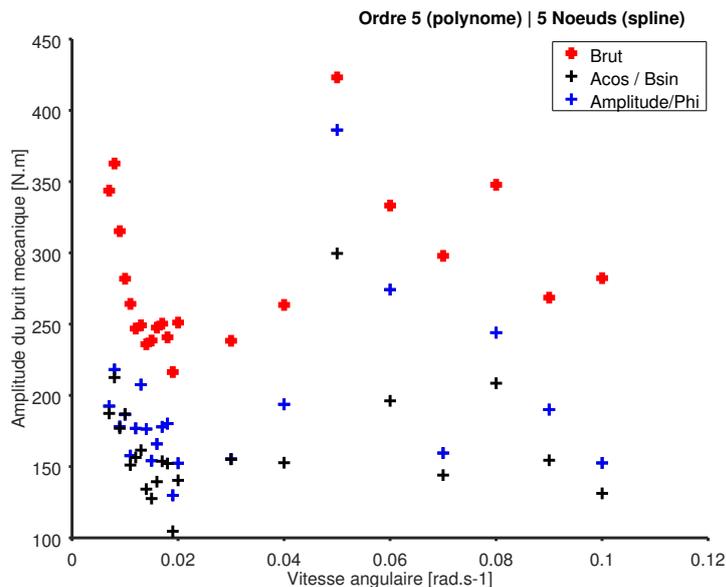


Figure 6.28 – Comparaison du résidu de la modélisation des frottements en utilisant le modèle fréquence/amplitude/déphasage et fréquence/A/B.

Nous observons sur les Figures 6.30 et 6.29 l'influence du nombre de points de contrôle sur la reconstruction des coefficients A et B du modèle de frottement. Un nombre élevé de points de contrôle fait apparaître de fortes oscillations entre les points de mesure de la vitesse angulaire. La modélisation ne sera probablement pas précise pour les vitesses non étudiées durant nos essais. Un nombre acceptable de points de contrôle est 16. Cependant, la Figure 6.31 montre que l'utilisation de 15 points amène à des résultats identiques à l'utilisation de 16 points. De

plus, si l'on considère l'erreur maximum, l'utilisation de 10 points de contrôle est suffisante (Figure 6.31b). Nous utiliserons par la suite 10 points de contrôle.

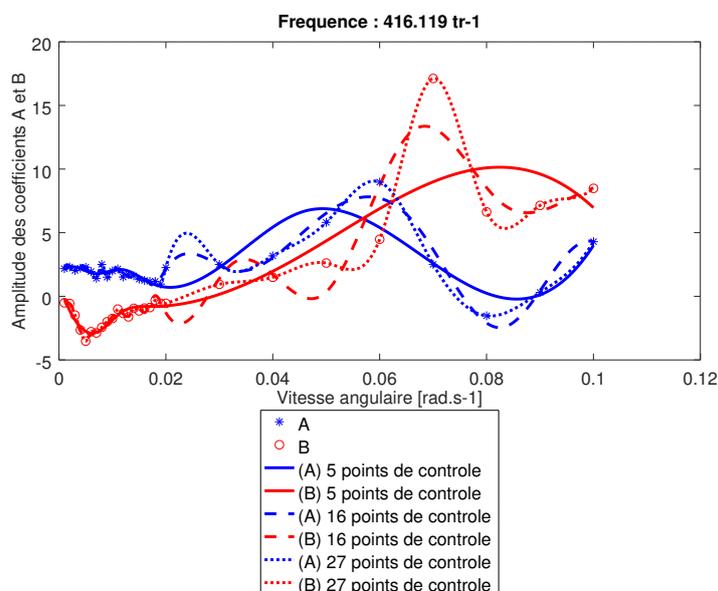


Figure 6.29 – Influence du nombre de points de contrôle sur la reconstruction des coefficients A et B pour la fréquence 66 rad^{-1} .

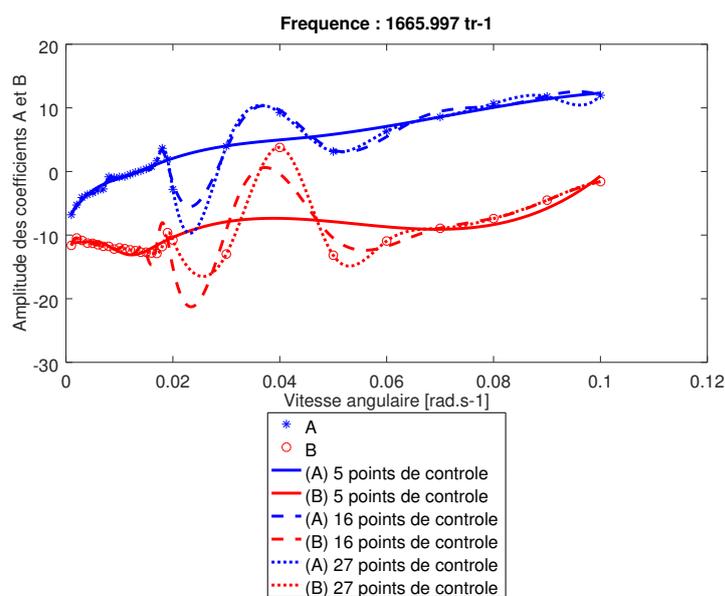


Figure 6.30 – Influence du nombre de points de contrôle sur la reconstruction des coefficients A et B pour la fréquence 265 rad^{-1} .

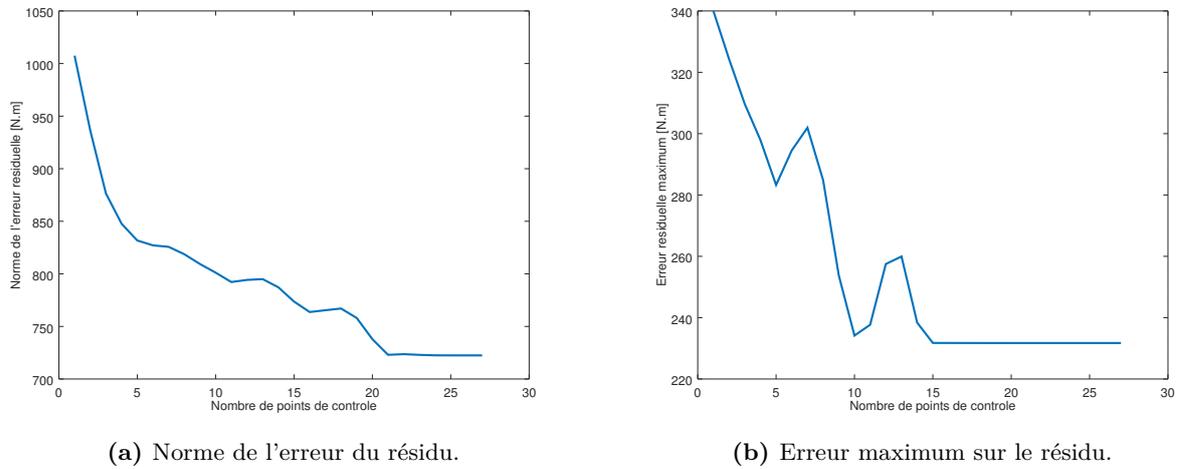


Figure 6.31 – Influence du nombre de points de contrôle sur la norme de l'erreur et l'erreur maximum du résidu de modélisation du bruit mécanique.

6.4.5.3 Résultats obtenus en pratique

Après avoir effectué l'identification des paramètres du modèle de bruit mécanique avec 10 points de contrôle (équation 6.25) nous calculons le résidu de ce modèle en soustrayant le couple mesuré au couple $\tau_P(q, \dot{q})$ modélisé (Figure 6.32). Les résultats pour différentes vitesses de rotations sont donnés Figure 6.33.

6.4.5.4 Modèle complet

Nous construisons un modèle complet intégrant les frottements secs/visqueux variables avec la température ainsi que le modèle de bruit mécanique dans un seul et même modèle. La Figure 6.34 montre la diminution du résidu du couple mesuré lors de l'utilisation du modèle complet par rapport au modèle de frottements secs/visqueux variables avec la température seul.

6.4.5.5 Automatisation de l'identification

Afin d'utiliser notre méthode à la production industriel en série de robots nous proposons une méthode automatisée permettant de calculer le nombre d'harmoniques à prendre en compte dans le modèle, la fréquence de chaque harmonique, ainsi que les fonctions de spline pour l'amplitude et la phase de chaque harmonique. Nous avons utilisé un script Octave/MatLab qui prend en entrée plusieurs acquisitions de couple à vitesse constante de l'axe considéré sous la forme de fichiers csv ou json. Nous avons effectué l'identification et le calcul du résidu pour différents robots Orion. Certains robots ont subi des améliorations par rapport au robot PT3 principalement étudié. Les résultats des résidus sont donnés dans les Figures 6.35a et 6.35b.

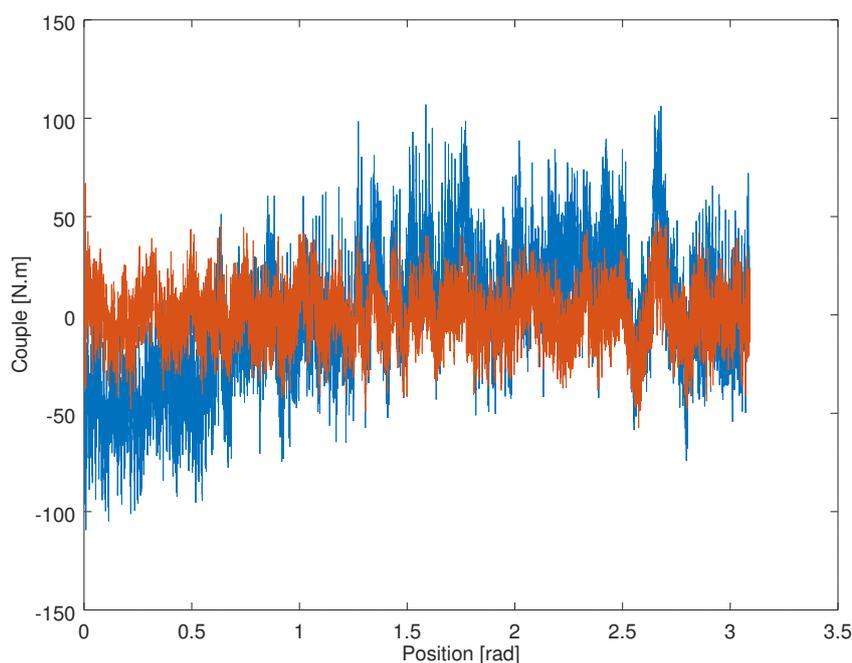


Figure 6.32 – Résidu de la modélisation du bruit mécanique après identification, pour une vitesse angulaire de $0,019 \text{ rad.s}^{-1}$.

6.5 Quantification de la précision de détection

Nous souhaitons quantifier la sensibilité de la détection de collisions, c'est-à-dire la force maximale que pourra exercer le robot sur l'opérateur ou l'environnement. Notons, que vu que la détection se fait au niveau de l'axe du moteur, la sensibilité de détection dépend de l'endroit où l'effort est exercé. Par exemple, au niveau de l'axe 6, un effort de collision à proximité de l'axe du moteur (l'effecteur) produirait un couple beaucoup plus faible que si cet effort se situait à l'extrémité de la table du fait du bras de levier plus important. Cela est valable pour tous les axes. De ce fait, mesurer la sensibilité en un point précis n'est pas significatif de la performance de la détection de collisions sur l'ensemble de robot. Nous avons tout de même proposé une expérience permettant de mesurer la sensibilité de détection en un point précis pour une première expérience. Nous installons un capteur d'efforts fixé sur la table médicale. Un câble relativement élastique est rigidement lié au capteur et à une armature fixe de la salle (Figure 6.36).

Nous imposons une vitesse de rotation articulaire ce qui va tendre le câble et engendrer un effort sur l'axe 6 par l'intermédiaire du bras de levier entre l'axe 6 et le capteur d'efforts. Au début du mouvement, le câble est détendu puis le câble se tend avec l'effet de la rotation de l'axe 6. Nous mesurons l'effort exercé par le câble sur le capteur d'efforts. L'effort mesuré va croître jusqu'à ce que la collision soit détectée et le robot arrêté. Nous mesurons l'effort maximum qui correspondra en cas clinique à l'effort maximal qu'exercera le robot sur son environnement à

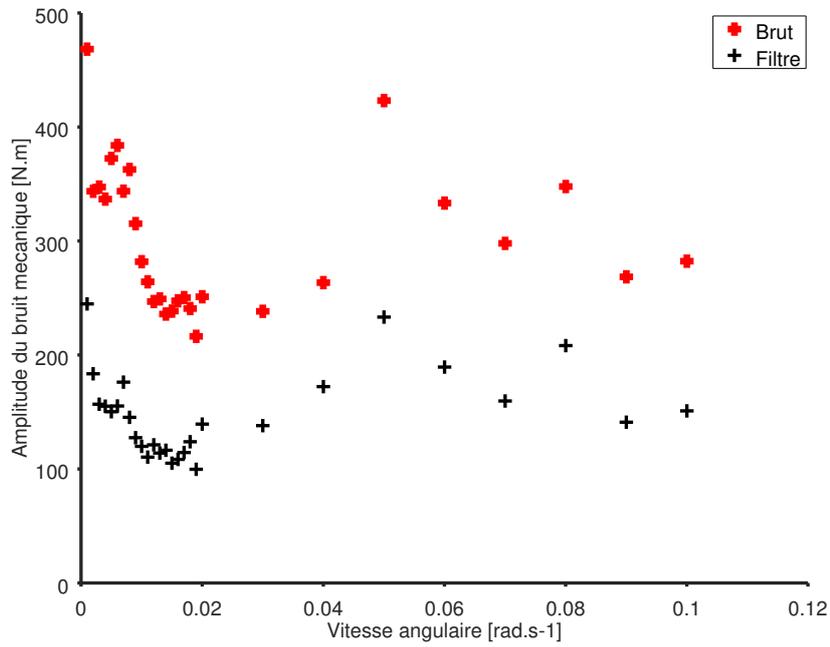


Figure 6.33 – Couple brut et résidu pour des vitesses de rotation de l’axe 1 de $0,01 \text{ rad.s}^{-1}$ à $0,1 \text{ rad.s}^{-1}$.

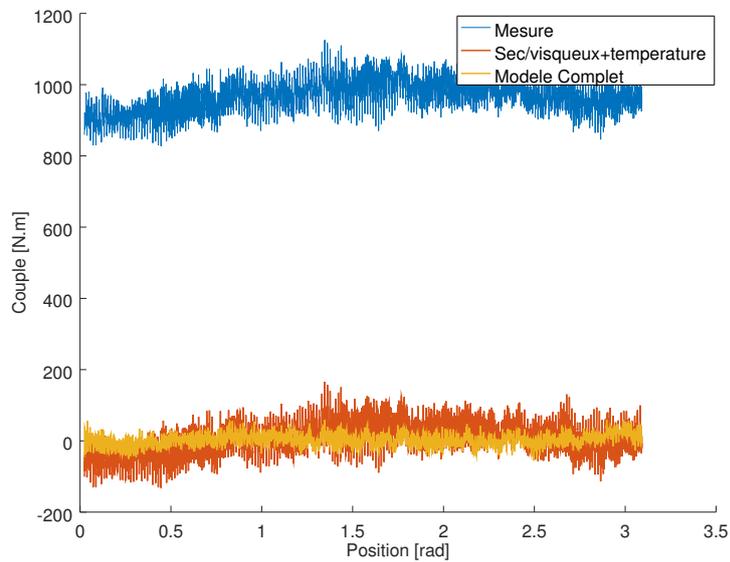


Figure 6.34 – Couple brut, filtré par le modèle de frottements secs/visqueux uniquement et filtré par le modèle complet

l’endroit du capteur d’effort et pour une zone du corps de même élasticité que celle du câble

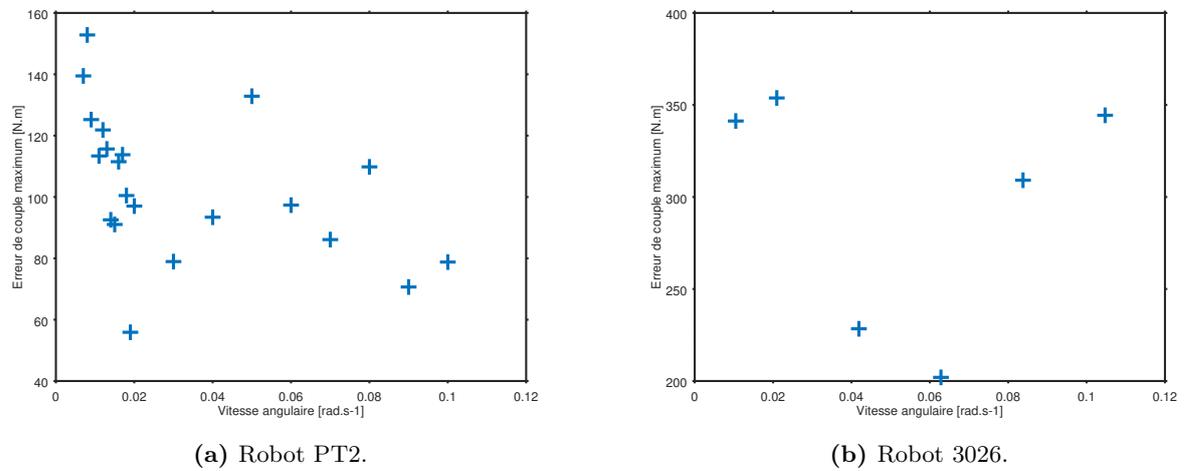


Figure 6.35 – Résidu de la modélisation du couple à l’axe 1 par le modèle complet pour les robots PT2 et 3026.

utilisé.

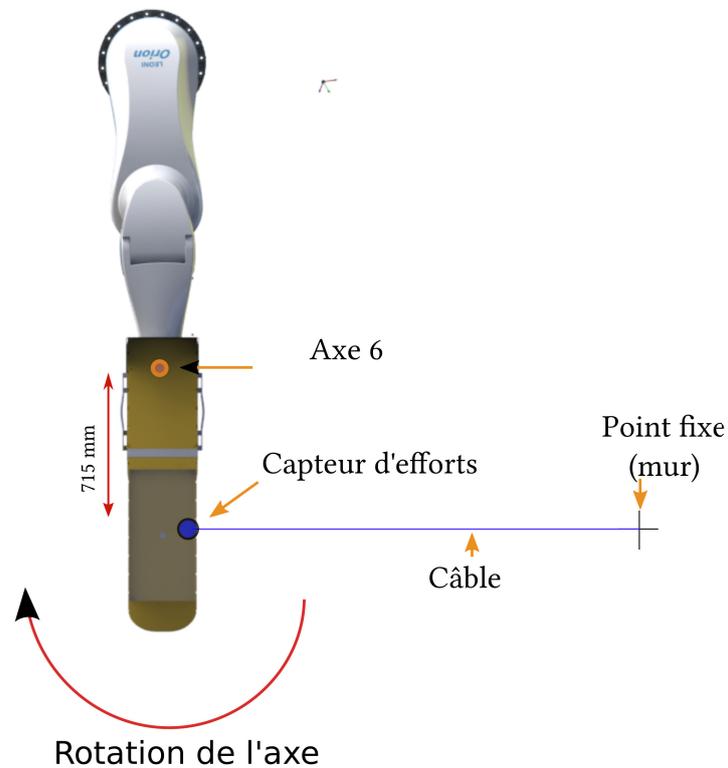


Figure 6.36 – Mise en place de l’expérience permettant de quantifier le seuil de détection lors d’une collision localisée à 715 mm de l’axe 6.

Résultats La sensibilité de détection obtenue, avec une méthode de détection antérieure à celle présentée dans la partie précédente, est de 120 N qui correspond à la valeur de la norme de l'effort appliqué par le robot sur le câble (Figure 6.37).

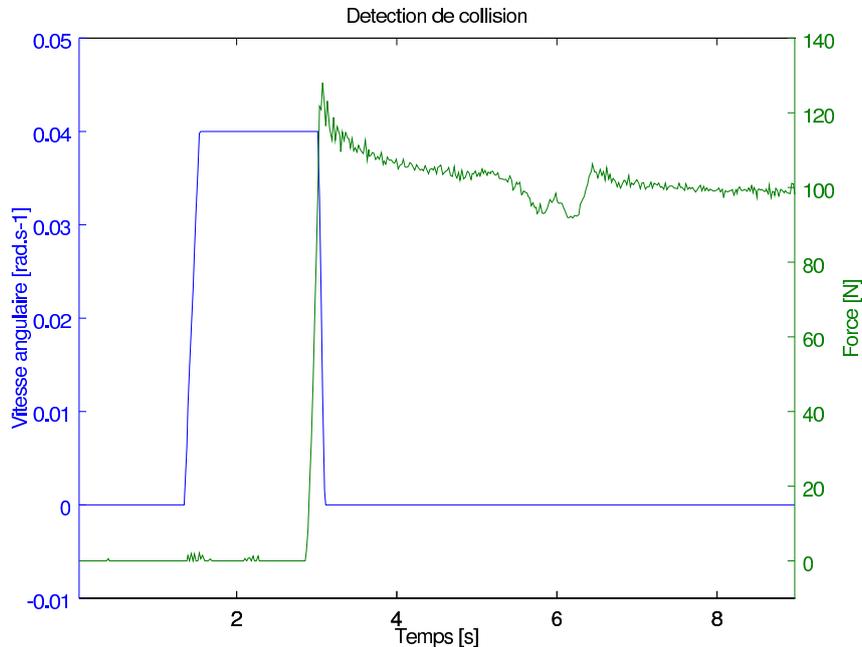


Figure 6.37 – Force exercée par le robot sur le câble lors d'un essai de collision.

Conclusion Le seuil de collision que nous nous étions fixé était de 65 N. La valeur obtenue pour une collision s'effectuant à 715 mm est de 120 N, ce que nous considérons comme insuffisant car dans le cas d'utilisation clinique considéré, des collisions peuvent se produire à une distance inférieure à 715 mm, le seuil de détection sera supérieur à 120 N.

6.6 Détection de collisions en utilisant un capteur d'efforts

Nous avons vu dans la partie 6.4 que la sensibilité de détection en utilisant la mesure du couple moteur était linéairement dépendante de la position de la collision par rapport à l'axe étudiée du fait du bras de levier. En effet, plus la collision se produit loin de l'axe, plus la sensibilité sera importante. De plus, dans la partie 6.5, nous avons remarqué que la méthode de détection de collision en utilisant l'axe 6 seul ne permettait pas de répondre au cahier des charges. La prise en compte des axes 1 à 5 permet d'améliorer dans certains cas la précision de détection, cependant n'ayant pas pu le vérifier jusqu'à présent nous proposons de valider une seconde technique qui pourra être utilisée en parallèle de la détection de collisions par les axes 1 à 6. Nous souhaitons utiliser le capteur d'efforts situé entre la table et l'effecteur afin de mesurer les efforts appliqués par le robot sur l'environnement au niveau de la table afin de détecter une collision.

Le capteur mesure en permanence les efforts appliqués par l'environnement sur la table du robot exprimés dans le repère du capteur. Ces efforts sont identiques à ceux exercés par la table

(i.e le robot) sur l'environnement par le principe d'action-réaction. Nous définissons un seuil d'effort au delà duquel une collision est présumée, ce seuil ne doit pas être trop faible pour ne pas détecter de fausses collisions mais pas trop élevé pour pouvoir détecter des efforts dangereux pour les personnels. Une fois la collision détectée, nous commandons une vitesse nulle dans l'espace opérationnel du robot par le *MCU*. Le robot ralenti jusqu'à s'arrêter.

Un membre de l'équipe LEONI CIA Cable Systems à implémenté une preuve de concept de détection de collision utilisant le capteur situé entre la table et l'effecteur en Ruby par l'API du robot Orion. Nous utilisons son travail pour quantifier le seuil de détection avec un protocole similaire à celui utilisé pour la détection de collisions par mesure des couples moteurs. Le protocole que nous proposons est le suivant ; un script en langage Ruby commande le robot en translation dans l'espace opérationnel. Un obstacle est positionné sur le chemin de la trajectoire théorique du robot (mouvement de translation sur l'axe X). Nous mesurons le déplacement de l'effecteur sur l'axe X ainsi que les efforts appliqués par l'environnement sur le capteur d'efforts (norme Euclidienne).

Nous observons que l'effort appliqué par le robot en fin de mouvement est de 85 N (Figure 6.38). Cependant, la détection de la collision s'effectue aux alentours de 60 N. Cependant pendant la décélération du robot les efforts appliqués par l'environnement sur le robot augmentent. L'algorithme a ordonné au robot de s'arrêter en utilisant la décélération maximale autorisée ce qui a conduit à un temps d'arrêt de 500 ms amenant une augmentation de l'effort appliqué par le robot sur l'environnement de 58 N à 85 N. Le seuil de détection peut être amélioré en permettant au robot de décélérer plus rapidement. De plus, nous pouvons faire l'hypothèse que ce seuil de détection reste constant en fonction de la localisation de la collision sur la table médicale.

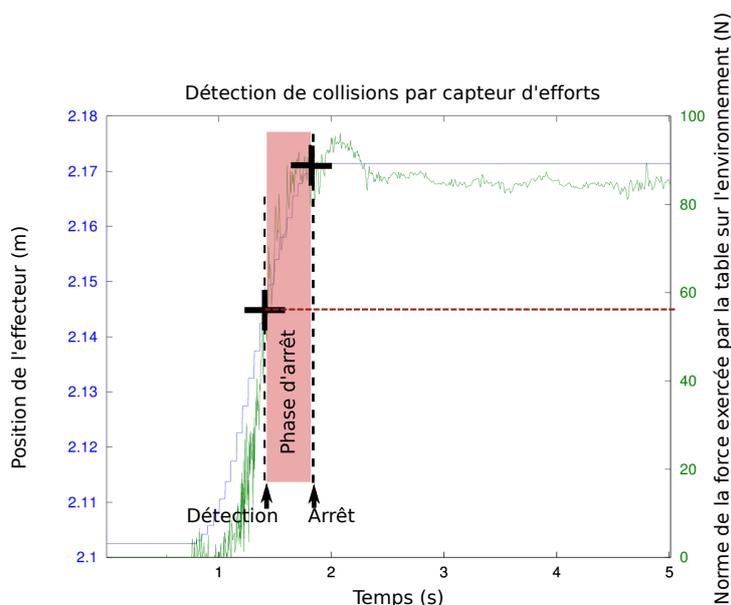


Figure 6.38 – Résultat de mesure de la performance de la détection de collision en utilisant un capteur d'efforts situé entre la table et l'effecteur.

Conclusion Nous avons vu que l'utilisation du capteur d'effort situé entre la table et l'effecteur permettait d'améliorer la détection de collision et permettait d'obtenir une précision de détection de collisions non liée à la localisation de la collision sur la structure du robot. Nous pensons que cette méthode peut être utilisée en parallèle de la détection de collisions par chaque axe de rotation.

6.7 Dispositif de sécurité simplifié basé sur des murs virtuels

Nous souhaitons nous assurer que le robot évolue en permanence dans un volume restreint de son espace de travail. Le volume dans lequel doit évoluer le robot est défini au maximum par 6 plans (murs) formant un cube (Figure 6.40). Les murs sont alignés sur les axes du repère de la base du robot. Les murs virtuels permettent de limiter le mouvement de l'effecteur du robot.

Un algorithme exécuté en boucle mesure la position de l'effecteur du robot et la compare avec la position des plans définissant le volume dans lequel il doit évoluer. Dès que l'effecteur atteint un mur, l'algorithme attache un ressort virtuel entre l'effecteur et le mur. De cette façon, il existe une force de rappel ramenant l'effecteur jusqu'au mur. En d'autres termes, plus l'opérateur tente de dépasser le mur, plus il est difficile de le dépasser encore plus à cause de la force de rappel du ressort virtuel (Figure 6.39). Ce principe [ROSENBERG et ADELSTEIN 1993] a été introduit dans une commande en impédance/admittance dans [SOUSA, CORTESÃO et QUEIRÓS 2009 et NOROUZZADEH, LORENZ et HIRCHE 2012]. Elle fut étendue à de l'évitement de collisions en utilisant un capteur à mesure de temps de vol [BASCETTA et al. 2010] et utilisée dans un robot industriel ABB IRB 140 [BARCELLINI et al. 2012].

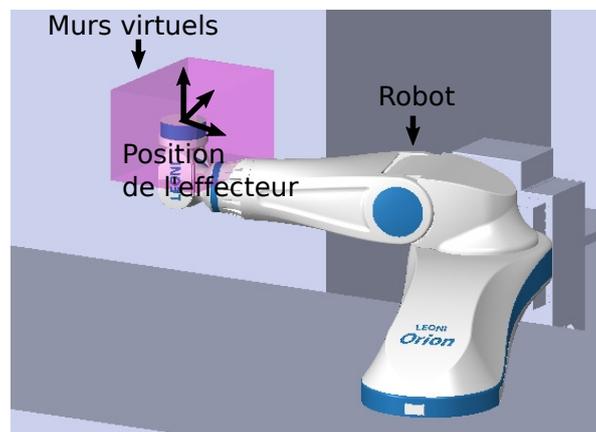


Figure 6.39 – Vue isométrique des murs virtuels utilisés avec le robot Orion.

Ce phénomène tire partie de la commande en admittance définie dans la partie 4.1. Nous avons vu que pour que le robot comanipulé évolue librement dans l'espace sans revenir à la position initiale du mouvement, nous avons posé $K = 0$ dans l'équation d'admittance 4.1. Pour que le mur virtuel fonctionne, nous allons changer la valeur de raideur virtuelle (K) pour une valeur non nulle pour l'axe pour lequel l'effecteur dépasse le mur virtuel.

Nous avons implémenté cette technique dans les premiers travaux de la thèse, lorsque nous utilisions la co-manipulation avec l'API Ruby du robot Orion. L'algorithme de murs virtuels était donc implémenté en Ruby en parallèle de la co-manipulation.

Nous définissons un plan limite sur Z uniquement afin d'obtenir un comportement libre de co-manipulation sur les axes X et Y mais limité en hauteur sur l'axe Z , le comportement obtenu est similaire à un plafond virtuel. Un opérateur manipule le robot en utilisant cette commande sans avoir de contrainte ni d'instruction autre que de déplacer le robot dans l'espace de travail de manière non prédéfinie. Une fois la limite de hauteur en Z atteinte, il devient de plus en plus dur pour l'opérateur de continuer le mouvement dans cette direction du au ressort virtuel de rappel du mur virtuel. La raideur initialement nulle au début du mouvement est passée à 1500 N/m lorsque le mur fut atteint (Figure 6.40). Le problème de cette méthode est la discontinuité de la raideur que nous aurions pu corriger en utilisation une raideur variable de 0 jusqu'à une valeur maximale avec une fonction arc tangente. La raideur une fois le mur atteint peut être ajustée afin d'obtenir le ressenti souhaité. Une forte raideur amènera un arrêt brutal une fois le mur atteint mais une raideur plus faible amènera un comportement moins brutal mais permettra à l'opérateur de dépasser plus facilement le mur virtuel.

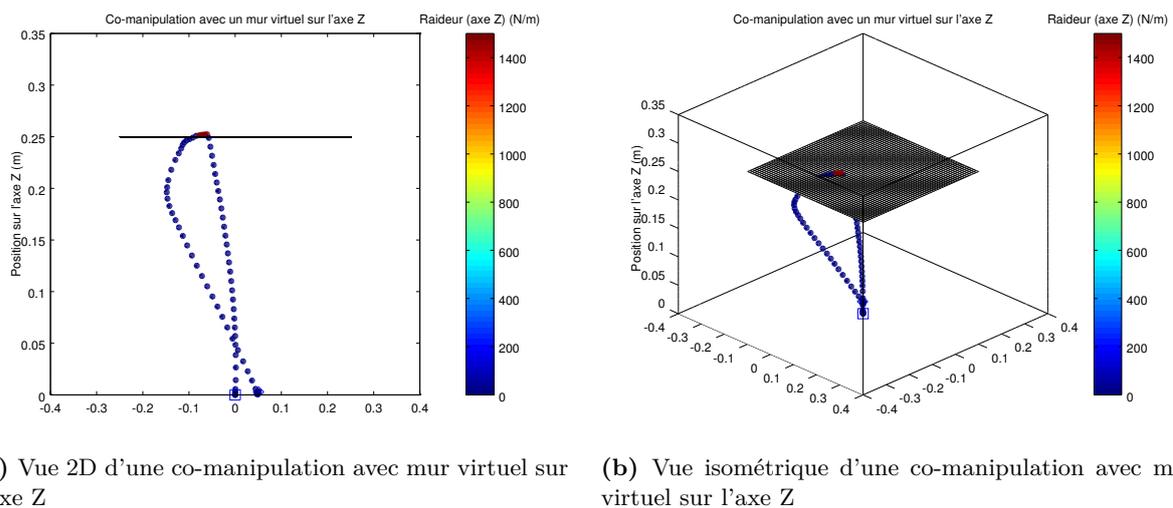


Figure 6.40 – Vue isométrique et 2D d'une co-manipulation avec mur virtuel sur l'axe Z avec le robot Orion.

6.8 Conclusion

L'analyse de risque associée au robot Orion, utilisé dans un environnement médical, fait apparaître la nécessité de disposer d'un mécanisme de détection de collisions pour renforcer la sécurisation de ses mouvements. Le cahier des charges de la détection de collisions ne peut pas se baser sur une norme adaptée au domaine médical et au robot Orion en particulier car une telle norme n'existe pas encore aujourd'hui. A contrario, une norme existe pour les robots industriels; nous nous sommes basés sur celle-ci afin de définir un seuil d'effort maximal de 65 N appliqué par le robot sur un opérateur. Notre solution se base sur l'utilisation de la mesure de couple de chaque moteur, qui est comparée aux résultats d'un modèle de couple théorique dont

les paramètres sont identifiés automatiquement pour chaque axe de chaque robot. Les parties de ce modèle que nous avons étudiées s'adressent aux rôles des frottements secs/visqueux, de la température, du bruit de mesure et du bruit fréquentiel lié aux engrenages. Sur l'ensemble des paramètres pris en compte on peut noter que :

- Les frottements ne sont pas symétriques par rapport au sens de rotation, ce qui nous oblige à identifier les paramètres du modèle pour chaque sens.
- Les frottements secs/visqueux peuvent être modélisé par un modèle (non symétrique) linéaire.
- La température fait varier linéairement les coefficients de frottements secs/visqueux, si bien que nous proposons un modèle englobant à la fois les frottements secs/visqueux et la température.
- Les frottements variables avec la position angulaire se révèlent être liés à la mécanique de transmission de façon périodique et sinusoïdale.

Nous avons mis en évidence que des oscillations d'efforts significatives sont dues aux réducteurs, et peuvent être modélisées par des sinusoïdes dépendant de la position et variant en fonction de la vitesse. Il convient d'identifier les paramètres de ce modèle sinusoïdal pour chaque axe de chaque robot. Avec une méthode de détection de collisions antérieure à celle présentée dans la partie 6.4.3 et implémentée uniquement sur l'axe 6, le seuil de détection d'une collision se produisant à 715 mm de l'axe étudié est de 120 N, ce qui est supérieur aux données du cahier des charges. La méthode prenant en compte la totalité du bruit mécanique devrait permettre d'améliorer ce seuil de détection. Malgré cela, et afin d'améliorer la sensibilité de détection nous avons développé une solution utilisant le capteur d'effort situé entre la table et l'effecteur (capteur utilisé conjointement avec la méthode 2 de co-manipulation). Dans un cas de collision similaire mais en utilisant le capteur d'effort ATI Omega-190 comme moyen de détection, le seuil de détection de la collision est de 85 N. La collision ayant été cependant détectée à 58 N, il est possible d'envisager de réduire ce seuil si l'on augmente la capacité de freinage du robot dans ce cas-ci. Le robot s'arrêtant plus rapidement, les efforts engendrés par la collision seront diminués.

Conclusion et perspectives

« Avant de chercher un remède, il faut trouver le mal. La première condition pour préparer un civet de lapin est d'abord d'attraper le lapin. »

Isaac ASIMOV

6.9 Conclusion

Dans le contexte de traitement oncologique en protonthérapie, la société LEONI CIA Cable Systems a développé un robot sériel permettant le positionnement du patient dans le Gantry. Ce robot diffère des positionneurs de patients utilisés aujourd'hui par le fait qu'il a été conçu spécifiquement pour l'application médicale contrairement aux robots existants qui sont des robots industriels adaptés pour ce besoin.

Pour répondre aux besoins médicaux, il a été décidé par l'entreprise LEONI CIA Cable Systems de concevoir le robot à partir d'une structure type exosquelette intégrant les moteurs et les câbles à l'intérieur de la structure, ainsi que d'utiliser des réducteurs de fort rapport de réduction limitant sa vitesse maximale. Ces caractéristiques particulières font du robot Orion un robot de forte inertie.

Le but de cette thèse est de développer un mode de co-manipulation manuel permettant à l'opérateur de déplacer le patient (i.e le robot) de façon intuitive, transparente et sécurisée qui prenne en compte la forte inertie du robot Orion.

La commande choisie à partir de l'état de l'art est une commande compliant dite en admittance, qui rend le comportement du robot équivalent à celui d'un système masse-amortisseur (Kelvin-Voigt) lorsque l'opérateur exerce son effort sur le dispositif haptique dédié à ce mode

de manipulation. La raideur virtuelle de cette commande a été supprimée afin d'obtenir le comportement en espace libre voulu. Un simulateur nous a permis de comprendre l'influence des paramètres de masse virtuelle (M) et d'amortissement virtuel (C). L'amortissement virtuel permet de régler la sensibilité voulue par l'opérateur ; le rapport qui existe entre la force exercée par celui-ci et la vitesse de l'effecteur du robot. La masse virtuelle agit comme un filtre passe-bas, elle permet d'obtenir un mouvement dont la vitesse ne varie pas brutalement, cela est bénéfique pour les confort du patient et de l'opérateur. Un réglage plus fin des paramètres est nécessaire afin de profiter de tous les avantages de cette commande.

La contrainte industrielle d'implémentation de cette commande dans le contrôleur existant du robot Orion a été traitée en utilisant la transformée en Z bilinéaire permettant de prendre en compte la discrétisation de la commande et le délai de la boucle de commande. Nous pouvons à ce jour envisager l'industrialisation du robot utilisant ce mode de commande.

Cette commande a été implémentée de 3 manières différentes utilisant des dispositifs haptiques distincts : la méthode barre en U (méthode 1), la méthode capteur sous la table (méthode 2) et la méthode joystick 3d (méthode 3). Dans un soucis de quantification de l'apport de ces 3 méthodes, deux expériences haptiques basées sur un état de l'art ont été proposées ; une évaluant la transparence et l'autre la justesse dynamique. Dans le réglage actuel des commandes, nous observons une nette amélioration du temps de pré-positionnement du patient et de la douceur du geste effectué par l'opérateur lors de l'utilisation des 3 méthodes haptiques proposées. En effet, la variation de vitesse au cours du mouvement par les 3 méthodes est sensiblement inférieure que lors de l'utilisation du TeachPendant qui produit un mouvement itératif. La transparence est nettement améliorée pour les méthodes 1 et 2, un peu moins pour la méthode 3 (indice LAS). Les deux expériences proposées permettent de distinguer la méthode 1 et la méthode 2 comme plus rapides et intuitives que la méthode 3. Des expériences mettant en jeu une manipulation différente permettra de montrer que l'utilisation de la méthode avec capteur sous la table est plus intuitive et pratique pour l'opérateur qui peut effectuer un déplacement depuis n'importe quel endroit autour de la table.

L'amélioration de la sécurité pour l'opérateur et pour le patient consiste en un mécanisme de détection de collisions prenant en compte les forts rapports de réduction et les différentes technologies des réducteurs du robot de forte inertie, par comparaison de la mesure de couple et d'un modèle théorique des frottements propres à chaque axe du robot. Le travail a consisté à développer une partie du modèle de frottements : les frottements secs et visqueux, l'influence de la température et la variation du couple suivant la position angulaire. Les éléments mécaniques de transmission associés à la forte masse du robot Orion posent un verrou technique quant à la modélisation des frottements variables avec la position angulaire. Un modèle basé sur une somme de signaux sinusoidaux finement identifiés à partir d'une méthode linéaire automatisée a permis de modéliser les phénomènes de bruits mécaniques dus à ces engrenages pour l'axe 1 du robot mais est extensible aux autres axes. Le modèle proposé s'adapte donc aux autres axes du robots et permet de prédire les efforts avec un résidu d'erreur d'environ 100 N.m. La validation expérimentale a montré que cette méthode permet d'atteindre 100 N de détection avec l'axe 6 seul, lorsque la collision se situe à 715 mm de l'axe 6 du robot. Une méthode utilisant le capteur sous la table permet d'améliorer le seuil de détection à 85 N voire 58 N si la capacité de freinage du robot est augmentée.

6.10 Perspectives

6.10.1 Commande en co-manipulation

La méthode 2 de co-manipulation (capteur situé entre la table médicale et l'effecteur) devrait permettre une intuitivité accrue pour l'opérateur par rapport aux méthodes 1 et 3. Pour cela la dynamique du système patient-table devra être prise en compte dans la commande à l'aide du modèle visco-élastique développé pendant cette thèse. Cela signifie implémenter le modèle dans le contrôleur du robot afin de soustraire aux valeurs d'efforts, lues par le capteur Omega-190, les valeurs prédites par le modèle. De plus, la stabilité n'a pas encore été étudiée de manière formelle. Les paramètres M et C de la commande en admittance devront être réglés en « temps-réel de l'application » afin de garantir la stabilité de la commande quelle que soit la raideur du bras de l'opérateur et les efforts appliqués par celui-ci. De plus, des expériences de quantifications du confort et de la justesse statique ont été préparées mais n'ont pas pu être testées par manque de temps ; la mise en place de ces expériences permettra de définir les paramètres optimaux de la commande en admittance.

6.10.2 Détection de collisions

Les frottements secs et visqueux dépendent de la température mais celle-ci n'est pas mesurable en temps-réel. Dans un futur proche il est possible d'ajouter des capteurs de température dans les engrenages ou d'utiliser les sondes situées dans les moteurs. Si cela n'est pas envisageable, étant donné que la température évolue lentement contrairement à la force d'un impact, il doit être possible de l'estimer.

Pour le moment, seul un axe a été complètement modélisé, celui subissant les efforts les plus importants ; la même étude sur les autres axes permettra d'améliorer la précision de détection. Il reste aussi, avec la détection sur tous les axes, à étudier quelle est la précision en fonction de la configuration, de la position du point de contact et de la direction de la force. Il n'a pas été possible de coupler la modélisation plus précise à vitesse constante avec la modélisation dynamique pour tester le niveau de détection sur des mouvements à vitesse variable. Il serait aussi intéressant de filtrer ou d'intégrer l'erreur de prédiction de couple, pour détecter des efforts plus faibles au bout d'un temps plus long. Puis, nous pourrions étudier le compromis de détection entre valeur de la force de collision détectée et la rapidité de la détection.

Commande en admittance

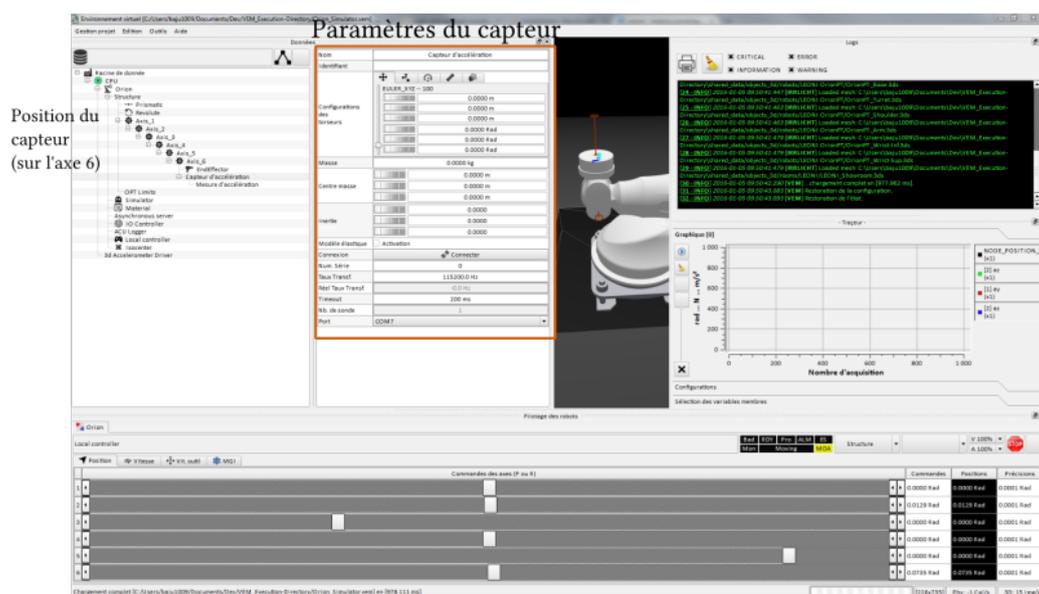


Figure 6.41 – Photo de l'interface graphique du driver du capteur d'accélération intégré dans la librairie CoSi.

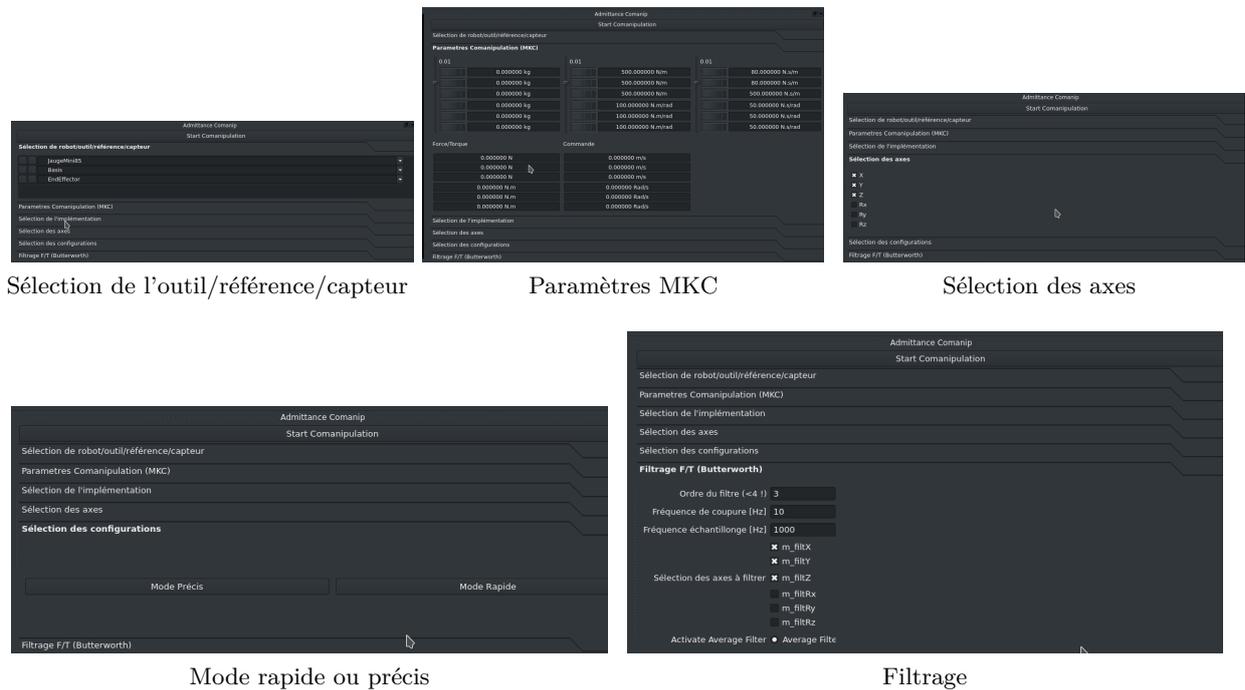


Figure 6.42 – Screenshot de l'interface utilisateur du module de co-manipulation du robot Orion

Expériences de validation de la commande en co-manipulation

Mesure de transparence

Seconde expérience Nous avons décidé d'améliorer la première expérience en modifiant le tracé à suivre de sorte que l'opérateur réalise des mouvements courbes plus significatifs des mouvements de pré-positionnement. Pour cela nous faisons tracer à chaque sujet des cercles en suivant un dessin sur la table médicale positionnée en bout d'effecteur du robot Orion de la même façon que l'expérience précédente à l'instar des expériences de [FICUCIELLO, VILLANI et B. SICILIANO 2015 et DUCHAINE 2010].

Matériel Le matériel utilisé est identique à la première expérience à l'exception du calque où est tracé le chemin de référence. Le tracé rectiligne diagonal a été remplacé par un tracé circulaire.

Mesure de justesse

Justesse statique : Faculté du robot comanipulé à atteindre une position déterminée à l'avance. Nous nous intéressons uniquement à l'écart entre la position à atteindre et la position réellement atteinte.

Justesse statique

Nous voulons quantifier la justesse statique de la solution de co-manipulation développée. Ce qui signifie pour le praticien l'erreur à laquelle il peut s'attendre à la fin du mouvement manuel du robot lorsqu'il essaiera de pré-positionner le patient au point de focalisation des Lasers pendant l'étape de pré-positionnement.

Méthode 2D quantitative Pour quantifier la justesse statique, nous utiliserons le critère portant sur la justesse de pose des robots manipulateurs industriels (ISO 9283) qui définit la méthode de test et le calcul du critère associé. Nous nous plaçons dans le cas le plus représentatif des deux cas cliniques considérés (pré-positionnement et extraction d'urgence). Nous nous basons la norme des robots industriels ISO 9283 que nous adaptons à notre cas clinique.

Méthode Notre méthode se base sur l'expérience de [POQUET 2014] expliquée précédemment dans laquelle l'opérateur pointe des cibles fixes grâce au robot comanipulé. Dans notre cas, les cibles seront imprimées sur un calque qui sera fixé sur la table médicale en bout d'effecteur. Nous positionnons un Laser fixe dans la salle de traitement qui pointera vers la surface de la table médicale. L'opérateur aura en charge de déplacer les cibles (i.e la table) pour que le Laser coïncide avec les cibles, en partant d'un point de départ identique à chaque fois, matérialisé par une marque sur le calque des cibles à pointer. Lorsque l'opérateur pensera qu'il ne peut plus améliorer la position courante pour faire coïncider une cible et le Laser il stoppera la co-manipulation et la position courante sera mesurée par le tracker de position. Cette position mesurée sera ensuite comparée avec la position théorique qu'il devait atteindre. Les sujets participeront à tour de rôle à l'expérience et chacun aura 5 essais pour essayer de faire coïncider au plus près le Laser et les cibles à pointer.

$$A_p = \sqrt{(\bar{X} - X_C)^2} \quad (6.30)$$

Avec :

- A_p : la justesse de pose
- \bar{X} : le barycentre des positions mesurées
- X_C : la position à atteindre

Matériel

- Robot Orion comanipulé
- Calque de cibles à atteindre
- Laser permettant de visualiser la position courante
- Tracker de position stéréoscopique

Méthode 2D qualitative Nous avons mis en place une seconde expérience simple et qualitative destinée à estimer la justesse statique de la commande en co-manipulation. Cette méthode est inspirée par celle proposée par [GIJBELS et al. 2014] à une échelle différente qui consiste à atteindre en co-manipulation des cibles d'épaisseur différentes. Lorsque la cible est correctement atteinte la justesse du robot est considérée supérieure à l'épaisseur de la cible. Il suffit de recommencer l'expérience avec des cibles d'épaisseur de plus en plus faible afin d'en déduire la justesse que peut atteindre le robot (Figure 6.43).

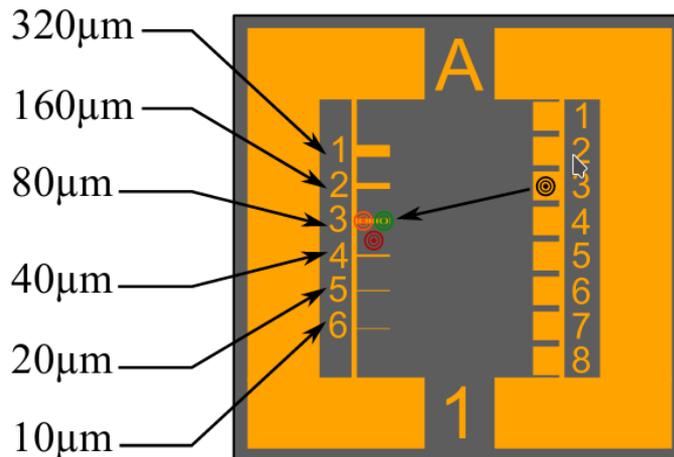


Figure 6.43 – Exemple d'expérience permettant d'évaluer la justesse statique d'un robot comanipulé en utilisant des cibles à atteindre de forme rectangulaire de différentes épaisseurs [GIJBELS et al. 2014]

Nous utiliserons un support vertical où seront affichés les différentes cibles rectangulaires d'épaisseur différentes. Un Laser fixé à l'horizontal sur la table médicale pointera en direction du tableau vertical. L'opérateur aura en charge d'atteindre les cibles rectangulaires en partant de la plus large vers la plus fine.

Matériel

- Robot Orion comanipulé
- Calque de cibles à atteindre
- Support de calque vertical
- Laser permettant de visualiser la position courante
- Tracker de position stéréoscopique

Conception de la chaîne de conditionnement d'un capteur d'accélération

Afin de quantifier le confort du patient et de comparer les différentes approches haptiques précédemment décrites nous mesurons les vibrations produites sur la table et sur le dispositif haptique. Nous avons développé une chaîne d'acquisition pour les mesures d'accélération à partir de solutions industrielles envisageables. La solution développée est utilisée dans la partie 5.3.1.4 afin de mesurer l'accélération de l'effecteur du robot pour la modélisation du patient comme une charge viscoélastique.

Cahier des charges du capteur

- Être capable de mesurer selon les 3 axes cartésiens (X, Y et Z).
- Pouvoir être monté sur n'importe quelle partie de la structure du robot afin de mesurer les vibrations sur ces parties.
- S'intégrer dans la librairie CoSi pour faire des acquisitions synchronisées avec les mouvements du robot et les autres capteurs (langage C++).
- La fréquence d'acquisition doit être supérieure à 500 Hz afin de permettre des analyses fréquentielles d'au moins 250 Hz .
- Posséder des capacités de transmission des données sans fil.

6.10.2.1 Solution industrielle (IFM electronics)

Aucune solution industrielle n'était en adéquation avec notre cahier des charges, nous avons décidé de construire une chaîne de mesure conditionneur+accéléromètre à partir de modules existants (module de mesure, module de traitement, module de communication) et de définir notre propre API de communication afin de synchroniser au niveau de l'acquisition les mesures de position et vitesses et celles du capteur d'accélération.

6.10.2.2 Conception de la chaîne de conditionnement (Partie électronique)

Nous avons définis trois modules distincts dont nous aurons besoin pour la conception de la chaîne de conditionnement du capteur d'accélération (Figure 6.45b) :

- un module de mesure ;
- un module de traitement pour faire l'acquisition du module de mesure, mettre en forme les données et les envoyer au module de communication ;
- et un module de communication sans fil.

Le cahier des charges spécifie une fréquence d'acquisition des données de 500 Hz , nous avons décidé de choisir un module de mesure opérant à 1 kHz afin de garder une marge pour le traitement des données et l'envoi.

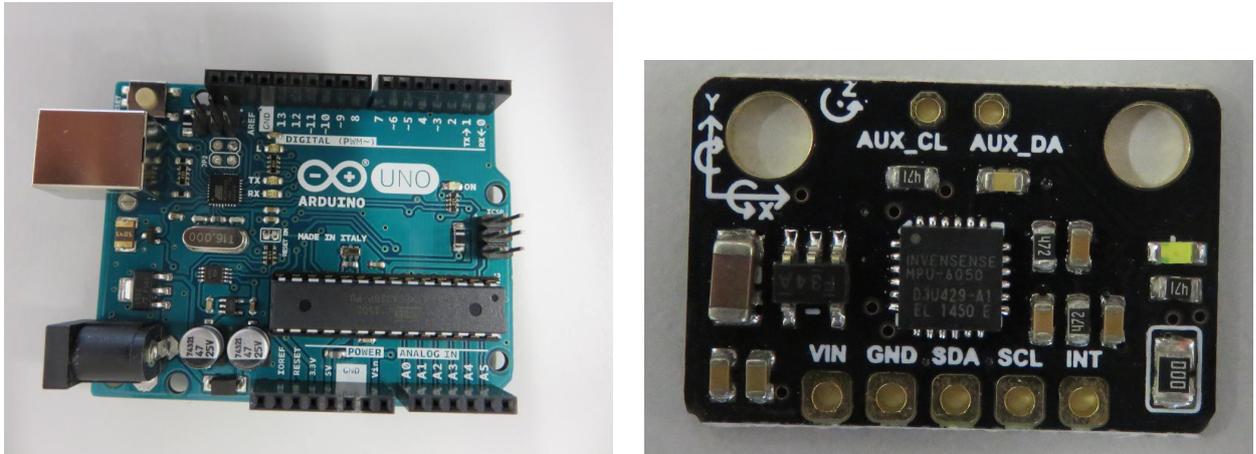
Le capteur choisi est un MPU6050 (Figure 6.44b) (Datasheet Annexe 6.50) avec les caractéristiques principales suivantes :

- Étendue de mesure : $\pm 2 g$
- Fréquence d'acquisition : 1 kHz

Le rôle du module de traitement est de récupérer les données acquises par le module d'acquisition, de les mettre sous la forme d'une trame et d'envoyer cette trame au module de communication qui la transmettra au client (PC standard).

Le module de traitement possède :

- une connectivité $I2C$ pour la communication avec le module d'acquisition choisi (MPU6050) ;



(a) Module de traitement Arduino UNO (vue de dessus). (b) Capteur d'accélération MPU6050 sur son PCB (vue de dessus).

Figure 6.44 – Module Arduino UNO et son capteur d'acquisition de vibrations MPU 6050

— et une connectivité *série* (*UART*) pour la communication avec le module de transmission.

Le module choisi est un *Arduino UNO* peu onéreux, simple d'utilisation et suffisamment performant pour notre capteur (Figure. 6.44a).

Un module de transmission Bluetooth permet d'envoyer les données au client (PC standard) situé à une distance maximale de 4 m du capteur. Nous avons choisi un module facilement paramétrable, à savoir le module *BlueTooth Shield v 1.2* de chez Robotshop basé sur un chipset HC-05 (Figure 6.45a) avec un débit de 115200 bauds.

Le schéma électrique complet est donné en Annexe 6.51.

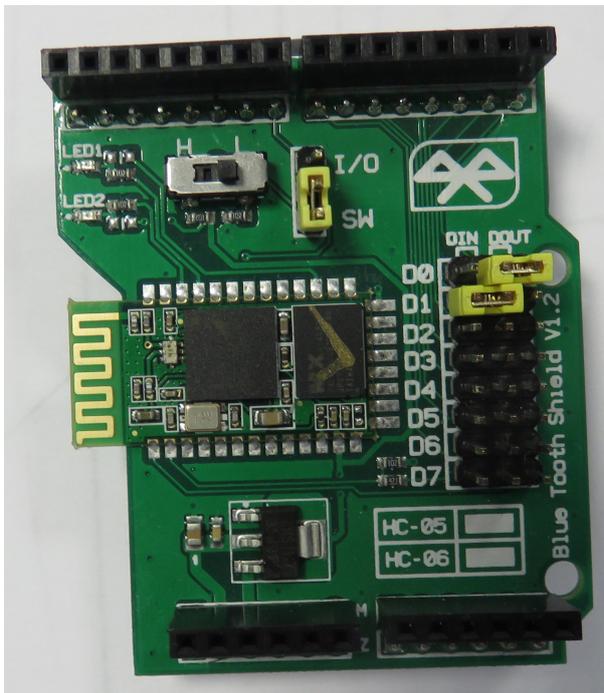
6.10.2.3 Conception de la chaine de conditionnement (Partie logicielle)

1. Architecture logicielle

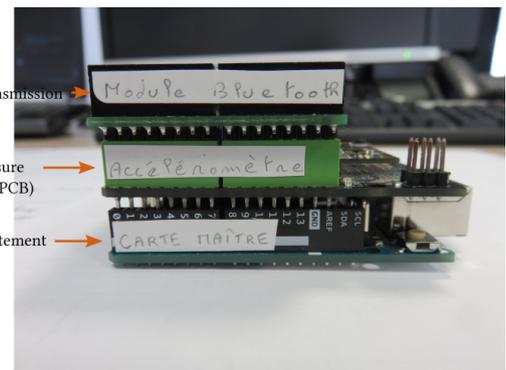
La partie logicielle contient trois parties :

- (a) Partie capteur
 - Programme de commande de l'Arduino
 - Programme de configuration du module de communication Bluetooth
- (b) Partie client
 - Driver intégré à la librairie CoSi permettant la connexion au capteur et le décodage des trames
- (c) Partie test
 - Programme de réception et de calcul de la fréquence d'acquisition

2. Programme principal de l'Arduino



(a) Module de communication HC-05 sur son PCB (vue de dessus).



(b) Assemblage des 3 modules. De haut en bas : module de communication, module de mesure et module de traitement.

Figure 6.45 – Module de communication et capteur d'accélération composé de ses 3 modules.

Le principe de fonctionnement interne du capteur d'accélération composé de ses 3 modules est donné dans l'annexe 6.52. Le programme est exécuté par la carte maître Arduino. Le programme est composé de deux parties :

- une partie gérée par une machine d'état qui permet de sélectionner le mode de fonctionnement du capteur :
 - mode attente de connexion d'un client ;
 - et un mode d'acquisition et d'envoi des valeurs acquises lorsqu'un client l'a demandé ;
- et une autre partie exécutée en boucle, qui acquiert les valeurs d'accélération par le capteur d'accélération et les envoie par le module Bluetooth.

3. Driver client de réception

La Figure 6.46 montre le fonctionnement interne du driver intégré dans la bibliothèque de pilotage du robot (CoSi) et permettant de recevoir et décoder les informations provenant du capteur. Le driver :

- se connecte au module Bluetooth par un port série émulé (protocole SPP) ;
- envoi d'une demande de lancement de l'acquisition ;
- puis en boucle :
 - réceptionne et décode les trames reçues.

Lorsque l'acquisition est terminée, il envoi une demande d'arrêt avant de se déconnecter. Pour une utilisation simplifiée nous avons développé une interface graphique du driver

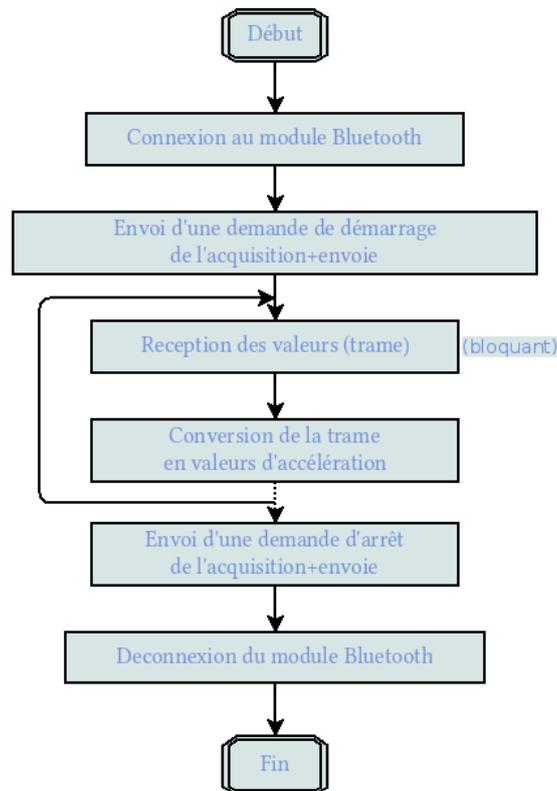


Figure 6.46 – Logigramme du programme principal du driver client.

dans la librairie CoSi (Annexe 6.41).

6.10.2.4 Conception de la chaîne de conditionnement (Partie mécanique)

Afin de pouvoir fixer le capteur sur le robot à des positions différentes nous avons conçu un support en CAO puis fabriqué en prototypage rapide (Annexe 6.53).

6.10.2.5 Mesure de la performance du capteur

Mesure de la fréquence d'acquisition coté client L'objectif est de mesurer la fréquence d'acquisition réelle (coté client) des mesures d'accélération. Le programme coté client acquiert un nombre de mesures du capteur et enregistre les données dans un fichier de type CSV.

Les essais de mesure de la fréquence d'acquisition comprennent 10000 échantillons. Les résultats sont donnés en Figure 6.47. La fréquence moyenne est de 844 Hz , l'écart type est de 1,86 Hz . La fréquence d'acquisition est *supérieure à celle du cahier des charges initial* donnée à 500 Hz donc nous considérons le capteur d'accélération opérationnel.

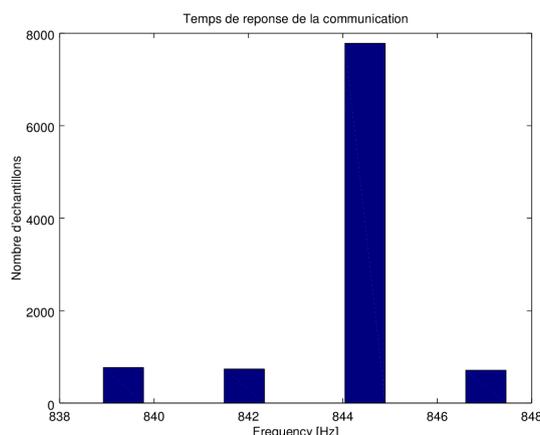


Figure 6.47 – Histogramme de la fréquence d’acquisition coté client du capteur d’accélération. La fréquence moyenne est de 844 Hz.

Afin de valider les mesures du capteur d’accélération nous avons mené une campagne de mesures en statique avec le capteur positionné à l’horizontal. L’axe Z du capteur est donc vertical et est soumis à l’accélération de la pesanteur que nous devrions mesurer (valeur de g : $9,81 \text{ m.s}^{-2}$). Pour chacun des 3 axes cartésiens nous avons fait une acquisition sans mouvement sur 3000 échantillons (Figure 6.48). Comme attendu, après étalonnage et correction du biais, le capteur mesure l’accélération de la pesanteur à la surface de la Terre, la valeur moyenne mesurée ($9,81 \text{ m.s}^{-2}$) est identique à la valeur de référence ($9,81 \text{ m.s}^{-2}$). L’erreur relative de justesse que fait le capteur sur cet axe ne peut être mesurée.

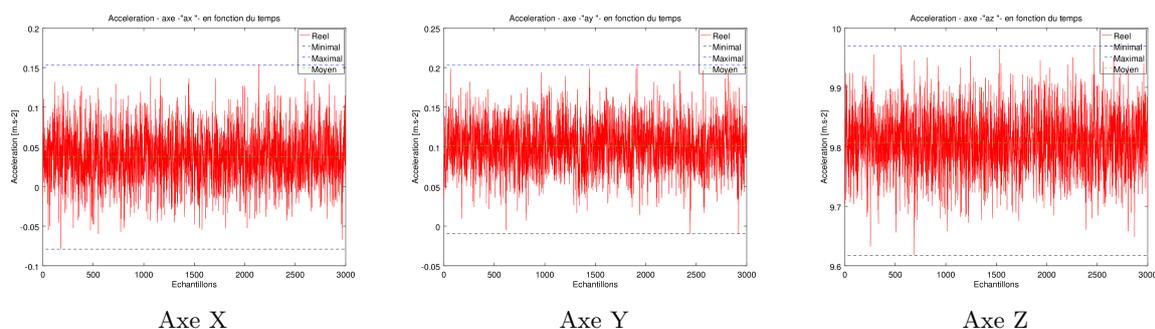


Figure 6.48 – Relevés d’accélération sur X, Y et Z sur 3000 échantillons avec le capteur d’accélération basé sur un module MPU6050.

Le capteur est positionné à l’horizontale et immobile, l’accélération sur les axes X et Y devrait être nulle, cependant nous mesurons un offset sur X et Y de respectivement $0,21 \text{ m.s}^{-2}$ et $0,23 \text{ m.s}^{-2}$ qui pourrait correspondre à une erreur sur la mise à zéro du capteur. Les résultats complets sont donnés dans le Tableau 6.10.

Compte tenu du faible écart-type sur les axes X et Y (respectivement 0.0374 et 0.03047 m.s^{-2}) par rapport à la moyenne nous pouvons en conclure que l’erreur est issue de l’étape d’étalonnage sensé corriger le biais du capteur et non pas du bruit de mesure.

Axe	Écart min-max ($m.s^{-2}$)	Valeur moyenne ($m.s^{-2}$)	Écart-type ($m.s^{-2}$)
Axe X	0,23	0,04	0,03374
Axe Y	0,21	0,10	0,03047
Axe Z	0,35	9,81	0,0496

Tableau 6.10 – Résultat des tests de justesse du capteur d'accélération.

Nous pouvons résumer les caractéristiques principales du capteur d'accélération dans le Tableau 6.11.

Caractéristique	Valeur
Nombre d'axe de mesure	3
Étendue de mesure	$\pm 2 g$
Réponse en fréquence	0-844 Hz
Niveau de bruit (du module MPU-6050 seulement)	$400 \mu g/\sqrt{Hz}$
Justesse de mesure	voir Tableau 6.10
Fidélité de mesure	voir Tableau 6.10

Tableau 6.11 – Résumé des caractéristiques principales du capteur d'accélération.

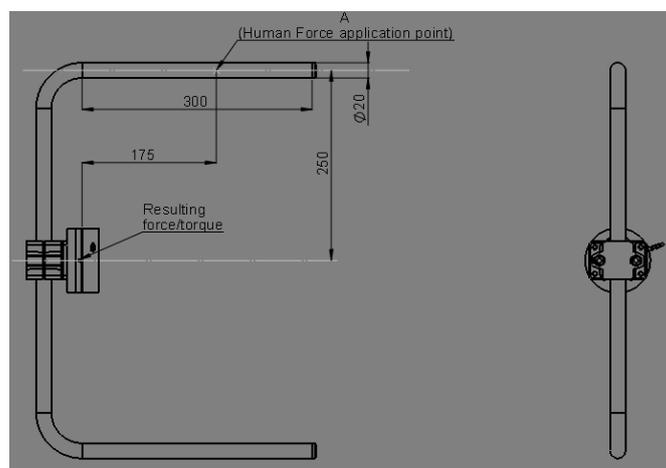


Figure 6.49 – Plan CAO de la barre haptique utilisée pour la preuve de concept de comanipulation.

Mesure du confort

Afin de quantifier la qualité de la commande en comanipulation nous décidons de mesurer les vibrations transmises à la main de l'opérateur et celles transmises au patient allongé sur la table du robot (dos, bassin et tête). Pour cela nous nous basons sur la norme médicale [ISO 60601-1 :2006] et plus particulièrement sur la partie 9.6.3 intitulée *Vibrations transmises à la main* à la fois pour le patient et pour l'opérateur. Cette norme oblige les appareils médicaux de la catégorie du robot Orion à ne pas dépasser un niveau maximal de vibration de $2,5 m.s^{-2}$ pour

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
ACCELEROMETER SENSITIVITY						
Full-Scale Range	AFS_SEL=0		±2		g	
	AFS_SEL=1		±4		g	
	AFS_SEL=2		±8		g	
	AFS_SEL=3		±16		g	
ADC Word Length	Output in two's complement format		16		bits	
Sensitivity Scale Factor	AFS_SEL=0		16,384		LSB/g	
	AFS_SEL=1		8,192		LSB/g	
	AFS_SEL=2		4,096		LSB/g	
	AFS_SEL=3		2,048		LSB/g	
Initial Calibration Tolerance			±5		%	
Sensitivity Change vs. Temperature	AFS_SEL=0, -40°C to +65°C		±0.02		%/°C	
Nonlinearity	Best Fit Straight Line		0.5		%	
Cross-Axis Sensitivity			±2		%	
ZERO-G OUTPUT						
Initial Calibration Tolerance	X and Y axes		±50		mg	1
	Z axis		±80		mg	
Zero-G Level Change vs. Temperature	X and Y axes, 0°C to +70°C		±35		mg	
	Z axis, 0°C to +70°C		±50		mg	
SELF TEST RESPONSE						
Relative	Change from factory trim	-14		14	%	2
NOISE PERFORMANCE						
Power Spectral Density	@ 10Hz, AFS_SEL=0 & ODR=1kHz		400		µg/√Hz	
LOW PASS FILTER RESPONSE						
	Programmable Range	5		260	Hz	
OUTPUT DATA RATE						
	Programmable Range	4		1,000	Hz	
INTELLIGENCE FUNCTION INCREMENT						
			32		mg/LSB	

1. Typical zero-g initial calibration tolerance value after MSL3 preconditioning
2. Please refer to the following document for further information on Self-Test: *MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Descriptions*

Figure 6.50 – Extrait de la datasheet du capteur MPU6050.

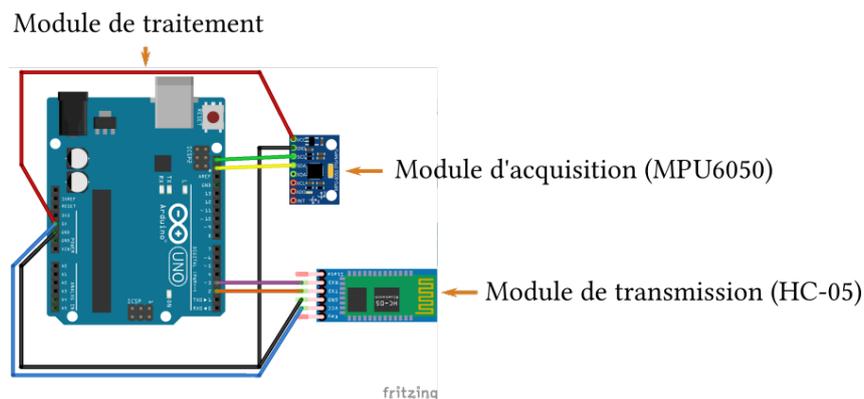


Figure 6.51 – Schéma électronique du capteur d'accélération avec ces 3 modules ; module de traitement (Arduino UNO), module de transmission (HC-05) et module d'acquisition (MPU-6050).

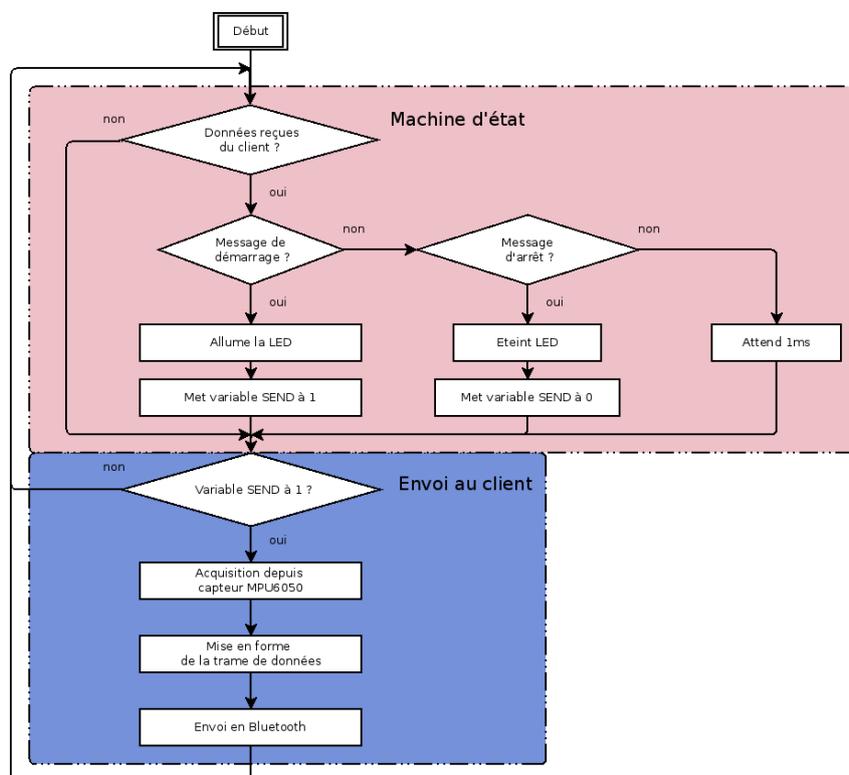


Figure 6.52 – Logigramme du programme principale du capteur d'accélération avec la partie machine d'état (en rouge) et la partie acquisition/envoi (en bleue).

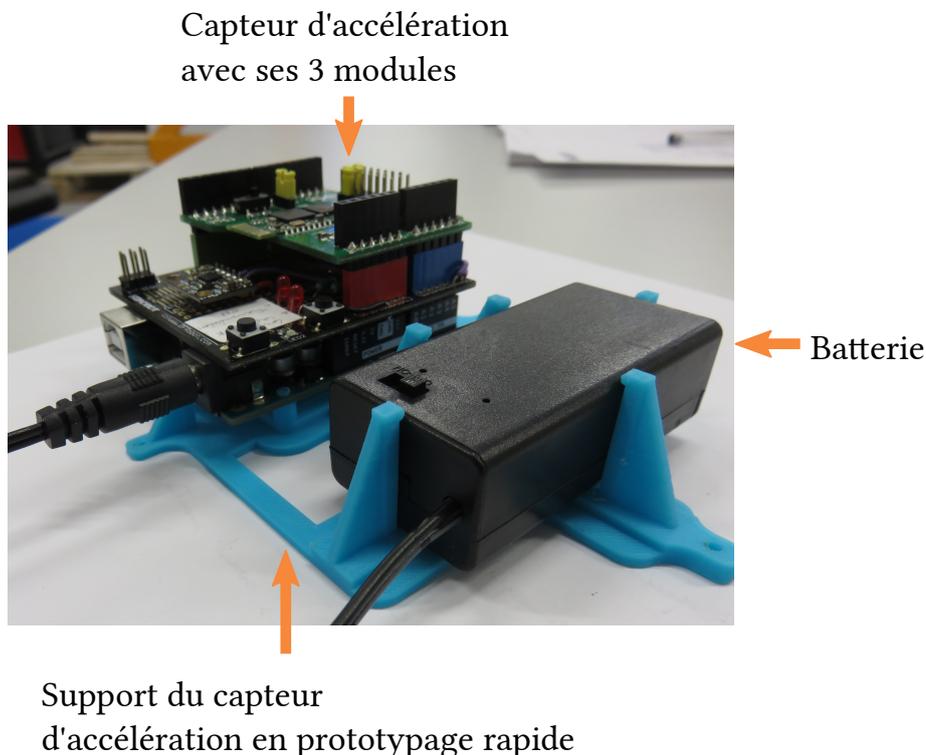


Figure 6.53 – Capteur d'accélération avec sa batterie et son support.

une période cumulée de 8 h au cours d'une période de 24 h. De plus, la mesure des vibrations doit se faire conformément à la norme ISO 5349-1, qui définit la bande de fréquences à mesurer et le calcul du niveau de vibrations à partir de la bande de fréquences en question.

Nous proposons d'expliquer le niveau de vibration maximal ainsi que le calcul et la méthode de mesure donné par la norme ISO 5349-1. Nous étudierons dans un second temps les vibrations produites par le robot Orion en proposant une procédure de mesure adaptée au robot Orion et respectant les normes 60601 et 5349 suivie de mesures in-situ. La norme 60601-1 9.6.3 définit un niveau maximal de vibrations ($2,5 m.s^2$) lorsque les vibrations s'étalent sur une période de 8h (cumulées) sur 24h. Dans le cas où les vibrations s'étalent sur une période différente, le niveau acceptable est adapté selon la formule suivante donnée par :

$$A_{max}(T) = 2,5 \times \sqrt{\frac{8}{T}} \quad (6.31)$$

Avec $A_{max}(T)$ le niveau maximal de vibrations pour une durée T (en heures). La durée T est la durée totale cumulée pendant 24h pendant laquelle le patient ou l'opérateur sont en contact avec le robot Orion. Dans notre cas il faut donc additionner toutes les durées des phases de traitement d'une journée pour connaître T.

La norme 5349 définit la bande de fréquence de mesure ainsi que le calcul du niveau de vibration suivant la réponse fréquentielle obtenue. La bande de fréquences utilisée pour la mesure doit être de 8-1000 Hz. Il est nécessaire selon la norme ISO 5349 de mesurer les vibrations sur 3 axes Cartésiens d'un repère orthonormé. Le calcul du niveau de vibrations s'effectue par le calcul de la norme Euclidienne par la formule :

$$A_{xyz} = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2} \quad (6.32)$$

Dans le cas où il est nécessaire de cumuler les vibrations au cours d'une période de 24h, le cumul doit s'effectuer par la formule :

$$A_{xyz}^{\sim} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n T_i \times A_{xyz}^2}{8}} \quad (6.33)$$

Avec :

- A_{xyz}^{\sim} : le niveau de vibrations cumulé
- n : le nombre de périodes distinctes
- T_i : la durée en heure de la période i
- A_{xyz} : le niveau de vibrations pour la période i

Mesure des vibrations produites lors d'un pré-positionnement par comanipulation
Pendant l'expérience de mesure de transparence et de justesse dynamique, nous plaçons le capteur d'accélération sur la table et mesurons à la fois le temps de mise en prépositionnement et le niveau de vibrations.

Détection de collisions

$$\begin{aligned} \min((AX \times B)^2) &= (AX - B)^T(AX - B) \\ &= X^T A^T AX - 2B^T AX + B^T B \\ &= 2A^T AX - 2(B^T A)^T \end{aligned} \quad (6.34)$$

En utilisant les équations 5.10 et 6.34 nous obtenons :

$$\begin{aligned} 2A^T AX - 2(B^T A)^T &= 0 \\ A^T AX &= (B^T A)^T \\ A^T AX &= A^T B \end{aligned}$$

CHAPITRE 7

Liste des acronymes

ACU *Applicative Control Unit.* 26–28, 30, 144

HCU *Hardware Control Unit.* 26, 28, 30, 59

MCU *Motion Control Unit.* 26–28, 30, 52, 59, 62, 67, 87, 88, 144, 158

ORION Orion Robotic Innovation for ONcology. 1

SCU *Safety Control Unit.* 26, 30

co-manipulation Méthode de commande d'un robot par laquelle l'opérateur manipule directement le robot. x, 1, 8, 9, 11–14, 31, 33, 36, 41, 43–54, 58–60, 63, 67–70, 73, 75–85, 87–89, 91–95, 101, 102, 105, 106, 108, 109, 111–113, 115, 118, 119, 160–163, IV–VI, XX

CoSi Librairie informatique (C++) permettant la manipulation du robot Orion. 26–28, 30, 59, 87, 88, VII, IX

Gy Unité de mesure de l'énergie d'un rayonnement ionisant apportant une énergie d'un joule à un milieu homogène d'une masse d'un kg (wikipédia). 5

LEONI CIA Cable Systems Société du groupe LEONI, fabriquant de systèmes de câbles et conceptrice du robot Orion de positionnement de patients pour la protonthérapie. . x, 1, 3, 12, 13, 15, 17, 19, 26, 28, 52, 59, 78, 80, 117, 118, 123, 138, 158, 163

pré-positionnement Méthode d'étalonnage réalisée manuellement par l'opérateur et consistant à aligner un repère visuel situé sur le patient avec un faisceau Laser solidaire de la salle de traitement. 3–6, 8–10, 75, 76, 79, 106, 108, 109, 117, IV, V

protonthérapie N/A. i, xiii, 1–4, 7–10, 13–15, 17–22, 29, 54, 106, 117, 123, 163, XX

- ADAMS, Richard J. et Blake HANNAFORD (1999). « Stable Haptic Interaction with Virtual Environments ». In : *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 15, 465–474.
- ALAMI, R et al. (2006). « Safe and Dependable Physical Human-Robot Interaction in Anthropic Domains : State of the Art and Challenges ». In : sous la dir. d’A BICCHI et De LUCA.
- AMOURI, L. et al. (2012). « An effective fuzzy-DVZ controller for an omnidirectional mobile robot ». In : *International Multi-Conference on Systems, Signals Devices*, p. 1–6. DOI : 10.1109/SSD.2012.6197996.
- ARMSTRONG-HÉLOUVRY, Brian, Pierre DUPONT et Carlos CANUDAS DE WIT (1994). « A Survey of Models, Analysis Tools and Compensation Methods for the Control of Machines with Friction ». In : *Automatica* 30.7, 1083–1138. ISSN : 0005-1098. DOI : 10.1016/0005-1098(94)90209-7. URL : [http://dx.doi.org/10.1016/0005-1098\(94\)90209-7](http://dx.doi.org/10.1016/0005-1098(94)90209-7).
- BALAS, O. et al. (2010). « État de l’art en radiothérapie ». In : *IRBM News* 31.3, p. 7–31. ISSN : 19597568. DOI : 10.1016/j.irbmw.2010.05.001. URL : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1959756810000337>.
- BALASUBRAMANIAN, S., A. MELENDEZ-CALDERON et E. BURDET (2012). « A Robust and Sensitive Metric for Quantifying Movement Smoothness ». In : *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 59.8, p. 2126–2136. ISSN : 0018-9294. DOI : 10.1109/TBME.2011.2179545.
- BARCELLINI, Alberto et al. (2012). « Integrating an anti-collision system based on laser Time-Of-Flight sensor in an industrial robot controller ». In : *IFAC Proceedings Volumes* 45.22, p. 664–669. ISSN : 1474-6670. DOI : 10.3182/20120905-3-HR-2030.00094. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016336862>.
- BASCETTA, L. et al. (2010). « Anti-collision systems for robotic applications based on laser Time-of-Flight sensors ». In : *2010 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, p. 278–284. DOI : 10.1109/AIM.2010.5695851.
- BAUMEYER, Julien (2015). « Co-manipulation of a viscoelastic load carrying robot for patient positioning in proton-therapy ». In : *Journée des Jeunes Chercheurs du laboratoire Prisme*. Amboise.

- BAUMEYER, Julien, Vincent BESNARD et al. (2016). « Enhance manipulability for patient positioning systems during the pre-positioning phase using physical human-robot interaction approach ». In : *Particle Therapy Co-operative Group (PTCOG55)*. Prague.
- BAUMEYER, Julien, Sylvain MIOSSEC et al. (2016). « Haptic multimodal assessment of robot manual guidance for patient pre-positioning in proton therapy ». In : *Journée Scientifique de la Société Française de Physique Médicale (SFPM)*. Nancy, France.
- BITTENCOURT, André Carvalho et Svante GUNNARSSON (2012). « Static Friction in a Robot Joint—Modeling and Identification of Load and Temperature Effects ». In : *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 134.5, p. 051013–051013. ISSN : 0022-0434. DOI : 10.1115/1.4006589. URL : <http://dx.doi.org/10.1115/1.4006589>.
- BO, Li Chun et D. PAVELESCU (1982). « The friction-speed relation and its influence on the critical velocity of stick-slip motion ». In : *Wear* 82.3, p. 277–289. ISSN : 0043-1648. DOI : 10.1016/0043-1648(82)90223-X. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/004316488290223X>.
- BOGDAN, Ioana Corina (2010). « Modélisation et commande de systèmes linéaires de micro-positionnement : application à la production de micro-composants électroniques ». Thèse de doct. Metz. URL : <http://www.theses.fr/2010METZ018S>.
- BONA, B., M. INDRI et N. SMALDONE (2003). « Nonlinear friction estimation for digital control of direct-drive manipulators ». In : *European Control Conference (ECC), 2003*, p. 2685–2690.
- BOWYER, S. A. et F. Rodriguez y BAENA (2015). « Dissipative Control for Physical Human-Robot Interaction ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 31.6, p. 1281–1293. ISSN : 1552-3098. DOI : 10.1109/TR0.2015.2477956.
- BROCK, Oliver et Oussama KHATIB (2002). « Elastic Strips : A Framework for Motion Generation in Human Environments ». In : *The International Journal of Robotics Research* 21.12, p. 1031–1052. ISSN : 0278-3649, 1741-3176. DOI : 10.1177/0278364902021012002. URL : <http://ijr.sagepub.com/content/21/12/1031>.
- BURDET, Etienne et al. (2001). « The central nervous system stabilizes unstable dynamics by learning optimal impedance ». In : *Nature* 414.6862, p. 446–449. ISSN : 0028-0836. DOI : 10.1038/35106566. URL : <http://www.nature.com/nature/journal/v414/n6862/abs/414446a0.html>.
- CAGNEAU, B. et al. (2008). « A passive force amplifier ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008*, p. 2079–2084. DOI : 10.1109/ROBOT.2008.4543513.
- CAMPEAU-LECOURS, A., S. FOUCAULT et al. (2016). « A cable-suspended intelligent crane assist device for the intuitive manipulation of large payloads ». In : *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* PP.99, p. 1–1. ISSN : 1083-4435. DOI : 10.1109/TMECH.2016.2531626.
- CAMPEAU-LECOURS, A., M. J.-D. OTIS et C. GOSSELIN (2016). « Modeling of physical human-robot interaction : Admittance controllers applied to intelligent assist devices with large payload ». In : *International Journal of Advanced Robotic Systems* 13.5. ISSN : 1729-8814. DOI : 10.1177/1729881416658167. URL : <http://arx.sagepub.com/lookup/doi/10.1177/1729881416658167>.
- CAMPEAU-LECOURS, Alexandre (2012). « Développement d’algorithmes de commande et d’interfaces mécatroniques pour l’interaction physique humain-robot ». Thèse de doct. Québec : Laval. URL : http://robot.gmc.ulaval.ca/docs/theses/alexandre_campeau-lecours.pdf.

-
- COLGATE, J. E., M. PESHKIN et S. H. KLOSTERMEYER (2003). « Intelligent assist devices in industrial applications : a review ». In : *2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS 2003). Proceedings*. T. 3, 2516–2521 vol.3. DOI : 10.1109/IROS.2003.1249248.
- CORTEVILLE, B. et al. (2007). « Human-inspired robot assistant for fast point-to-point movements ». In : *2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 3639–3644. DOI : 10.1109/ROBOT.2007.364036.
- CROSHAW, P. F. (1969). « HARDIMAN I ARM TEST - HARDIMAN I PROTOTYPE PROJECT ». In : p. 82. URL : <http://cyberneticzoo.com/man-amplifiers/1966-69-g-e-hardiman-i-ralph-mosher-american/>.
- DAEMI, M. et B. HEIMANN (1997). « Identification and Compensation of Gear Friction for Modeling of Robots ». In : *ROMANSY 11*. Sous la dir. de Prof Adam MORECKI, Prof Giovanni BIANCHI et Dr Cezary RZYMKOWSKI. International Centre for Mechanical Sciences 381. DOI : 10.1007/978-3-7091-2666-0_11. Springer Vienna, p. 89–96. ISBN : 978-3-211-82903-5 978-3-7091-2666-0. URL : http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-7091-2666-0_11.
- DE CARLI, D. et al. (2009). « Measuring intent in human-robot cooperative manipulation ». In : *IEEE International Workshop on Haptic Audio visual Environments and Games, 2009. HAVE 2009*, p. 159–163. DOI : 10.1109/HAVE.2009.5356124.
- DE LUCA, A. et F. FLACCO (2012). « Integrated control for pHRI : Collision avoidance, detection, reaction and collaboration ». In : *2012 4th IEEE RAS EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob)*, p. 288–295. DOI : 10.1109/BioRob.2012.6290917.
- DE SANTIS, Agostino, A. ALBU-SCHÄFFER et al. (2007). « The skeleton algorithm for self-collision avoidance of a humanoid manipulator ». In : *2007 IEEE/ASME international conference on Advanced intelligent mechatronics*, p. 1–6. DOI : 10.1109/AIM.2007.4412606.
- DE SANTIS, Agostino, Bruno SICILIANO et al. (2008). « An atlas of physical human-robot interaction ». In : *Mechanism and Machine Theory* 43.3, p. 253–270. ISSN : 0094-114X. DOI : 10.1016/j.mechmachtheory.2007.03.003. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094114X07000547>.
- DE SCHUTTER, J. et H. VAN BRUSSEL (1988). « Compliant Robot Motion II. A Control Approach Based on External Control Loops ». In : *International Journal of Robotic Research*.
- DE WIT, C.C. et al. (1989). « Adaptive friction compensation in robot manipulators : low-velocities ». In : , *1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1989. Proceedings*, 1352–1357 vol.3. DOI : 10.1109/ROBOT.1989.100168.
- DOLAN, J.M., M.B. FRIEDMAN et M.L. NAGURKA (1993). « Dynamic and loaded impedance components in the maintenance of human arm posture ». In : *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 23.3, p. 698–709. ISSN : 0018-9472. DOI : 10.1109/21.256543.
- DOMBRE, E. et al. (2003). « Dermanob : A safe robot for reconstructive surgery ». In : *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 19.5, p. 876–884. ISSN : 1042-296X. DOI : 10.1109/TRA.2003.817067.
- DUBOIS, Francois, Nicolas PETIT et Pierre ROUCHON (1999). « Motion Planning and Nonlinear Simulations for a Tank Containing a Fluid ». In : *In Proceedings of the 1999 European Control Conference*.
-

- DUCHAINE, Vincent (2010). « Commande des robots destinés à interagir physiquement avec l'humain ». Thèse de doct. Laval : Laval. URL : http://robot.gmc.ulaval.ca/docs/theses/vincent_duchaine.pdf.
- DUCHAINE, Vincent et C. GOSSELIN (2011). « Unified robot control scheme for cooperative motion, autonomous motion and contact reaction ». In : *Journal of Robotics and Mechatronics* 23, p. 557–566.
- DUCHAINE, Vincent et C.M. GOSSELIN (2007). « General Model of Human-Robot Cooperation Using a Novel Velocity Based Variable Impedance Control ». In : *EuroHaptics Conference, 2007 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics 2007. Second Joint*, p. 446–451. DOI : 10.1109/WHC.2007.59.
- DUMORA, Julie (2014). « Contribution à l'interaction physique homme-robot : application à la comanipulation d'objets de grandes dimensions ». Thèse de doct. CEA List.
- DUPONT, Pierre et al. (2002). « Single state elastoplastic friction models ». In : *ResearchGate* 47.5, p. 787–792. ISSN : 0018-9286. DOI : 10.1109/TAC.2002.1000274. URL : https://www.researchgate.net/publication/3024393_Single_state_elastoplastic_friction_models.
- FEDDEMA, J. et al. (1996). « Robotically controlled slosh-free motion of an open container of liquid ». In : , *1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1996. Proceedings.* T. 1, 596–602 vol.1. DOI : 10.1109/ROBOT.1996.503840.
- FERRETTI, Gianni et al. (2003). « Friction Model Validation in Sliding and Presliding Regimes with High Resolution Encoders ». In : *Experimental Robotics VIII*. Sous la dir. de Prof Bruno SICILIANO et Prof Paolo DARIO. Springer Tracts in Advanced Robotics 5. DOI : 10.1007/3-540-36268-1_29. Springer Berlin Heidelberg, p. 328–337. ISBN : 978-3-540-00305-2 978-3-540-36268-5. URL : http://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-36268-1_29.
- FICUCIELLO, F., L. VILLANI et B. SICILIANO (2015). « Variable Impedance Control of Redundant Manipulators for Intuitive Human Robot Physical Interaction ». In : *IEEE Transactions on Robotics* 31.4, p. 850–863. ISSN : 1552-3098. DOI : 10.1109/TR0.2015.2430053.
- FLASH, T. et N. HOGAN (1985). « The coordination of arm movements : an experimentally confirmed mathematical model ». In : *The Journal of Neuroscience : The Official Journal of the Society for Neuroscience* 5.7. PMID : 4020415, p. 1688–1703. ISSN : 0270-6474.
- FRIGOLA, Manuel et al. (2005). « Robust Modeling of a body for Human-Robot Interaction ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005. ICRA '05*.
- GARCIA, Elena, Pablo Gonzalez de SANTOS et Carlos Canudas de DE WIT (2002). « Velocity Dependence in the Cyclic Friction Arising with Gears ». In : *The International Journal of Robotics Research* 21.9, p. 761–771. ISSN : 0278-3649, 1741-3176. DOI : 10.1177/0278364902021009877. URL : <http://ijr.sagepub.com/content/21/9/761>.
- GERAVAND, M., F. FLACCO et A. DE LUCA (2013). « Human-robot physical interaction and collaboration using an industrial robot with a closed control architecture ». In : *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, p. 4000–4007. DOI : 10.1109/ICRA.2013.6631141.
- GEVAERT, T. et al. (2011). « SU-E-J-136 : Clinical Evaluation of a Robotic 6-Degree of Freedom Treatment Couch for Frameless Radiosurgery ». In : *Medical Physics* 38.6, p. 3474–3474. ISSN : 0094-2405. DOI : 10.1118/1.3611903. URL : <http://scitation.aip.org/content/aapm/journal/medphys/38/6/10.1118/1.3611903>.
- GIJBELS, A. et al. (2014). « Experimental Validation of a Robotic Comanipulation and Telemanipulation System for Retinal Surgery ». In : *5th IEEE RAS/EMBS International Conference*

- on *Biomedical Robotics and Biomechatronics*, p. 144–150. DOI : 10.1109/BIOROB.2014.6913767.
- GOMI, H., Y. KOIKE et M. KAWATO (1992). « Human hand stiffness during discrete point-to-point multi-joint movement ». In : *1992 14th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. T. 4, p. 1628–1629. DOI : 10.1109/IEMBS.1992.5761956.
- HADDADIN, S. et al. (2008). « Collision detection and reaction : A contribution to safe physical Human-Robot Interaction ». In : *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008*, p. 3356–3363. DOI : 10.1109/IROS.2008.4650764.
- HAGAG, Benny et al. (2011). « RIO : Robotic-Arm Interactive Orthopedic System MAKOplasty : User Interactive Haptic Orthopedic Robotics ». In : *Surgical Robotics*. Sous la dir. de Jacob ROSEN, Blake HANNAFORD et Richard M. SATAVA. DOI : 10.1007/978-1-4419-1126-1_10. Springer US, p. 219–246. ISBN : 978-1-4419-1125-4 978-1-4419-1126-1. URL : http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4419-1126-1_10.
- HAMON, Pauline (2011). « Modélisation et identification dynamiques des robots avec un modèle de frottement sec fonction de la charge et de la vitesse ». Thèse de doct. Nantes. URL : <http://www.theses.fr/2011NANT2021>.
- HESS, D. P. et A. SOOM (1990). « Friction at a Lubricated Line Contact Operating at Oscillating Sliding Velocities ». In : *Journal of Tribology* 112.1, p. 147–152. ISSN : 0742-4787. DOI : 10.1115/1.2920220. URL : <http://dx.doi.org/10.1115/1.2920220>.
- HOGAN, N. (1984). « An organizing principle for a class of voluntary movements ». In : *The Journal of Neuroscience* 4.11. PMID : 6502203, p. 2745–2754. ISSN : 0270-6474, 1529-2401. URL : <http://www.jneurosci.org/content/4/11/2745>.
- HOGAN, Neville (1985). « Impedance Control : An Approach to Manipulation : Part II—Implementation ». In : *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 107.1, p. 8–16. ISSN : 0022-0434. DOI : 10.1115/1.3140713. URL : <http://dx.doi.org/10.1115/1.3140713>.
- HONDORI, H. M. (2012). « Measuring Human Arm’s Mechanical Impedance for Assessment of Motor Function ». In :
- HORSE (2015). *horse*. <http://www.horse-project.eu/CEA-Competence-Centre>. URL : <http://www.horse-project.eu/CEA-Competence-Centre>.
- HOWARD, T. et J. SZEWCZYK (2014). « Visuo-haptic feedback for 1-D guidance in laparoscopic surgery ». In : *5th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, p. 58–65. DOI : 10.1109/BIOROB.2014.6913752.
- HUG, Eugen B et al. (2002). « Proton radiotherapy in management of pediatric base of skull tumors ». In : *International Journal of Radiation Oncology*Biophysics* 52.4, p. 1017–1024. ISSN : 0360-3016. DOI : 10.1016/S0360-3016(01)02725-0. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360301601027250>.
- ICARO (2010). *Project ICARO (Industrial Cooperative Assistant Robotics) | ANR - Agence Nationale de la Recherche*. <http://www.agence-nationale-recherche.fr/?Project=ANR-10-CORD-0025>. URL : <http://www.agence-nationale-recherche.fr/?Project=ANR-10-CORD-0025>.
- IKEURA, R. et H. INOOKA (1995). « Variable impedance control of a robot for cooperation with a human ». In : , *1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1995. Proceedings*. T. 3, 3097–3102 vol.3. DOI : 10.1109/ROBOT.1995.525725. URL : <http://>

- [//ieeexplore.ieee.org/xpl/abstractCitations.jsp?tp=&arnumber=525725&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D525725](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/abstractCitations.jsp?tp=&arnumber=525725&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D525725).
- IKEURA, R., H. MONDEN et H. INOOKA (1994). « Cooperative motion control of a robot and a human ». In : , *3rd IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, 1994. RO-MAN '94 Nagoya, Proceedings*, p. 112–117. DOI : 10.1109/ROMAN.1994.365946.
- ISO10218 (2011). *ISO 10218-1 :2011 - Robots and robotic devices - Safety requirements for industrial robots - Part 1 : Robots*. http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=51330. URL : http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=51330.
- ISO10218-2 (2011). *ISO 10218-2 :2011 - Robots and robotic devices - Safety requirements for industrial robots - Part 2 : Robot systems and integration*. http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=41571. URL : http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=41571.
- ISO15066 (2016). *ISO/TS 15066 :2016 - Robots and robotic devices - Collaborative robots*. http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=62996. URL : http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=62996.
- JABBOUR, Ziad (2010). *Contribution to the Stiffness and Transparency Improvement of a Haptic Interface Used for Surgical Cobotic Applications*.
- JACQUEMIN, Yoan (2011). « Care-Trajectory optimization in radiotherapy and hadrontherapy facilities ». Theses. Université Jean Monnet - Saint-Etienne. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00718789>.
- JLASSI, Sarra (2013). « Formulation et études des problèmes de commande en co-manipulation robotique ». Thèse de doct. Université Paris Sud - Paris XI. URL : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00982969>.
- JLASSI, Sarra, Sami TLIBA et Yacine CHITOUR (2014). « An Online Trajectory Generator-Based Impedance Control For Co-manipulation Tasks ». In : *Proceedings of the IEEE Haptics Symposium 2014*. ImpedanceControl_JTC_HAPTICS2014 ImpedanceControl_JTC_HAPTICS2014. Houston, Texas, États-Unis, 391–396. URL : <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00911088>.
- JOLY, Luc (1997). *Commande hybride position/force pour la teleoperation : une approche basee sur des analogies mecaniques*. Paris 6. URL : <http://www.theses.fr/1997PA066673>.
- JR, Marcelo H. Ang, Wei LIN et Ser-Yong LIM (1999). « A walk-through programmed robot for welding in shipyards ». In : *Industrial Robot : An International Journal* 26.5, p. 377–388. ISSN : 0143-991X. DOI : 10.1108/01439919910284000. URL : <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/01439919910284000>.
- KAZANZIDES, P. (1992). « Force sensing and control for a surgical robot ». In : Nice. ISBN : 0-8186-2720-4. DOI : 10.1109/ROBOT.1992.220224.
- KAZEROONI, H. (1990). « Human-robot interaction via the transfer of power and information signals ». In : *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 20.2, p. 450–463. ISSN : 0018-9472. DOI : 10.1109/21.52555.
- (1993). « Extender : a case study for human-robot interaction via transfer of power and information signals ». In : , *2nd IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, 1993. Proceedings*, p. 10–20. DOI : 10.1109/ROMAN.1993.367756.

- KEARNEY, R. E. et I. W. HUNTER (1990). « System identification of human joint dynamics ». In : *Critical Reviews in Biomedical Engineering* 18.1. PMID : 2204515, p. 55–87. ISSN : 0278-940X.
- KEOGH, Eamonn et Chotirat Ann RATANAMAHATANA (2004). « Exact indexing of dynamic time warping ». In : *Knowledge and Information Systems* 7.3, p. 358–386. ISSN : 0219-1377, 0219-3116. DOI : 10.1007/s10115-004-0154-9. URL : <http://link.springer.com/article/10.1007/s10115-004-0154-9>.
- KHALIL, W. et J. KLEINFINGER (1986). « A new geometric notation for open and closed-loop robots ». In : *1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Proceedings*. T. 3, p. 1174–1179. DOI : 10.1109/ROBOT.1986.1087552.
- KOMATI, Bilal et al. (2013). « Explicit Force Control vs Impedance Control for Micromanipulation ». In : V001T09A018. DOI : 10.1115/DETC2013-13067. URL : <http://dx.doi.org/10.1115/DETC2013-13067>.
- KOSUGE, K., Y. FUJISAWA et T. FUKUDA (1993). « Mechanical system control with man-machine-environment interactions ». In : , *1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1993. Proceedings*, 239–244 vol.1. DOI : 10.1109/ROBOT.1993.291989.
- KROEMER, K. H. (1969). *PUSH FORCES EXERTED IN SIXTY-FIVE COMMON WORKING POSITIONS*. Rapp. tech.
- KULIĆ, D. et E. A. CROFT (2003). « Estimating Intent for Human-Robot Interaction ». In : *in IEEE Int. Conference on Advanced Robotics*, p. 810815.
- LABRECQUE, P.D. et C. GOSSELIN (2014). « Robotic force amplification with free space motion capability ». In : *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, p. 134–140. DOI : 10.1109/ICRA.2014.6906600.
- LACEVIC, B. et P. ROCCO (2010). « Kinetostatic danger field - a novel safety assessment for human-robot interaction ». In : *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, p. 2169–2174. DOI : 10.1109/IROS.2010.5649124.
- LACQUANTI, F., F. LICATA et J. F. SOECHTING (1982). « The mechanical behavior of the human forearm in response to transient perturbations ». In : *Biological Cybernetics* 44.1. PMID : 7093368, p. 35–46. ISSN : 0340-1200.
- LAMY, Xavier (2011). « Conception d’une interface de pilotage d’un Cobot ». Thèse de doct. Paris 6. URL : <http://www.theses.fr/2011PA066029>.
- LAMY, X. et al. (2009). « Achieving efficient and stable comanipulation through adaptation to changes in human arm impedance ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009. ICRA '09*, p. 265–271. DOI : 10.1109/ROBOT.2009.5152294.
- LAWITZKY, M., A. MORTL et S. HIRCHE (2010). « Load sharing in human-robot cooperative manipulation ». In : *2010 IEEE RO-MAN*, p. 185–191. DOI : 10.1109/ROMAN.2010.5598627.
- LAWRENCE, D.A. (1988). « Impedance control stability properties in common implementations ». In : , *1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1988. Proceedings*, 1185–1190 vol.2. DOI : 10.1109/ROBOT.1988.12222.
- LECOURS, Alexandre et Clément GOSSELIN (2013). « Computed-Torque Control of a Four-Degree-of-Freedom Admittance Controlled Intelligent Assist Device ». In : *Experimental Robotics*. Sous la dir. de Jaydev P. DESAI et al. Springer Tracts in Advanced Robotics 88. Springer International Publishing, p. 635–649. ISBN : 978-3-319-00064-0 978-3-319-00065-7. URL : http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-00065-7_43.
- LEE, Seungyeol (2010). « MFR (Multi-purpose Field Robot) Based on Human-Robot Cooperative Manipulation for Handling Building Materials ». In : *Robot Manipulators New Achie-*

- vements. ISBN : 978-953-307-090-2. URL : <http://www.intechopen.com/books/robot-manipulators-new-achievements/mfr-multi-purpose-field-robot-based-on-human-robot-cooperative-manipulation-for-handling-building-ma>.
- LICHIARDOPOL, S., N. van de WOUW et H. NIJMEIJER (2009). « Control scheme for human-robot co-manipulation of uncertain, time-varying loads ». In : *American Control Conference, 2009. ACC '09*. P. 1485–1490. DOI : 10.1109/ACC.2009.5160062.
- LINDE, Van Der et al. (2002). *The HapticMaster, a new high-performance haptic interface*.
- LUNDKVIST, Jonas et al. (2005). « Proton therapy of cancer : Potential clinical advantages and cost-effectiveness ». In : *Acta Oncologica* 44.8, p. 850–861. ISSN : 0284-186X. DOI : 10.1080/02841860500341157. URL : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02841860500341157>.
- MACDONALD, Shannon M. et al. (2008). « Proton Radiotherapy for Childhood Ependymoma : Initial Clinical Outcomes and Dose Comparisons ». In : *International Journal of Radiation Oncology*Biophysics*Physics* 71.4, p. 979–986. ISSN : 0360-3016. DOI : 10.1016/j.ijrobp.2007.11.065. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036030160704758X>.
- MAEDA, Y., T. HARA et T. ARAI (2001). « Human-robot cooperative manipulation with motion estimation ». In : *2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2001. Proceedings*. T. 4, 2240–2245 vol.4. DOI : 10.1109/IR0S.2001.976403.
- MAKAROV, Maria (2013). « Contribution à la modélisation et la commande robuste de robots manipulateurs à articulations flexibles. Applications à la robotique interactive. » Thèse de doct. Supélec. URL : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00844738>.
- MILLER, B. E., J. E. COLGATE et R. A. FREEMAN (1999). « Passive implementation for a class of static nonlinear environments in haptic display ». In : *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.99CH36288C)*. T. 4, 2937–2942 vol.4. DOI : 10.1109/ROBOT.1999.774043.
- MIOSSEC, S. et A. KHEDDAR (2009). « Human motion in cooperative tasks : Moving object case study ». In : *2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, p. 1509–1514. DOI : 10.1109/ROBIO.2009.4913224.
- MOREIRA, Pedro Lopes da Frota (2012). « Model based force control for soft tissue interaction and applications in physiological motion compensation ». Thèse de doct. Montpellier 2. URL : <http://www.theses.fr/2012MON20179>.
- MORETTE, Nicolas (2009). « Contribution à la navigation de robots mobiles : approche par modèle direct et commande prédictive ». Thèse de doct. Université d'Orléans. URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00517376/document>.
- MÖRTL, Alexander et al. (2012). « The Role of Roles : Physical Cooperation between Humans and Robots ». In : *The International Journal of Robotics Research*, p. 0278364912455366. ISSN : 0278-3649, 1741-3176. DOI : 10.1177/0278364912455366. URL : <http://ijr.sagepub.com/content/early/2012/08/22/0278364912455366>.
- MUSSA-IVALDI, F. A., N. HOGAN et E. BIZZI (1985). « Neural, mechanical, and geometric factors subserving arm posture in humans ». In : *The Journal of Neuroscience : The Official Journal of the Society for Neuroscience* 5.10. PMID : 4045550, p. 2732–2743. ISSN : 0270-6474.
- MUVENGEI, Onesmus, John KIHU et Bernard IKUA (2012). « Computational Implementation of LuGre Friction Law in a Revolute Joint with Clearance ». In : *Sustainable Research and Innovation Conference*. URL : <http://jkuat-sri.com/ojs/index.php/proceedings/article/view/195>.

-
- NASA (2000). *Human Performance Capabilities*. <http://msis.jsc.nasa.gov/sections/section04.htm>. URL : <http://msis.jsc.nasa.gov/sections/section04.htm>.
- NEWMAN, W. et N. HOGAN (1987). « High speed robot control and obstacle avoidance using dynamic potential functions ». In : *1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation Proceedings*. T. 4, p. 14–24. DOI : 10.1109/ROBOT.1987.1088046.
- NOROUZZADEH, S., T. LORENZ et S. HIRCHE (2012). « Towards safe physical human-robot interaction : An online optimal control scheme ». In : *2012 IEEE RO-MAN*, p. 503–508. DOI : 10.1109/ROMAN.2012.6343801.
- NUNINGER, Walter, Wilfrid PERRUQUETTI et Jean-Pierre RICHARD (2006). « Bilan et enjeux des modèles de frottements : tribologie et contrôle au service de la sécurité des transports ». In : URL : <https://hal.inria.fr/inria-00192425/document>.
- NYSTRÖM, Håkan (2010). « The role of protons in modern and biologically-guided radiotherapy ». In : *Acta Oncologica* 49.7, p. 1124–1131. ISSN : 0284-186X. DOI : 10.3109/0284186X.2010.498436. URL : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3109/0284186X.2010.498436>.
- OTT, C., R. MUKHERJEE et Y. NAKAMURA (2010). « Unified Impedance and Admittance Control ». In : *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, p. 554–561. DOI : 10.1109/ROBOT.2010.5509861.
- OTT, Christian, Ranjan MUKHERJEE et Yoshihiko NAKAMURA (2014). « A Hybrid System Framework for Unified Impedance and Admittance Control ». In : *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. ISSN : 0921-0296, 1573-0409. DOI : 10.1007/s10846-014-0082-1. URL : <http://elib.dlr.de/90207/>.
- PHRIENDS (2008). *PHRIENDS*. <http://www.phriends.eu/>. URL : <http://www.phriends.eu/>.
- PINAULT, Samuel (2008). « Utilisation d’un système de recalage externe pour le repositionnement quotidien d’un patient en protonthérapie ». Thèse de doct. Paris 6. URL : <http://www.theses.fr/2008PA066219>.
- PIROS (2013). *PIROS Project Physically Interactive RObot Services*. <http://piros.web.auth.gr/>. URL : <http://piros.web.auth.gr/>.
- POQUET, Cécile (2014). « conception et commande d’un robot porte-sonde endorectale ». Thèse de doct. Paris Jussieu : UPMC.
- PRIDGEN, B., Kun BAI et W. SINGHOSE (2010). « Slesh suppression by robust input shaping ». In : *2010 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, p. 2316–2321. DOI : 10.1109/CDC.2010.5717429.
- RAHMAN, M. M., Ryojun IKEURA et K. MIZUTANI (2002). « Impedance characteristic of human arm for cooperative robot ». In :
- RAIBERT, M. H. et J. J. CRAIG (1981). « Hybrid Position/Force Control of Manipulators ». In : *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 103.2, p. 126–133. ISSN : 0022-0434. DOI : 10.1115/1.3139652. URL : <http://dx.doi.org/10.1115/1.3139652>.
- REED, K.B. et al. (2006). « Haptic cooperation between people, and between people and machines ». In : *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 2109–2114. DOI : 10.1109/IRoS.2006.282489.
- RHIJN, Jonathan Van et al. (2010). « Mechanical Impedance : A Cobotic and Haptic Actuators Performance Criterion ». In : *Haptics : Generating and Perceiving Tangible Sensations*. Sous la dir. d’Astrid M. L. KAPPERS et al. Lecture Notes in Computer Science 6191. Springer
-

- Berlin Heidelberg, p. 225–232. ISBN : 978-3-642-14063-1 978-3-642-14064-8. URL : http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-14064-8_33.
- ROSENBERG, L.B. et B.D. ADELSTEIN (1993). « Perceptual decomposition of virtual haptic surfaces ». In : *Virtual Reality, 1993. Proceedings., IEEE 1993 Symposium on Research Frontiers in*, p. 46–53. DOI : 10.1109/VRAIS.1993.378264.
- RUDERMAN, M., F. HOFFMANN et T. BERTRAM (2009). « Modeling and Identification of Elastic Robot Joints With Hysteresis and Backlash ». In : *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 56.10, p. 3840–3847. ISSN : 0278-0046. DOI : 10.1109/TIE.2009.2015752.
- SALISBURY, J. K. (1980). « Active stiffness control of a manipulator in cartesian coordinates ». In : *1980 19th IEEE Conference on Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes*, p. 95–100. DOI : 10.1109/CDC.1980.272026.
- SAPHARI (2011). *SAPHARI - Safe and Autonomous Physical Human-Aware Robot Interaction - Home*. <http://www.saphari.eu/>. URL : <http://www.saphari.eu/>.
- SCHMIDTLER, Jonas, Christina HARBAUER et Klaus BENGLER (2014). « Investigation of human behaviour in pushing and pulling tasks for direct manipulation of a collaborative robot ». In : Lisbonne. DOI : 10.13140/RG.2.1.4230.1601. URL : https://www.researchgate.net/publication/274100213_Investigation_of_human_behaviour_in_pushing_and_pulling_tasks_for_direct_manipulation_of_a_collaborative_robot.
- SCHUTTER, J. De et H. Van BRUSSEL (1988). « Compliant Robot Motion II. A Control Approach Based on External Control Loops ». In : *The International Journal of Robotics Research* 7.4, p. 18–33. ISSN : 0278-3649, 1741-3176. DOI : 10.1177/027836498800700402. URL : <http://ijr.sagepub.com/content/7/4/18>.
- SERAJI, H. (1994). « Adaptive admittance control : an approach to explicit force control in compliant motion ». In : , *1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1994. Proceedings*, 2705–2712 vol.4. DOI : 10.1109/ROBOT.1994.350927.
- SETO, F., K. KOSUGE et Y. HIRATA (2005). « Self-collision avoidance motion control for human robot cooperation system using RoBE ». In : *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005. (IROS 2005)*, p. 3143–3148. DOI : 10.1109/IROS.2005.1544958.
- SEYFFERTH, W., A.J. MAGHZAL et J. ANGELES (1995). « Nonlinear modeling and parameter identification of harmonic drive robotic transmissions ». In : , *1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1995. Proceedings. T. 3*, 3027–3032 vol.3. DOI : 10.1109/ROBOT.1995.525714.
- SICILIANO, Bruno et Oussama KHATIB (2008). *Handbook of Robotics*. Springer Berlin Heidelberg. ISBN : 978-3-540-23957-4. URL : <http://www.springer.com/engineering/robotics/book/978-3-540-23957-4>.
- SIMONI, L. et al. (2015). « Friction modeling with temperature effects for industrial robot manipulators ». In : *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, p. 3524–3529. DOI : 10.1109/IROS.2015.7353869.
- SOUSA, Cristóvão, Rui CORTESÃO et Pedro QUEIRÓS (2009). « Compliant Comanipulation Control for Medical Robotics ». In : *Proceedings of the 2Nd Conference on Human System Interactions. HSI'09*. Piscataway, NJ, USA : IEEE Press, 262–268. ISBN : 978-1-4244-3959-1. URL : <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1689359.1689406>.
- ST. CLAIR, W. H et al. (2004). « Advantage of protons compared to conventional X-ray or IMRT in the treatment of a pediatric patient with medulloblastoma ». In : *International Journal of Radiation Oncology*Biophysics* 58.3, p. 727–734. ISSN : 0360-3016. DOI :

-
- 10.1016/S0360-3016(03)01574-8. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360301603015748>.
- SURDILOVIC, D. et J. RADOJICIC (2007). « Robust Control of Interaction with Haptic Interfaces ». In : *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 3237–3244. DOI : 10.1109/ROBOT.2007.363972.
- SWEVERS, J. et al. (2000). « An integrated friction model structure with improved presliding behavior for accurate friction compensation ». In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 45.4, p. 675–686. ISSN : 0018-9286. DOI : 10.1109/9.847103.
- TAKUBO, T., H. ARAI et K. TANIE (2001). « Human-robot cooperative handling using virtual nonholonomic constraint in 3-D space ». In : *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA*. T. 3, 2680–2685 vol.3. DOI : 10.1109/ROBOT.2001.933027.
- TATSUZAKI, Hideo, Marcia M. URIE et Christopher G. WILLETT (1992). « 3-D comparative study of proton vs. x-ray radiation therapy for rectal cancer ». In : *International Journal of Radiation Oncology*Biology*Physics* 22.2, p. 369–374. ISSN : 0360-3016. DOI : 10.1016/0360-3016(92)90056-N. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036030169290056N>.
- TAYLOR, Russell et al. (1999). « A Steady-Hand Robotic System for Microsurgical Augmentation ». In : *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI’99*. Sous la dir. de Chris TAYLOR et Alain COLCHESTER. Lecture Notes in Computer Science 1679. Springer Berlin Heidelberg, p. 1031–1041. ISBN : 978-3-540-66503-8 978-3-540-48232-1. URL : http://link.springer.com/chapter/10.1007/10704282_112.
- TSUJI, Toshio, Masamitsu MORITANI et al. (1996). « An Analysis of Human Hand Impedance Characteristics During Isometric Muscle Contractions ». In : *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers* 32.2, p. 271–280. DOI : 10.9746/sicetr1965.32.271.
- TSUJI, Toshio et Yoshiyuki TANAKA (2008). « Bio-mimetic impedance control of robotic manipulator for dynamic contact tasks ». In : *Robotics and Autonomous Systems* 56.4, p. 306–316. ISSN : 0921-8890. DOI : 10.1016/j.robot.2007.09.001. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889007001133>.
- TSUJI, T. et al. (1994). « Spatial characteristics of human hand impedance in multi-joint arm movements ». In : *Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems ’94. ’Advanced Robotic Systems and the Real World’, IROS ’94*. T. 1, 423–430 vol.1. DOI : 10.1109/IROS.1994.407441.
- TURNWALD, A., S. EGER et D. WOLLHERR (2015). « Investigating similarity measures for locomotor trajectories based on the human perception of differences in motions ». In : *2015 IEEE International Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO)*, p. 1–6. DOI : 10.1109/ARSO.2015.7428196.
- TUSTIN, A. (1947). « The effects of backlash and of speed-dependent friction on the stability of closed-cycle control systems ». In : *Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part IIA : Automatic Regulators and Servo Mechanisms* 94.1, p. 143–151. DOI : 10.1049/ji-2a.1947.0021.
- VUKOBRATOVIC, Miomir (2009). « Control of Robots in Contact Tasks : A Survey ». In : *Dynamics and Robust Control of Robot-Environment Interaction*. World Scientific. ISBN : 978-981-283-476-8.
- WAIBOER, Rob (2007). « Dynamic modelling, identification and simulation of industrial robots – for off-line programming of robotised laser welding – ». In :
-

- WAIBOER, Rob, Ronald AARTS et Ben JONKER (2005). « Velocity dependence of joint friction in robotic manipulators with gear transmissions ». In : *Proceedings of the ECCOMAS Thematic Conference Multibody Dynamics 2005*. Madrid, Spain, p. 1–19. URL : <http://doc.utwente.nl/52669/>.
- WHITNEY, D. E., C. A. LOZINSKI et J. M. ROURKE (1986). « Industrial Robot Forward Calibration Method and Results ». In : *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 108.1, p. 1–8. ISSN : 0022-0434. DOI : 10.1115/1.3143737. URL : <http://dx.doi.org/10.1115/1.3143737>.
- WHITNEY, Daniel E. (1977). « Force Feedback Control of Manipulator Fine Motions ». In : *J. Dyn. Sys., Meas., Control* 99(2), 91-97. DOI : 10.1115/1.3427095.
- WOJEWODA, Jerzy et al. (2008). « Hysteretic effects of dry friction : modelling and experimental studies ». In : *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences* 366.1866. PMID : 17947206, p. 747–765. ISSN : 1364-503X. DOI : 10.1098/rsta.2007.2125.
- ZANCHETTIN, Andrea Maria et al. (2010). « Kinematic motion analysis of the human arm during a manipulation task ». In : *Robotics (ISR), 2010 41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK)*, p. 1–6.

Conférences internationales avec comité de lecture

- BAUMEYER, Julien, Vincent BESNARD et al. (2016). « Enhance manipulability for patient positioning systems during the pre-positioning phase using physical human-robot interaction approach ». In : *Particle Therapy Co-operative Group (PTCOG55)*. Prague.
- BAUMEYER, Julien, Sylvain MIOSSEC et al. (2016). « Torque Collision Detection with experimental validation for protontherapy positioning robot ». In : *Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing 2016*. Cyprus.
- BAUMEYER, Julien, Pierre VIEYRES et al. (2015). « Robotic co-manipulation with 6 DoF admittance control : application to patient positioning in proton-therapy ». In : *International Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts*. Lyon. DOI : 10.1109/ARSO.2015.7428220. URL : http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=7428220&filter%3DAND%28p_IS_Number%3A7428193%29%26pageNumber%3D2.

Conférences nationales avec comité de lecture

- BAUMEYER, Julien et al. (2016). « Haptic multimodal assessment of robot manual guidance for patient pre-positioning in proton therapy ». In : *Journée Scientifique de la Société Française de Physique Médicale (SFPM)*. Nancy, France.

Conférences internes ou sans comité de lecture

- BAUMEYER, Julien (2014). « Motion generation with haptic control for a proton therapy robotic system ». In : *Journée Nationale des Jeunes Chercheurs en Robotique*. Paris.

BAUMEYER, Julien (2015). « Co-manipulation of a viscoelastic load carrying robot for patient positioning in proton-therapy ». In : *Journée des Jeunes Chercheurs du laboratoire Prisme*. Amboise.

[Julien BAUMEYER]
[Co-manipulation sûre d'un robot de protonthérapie]

Résumé : Cette thèse se place dans un contexte médical de traitements oncologiques, plus particulièrement en protonthérapie robotisée. L'objectif de cette thèse, réalisée sous contrat Cifre avec la société LEONI CIA Cable Systems, est le développement d'une commande en co-manipulation sûre dédiée à un robot médical sériel. Cette commande doit permettre à un opérateur de manipuler intuitivement et précisément un robot de grande inertie positionneur de patients. Les contributions portent sur deux axes, d'une part le développement et l'implémentation sur le robot Orion de l'entreprise LEONI CIA Cable Systems d'une commande en admittance ainsi que la comparaison de trois dispositifs haptiques, et d'autre part le développement d'un mécanisme de détection de collisions proprioceptif permettant l'amélioration de la sécurité de fonctionnement. À partir d'une revue de la littérature concernant les commandes compliantes, nous avons développé et implémenté une commande en admittance dédiée au robot Orion en tenant compte de la discrétisation de la commande par le contrôleur spécifique de ce robot. Une expérience de comparaison sur le robot nous a permis d'identifier le dispositif haptique le mieux adapté au cas clinique considéré.

Après une étude de l'état de l'art des mécanismes de détection de collisions, une approche fréquentielle de la modélisation du couple axial prenant en compte les rapports de réduction élevés et de technologie différente du robot a été proposée. Elle permet de modéliser finement le couple théoriquement fourni par les moteurs ; celui-ci est ensuite comparé avec la mesure du couple réellement produit afin de détecter une éventuelle collision.

Mots clés : commande en admittance, comanipulation, détection de collisions, protonthérapie, robot sériel

[Safe Physical Human-Robot interaction for a protontherapy robotic system]

Abstract : This PhD thesis takes place in a medical context of oncological treatments, more particularly in robotised protontherapy. The objective of this thesis, carried out under a CIFRE contract with LEONI CIA Cable Systems, is the development of a safe comanipulation control dedicated to a serial medical robot. This control law should allow an operator to intuitively and precisely manipulate a robot of high inertia for accurate patients positioning. The contributions of this thesis focus on the development and implementation of an admittance-controlled Orion robot from LEONI CIA Cable Systems and the comparison of three haptic devices, and on the other hand, on the development of a proprioceptive collision detection mechanism allowing the improvement of operational safety. Based on a review of the literature on compliant controls, we have developed and implemented an admittance control approach dedicated to the Orion robot, taking into account the discretization of the control by the controller specific to this robot. A comparison experiment on the robot allowed us to identify the haptic device best suited to the clinical case considered.

Based on a state of the art of collision detection mechanisms analysis, a frequency approach of the modeling of the axial torque taking into account the high reduction ratios and different robot technology has been proposed. It allows us to finely model the torque theoretically provided by the motors ; The latter is then compared with the measurement of the torque actually produced in order to detect a possible collision.

Keywords : admittance control, comanipulation, collision detection, protontherapy, serial robot

