

MATHIEU MYRAND

**SIMULATION DYNAMIQUE D'UNE MAIN ROBOTIQUE
SOUS-ACTIONNÉE**

Mémoire
présenté
à la Faculté des études supérieures
de l'Université Laval
pour l'obtention
du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

Département de génie mécanique
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

MARS 2004

Résumé

Ce mémoire traite de simulations dynamiques de la main robotique sous-actionnée SARAH réalisées à l'aide du logiciel ADAMS. En effet, la main SARAH est considérée comme un outil potentiel pour le robot Dextre sur la station spatiale internationale et le développement d'un modèle dynamique de la main et du robot dans un environnement virtuel est nécessaire à la planification des tâches. Dans un premier temps, les modèles dynamiques de la main robotique SARAH sont contruits selon une approche étape par étape. De même, des simulations sont effectuées afin d'établir des relations entre différents paramètres. Par la suite, le comportement du robot Dextre est ajouté aux modèles de SARAH. En effet, à l'aide de capteurs de force et de moments localisés à l'organe terminal, les bras de Dextre réagissent en se déplaçant afin de minimiser les efforts mesurés. Finalement, plusieurs tâches sont simulées. La principale est la préhension d'une poignée habituellement réservée aux astronautes afin d'aider la stabilisation du robot Dextre.

Mathieu Myrand

Clément Gosselin

Avant-propos

Tout d’abord, je désire remercier monsieur Clément Gosselin, mon directeur de recherche durant mes travaux de maîtrise. En effet, il a cru en mes capacités et il m’a donné la chance d’accomplir mon projet dans un environnement de travail stimulant. Ses précieux conseils ont su me guider vers la bonne solution et m’ont permis d’approfondir mes connaissances dans le domaine de la robotique.

De même, je souhaite remercier Thierry Laliberté pour le temps qu’il a passé à m’aider à bien comprendre le fonctionnement de la main SARAH. Thierry, le design de cette main est génial ! Je veux aussi remercier Boris Mayer-St-Onge pour nous permettre d’avoir des ressources informatiques toujours à la fine pointe et un réseau sans faille. De même, l’aide de monsieur Éric Martin de l’Agence Spatiale Canadienne (ASC) qui nous a fourni un modèle SIMULINK des bras du manipulateur agile spécialisé (SPDM) a été grandement appréciée.

Je veux aussi remercier tous les membres du laboratoire que j’ai eu la chance de côtoyer durant ces deux ans. Je n’oublierai pas les “poutines du vendredi”, les fameuses “Pauses-Dufour” et ces jeudis soirs mémorables au Pub. Une pensée spéciale pour Nicolas Bouchard qui m’a fortement incité à soumettre mon projet de recherche au concours du Forum des étudiants en aérospatiale 2003. Sans toi, je n’aurais pas participé, ni gagné le premier prix.

Je m’en voudrais de ne pas remercier mes parents pour leur soutien et pour m’avoir donné le goût d’apprendre. Je veux aussi dire “merci” à ma soeur, à tous mes amis et à tous les gens que j’aime. Ma réussite est aussi la vôtre.

Finalement, je désire remercier le conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), les chaires de recherche du Canada ainsi que la compagnie MD Robotics pour leur soutien financier durant mes études graduées. Ce fut extrêmement apprécié. Merci !

Table des matières

Résumé	i
Avant-propos	ii
Table des matières	iv
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	viii
Introduction	1
1 Modélisation dynamique de SARAH dans ADAMS	8
1.1 Approche employée dans la construction des modèles dans ADAMS . . .	9
1.2 Modèles construits dans ADAMS	10
1.2.1 Mains planes (2D)	10
1.2.1.1 Main plane avec doigts à 2 ddl	10
1.2.1.2 Main plane avec doigts à 3 ddl	12
1.2.2 Mains tridimensionnelles (3D)	13
1.2.2.1 Main tridimensionnelle avec doigts à 2 ddl	13
1.2.2.2 Main tridimensionnelle avec doigts à 3 ddl	16
1.3 Construction des éléments mécaniques dans ADAMS	18
1.3.1 Ressorts en torsion	18
1.3.2 Amortisseur	18
1.3.3 Butées mécaniques	19
1.3.4 Mécanisme autobloquant	20

1.3.5	Force de fermeture	21
1.3.6	Forces de contact	22
2	Analyse géométrique du levier 3D en configuration cylindrique	24
2.1	Problème géométrique inverse du levier 3D	25
2.1.1	Solution au problème géométrique inverse	25
2.1.2	Vérification du PGI	30
2.2	Position d'actionnement du levier	33
2.3	Dérivation des matrices jacobiennes	35
2.4	Singularités	38
3	Simulations effectuées avec le modèle ADAMS de la main SARAH (prise cylindrique)	40
3.1	Résultats qualitatifs	41
3.2	Résultats quantitatifs	42
3.2.1	Effet de la masse volumique sur un objet libre	42
3.2.2	Relation entre la force de fermeture et la force de serrage	46
3.2.3	Effort dans les vis de transmission	50
3.2.4	Point d'équilibre	52
3.2.5	Grosueur de l'objet à saisir	53
4	Comportement compliant	56
4.1	Définition de la compliance	57
4.2	Dextre (Manipulateur agile spécialisé)	59
4.3	Modèle linéarisé du robot Dextre avec FMA	60
4.4	Modèle simplifié unidimensionnel	62
4.5	Implantation dans ADAMS du modèle à 6 ddl de Dextre	66
5	Main SARAH avec contrôleur compliant (<i>Force/Moment Accommodation</i>)	69
5.1	Vérification de l'approximation du deuxième ordre	70
5.1.1	Premier niveau de vérification	70
5.1.2	Second niveau de vérification	72
5.2	Approximation du premier ordre	72
5.3	Simulations de tâches incluant le FMA	74
5.3.1	Cylindre	75
5.3.1.1	Cylindre centré	75
5.3.1.2	Cylindre décentré	75
5.3.1.3	Cylindre centré avec angle	78

5.3.2	Poignée pour astronautes	78
5.3.3	Objet de forme quelconque	82
5.3.4	Observations générales	83
	Conclusion	84
	Bibliographie	89
A	Calcul des forces de contact dans ADAMS	92
A.1	Boîte de dialogue	92
A.1.1	Géométries	93
A.1.2	Type de force de contact	94
A.1.3	Ajout de la friction	96
A.1.4	Conseils	96

Liste des tableaux

3.1	Valeurs utiles à la conversion de la force de fermeture (N) en couple d'entrée (lb-po).	50
4.1	Coefficients des six fonctions de transfert du 2 ^e ordre.	67
5.1	Coefficients des six fonctions de transfert du 1 ^{er} ordre.	74
A.1	Estimations des coefficients utiles à la définition des forces de contact. .	94
A.2	Estimations des coefficients utiles à la définition des forces de friction. .	96

Liste des figures

1	Principe du sous-actionnement, image fournie par Thierry Laliberté. . .	2
2	Différents types de prises avec la main SARAH M1, tiré de http://wwwrobot.gmc.ulaval.ca	3
3	Mécanisme d’avance, image tirée de [4]	4
4	Système d’entretien mobile (MSS) de la station spatiale. Image recueillie sur le site web de l’agence spatiale canadienne (http://www.espace.gc.ca/).	5
1.1	Approche employée dans la construction des modèles dans ADAMS. . .	9
1.2	Schéma général de la main plane avec doigts à 2 ddl.	10
1.3	Simulations effectuées avec la main plane employant les doigts à 2 ddl.	12
1.4	Simulations effectuées avec la main plane employant les doigts à 3 ddl.	14
1.5	Modèle du levier 3D utilisé pour simuler le système d’engrenages à une entrée et à trois sorties dans ADAMS pour la prise cylindrique.	15
1.6	Illustration de la prise en puissance.	17
1.7	Illustration de la prise en précision.	17
1.8	Repères nécessaires à la construction des butées mécaniques.	19
1.9	Repères nécessaires à la construction des butées mécaniques.	21
1.10	Les dix corps “fantômes” ajoutés sur la main.	23
2.1	Modèle du levier 3D utilisé pour simuler le différentiel à une entrée et à trois sorties dans ADAMS.	26
2.2	Définition des angles θ_i situés entre les vecteurs \mathbf{u}_i et l’axe y_1 , où $i = 1, 2, 3$.	27
2.3	Définition des angles ϕ et ψ permettant le changement de repère. . . .	27

2.4	Configuration finale de la prise simulée dans ADAMS utile à la vérification du PGI.	30
2.5	Évolution des angles θ_i , où $i = 1, 2, 3$	31
2.6	Erreur absolue entre les angles obtenus à l'aide du modèle ADAMS et ceux découlant du PGI.	32
2.7	Illustration des angles α_i	33
2.8	Erreur absolue générée pour chacune des positions d'actionnement étudiées.	34
2.9	Lieu d'actionnement du levier différentiel 3d.	35
2.10	Similarités entre le levier différentiel 3D et la somme de deux leviers plans.	35
2.11	Les différents leviers 3D employés dans la construction des modèles ADAMS de SARAH.	36
3.1	Illustration des essais qualitatifs réalisés.	41
3.2	Évolution du module des forces de contact dans le temps.	42
3.3	Configuration finale de la main pour une grande masse volumique de $1 \times 10^{-3} \text{ kg/mm}^3$ (a) et pour une masse volumique faible de $1 \times 10^{-7} \text{ kg/mm}^3$ (b).	44
3.4	Effet de la masse volumique sur la prise d'un objet cylindrique libre.	45
3.5	Force de serrage en fonction du déplacement du cylindre.	46
3.6	Force de serrage sur l'objet en fonction de la force de fermeture pour un cylindre libre.	48
3.7	Différentiel à une entrée et trois sorties utilisé sur la vraie main (image fournie par Thierry Laliberté).	49
3.8	Schéma de la membrure d'actionnement proximale ayant le comportement autobloquant.	51
3.9	Force équivalente générée par l'autoblocage en fonction de la force appliquée au centre du cylindre.	52
3.10	Configuration fermée (a) et ouverte (b) de la phalange distale lors de la prise en précision d'un objet fixe.	53
3.11	Variation de l'angle de la phalange distale en fonction de la hauteur de l'objet à saisir.	54
3.12	Effet du diamètre du cylindre sur la force de serrage générée.	55
4.1	Le <i>Remote Compliant Center</i> , extrait des notes de "Mécanique des manipulateurs" (GMC-64388).	58

4.2	Composantes principales de Dextre, le manipulateur agile spécialisé. Image recueillie sur le site web de l'agence spatiale canadienne (http://www.espace.gc.ca/).	59
4.3	Modèle SIMULINK utilisant les variables d'état linéarisé du SPDM avec FMA.	61
4.4	DCL du modèle à une dimension.	62
4.5	Fenêtre de création de la variable FORCE_X.	65
4.6	Réponse en vitesse de l'objet dans l'environnement ADAMS à une force de 100 N.	66
4.7	Point d'application du comportement FMA associé au robot Dextre. . .	68
5.1	Repère associé à un modèle ADAMS de SARAH.	71
5.2	Premier niveau de vérification : force en x et couple en x	71
5.3	Graphique comparatif des réponses obtenues à partir des trois modèles. . .	73
5.4	Prise du cylindre centré de 60 mm de diamètre situé à 50 mm de la paume. . .	76
5.5	Prise du cylindre de 100 mm de diamètre, situé à 60 mm de la paume et à 10 mm du milieu de la main.	77
5.6	Prise du cylindre centré avec angle dans la direction normale à la paume de la main (x).	79
5.7	Dimensions de la plus petite des poignées (a) pour astronautes dispersées sur la station spatiale internationale (ISS) et séquence de saisie (b) à l'aide du FMA.	80
5.8	Séquence de saisie de l'objet en forme de ballon de football.	82
A.1	Définition des forces de contact dans ADAMS.	93
A.2	Schéma illustrant les différents arguments nécessaires à la fonction IMPACT, image tirée de manuel d'aide à l'utilisateur du logiciel ADAMS [11].	95
A.3	Relation entre la vitesse des objets en contact et le coefficient de friction, image tirée de manuel d'aide à l'utilisateur d'ADAMS [11].	97

Introduction

En guise d'introduction à ce mémoire, quelques informations importantes décrivant la main robotique SARAH sont présentées. Par la suite, le contexte et la pertinence du projet sont mis en évidence. Finalement, l'organisation du mémoire est proposée.

La main robotique SARAH

La main robotique SARAH (Self-Adapting Robotic Auxiliary Hand) est une main sous-actionnée qui a été développée au laboratoire de robotique de l'Université Laval en collaboration avec la compagnie MD Robotics. Une main est sous-actionnée lorsqu'elle possède moins d'actionneurs (a) que de degrés de liberté (n). Dans ce cas, le degré de sous-actionnement est de $n - a$ [1]. Il faut donc remplacer les $n - a$ degrés de liberté non-actionnés par des éléments passifs comme des ressorts en torsion et des butées mécaniques afin de réaliser le sous-actionnement du doigt ([2],[3]). D'ailleurs, une séquence de fermeture illustrant le principe de sous-actionnement est présentée à la figure 1. Sur cette image, un doigt ayant deux degrés de liberté (un degré par phalange) est commandé par une force représentée par la flèche. Avant le premier contact, le doigt se déplace comme un corps rigide autour du pivot. Lorsque le premier contact se fait, la phalange proximale reste fixe et la force de fermeture se transmet au ressort en torsion, ce qui détend le doigt. Finalement, la phalange distale se déplace

jusqu'à ce qu'elle touche l'objet. Donc, grâce au sous-actionnement, le doigt s'adapte à la forme de l'objet à saisir.

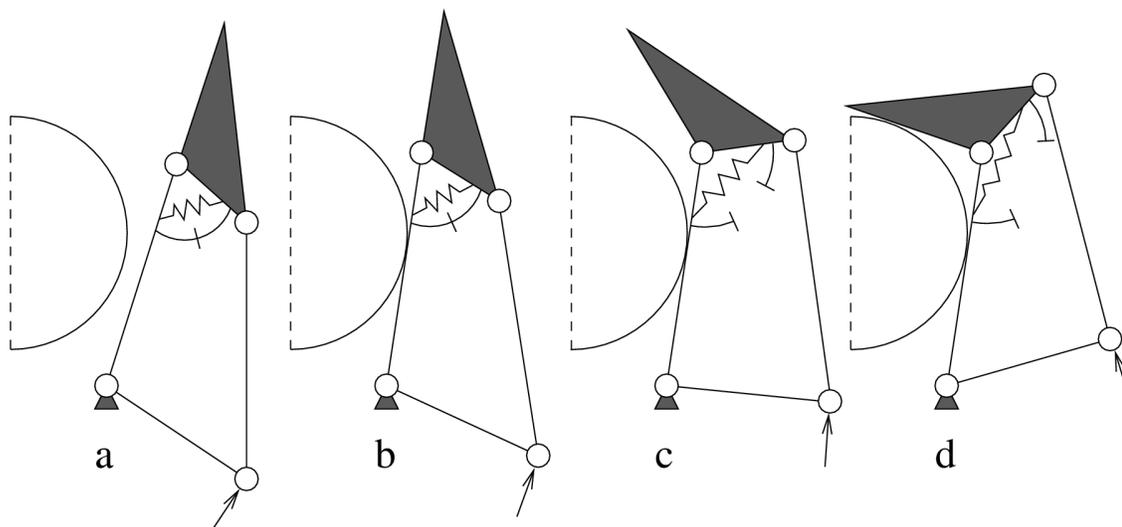
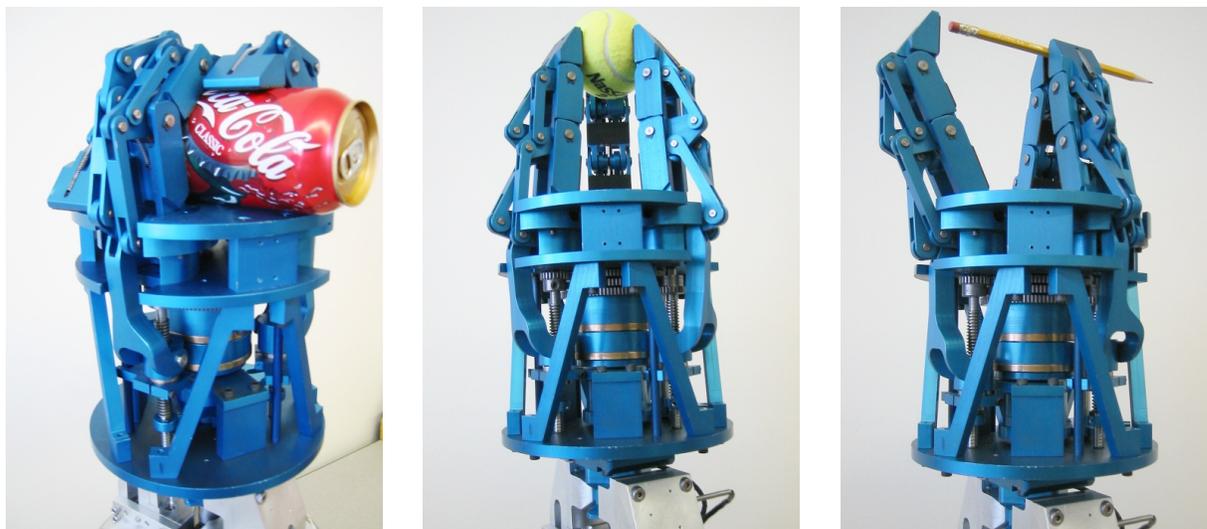


Figure 1: Principe du sous-actionnement, image fournie par Thierry Laliberté.

La main robotique SARAH est composée de trois doigts sous-actionnés. Chaque doigt possède trois phalanges : la phalange proximale près de la paume, la phalange médiane et la phalange distale à l'extrémité. De plus, les trois doigts sont situés aux sommets d'un triangle équilatéral. En effet, deux de ces doigts peuvent pivoter sur eux-mêmes de manière synchronisée afin d'adopter trois configurations de prises. L'autre doigt, le pouce, reste fixe. Ces configurations sont illustrées à la figure 2. L'image de gauche illustre la prise cylindrique d'une canette de boisson gazeuse. Lors d'une prise cylindrique, les deux doigts mobiles font face au pouce. De plus, une prise cylindrique peut être réalisée en puissance si l'objet est situé dans le creux de la main et si toutes les phalanges sont impliquées (comme pour la canette), ou encore en précision si l'objet est saisi seulement par le bout des doigts (phalanges distales). De même, la figure 2 (b) illustre la prise sphérique. Dans ce cas, les trois sont orientés vers le centre de la paume. L'image illustre la prise en précision d'une balle de tennis par les phalanges distales. Bien entendu, une prise en puissance est aussi possible avec la configuration sphérique. Finalement, la figure 2 (c) montre la configuration plane. Cette prise est légèrement différente car seulement deux des doigts sont nécessaires (les doigts qui peuvent pivoter) alors que le pouce est bloqué. En effet, les deux doigts mobiles se font face. La figure 2 (c) montre la prise en précision d'un crayon. De même, la prise en puissance est aussi possible en configuration plane. Bref, ces trois images démontrent assez clairement que le sous-actionnement des doigts permet l'adaptation de la main à la forme de l'objet.



(a) Cylindrique

(b) Sphérique

(c) Plane

Figure 2: Différents types de prises avec la main SARAH M1, tiré de <http://wwwrobot.gmc.ulaval.ca>.

Par ailleurs, la main robotique SARAH n'est actionnée que par un seul moteur. En effet, grâce à un ingénieux différentiel à une entrée et à trois sorties, le couple appliqué à la base de la main est divisé en trois couples identiques transmis à chacun des doigts. De plus, si un des doigts est bloqué, le couple d'entrée se distribue entre les deux doigts restants. Donc, en plus du sous-actionnement de chacun des doigts à trois degrés de liberté, il existe également un sous-actionnement entre les doigts.

Par ailleurs, le couple servant à fermer les doigts de la main peut aussi être utilisé afin de changer la configuration de prise en faisant pivoter les deux doigts mobiles sur eux-mêmes. Ceci est effectué grâce à un mécanisme d'avance permettant de passer d'un mode de fonctionnement à l'autre. Ce mécanisme est illustré à la figure 3 et il se situe à la base de la main. L'écrou situé au bas de la figure correspond à l'endroit où le couple d'entrée est appliqué. À chaque fois que l'écrou est avancé et relâché, l'arbre atteint une des positions associées à un mode de fonctionnement particulier (orientation des doigts ou fermeture). Bref, le mécanisme d'avance responsable du changement de position de l'arbre est semblable à celui d'un stylo à bille. Ainsi, selon sa position, le second écrou fixé au sommet de l'arbre s'engage soit dans la douille permettant de contrôler l'orientation des doigts ou soit dans la douille servant à activer la fermeture des doigts. Donc, la main robotique SARAH est une main sous-actionnée à 10 degrés de liberté,

c'est-à-dire trois degrés de liberté par doigt et un degré de liberté supplémentaire associé au mécanisme de reconfiguration des doigts. En terminant, les doigts de la main SARAH utilisent un mécanisme spécial appelé *Parallel Precision Grasp Mechanism* assurant le maintien des surfaces des phalanges distales perpendiculaires à la paume de la main [4] avant le premier contact avec l'objet.

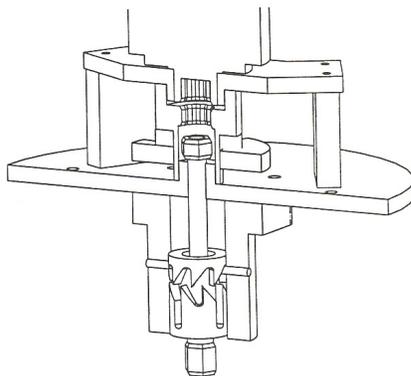


Figure 3: Mécanisme d'avance, image tirée de [4]

Une main sous-actionnée comme SARAH se distingue des autres mains robotiques existantes sur plusieurs plans. Tout d'abord, le contrôle est simplifié puisqu'il n'y a pas de capteurs. De plus, le design de SARAH en fait une main robuste pouvant supporter de grandes charges. La plupart des mains existantes, comme la main *UTAH/M.I.T.* [5] ou la main *DLR-Hand II* [6], sont beaucoup plus complexes au point de vue du contrôle et souvent plus fragiles. Cependant, elles sont destinées à la manipulation d'objet tandis que SARAH a été conçue en vue de la préhension d'objets.

Contexte et pertinence du projet

Tel que décrit dans [7], la main robotique SARAH est considérée comme un outil potentiellement utilisable à l'organe terminal du robot SPDM (*Special Purpose Dexterous Manipulator*) sur la station spatiale internationale. Le robot SPDM fait partie du système d'entretien mobile (MSS) de la station spatiale illustré à la figure 4. Trois éléments font partie du système d'entretien mobile. Tout d'abord, il y a la base mobile (MBS) située au bas de la figure 4. Le second élément est le grand bras appelé télémanipulateur de la station spatiale (SSRMS) ou encore Canadarm2. Finalement, le dernier élément est le manipulateur agile spécialisé (SPDM), fixé au Canadarm2 sur

la figure 4 et possédant deux bras et un torse. Ces trois éléments peuvent fonctionner tous ensemble ou séparément. Par exemple, le robot SPDM peut se fixer directement sur la base mobile.

Une des tâches les plus importantes que SARAH est appelée à réaliser comme outil du robot SPDM est de saisir une des nombreuses poignées dispersées sur la station spatiale (habituellement réservées aux astronautes) afin de stabiliser le manipulateur agile spécialisé (SPDM) pendant que l'autre bras effectue un travail. En fait, un outil comme SARAH serait utilisé conjointement avec le robot SPDM afin d'accomplir de nombreuses tâches dans le but de limiter le temps passé par les astronautes dans l'espace (Extra Vehicular Activity - EVA).



Figure 4: Système d'entretien mobile (MSS) de la station spatiale. Image recueillie sur le site web de l'agence spatiale canadienne (<http://www.espace.gc.ca/>).

Afin d'avoir une idée générale de la façon dont SARAH pourrait accomplir ces tâches avant de se lancer dans une série de tests avec la vraie main et un robot imitant le comportement du manipulateur agile spécialisé (SPDM), le développement d'un modèle virtuel de SARAH incluant le robot SPDM est essentiel. Chez MD Robotics, la planification des tâches est effectuée à l'aide d'un logiciel spécialement développé à cette fin appelé *RAMPS* (Robotic and Mission Planning System). Cependant, ce logiciel utilise une approche cinématique et il n'y a pas de dynamique dans la modélisation [8]. D'autre part, certains logiciels spécialisés comme *GraspIt!* [9] ont été créés afin de pouvoir simuler dynamiquement la prise d'objets par une main robotique. Par contre, le nombre de mains disponible est limité (Barrett, DLR, etc...) et les modifications pouvant être apportées aux modèles existants sont restreintes. Heureusement, un logiciel comme ADAMS donne beaucoup plus de libertés à l'utilisateur. En effet, un article traitant de la création d'une main dans ADAMS a déjà été publié [10] et ce logiciel semble parfaitement adapté à la création d'un modèle dynamique de la main sous-actionnée SARAH.

Donc, l'objectif de ce mémoire consiste en la création d'un modèle dynamique de SARAH et d'un des bras du manipulateur agile spécialisé (SPDM) afin de pouvoir simuler la réalisation de tâches particulières par la main SARAH sur la station spatiale internationale, dont notamment la prise d'une poignée.

Organisation du mémoire

Ce mémoire est divisé en cinq chapitres. Au chapitre 1, les diverses étapes menant à la construction du modèle dynamique de la main SARAH dans ADAMS sont expliquées. Par la suite, au chapitre 2, l'analyse géométrique du levier 3D utilisé dans le modèle ADAMS de SARAH afin de remplacer le différentiel à une entrée et à trois sorties est présentée. De même, le chapitre 3 traite des principaux résultats obtenus lors des simulations réalisées avec la configuration cylindrique du modèle ADAMS de SARAH. Le chapitre 4 a pour thème la création du modèle d'un des bras du SPDM incluant le comportement particulier associé au *Force/Moment Accommodation*. Finalement, le chapitre 5 présente les simulations de tâches réalisées à l'aide du modèle dynamique de SARAH et du robot SPDM dans ADAMS.

Chapitre 1

Modélisation dynamique de SARAH dans ADAMS

Ce chapitre a pour thème la construction des modèles dynamiques de la main SARAH dans ADAMS. L'approche employée consiste à créer un modèle simple, à le valider à l'aide de simulations et à le complexifier progressivement. D'ailleurs, chacun des modèles créés menant à l'obtention du modèle dynamique final de SARAH sont présentés. Finalement, la construction des éléments mécaniques dans ADAMS est expliquée.

1.1 Approche employée dans la construction des modèles dans ADAMS

L'objectif du chapitre 1 est d'obtenir une modélisation dynamique réaliste et robuste de la main robotique sous-actionnée à 10 degrés de liberté SARAH. Pour ce faire, une approche particulière a été utilisée. Cette méthode est appelée "the crawl-walk-run approach" telle que décrite dans le manuel d'aide à l'utilisateur d'ADAMS [11]. En termes clairs, cette approche consiste à débiter la modélisation en utilisant un modèle simplifié. Par la suite, une fois la validation du modèle complétée à l'aide de plusieurs simulations, il devient possible de complexifier le système. De même, le processus se répète avec le modèle plus complexe et ainsi de suite. Bref, il est beaucoup plus facile de vérifier le bon fonctionnement et de trouver les erreurs de cette façon que de tenter de construire le modèle désiré au premier essai.

Pour ce faire, quatre modèles ont été développés de façon séquentielle. Il a été décidé que le premier modèle créé dans ADAMS serait une version plane (en deux dimensions) de la main employant le doigt à deux degrés de liberté étudié dans [1]. La seconde version de la main étudiée dans ADAMS est aussi une version en deux dimensions. Cependant, des doigts à trois degrés de liberté sont employés. Fait à noter, étant donné la complexité des géométries utilisées, les pièces ne sont pas construites directement dans ADAMS. En effet, le logiciel *Pro/ENGINEER* est utilisé. De plus, le module *MECHANISM/Pro* est nécessaire afin de faire le lien entre la construction des pièces et des assemblages dans *Pro/ENGINEER* avec le logiciel ADAMS. Finalement, les deux autres modèles créés sont des versions en trois dimensions. Le premier est construit à partir des doigts à deux degrés de liberté tandis que le second, qui constitue le modèle final, fait appel aux doigts à trois degrés de liberté. Le chemin parcouru est illustré à la figure 1.1.

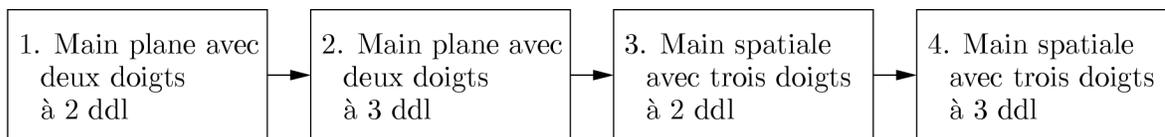


Figure 1.1: Approche employée dans la construction des modèles dans ADAMS.

1.2 Modèles construits dans ADAMS

1.2.1 Mains planes (2D)

1.2.1.1 Main plane avec doigts à 2 ddl

Le premier modèle développé dans l'environnement ADAMS est une main possédant deux doigts à deux degrés de liberté dans le plan. Cette main est illustrée à la figure 1.2 et constitue un niveau supérieur de complexité par rapport au doigt étudié dans [1]. Cette architecture est inspirée de l'architecture présentée dans le brevet du doigt sous-actionné [12].

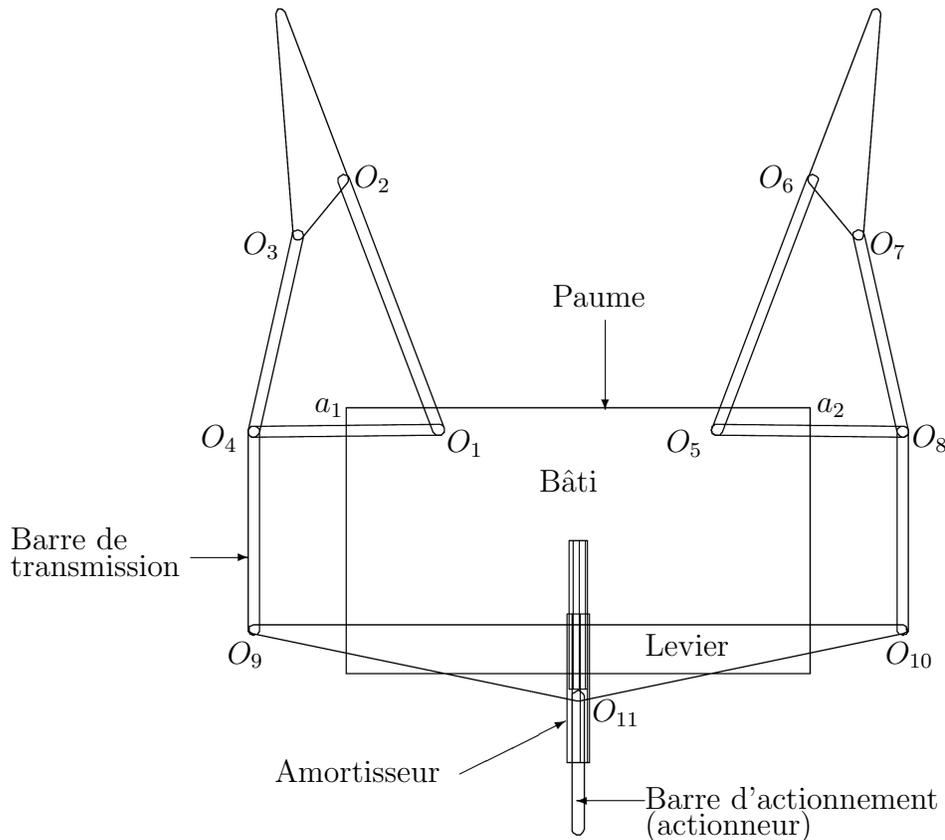


Figure 1.2: Schéma général de la main plane avec doigts à 2 ddl.

Voici une brève description de l'architecture. La main est composée des éléments suivants : le bâti, la paume, les doigts à deux degrés de liberté, le levier différentiel, les barres de transmission et la barre d'actionnement. À noter que la barre d'actionnement

est liée au bâti par une liaison prismatique orientée perpendiculairement à la surface de la paume. Toutes les autres articulations sont de type rotoïde.

Tout d'abord, des ressorts en torsion (éléments passifs) sont présents aux articulations O_2 et O_6 pour permettre le sous-actionnement du doigt. Tout comme le doigt étudié dans [1], des butées mécaniques sont présentes aux articulations O_2 et O_6 . Les limites angulaires de déplacement de ces articulations sont de 0° à 130° par rapport à la phalange proximale pour le doigt de droite et de -130° à 0° pour le doigt de gauche. En outre, un comportement autobloquant est ajouté aux articulations O_1 et O_5 . Cette caractéristique admet le déplacement de la membrure a_1 dans la direction horaire et s'y oppose dans la direction antihoraire lors de la fermeture des doigts sur l'objet. Encore une fois, concernant le doigt de droite, le mouvement de a_2 est plutôt permis dans le sens antihoraire. Sur la main robotique SARAH, ce sont les vis de transmission qui sont responsables du comportement autobloquant. En effet, les membrures actionnées par les vis de transmission ne peuvent se déplacer que vers les l'objet lors de la fermeture. Bien entendu, les doigts ne sont pas autobloquants lors de l'ouverture de la main.

De même, la main est actionnée par une force appliquée sur la barre d'actionnement dans la direction normale à la paume de la main. Donc, le contrôle de la main se fait en force et non en déplacement. Par ailleurs, un amortisseur a été ajouté entre l'actionneur et le bâti afin de limiter la vitesse de fermeture de la main sur l'objet. De cette façon, il n'y a pas de génération de grandes forces de contact lorsque les doigts rencontrent l'objet pour la première fois. La beauté de cette approche réside dans le fait que l'amortisseur n'influence pas la force de fermeture lorsque la prise de l'objet est complétée. En effet, la vitesse de déplacement de l'actionneur par rapport au bâti devient nulle. L'avantage de la commande en force par rapport à la commande en déplacement est l'atteinte d'un état de stabilité de la main lorsque la prise est complétée. Contrairement au doigt étudié dans [1], aucun capteur n'est utilisé afin de mettre fin aux simulations. De plus, pour cette architecture, cinq forces de contact ont été définies entre la main et l'objet à saisir : il y a quatre forces de contact entre les phalanges (proximales et distales) et l'objet ainsi qu'une force de contact entre la paume et l'objet. Le frottement est également pris en compte dans ce modèle. En effet, les coefficients de frottement statique et dynamique ont été fixés à 0.8 et à 0.76 afin de simuler un contact entre du caoutchouc et de l'acier. Ces valeurs sont tirées du manuel d'aide à l'utilisateur d'ADAMS [11] et elles sont en continuité avec les valeurs choisies dans [1]. Finalement, une prise en puissance ainsi qu'une prise en précision réalisées à l'aide de la main plane ayant

deux doigts à deux degrés de liberté sont illustrées à la figure 1.3.

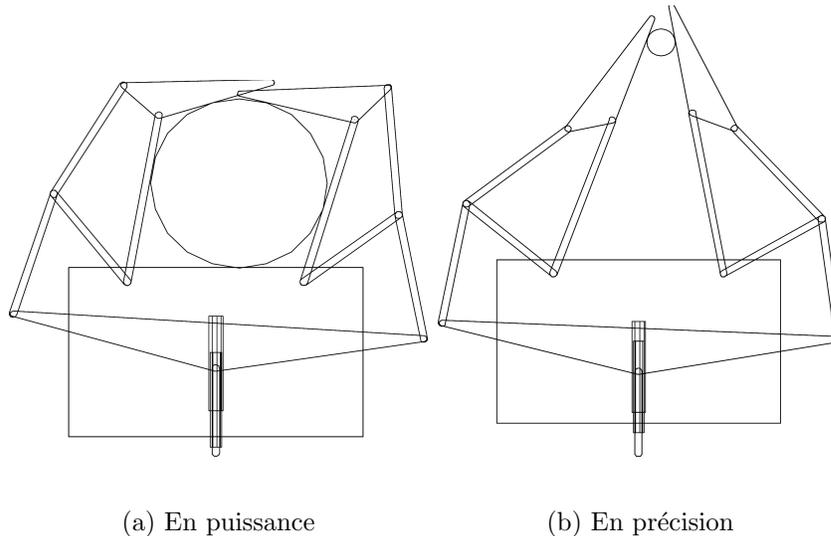


Figure 1.3: Simulations effectuées avec la main plane employant les doigts à 2 ddl.

1.2.1.2 Main plane avec doigts à 3 ddl

Le second modèle développé suivant l’approche “crawl-walk-run” est légèrement plus complexe que le premier. En effet, les doigts sous-actionnés à deux degrés de liberté sont dorénavant remplacés par des doigts sous-actionnés à trois degrés de liberté. De plus, le “parallel precision grasp mechanism” [4] est utilisé afin de maintenir les phalanges distales perpendiculaires à la surface de la paume avant le premier contact. Comme pour la main employant les doigts à deux degrés de liberté, il est possible d’effectuer à la fois des prises en puissance et des prises en précision. De façon identique au premier modèle développé, le système de sous-actionnement entre les doigts utilise un levier différentiel entraîné par la barre d’actionnement. Cela permet une distribution de la force entre les doigts durant la fermeture. De même, si un doigt est bloqué, l’autre doigt est capable de compléter son mouvement de fermeture.

Voici les caractéristiques principales du modèle dynamique développé à l’aide du logiciel ADAMS. Tout d’abord, les dimensions des doigts à trois degrés de liberté correspondent à celles des doigts de la main sous-actionnée à 10 degrés de liberté. De même, la distance entre les points d’ancrage des deux doigts avec la paume correspond à la distance entre les doigts lors d’une configuration en prise cylindrique de la main SARAH. En tout, six ressorts en torsion sont utilisés (trois par doigt) : il y en a un

entre la paume et la membrure parallèle proximale, un entre la phalange proximale et la phalange médiane ainsi qu'un entre la phalange distale et la membrure parallèle distale. La valeur de la constante du ressort a été fixée à 0.1 Nmm/deg. Cette valeur est identique à celle utilisée dans le mémoire de Laura M. Sie [1]. Par ailleurs, il y a six butées mécaniques dans cette version de la main, c'est-à-dire trois par doigt. En effet, dans le cas du doigt de droite, le mouvement angulaire de la phalange proximale par rapport à la paume est limité de 60° à 130° , le mouvement de la phalange médiane par rapport à la phalange proximale est contraint de 90° à 180° et finalement, le mouvement de la phalange distale relativement à la phalange médiane se limite de 90° à 200° . Comme pour le modèle plan utilisant les doigts à deux degrés de liberté, l'actionneur est lié à la paume par une articulation prismatique normale à la surface de la paume. Finalement, le comportement autobloquant est également présent, ce qui signifie que les membrures actionnées par les barres de transmission se déplacent toujours vers l'objet lors de la fermeture et non en s'éloignant de celui-ci.

Au plan des forces à modéliser dans le modèle ADAMS de la main, des ressemblances et des différences sont observables par rapport à la version précédente de la main. Tout d'abord, mentionnons les similarités. Au plan de l'actionnement, le contrôle s'effectue en force. La force de fermeture est appliquée directement sur la barre d'actionnement, dans la direction normale à la surface de la paume de la main. De même, un amortisseur est présent entre le bâti et la barre d'actionnement afin de limiter la vitesse de fermeture des doigts. La différence principale s'observe au niveau du nombre de forces de contact modélisées dans le logiciel. En effet, puisque chaque doigt est composé de trois phalanges au lieu de deux, 7 forces de contact doivent être modélisées entre la main et l'objet à saisir (en incluant le contact entre la paume et l'objet). Des prises effectuées à l'aide du modèle créé dans ADAMS sont montrées à la figure 1.4.

1.2.2 Mains tridimensionnelles (3D)

1.2.2.1 Main tridimensionnelle avec doigts à 2 ddl

Une fois la validation des modèles plans complétée à l'aide de nombreuses simulations, l'étape suivante consiste à rehausser le degré de complexité en développant une main tridimensionnelle, ce qui se rapproche d'autant plus de la réalité. Afin de simpli-

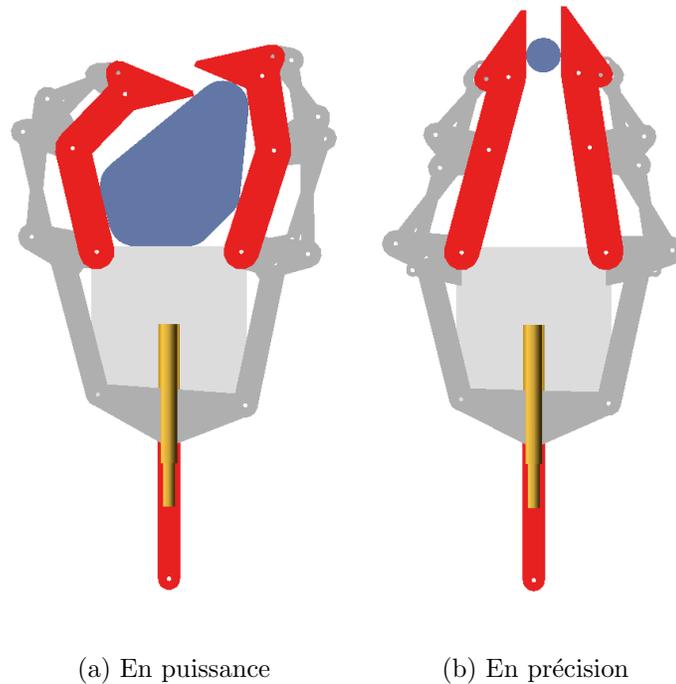


Figure 1.4: Simulations effectuées avec la main plane employant les doigts à 3 ddl.

fié le modèle, une généralisation du mécanisme de sous-actionnement employant un levier différentiel semblable aux versions planes est créée. En effet, il est plus simple de modéliser le sous-actionnement de cette façon, dans ADAMS, que de recréer le système d'engrenages à une entrée et trois sorties employé sur la vraie main [13] (voir la figure 3.7).

Le mécanisme de sous-actionnement entre les doigts est illustré à la figure 1.5. Il est composé des trois éléments suivants : la barre d'actionnement, le levier et les barres de transmission. La barre d'actionnement est liée au bâti de la main par une articulation prismatique perpendiculaire à la surface de la paume. De même, elle est aussi liée au levier par une articulation de type cardan. Chaque barre de transmission est liée au levier par une articulation sphérique et à un des doigts par une articulation de cardan. À noter que dans ce cas-ci, un modèle ADAMS a été réalisé pour chacune des configurations possibles des doigts. En effet, il y a un modèle pour la prise cylindrique, un modèle pour la prise sphérique et un pour la prise plane puisque la forme du levier diffère d'une configuration à l'autre. Bien entendu, pour la configuration plane, un des trois doigts ne peut pas se déplacer. Dans ce cas, le levier employé est équivalent à celui employé pour les mains en deux dimensions. De plus, le fait que trois modèles distincts

aient été développés simplifie le développement dans le logiciel. En effet, il n'est plus nécessaire de construire un mécanisme de reconfiguration des doigts dans ADAMS. En outre, cela engendre une diminution du temps de calcul lors des simulations.

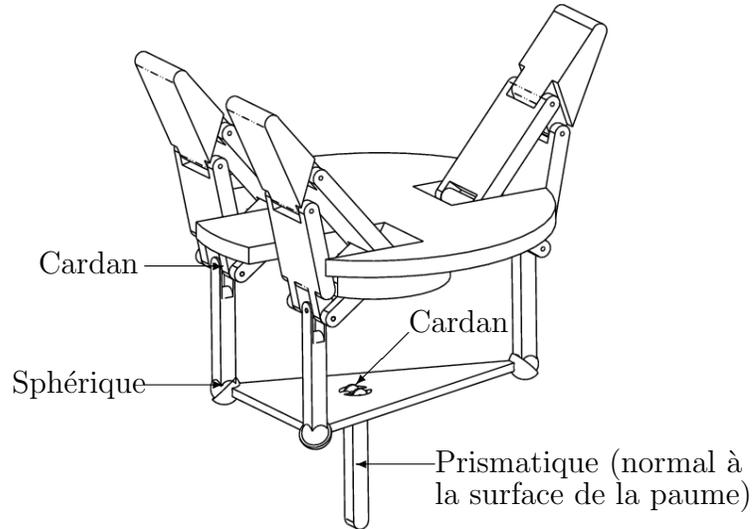


Figure 1.5: Modèle du levier 3D utilisé pour simuler le système d'engrenages à une entrée et à trois sorties dans ADAMS pour la prise cylindrique.

Chaque main tridimensionnelle utilise trois doigts sous-actionnés à deux degrés de liberté. Dans chacune des trois mains, trois ressorts en torsion sont nécessaires, c'est-à-dire un par articulation rotoïde entre la phalange proximale et la phalange distale de chaque doigt pour le sous-actionnement. De même, il y a 6 butées dans le modèle, c'est-à-dire deux par doigts. En effet, le déplacement angulaire de la phalange proximale est limité de 50° à 130° par rapport à la paume tandis que la phalange distale est contrainte de 50° à 190° par rapport à la phalange proximale. Par ailleurs, comme pour le modèle plan utilisant les doigts à deux degrés de liberté, les membrures auxquelles les barres de transmission sont fixées ont un comportement autobloquant.

La force de fermeture est encore une fois appliquée à la barre d'actionnement dans la direction normale à la paume. Pour chacune des configurations, l'axe de la barre d'actionnement passe par le centroïde du levier. Cela assure un équilibrage du levier lors de la fermeture et un mouvement synchronisé des doigts avant le premier contact. D'ailleurs, le chapitre 2 est entièrement consacré à l'analyse du levier 3D. Encore une fois, un amortisseur est ajouté entre la barre d'actionnement et le bâti afin de limiter la vitesse de fermeture des doigts lors de l'application de la force sur la barre d'actionnement. Par ailleurs, un total de 7 forces de contact entre SARAH et l'objet à saisir sont

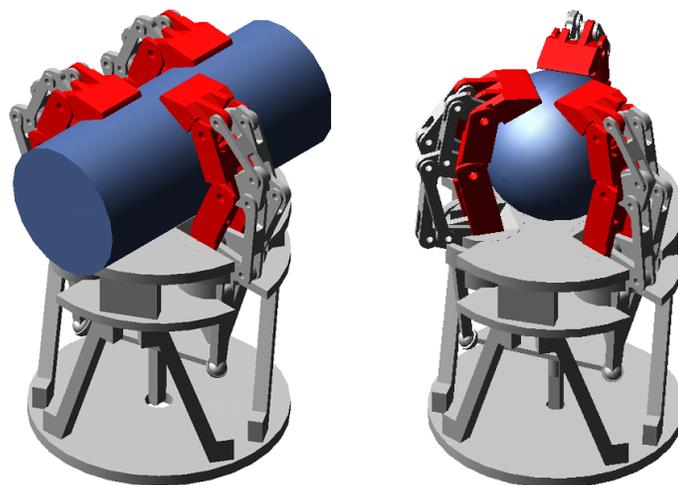
modélisées pour chacune des configurations. En terminant, il est important de noter que les trois modèles de la main SARAH utilisant les doigts à deux degrés de liberté ont été construits dans le but de valider le concept de levier 3D pour le sous-actionnement entre les doigts.

1.2.2.2 Main tridimensionnelle avec doigts à 3 ddl

L'objectif fixé au début du chapitre, c'est-à-dire la construction d'un modèle de la main SARAH dans l'environnement ADAMS, est atteint dans cette section. En effet, les doigts à deux degrés de liberté de la première version tridimensionnelle de la main sont remplacés par des doigts à trois degrés de liberté.

La main tridimensionnelle développée utilisant les doigts à trois degrés de liberté possède des dimensions identiques à la main SARAH M1. De plus, le système de sous-actionnement utilisé entre les doigts est le même que celui qui a été utilisé à la section 1.2.2.1. Par conséquent, trois modèles différents de la main correspondant à chacune des trois configurations possibles des doigts (cylindrique, sphérique et planaire) ont été développés. Donc, selon la forme de l'objet à saisir, un des trois modèles ADAMS doit être choisi pour effectuer une simulation. Par ailleurs, chaque main est composée de neuf ressorts en torsion, c'est-à-dire trois pour chacun des doigts aux endroits décrits à la section 1.2.1.2. De même, neuf butées mécaniques sont présentes, c'est-à-dire trois par doigt. Les limites angulaires sont les mêmes que celles de la main SARAH M1. La phalange proximale peut se déplacer de 60° à 130° par rapport à la paume, la phalange médiane de 90° à 130° par rapport à la phalange proximale et la phalange distale de 90° à 200° relativement à la phalange médiane. Le comportement autobloquant est également présent dans chacun des doigts.

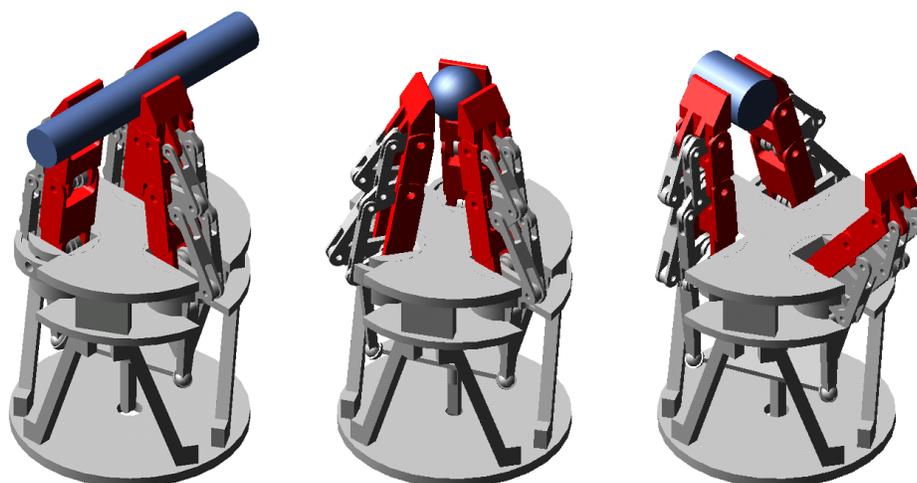
Comme pour tous les autres modèles développés dans ADAMS, une force appliquée sur la barre d'actionnement contrôle la fermeture des doigts. La force est appliquée sur la barre d'actionnement dans l'axe de l'articulation prismatique perpendiculaire à la surface de la paume. Un amortisseur est également utilisé afin de limiter la vitesse de fermeture des doigts. Puisque trois doigts à trois degrés de liberté sont utilisés pour chaque modèle, un total de dix forces de contact doivent être créées dans le logiciel ADAMS. Les figures 1.6 et 1.7 illustrent quelques prises typiques réalisées à l'aide du modèle dynamique tridimensionnel de la main SARAH construit à l'aide du logiciel ADAMS.



(a) Cylindrique

(b) Sphérique

Figure 1.6: Illustration de la prise en puissance.



(a) Cylindrique

(b) Sphérique

(c) Planaire

Figure 1.7: Illustration de la prise en précision.

1.3 Construction des éléments mécaniques dans ADAMS

1.3.1 Ressorts en torsion

Les ressorts en torsion utilisés dans chacun des modèles développés sont essentiels au sous-actionnement des doigts. Pour construire ces éléments élastiques, l'icône *Torsion Spring* dans le menu *Main Toolbox* doit être choisi. Par la suite, l'option *2 Bod - 1 Loc* est sélectionnée. Il faut également faire un choix entre l'option *Normal to Grid* et l'option *Pick Feature* afin de déterminer l'orientation axiale du ressort. L'axe du ressort en torsion sera perpendiculaire à la grille de travail avec l'option *Normal to Grid* tandis que l'option *Pick Feature* signifie que l'axe du ressort sera parallèle au vecteur sélectionné. Finalement, la dernière étape consiste à sélectionner les deux corps concernés et le lieu où le ressort sera appliqué. Par la suite, il est possible de modifier les propriétés du ressort en sélectionnant l'élément élastique désiré et en appuyant sur *Modify*. Ici, la constante de rigidité en torsion du ressort a été fixée à 0.1 N mm/deg. En effet, cette valeur correspond à celle donnée aux ressorts en torsion dans le mémoire de Laura M. Sie [1].

1.3.2 Amortisseur

L'amortisseur est utilisé dans les modèles afin de limiter la vitesse de fermeture des doigts. Sa construction est assez simple. Il suffit de sélectionner l'icône *Spring* et de choisir les deux endroits où le ressort doit être fixé. Dans le cas des différents modèles de mains, l'amortisseur est fixé à la fois sur un point de la barre d'actionnement ainsi que sur le bâti de la main. Cependant, une fois le ressort créé, il est nécessaire de modifier les propriétés de ce dernier en appuyant sur *Modify*. Dans la fenêtre *Modify a Spring-Damper Force*, l'onglet *Stiffness Coefficient* est sélectionné à l'aide de la souris et changé pour *No Stiffness*. Voilà, le ressort-amortisseur n'est plus qu'un amortisseur. Il ne reste plus qu'à fixer le coefficient d'amortissement à la valeur désirée.

1.3.3 Butées mécaniques

Les butées mécaniques sont présentes dans tous les modèles développés de la main SARAH. Ces éléments déterminent les limites angulaires de déplacement des phalanges et participent au sous-actionnement des doigts. La création de ces éléments a déjà été expliqué dans [1], mais cette section constitue un complément.

La première étape consiste à créer un couple à l'articulation où les limites angulaires sont nécessaires. Pour ce faire, il faut sélectionner l'icône *Torque* et choisir l'option *2 Bodies - 2 Locations*. Pour les versions planes, le couple est orienté par défaut perpendiculairement à la grille de travail (*Working Grid*). Dans le cas des versions tridimensionnelles de la main, l'icône *Torque (3 Comps)* est privilégiée. L'avantage réside dans le fait que les trois vecteurs de couples peuvent être orientés grâce à l'option *Pick Feature*.

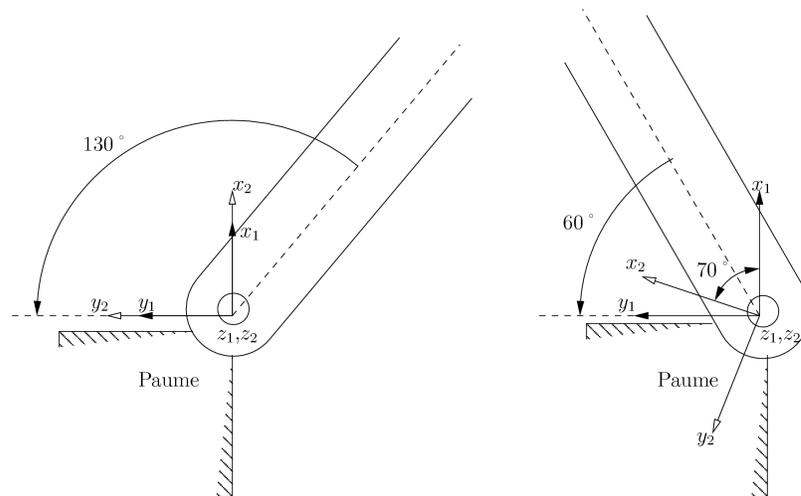


Figure 1.8: Repères nécessaires à la construction des butées mécaniques.

L'exemple suivant illustre la création d'une butée mécanique limitant le déplacement angulaire de la phalange proximale par rapport à la paume de la main. Tout d'abord, il faut créer deux marqueurs coïncidents, c'est-à-dire un sur la phalange proximale et un sur la paume tel qu'illustré à la figure 1.8. Sur cette figure, le marqueur 1 est fixé à la paume tandis que le marqueur 2 est lié à la phalange proximale. Par la suite, il faut modifier le vecteur de couples (*Torque (3 Comps)*) orienté selon le repère de la paume

à l'aide de la fonction BISTOP de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
 A_x &= 0 \\
 A_y &= 0 \\
 A_z &= -BISTOP(AZ(\text{marqueur1}, \text{marqueur2}), VZ(\text{marqueur1}, \text{marqueur2}, \\
 &\quad \text{marqueur2}), 0d, 70d, 1e8, 1.1, 100, .01d)
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

où AZ mesure l'angle entre les marqueurs, VZ mesure la vitesse relative entre les deux marqueurs, $0d$ est la limite inférieure angulaire en degrés et $70d$ est la limite supérieure. De même, les quatre derniers chiffres représentent la raideur, l'exposant du ressort non-linéaire, le coefficient d'amortissement et la distance sur laquelle l'amortissement est progressivement activé lorsqu'une limite angulaire est atteinte. Bref, entre 0° et 70° , aucune force n'est appliquée. La force qui s'oppose au déplacement angulaire est activée lorsque les limites 0° et 70° sont atteintes. À la figure 1.8, comme l'angle initial entre la phalange proximale et la paume est de 130° , une amplitude de mouvement de 70° entre les deux marqueurs permet de créer une butée ayant une limite angulaire de 60° à 130° par rapport à la paume. Pour plus de détails sur la fonction *BISTOP*, voir le guide de l'utilisateur du logiciel ADAMS [11].

1.3.4 Mécanisme autobloquant

Le comportement autobloquant de la membrure liée à la barre de transmission permet le déplacement dans une direction angulaire et l'interdit dans l'autre. En fait, cette membrure se déplace toujours vers l'objet lors de la fermeture des doigts et non en s'éloignant de ce dernier. Ce comportement se définit de la façon suivante dans ADAMS. Tout d'abord, il faut créer un vecteur de couples (*Torque (3 Comps)*) entre la membrure autobloquante et la paume en utilisant l'option *2 Bod - 2 Loc*. Encore une fois, deux marqueurs coïncidents doivent être ajoutés : un sur la paume et un sur la membrure autobloquante.

Par la suite, le vecteur de couple est modifié selon l'axe où le comportement est désiré, c'est-à-dire l'axe de l'articulation rotoïde entre la paume et la membrure autobloquante. La figure 1.9 illustre la création du comportement autobloquant. Le marqueur 1 se situe sur la paume tandis que le marqueur 2 se situe sur la membrure d'actionnement proximale, c'est-à-dire la membrure où la force est transmise par le biais de la barre de transmission. La fonction *STEP* est employée pour obtenir ce comportement. En effet,

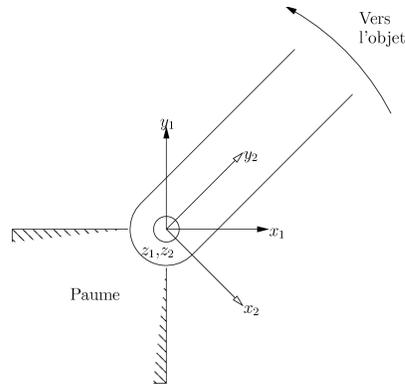


Figure 1.9: Repères nécessaires à la construction des butées mécaniques.

la fonction peut ressembler à ceci :

$$Az = 1e5 \times STEP(-WZ(\text{marqueur2}, \text{marqueur1}), 0, 0, 0.1, 1) \quad (1.2)$$

La fonction *STEP* est une approximation de la fonction Heaviside (échelon unité) par un polynôme de degré 3. Dans ce cas-ci, lorsqu'une vitesse angulaire négative est détectée (par la fonction *WZ*) et que l'opposé de cette vitesse atteint 0.1 rad/s, l'échelon atteint la valeur 1 et un couple de 10 000 Nmm est appliquée dans la direction *z* afin de s'opposer à l'éloignement de la membrure actionnée de l'objet à saisir.

1.3.5 Force de fermeture

Comme la main est sous-actionnée, l'application de seulement une force est nécessaire afin de contrôler adéquatement la main. Bien entendu, la force de fermeture est appliquée au centre de masse de la barre d'actionnement, perpendiculairement à la surface de la paume. La force de fermeture se définit assez simplement dans ADAMS. Tout d'abord, il faut cliquer sur l'icône *Forces* et choisir *Force (Single-Component)*. Concernant la direction de la force, trois choix sont offerts : *Space Fixed*, *Body Moving* et *Two Bodies*. Pour que la force soit interne à la main, il faut choisir *Two Bodies*. Dans ce cas, la force est appliquée à l'actionneur (*Action Body*) et la réaction est sur le bâti de la main (*Reaction Body*). Finalement, il ne reste plus qu'à définir la fonction définissant la force de fermeture appliquée à l'actionneur. La voici :

$$F_{FERMETURE} = 1000 \times STEP(\text{time}, 0.0, 0.0, 0.1, 1.0) \quad (1.3)$$

L'équation (1.3) signifie simplement que la force de fermeture est graduellement appliquée de 0 N à 1000 N en un temps de 0.1 secondes.

1.3.6 Forces de contact

La définition des forces de contact est un élément important de la modélisation. En effet, ces forces définissent la relation entre les doigts de la main et l’objet à saisir. L’annexe A explique le calcul des forces de contact dans ADAMS et le rôle de chacun des paramètres. Une justification concernant la valeur choisie pour chacun des paramètres est aussi présentée.

Cependant, il est important de mentionner que les forces de contact sont définies entre les géométries des corps. Lorsqu’un modèle est importé de *Pro/ENGINEER* vers ADAMS, la géométrie de chaque corps est définie comme étant une coquille mince (*Thin Shell*). Ces coquilles sont complexes et elles augmentent de beaucoup le temps de résolution de la force de contact à chaque incrément de temps. De même, lorsque la coquille est trop mince, il arrive que les corps passent au travers l’un de l’autre et le contact est alors perdu. Une façon élégante de régler ce problème est de remplacer les coquilles minces par des géométries primitives créées dans ADAMS comme des boîtes (*Box*) et des cylindres (*Cylinder*). En effet, il suffit de créer ces corps par dessus les corps existants et de les relier par une liaison rigide au centre de masse du corps existant. Pour que ces corps n’affectent pas trop la dynamique du système, une masse faible de 1^{-3} kg et une inertie de $I_{xx} = I_{yy} = I_{zz} = 1 \times 10^{-3} \text{ kg mm}^2$ sont données. Par la suite, les forces de contact sont définies entre ces corps “fantômes” faits de primitives et l’objet (aussi formé à partir de primitives). La figure 1.10 illustre les dix corps “fantômes” ajoutés au modèle de la main SARAH sur chacune des neuf phalanges ainsi que sur la paume.

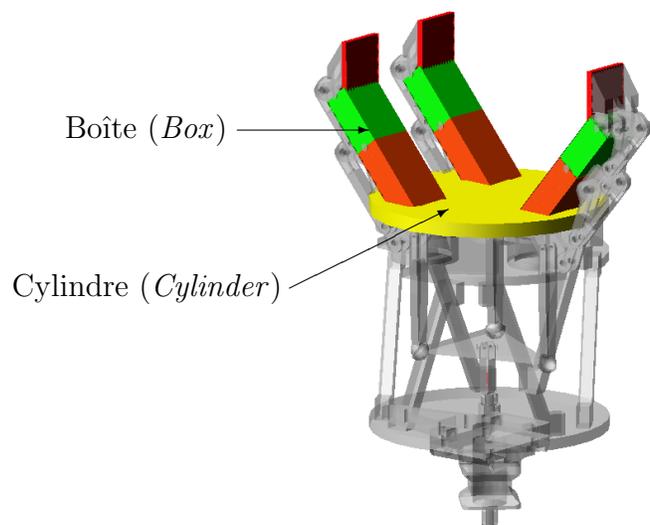


Figure 1.10: Les dix corps “fantômes” ajoutés sur la main.

Chapitre 2

Analyse géométrique du levier 3D en configuration cylindrique

Le thème de ce chapitre est l'analyse géométrique du levier 3D. Le levier 3D est une version simplifiée du différentiel à une entrée et à trois sorties employé sur la vraie main SARAH dans le sous-actionnement entre les doigts. Tout d'abord, le problème géométrique inverse (PGI) du levier 3D de la main en configuration cylindrique est résolu et la position idéale d'actionnement est calculée. De même, à partir du PGI, les matrices jacobiennes ainsi que les singularités du mécanisme sont déterminées.

2.1 Problème géométrique inverse du levier 3D

Cette section présente le développement des équations régissant le problème géométrique inverse (PGI) du levier différentiel 3D utilisé dans le modèle ADAMS de la main sous-actionnée SARAH. Le développement fait dans ce chapitre s'applique à la configuration cylindrique des doigts de la main. Or, un développement semblable peut être réalisé pour la configuration sphérique et la configuration plane et ce, à quelques modifications près. Le levier est illustré à la figure 2.1. Il est composé de quatre articulations de type cardan, de trois liens sphériques et d'une articulation prismatique entre l'actionneur et le bâti dans la direction perpendiculaire à la surface de la paume. D'ailleurs, ces articulations sont présentées à la figure 1.5. La méthode utilisée pour résoudre le problème géométrique inverse, obtenir les jacobiniennes et les configurations singulières s'inspire des notes du cours *Mécanique des Manipulateurs* [14].

2.1.1 Solution au problème géométrique inverse

Le différentiel à une entrée et à trois sorties utilisé dans le mécanisme de sous-actionnement des doigts de la main SARAH (voir figure 3.7) a été remplacé par un levier tridimensionnel (3D) simplifié afin d'en faciliter la construction dans ADAMS. Ce levier possède trois entrées : la position verticale z de l'actionneur ainsi que les angles ϕ et ψ dictant l'orientation du repère mobile (celui de la plate-forme du levier) par rapport au repère fixe (celui de la paume).

Dans le repère fixe, c'est-à-dire celui de la paume de la main, les trois vecteurs \mathbf{r}_i sont connus et illustrés à la figure 2.1. Ces vecteurs relient le centre du repère fixe à la liaison rotoïde située entre chacun des doigts et la paume. De même, les vecteurs \mathbf{r}_i sont dans le plan XY du repère fixe. Voici ces vecteurs :

$$\mathbf{r}_1 = \begin{bmatrix} A_x & A_y & 0 \end{bmatrix}^T \quad (2.1)$$

$$\mathbf{r}_2 = \begin{bmatrix} B_x & B_y & 0 \end{bmatrix}^T \quad (2.2)$$

$$\mathbf{r}_3 = \begin{bmatrix} C_x & C_y & 0 \end{bmatrix}^T \quad (2.3)$$

De plus, les trois vecteurs \mathbf{u}_1 , \mathbf{u}_2 et \mathbf{u}_3 sont également connus. Ces vecteurs relient les deux pivots à la base de chaque doigt. Ils sont illustrés à la figure 2.1. Le vecteur \mathbf{u}_1

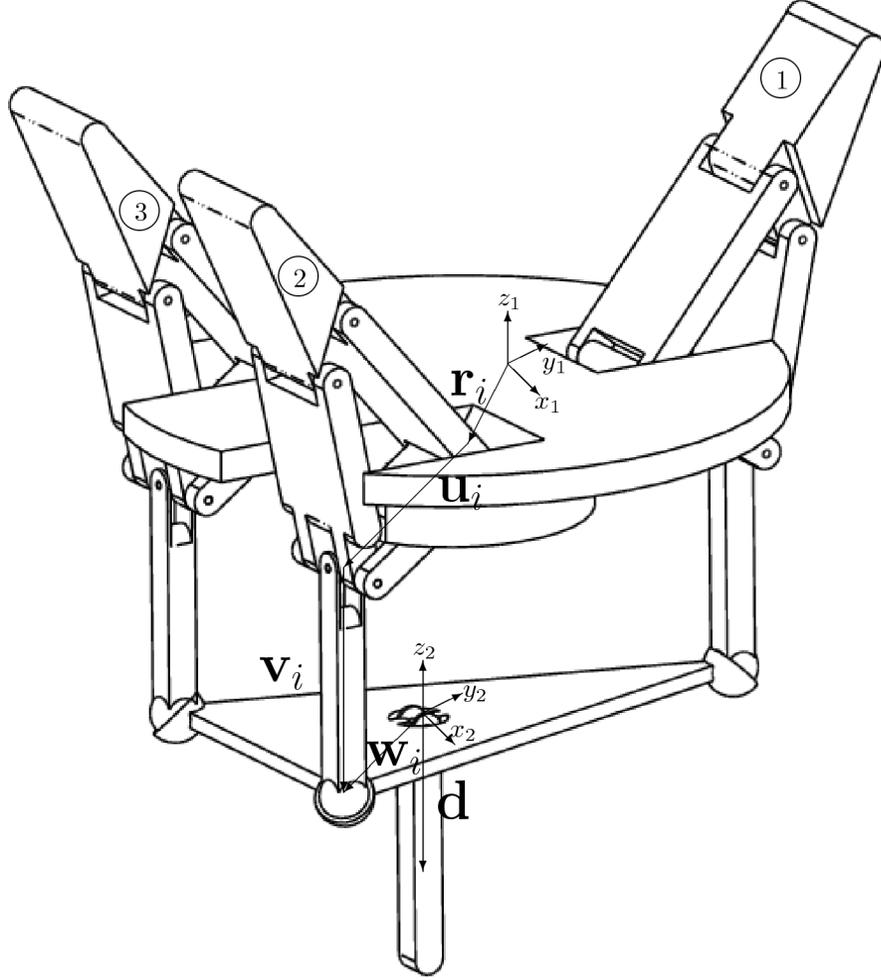


Figure 2.1: Modèle du levier 3D utilisé pour simuler le différentiel à une entrée et à trois sorties dans ADAMS.

dépend de θ_1 , le vecteur \mathbf{u}_2 de θ_2 et le vecteur \mathbf{u}_3 de θ_3 . L'angle θ_i est l'angle que fait le vecteur \mathbf{u}_i avec l'axe y_1 comme le suggère la figure 2.2. Bien entendu, ces trois vecteurs sont dans le plan YZ du repère fixe.

$$\mathbf{u}_1 = \begin{bmatrix} 0 & l_1 \cos \theta_1 & l_1 \sin \theta_1 \end{bmatrix}^T \quad (2.4)$$

$$\mathbf{u}_2 = \begin{bmatrix} 0 & l_1 \cos \theta_2 & l_1 \sin \theta_2 \end{bmatrix}^T \quad (2.5)$$

$$\mathbf{u}_3 = \begin{bmatrix} 0 & l_1 \cos \theta_3 & l_1 \sin \theta_3 \end{bmatrix}^T \quad (2.6)$$

À noter que les vecteurs \mathbf{u}_i possèdent tous la même longueur, tout comme les vecteurs \mathbf{v}_i liant les liaisons de cardan aux articulations sphériques. Donc, on a :

$$\mathbf{u}_i^T \mathbf{u}_i = l_1^2 \quad (2.7)$$

$$\mathbf{v}_i^T \mathbf{v}_i = l_2^2 \quad (2.8)$$

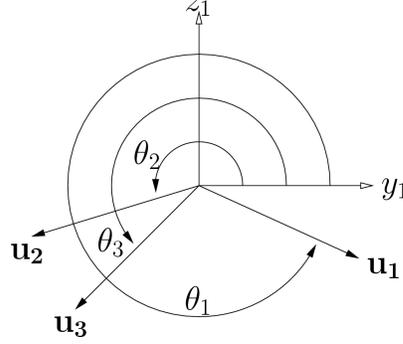


Figure 2.2: Définition des angles θ_i situés entre les vecteurs \mathbf{u}_i et l'axe y_1 , où $i = 1, 2, 3$.

Il est également possible d'exprimer les vecteurs \mathbf{w}_i dans le repère mobile, c'est-à-dire celui du levier différentiel. En effet, les vecteurs \mathbf{w}_i relient le centre de la plate-forme du levier aux articulations sphériques. Ces vecteurs sont :

$$[\mathbf{w}_1]_2 = \begin{bmatrix} D_x & D_y & 0 \end{bmatrix}^T \quad (2.9)$$

$$[\mathbf{w}_2]_2 = \begin{bmatrix} E_x & E_y & 0 \end{bmatrix}^T \quad (2.10)$$

$$[\mathbf{w}_3]_2 = \begin{bmatrix} F_x & F_y & 0 \end{bmatrix}^T \quad (2.11)$$

Afin de pouvoir exprimer les vecteurs $[\mathbf{w}_i]_2$ dans le repère fixe, la matrice de changement de repère est nécessaire. Cette matrice dépend de l'angle ϕ et de l'angle ψ illustrés à la figure 2.3. Ces deux angles dictent l'orientation de la plate-forme du levier.

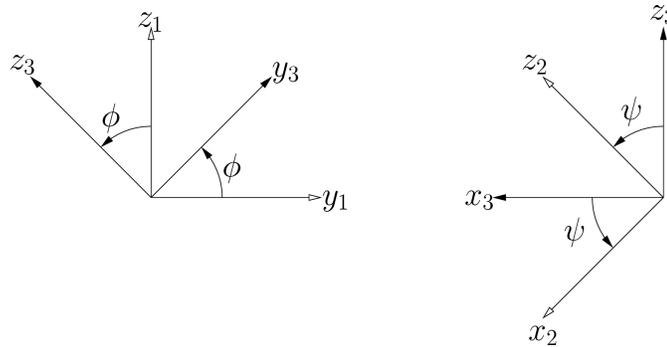


Figure 2.3: Définition des angles ϕ et ψ permettant le changement de repère.

En créant un repère intermédiaire (le repère trois), il est possible d'obtenir la matrice de rotation du repère trois par rapport au repère un. Cette matrice dépend de ϕ :

$$\mathbf{Q}_{31} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

De même, la matrice de rotation du repère deux (repère du levier) au repère intermédiaire est obtenue. Toutefois, cette matrice dépend de ψ .

$$\mathbf{Q}_{23} = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Finalement, la matrice \mathbf{Q} est obtenue en multipliant les deux matrices trouvées.

$$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_{21} = \mathbf{Q}_{23}\mathbf{Q}_{31} \quad (2.14)$$

Donc, en connaissant la valeur des angles ϕ et ψ à un instant donné, il est facile d'exprimer les vecteurs \mathbf{w}_i dans le repère de la paume de la main.

$$[\mathbf{w}_i]_1 = \mathbf{Q} [\mathbf{w}_i]_2 \quad (2.15)$$

Il ne reste plus que deux vecteurs à définir avant d'entreprendre la résolution du problème géométrique inverse. Tout d'abord, il y a le vecteur \mathbf{d} qui relie le centre du levier au lieu d'actionnement. Ce vecteur est exprimé dans le repère fixe et son orientation demeure constante en vertu du lien prismatique entre l'actionneur et la paume. Finalement, le vecteur \mathbf{p} exprime la position du lieu d'actionnement dans le repère fixe.

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -l_3 \end{bmatrix}^T \quad (2.16)$$

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} G_x & G_y & z \end{bmatrix}^T \quad (2.17)$$

Maintenant que tous les vecteurs nécessaires à la résolution du PGI sont connus, le vecteur \mathbf{p} peut être exprimé de trois façons différentes pour chacun des doigts. L'équation (2.18) exprime \mathbf{p} dans le repère fixe, où $i = 1, 2, 3$. La forme de l'équation est donc la même pour chacun des doigts.

$$[\mathbf{p}]_1 = [\mathbf{r}_i]_1 + [\mathbf{u}_i]_1 + [\mathbf{v}_i]_1 - [\mathbf{w}_i]_1 + [\mathbf{d}]_1 \quad (2.18)$$

En isolant $[\mathbf{v}_i]_1$ dans l'équation (2.18), l'équation (2.19) est obtenue.

$$[\mathbf{v}_i]_1 = [\mathbf{p}]_1 - [\mathbf{r}_i]_1 - [\mathbf{u}_i]_1 + [\mathbf{w}_i]_1 - [\mathbf{d}]_1 \quad (2.19)$$

Pour simplifier les expressions, les crochets sont enlevés et il est sous-entendu que tous les vecteurs sont exprimés dans le repère fixe de la paume. Connaissant le module de

\mathbf{v}_i , l'expression suivante est facilement obtenue :

$$\begin{aligned}\mathbf{v}_i^T \mathbf{v}_i &= (\mathbf{p} - \mathbf{r}_i - \mathbf{u}_i + \mathbf{w}_i - \mathbf{d})^T (\mathbf{p} - \mathbf{r}_i - \mathbf{u}_i + \mathbf{w}_i - \mathbf{d}) \\ &= ((\mathbf{p} - \mathbf{r}_i + \mathbf{w}_i - \mathbf{d}) - \mathbf{u}_i)^T ((\mathbf{p} - \mathbf{r}_i + \mathbf{w}_i - \mathbf{d}) - \mathbf{u}_i)\end{aligned}\quad (2.20)$$

Par la suite, en distribuant les différents termes de l'équation (2.20), une expression dont le seul inconnu est l'angle θ_i (provenant du vecteur \mathbf{u}_i) est disponible.

$$2(\mathbf{p} - \mathbf{r}_i + \mathbf{w}_i - \mathbf{d})^T \mathbf{u}_i = (\mathbf{p} - \mathbf{r}_i + \mathbf{w}_i - \mathbf{d})^T (\mathbf{p} - \mathbf{r}_i + \mathbf{w}_i - \mathbf{d}) + \mathbf{u}_i^T \mathbf{u}_i - \mathbf{v}_i^T \mathbf{v}_i \quad (2.21)$$

L'équation (2.21) équivaut à une expression de la forme

$$A_i \cos \theta_i + B_i \sin \theta_i + C_i = 0 \quad (2.22)$$

où :

$$A_i = 2(\mathbf{p} - \mathbf{r}_i + \mathbf{w}_i - \mathbf{d})^T \mathbf{e}_1 l_1 \quad (2.23)$$

$$B_i = 2(\mathbf{p} - \mathbf{r}_i + \mathbf{w}_i - \mathbf{d})^T \mathbf{e}_2 l_1 \quad (2.24)$$

$$C_i = l_2^2 - l_1^2 - (\mathbf{p} - \mathbf{r}_i + \mathbf{w}_i - \mathbf{d})^T (\mathbf{p} - \mathbf{r}_i + \mathbf{w}_i - \mathbf{d}) \quad (2.25)$$

À noter que les vecteurs \mathbf{e}_1 et \mathbf{e}_2 sont définis de la manière suivante :

$$\mathbf{e}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (2.26)$$

$$\mathbf{e}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (2.27)$$

$$(2.28)$$

Sachant que :

$$T_i = \tan \frac{\theta_i}{2}, \quad \cos \theta_i = \frac{1-T_i^2}{1+T_i^2}, \quad \sin \theta_i = \frac{2T_i}{1+T_i^2} \quad (2.29)$$

On obtient l'équation quadratique suivante :

$$(C_i - A_i) T_i^2 + 2B_i T_i + (C_i + A_i) = 0 \quad (2.30)$$

En résolvant l'équation (2.30), deux valeurs de T_i sont obtenues. Donc, cela signifie qu'il existe deux solutions pour chaque angle θ_i , ou $i = 1, 2, 3$. Par conséquent, il y a un total de huit solutions au PGI du levier différentiel 3D de la main en configuration cylindrique.

2.1.2 Vérification du PGI

Afin de valider la solution obtenue au problème géométrique inverse, deux logiciels sont employés : Matlab et ADAMS. Tout d'abord, le logiciel Matlab est utilisé dans la programmation du PGI du levier différentiel. En effet, les entrées du programme Matlab sont ϕ , ψ et z et les sorties obtenues sont les angles θ_1 , θ_2 et θ_3 . D'autre part, le logiciel ADAMS est utilisé afin de générer une séquence de fermeture de la main dont la configuration finale est illustrée à la figure 2.4. Tous les paramètres, c'est-à-dire ϕ , ψ , z , θ_1 , θ_2 et θ_3 sont mesurés dans ADAMS. Ensuite, les valeurs de ϕ , ψ et z sont données en entrée au programme Matlab et les trois angles θ_i calculés sont comparés avec ceux donnés par ADAMS. Si les angles sont les mêmes, cela signifie que la solution au PGI est correcte.

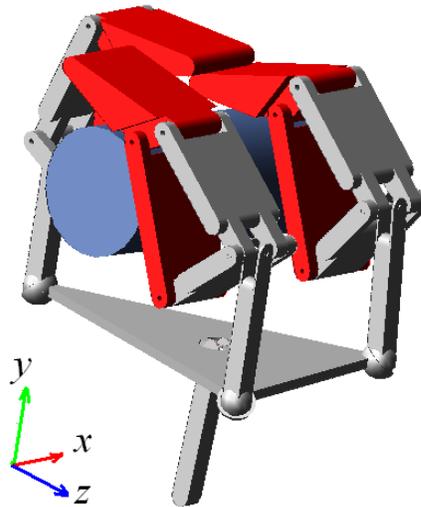
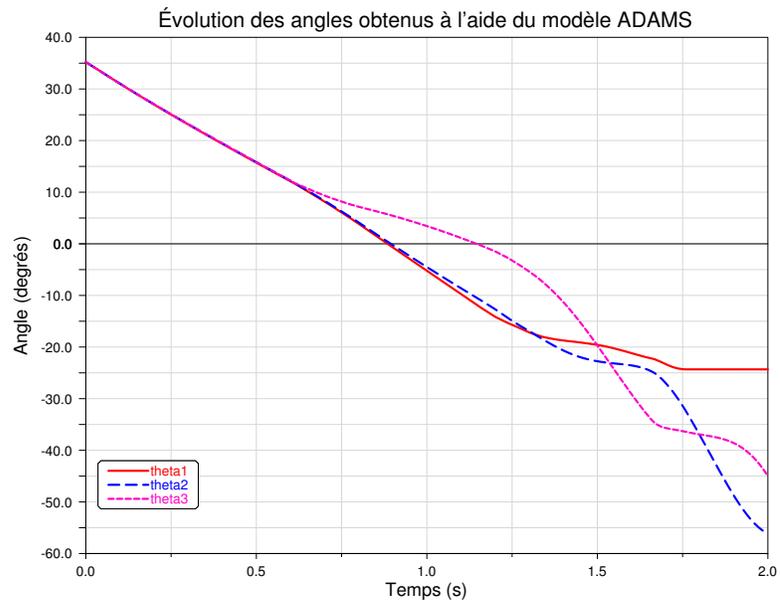
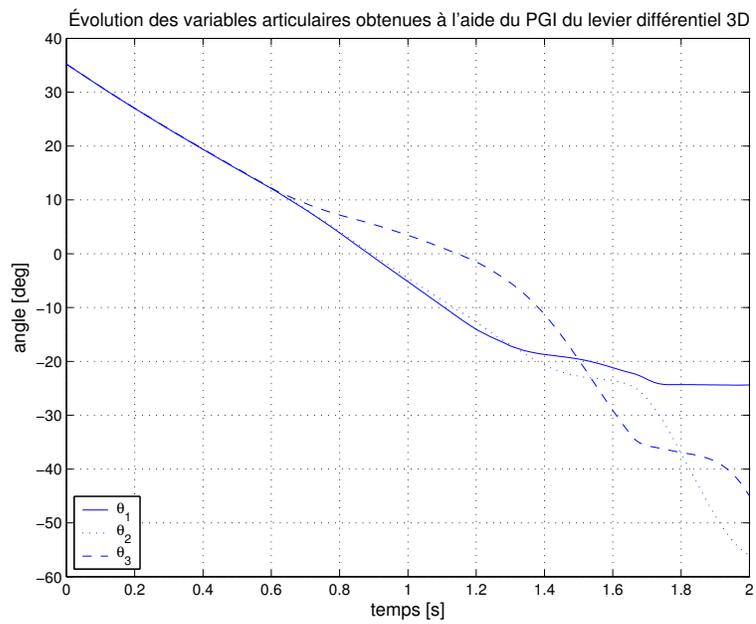


Figure 2.4: Configuration finale de la prise simulée dans ADAMS utile à la vérification du PGI.

Comment effectuer la prise de mesure dans ADAMS/View 12.0.0 de ϕ , ψ , z , θ_1 , θ_2 et θ_3 ? Pour les trois angles θ_i , il faut cliquer sur *Build* \rightarrow *Measure* \rightarrow *Angle* \rightarrow *New* et choisir les trois points nécessaires à la définition de chaque angle (*First Marker*, *Middle Marker*, *Last Marker*). Pour prendre la mesure de z , il faut choisir *Build* \rightarrow *Measure* \rightarrow *Point - to - Point* \rightarrow *New*. Ensuite, à *To Point*, le marqueur indiquant centre de masse de l'actionneur est sélectionné et à *From Point*, c'est le marqueur au centre de la paume (repère fixe). De plus, la direction y en cartésien doit être choisie à *Component*.



(a) Dans ADAMS



(b) Dans Matlab

Figure 2.5: Évolution des angles θ_i , où $i = 1, 2, 3$.

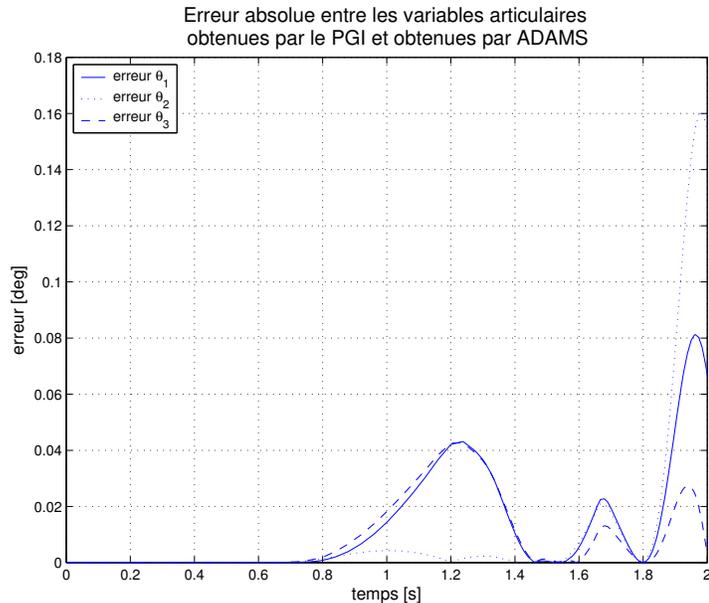


Figure 2.6: Erreur absolue entre les angles obtenus à l'aide du modèle ADAMS et ceux découlant du PGI.

Pour les angles ϕ et ψ , la procédure est légèrement différente. Il faut cliquer avec le bouton de droite de la souris sur le levier et choisir *Part : levier* \rightarrow *Measure* et choisir *Orientation...* dans le menu qui apparaît à l'écran. À l'onglet *Characteristic*, on choisit *Yaw*, *Pitch*, *Roll*. De même, à l'option *To Marker*, il faut sélectionner le marqueur indiquant le centre de gravité du levier (repère mobile) et à *From Marker*, le marqueur attaché au centre de gravité de l'actionneur (repère fixe). Finalement, pour l'angle ϕ , c'est le *Roll* qui doit être mesuré (*Component* \rightarrow *Third rotation*), c'est-à-dire la rotation autour de l'axe x du repère mobile par rapport au repère fixe à la figure 2.4. Pour obtenir l'évolution de ψ , c'est le *Yaw* qui est nécessaire (*Component* \rightarrow *First rotation*). Dans ce cas, le *Yaw* exprime la rotation autour de l'axe z du repère mobile par rapport au repère fixe. À noter que le repère défini dans ADAMS (voir figure 2.4) est différent de celui illustré à la figure 2.3.

À la figure 2.5 (a), les trois angles θ_i mesurés directement dans ADAMS sont illustrés. De même, à la figure 2.5 (b), l'évolution des trois angles θ_i calculés à l'aide de la solution au problème géométrique inverse est tracée à partir des paramètres z , ϕ et ψ mesurés dans ADAMS. Les deux graphiques obtenus sont très similaires, ce qui confirme la validité de la solution trouvée au problème géométrique inverse. Par ailleurs, la figure 2.6 montre l'erreur absolue entre la valeur des θ_i obtenus par le PGI et ceux mesurés dans ADAMS. L'erreur maximale est d'environ 0.16° , ce qui est très peu.

Les causes probables de cette différence peuvent se situer au niveau de la précision des méthodes de calcul des deux logiciels. De même, une légère erreur a pu être commise lors de la prise de mesure des paramètres et des points dans ADAMS nécessaires à la résolution du PGI dans Matlab.

2.2 Position d'actionnement du levier

Un élément important à définir est la position d'actionnement sur le levier 3D. En effet, dans le cas du différentiel utilisé sur la main SARAH M1, chaque doigt reçoit un couple identique avant le premier contact entre les phalanges et l'objet. Pour le modèle de la main créé dans ADAMS, il est tout aussi important que la force de fermeture soit répartie de façon égale entre les trois doigts avant que les phalanges rencontrent l'objet. Donc, puisque chaque doigt reçoit une portion égale de la force de fermeture appliquée, le déplacement angulaire de chaque vecteur u_i doit être égal. Plus précisément, il est nécessaire que le module des angles α_1 , α_2 et α_3 illustrés à la figure 2.7 soit égal. Ce fait important est utilisé ici dans le processus de détermination de la position idéale d'actionnement.

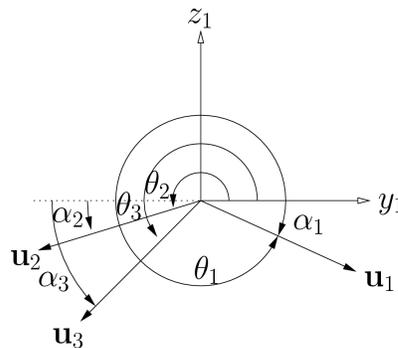


Figure 2.7: Illustration des angles α_i .

Le programme Matlab utilisé lors de la résolution du problème géométrique inverse est nécessaire. La configuration initiale du levier est fixée à $\phi = \psi = 0$ car lorsqu'il n'y a pas encore eu de contact entre les doigts et l'objet à saisir, le levier différentiel doit être parallèle à la paume de la main. De plus, lors du processus d'optimisation, les variables sont les positions G_x et G_y du lieu d'actionnement telles que définies à l'équation (2.18). Afin d'obtenir une grande plage de résultats, la valeur $z = -75$ est choisie par essais et erreurs. En effet, de $z = -79$ jusqu'à $z = -71$, la même solution a été obtenue. Par

contre, en dehors de ces limites, des solutions imaginaires viennent fausser la réponse optimisée calculée par Matlab. Par conséquent, la fonction à minimiser est la valeur absolue de l'erreur angulaire entre les valeurs des angles α_1 , α_2 et α_3 .

$$erreur = |(\alpha_2 - \alpha_1) + (\alpha_3 - \alpha_1)| \quad (2.31)$$

En appliquant cet algorithme et en faisant varier les positions G_x et G_y de façon à couvrir toute la gamme des positions possibles d'actionnement sur le levier, la figure 2.8 est obtenue. À noter que les positions G_x et G_y ont été normalisées sur la dimension en x et la dimension en y du levier différentiel 3D.

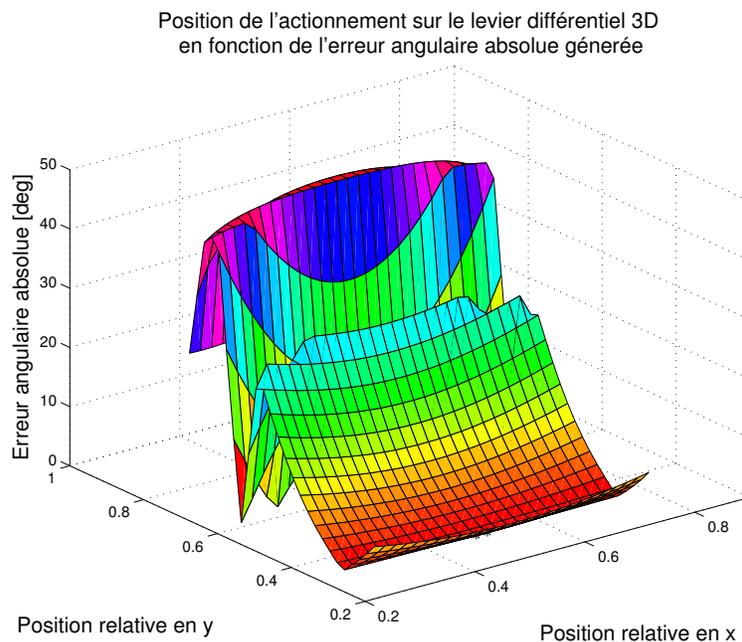


Figure 2.8: Erreur absolue générée pour chacune des positions d'actionnement étudiées.

Deux positions engendrant une erreur absolue minimale de 0.2160° ont été obtenues : $(0.49, 0.33)$ et $(0.51, 0.33)$. En fait, ces deux positions indiquent le même endroit, c'est-à-dire le centroïde du levier ayant la forme d'un triangle isocèle. La position est d'ailleurs illustré à la figure 2.9. Ce résultat est bel et bien le résultat attendu. En effet, le levier utilisé dans ADAMS équivaut à la combinaison de deux leviers tels qu'illustrés à la figure 2.10. Pour que la somme des moments au centre du premier levier soit nulle, il faut que $2F_1 = F_{23}$. De même, le second levier divise la force F_{23} en deux parts égales, de sorte que les trois forces appliquées à chacun des doigts sont égales $F_1 = F_2 = F_3 = \frac{F_{23}}{2}$.

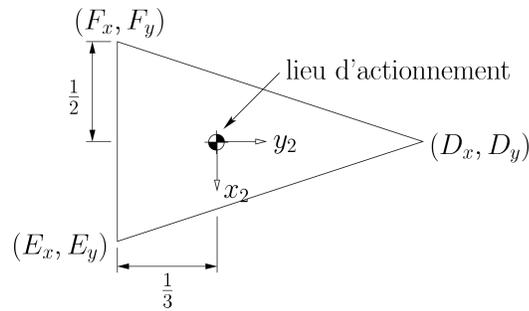


Figure 2.9: Lieu d'actionnement du levier différentiel 3d.

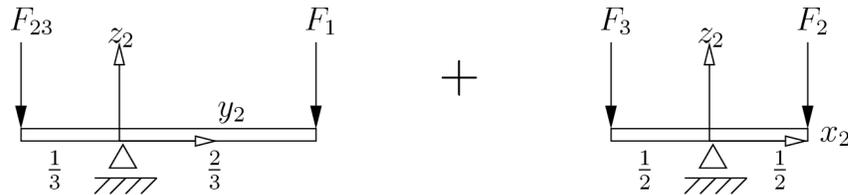


Figure 2.10: Similarités entre le levier différentiel 3D et la somme de deux leviers plans.

Pour la main en configuration sphérique et pour la main plane, un levier 3D similaire est utilisé. Cependant, le lieu d'actionnement du levier est légèrement différent. En effet, les barres d'actionnement sont perpendiculaires à la surface de la paume de la main lorsque la main est au repos et sont décalées par rapport à l'axe permettant à deux des doigts de pivoter sur eux-mêmes. Donc, la forme triangulaire du levier change d'une configuration à l'autre. Ceci est illustré à la figure 2.11. Sur cette figure, la forme triangulaire des leviers est délimitée par des lignes pointillées. Pour la prise cylindrique, le levier est un triangle isocèle. Par contre, pour la main sphérique, la plate-forme du levier est un triangle équilatéral. Bien entendu, le lieu d'actionnement est le centroïde du triangle. Finalement, pour la prise plane, puisque le pouce de la main est bloqué, le levier 3D employé est équivalent aux leviers utilisés pour les mains planes de la section 1.2.1. La seule condition à respecter est que le lieu d'actionnement passe par l'axe entre les deux doigts tel qu'illustré à la figure 2.11 (c).

2.3 Dérivation des matrices jacobiennes

Dans cette section, les matrices jacobiennes sont calculées à partir du problème géométrique inverse du levier 3D résolu à la section 2.1. L'obtention des matrices jacobiennes

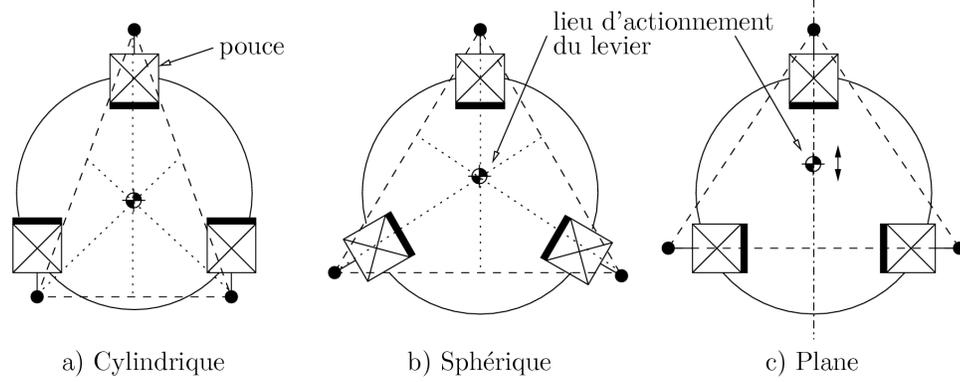


Figure 2.11: Les différents leviers 3D employés dans la construction des modèles ADAMS de SARAH.

permet la détermination des configurations singulières du mécanisme du levier 3D. Cela est fait à la section 2.4. Les matrices jacobiennes \mathbf{A} et \mathbf{B} relient les vitesses des paramètres de la façon suivante :

$$\mathbf{A} \begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \mathbf{B} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

C'est l'expression obtenue à l'équation (2.21) qui sert de point de départ à la dérivation des matrices jacobiennes. Tout d'abord, deux nouveaux termes sont définis afin de simplifier l'écriture :

$$\mathbf{h}_i = \mathbf{p} + \mathbf{w}_i = \mathbf{p} + \mathbf{Q}_{21}[\mathbf{w}_i]_2 \quad (2.33)$$

$$\mathbf{s}_i = \mathbf{r}_i + \mathbf{d} \quad (2.34)$$

Ce qui permet de réécrire l'équation (2.21) sous la forme suivante :

$$l_2^2 - l_1^2 = (\mathbf{h}_i - \mathbf{s}_i)^T (\mathbf{h}_i - \mathbf{s}_i) - 2(\mathbf{h}_i - \mathbf{s}_i)^T \mathbf{u}_i \quad (2.35)$$

Pour obtenir les jacobiennes, il faut dériver l'équation (2.35) par rapport au temps. On obtient :

$$2(\mathbf{h}_i - \mathbf{s}_i)^T \dot{\mathbf{h}}_i - 2\mathbf{u}_i^T \dot{\mathbf{h}}_i - 2(\mathbf{h}_i - \mathbf{s}_i)^T \dot{\mathbf{u}}_i = 0 \quad (2.36)$$

ou encore :

$$\begin{aligned} (\mathbf{h}_i - \mathbf{s}_i - \mathbf{u}_i)^T \dot{\mathbf{h}}_i &= (\mathbf{h}_i - \mathbf{s}_i)^T \dot{\mathbf{u}}_i \\ \mathbf{v}_i^T \dot{\mathbf{h}}_i &= (\mathbf{u}_i + \mathbf{v}_i)^T \dot{\mathbf{u}}_i \end{aligned} \quad (2.37)$$

Deux termes à dériver apparaissent aux équations (2.36) et (2.37), c'est-à-dire $\dot{\mathbf{u}}_i$ et $\dot{\mathbf{h}}_i$.
Tout d'abord, le vecteur \mathbf{u}_i a la forme suivante :

$$\mathbf{u}_i = \begin{bmatrix} 0 & l_1 \cos \theta_i & l_1 \sin \theta_i \end{bmatrix}^T \quad (2.38)$$

où $i = 1, 2, 3$. La dérivée du vecteur \mathbf{u}_i est :

$$\dot{\mathbf{u}}_i = \dot{\theta}_i \begin{bmatrix} 0 & -l_1 \sin \theta_i & l_1 \cos \theta_i \end{bmatrix}^T \quad (2.39)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_i = \mathbf{E}_1 \mathbf{u}_i \dot{\theta}_i \quad (2.40)$$

où

$$\mathbf{E}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

De même, le terme \mathbf{h}_i est défini à l'équation (2.33). La dérivée de \mathbf{h}_i a la forme suivante :

$$\dot{\mathbf{h}}_i = \dot{\mathbf{p}} + \dot{\mathbf{Q}}_{23} \mathbf{Q}_{31} [\mathbf{w}_i]_2 + \mathbf{Q}_{23} \dot{\mathbf{Q}}_{31} [\mathbf{w}_i]_2 + \mathbf{Q}_{23} \mathbf{Q}_{31} [\dot{\mathbf{w}}_i]_2 \quad (2.42)$$

Ce qui donne :

$$\dot{\mathbf{h}}_i = \dot{z} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \dot{\psi} \begin{bmatrix} -\sin \psi & 0 & \cos \psi \\ 0 & 0 & 0 \\ -\cos \psi & 0 & -\sin \psi \end{bmatrix} \mathbf{Q}_{31} [\mathbf{w}_i]_2 + \dot{\phi} \mathbf{Q}_{23} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin \phi & -\cos \phi \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \end{bmatrix} [\mathbf{w}_i]_2 \quad (2.43)$$

À l'aide des deux matrices suivantes, l'écriture peut être simplifiée :

$$\mathbf{E}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \mathbf{E}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

on obtient alors :

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{h}}_i &= \dot{z} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \dot{\psi} \mathbf{E}_2 \mathbf{Q}_{23} \mathbf{Q}_{31} [\mathbf{w}_i]_2 + \dot{\phi} \mathbf{Q}_{23} \mathbf{Q}_{31} \mathbf{E}_3 [\mathbf{w}_i]_2 \\ \dot{\mathbf{h}}_i &= \dot{z} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \dot{\psi} \mathbf{E}_2 \mathbf{w}_i + \dot{\phi} \mathbf{Q} \mathbf{E}_3 \mathbf{Q}^T \mathbf{w}_i \\ \dot{\mathbf{h}}_i &= \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} & \mathbf{E}_2 \mathbf{w}_i & \mathbf{Q} \mathbf{E}_3 (\mathbf{w}_i^T \mathbf{Q})^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.45)$$

Maintenant que $\dot{\mathbf{u}}_i$ et $\dot{\mathbf{h}}_i$ sont connus, il est possible de revenir à l'équation (2.37) et d'obtenir l'expression des matrices jacobiennes.

$$\begin{bmatrix} v_{1z} & \mathbf{v}_1^T \mathbf{E}_2 \mathbf{w}_1 & \mathbf{v}_1^T \mathbf{Q} \mathbf{E}_3 (\mathbf{w}_1^T \mathbf{Q})^T \\ v_{2z} & \mathbf{v}_2^T \mathbf{E}_2 \mathbf{w}_2 & \mathbf{v}_2^T \mathbf{Q} \mathbf{E}_3 (\mathbf{w}_2^T \mathbf{Q})^T \\ v_{3z} & \mathbf{v}_3^T \mathbf{E}_2 \mathbf{w}_3 & \mathbf{v}_3^T \mathbf{Q} \mathbf{E}_3 (\mathbf{w}_3^T \mathbf{Q})^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1^T \mathbf{E}_1 \mathbf{u}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{v}_2^T \mathbf{E}_1 \mathbf{u}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{v}_3^T \mathbf{E}_1 \mathbf{u}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

L'équation (2.46) est l'expression des équations de vitesse du levier 3D. C'est à partir des matrices jacobiennes ainsi obtenues que les configurations singulières sont déterminées.

2.4 Singularités

À partir de l'expression des matrices jacobiennes de la section 2.3, il est possible d'effectuer une analyse des singularités du mécanisme de levier différentiel 3D utilisé dans le modèle ADAMS de la main SARAH. Tout d'abord, il existe deux types de singularités : les singularités de type I et les singularités de type II [14]. Une singularité de type I se produit lorsque le déterminant de la matrice \mathbf{B} est nul. Physiquement, cela correspond à une limite de l'espace de travail. La matrice \mathbf{B} est :

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1^T \mathbf{E}_1 \mathbf{u}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{v}_2^T \mathbf{E}_1 \mathbf{u}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{v}_3^T \mathbf{E}_1 \mathbf{u}_3 \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

Pour que la matrice \mathbf{B} devienne singulière, il suffit qu'un zéro apparaisse sur la diagonale. Cela va se produire si une des barres de transmission (\mathbf{v}_i) devient parallèle à la membrure qui est rattaché au bâti et à la barre de transmission (\mathbf{u}_i).

Par ailleurs, une singularité de type II se produit lorsque la matrice \mathbf{A} devient singulière, c'est-à-dire lorsque son déterminant est nul. La matrice \mathbf{A} est :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} v_{1z} & \mathbf{v}_1^T \mathbf{E}_2 \mathbf{w}_1 & \mathbf{v}_1^T \mathbf{Q} \mathbf{E}_3 (\mathbf{w}_1^T \mathbf{Q})^T \\ v_{2z} & \mathbf{v}_2^T \mathbf{E}_2 \mathbf{w}_2 & \mathbf{v}_2^T \mathbf{Q} \mathbf{E}_3 (\mathbf{w}_2^T \mathbf{Q})^T \\ v_{3z} & \mathbf{v}_3^T \mathbf{E}_2 \mathbf{w}_3 & \mathbf{v}_3^T \mathbf{Q} \mathbf{E}_3 (\mathbf{w}_3^T \mathbf{Q})^T \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

Pour que cette matrice soit singulière, il faut que les colonnes soient linéairement dépendantes. Ceci se produit entre autres si une colonne de zéros apparaît dans la matrice. Une première façon de faire apparaître des zéros dans la matrice \mathbf{A} est d'obtenir

$v_{1z} = v_{2z} = v_{3z} = 0$. Cet événement se produit si les trois vecteurs \mathbf{v}_i associés aux barres de transmission n'ont pas de composantes en z et sont dans un plan parallèle au plan XY du repère fixe. Dans ce cas, les doigts peuvent subir un déplacement infinitésimal même si le levier est bloqué en z , ϕ et ψ . De même, il est possible de faire apparaître des zéros dans la 2^e ou la 3^e colonne de la matrice \mathbf{A} . En effet, si chaque vecteur \mathbf{v}_i devient parallèle à son vecteur \mathbf{w}_i associé, alors la 2^e et la 3^e colonnes deviennent remplies de zéros. Ce cas correspond à la situation où les trois barres \mathbf{v}_i associées aux barres de transmission sont parallèles aux vecteurs \mathbf{w}_i du levier. Bref, les barres de transmission sont dans le même plan que le levier. Finalement, pour qu'une ligne de zéros apparaisse, il faut qu'un vecteur \mathbf{v}_i devienne parallèle au vecteur \mathbf{w}_i correspondant et que le vecteur \mathbf{v}_i soit dans le plan XY de la figure 2.1.

Pour assurer le bon fonctionnement du levier 3D nécessaire au sous-actionnement des doigts dans ADAMS, il est important que ce dernier fonctionne hors de ces zones de singularités. Heureusement, le fonctionnement normal du levier lors des nombreuses simulations effectuées dans ADAMS se déroule loin des zones de singularités décrites dans cette section.

Chapitre 3

Simulations effectuées avec le modèle ADAMS de la main SARAH (prise cylindrique)

Ce chapitre traite des résultats importants découlant des simulations réalisées à partir du modèle dynamique de la main SARAH dans ADAMS. Tout d'abord, des résultats qualitatifs sont présentés afin de valider le comportement général de la main. Par la suite, des résultats quantitatifs sont montrés : effet de la masse volumique sur un objet libre, relation entre la force de fermeture et la force de serrage, effort dans les vis de transmission, présence du point d'équilibre et effet de la grosseur de l'objet à saisir sur les forces de serrage.

3.1 Résultats qualitatifs

Plusieurs essais ont été faits afin d'étudier le comportement du modèle ADAMS de la main robotique SARAH. Parmi ceux-ci, il y a l'adaptation des doigts de la main à un objet de forme quelconque, la fermeture des autres doigts même si un des doigts est bloqué et le fait que la force de serrage est appliquée à partir du moment où toutes les phalanges ont fait contact avec l'objet à saisir.

Le premier essai présenté ici vise à vérifier l'adaptation des doigts de la main à un objet de forme quelconque. Pour ce faire, l'objet saisi par la main a la forme d'un petit haltère (illustré à la figure 3.1 (a)) formé de deux disques de 80 mm de diamètre liés par une tige de 20 mm de diamètre. L'objet est placé au centre de la main. D'après la figure 3.1 (b), on constate que les doigts sous-actionnés de la main s'adaptent à la forme particulière de l'objet. En effet, les deux doigts situés du même côté de la main épousent la forme des disques extérieurs tandis que le doigt du centre de la configuration cylindrique s'adapte à la tige. De même, si un doigt est bloqué pour une raison quelconque, les deux doigts restants vont tout de même pouvoir se fermer et s'adapter à la forme de l'objet comme le montre la figure 3.1 (c). Donc, le sous-actionnement des doigts à trois degrés de liberté fonctionne, tout comme le sous-actionnement entre les doigts grâce au levier 3D.

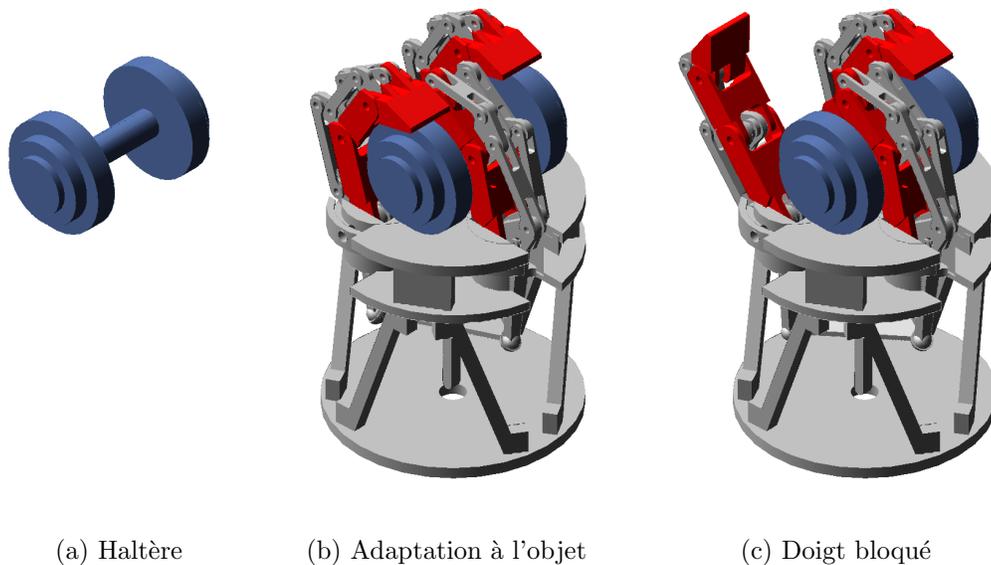


Figure 3.1: Illustration des essais qualitatifs réalisés.

Par ailleurs, la figure 3.2 présente l'évolution du module des forces de contact lors de la simulation de la prise de l'haltère avec tous les doigts (voir la figure 3.1 (b)). Ce graphique a été inséré dans le mémoire afin d'illustrer le fait que la force de serrage est pleinement appliquée lorsque toutes les phalanges sont en contact avec l'objet à saisir. En effet, à la figure 3.2, le module des forces de contact est nul jusqu'aux environs de 4.5 secondes. À cet instant, toutes les phalanges sont en contact avec l'objet et la force de fermeture appliquée à l'actionneur ne sert plus à déplacer les phalanges, mais plutôt à serrer l'objet.

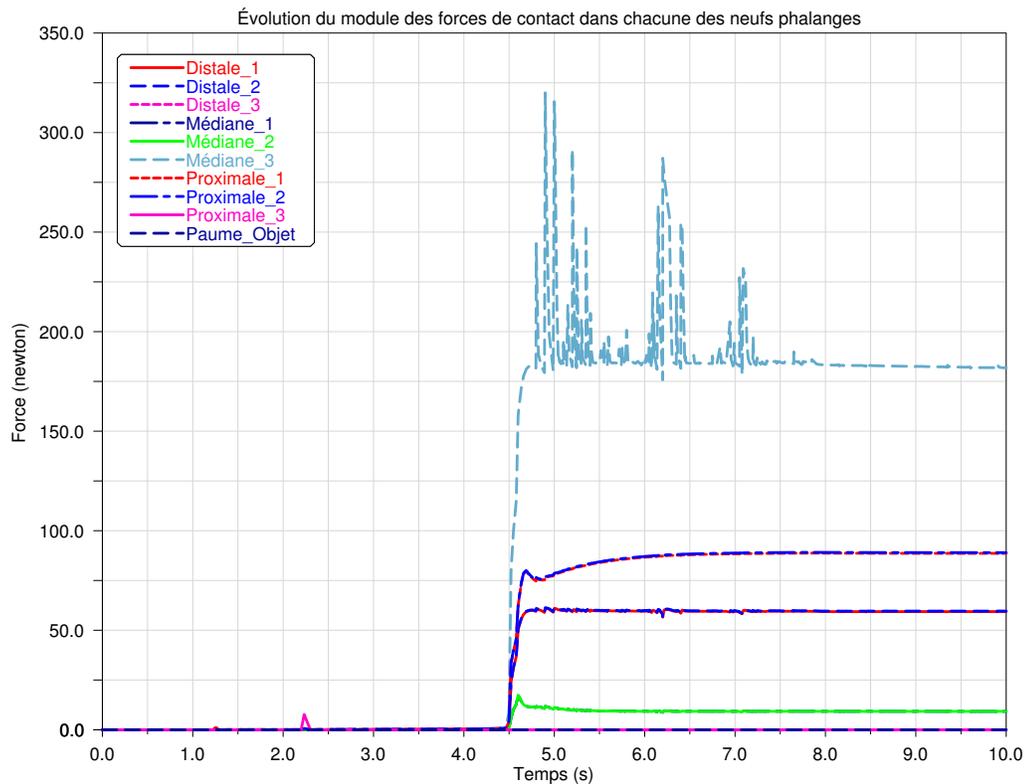


Figure 3.2: Évolution du module des forces de contact dans le temps.

3.2 Résultats quantitatifs

3.2.1 Effet de la masse volumique sur un objet libre

La première série de simulations réalisées a pour objectif d'étudier la prise en puissance d'un cylindre libre dans un environnement sans gravité. Contrairement au cylindre, la

main est fixée au sol. Un cylindre de 90 mm de diamètre semblable au capteur de force et de moment déjà utilisé avec la main SARAH [4] a été choisi comme étant l'objet à saisir. Le paramètre varié lors de cette étude est la masse volumique (ρ) du cylindre. Bien entendu, la variation de la masse volumique influence la masse du cylindre (M) et son inertie (I). On a :

$$M = \rho\pi R^2 h \quad (3.1)$$

$$I = \begin{bmatrix} \frac{1}{12}Mh^2 + \frac{1}{4}MR^2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{12}Mh^2 + \frac{1}{4}MR^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}MR^2 \end{bmatrix}$$

L'effet de la variation de la masse volumique (ρ) est observé sur le déplacement total du centre du cylindre ainsi que sur la force de serrage générée. Le déplacement total du cylindre est défini à l'équation (3.2), où δ_x , δ_y et δ_z sont les valeurs moyennes du déplacement du cylindre dans les directions x , y et z à partir du moment où la prise est relativement stable. Les axes sont illustrés à la figure 3.3. Le déplacement total est donc :

$$\Delta_{total} = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2 + \delta_z^2} \quad (3.2)$$

De même, la force de serrage est définie à l'équation (3.3) :

$$F_{serrage} = \frac{|f_1| + |f_2| + |f_3|}{2} \quad (3.3)$$

où $f_i = f_{proxy_i} + f_{medy_i} + f_{disty_i}$ est la somme des forces sur chacune des phalanges dans la direction y au doigt i . Le doigt 1 est celui qui est seul de son côté, tandis que les doigts 2 et 3 sont du même côté de la paume. Puisque la prise atteint un état d'équilibre, il est possible d'écrire :

$$f_{1y} = f_{2y} + f_{3y} \quad (3.4)$$

Voilà donc pourquoi la force de serrage définie à l'équation (3.3) est une moyenne des forces absolues générées de chaque côté du cylindre (divisé par deux et non par trois).

À la figure 3.3, les configurations finales de la prise d'un objet libre à masse volumique élevée et d'un autre à masse volumique faible sont présentées. On remarque que lorsque la masse volumique est faible, la configuration finale n'est pas aussi symétrique que dans le cas où la masse volumique est élevée. En effet, le cylindre se déplace légèrement du côté où il n'y a qu'un seul doigt.

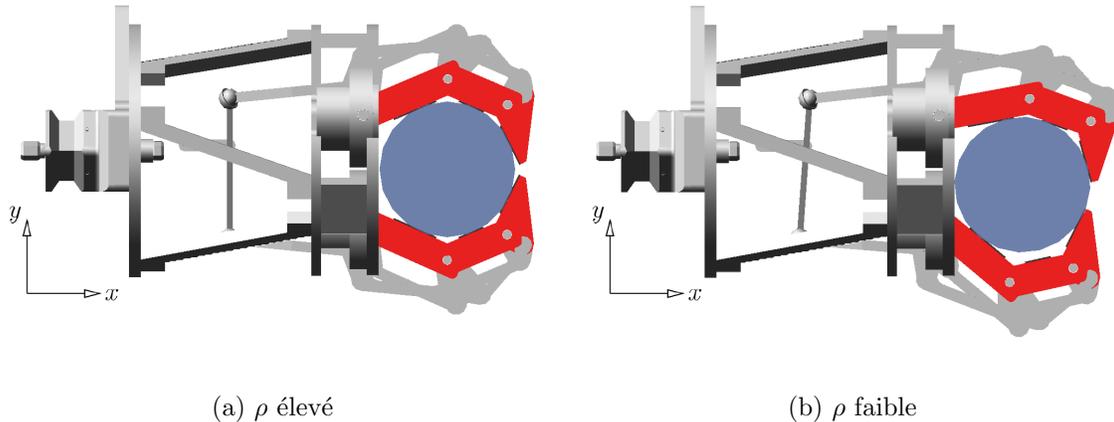


Figure 3.3: Configuration finale de la main pour une grande masse volumique de $1 \times 10^{-3} \text{ kg/mm}^3$ (a) et pour une masse volumique faible de $1 \times 10^{-7} \text{ kg/mm}^3$ (b).

Plusieurs simulations ont été réalisées sur une plage de masses volumiques variant de $1 \times 10^{-7} \text{ kg/mm}^3$ à $1 \times 10^{-3} \text{ kg/mm}^3$. De plus, des simulations ont été faites en présence des butées et d'autres simulations en l'absence des butées. Cela a permis de tracer la figure 3.4 (a). D'après cette figure, on remarque que plus la masse volumique du cylindre est élevée, moins le déplacement du cylindre est grand. Donc, l'objet cylindrique demeure beaucoup plus près de sa position initiale lorsque la masse et l'inertie du cylindre sont grands. De plus, à faible masse volumique, le déplacement du cylindre augmente rapidement pour atteindre l'ordre du centimètre. En outre, à faible masse volumique, l'effet des butées se fait sentir en diminuant le déplacement du cylindre. Donc, le rôle des butées est très important lors de la prise d'un objet libre dans un environnement sans gravité.

La figure 3.4 (b) illustre la relation entre la masse volumique du cylindre et la force de serrage. Une stabilisation de la force de serrage est observée lorsque la masse volumique du cylindre est élevée. Par contre, une diminution de la force de serrage est observable aux environs de $0.5 \times 10^{-3} \text{ kg/mm}^3$. Bref, d'après les figures 3.4 (a) et 3.4 (b), il semble y avoir un lien entre le déplacement de l'objet cylindrique et la force de serrage générée sur celui-ci. Ce lien est illustré à la figure 3.5. La conclusion générale est que la force de serrage générée est reliée au déplacement total du centre du cylindre, c'est-à-dire la position finale de l'objet.

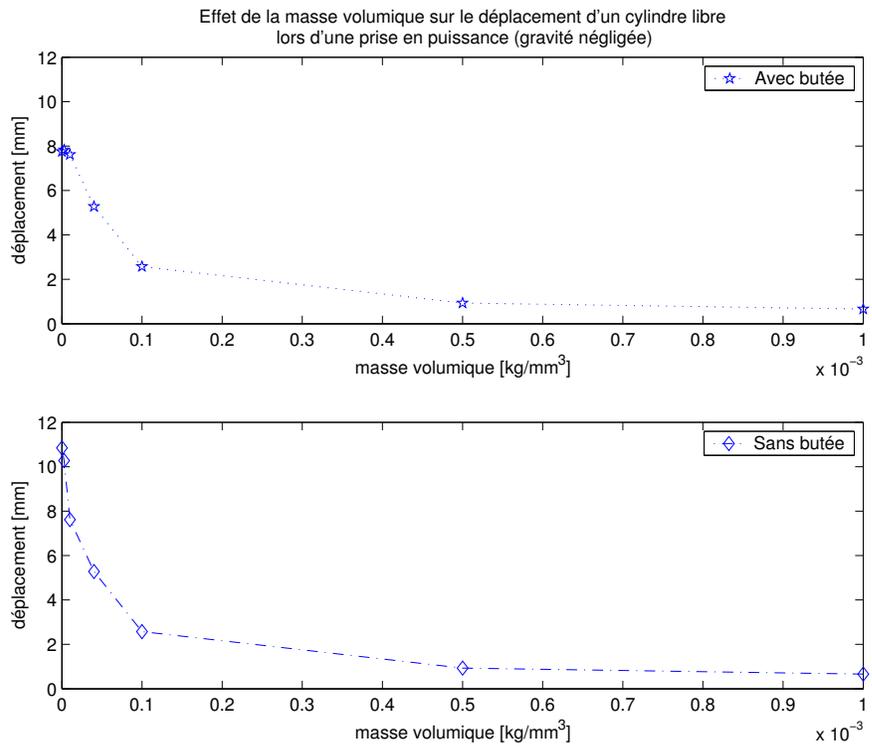
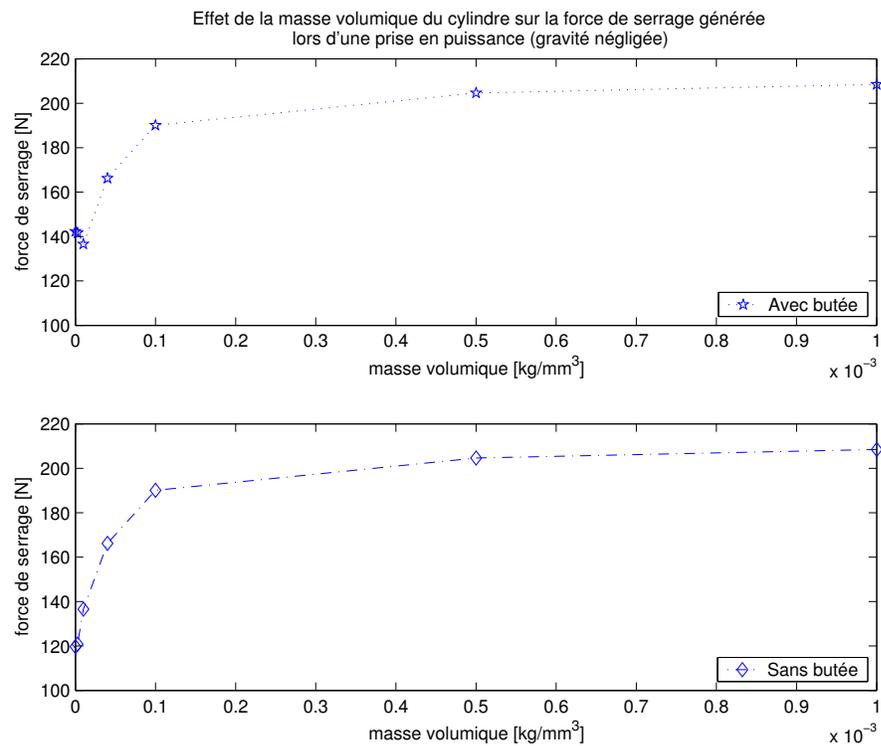
(a) Effet de la masse volumique ρ sur le déplacement du cylindre(b) Effet de la masse volumique ρ sur la force de serrage générée

Figure 3.4: Effet de la masse volumique sur la prise d'un objet cylindrique libre.

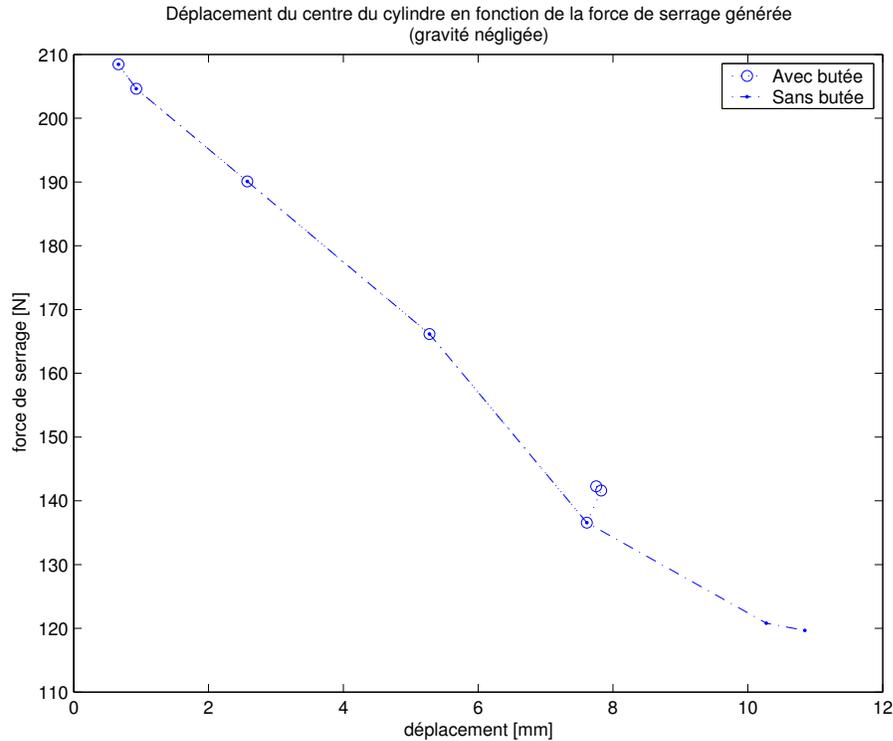


Figure 3.5: Force de serrage en fonction du déplacement du cylindre.

3.2.2 Relation entre la force de fermeture et la force de serrage

De la même manière, la relation entre la force de fermeture, c'est-à-dire la force appliquée à l'actionneur, et la force de serrage sur le cylindre libre a été obtenue. Étant donné que la force appliquée sur l'actionneur est le paramètre qui varie dans les simulations, il est nécessaire de faire aussi varier le coefficient d'amortissement b entre l'actionneur et la structure de la main. En effet, posons

$$F = m\ddot{x} + b\dot{x} \quad (3.5)$$

où F est la force appliquée sur l'actionneur, \dot{x} est la vitesse de déplacement de l'actionneur, m est la masse générale déplacée par la force de fermeture et b est le coefficient d'amortissement. En appliquant la transformée de Laplace à l'équation (3.5), on obtient la fonction de transfert du premier ordre suivante [15] :

$$\frac{\dot{X}(s)}{F(s)} = \left(\frac{1}{b}\right) \frac{\frac{b}{m}}{s + \frac{b}{m}} = k \frac{a}{s + a} \quad (3.6)$$

Donc, pour obtenir une vitesse constante en régime permanent entre chacun des essais, il faut que le ratio $\frac{F}{b}$ demeure constant en considérant que la force de fermeture appliquée est de type échelon. Ici, un ratio de 4 a été fixé par essais et erreurs afin d'obtenir un temps de fermeture d'environ 10 secondes (comparable à celui de la vraie main). En effet, si le coefficient d'amortissement est trop faible, la fermeture des doigts sur l'objet va se produire très rapidement et provoquer la création de grandes forces de contact lors de la rencontre des phalanges avec le cylindre. De même, un ratio trop faible (causé par un coefficient d'amortissement élevé) engendre une augmentation du temps de fermeture. Par conséquent, l'effet négatif est l'augmentation du temps de calcul lors de la résolution des équations régissant la simulation. Finalement, il est à noter que le paramètre b influencera légèrement le régime transitoire par le biais du terme $\frac{b}{m}$. Cependant, cet aspect est négligé puisque la partie transitoire observée dans ADAMS est très rapide.

Sept forces de fermeture variant de 0 N à 1500 N ont été appliquées au modèle ADAMS. Étant donné que l'objet est libre, une masse volumique équivalente à $1 \times 10^{-3} kg/mm^3$ a été choisie afin que le déplacement du cylindre demeure minimum et que ce ne soit pas un facteur influençant les résultats de la simulation. Pour ce qui est des forces de serrage sur l'objet, trois mesures d'intérêt sont étudiées pour la configuration cylindrique : la force de serrage selon y (*les doigts opposés*), la force de serrage selon x (*la paume et les doigts opposés*) et la prise en précision.

Pour la configuration *doigts opposés*, l'équation (3.3) a été utilisée. Cependant, pour la configuration *paume et doigts opposés*, puisque la force de serrage est mesurée dans la direction x , une formulation qui diffère légèrement de l'équation (3.3) a été choisie. La voici :

$$F_{serrage} = \frac{|prox_x| + |med_x| + |dist_x| + |paume_x|}{2} \quad (3.7)$$

où :

$$prox_x = f_{prox_1x} + f_{prox_2x} + f_{prox_3x} \quad (3.8)$$

$$med_x = f_{med_1x} + f_{med_2x} + f_{med_3x} \quad (3.9)$$

$$dist_x = f_{dist_1x} + f_{dist_2x} + f_{dist_3x} \quad (3.10)$$

$$paume_x = f_{paume_x} \quad (3.11)$$

L'équation (3.8) signifie que $prox_x$ est la somme des forces dans la direction x des phalanges proximales des doigts. La même logique est suivie aux équations (3.9), (3.10)

et (3.11). Finalement, la prise en précision est la somme des valeurs absolues des forces sur les phalanges distales dans la direction y (parallèle à la surface de la paume de la main) divisée par deux.

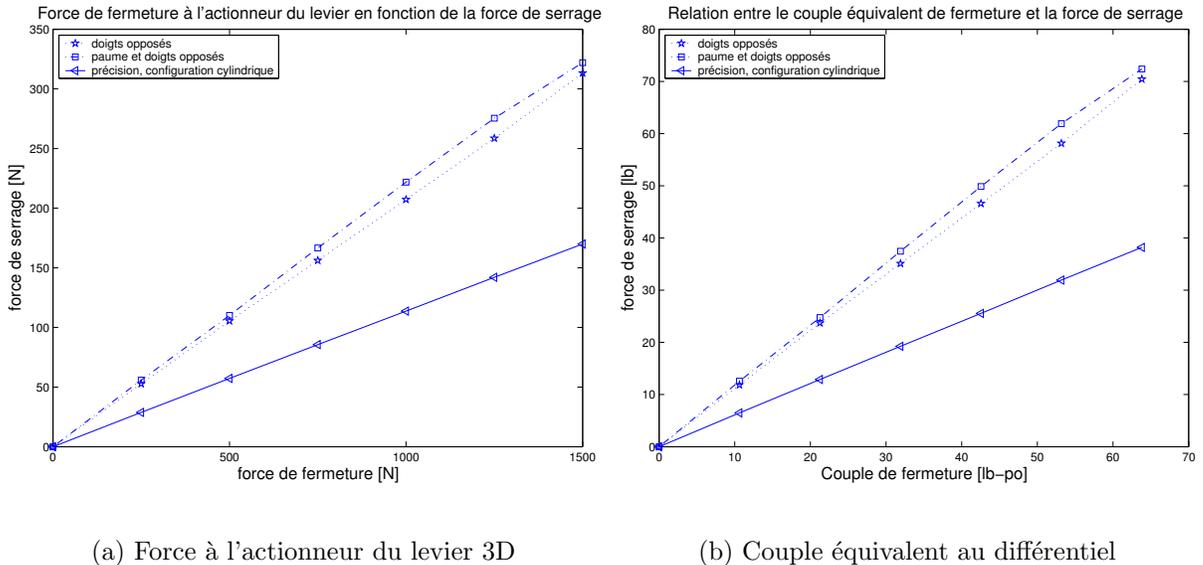


Figure 3.6: Force de serrage sur l'objet en fonction de la force de fermeture pour un cylindre libre.

Suite aux simulations effectuées, la figure 3.6 (a) est tracée dans Matlab. La relation entre la force de fermeture et la force de serrage générée est linéaire. En effet, plus la force de fermeture appliquée augmente, plus la force de serrage croît, ce qui est tout à fait logique. De plus, la configuration de prise *paume et doigts opposés* engendre des forces de serrage plus élevées que celle où les doigts sont opposés. Ce résultat est similaire à la relation expérimentale obtenue entre le couple d'entrée (lb-po) et la force de serrage (lb) pour la main SARAH M1 dans [4].

Par ailleurs, il est facile de transformer la force d'entrée appliquée à l'actionneur du levier 3D en un couple d'entrée équivalent à l'entrée du différentiel afin d'obtenir des graphiques semblables à ceux obtenus expérimentalement avec la main SARAH M1. Pour ce faire, la figure 3.7 illustrant le différentiel à une entrée et à trois sorties est utilisée. Tout d'abord, les hypothèses suivantes sont émises :

$$F_{doigt} = \frac{F_{ferm}}{3} \quad (3.12)$$

$$T_{diff} = \frac{T_{entree}}{3} \quad (3.13)$$

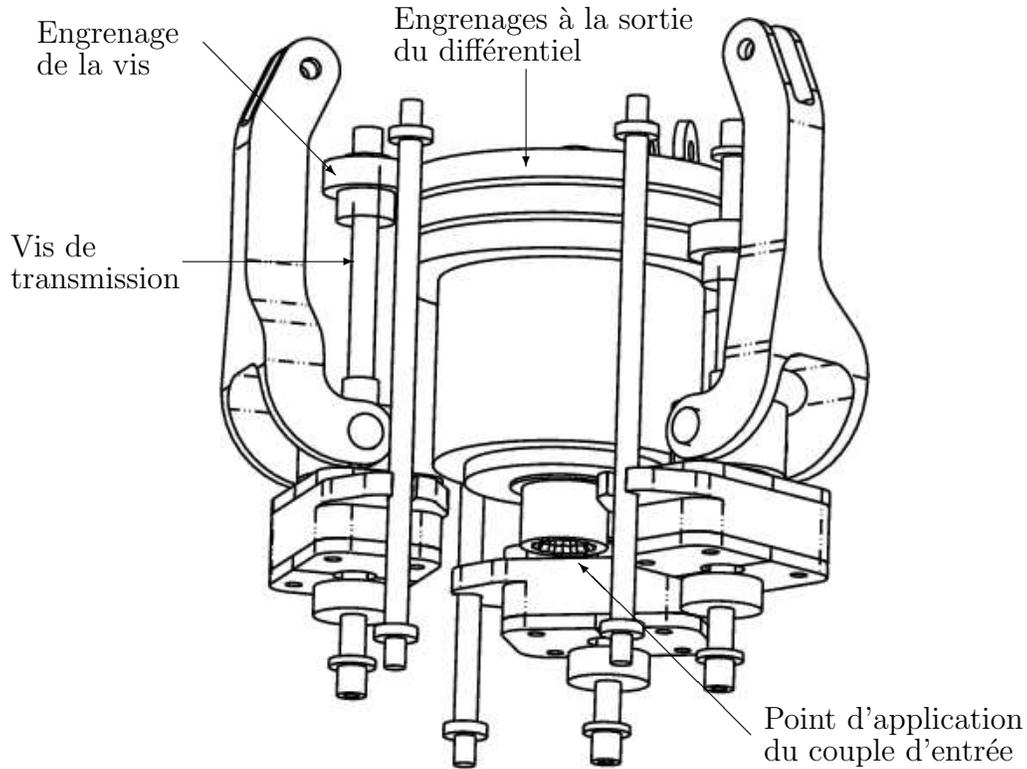


Figure 3.7: Différentiel à une entrée et trois sorties utilisé sur la vraie main (image fournie par Thierry Laliberté).

Cela signifie que la force de fermeture se divise également en trois à chacun des doigts dans le levier 3D et que le couple d'entrée se sépare aussi en trois couples égaux à la sortie du différentiel avant le premier contact entre les doigts et l'objet. De même, il est clair que le couple dans la vis de transmission est le même que celui à l'engrenage fixé à la vis de transmission. Donc, le couple à la sortie du différentiel est :

$$T_{diff} = T_{engrvis} \frac{\phi_{diff}}{\phi_{engrvis}} = T_{vis} \frac{\phi_{diff}}{\phi_{engrvis}} \quad (3.14)$$

À partir des équations (3.13) et (3.14), l'expression définissant le couple d'entrée est :

$$T_{entree} = 3T_{engrvis} \frac{\phi_{diff}}{\phi_{engrvis}} = 3T_{vis} \frac{\phi_{diff}}{\phi_{engrvis}} \quad (3.15)$$

où le couple de montée dans la vis de transmission dont le pas est simple et les filets sont carrés est défini dans [16] de la manière suivante :

$$T_{vis} = F_{doigt} \left(\frac{d_m}{2} \right) \left(\frac{p + \pi \mu d_m}{\pi d_m - \mu p} \right) \quad (3.16)$$

Finalement, l'expression du couple d'entrée au différentiel équivalent à la force de fermeture appliquée au levier 3D est obtenue à l'équation (3.17) par la relation suivante :

$$T_{entree} = F_{ferm} \left(\frac{d_m}{2} \right) \left(\frac{p + \pi \mu d_m}{\pi d_m - \mu p} \right) \frac{\phi_{diff}}{\phi_{engrvis}} \quad (3.17)$$

où p est le pas de la vis, μ est le coefficient de frottement, $d_m = \phi_{vis} - \frac{p}{2}$ est le diamètre moyen de la vis, ϕ_{diff} est le diamètre de l'engrenage à la sortie du différentiel et $\phi_{engrvis}$ est le diamètre de l'engrenage fixé sur la vis de transmission. Toutes les valeurs utiles sont consignées dans le tableau 3.1 et sont obtenues à partir des caractéristiques de la vis de transmission utilisée sur la main SARAH M1. En terminant, une valeur légèrement élevée a été donnée au coefficient de frottement ($\mu = 0.2$) afin de compenser pour certaines erreurs de modélisation commises. Les résultats de la conversion de la force de fermeture appliquée au levier 3D au couple équivalent à l'entrée du différentiel sont présentés à la figure 3.6 (b).

Tableau 3.1: Valeurs utiles à la conversion de la force de fermeture (N) en couple d'entrée (lb-po).

Symbole	Description	Valeur	Unités
p	Pas de la vis	0.083	pouces
ϕ_{vis}	Diamètre de la vis	$\frac{3}{8}$	pouces
$\phi_{engrdiff}$	Diamètre de l'engrenage à la sortie du différentiel	3	pouces
$\phi_{engrvis}$	Diamètre de l'engrenage fixé à la vis de transmission	$\frac{3}{4}$	pouces
d_m	Diamètre moyen de la vis	0.3335	pouces
μ	Coefficient de frottement	0.20	-

3.2.3 Effort dans les vis de transmission

Cette série de simulations vise à vérifier l'effet sur la membrure ayant le comportement autobloquant de l'application d'une force sur un objet saisi par la main. Encore une fois, l'objet est libre. Il possède un diamètre de 90 mm ainsi qu'une très grande masse volumique afin de limiter les déplacements lors de la préhension. Voici la séquence des événements à chacune des simulations. Tout d'abord, durant les cinq premières secondes, la main se ferme sur l'objet cylindrique. Par la suite, durant les cinq secondes suivantes, une force est appliquée au centre de l'objet en direction de l'unique doigt,

ce qui constitue un cas limite. Sept forces variant de 0 N à 300 N par tranche de 50 N sont appliquées sur l'objet. L'information recueillie à chaque simulation est le couple généré à la base du doigt par le comportement autobloquant. Par la suite, le couple est converti en force équivalente dans la vis de transmission à l'aide de l'équation suivante :

$$F_{vis} = \frac{T_{autoblocage}}{d \cos \theta} \quad (3.18)$$

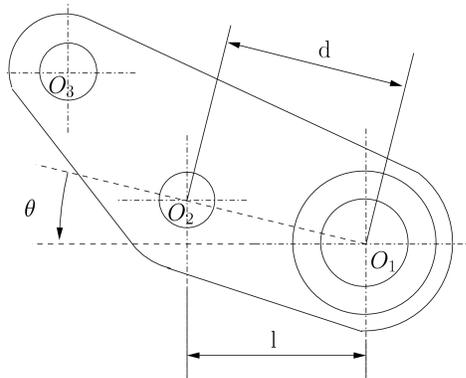


Figure 3.8: Schéma de la membrure d'actionnement proximale ayant le comportement autobloquant.

Les termes d et θ sont illustrés à la figure 3.8. Le terme d est la distance entre l'axe qui lie la phalange proximale au bâti en O_1 et l'endroit où la vis de transmission pousse sur la membrure en O_2 . De même, l'angle θ est l'angle que fait la droite passant par O_1 et O_2 avec la surface de la paume de la main. De plus, l'hypothèse que la force dans la vis de transmission est perpendiculaire à la surface de la paume est émise afin de simplifier les calculs. Le graphique obtenu est illustré à la figure 3.9.

Or, d'après les propriétés de l'écrou utilisé, la charge maximale en statique est de 1500 lbs et de 300 lbs en dynamique. Cette valeur n'est pas dépassée pour une charge approchant les 70 lbs, alors que la charge maximale que peut supporter la main est d'environ 60 lbs selon [4]. Cependant, d'autres éléments peuvent céder avant la vis de transmission. Donc, l'effort dans les vis de transmission ne semble pas critique.

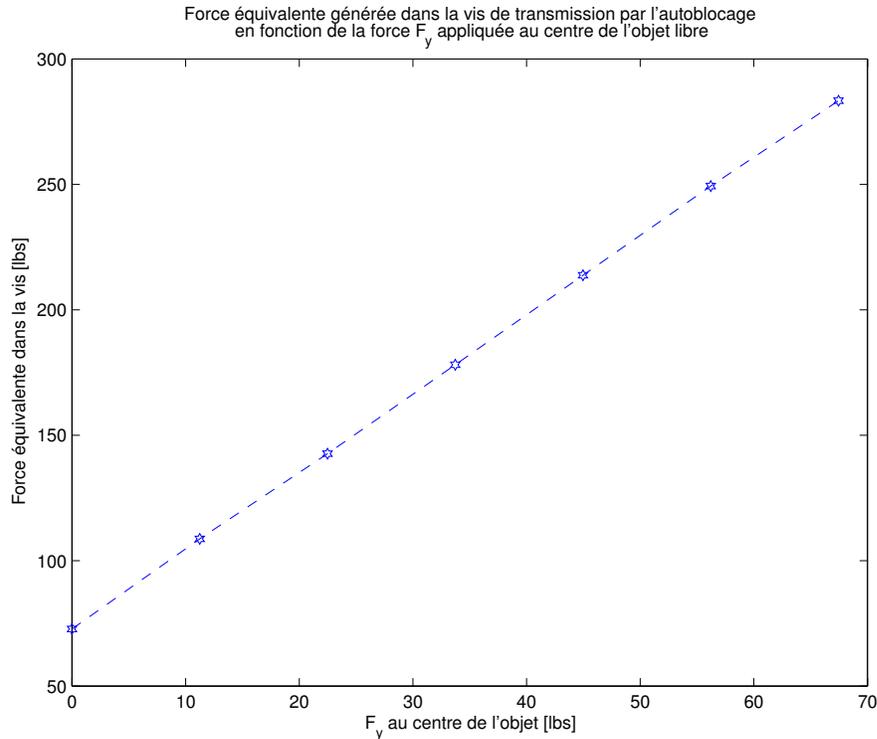


Figure 3.9: Force équivalente générée par l'autoblocage en fonction de la force appliquée au centre du cylindre.

3.2.4 Point d'équilibre

Le point d'équilibre est défini dans [3] comme étant *le point de contact sur une phalange qui permet d'atteindre l'équilibre statique, pour une configuration donnée, lorsqu'il n'y a pas de contact à la phalange précédente*. En fait, le point d'équilibre est le point que la phalange distale cherche à atteindre durant la prise en précision d'un objet. L'objectif de cette section est de montrer la présence du point d'équilibre dans le modèle ADAMS de la main SARAH et de voir l'effet de la friction sur le point d'équilibre. Ainsi, un cylindre fixe de 1 cm de diamètre est placé au centre de la paume. De même, la distance h qui sépare le centre du cylindre de la surface de la paume est variée de 90 mm à 115 mm. L'élément mesuré à chacune des simulations est l'angle final de la phalange distale par rapport à la paume de la main. Si l'angle est positif, la phalange est en configuration fermée et si l'angle est négatif, la phalange est en configuration ouverte tel qu'illustré à la figure 3.10. Dans le cas des simulations incluant la friction, le coefficient de frottement dynamique est de 0.76 et le coefficient de frottement statique est de 0.8. Finalement, la figure 3.11 est obtenue.

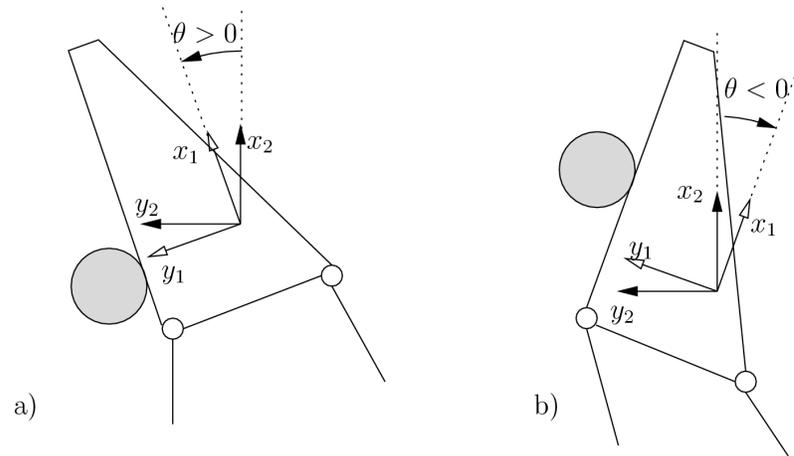


Figure 3.10: Configuration fermée (a) et ouverte (b) de la phalange distale lors de la prise en précision d'un objet fixe.

Après consultation de la figure 3.11, l'effet du frottement sur le point d'équilibre est assez facile à visualiser. Tout d'abord, la friction convertit le point d'équilibre en une région d'équilibre tel que suggéré dans [3]. De plus, avec l'ajout du frottement, les phalanges distales ont tendance à rester perpendiculaires à la paume dans une plus grande région en présence des forces de friction. En conclusion, dans le cas des prises en précision, les forces de frottement sont profitables car elle agrandissent la zone d'équilibre des phalanges distales.

3.2.5 Grosseur de l'objet à saisir

L'objectif de cette dernière étude est de vérifier l'effet du diamètre du cylindre à saisir sur la force de serrage générée. De même, l'effet est analysé pour la prise en puissance et pour la prise en précision. Dans chacune des situations, le cylindre est fixé au centre de la paume. Pour la prise en puissance, la distance entre la paume de la main et l'objet à saisir est équivalente au rayon du cylindre. Pour la prise en précision, l'objet est fixé à une distance de 102.5 mm. Une force de 1000 Newtons, ce qui équivaut à un couple approximatif de 30 lb-po selon la figure 3.6, est appliquée à l'actionneur. Par ailleurs, chaque simulation se déroule sur dix secondes afin de stabiliser la prise. De plus, la valeur retenue de la force de serrage est une moyenne sur les deux dernières secondes.

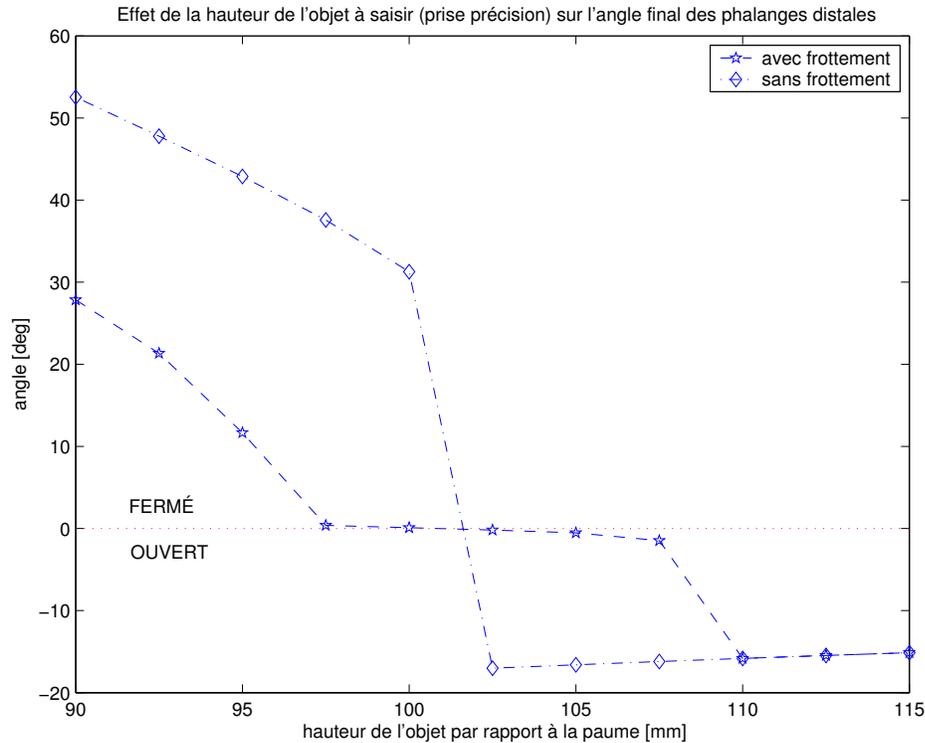


Figure 3.11: Variation de l'angle de la phalange distale en fonction de la hauteur de l'objet à saisir.

Dans le cas de la prise en puissance, la force de serrage est définie de la façon suivante :

$$F_{serrage} = |f_{proxy_i} + f_{medy_i} + f_{disty_i}| \quad (3.19)$$

où i représente un des trois doigts. En effet, puisque la prise est centrée et que l'objet est symétrique et fixé au sol, chacun des doigts applique la même force sur l'objet. Du côté de la prise en précision, étant donné que seulement la phalange distale entre en contact avec l'objet, la force de serrage correspond à la composante en y de la force de contact d'une des phalanges. À la suite de plusieurs simulations, la figure 3.12 est tracée. De ce graphique, on constate la présence d'un maximum sur la courbe pour la prise en puissance d'un cylindre de 65 mm de diamètre, ce qui correspond à une force de serrage d'environ 125 Newtons. De même, plus le cylindre est gros, plus la force de serrage générée diminue. Cela signifie que pour chaque objet, il existe une grandeur optimale de la main qui engendre une force maximale de serrage. Ce fait pourrait être très utile lors du design d'une main sous-actionnée pour une tâche répétitive, comme sur une chaîne de production par exemple. Quant à la prise en précision en configuration cylindrique, la courbe obtenue possède une pente assez faible. Donc, il ne semble pas

Il y a un lien évident entre la grosseur de l'objet et la force de serrage générée. En outre, il est important de remarquer que la prise en précision génère des forces de serrage beaucoup plus faibles que la prise en puissance. Cela a aussi été observé à la figure 3.6.

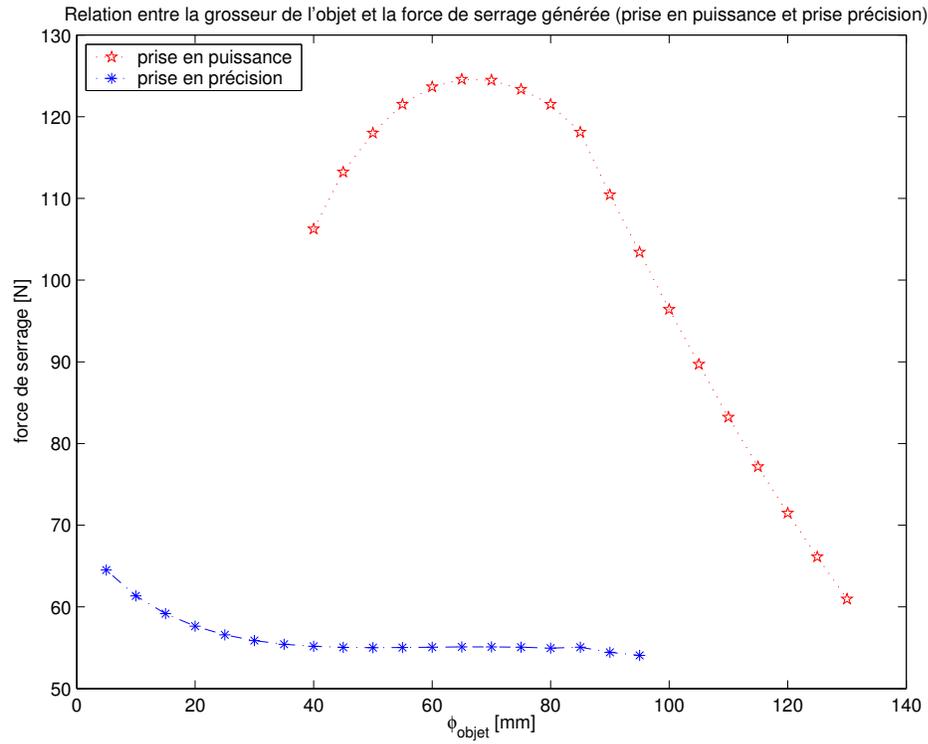


Figure 3.12: Effet du diamètre du cylindre sur la force de serrage générée.

Chapitre 4

Comportement compliant

Ce chapitre décrit l'ajout du comportement compliant (souplesse) aux modèles dynamiques de la main SARAH développés dans ADAMS. Tout d'abord, la distinction entre la compliance passive et la compliance active est effectuée. Par la suite, le robot à deux bras Dextre appelé à utiliser la main SARAH comme outil est présenté. À partir d'un modèle SIMULINK fourni par l'Agence spatiale canadienne imitant le comportement d'un des bras de Dextre, un modèle simplifié unidimensionnel est construit. Finalement, une généralisation du modèle unidimensionnel simplifié du comportement compliant est implantée à la base de la main SARAH dans ADAMS.

4.1 Définition de la compliance

Ce chapitre présente l'ajout du comportement compliant aux modèles dynamiques de la main SARAH dans ADAMS. En effet, la compliance est réalisée grâce au comportement particulier appelé *Force/Moment Accommodation* présent dans les bras de Dextre. Avant d'aller plus loin, une définition générale de la compliance est nécessaire. Ce terme est propre au domaine de la robotique. Dans [17], la compliance est définie de la façon suivante :

La compliance peut être définie comme étant la capacité d'un manipulateur à avoir un comportement souple ; le robot compliant peut subir un déplacement sous l'effet d'un effort dû au contact du manipulateur avec son environnement, cet effort restant cependant dans des limites raisonnables pour la tâche considérée.

En outre, tout robot devant accomplir une tâche nécessitant un contact avec son environnement doit avoir un comportement compliant. En effet, il existe toujours une erreur de position lors du déplacement d'un robot. Si l'environnement du robot a une matrice de rigidité \mathbf{K} très grande, un déplacement $\Delta\mathbf{x}$ va provoquer des forces ($\Delta\mathbf{F} = \mathbf{K}\Delta\mathbf{x}$) très grandes dans le robot, ce qui pourrait causer des bris [14]. Donc, une commande en position est inappropriée pour les tâches nécessitant des contacts ; il faut plutôt opter pour une commande en force. Pour ce faire, la compliance peut être ajoutée de plusieurs façons au robot. En fait, il existe deux grandes familles : la compliance passive et la compliance active.

En premier lieu, la compliance passive est réalisée à l'aide d'éléments mécaniques. L'exemple classique est le *Remote Compliant Center* [18] utilisé principalement pour les tâches répétitives de mise en place de tiges dans des trous. Ce mécanisme, illustré à la figure 4.1, est ajouté entre l'organe terminal et l'outil. Sous l'effet des forces de contact ressenties, les ressorts (éléments passifs) du *Remote Compliant Center* vont se déformer, ce qui compense les erreurs de positionnement et évite les bris. La particularité du *Remote Compliant Center* est la présence d'un *centre de compliance* O_c . À ce point, la matrice de rigidité est diagonale, ce qui signifie que le comportement est découplé. Par exemple, une force de contact en x va déplacer le point O_c dans la direction x . Par ailleurs, il existe aussi d'autres avenues si un comportement compliant passif est désiré.

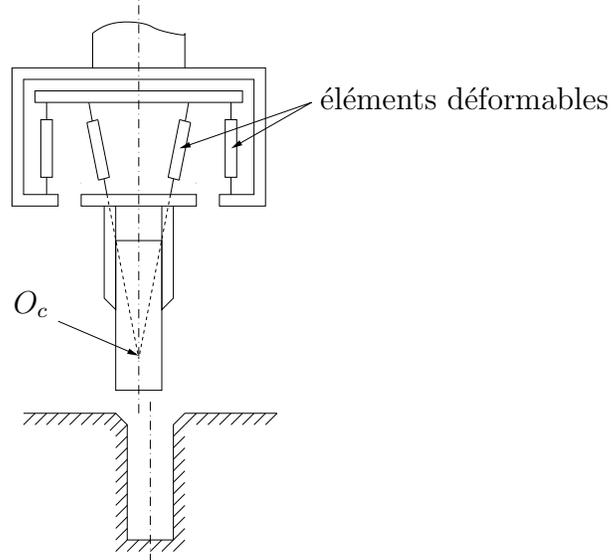


Figure 4.1: Le *Remote Compliant Center*, extrait des notes de “Mécanique des manipulateurs” (GMC-64388).

Parmi celles-ci, il est possible d’employer des membrures flexibles pour le bras du robot ou d’utiliser des actionneurs souples [17]. Bref, l’avantage principal de la commande par compliance passive est la simplicité de la commande. En effet, il n’est pas nécessaire de mesurer les efforts à l’aide de capteurs, ce qui diminue les coûts. Cependant, il y a quelques désavantages. En effet, la matrice de raideur est fixe (reliée au système mécanique choisi) et il faut tenir compte du déplacement des éléments passifs (RCC, membrures) dans la mesure du positionnement de l’outil.

L’autre catégorie de compliance est la compliance active. Celle-ci consiste plutôt à créer une loi de commande visant à déplacer les joints du robot sous l’effet des forces de contact mesurées par des capteurs de force et de moment. L’avantage par rapport à la compliance passive est la possibilité de varier la loi de commande à tout moment (matrice de raideur variable). De plus, il n’est pas nécessaire d’ajouter des éléments mécaniques supplémentaires au robot. Les désavantages sont la nécessité d’utiliser des capteurs de force dans la loi de commande, ce qui fait augmenter les coûts.

En terminant, le robot *Dextre*, décrit en détails à la section 4.2, est doté de compliance active. En effet, il utilise des capteurs de forces et de moments et se déplace afin de minimiser les efforts mesurés au changeurs d’outils et d’ORU (OTCM) illustré à la figure 4.2. C’est ce comportement qui est ajouté aux modèles ADAMS de la main

SARAH dans ce chapitre.

4.2 Dextre (Manipulateur agile spécialisé)

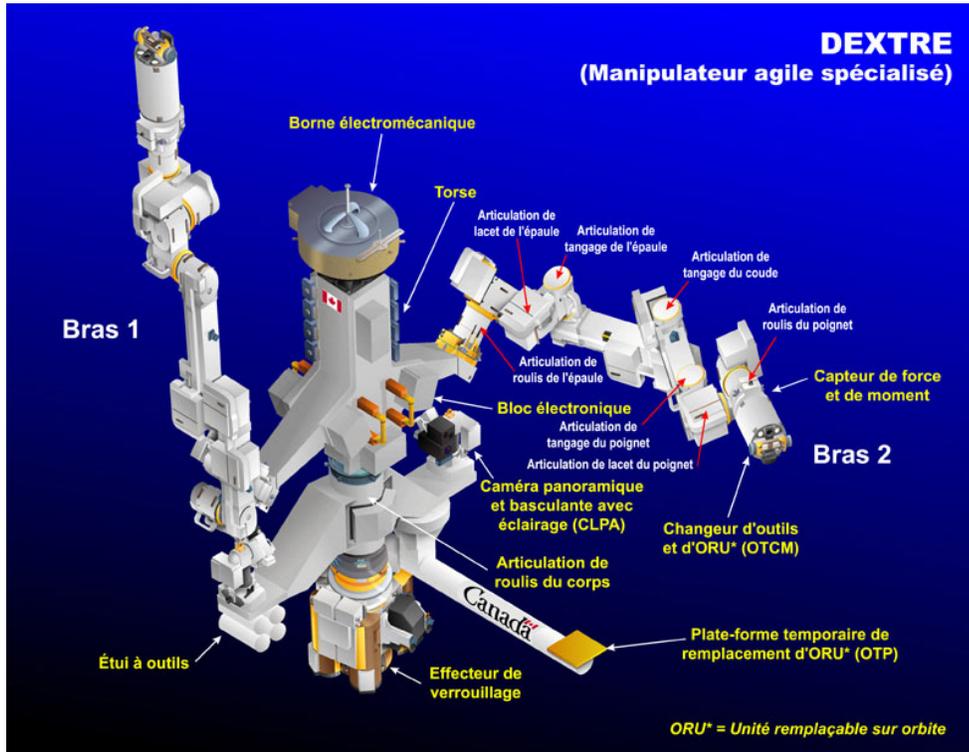


Figure 4.2: Composantes principales de Dextre, le manipulateur agile spécialisé. Image recueillie sur le site web de l'agence spatiale canadienne (<http://www.espace.gc.ca/>).

Dextre, soit le manipulateur agile spécialisé en français ou le *Special Purpose Dextrous Manipulator* (SPDM) en anglais, est la toute dernière contribution du Canada à la station spatiale internationale. Ce robot, illustré à la figure 4.2, est muni de deux bras ayant chacun sept degrés de liberté tout comme le bras humain. Dextre possède également un torse lui permettant de pivoter sur lui-même. En bref, le robot Dextre possède quinze degrés de liberté, mesure 3.5 m de longueur, pèse 1662 kg et la masse maximale pouvant être déplacée est de 600 kg. De plus, Dextre ne peut bouger qu'un seul bras à la fois afin d'éviter les collisions avec lui-même. L'autre bras est habituellement ancré à la station spatiale, ce qui donne une très grande stabilité au robot. En outre, Dextre a été conçu dans le but de remplacer les astronautes dans l'exécution de tâches à l'extérieur de la station spatiale. En effet, ces activités sont souvent très

longues et doivent être effectuées dans des conditions très difficiles. Avec le bras canadien (Canadarm2) et la Base mobile, Dextre forme un ensemble appelé le système d'entretien mobile (MSS). Ces trois éléments peuvent travailler individuellement ou en coopération [19].

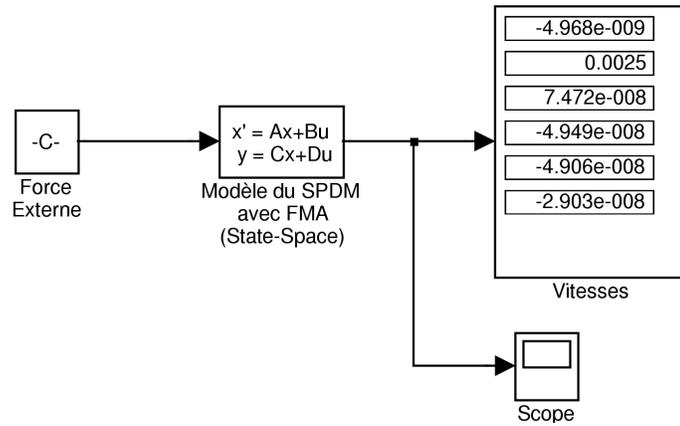
À l'extrémité de chacun des bras de Dextre se trouve un changeur d'outils et d'ORU (OTCM) équipé de mâchoires pouvant saisir différents outils. C'est à cet endroit que la main SARAH serait employée. Ce qui rend le manipulateur Dextre si agile et si apte à accomplir des tâches délicates est la présence de capteurs de forces et de moments à la base de l'OTCM. À partir des forces et des moments mesurés par les capteurs, Dextre se déplace afin de limiter les efforts ressentis et d'éviter les bris et ce, dans le but d'accomplir la tâche en douceur. Ce comportement spécial du robot est appelé *compliance active*, ou encore *Force/Moment Accommodation* (FMA) en anglais.

4.3 Modèle linéarisé du robot Dextre avec FMA

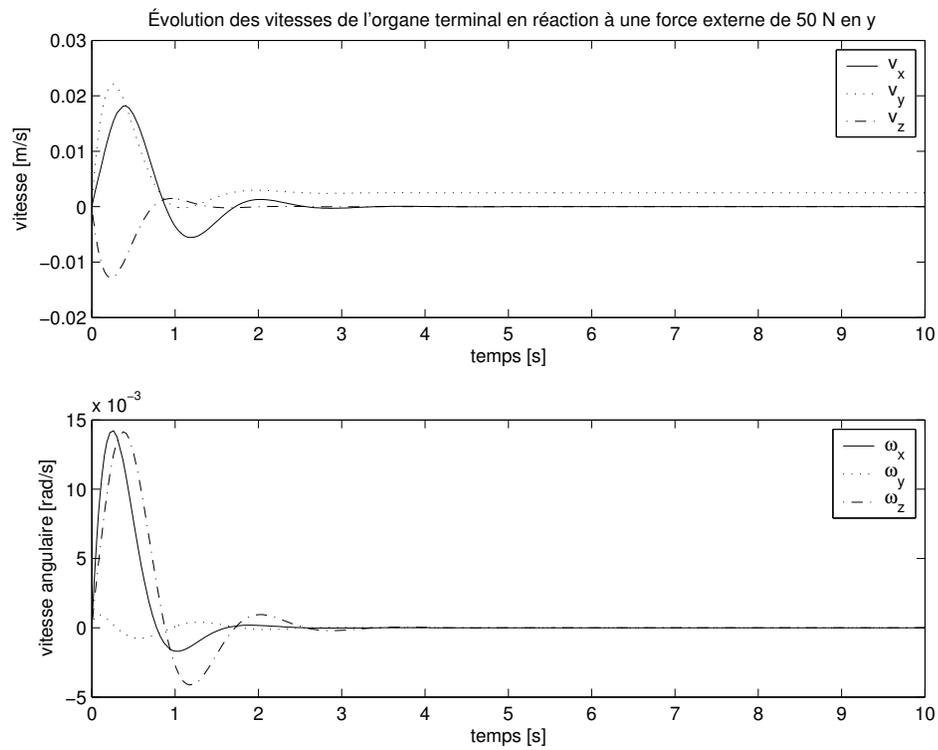
Un modèle SIMULINK du robot Dextre a été fourni par l'agence spatiale canadienne (ASC). Ce modèle linéarisé de Dextre en boucle fermée utilise les variables d'état. Fait important, la représentation inclut également le comportement associé au FMA (*Force/Moment Accommodation*). L'entrée du système est un vecteur à six composantes, c'est-à-dire les trois forces et les trois moments appliqués à l'organe terminal de Dextre. Les sorties sont les vitesses de l'organe terminal en translation et en rotation. De plus, le modèle fourni est associé à une configuration particulière des articulations du robot. La position en radians de chacune des sept articulations est exprimée à l'équation (4.1).

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0015 & -1.05 & 1.576 & 1.043 & -0.002 & -1.575 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Le schéma bloc SIMULINK est illustré à la figure 4.3 (a), où une force de 50 N a été appliquée dans la direction y , c'est-à-dire l'axe autour duquel s'effectue la dernière rotation au poignet du SPDM. Les vitesses finales de l'organe terminal sont ensuite affichées. À noter que les unités utilisées dans le modèle SIMULINK sont les N pour les forces, les Nm pour les couples, les m/s pour les vitesses et les rad/s pour les vitesses angulaires.



(a) Schéma bloc



(b) Réponse en vitesse à une force appliquée de 50 N

Figure 4.3: Modèle SIMULINK utilisant les variables d'état linéarisé du SPDM avec FMA.

À partir du modèle SIMULINK de Dextre, il est possible de tracer l'évolution des vitesses dans le temps produites par la force de 50 N dans la direction y tel qu'illustré à la figure 4.3 (b). Durant la période transitoire qui s'étend sur quelques secondes, des vitesses sont générées dans toutes les directions. Cependant, en régime permanent, la seule vitesse qui demeure à la figure 4.3 (b) est dans la direction y .

En outre, le modèle SIMULINK fourni par l'agence spatiale sert d'outil de base à l'ajout du comportement associé au *Force/Moment Accommodation* au modèle dynamique de la main SARAH dans ADAMS. Par conséquent, le but recherché est d'ajouter le comportement compliant à chacun des modèles dynamiques existants de SARAH afin que les simulations de tâches à accomplir sur la station spatiale soient plus réalistes.

4.4 Modèle simplifié unidimensionnel

En première approximation, un modèle simplifié est construit dans ADAMS. Ce modèle est constitué d'un corps ne pouvant se déplacer que sur l'axe des x auquel une force extérieure f_{ext} est appliquée. La vitesse \dot{x} du corps est la réponse du système à la force extérieure. Le diagramme des corps libres du modèle simplifié unidimensionnel est illustré à la figure 4.4.

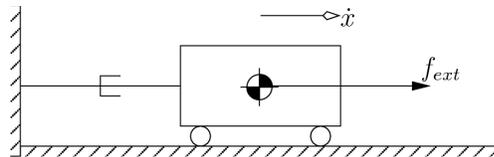


Figure 4.4: DCL du modèle à une dimension.

Tout d'abord, la fonction de transfert du modèle simplifié unidimensionnel reliant la force extérieure à la vitesse du corps est obtenue à partir du modèle SIMULINK fourni par l'Agence spatiale canadienne. En effet, la réponse en vitesse obtenue à la figure 4.3 (b) peut être approximée par la réponse d'un système du deuxième ordre de la façon suivante :

$$\frac{\dot{X}(s)}{F(s)} = \frac{1}{as^2 + bs + c} \quad (4.2)$$

où l'entrée du système est la force extérieure appliquée et la sortie est la vitesse du corps. Il y a donc trois paramètres à définir dans l'équation (4.2) : a , b et c . Tel que

défini dans [15], la forme générale d'une équation du deuxième ordre est :

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.3)$$

où ω_n est la fréquence naturelle et ζ est le facteur d'amortissement. Une identification de la réponse à un échelon unitaire du modèle SIMULINK fourni par l'agence spatiale doit être faite afin d'obtenir les valeurs appropriées de ω_n et ζ . Pour ce faire, une force constante de 1 N est appliquée dans la direction de l'axe de la dernière rotation du poignet du robot Dextre (y) et la réponse en vitesse dans la direction y est extraite. Cette courbe est utilisée lors de l'identification. De plus, puisque la vitesse tend vers zéro dans toutes les autres directions en régime permanent, une hypothèse importante est posée : le modèle est découplé. Donc, une force dans une direction va générer une réponse en vitesse dans une seule direction. Cela n'est pas totalement vrai, mais cette hypothèse simplifie énormément le modèle. De même, le *Controls Toolkit* présent dans le logiciel ADAMS n'utilise que des fonctions de transfert simplifiées à une entrée et une sortie. Il serait donc très difficile d'implanter un modèle couplé dans ADAMS avec six entrées en forces et six sorties en vitesse.

Afin d'obtenir les valeurs ω_n et ζ , certaines caractéristiques de la courbe sont observées. En effet, ces deux paramètres sont associés aux éléments caractéristiques suivants de la réponse d'un système du second ordre sous-amorti : le temps maximum (T_p), le dépassement (%OS), le temps d'établissement (T_s) et le temps de montée (T_r). Le temps maximum (T_p) est défini comme le temps au premier sommet, le dépassement (%OS) exprime de combien le maximum de la courbe excède la valeur finale, le temps d'établissement (T_s) est le temps nécessaire pour que la réponse demeure à $\pm 2\%$ de la valeur finale et le temps de montée (T_r) est le temps pris par la réponse pour passer de 10% à 90% de la valeur finale. Habituellement, le facteur d'amortissement est directement obtenu à partir du dépassement. Cependant, puisque le dépassement de la réponse du modèle fourni par l'agence spatiale est supérieur à 100 %, cet élément est inutile ici. En effet, la réponse du modèle n'est pas une véritable réponse du deuxième ordre car le maximum de la courbe est environ cinq fois plus grand que la valeur atteinte en régime permanent. C'est pourquoi le temps maximum et le temps d'établissement sont utilisés pour trouver ω_n et ζ . Ils sont définis de la façon suivante :

$$T_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (4.4)$$

$$T_s = \frac{4}{\zeta \omega_n} \quad (4.5)$$

Lorsque T_p et T_s sont connus, la fréquence naturelle ω_n et le facteur d'amortissement ζ sont facilement obtenus en combinant les équations (4.4) et (4.5), ce qui donne :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\pi^2}{T_p^2} + \frac{16}{T_s^2}} \quad (4.6)$$

$$\zeta = \frac{4}{T_s \omega_n} \quad (4.7)$$

Maintenant que les valeurs associées à ω_n et à ζ sont posées, la fonction de transfert du modèle unidimensionnel est connue. À noter qu'à l'équation suivante, le terme k est un gain qui correspond au ratio de la valeur atteinte en régime permanent sur la valeur d'entrée.

$$\begin{aligned} \frac{\dot{X}(s)}{F(s)} &= \frac{1}{\frac{1}{k\omega_n^2}s^2 + \frac{2\zeta}{k\omega_n}s + \frac{1}{k}} \\ &= \frac{1}{136.2758s^2 + 345.5157s + 19994} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Par conséquent, la fonction de transfert du modèle simplifié unidimensionnel est maintenant définie. L'étape suivante consiste à l'implanter dans le logiciel de simulation dynamique ADAMS. Pour ce faire, une sphère servant de corps est créée. Celle-ci est liée au sol par une articulation prismatique afin de limiter le déplacement du corps à une seule direction et ce, dans un environnement sans gravité. Une force (FORCE_EXT) est appliquée sur l'objet. Pour établir la réponse en vitesse du corps, il faut construire le schéma de contrôle dans ADAMS à l'aide du *Controls Toolkit*. L'entrée du système est la somme des forces appliquées sur l'objet dans la direction x . Une variable (FORCE_X) qui va calculer la somme des forces en x à chaque incrément de temps est donc nécessaire. Pour ce faire, il faut aller dans le menu *Build*, cliquer sur *System Elements*, choisir *State Variable* et remplir la fenêtre de dialogue comme à la figure 4.5. La fonction SFORCE sert à mesurer une force n'ayant qu'une seule composante. Le premier argument indique quelle force doit être mesurée (FORCE_EXT), le premier 0 signifie que la force doit être mesurée sur le premier corps (*First Body*), c'est-à-dire la sphère, et le 2 indique que la composante en x de la force est calculée par rapport au repère global (dernier 0).

Pour créer le schéma de contrôle, il faut aller dans *Build*, cliquer sur *Controls Toolkit* et choisir *Standard Control Blocks...* Il faut alors définir dans l'ordre l'entrée, la fonction de transfert et la sortie. L'entrée est la variable représentant la somme des forces en x

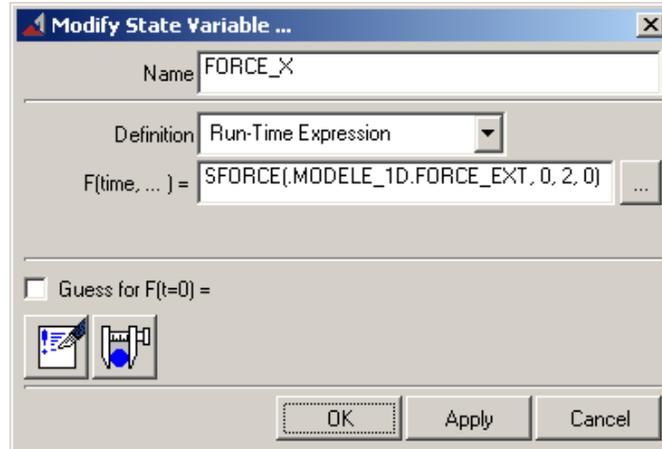


Figure 4.5: Fenêtre de création de la variable FORCE_X.

appliquées (FORCE_X). L'équation à insérer dans l'espace *Function* est :

$$Function = VARVAL(.MODELE_1D.FORCE_X) \quad (4.9)$$

Ici, la fonction VARVAL donne la valeur de la variable FORCE_X à chaque incrément de temps. Ensuite, il faut ajouter la fonction de transfert. Les coefficients proviennent de l'équation (4.8). L'entrée de la fonction de transfert doit aussi être indiquée. Finalement, la sortie est créée. Il est important de lui donner un nom (VITESSE_OUTPOUT) et d'indiquer à ADAMS de quelle fonction de transfert elle provient. Maintenant, la variable VITESSE_OUTPOUT est utilisée dans la définition du mouvement de l'articulation prismatique du modèle unidimensionnel. L'équation (4.10) est employée, tout en s'assurant de choisir *Velocity* à l'onglet *Type*.

$$Function = 1000 * .MODELE_1D.VITESSE_OUTPOUT \quad (4.10)$$

À noter que le chiffre 1000 permet de faire la conversion d'unités de mètres par secondes à millimètres par secondes puisque les unités choisies dans le modèle ADAMS de SARAH sont les millimètres et non les mètres comme dans le modèle SIMULINK. Par la suite, si une force constante de 100 Newtons est appliquée sur l'objet, il est possible de tracer la réponse en vitesse ainsi que la somme des forces au centre de l'objet. La figure 4.6 présente ces résultats. Pour une force extérieure de 100 N appliquée sur le corps, la vitesse atteinte est d'environ 5 mm/s, ce qui est équivalent au modèle fourni par l'agence spatiale canadienne. De plus, la somme des forces au centre de l'objet tend vers zéro, ce qui est le comportement souhaité.

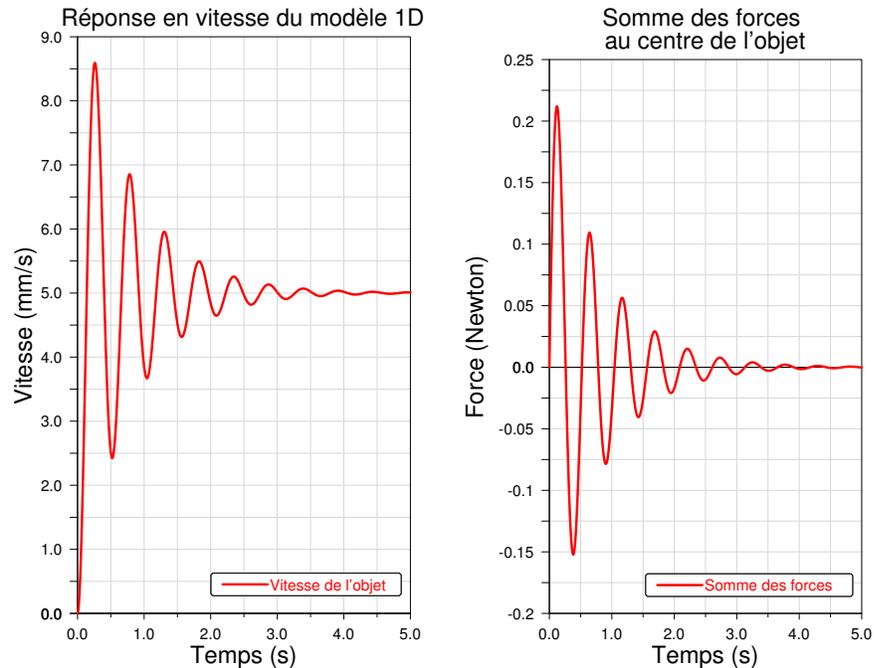


Figure 4.6: Réponse en vitesse de l'objet dans l'environnement ADAMS à une force de 100 N.

4.5 Implantation dans ADAMS du modèle à 6 ddl de Dextre

L'objectif poursuivi est d'ajouter le comportement du robot Dextre aux modèles de la main SARAH développés dans l'environnement ADAMS. Il devient donc essentiel de généraliser le modèle de compliance à une seule dimension de la section 4.4 à un espace à trois dimensions incluant trois déplacements en translation et trois déplacements en rotation. Pour ce faire, quelques hypothèses doivent être posées. Premièrement, la réponse en vitesse du modèle SIMULINK de Dextre est approximée par la réponse d'un système du deuxième ordre. Deuxièmement, la réponse à une force ou un moment est découplée. Cette hypothèse avait déjà été émise à la section 4.4. Cela équivaut à la création d'un centre de compliance comme sur le *Remote Compliant Center* de la section 4.1. Finalement, même si le modèle SIMULINK de Dextre correspond à une configuration particulière des sept articulations du bras exprimée à l'équation (4.1), on dira que le bras est toujours près de cette configuration lorsqu'il accomplit une tâche.

À partir de ces trois hypothèses, les trois paramètres a , b et c de l'équation (4.2) doivent être obtenus dans chacune des six directions, c'est-à-dire les trois translations et les trois rotations. Pour ce faire, six réponses en vitesses sont identifiées. En effet, six simulations différentes doivent être effectuées afin d'obtenir la réponse à six échelons unitaires de forces et de moments. Bien sûr, le processus d'identification est le même que celui utilisé pour le modèle unidimensionnel. Les valeurs obtenues pour chacun des paramètres dans chacune des directions sont résumées au tableau 4.1. De plus, les directions des axes dans ADAMS sont illustrés la figure 5.1.

Tableau 4.1: Coefficients des six fonctions de transfert du 2^e ordre.

Direction	$a = \frac{1}{k\omega_n^2}$	$b = \frac{2\zeta}{k\omega_n}$	$c = \frac{1}{k}$
translation en x (z dans ADAMS)	163.9458	313.5143	1.9999e+004
translation en y (x dans ADAMS)	136.2758	345.5157	1.9994e+004
translation en z (y dans ADAMS)	78.1969	232.6779	1.9999e+004
rotation en x (z dans ADAMS)	66.0455	244.5127	1.3699e+004
rotation en y (x dans ADAMS)	33.7298	123.0690	1.3697e+004
rotation en z (y dans ADAMS)	112.1021	227.4847	1.3694e+004

Le comportement compliant, appelé *Force/Moment Accommodation*, est ajouté à la base de la main SARAH au point P_0 illustré à la figure 4.7. Cependant, ceci n'est pas totalement vrai car les capteurs de forces et de moments sont situés dans l'OTCM (*ORU Tool Change Out Mechanism*) illustré à la figure 4.2 et non à l'endroit où la main vient se fixer sur l'OTCM. Dans ADAMS, le bâti de la main est lié au sol au point P_0 par un mouvement général (*General Motion - Two Bodies, One Location, Normal To Grid*). Par conséquent, il devient possible de prescrire la vitesse de déplacement dans chacune des six directions en réaction à la somme des forces et des moments au point de jonction du bâti avec le sol. Puisque les 18 coefficients des fonctions de transfert sont connus, l'élément à obtenir est la somme des forces et des moments au point P_0 à chaque incrément de temps. Malheureusement, cette information n'est pas directement disponible dans ADAMS. Cependant, toutes les forces et tous les moments au point P_0 sont le résultat des forces de contact entre l'objet à saisir et la main. Puisque l'objet est attaché au sol, la somme des forces et des moments au point P_1 est la résultante des forces de contact sur l'objet. À partir de cette information, il est facile de transférer la résultante des forces et des moments du lien entre l'objet et le sol (P_1) jusqu'à la base de la main (P_0). Pour cela, les expressions suivantes sont définies :

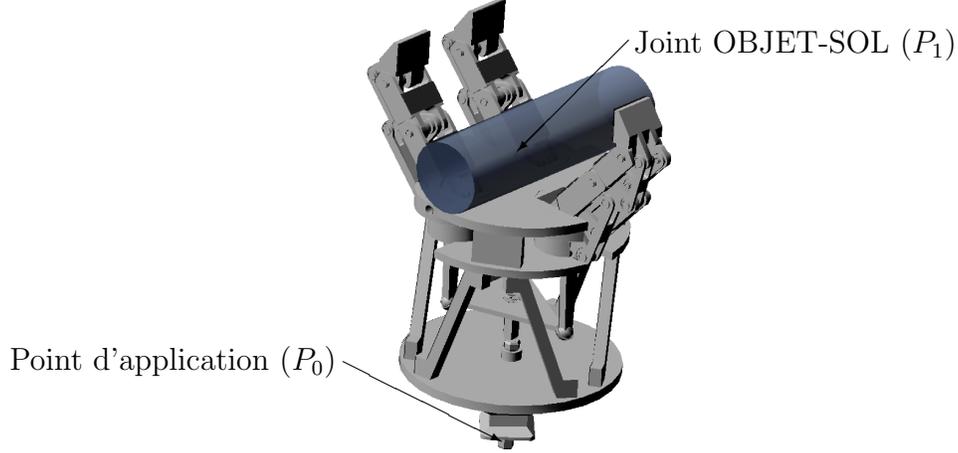


Figure 4.7: Point d'application du comportement FMA associé au robot Dextre.

$$\Sigma \mathbf{F}_{P_1} = \begin{bmatrix} f_x & f_y & f_z \end{bmatrix}^T \quad (4.11)$$

$$\Sigma \mathbf{M}_{P_1} = \begin{bmatrix} m_x & m_y & m_z \end{bmatrix}^T \quad (4.12)$$

$$\mathbf{r} = P_1 - P_0 \quad (4.13)$$

où $\Sigma \mathbf{F}_{P_1}$ est la somme des forces sur le sol au point P_1 , $\Sigma \mathbf{M}_{P_1}$ est la somme des moments sur le sol au point P_1 et \mathbf{r} est le vecteur liant le point P_0 au point P_1 . Avec ces expressions, la somme des forces et des moments est facilement obtenue :

$$\Sigma \mathbf{F}_{P_0} = \Sigma \mathbf{F}_{P_1} \quad (4.14)$$

$$\Sigma \mathbf{M}_{P_0} = \Sigma \mathbf{M}_{P_1} + \mathbf{r} \times \Sigma \mathbf{F}_{P_1} \quad (4.15)$$

Encore une fois, le *Controls Toolkit* est utilisé ici. Six entrées sont créées, c'est-à-dire trois pour la somme des forces au point P_0 et trois pour la somme des moments. Par la suite, six fonctions de transfert sont construites à partir des paramètres obtenus par identification et consignés dans le tableau 4.1. Finalement, les six sorties, c'est-à-dire les trois vitesses en translation et les trois vitesses angulaires en rotation, sont disponibles. Par la suite, il suffit de remplacer les six espaces vides de la contrainte liant le bâti de la main au sol (*General Motion*) par les six sorties en vitesse du modèle FMA. Pour convertir les unités, il faut multiplier par 1000 les sorties en vitesses translationnelles afin de convertir les m/s en mm/s . Également, il faut diviser les entrées en moments par 1000 afin de passer des Nmm aux Nm afin de respecter les unités du modèle SIMULINK fourni par l'Agence spatiale canadienne. Le modèle ADAMS de SARA H incluant le comportement associé au robot Dextre est maintenant terminé. L'étape suivante consiste à effectuer de nombreuses simulations afin de valider l'approximation du deuxième ordre suggérée. C'est ce qui est fait au chapitre 5.

Chapitre 5

Main SARAH avec contrôleur compliant (*Force/Moment Accommodation*)

Au début du chapitre, une vérification de l'approximation du deuxième ordre du *Force/Moment Accommodation* est effectuée. Cependant, le temps de réaction de l'approximation est trop lent, ce qui engendre des prises instables. C'est pourquoi une approximation du premier ordre dont le temps de réaction est plus rapide est créée à la section 5.2. À partir de ce nouveau modèle dynamique de SARAH incluant la compliance active du robot Dextre, la prise de différents objets est réalisée à la section 5.3. Parmi les objets saisis, il y a des cylindres, des poignées destinées aux astronautes ainsi qu'un ballon de football. Le modèle dynamique de la main SARAH développé dans ADAMS incluant le FMA est alors complété et disponible en vue de la planification de tâches sur la station spatiale.

5.1 Vérification de l'approximation du deuxième ordre

Le comportement compliant associé au *Force/Moment Accommodation* présent dans les deux bras de Dextre a été ajouté au modèle ADAMS de la main SARAH au chapitre 4. En effet, une approximation du deuxième ordre du modèle SIMULINK fourni par l'Agence spatiale canadienne a été faite et plusieurs hypothèses ont été posées. Par conséquent, l'étape subséquente consiste à vérifier la validité du modèle obtenu. Pour ce faire, deux niveaux de vérification sont utilisés. Le premier niveau consiste à appliquer des forces connues à la liaison présente entre l'objet et le sol et à vérifier la réponse en vitesse du bâti de la main. Pour le second niveau, la prise de divers objets est tentée.

5.1.1 Premier niveau de vérification

Pour le premier niveau de vérification, un vecteur composé de trois forces et trois moments (*General Force Vector (Six-Component Force)*) est appliqué au point P_1 de la figure 4.7 liant l'objet à saisir au sol. Le critère de vérification est la qualité de la réponse en vitesse du bâti de la main. Ainsi, les dix forces de contact entre les phalanges et l'objet à saisir sont désactivées car elles sont inutiles ici. Au total, six simulations différentes sont effectuées. Pour le premier essai, une force de -100 N en x est appliquée sur l'objet, ce qui équivaut à une force de 100 N sur le sol. La réponse en vitesse obtenue est illustrée à la figure 5.2. Pour le second essai, une force de -100 N est appliquée en y et pour le troisième, une force de -100 N est appliquée en z . De même, des essais visant à vérifier la réponse en vitesse angulaire du bâti à des moments appliqués sur l'objet sont exécutés. En effet, un moment de -100 Nm autour de l'axe x est imposé à l'objet au quatrième essai. La réponse est illustrée à la figure 5.2. Finalement, l'application d'un moment de -100 Nm autour de l'axe des y et d'un moment de -100 Nm autour de l'axe z constituent le cinquième et le sixième essai. À noter que les directions des axes sont définies à la figure 5.1.

En jetant un coup d'oeil aux réponses en vitesses illustrées à la figure 5.2, le succès du premier niveau de vérification est confirmé. Tout d'abord, pour une entrée en force de -100 N, la vitesse se stabilise aux environs de 5 mm/s, ce qui est attendu. De même, pour

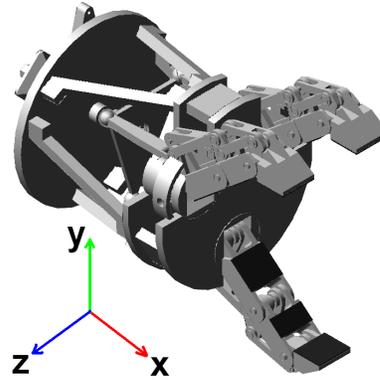


Figure 5.1: Repère associé à un modèle ADAMS de SARAH.

un moment de -100 Nm, la vitesse angulaire se stabilise aux environs de 0.0073 rad/s. Bien entendu, il y a quelques différences entre le modèle fourni par l'Agence spatiale canadienne et l'approximation du deuxième ordre. En effet, même si le temps maximum (T_p) et le temps d'établissement (T_s) sont identiques dans les deux cas, le maximum atteint par le modèle de l'Agence spatiale canadienne lors de la réponse transitoire est beaucoup plus élevé. En bref, la conclusion du premier niveau de vérification est que l'approximation du 2^e ordre semble une bonne estimation.

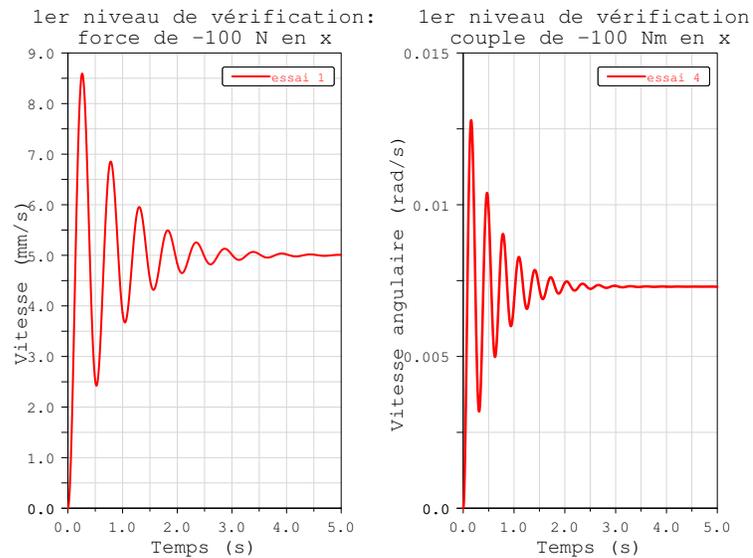


Figure 5.2: Premier niveau de vérification : force en x et couple en x .

5.1.2 Second niveau de vérification

Tel que mentionné au début de la section 5.1, le second niveau de vérification repose sur la prise de différents objets à l'aide du modèle ADAMS de la main robotique SARAH incluant le comportement associé aux bras de Dextre (*Force/Moment Accommodation*). Dans un premier temps, le cas le plus simple consiste à essayer de saisir un cylindre de 60 mm de diamètre situé au centre de la main et décalé de 10 mm de la paume. Le comportement attendu est le suivant : lorsque toutes les phalanges de la main seront en contact avec l'objet, le bâti de la main commencera à avancer vers l'objet. Par la suite, quand l'objet entrera en contact avec la paume de la main, la somme des forces en y (dans la direction perpendiculaire à la paume de la main, en x dans ADAMS) va tendre vers zéro et le bâti de la main va cesser son déplacement. La prise sera alors complétée et stable. Cependant, ce n'est pas ce qui s'est produit lors des quelques simulations effectuées. En effet, la vitesse du bâti devient instable lorsque l'objet entre en contact avec la paume. Cela engendre rapidement la création de très grandes forces de contact et la simulation cesse. L'approximation du second ordre du modèle fourni par l'Agence spatiale canadienne implantée dans ADAMS nécessite donc quelques modifications.

5.2 Approximation du premier ordre

L'approximation du second ordre développée au chapitre 4 ne fonctionne pas de la façon souhaitée. Il faut donc apporter quelques changements au modèle. En effet, si on jette un coup d'oeil à la figure 5.3, on constate que le modèle fourni par l'Agence spatiale canadienne réagit beaucoup plus rapidement que l'approximation du deuxième ordre à l'application d'une force de 100 N dans la direction y dans SIMULINK (la direction x dans ADAMS). Il faut donc trouver un moyen de réduire le temps de réaction de l'approximation du deuxième ordre. En effet, l'approximation du deuxième ordre réagit trop lentement à la variation dans la somme des forces au point P_0 de la figure 4.7, ce qui engendre de l'instabilité et la création de grandes forces lorsque l'objet entre en contact avec la paume.

Afin de régler ce problème, une approximation du premier ordre du *Force/Moment Accommodation* de Dextre est créée. Le nouveau modèle est défini par la fonction de

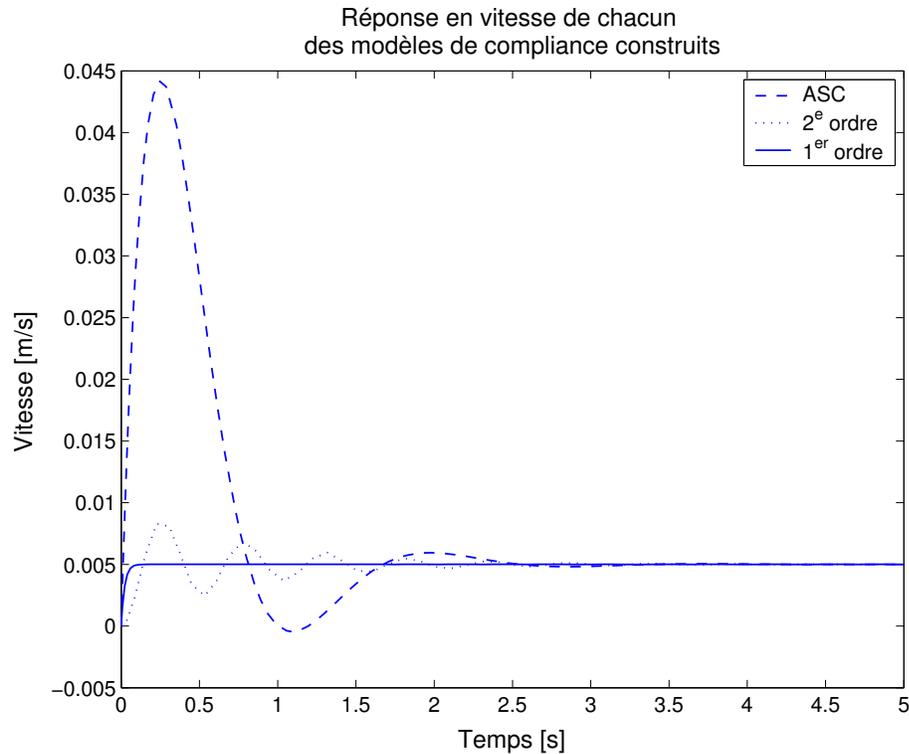


Figure 5.3: Graphique comparatif des réponses obtenues à partir des trois modèles.

transfert suivante :

$$G(s) = k \frac{a}{s + a} \quad (5.1)$$

où $\frac{1}{a}$ est la constante de temps. Par définition, la constante de temps indique le temps nécessaire afin d'atteindre 63 % de la valeur finale [15]. Par hypothèse, on pose que le temps écoulé à la première atteinte de 63% de la valeur finale par la réponse du modèle fourni par l'ASC donne la valeur de la constante de temps. De plus, le gain k est le ratio de la sortie sur l'entrée. Comme pour l'approximation du deuxième ordre du FMA, une identification doit être faite afin d'obtenir les valeurs des six fonctions de transferts du premier ordre essentielles à l'implantation du *Force/Moment Accommodation* dans ADAMS. Pour ce faire, les six réponses en vitesses de la section 4.5 sont utilisées. Le tableau 5.1 résume les valeurs trouvées pour a et k .

Un coup d'oeil à la figure 5.3 permet de comparer les réponses à une force de 100 N dans la direction y (x dans ADAMS) pour chacun des trois modèles : le modèle fourni par l'Agence spatiale canadienne (ASC), l'approximation du deuxième ordre et l'approximation du premier ordre. Dans un premier temps, la valeur atteinte en régime permanent en réaction à une force de 100 N dans la direction y est la même pour les trois

Tableau 5.1: Coefficients des six fonctions de transfert du 1^{er} ordre.

Direction	a	k
translation en x (z dans ADAMS)	35.4067	$\frac{1}{19999}$
translation en y (x dans ADAMS)	47.1188	$\frac{1}{19994}$
translation en z (y dans ADAMS)	57.5287	$\frac{1}{19999}$
rotation en x (z dans ADAMS)	51.6455	$\frac{1}{13699}$
rotation en y (x dans ADAMS)	84.0172	$\frac{1}{13697}$
rotation en z (y dans ADAMS)	41.5148	$\frac{1}{13694}$

modèles. De plus, l'approximation du premier ordre réagit beaucoup plus rapidement à l'application de la force que l'approximation du second ordre. Malheureusement, les réponses transitoires des deux approximations sont très différentes de celle du modèle fourni par l'Agence spatiale canadienne (ASC). En effet, le modèle fourni par l'agence spatiale a un premier maximum très élevé (environ cinq fois plus élevé que l'approximation du second ordre) tandis que l'approximation du premier ordre n'en a pas. En revanche, tel que démontré à la section 5.3, l'approximation du premier ordre engendre des simulations donnant un bon aperçu du comportement associé au *Force/Moment Accommodation* du bras de Dextre lorsque la main SARAH est employée comme outil.

5.3 Simulations de tâches incluant le FMA

Plusieurs simulations ont été effectuées afin de valider le comportement associé au *Force/Moment Accommodation* ajouté au modèle dynamique de SARAH dans ADAMS. Parmi celles-ci, quelques unes sont présentées dans cette section. À noter que l'approximation du premier ordre est utilisée et que les forces de contact sont définies sans friction pour chacune des simulations. Bref, l'objectif de cette section est de démontrer le bon fonctionnement de l'approximation du premier ordre dans ADAMS et de voir comment le *Force/Moment Accommodation* pourrait être utilisé dans l'espace par les astronautes lors de la réalisation de différentes tâches impliquant la main SARAH. Des cylindres, une poignée et un ballon de football sont les objets saisis par la main SARAH incluant le *Force/Moment Accommodation* dans les sections suivantes.

5.3.1 Cylindre

Le cylindre est l'objet le plus simple à saisir pour la configuration cylindrique de la main SARAH développée dans ADAMS. Ainsi les trois premières simulations présentées dans cette section impliquent la préhension d'un cylindre. En effet, des cylindres de dimensions variables positionnés à différents endroits sont attrapés par la main SARAH incluant le FMA de Dextre.

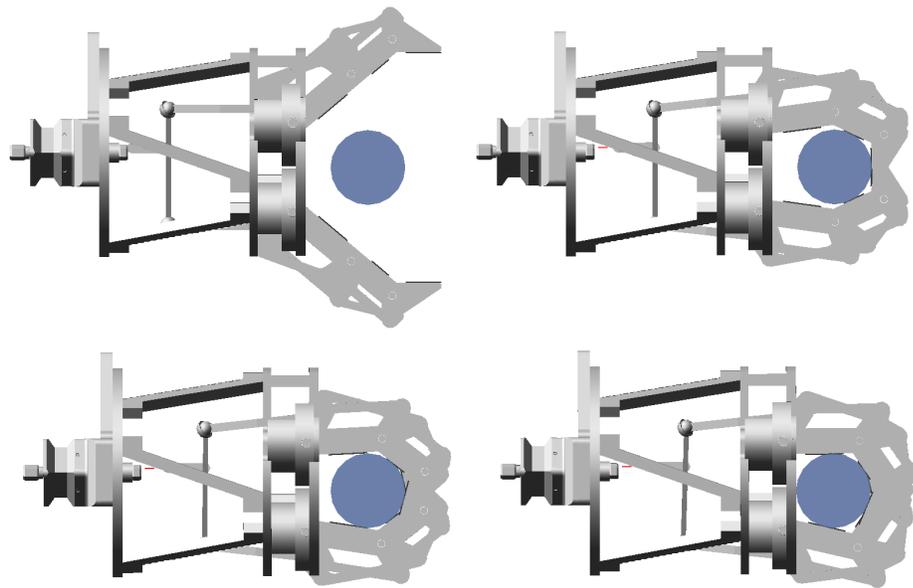
5.3.1.1 Cylindre centré

Le premier essai consiste à saisir un cylindre de 60 mm de diamètre dont le centre est situé à 50 mm de la paume. Donc, la distance minimale entre l'objet et la paume est de 20 mm. Tel que mentionné plus tôt et tel que spécifié à l'annexe A, il n'y a pas de friction dans le modèle ADAMS car cela complexifie énormément les calculs. En effet, en présence de friction, le temps de résolution augmente et la simulation se solde parfois par un échec. La figure 5.4 (a) illustre la séquence de saisie de l'objet.

Au début de la simulation, le bâti de la main reste fixe et les doigts se ferment sur l'objet. Lorsque toutes les phalanges sont en contact avec l'objet, la somme des forces en x (perpendiculaire à la paume de la main) n'est plus nulle et le bâti de la main avance vers le cylindre. D'ailleurs, le bâti de la main se déplace tant que la somme des forces n'est pas nulle. L'évolution de la somme des forces au point P_0 et de la vitesse du bâti sont présentées à la figure 5.4 (b). Finalement, la somme des forces tend vers zéro lorsque l'objet entre en contact avec la paume. À ce moment, le déplacement du bâti cesse et la prise est stable. Par ailleurs, un léger déplacement apparaît dans la direction y car d'un côté de la main il y a deux doigts et de l'autre, un seul.

5.3.1.2 Cylindre décentré

La seconde simulation est à peine différente de la première. Les changements se situent sur deux plans. Premièrement, le diamètre du cylindre est beaucoup plus grand (100 mm au lieu de 60 mm). De même, la position du centre du cylindre n'est pas la même. En effet, le centre de l'objet est décalé de 10 mm par rapport au milieu de la main (du côté où il y a deux doigts) et situé à 60 mm de la surface de la paume. Encore une fois, la simulation se déroule sur dix secondes et ce, sans friction. La séquence de



(a) Séquence de saisie du cylindre

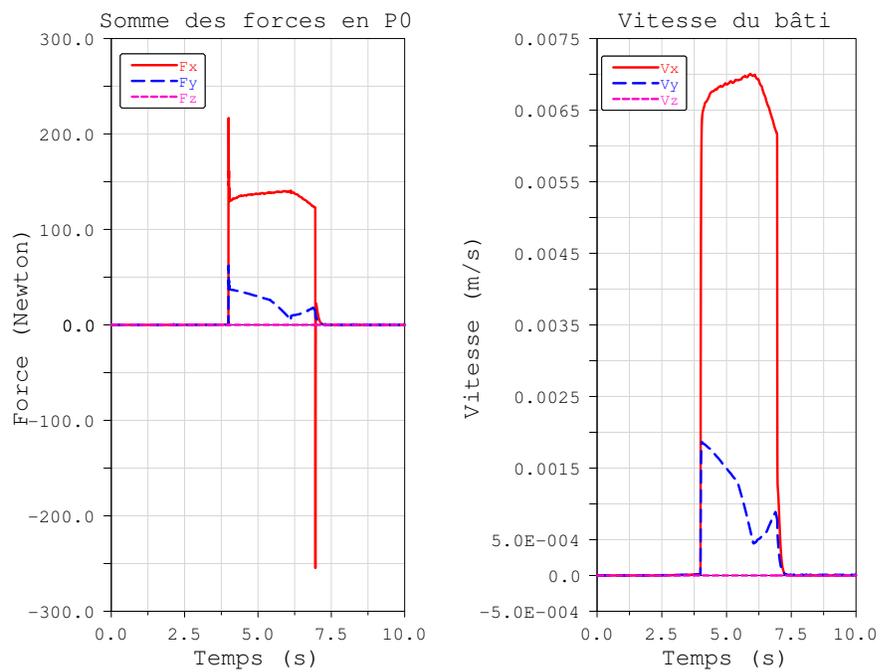
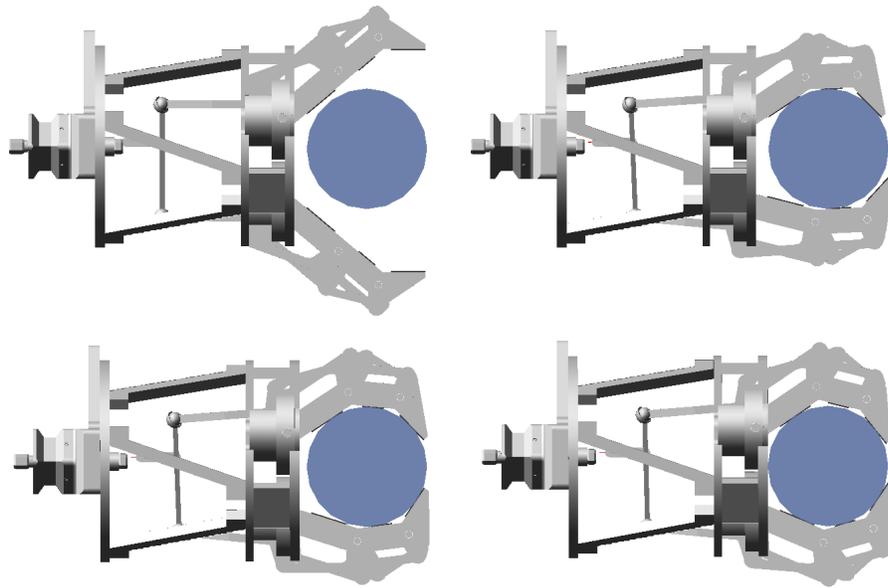
(b) Évolution de la somme des forces au point P_0 et évolution de la vitesse du bâti

Figure 5.4: Prise du cylindre centré de 60 mm de diamètre situé à 50 mm de la paume.



(a) Séquence de saisie du cylindre

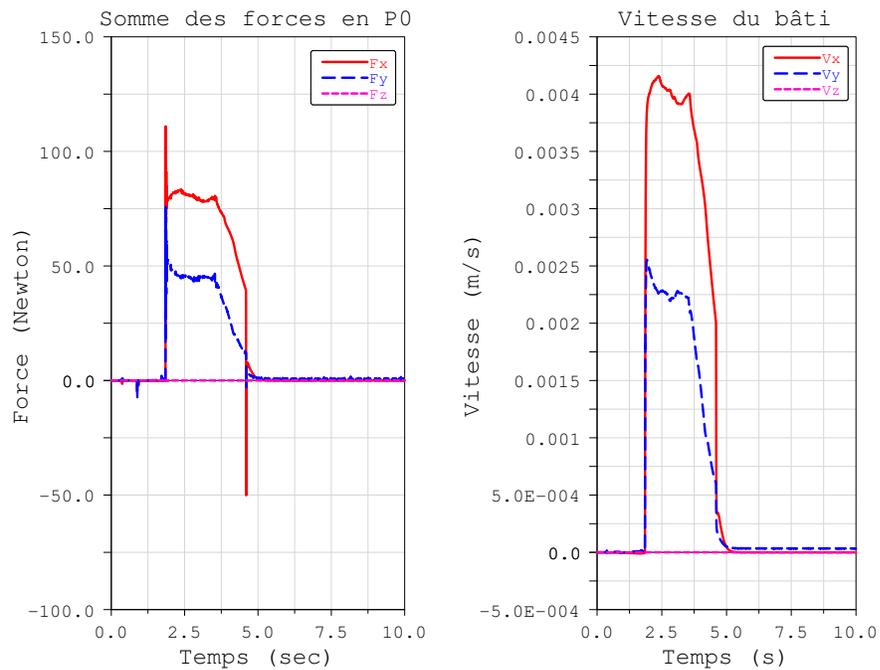
(b) Évolution de la somme des forces au point P_0 et évolution de la vitesse du bâti

Figure 5.5: Prise du cylindre de 100 mm de diamètre, situé à 60 mm de la paume et à 10 mm du milieu de la main.

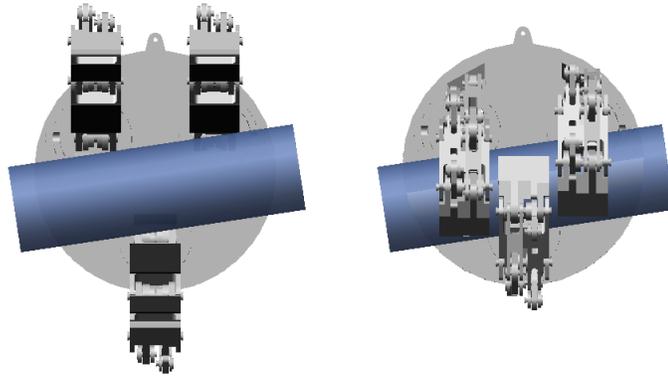
fermeture ainsi que l'évolution des forces et de la vitesse du bâti sont présentées à la figure 5.5. Encore une fois, le déplacement du bâti de la main débute lorsque toutes les phalanges de la main sont en contact avec le cylindre. À cet instant, la somme des forces en x et en y n'est plus nulle et le bâti de la main se déplace vers le centre de l'objet. La seconde simulation se termine par une stabilisation de la prise lorsque l'objet entre en contact avec la paume. À ce moment, la somme des forces tend vers zéro, tout comme la vitesse de déplacement du bâti qui devient nulle.

5.3.1.3 Cylindre centré avec angle

La troisième simulation a pour objectif de solliciter le comportement en rotation de la main SARAH. En effet, le cylindre à attraper a subi une rotation d'environ 6° par rapport à l'axe perpendiculaire à la surface de la paume (axe x). Le cylindre a un diamètre de 60 mm et est situé à 50 mm de la surface de la paume dans la direction x . Comme pour les simulations précédentes, il est attendu que le déplacement du bâti de la main débute au moment où toutes les phalanges sont en contact avec l'objet. Par la suite, la main devrait effectuer une rotation autour de l'axe x afin que la prise cylindrique s'aligne avec l'axe du cylindre. Finalement, la simulation devrait se terminer lorsque la paume entre en contact avec l'objet. Or, ce n'est pas le cas. En effet, si on jette un coup d'oeil à la figure 5.6 (a), le bâti de la main n'a subi aucune rotation autour de l'axe x à la fin de la séquence de fermeture. Cela s'explique par la très grande rigidité en rotation du modèle du bras de Dextre ajouté à SARAH dans ADAMS. En effet, à la fin de la simulation, des moments autour de l'axe des x sont toujours présents dans le modèle (voir figure 5.6 (b)) et les vitesses angulaires sont très faibles. Par exemple, pour un couple d'entrée de 100 Nm, la vitesse angulaire en régime permanent est de 0.0073 rad/s ou encore 0.4 degrés/s, ce qui est très petit.

5.3.2 Poignée pour astronautes

Une des tâches principales que la main robotique SARAH est appelée à accomplir sur la station spatiale internationale est la stabilisation d'un des bras de Dextre en saisissant une des nombreuses poignées normalement destinées à aider les astronautes lors de la réalisation de travaux hors de la station. Ces poignées sont dispersées partout sur la surface de la station spatiale. La réalisation de cette tâche par la main SARAH pourrait



(a) Séquence de saisie du cylindre

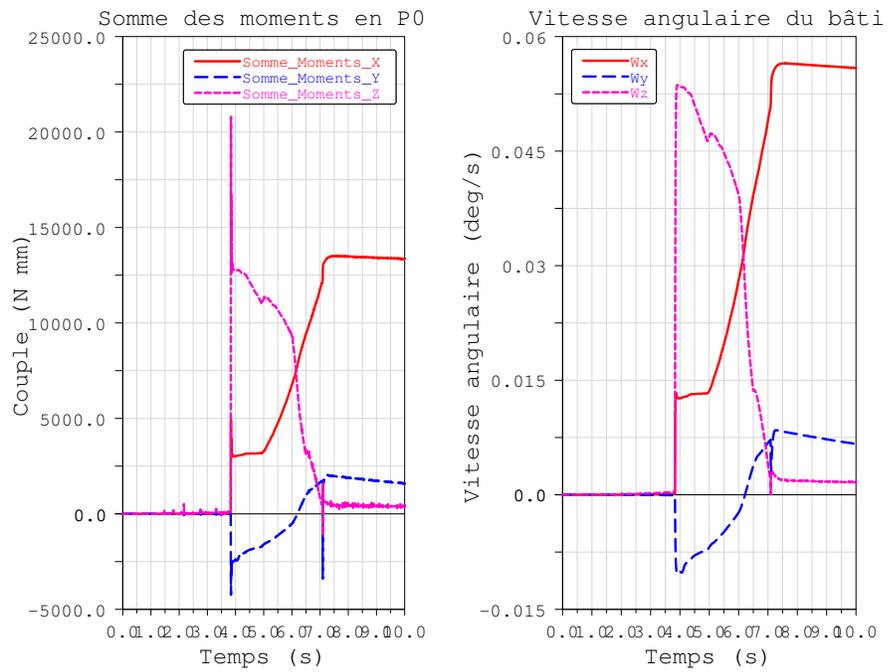
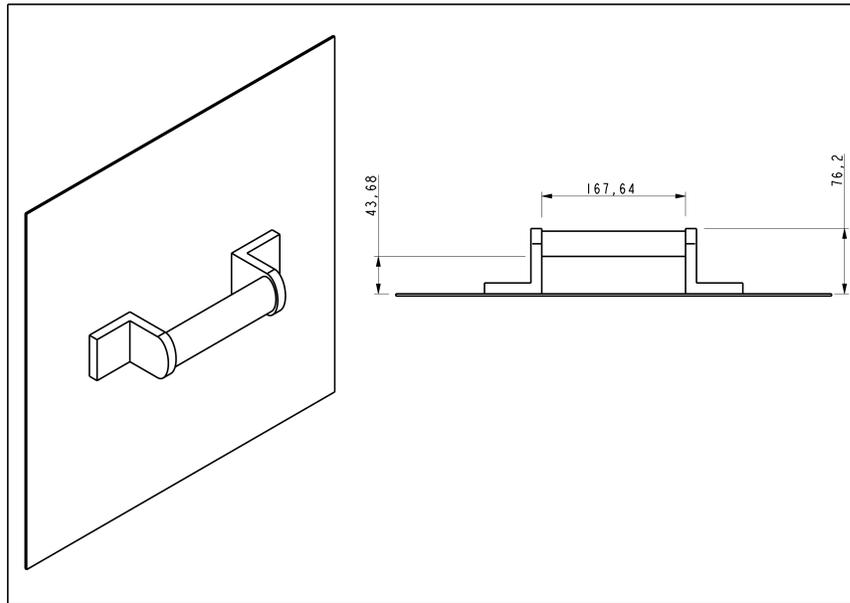
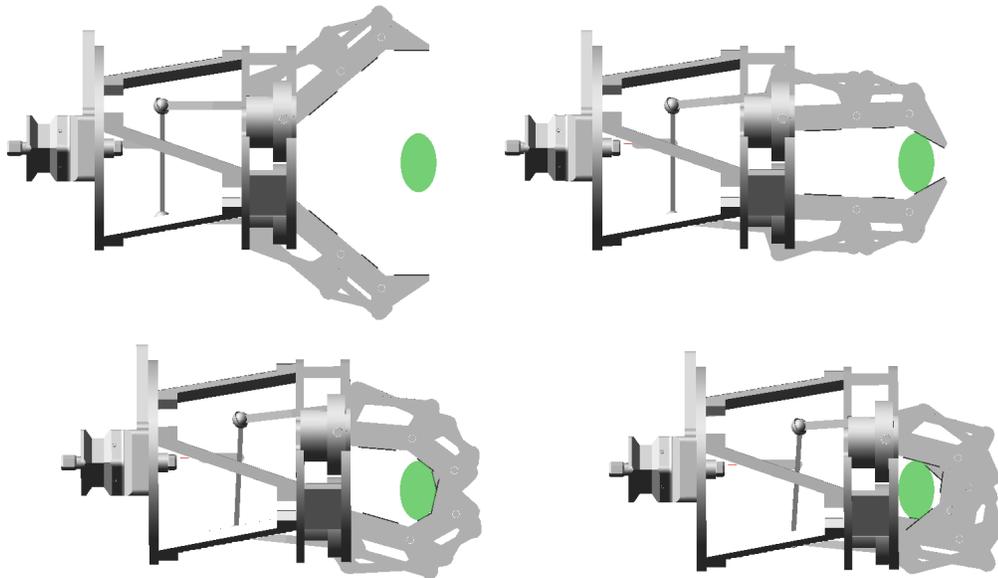
(b) Évolution de la somme des moments au point P_0 et évolution de la vitesse angulaire du bâti

Figure 5.6: Prise du cylindre centré avec angle dans la direction normale à la paume de la main (x).



(a) Dimensions importantes de la poignée



(b) Séquence de saisie

Figure 5.7: Dimensions de la plus petite des poignées (a) pour astronautes dispersées sur la station spatiale internationale (ISS) et séquence de saisie (b) à l'aide du FMA.

agrandir l'ensemble des points où un des bras de Dextre peut se fixer afin de se stabiliser et donc, augmenter le nombre d'endroits où le robot Dextre peut travailler à l'extérieur de la station spatiale. D'ailleurs, la plus petite poignée est illustrée à la figure 5.7 (a). Le défi important de cette tâche provient de l'espace restreint entre la poignée et le mur auquel elle est fixée. En effet, si cet espace était aussi grand que nécessaire, une prise en puissance directe de la poignée en approchant la paume de l'objet serait la meilleure façon de réaliser la prise. Or, cela est impossible en raison de l'espace réduit et de l'interférence probable des doigts avec le mur. En effet, les doigts mesurent 16.5 cm du point de fixation sur le bâti jusqu'à l'extrémité de la phalange distale alors que l'espace entre la poignée et le mur est d'environ 4.4 cm. Il faut donc trouver une façon alternative de réaliser cette prise avec le design actuel de la main. Sinon, une mise à l'échelle de la main actuelle ou un nouveau design devra être envisagé.

La meilleure façon d'approcher ce problème a été suggérée par Thierry Laliberté dans un rapport soumis à la compagnie *MD Robotics*. Elle consiste à attraper la poignée avec le bout des doigts (phalanges distales) et à fermer la main tout en avançant le bâti. Cependant, il est possible d'accomplir ceci en utilisant le comportement associé au *Force/Moment Accommodation* d'un des bras de Dextre et ce, sans avoir à bouger directement le bâti par des commandes envoyées par l'astronaute aux articulations du robot. En guise d'exemple, une séquence illustrant une des simulations réalisées dans ADAMS est présentée à la figure 5.7 (b). Le principe est assez simple. Il suffit de prendre la poignée avec le bout des doigts comme si une prise en précision était tentée. Par la suite, puisque la somme des forces au point P_0 dans la direction x devient positive lorsque les phalanges distales touchent la poignée, le bâti de la main va avancer vers l'objet jusqu'à ce que la paume entre en contact avec l'objet. À ce moment, la prise est stable. Par conséquent, la seule manipulation que l'astronaute doit réaliser à partir de son poste de commande afin de stabiliser un des bras de Dextre est de positionner SARAH pour qu'elle soit prête à accomplir une prise en précision de la poignée. Ensuite, le *Force/Moment Accommodation* s'occupe du reste. Par contre, il est important de s'assurer que les doigts n'entrent pas en contact avec la paroi de la station spatiale internationale lors de la prise ou lors de l'ouverture de la main. Dans le cas de cette tâche délicate, une validation sur un banc d'essai à l'aide du vrai modèle de SARAH et du robot Dextre est sans doute nécessaire. De même, peut-être qu'un nouveau design ou une mise à l'échelle de la version actuelle de SARAH devrait être envisagée.

5.3.3 Objet de forme quelconque

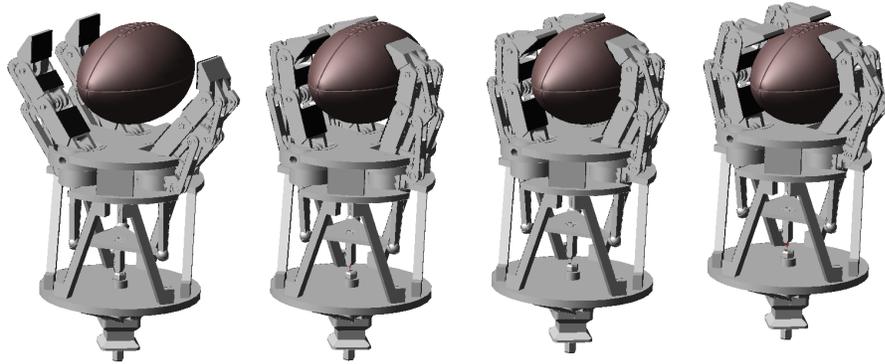


Figure 5.8: Séquence de saisie de l'objet en forme de ballon de football.

Le dernier objet saisi par le modèle ADAMS de SARAH incluant le *Force/Moment Accommodation* est un ballon de football. L'objectif de la simulation est de montrer que le FMA aide SARAH à s'adapter à n'importe quelle forme d'objet et à minimiser la somme des forces générées sur les bras de Dextre. Le modèle CAD du ballon de football, qui est à 40% de la vraie grandeur, a été trouvé sur internet [20]. Tout d'abord, un corps ADAMS ayant la même forme que le ballon a été créé par révolution d'une courbe suivant le profil du ballon. Par la suite, les forces de contact sont créées entre les corps "fantômes" des phalanges et de la paume (voir section 1.3.6) et le ballon de football créé dans ADAMS. En fait, le modèle en .dxf du ballon trouvé [20] a été conservé dans l'environnement ADAMS pour l'esthétique des simulations et a servi de modèle de base pour la création du corps ADAMS ayant la forme du ballon par révolution. De plus, le centre du ballon de football est situé à 75 mm de la surface de la paume. Bien entendu, la friction ne fait pas partie du modèle. La figure 5.8 illustre la séquence de fermeture de la main sur le ballon de football.

Comme le démontre la figure 5.8, le *Force/Moment Accommodation* ajouté au modèle de SARAH peut s'adapter à des objets ayant des formes irrégulières comme un ballon de football. À partir du moment où toutes les phalanges ont fait contact avec le ballon, le bâti de la main s'avance jusqu'à ce que la paume entre en contact avec la surface du ballon. Comme dans les simulations précédentes, c'est à ce moment que la somme des forces dans toutes les directions tend vers zéro et que la prise devient stable.

5.3.4 Observations générales

Cette section résume plusieurs observations notées au fil des multiples simulations effectuées à l'aide du modèle ADAMS de SARAH incluant le *Force/Moment Accommodation*. Tout d'abord, il n'a pas été possible d'accomplir la prise en précision d'un petit cylindre avec les phalanges distales. En effet, ce qui était favorable dans le cas de la prise de la poignée pour astronautes devient indésirable dans ce cas-ci. Dès qu'une force est générée dans la direction normale à la paume de la main (x), le bâti se déplace vers l'objet comme si une prise en puissance était la prise désirée. De plus, dans la configuration du modèle fourni par l'agence spatiale canadienne, le bras de Dextre est extrêmement rigide en rotation tel que démontré à la section 5.3.1.3. Finalement, même si le modèle fourni par l'agence spatiale a été approximé par des fonctions de transfert du premier ordre et que toutes les simulations incluant le FMA ont été effectuées sans friction afin de diminuer le temps de calcul et d'éviter que les simulations se soldent par un message d'erreur, le modèle dynamique de la main SARAH développé dans ADAMS incluant le FMA donne quand même une très bonne idée du comportement attendu de SARAH dans l'espace et peut facilement être utilisé aux premières étapes de la planification des tâches.

Conclusion

Conclusions importantes du mémoire

La main robotique SARAH est une main sous-actionnée développée au laboratoire de robotique de l'Université Laval. Elle est considérée comme un outil potentiel pour le robot à deux bras Dextre sur la station spatiale internationale. Une des tâches principales à réaliser consiste à stabiliser un des bras de Dextre en agrippant une poignée pendant que l'autre bras accomplit un autre travail. L'objectif de ce mémoire est de créer un modèle dynamique de la main robotique SARAH et du robot Dextre à l'aide du logiciel ADAMS. En effet, ce modèle va permettre d'avoir une idée générale de la façon dont SARAH pourrait accomplir différentes tâches sur la station avant d'entreprendre une série de tests avec la vraie main et un robot imitant le comportement du manipulateur agile spécialisé (Dextre).

Le chapitre 1 traite de la création des modèles dynamiques de la main SARAH dans ADAMS. Tel que décrit dans le mémoire, il est important de créer les modèles en utilisant la méthode appelée “the crawl-walk-run approach” décrite à la section 1.1. De cette façon, en créant des modèles simples, en les validant et en ajoutant un degré supérieur de complexité à chaque étape, le bon fonctionnement et la robustesse du modèle sont assurés. De même, afin de diminuer le temps de calcul, il est impératif de

remplacer les corps impliqués dans les forces de contact par des géométries primitives créées dans ADAMS tel que mentionné à la section 1.3.6.

Au chapitre 2, l'analyse géométrique du levier 3D utilisé en configuration cylindrique est présentée. Le levier 3D a été créé afin de remplacer le différentiel à une entrée et à trois sorties de la vraie main par un système équivalent dans ADAMS facile à modéliser et diminuant le temps de calcul des simulations. Il a été démontré à partir du problème géométrique inverse que l'endroit idéal d'actionnement permettant une distribution égale de la force de fermeture entre les doigts est le centroïde de la plateforme triangulaire. De même, l'expression des matrices jacobiniennes et les singularités associées au levier 3D sont obtenues. D'après les nombreuses simulations effectuées, on remarque que le levier 3D fonctionne habituellement loin des configurations singulières.

Le chapitre 3 présente plusieurs résultats découlant des simulations effectuées avec le modèle dynamique de SARAH en configuration cylindrique. Tout d'abord, les résultats qualitatifs confirment le fait que la main s'adapte à la forme de n'importe quel objet, que la prise peut s'effectuer même si un doigt est bloqué et que la force de fermeture ne s'applique que lorsque toutes les phalanges sont en contact avec l'objet.

De même, des résultats plus quantitatifs ont été obtenus. Tout d'abord, plus la masse volumique d'un objet libre dans un environnement sans gravité est faible, plus l'objet va se déplacer dans la main lors de la préhension. Heureusement, l'ajout de butées mécaniques entre les phalanges est très utile car le déplacement de l'objet est ainsi limité. Par ailleurs, la relation obtenue entre la force de fermeture appliquée au levier 3D du modèle ADAMS de SARAH et la force de serrage est semblable aux résultats expérimentaux recueillis à l'aide de SARAH M1 et des capteurs de force. De plus, une série de simulations a également été faite dans le but de vérifier si les efforts subis par la vis de transmission ne sont pas trop élevés. La conclusion est que la charge maximale que peut subir la vis n'est pas dépassée pour une force d'environ 70 lbs sur l'objet saisi. Cependant, d'autres parties de la main peuvent céder avant la vis.

D'autre part, des essais ont aussi été réalisés afin de vérifier la présence du point d'équilibre sur le modèle dynamique de SARAH et de voir l'effet du frottement. D'après les résultats obtenus, le point d'équilibre est bel et bien observable et le frottement contribue à transformer le point d'équilibre en une zone d'équilibre. Bref, le frottement aide la prise en précision des objets. Finalement, l'élément le plus important à retenir

de la série de simulations visant à voir l'effet de la grosseur de l'objet à saisir sur la force de serrage est qu'il existe une grosseur optimale d'objet engendrant une force de serrage maximale pour une prise en puissance. Cet élément doit nécessairement être pris en compte lors de la conception d'une main sous-actionnée pour la réalisation de tâches répétitives, comme sur une chaîne de production. De plus, pour une même grosseur d'objet, la prise en puissance génère des forces de serrage beaucoup plus élevées que la prise en précision. En terminant, contrairement à la prise en puissance, la prise en précision ne semble pas être aussi dépendante de la grosseur de l'objet car la courbe tracée est presque droite.

Au chapitre 4, le comportement associé au *Force/Moment Accommodation* du robot Dextre est ajouté aux modèles dynamiques de la main SARAH déjà créés dans ADAMS. En effet, la compliance active des bras de Dextre minimise les efforts mesurés par les capteurs de forces et de moments en déplaçant les articulations du robot. Ainsi, les bris dans le bras sont évités et les tâches sont accomplies en douceur. Dans un premier temps, un modèle linéarisé utilisant les variables d'état du robot Dextre a été fourni par l'Agence spatiale canadienne. L'entrée du modèle est un vecteur à six composantes représentant la somme des forces et des moments à l'organe terminal. En sortie, la vitesse en translation et en rotation est obtenue. C'est à partir de ce modèle que le comportement compliant est ajouté à la main SARAH. D'ailleurs, quelques hypothèses sont formulées. Tout d'abord, on dira que le comportement est découplé, c'est-à-dire qu'une force en x va engendrer une vitesse en x . De plus, même si le modèle fourni par l'Agence spatiale canadienne correspond à une configuration particulière des articulations du bras, nous allons dire que le robot est toujours près de cette configuration lorsqu'il accomplit une tâche. Finalement, une identification de la réponse du modèle de la réponse permet d'obtenir une approximation du deuxième ordre du comportement de Dextre. C'est ce comportement qu'on ajoute aux modèles dynamiques de SARAH.

Finalement, le chapitre 5 présente les simulations effectuées à l'aide du modèle dynamique de la main SARAH incluant le comportement associé au *Force/Moment Accommodation*. Tout d'abord, l'approximation du deuxième ordre réalisée au chapitre 4 est vérifiée. Malheureusement, le temps de réaction est trop lent, ce qui fait que la vitesse du bâti devient instable lorsque la paume touche à l'objet à saisir. Ainsi, de grandes forces de contact indésirables sont créées. Pour régler ce problème, l'approximation du deuxième ordre est alors remplacée par une approximation du premier ordre dont le temps de réaction est beaucoup plus court. Même si la réponse transitoire est

différente de celle du modèle fourni par l'Agence spatiale canadienne, il est important de mentionner que le comportement obtenu est assez réaliste. Donc, à l'aide du modèle dynamique de SARAH et du robot Dextre, la tâche de préhension d'une poignée pour astronautes a pu être simulée. La conclusion importante est que même si la distance entre la poignée et la paroi à laquelle elle est fixée est restreinte, il est possible de saisir la poignée. En effet, en attrapant la poignée comme si une prise en précision est tentée, la somme des forces dans la direction perpendiculaire à la paume de la main devient non nulle lorsque les phalanges distales touchent à la poignée. Par conséquent, le bâti de la main va avancer vers la poignée jusqu'à ce qu'elle entre en contact avec la paume. À ce moment là, la prise de la poignée est terminée et la contrainte de l'espace restreint a été contournée. Il reste cependant à vérifier cette tâche expérimentalement.

Travaux futurs

Cette section présente les travaux qui pourront être faits afin d'améliorer les modèles construits dans ADAMS et d'utiliser au maximum le modèle.

Dans un premier temps, il est possible de remplacer l'approximation du premier ordre du *Force/Moment Accommodation* du modèle par le vrai modèle SIMULINK fourni par l'Agence spatiale canadienne. En effet, à l'aide du module MSC.Adams/Controls, le lien entre le modèle dynamique de SARAH construit dans ADAMS et le modèle SIMULINK du *Force/Moment Accommodation* peut être fait directement en mesurant la somme des forces et des moments à la base de la main à chaque incrément de temps, en la donnant en entrée au modèle SIMULINK et en utilisant la sortie en vitesse du modèle SIMULINK pour contrôler le déplacement du bâti de la main SARAH dans ADAMS. Également, une interface simplifiée pour l'utilisateur lui permettant d'insérer divers objets provenant d'une librairie, d'activer ou de désactiver différents éléments de la main (friction, butées, autoblocage) et de changer différents paramètres comme la force de fermeture ou le coefficient d'amortissement serait sans doute très utile. En effet, pour quelqu'un qui ne connaît pas ADAMS, certaines de ces modifications peuvent s'avérer complexes sans la présence d'une interface simplifiée.

De plus, il serait intéressant de pouvoir simuler quelques-unes des autres tâches que le robot Dextre pourrait accomplir avec la main SARAH comme outil. Bien sûr, la tâche de préhension d'une poignée habituellement réservée aux astronautes a déjà été simulée. Parmi les autres tâches à considérer, il y a notamment l'enlèvement de couvertures thermiques servant à emballer les items de remplacement, le déplacement des multiples caméras de la station spatiale d'un endroit à l'autre et la préparation des sites de travail pour les astronautes hors de la station spatiale. Pour ce faire, une plus grande quantité d'informations sur ces tâches devra être disponible. Finalement, il est nécessaire de pouvoir ajouter du mouvement entre le bâti de la main et le sol afin de déplacer la main dans ADAMS comme si elle était manipulée par le robot Dextre.

En terminant, une validation expérimentale du modèle ADAMS de la main SARAH et du robot Dextre devrait être réalisée. En effet, en utilisant le robot SARCOS et en lui ajoutant de la compliance active à l'aide de capteurs de forces et de moments, la validation des résultats obtenus dans ADAMS au niveau de la planification de tâches pourra être faite.

Bibliographie

- [1] L.M. Sie, “Analyse dynamique et optimisation de préhenseurs sous-actionnés à l’aide du logiciel ADAMS,” *Mémoire de maîtrise présenté à la faculté des études supérieures de l’Université Laval*, 2002.
- [2] S. Montambault and C.M. Gosselin, “Analysis of Underactuated Mechanical Grippers,” *Journal of Mechanical Design*, Vol. 123, September 2001.
- [3] T. Laliberté and C.M. Gosselin, “Simulation and Design of Underactuated Mechanical Hands,” *Mechanism and Machine Theory*, 1998, vol. 33, n. 1/2, pp. 39–57.
- [4] T. Laliberté and C.M. Gosselin, “Underactuation in Space Robotic Hands,” *Proceeding of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space : i-SAIRAS 2001*, Canadian Space Agency, St-Hubert, Quebec, Canada, June 18-22, 2001.
- [5] S.C. Jacobsen, J.E. Wood, D.F. Knutti, and K.B. Biggers, “The UTAH/M.I.T. Dextrous Hand : Work in Progress,” *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 21-50, 1984.
- [6] J. Butterfaß, M. Grebenstein, H. Liu and G. Hirzinger, “DLR-Hand II : Next Generation of a Dextrous Robot Hand,” *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, Seoul, South Korea, pp. 109-114, 2001.

- [7] B. Rubinger, L. Gregoris, C.M. Gosselin and T. Laliberté, “Self-Adapting Auxiliary Hand (SARAH) for SPDM Operations on the International Space Station,” *Proceeding of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space : i-SAIRAS 2001*, Canadian Space Agency, St-Hubert, Quebec, Canada, June 18-22, 2001.
- [8] B. Rubinger, M. Brousseau, J. Lymer, C.M. Gosselin and T. Laliberté, “A Novel Robotic Hand-SARAH For Operations on the International Space Station,” *7th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation : ASTRA 2002*, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 19-21 November 2002.
- [9] A.T. Miller and P.K. Allen, “GraspIt! : A Versatile Simulator for Grasp Analysis,” In *Proceedings ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, Orlando, FL, pp. 1251-1258, November 2000.
- [10] M. Renault and F.B. Ouezdou, “Dynamic Simulation of Hand-Forearm System,” *IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, 2001.
- [11] Mechanical Dynamics Inc., “ADAMS-Help” *Mechanical Dynamics Inc.*, 2000.
- [12] C.M. Gosselin and T. Laliberté, “Underactuated Mechanical Finger with Return Actuation,” *U.S. Patent 5 762 390*, 1998.
- [13] C.M. Gosselin and T. Laliberté, “Actuation System for Highly Underactuated Gripping Mechanism,” *U.S. Patent 6 505 870 B1*, 2003.
- [14] C.M. Gosselin, “Mécanique des manipulateurs GMC-64388 (Notes de cours),” *Département de Génie Mécanique*, Hiver 1998.
- [15] N.S. Nise, “Control System Engineering,” *John Wiley & Sons Inc.*, Third Edition, 970 p., 2000.
- [16] G. Drouin, M. Gou, P. Thiry et R. Vinet, “Éléments de machine,” *Éditions de l'école polytechnique de Montréal*, Deuxième édition revue et augmentée, 543 p., 1997.
- [17] C. Prelle, “Contribution au contrôle de la compliance d'un bras de robot à actionnement électropneumatique,” *Thèse présentée devant l'institut national des sciences appliquées de Lyon*, 1997.

[18] P.C. Watson, "Remote Center Compliance System," *U.S. Patent 4 098 001*, 1978.

[19] <http://www.space.gc.ca>

[20] <http://www.3dcafe.com>

Annexe A

Calcul des forces de contact dans ADAMS

Cette annexe présente la définition des forces de contact dans ADAMS et décrit brièvement les méthodes de calcul utilisées par le logiciel. Il est important de bien définir ces éléments puisque la résolution des équations complexes régissant les forces de contact est le goulot d'étranglement faisant augmenter le temps de calcul des simulations. De plus, la résolution peut parfois engendrer des erreurs qui font stopper les simulations.

A.1 Boîte de dialogue

Dans notre modèle ADAMS, dix forces de contact sont créées : il y en a neuf entre les phalanges des doigts et l'objet et il y en a une autre entre la paume et l'objet.

Chacune des forces de contact est définie à l'aide d'une boîte de dialogue comme celle de la figure A.1. C'est d'ailleurs à partir de cette boîte de dialogue que les différents éléments à considérer lors de la définition des forces de contact sont présentés.

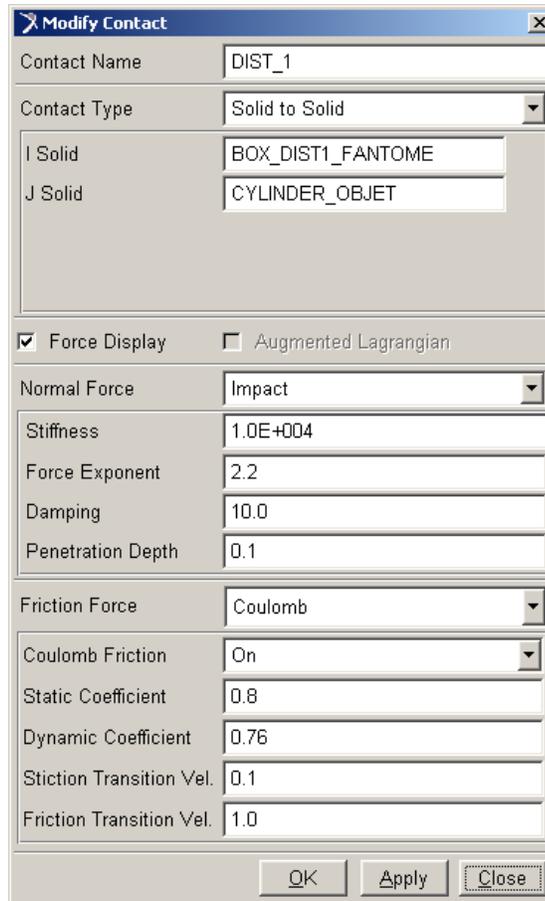


Figure A.1: Définition des forces de contact dans ADAMS.

A.1.1 Géométries

Dans un premier temps, il faut donner un nom à la force de contact. Par exemple, la force de contact présentée ici est celle entre la phalange distale du premier doigt et l'objet. C'est pourquoi le nom (*Contact Name*) donné à la force est DIST_1. Par la suite, il faut indiquer à ADAMS entre quelles catégories de géométries (*Contact Type*) le contact aura lieu. En tout, il y a sept choix offerts. Dans notre cas, puisque le contact se produit entre deux corps tridimensionnels de géométrie quelconque, l'onglet *Solid to Solid* est choisi. Parmi les autres choix offerts, il y a *Curve to Curve*, *Point to Curve*, *Point to Plane*, *Curve to Plane*, *Sphere to Plane* et *Sphere to Sphere*. Finalement, il est

nécessaire d'indiquer le nom des deux géométries impliquées dans le contact. Pour la force DIST_1, les corps ADAMS impliqués sont BOX_DIST1_FANTOME (*I Solid*) et CYLINDER_OBJET (*J Solid*). Ces corps sont décrits à la section 1.3.6.

A.1.2 Type de force de contact

Maintenant que les géométries impliquées dans la définition de la force de contact ont été choisies, la catégorie de la force de contact (*Normal Force*) est choisie. Encore une fois, trois choix sont offerts : *Impact*, *Restitution* et *User Defined*. Pour la méthode *Restitution*, il faut définir la pénalité (*Penalty*), c'est-à-dire la propriété de rigidité locale entre les corps, ainsi que le coefficient de restitution (*Restitution Coefficient*). L'autre méthode est appelée *Impact* et constitue une modélisation de la force de contact par un ressort-amortisseur non-linéaire. C'est cette méthode qui est employée dans la définition des forces de contact du modèle dynamique de la main SARAH. En effet, les courbes obtenues sont plus lisses, les simulations sont plus rapides et cette définition est beaucoup plus appropriée que la méthode *Restitution* pour les contacts persistants entre deux corps. Finalement, la méthode permettant à l'utilisateur de définir la force de contact à l'aide d'une fonction n'est pas utilisée (*User Defined*).

Par conséquent, quatre éléments doivent être définis lors de la création d'une force en utilisant la méthode *Impact* : la rigidité (*Stiffness*), l'exposant de la force (*Force Exponent*), le coefficient d'amortissement (*Damping*) et la profondeur de pénétration (*Penetration Depth*). Les valeurs ont été choisies à partir de valeur d'estimations grossières (*Ballpark Values*) trouvés dans la *Knowledge Base* sur le site web de la compagnie MSC.Software. Les valeurs suivantes étaient disponibles dans la documentation :

Tableau A.1: Estimations des coefficients utiles à la définition des forces de contact.

Matériau 1	Matériau 2	k [N/mm]	c [Ns/mm]	d [mm]	e [mm]
Aluminium (sec)	Aluminium (sec)	35000	28	1.5	0.1
Caoutchouc (sec)	Aluminium (sec)	2855	0.570	1.1	0.1
<i>Phalanges</i>	<i>Objet</i>	<i>10000</i>	<i>10</i>	<i>2.2</i>	<i>0.1</i>

Les valeurs choisies sont donc à mi-chemin entre les deux estimés. En effet, les doigts de la main SARAH sont faits en aluminium et les phalanges sont munies de petits

caoutchous pour augmenter le coefficient de friction entre la main et l'objet, ce qui justifie l'approximation. La surface en contact avec l'objet est donc une mince couche de caoutchouc renforcé par de l'aluminium. Au niveau de l'exposant, la valeur par défaut de 2.2 a été conservée. Par conséquent, la fonction IMPACT prend les arguments suivants :

$$FONCTION = IMPACT(x, \dot{x}, x_1, k, e, c_{max}, d) \quad (A.1)$$

où x est la distance entre les deux corps, \dot{x} est la vitesse d'approche, x_1 est une longueur libre fixe, k est la rigidité, e est l'exposant de la force, c_{max} est le coefficient d'amortissement maximal et d est la profondeur maximale de pénétration. Les arguments de la fonction sont illustrés à la figure A.2. L'équation permettant de calculer la force de contact est donc la suivante :

$$IMPACT = \left\{ \begin{array}{l} x < x_1 \rightarrow \text{Max}(0, k(x_1 - x)^e - STEP(x, x_1 - d, c_{max}, x_1, 0) * \dot{x}) \\ x \geq x_1 \rightarrow 0 \end{array} \right\} \quad (A.2)$$

Il y a plusieurs choses à dire sur l'équation (A.2). Tout d'abord, lorsqu'il n'y a pas de contact ($x \geq x_1$), la force est nulle. Lorsqu'il y a contact, la fonction IMPACT agit comme un ressort-amortisseur. En effet, si $p = x_1 - x$ est la pénétration de l'objet I dans l'objet J , la force de contact est alors $k * p$ pour la partie ressort et $c * \dot{x}$ pour la partie amortisseur où le coefficient d'amortissement varie de 0 à c_{max} lorsque la distance x varie de x_1 à $x_1 - d$. Finalement, la fonction Max n'est là que pour s'assurer du signe positif de la force de contact calculée. Si le signe est négatif, alors la force prend la valeur 0.

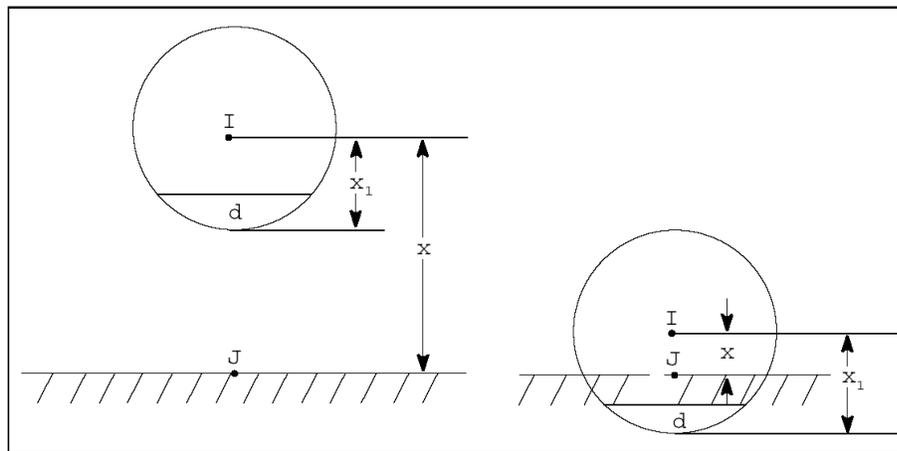


Figure A.2: Schéma illustrant les différents arguments nécessaires à la fonction IMPACT, image tirée de manuel d'aide à l'utilisateur du logiciel ADAMS [11].

A.1.3 Ajout de la friction

La dernière étape consiste à ajouter la friction au modèle. Trois choix s'offrent à l'utilisateur relativement à la force de frottement (*Friction Force*) : choisir le modèle de Coulomb, négliger la force de friction (*None*) ou définir sa propre loi (*User Defined*). Dans ce mémoire, certaines simulations ont été réalisées avec friction et d'autres sans friction. Si la friction est désirée, il faut définir le coefficient de frottement statique (*Static Coefficient*), le coefficient de frottement dynamique (*Dynamic Coefficient*), la vitesse de frottement statique (*Stiction Transition Vel.*) et la vitesse de frottement statique (*Friction Transition Vel.*). Les estimations pour ces quatre arguments sont les suivantes :

Tableau A.2: Estimations des coefficients utiles à la définition des forces de friction.

Matériau 1	Matériau 2	μ_s	μ_d	v_s [mm/s]	v_d [mm/s]
Aluminium (sec)	Aluminium (sec)	0.25	0.2	0.1	10
Caoutchouc (sec)	Aluminium (sec)	0.25	0.2	0.1	10
<i>Phalanges</i>	<i>Objet</i>	<i>0.8</i>	<i>0.76</i>	<i>0.1</i>	<i>10</i>

Dans ce cas-ci, les valeurs choisies ne correspondent pas aux estimations trouvées dans la *Knowledge Base*. Les valeurs choisies sont celles trouvées dans le manuel d'aide à l'utilisateur d'ADAMS [11]. D'ailleurs, ce sont ces valeurs qui ont été employées dans [1].

En jettant un coup d'oeil à la figure A.3, on remarque que le coefficient de friction varie en fonction de la vitesse relative entre le corps I et le corps J . C'est ce fait qui complexifie énormément la résolution des équations dans ADAMS et qui fait augmenter considérablement le temps de calcul.

A.1.4 Conseils

En terminant, il faut être très prudent dans l'utilisation des forces de contact. En effet, la définition des paramètres n'est pas toujours évidente et parfois, la variation d'un paramètre aussi grande soit elle ne change pas grand chose au résultat. Il est important de lire beaucoup sur le fonctionnement des forces de contact dans ADAMS

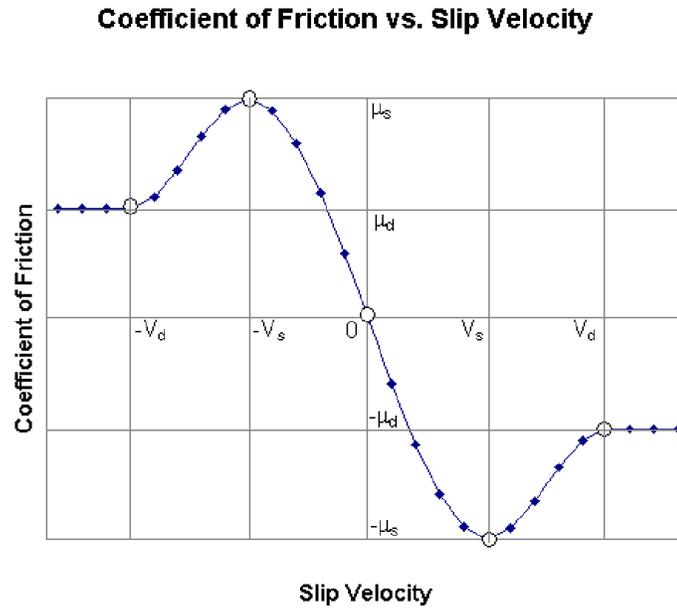


Figure A.3: Relation entre la vitesse des objets en contact et le coefficient de friction, image tirée de manuel d'aide à l'utilisateur d'ADAMS [11].

([11]), de consulter la *Knowledge Base* sur le site de la compagnie MSC.Software (www.mscsoftware.com) et de poser des questions sur des forum d'utilisateurs ADAMS si des problèmes sont rencontrés.