HAL
open science

Modélisations et stratégie de prise pour la manipulation d'objets déformables

Lazher Zaidi

To cite this version:

Lazher Zaidi. Modélisations et stratégie de prise pour la manipulation d'objets déformables. Autre. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2016. Français. NNT : 2016CLF22681 . tel-01343377

HAL Id: tel-01343377

https://theses.hal.science/tel-01343377v1

Submitted on 8 Jul 2016

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

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

N° Ordre : D.U. 2681
N° EDSPIC : 749

Université BLAISE PASCAL – Clermont II

École Doctorale
Sciences pour l'Ingénieur de Clermont Ferrand

Thèse de Doctorat

Présentée par

Lazher ZAIDI

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR D'UNIVERSITÉ

Spécialité : Génie Mécanique

Modélisations et stratégie de prise pour la manipulation d'objets déformables

Soutenue publiquement le 22 Mars 2016 devant le jury :

P. MARTINET	Professeur des Universités, ECN	Président
V. PERDEREAU	Professeur des Universités, ISIR, UPMC	Rapporteur
D. SIDOBRE	Maître de conférences HDR, Université Paul Sabatier	Rapporteur
Y. MEZOUAR	Professeur des Universités, Institut Pascal, SIGMA	Directeur de thèse
L. SABOURIN	Maître de conférences HDR, Institut Pascal, SIGMA	Co-directeur de thèse
B-C. BOUZGARROU	Maître de conférences, Institut Pascal, SIGMA	Co-Encadrant
J-A. CORRALES	Maître de conférences, Institut Pascal, SIGMA	Invité

Institut Pascal
Université Blaise Pascal et SIGMA-Clermont

Remerciement

Mes sincères remerciements sont adressés aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer mes travaux et mes différentes contributions scientifiques. Merci donc à M. Philippe MARTINET pour ses qualités de président du Jury et à Mme. Véronique PERDEREAU et M. Daniel SIDOBRE pour la pertinence de leurs critiques envers ce manuscrit. Leurs remarques et l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail m'ont énormément touché.

Je remercie M. Youcef MEZOUAR et M. Laurent SABOURIN pour leurs innombrables qualités de directeurs de thèse. Leurs remarques pointues, leurs expériences sont autant d'éléments qui m'ont permis de vivre ces travaux de thèse avec passion.

J'exprime ma reconnaissance à mon co-encadrant de thèse M. Chedli BOUZGARROU et je lui adresse mes plus sincères remerciements. Sa disponibilité et son encadrement de grande qualité m'ont permis de réussir mon projet et surtout de prendre goût au monde de la recherche. J'en suis très reconnaissant. J'espère très sincèrement que nous arriverons à travailler ensemble dans un avenir proche sous forme de partenariat de recherche.

Je remercie M. Juan-Antonio CORRALES pour son soutien sans faille. C'est un plaisir de travailler avec toi, de profiter de ton expérience de terrain et j'espère continuer à travailler avec toi dans un avenir proche.

Je remercie les financeurs de cette thèse. En effet, ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'avenir dans le cadre du projet EquipEx Robotex (ANR-10-EQPX-44), d'une aide de l'Union Européenne au titre du Programme Compétitivité Régionale et Emploi 2007-2013 (FEDER – Région Auvergne), d'une aide de l'Institut Français de Mécanique Avancée, et d'une aide de la Région Auvergne.

Un grand merci à mes amis. Vous m'avez fait le plus beau des cadeaux par votre présence tout le long de cette journée de soutenance. Un grand merci à vous, vous avez été exceptionnels ! Merci à Omar, Seifeddine, Bassem, Zinou, Yassin, Achref,

Khalifa, Lotfi, Montassar, Ilyess, Adel, Djily, Nadège, Khaled, Fidele, Aicha, Essia, Nessrine, Abdoullah, Walid, Said, Rawan, Houda, Lobna et Amina.

Un grand merci à tous les enseignants chercheurs, professeurs agrégés et professeurs pour leurs excellents échanges. Ils m'ont apporté énormément jusqu'à l'obtention de mon diplôme de Master mais aussi jusqu'à l'obtention de mon doctorat. Un merci à Jean-François DESTREBECQ, Alexis BEAKOU, François AUSLENDER et Benoît BLAYSAT.

Un merci chaleureux à Jacqueline pour son dynamisme et son soutien !

Mes plus grands remerciements sont tout droit destinés à l'amour de ma vie, Afef, qui m'a poussé dans cette reprise d'étude, qui a su m'apporter son soutien au quotidien.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance à mes chers parents qui ont été toujours à mes côtés. Je les remercie sincèrement pour leur soutien inconditionnel et constant, pour m'avoir donné du courage et de l'espoir, pour être toujours présents même à distance. Je leur dois ce que je suis.

Je dédie cette thèse à mes parents, Afef et à mes deux enfants Israa et Khalil.

Table des matières

Table des matières 5

Table des illustrations 7

Index des tableaux 10

Principales notations 11

Introduction générale 15

I. Contexte et motivations 15
II. Problématiques scientifiques et Contributions 16
III. Organisation du manuscrit 18

1 État de l'art 19

1.1 Introduction 19
1.2 Synthèse des prises 20
1.2.1 Définitions des prises robotiques 20
1.2.2 Propriétés de la prise 21
1.2.3 Mesure de qualité de prise 23
1.3 Planification des saisies robotiques 29
1.3.1 Type de contact 29
1.3.2 Nombre de contacts nécessaires 30
1.3.3 Force closure : formulation et état de l'art 31
1.4 Modélisation des objets déformables 35
1.4.1 Critères du choix d'un modèle de corps déformable 35
1.4.2 Principaux modèles déformables 36
1.5 Interaction robotique avec les objets déformables 41
1.6 Conclusion 50

2 Modélisation de l'interaction main robotique – objet déformable 53

2.1 Contexte 53
2.2 Modèles de contact existants 54
2.3 Modèle de contact proposé : doigt rigide – corps déformable 60
2.3.1 Calcul des forces normales 60
2.3.2 Calcul des forces tangentielles 61
2.3.3 Application à un cas simple : bille sur plan 63
2.4 Application à un objet déformable 69
2.4.1 Hypothèses de modélisation 69
2.4.2 Schéma global de simulation du modèle 70
2.4.3 Calcul des forces de contact 71
2.4.4 Distribution des forces de contact sur les nœuds 76
2.4.5 Détermination des forces de prise 77
2.5 Conclusion 78

3 Planification de la préhension d'objets déformables 81

3.1 Modélisation d'objets déformables 81
3.1.1 Modèle masse-ressort 81
3.1.2 Déformation de l'objet 84
3.2 Configuration de saisie de l'objet 85
3.3 Modèle géométrique du robot et de la main 91
3.3.1 Modèles du robot Adept Viper S1700D 91
3.3.2 Modèle de la main Barrett 93
3.4 Stratégie de pré-grasp 94
3.5 Planification de la manipulation d'objet 96
3.6 Conclusion 100

4 Résultats expérimentaux 103

4.1 Plateforme robotique 103
4.1.1 Mains robotiques 103
4.1.2 Robot KUKA LWR 4+ 106
4.1.3 Robot Adept 106
4.2 Caractérisation expérimentale des objets déformables 107
4.3 Etalonnage du capteur tactile 110
4.4 Essai de compression 111
4.5 Prise d'un objet déformable 114
4.6 Planification de préhension 119
4.7 Conclusion 124

Conclusions et perspectives 127

Références bibliographiques 133

ANNEXE A : Modélisation associée au robot ADEPT 150

ANNEXE B : Modélisation associée à la main Barrett 154

Table des illustrations

Figure I Application de la manipulation d'objets déformables 16
Figure 1-1 Procédure d'exécution d'une prise 20
Figure 1-2 Etapes de la modélisation de la préhension et de la manipulation [Cutkosky89] 21
Figure 1-3 Arrangement des forces 25
Figure 1-4 Polygone de prise 26
Figure 1-5 Distances di [Chinellato05] 27
Figure 1-6 Distances D entre CO et CT 28
Figure 1-7 Présentation des écarts δi 28
Figure 1-8 Modèle de contact, ponctuel sans frottement (a), ponctuel avec frottement (b), contact mou (c) 30
Figure 1-9 Prises planes par deux et trois doigts avec contact ponctuelle [Ponce95] 32
Figure 1-10 Prise *force-closure* avec trois doigts [Li03] 33
Figure 1-11 Zone d'intersection des cônes de frottement [Niparnan04] 33
Figure 1-12 Stratégie de prise [El-Khoury11]. 34
Figure 1-13 Prise *force closure* d'un cylindre [Daoud11] 34
Figure 1-14 Spline d'interpolation 37
Figure 1-15 Maillages surfaciques triangulaires (a) et maillages volumiques tétraédriques (b) 38
Figure 1-16 Principaux types d'élément 40
Figure 1-17 Configuration de la prise de l'objet déformable [Hirai01] 42
Figure 1-18 Robot manipulateur en interaction avec un objet déformable inconnu [Navarro13]. 44
Figure 1-19 Dispositif expérimental (a), exemples de mesures de déformation (b) [Frank14] 44
Figure 1-20 Objet à l'état initial (a), durant la tâche de prise (b) [Jia13] 45
Figure 1-21 Préhension de l'objet déformable (a), configuration initiale du placement des doigts (b) et test de *liftabilaty*, soulèvement de l'objet (c) [Lin14] 46
Figure 1-22 Configuration d'assemblage automatique de câble par un robot à deux bras (a), détection de collision au cours de la manipulation et positionnement du câble (b) [Papacharalampopoulos15] 46
Figure 1-23 Découpe et séparation d'objet déformable [Long14] 47
Figure 1-24 Séparation de deux muscles par système multi-bras 48
Figure 1-25 Utilisation des capteurs haptiques d'un robot personnel afin d'acquérir les propriétés physiques des objets alimentaires pour la définition des stratégies de manipulation [Gemici14] 48
Figure 1-26 Représentation d'un objet déformable avec triangulations de taille minimales et maximales par rapport aux points de préhension (a), trois manipulateurs mobiles portant un drap déformable (b) [Alonso-Mora15] 49
Figure 1-27 Configuration d'une manipulation coopérative homme-Robot [Kruse15] . 50
Figure 2-1 Contact entre deux sphères 55

Figure 2-2 Approche de contact [Azad10] 58
Figure 2-3 Contact tangentiel entre sphère et plan [Dopico11] 59
Figure 2-4 Déformation locale dans la zone de contact d'une sphère et d'un plan 61
Figure 2-5 Modèle rhéologique de la force tangentielle 62
Figure 2-6 Configuration du système bille-plan 64
Figure 2-7 Rebondissement de la balle sur le plan 65
Figure 2-8 Vitesse angulaire (rad/s) 66
Figure 2-9 Force normale (N) 67
Figure 2-10 Force tangentielle de frottement (N) 67
Figure 2-11 Agrandissement du premier rebondissement dans la figure 1-10 68
Figure 2-12 Variables d'état u et v 68
Figure 2-13 Agrandissement de figure 1-14 69
Figure 2-14 Modélisation du contact doigt – objet déformable 70
Figure 2-15 Diagramme de la planification de la prise basée sur le modèle de contact. 71
Figure 2-16 Détection de contact doigt-facettes à l'état initiale 73
Figure 2-17 Interpolation des vitesses des nœuds d'une facette 74
Figure 2-18 Contact entre l'hémisphère et le plan de la facette j 75
Figure 2-19 Distribution des forces de contact sur les nœuds d'une facette 77
Figure 2-20 Configuration du système de prise 78
Figure 3-1 Structure du fichier de maillage utilisé 82
Figure 3-2 Modèle d'objet déformable avec 97 nœuds et 314 éléments. 82
Figure 3-3 Paramétrage du système masse-ressort 84
Figure 3-4 Démarche de la simulation du modèle 85
Figure 3-5 Distance entre le centre de masse de l'objet CO et le centre de plan de prise CT 86
Figure 3-6 Configuration de prise *force closure* d'une sphère 88
Figure 3-7 Configuration de prise *force closure* d'un cube 89
Figure 3-8 Configuration de prise *force closure* d'un cylindre 90
Figure 3-9 Modélisation du robot Adept Viper S1700D par la méthode TCS 92
Figure 3-10 Barrett hand 93
Figure 3-11 Paramétrage de la main Barrett par la méthode TCS 94
Figure 3-12 Coïncidence de TCP et CO 95
Figure 3-13 Coïncidence de TCP et CT 95
Figure 3-14 Représentation de la plateforme Robot + main sous Matlab® 97
Figure 3-15 Démarche globale pour la planification de la prise initiale 98
Figure 3-16 Étapes dans la définition de la configuration pré-grasp pour un cube : (b) approche, (c) orientation de la main, (d) configuration de pré-grasp 99
Figure 3-17 Étapes dans la définition de la configuration pré-grasp pour un cylindre : (b) approche, (c) orientation de la main, (d) configuration de pré-grasp 99
Figure 4-1 Main Shadow 104
Figure 4-2 Représentation du capteur tactile BioTac 105
Figure 4-3 Main Barrett à 3 doigts 105
Figure 4-4 Plateforme bi-bras 106
Figure 4-5 Robot Adept Viper 1700d 107
Figure 4-6 Essai de compression d'un parallélépipède rectangle en mousse 108

Figure 4-7 Évolution des forces et des contraintes en fonction, respectivement, des déplacements et déformations en compression pour un parallélépipède rectangle en mousse 108
Figure 4-8 Essaie de compression d'un cylindre en mousse 108
Figure 4-9 Évolution des forces et des contraintes en fonction, respectivement, des déplacements et déformations en compression pour un cylindre en mousse 109
Figure 4-10 Essai de compression d'une sphère 109
Figure 4-11 Évolution des forces et des contraintes en fonction, respectivement, des déplacements et déformations en compression pour une sphère souple 109
Figure 4-12 Courbe utilisée pour la calibration du signal du capteur Biotac 111
Figure 4-13 Résultats de simulation et expérimentaux 112
Figure 4-14 Force normale appliquée par le doigt en fonction de la pénétration 113
Figure 4-15 Erreur de la force par rapport à la pénétration 113
Figure 4-16 Configuration initiale de la prise 114
Figure 4-17 Configuration de prise *force closure* 115
Figure 4-18 Diagramme de planification de prise d'un objet déformable 116
Figure 4-19 Différentes étapes d'une tâche de saisie réelle et simulée : (a) - (d) Configuration de prise initiale, (b) - (e) *Pré-grasp*, (c) - (f) Déformations finale de l'objet 117
Figure 4-20 Forces simulées appliquées par les doigts 118
Figure 4-21 Forces appliquées par la main Shadow mesurées expérimentalement 118
Figure 4-22 Diagramme de planification de préhension 119
Figure 4-23 Planification de prise d'un cube: (a) - (d) Configuration de pré-grasp du cube, (b) - (e) Contact initiale optimisé, (c) - (f) Déformations finale de l'objet 120
Figure 4-24 Différentes vue de déformation du cube en simulation et en expérimental 121
Figure 4-25 Manipulation *pick and place* du cube par le robot Adept et la main Barrett 122
Figure 4-26 Planification de prise d'un cylindre: (a) - (e) Configuration de pré-grasp du cylindre, (b) - (f) Contact initiale optimisé, (c) - (g) - (d) - (h) Déformations finale du cylindre 123
Figure 4-27 Manipulation *pick and place* du cylindre par le robot Adept et la main Barrett 124
Figure 5-1 Illustration de la planification de déformation souhaitée d'une mousse pour une tâche de positionnement 130
Figure A-1: Modélisation TCS du robot Adept Viper S1700D 150
Figure B-1 Main Barrett 154
Figure B-2 Modélisation TCS de la main Barrett 154
Figure B-3 Relations géométriques entre les phalanges de la main Barrett 157

Index des tableaux

Tableau 1-1 Nombre de doigts requis pour saisir un objet ----------31

Tableau 1-2 Tableau comparatif des deux méthodes masse-ressort et élément finis ----41

Tableau 2-1 Propriétés mécaniques de la balle et du plan ----------66

Tableau 3-1 Evaluation de la configuration initiale pour une sphère ----------88

Tableau 3-2 Evaluation de la configuration initiale pour un cube ----------89

Tableau 3-3 Evaluation de la pose initiale pour un cylindre ----------90

Tableau 3-4 Les configurations articulaires du robot et de la main---------- 100

Tableau 3-5 Jauges outils des résultats de pré-grasp---------- 100

Tableau 4-1 Modules de Young des mousses testées ---------- 110

Tableau 4-2 Mesure capteur tactile et balance ---------- 111

Tableau 4-3 Coordonnées des points de contact dans le repère de la paume de la main Shadow ---------- 114

Principales notations

R_O	Repère de référence de centre O
μ	Coefficient de frottement
$\vec{f}_n$	Force normale
k	Constante de rigidité
δ	Pénétration, indentation
$\dot{\delta}$	Vitesse de pénétration
R	Rayon de sphère
E	Module de Young
v	Coefficient de Poisson
$\vec{v}_n$	La vitesse normale relative des corps en collision
λ	Facteur d'amortissement visqueux
k_t	Constante de rigidité tangentielle
D_t	Constante d'amortissement tangentiel
$\vec{f}_{stick}$	Force d'adhérence (sticking force)
$\vec{f}_{slip}$	Force de glissement
$\vec{f}_t$	Force tangentielle
$\vec{v}_t$	Vitesse tangentielle
S	Fonction de transition entre les deux forces f_{slip} et f_{stick}
$\vec{n}_p$	Vecteur normal à la surface de contact
s	Déformation dans la zone de contact

$\mathbf{H}$	Matrice des fonctions de forme
$\mathbf{I}_3$	Matrice identité de taille de 3 x 3
$\vec{P}_{ci}$	Position du centre de demi-sphère i
$\vec{P}_{pj}$	Position point de projection de $\vec{P}_{ci}$ sur la facette j
d_{j}	Distance entre $\vec{P}_{ci}$ et $\vec{P}_{pj}$
$\vec{v}_{\mathrm{r_j}}$	Vitesse relative entre un doigt et une facette j
$\vec{f}_{\mathrm{Nj}}$	Force normale sur la facette j
$\vec{v}_{\mathrm{n_j}}$	Vitesse normale entre le doigt et la facette j
MMC	Mécanique des milieux continus
MEF	Méthode des éléments finis
C_O	Centre de l'objet
C_T	Centre de triangle de prise
TCP	Tool centre point
MGD	Modèle géométrique direct
MGI	Modèle géométrique inverse
DDL	Degré de liberté
MAPE	Mean Absolute Percentage Error
WDLS	Weighted Damped Least-Squares
KDL	Kinematics Dynamics Library

Introduction générale

Cette partie constitue une introduction générale aux travaux qui seront décrits dans la suite du document. Elle présente dans un premier temps, le contexte et nos principales motivations.

Les problématiques scientifiques et nos contributions sont ensuite brièvement présentées. Elle donne également l'organisation du manuscrit.

I. Contexte et motivations.....15
II. Problématiques scientifiques et Contributions.....16
III. Organisation du manuscrit.....18

I. Contexte et motivations

La manipulation dextre est un sujet de recherche important dans le domaine de la robotique soulevant de nombreux challenges. Pour s'en convaincre, il suffit d'observer la réalisation de tâches de manipulation complexes et difficiles réalisées par un humain. Il est clair que ces opérations nécessitent une grande dextérité ainsi qu'une coordination intelligente entre perception (tactile, effort, vision) et action.

Les travaux de recherche relatifs à la manipulation dextre sont essentiellement focalisés sur l'interaction entre des mains robotiques et des corps rigides. Peu de travaux abordent le cas de la manipulation d'objets déformables. L'augmentation des besoins en automatisation, le développement de nouvelles applications dans les domaines de la chirurgie, de l'industrie agro-alimentaire et des services à la personne rendent nécessaire l'étude de la saisie et de la manipulation d'objets déformables par des systèmes robotiques afin d'en accroître les capacités.

La modélisation et la simulation d'objets déformables ont déjà été exploitées dans le cadre du développement de simulateurs de chirurgie, par exemple pour la formation des médecins à l'intervention sur des organes humains avec des sensations haptiques (plateforme SOFA [Faure12]). Elles ont également été intégrées dans des applications robotiques relatives à la manipulation et la découpe de viandes ou d'autres produits mous (ANR – ARMS- [Essahbi13, Long14]), ou encore dans le cadre de la saisie et de la manipulation d'objets de la vie quotidienne pour l'assistance à la personne (Care-O-bot II [Hans02]).

Figure I Application de la manipulation d'objets déformables

La préhension et la manipulation de corps rigides par une main robotique est un sujet d'étude déjà très complexe mettant en jeu de nombreux processus. Lorsque les corps sont déformables, de nouvelles problématiques scientifiques apparaissent, rendant encore plus complexe la manipulation. Cette complexité accrue est essentiellement liée aux comportements des matériaux déformables. L'un des défis de la manipulation d'objets déformables est la modélisation et la simulation en temps réel. La modélisation de l'interaction entre le manipulateur et l'objet déformable est également un enjeu majeur. La complexité de l'interaction découle du lien entre le changement de la forme de l'objet et les efforts qui lui sont appliqués. La préhension et la manipulation exigent alors le contrôle de la configuration de l'objet et de sa déformation mais également le contrôle de la variation des zones de contact en fonction des forces appliquées à l'objet.

II. Problématiques scientifiques et Contributions

Le contexte de nos travaux concerne la manipulation dextre d'objets déformables par un préhenseur mécanique anthropomorphique de type main articulée à plusieurs doigts. Cette tâche présente une grande complexité et son étude nécessite une expertise dans des domaines variés : mécanique (configuration structurale de la main, modélisation de l'interaction), instrumentation (capteur de vision, capteur de force et/ou de couple, capteur tactile) et commande (contrôle du mouvement des doigts en force et/ou position) pour assurer la qualité de prise d'objets déformables et garantir la stabilité.

Comme évoqué précédemment, la manipulation robotique d'objets déformables est un domaine très ardu d'un point de vue scientifique et technologique. Le développement des systèmes robotiques autonomes pour la saisie et la manipulation de corps déformables exige d'aborder les thèmes suivants :

- *Développement de préhenseurs robustes et agiles*
- *Modélisation et simulation des déformations d'objets déformables*
- *Modélisation et contrôle de l'interaction entre une main robotique et des objets déformables*
- *Développement de nouveaux critères pour évaluer la qualité de préhension des objets déformables*
- *Traitement de données des capteurs (fusion multi-capteurs)*
- *Développement de conditions nécessaires et suffisantes d'équilibre pour des prises planes et tridimensionnelles d'objets déformables*
- *Développement de stratégies de planification des prises d'objets déformables par une main robotique*

Les travaux présentés dans cette thèse se focalisent plus particulièrement sur la modélisation et la simulation d'objets déformables, la modélisation de l'interaction entre une main robotique et ces objets ainsi que la planification de leurs prises.

L'objectif de la planification de tâches de manipulation dextre est de déterminer les trajectoires à suivre et/ou les efforts à appliquer par les doigts et le bras manipulateur afin de déplacer et/ou déformer l'objet saisi d'une configuration de départ (état initial) à une configuration finale (état désiré). L'approche que nous développons dans la suite peut-être décomposée en deux phases [Bicchi95]. Dans la première phase, il s'agit de déterminer la configuration initiale des doigts sur la surface de l'objet en exploitant des critères de stabilité permettant de garantir la robustesse de la prise. La deuxième phase consiste à générer des trajectoires réalisables par le système mécanique assurant tout au long de l'opération de saisie la stabilité de l'objet en prenant en compte les contraintes cinématiques et dynamiques liées à l'interaction des doigts avec l'objet.

III. Organisation du manuscrit

Dans **le chapitre I**, nous présentons dans un premier temps, les fondements théoriques de l'analyse, de la synthèse et des mesures de la qualité des prises. Nous présentons ensuite l'état de l'art relatif à la modélisation et à la manipulation robotique d'objets déformables.

Le chapitre II est consacré à l'étude de l'interaction entre un mécanisme préhenseur et des objets déformables. Nous proposons en particulier une nouvelle modélisation des contacts avec des objets déformables. En effet, la définition d'un modèle de contact entre une main robotique et un objet à grande déformation reste un problème complexe en raison du comportement de celui-ci et des non linéarités associées aux contacts.

Le chapitre III présente dans un premier temps l'approche utilisée pour la modélisation de l'objet déformable. Ensuite, il décrit la stratégie utilisée pour la planification de la prise. Une approche, basée sur des critères géométriques exploitée pour des objets rigides, est adaptée à la détermination de la configuration initiale de la prise d'un objet déformable. Enfin, ces critères sont appliqués à plusieurs types d'objets en utilisant différents types de robots et de mains robotiques.

Le chapitre IV présente les différents résultats expérimentaux liés à la préhension d'objets déformables. Ceux-ci ont été obtenus en utilisant un robot Kuka LWR4+ et une main Shadow équipée de capteurs BioTac. Ce chapitre présente également des résultats expérimentaux relatifs à la planification de la prise obtenue en utilisant un robot Adept (Viper1700D) et une main Barrett.

1 État de l'art

Afin de développer une stratégie assurant une prise stable d'un objet déformable, plusieurs points relatifs à l'interaction entre les doigts et l'objet doivent être étudiés. Le premier point concerne la modélisation du comportement de l'objet, la modélisation de l'interaction objet-doigts et la définition de relation entre les forces appliquées et les déformations. Un autre point important dans le cadre de nos travaux concerne la planification de la prise et la définition d'une stratégie de préhension des objets déformables. Le choix des points de contact initiaux doit respecter des critères d'accessibilité mais également d'optimalité par rapport à un ou plusieurs critères de mesure de qualité de saisie. Cette problématique relève de l'analyse et de la synthèse des prises qui constituent deux problèmes fondamentaux de l'étude de la saisie et de la manipulation dextre.

Dans ce chapitre, nous commençons par rappeler quelques fondements théoriques de la saisie robotique. Ensuite, nous dressons un état de l'art relatif à la synthèse de prise. Finalement, nous présentons les différents travaux liés à la manipulation des objets déformables.

1.1 Introduction 19
1.2 Synthèse des prises 20
1.2.1 Définitions des prises robotiques 20
1.2.2 Propriétés de la prise 21
1.2.3 Mesure de qualité de prise 23
1.3 Planification des saisies robotiques 29
1.3.1 Type de contact 29
1.3.2 Nombre de contacts nécessaires 30
1.3.3 Force closure : formulation et état de l'art 31
1.4 Modélisation des objets déformables 35
1.4.1 Critères du choix d'un modèle de corps déformable 35
1.4.2 Principaux modèles déformables 36
1.5 Interaction robotique avec les objets déformables 41
1.6 Conclusion 50

1.1 Introduction

Les capacités de l'être humain dans la réalisation de tâches de manipulations complexes et difficiles sont très étendues. La mécanisation/robotisation de ces tâches par des machines est un défi dans le domaine de la robotique. Actuellement, des robots remplacent avantageusement l'être humain dans le cadre de tâches manufacturières, de l'industrie automobile, de travaux pénibles ou dangereux. Le terme manipulation regroupe toutes les actions mécaniques que le robot peut effectuer sur son environnement. Parmi les nombreuses tâches de manipulation robotisées, la manipulation dextre des objets déformables est certainement l'une des plus compliquée. De nombreux travaux de recherche ont été développés pour répondre aux exigences liées à la préhension et à la manipulation des objets rigides, mais comme nous le verrons par la suite, très peu de travaux concernent l'étude de l'interaction robotique avec des objets déformables.

Nous commençons par donner quelques rappels relatifs aux concepts exploités dans le contexte de la saisie robotique, puis nous présentons une synthèse des travaux concernant la prise et la manipulation d'objets rigides et d'objets déformables.

1.2 Synthèse des prises

La synthèse et l'analyse de la préhension sont liées principalement à la recherche d'un ensemble de points de contact pour une configuration de main sur une géométrie d'objet donné [Pollard04]. La synthèse de la préhension d'un objet de forme complexe par une main robotique est un problème compliqué en raison de la multiplicité des configurations de prises possibles, de la variété dans la forme et la dimension des objets à saisir. De nombreuses recherches se sont focalisées sur le développement et l'optimisation des critères qui permettent de garantir la stabilité de l'objet pour une prise donnée.

1.2.1 Définitions des prises robotiques

La préhension robotique est définie comme un processus durant lequel un objet est saisi par les doigts d'une main robotique. Les doigts de la main robotique doivent agir d'une façon coordonnée et coopérative pour réaliser et maintenir la préhension [Okamura00]. Le processus d'exécution d'une préhension (Fig. 1-1) peut être décomposé en quatre étapes [Hester99] :

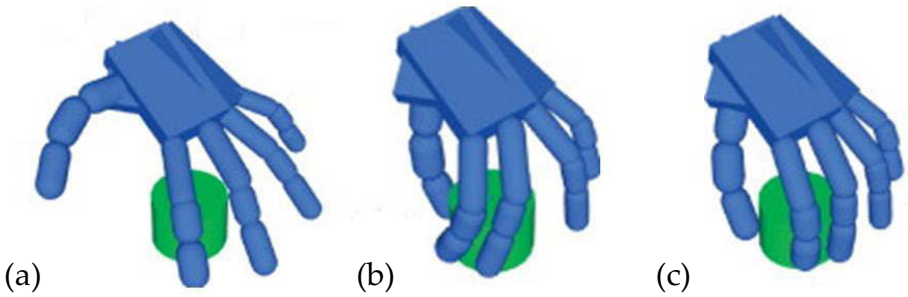

Figure 1-1 Procédure d'exécution d'une prise

- *Acquisition (caractérisation) de l'objet : détermination de la typologie et de la position de l'objet cible,*
- *Synthèse de prise : détermination de la configuration appropriée de la main suivant le type d'objet et la tâche à exécuter (figure 1-1 (a)),*
- *Approche : positionnement de la main près de l'objet (figure 1-1 (b)),*
- *Exécution de la prise : obtention de la prise réelle de l'objet (figure 1-1 (c)).*

Le choix d'une préhension dépend très fortement des paramètres du système tels que : le nombre de points de contact, la géométrie de l'objet, la structure du préhenseur, les propriétés mécaniques de l'objet et de la tâche désirée [Miller04].

La figure 1.2 schématise les quatre niveaux d'étude que l'on retrouve dans la littérature pour la modélisation de la préhension et de la manipulation [Cutkosky89]. Ces quatre niveaux sont relatifs aux propriétés géométriques, cinématiques, dynamiques et aux relations constitutives. Sur la base des différents modèles analytiques de préhension et de manipulation, un certain nombre de propriétés de prise ont été développées. Ces propriétés fournissent des moyens quantitatifs pour évaluer la qualité de la prise.

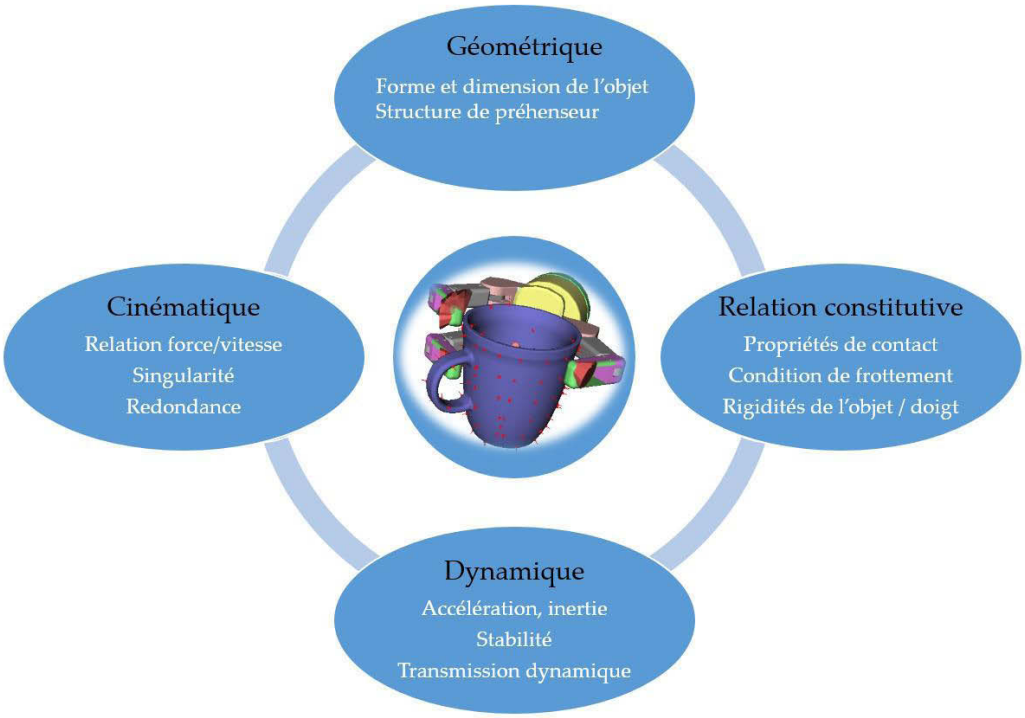

Figure 1-2 Etapes de la modélisation de la préhension et de la manipulation [Cutkosky89]

1.2.2 Propriétés de la prise

Afin de prendre en compte les propriétés mécaniques de la préhension pour générer des prises possédant de bonnes qualités par rapport à la tâche, il est nécessaire de les définir précisément et d'identifier les paramètres appropriés pour en mesurer la qualité [Hester99]. Sur la base des différents modèles analytiques de préhension et de manipulation, un certain nombre de mesures de la qualité ont été développées. Les principales propriétés identifiées relatives à la saisie sont présentées ci-dessous.

- *Force closure*

Le critère *force closure* est l'une des caractéristiques essentielles pour la préhension des d'objets. En tenant compte des frottements dans la zone de contact, ce critère représente une condition d'existence d'un système de forces de contact (à l'intérieur des cônes de frottement) capable de maintenir l'équilibre de l'objet saisi soumis à un torseur de forces extérieures [Nguyen86, Bicchi99].

- *Forme closure*

Le critère *forme closure* a été introduite par Reuleaux [Reuleaux12] et elle est associée à la capacité d'un dispositif de préhension à empêcher les mouvements de l'objet saisi, en n'utilisant que des contacts unilatéraux sans frottement. Ce type de prise empêche tout mouvement de l'objet saisi, même si les contacts sont sans frottement. La capacité à résister à des charges externes quelconques est l'une de ses propriétés essentielles.

- *Equilibre*

Une prise est en équilibre quand la résultante, des forces et des moments, appliqués sur l'objet (par les doigts et les perturbations externes) est nulle. On cherche alors les forces de contact qui satisfont toutes les contraintes liées à l'équilibre des efforts appliqués, aux frottements et aux limites articulaires [Cutkosky89].

- *Stabilité*

La stabilité de la prise est liée à la question suivante : La prise reviendra-t-elle à sa configuration initiale après avoir été sollicitée par des forces/moments externes ?

On considère que la prise est stable si des erreurs quelconques sur la position de l'objet ou sur la force exercée par un doigt, provoquée par une perturbation, disparaissent rapidement après la suppression de la perturbation. Ainsi, la prise doit produire des forces de restitution quand elle est éloignée de l'équilibre [Cutkosky89].

- *Dextérité*

Une prise est dite dextre si les relations cinématiques entre la main et l'objet permettent à la main de déplacer l'objet d'une manière compatible avec la tâche à exécuter. Dans le cas général où la tâche n'est pas spécifiée, une prise est considérée comme dextre si le manipulateur peut déplacer l'objet dans n'importe quelle direction [Kumar12].

- *Compliance*

La compliance est définie par la capacité d'un manipulateur à posséder un comportement souple et à s'adapter à son environnement. La compliance de

la prise est modélisée par des ressorts virtuels au niveau des points de contact. Une prise est compliante si l'objet saisi se comporte comme un ressort-amortisseur généralisé ou une impédance, en respectant les contraintes externes telles que le contact avec une surface dure, la vitesse d'exécution de la tâche ou les efforts appliqués [Cutkosky89].

Les critères et les conditions présentées ci-dessus comme la *force closure*, l'*équilibre*, la *stabilité* et la *dextérité* sont fondamentales pour définir des mesures de qualité des prises et ainsi les analyser et les planifier. Ces propriétés sont les plus fréquemment considérées pour caractériser une prise, déterminer des points de contact des doigts sur l'objet et la configuration appropriée de la main tout en respectant les contraintes cinématiques de celle-ci [Bounab11]. Bien que ces propriétés soient principalement établies dans le contexte de la saisie, elles sont également valides pour la manipulation. La section suivante décrit les principales mesures de qualité de prise de la littérature.

1.2.3 Mesure de qualité de prise

Le problème de la sélection d'une prise parmi plusieurs nécessite une phase d'optimisation qui s'appuie sur des critères afin de sélectionner une prise optimale pour la tâche considérée.

Plusieurs méthodes liées à la stabilité de la prise avec des mains robotiques ont été développées. Elles s'attachent principalement à optimiser la prise selon différents critères, mais elles sont, pour la plupart, appliquées à des objets rigides. Ces mesures de qualité peuvent être associées à la position des points de contact, à la configuration de la main robotique ou à une mesure globale [Ferrari92, Suárez06, Gabiccini10].

Mesures associées à la position des points de contact

Les critères de mesure associés à la position des points de contact tiennent compte des propriétés de l'objet (forme, taille, poids), des contraintes de frottement et des conditions de *force closure* pour quantifier la qualité de prise.

Pour ce sous-groupe, seule la matrice de prise G est considérée pour la mesure de la qualité. Cette matrice représente la relation entre les forces appliquées par les doigts et le torseur statique résultant de ces forces au niveau des points de contact (cas à trois doigts) [Park92].

$$G = \begin{bmatrix} I & I & I \\ R_1 & R_2 & R_3 \end{bmatrix} \tag{1.1}$$

avec

$$R_i = \begin{bmatrix} 0 & -z_i & y_i \\ z_i & 0 & -x_i \\ -y_i & x_i & 0 \end{bmatrix} \tag{1.2}$$

où I est la matrice identité de dimensions 3×3 et les matrices R_i (i = 1, 2, 3) sont des matrices antisymétriques de dimensions 3×3 contenant les positions des points de contact des doigts sur l'objet.

- Valeur singulière minimale de G

La plus petite valeur singulière de la matrice de prise G, $\sigma_{min}(G)$ est une mesure de qualité de prise. Elle caractérise la distance entre la configuration actuelle de la prise et une configuration singulière (le contrôle d'un degré de liberté est perdu) [kim01, Li87]. Le critère s'exprime sous la forme :

$$Q_{p1} = \sigma_{min}(G) \tag{1.3}$$

La prise optimale correspond à la plus grande valeur de $\sigma_{min}(G)$.

- Volume de l'ellipsoïde dans l'espace des torseurs

L'effet de la matrice de prise G dans la relation de transformation entre les forces aux points de contact et le torseur des efforts appliqués par les doigts peut être représenté par un ellipsoïde. Le volume de cet ellipsoïde représente une mesure de la contribution globale de toutes les forces de contact. Cette mesure de qualité considère toutes les valeurs propres et elle doit être maximisée pour obtenir la meilleure prise [Li87]. Le critère s'exprime sous la forme :

$$Q_{p2} = \alpha\sqrt{\det(GG^T)} = \alpha(\sigma_1\sigma_2 \dots \sigma_d) \tag{1.4}$$

Où $\sigma_1\sigma_2 \dots \sigma_d$ représentent les valeurs propres de la matrice de prise G et α est une constante.

- Indice d'isotropie de la prise

Ce critère vise à créer une contribution uniforme des forces de contact sur l'ensemble des points de contact avec l'objet. Il est utilisé pour obtenir une prise isotrope où les grandeurs des forces internes sont semblables. Cette mesure de qualité est appelée indice d'isotropie de prise. Le critère associé est défini par :

$$Q_{p3} = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \tag{1.5}$$

Cette mesure de qualité est proche de 1 quand la prise est isotrope (cas optimal), et elle tend vers 0 quand la prise se rapproche d'une configuration singulière [Li87, Suárez06].

Mesures basées sur des relations géométriques

Ce sous-groupe correspond aux critères associés aux mesures de la qualité des prises relatives à l'évaluation de relations géométriques liées aux points de contact.

- Arrangement des Forces

L'équilibre d'une prise *force closure* est atteinte quand les directions des forces sont uniformément distribuées autour de l'objet [Ponce95, Chinellato05]. En d'autres termes, les trois angles définis entre les forces doivent être les plus proches possible de 120°. Ce critère est définie par :

$$Q_{g1} = \frac{\pi^3/27}{(\pi-\varphi_1)(\pi-\varphi_2)(\pi-\varphi_3)} - 1 \qquad (1.6)$$

Les trois angles φ_1, φ_2 et φ_3 sont présentés sur la figure 1-3 avec P_1, P_2 et P_3 les trois points de contact des doigts avec l'objet.

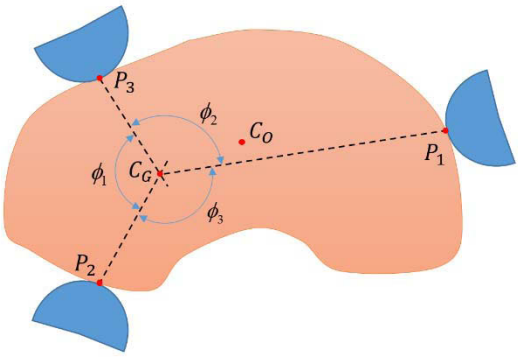

Figure 1-3 Arrangement des forces

- Indice de stabilité

Ce critère vise à mesurer l'uniformité de la distribution des doigts sur l'objet, par une évaluation des relations géométriques liées aux points de contact. L'indice de stabilité permet de mesurer la distribution uniforme des doigts sur l'objet, grâce à une comparaison de la valeur des angles internes du polygone de prise présenté à la figure 1-4 [Kim01]. L'indice de stabilité est minimum quand le polygone de contact est régulier. Ce critère est défini par :

$$Q_{g2} = \frac{1}{\theta_{max}} \sum_{i=1}^{n_f} \left|\theta_i - \bar{\theta}\right| \qquad (1.7)$$

L'angle intérieur au sommet du polygone de contact est θ_i, $\bar{\theta}$ est l'angle interne moyen du polygone régulier correspondant est donné par :

$$\bar{\theta} = \frac{180\,(n_f - 2)}{n_f} \tag{1.8}$$

Avec n_f le nombre de doigts.

L'angle θ_{max} est la somme des angles internes, donné par :

$$\theta_{max} = (n_f - 2)(180 - \bar{\theta}) + 2\bar{\theta} \tag{1.9}$$

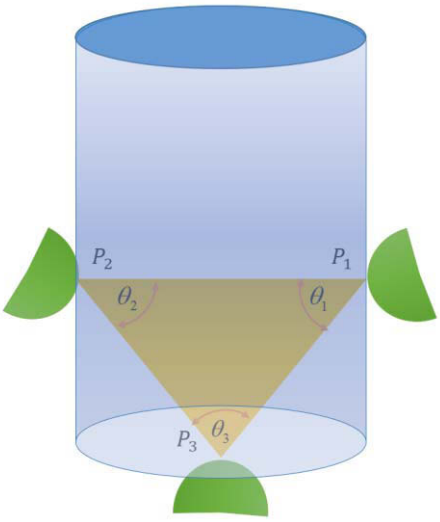

Figure 1-4 Polygone de prise

Dans le cas d'une saisie avec trois doigts, la prise est optimale quand le polygone de contact est un triangle équilatéral, c'est-à-dire que les trois angles internes du triangle de saisie sont égaux et valent 60° [Mirtich94].

- Aire du polygone de la prise

Ce critère est utilisé comme mesure de qualité de prise pour les objets 2D ou 3D. Pour les prises à trois doigts, plus le triangle formé par les points de contact sur l'objet est grand, plus la prise est robuste [Chinellato05]. On note W masse de l'objet, A l'aire de l'objet, A_T l'aire du triangle de prise qui est supposé avoir une superficie égale à A/4. Plus l'aire du triangle A_T est grande, plus la saisie sera stable. Le critère est défini par :

$$Q_{g3} = \mathrm{W}\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{A}\,\mathrm{A_T}} \tag{1.10}$$

- Indice d'incertitude de la prise

Le positionnement des doigts sur les régions de prise peut être erroné en raison d'imprécision introduite par le système de perception et des tolérances mécaniques. Quand les points de contact sont proches des extrémités d'une zone de prise, les doigts risquent d'être positionnés à côté de ces régions, ce qui

modifie la qualité de la prise [Morales02, Chinellato05]. La prise permet de réduire l'erreur maximale dans le positionnement des doigts si chaque doigt est nominalement placé au centre de chaque région de prise [Kim04].

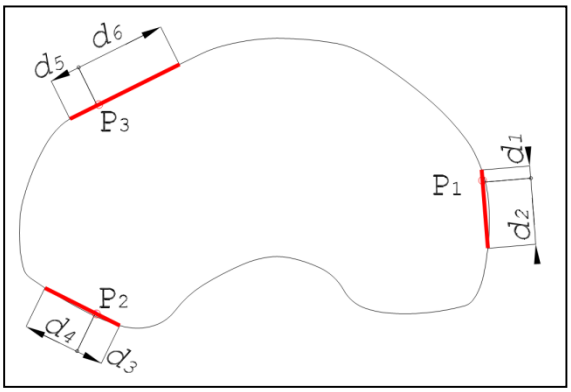

Figure 1-5 Distances d_i [Chinellato05]

Ce critère est exprimé en considérant les distances d_i (Fig. 1-5) données par les points de contact et les extrémités des régions de prise. L'indice d'incertitude est donné par :

$$Q_{g4} = \sum_{i=1}^{6} q_i \tag{1.11}$$

avec

$$q_i = \begin{cases} 0 & si\ d_i \geq \lambda \\ \dfrac{\lambda}{d_i} - 1 & si\ d_i < \lambda \end{cases} \tag{1.12}$$

λ est le seuil d'erreur de positionnement des doigts.

Plus la taille des régions est grande, plus l'ensemble des positions correctes acceptables produisant une prise *force closure* est important [Ponce95].

- Distance entre le barycentre des points de contacts et le centre de masse de l'objet

L'effet des forces d'inertie et de la gravité sur la prise se réduit au minimum quand la distance D entre le centre de masse C_O de l'objet (2D/3D), et le centre du triangle/polygone de prise C_T est minimisée (Fig. 1-6). Cette distance a également été employée comme critère de qualité des prises pour les objets 2D [Morales02, Chinellato05] et les objets 3D [Ponce95].

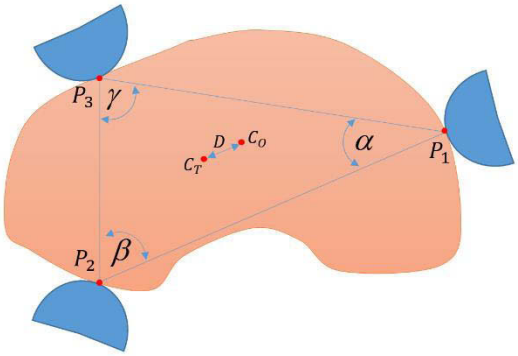

Figure 1-6 Distances D entre C_O et C_T

Mesures de qualité associées à la configuration de la main

Ce groupe de mesures de qualité inclut la configuration de la main multi-doigts afin d'estimer la qualité des prises.

- Ligne d'effort

Le critère Q_{c1} prend en compte les écarts δ_i des forces de contact F_i par rapport aux forces normales N_i. Il permet d'évaluer le risque de glissement entre les doigts et l'objet. Si ces écarts sont faibles, on a alors un risque faible d'instabilité. Il est défini par :

$$Q_{c1} = \frac{4\beta}{3}(\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2)/arctan^2(\mu) \tag{1.13}$$

avec

$$\beta = \begin{cases} 1 \; si \; \forall i \; \delta_i \leq \arctan(\mu) \\ 3 \; si \; \exists i \; \delta_i \geq \arctan(\mu) \end{cases} \tag{1.14}$$

Dans le cas où le coefficient de frottement des contacts μ entre les doigts et l'objet n'est pas connu à l'avance, plus les forces réelles F_i s'écartent de la normale N_i (Fig. 1-7), plus le risque de glissement des doigts augmente [Morales02, Chinellato05].

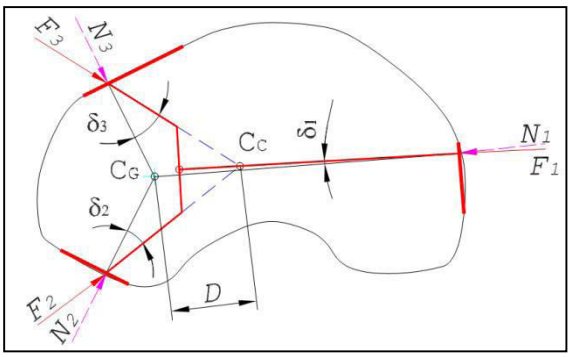

Figure 1-7 Présentation des écarts δ_i

Le critère Q_{c2} permet d'évaluer la déviation totale d'une configuration de saisie. La déviation est évaluée grâce à la distance D entre le centre réel de la saisie C_G et le centre de saisie théorique C_c (Fig. 1-7) [Chinellato05].

$$Q_{c2} = 2W \frac{C_G - C_c}{\eta\mu/2} \tag{1.15}$$

Avec η l'extension maximale des doigts et μ le coefficient de frottement.

- Positions des liaisons des doigts (critère intrinsèque à la main)

Dans une configuration donnée de prise, il est souhaitable qu'aucune valeur articulaire du doigt ne soit à sa limite physique. Il est ainsi utile de sélectionner une prise dont les valeurs articulaires des doigts soient aussi loin que possible des limites. Ce critère est utilisé pour mesurer les déviations des valeurs articulaires défini par :

$$Q_{c3} = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\theta_i - \theta_{0i}}{\theta_{i\,max} - \theta_{i\,min}} \right)^2 \tag{1.16}$$

où n est le nombre d'articulations des doigts. Les angles θ_i et θ_{0i} représentent respectivement, les positions courantes et moyennes de la liaison i. La minimisation du critère Q_{c3} fournit une configuration de prise dont les positions des liaisons sont proches de leurs positions moyennes.

Ces différents critères sont ensuite corrélés pour déterminer les meilleures saisies pour un objet donné.

1.3 Planification des saisies robotiques

1.3.1 Type de contact

La compréhension de la nature du contact est primordiale pour l'analyse des prises. Les forces ou les couples qui sont appliqués sur l'objet par la main robotique dépendent de la configuration de celle-ci et des forces d'adhérence. Le modèle de contact caractérise à la fois les forces qui peuvent être transmises à travers le contact et les mouvements relatifs entre l'objet et les doigts. Ces caractéristiques sont déterminées par la géométrie des surfaces de contact ainsi que les propriétés mécaniques des deux surfaces.

Les modèles de contact peuvent être classifiés suivant le type de contact. Chaque type de contact peut-être décrit par un modèle mathématique des efforts associés (Fig. 1-8).

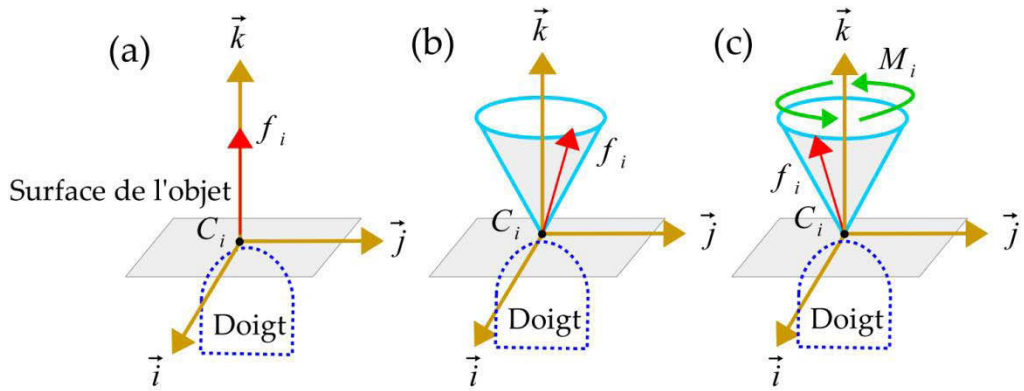

Figure 1-8 Modèle de contact, ponctuel sans frottement (a), ponctuel avec frottement (b), contact mou (c).

- *Le contact ponctuel sans frottement*

  Il s'applique si l'on considère qu'il n'y a pas de frottement entre le doigt et l'objet. Dans ce cas, les forces exercées sur l'objet sont normales à la surface de contact. Ce modèle est purement théorique, mais il est très utile quand le frottement entre les doigts et l'objet est négligeable ou inconnu [Bounab11].

- *Le contact ponctuel avec frottement*

  Plusieurs modèles sont proposés pour tenir compte du frottement lors de la prise [Stewart00]. C'est le modèle généralement utilisé dans le domaine de la manipulation robotique.

- *Le contact ponctuel déformable*

  Ce modèle permet d'introduire des moments de torsion frictionnels exercés autour de la normale à la surface de contact dus à la déformation de la surface de contact. C'est le modèle utilisé quand on considère que le bout du doigt et/ou l'objet sont déformables.

1.3.2 Nombre de contacts nécessaires

Pour une tâche de prise donnée, l'une des premières questions posée concerne le nombre de doigts nécessaires pour saisir l'objet. Une prise est principalement classée en deux types : *form closure* et *force closure*. Le nombre de doigts nécessaires pour obtenir une prise *form closure* ou *force closure* dépend essentiellement du type de contact à considérer entre le doigt et l'objet.

Pour un objet en équilibre saisi sans frottement, Mishra *et al*. dans [Mishra87] ont montrés que six contacts sont suffisants pour la saisie des objets 2D et que douze doigts sont suffisants pour des objets 3D. Pour le cas de prises avec présence de frottements, trois doigts sont suffisants pour des objets 2D, et quatre dans le cas 3D [Markenscoff99]. Ces résultats ont été établis en considérant un

triangle équilatéral pour le cas 2D et un tétraèdre régulier pour le cas 3D. Mirtich et Canny [Mirtich94] ont montré que dans le cas d'une prise avec des doigts hémisphériques en présence de frottement statique, tout objet 2D peut être saisi avec deux doigts et tout objet 3D avec trois doigts. Garzón et Feijoo [Garzón06] ont proposé un résumé du nombre de contacts suffisants pour obtenir une prise de type *force closure* (Tab. 1-1).

Objet	Contact sans frottement	Contact avec frottement	Contact mous
Bidimensionnel (2D)	6	3	3
Tridimensionnel (3D)	12	4	3

Tableau 1-1 Nombre de doigts requis pour saisir un objet

1.3.3 *Force closure* : formulation et état de l'art

La configuration des contacts de chaque prise peut être analysée pour vérifier la capacité de celle-ci à résister à des perturbations et à assurer des propriétés de dextérité. La réussite d'une tâche de manipulation repose notamment sur la qualité de la ou des prises choisies. Toutefois, il y a généralement plus d'une configuration de prise qui permet d'assurer le maintien de l'objet. Le choix d'une prise parmi plusieurs réalisables nécessite d'établir des critères qualitatifs aptes à extraire la bonne.

Avant d'aborder le choix de ces critères, notons que la prise doit tout d'abord être réalisable. Elle doit donc, en premier lieu, garantir la stabilité de l'objet saisi. Une propriété importante est donc requise pour la réalisation de la plupart des tâches de manipulation, il s'agit de la propriété *force closure* [Daoud11]. Cette propriété a été introduite par Reuleaux [Reuleaux63]. De nombreux travaux se sont orientés vers le développement d'algorithmes et de méthodes qui assurent des prises *force closure*. En intégrant le frottement aux contacts, une prise est dite *force closure* lorsque les torseurs transmissibles par les forces de contact peuvent équilibrer tout torseur de forces extérieures.

Mirtich et Canny [Mirtich94] ont présenté une étude sur la détermination des prises *force closure* optimales pour le cas de prise 2D et 3D. Les auteurs ont développé un critère optimal fondé sur l'espace des torseurs. Ce critère est utilisé pour évaluer les prises optimales à 2 et 3 doigts pour les objets 2D et les prises optimales à 3 doigts pour les objets 3D. Les algorithmes présentés sont simples et efficaces pour la prise d'objets polygonaux convexes et non-convexes.

Ponce et Faverjon [Ponce95] ont déterminé plusieurs conditions suffisantes pour la stabilité des prises d'objets 2D polygonaux avec trois doigts.

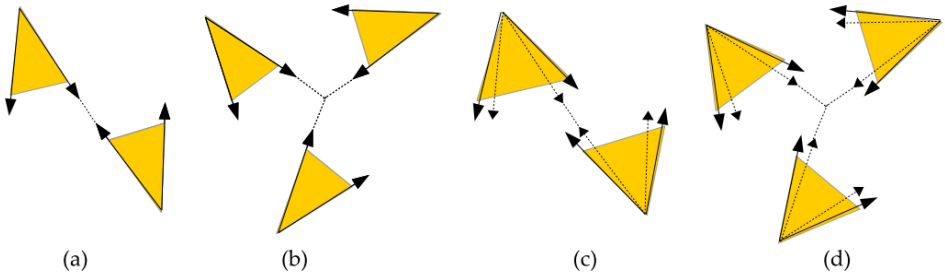

Figure 1-9 Prises planes par deux et trois doigts avec contact ponctuelle [Ponce95]

Une condition suffisante pour que trois doigts génèrent une prise en équilibre est liée au fait que les trois normales aux points de contact étendent positivement le plan de prise et que l'intersection des trois cônes de frottement n'est pas vide. Dans la figure 1-9, les triangles jaunes représentent les cônes de frottement au niveau des points de contact. Les saisies (a) et (b) sont en équilibre mais elles ne sont pas *force closure.* Les prises (c) et (d) ont des coefficients de frottement plus grands et réalisent la condition *force closure*.

Miller et Allen [Miller99] ont présenté un système d'analyse des prises pour des objets 3D. Ce système permet de déterminer la configuration de la main ainsi que le type de contact adéquat entre les doigts et l'objet. Il permet également une évaluation de la qualité de la prise basée sur la stabilité de l'objet. Cette étude a été effectuée sur des objets polyédriques.

Li [Li03] a développé une condition nécessaire et suffisante pour les prises des objets 2D à trois points de contact. Il a proposé un algorithme basé sur des calculs géométriques pour trouver une prise *force closure* d'objets polygonaux. Cette méthode considère que le contact est ponctuel avec frottement. Les trois points de contact étant connus, un plan appelé *plan de la prise* peut être défini. L'existence d'une prise *force closure* est testée par l'intersection entre les trois cônes de frottement et le plan de la prise. Si l'intersection d'un de ces cônes avec le plan de la prise conduit à un seul vecteur d'intersection, la prise n'est pas *force closure*.

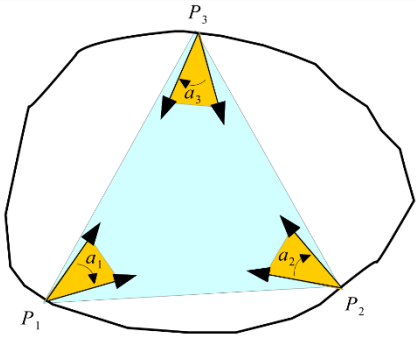

Figure 1-10 Prise *force-closure* avec trois doigts [Li03]

Niparnan et Sudsang [Niparnan04] ont proposé une approche permettant de déterminer les prises *force closure* à partir d'un ensemble de points sur la surface de l'objet. L'approche proposée peut être mise en œuvre pour une grande classe de formes de l'objet. L'intérêt de l'approche réside dans sa capacité à localiser efficacement les régions, dans un espace tridimensionnel, où les cônes de frottement s'intersectent afin de valider les conditions *force closure*.

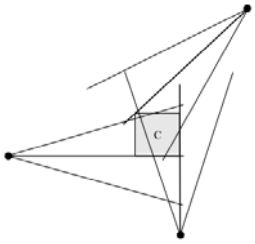

Figure 1-11 Zone d'intersection des cônes de frottement [Niparnan04]

Roa et Suàrez [Roa07] ont proposé une méthode géométrique permettant d'assurer des prises *force closure*, avec un nombre quelconque de doigts. La méthode proposée est basée sur une représentation des surfaces de l'objet par un nuage de points et applicable aux objets de formes arbitraires.

El-Khoury, Sahbani et Bidaud [El-Khoury11] ont présenté une analyse bibliographique sur la préhension robotique, l'interaction doigt-objet, la conception et le contrôle des mains robotiques. Les différents algorithmes de synthèse de prise ont été présentés et les différentes techniques d'apprentissage de prise ont également été mentionnées. Cette étude s'est concentrée sur les différentes approches de synthèse de prise analytiques et empiriques. En examinant la littérature liée à la préhension robotique, les auteurs ont constaté que les approches analytiques de type *force closure* sont stables mais ne répondent pas forcement aux exigences de la tâche. En effet, la stabilité est une condition nécessaire mais non suffisante pour la définition d'une stratégie de préhension robotique. Par conséquent, le développement de prises orientées tâche est indispensable pour une stratégie de préhension (Fig. 1-12).

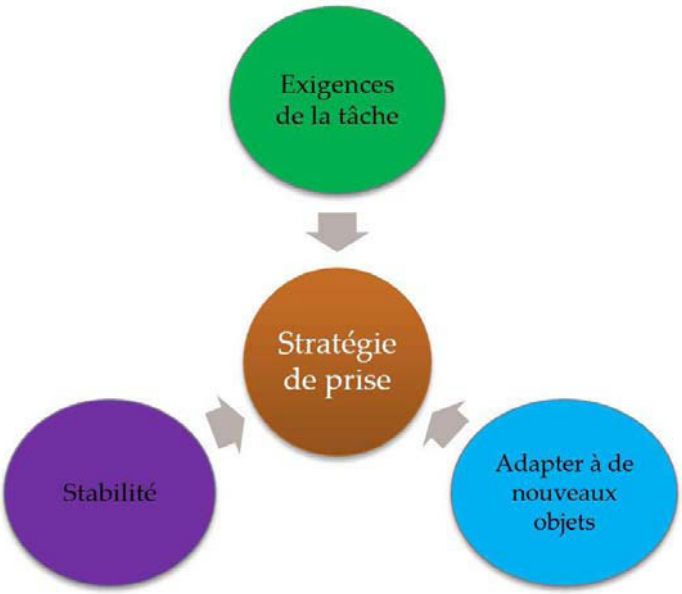

Figure 1-12 Stratégie de prise [El-Khoury11].

D'autres auteurs [Daoud11] ont présenté une méthode de synthèse de prise pour les tâches de manipulation en ligne. En utilisant trois doigts articulés, cette méthode est en mesure de fournir rapidement une prise initiale optimisée avant la manipulation de l'objet. Les auteurs ont utilisé l'algorithme donné par Li [Li03] pour assurer une prise *force closure*. Il est également essentiel de calculer les forces nécessaires pour manipuler l'objet et compenser les forces extérieures, mais également pour éviter ou minimiser le risque de glissement. Les auteurs ont proposé un algorithme non-linéaire d'optimisation pour calculer les forces à appliquer par les bouts des doigts afin d'assurer la stabilité de l'objet. Ils ont également montré que cette méthode est robuste et compatible avec les prises à trois doigts.

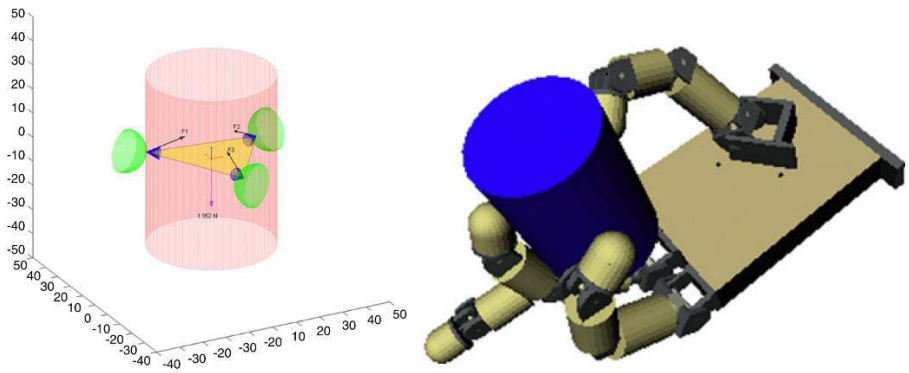

Figure 1-13 Prise *force closure* d'un cylindre [Daoud11]

Gilart et Suàrez [Gilart12] ont proposé une approche pour déterminer les points de contact assurant une prise *force closure* pour les doigts de n'importe quel type de main. Dans un premier temps des prises assurant le critère *force closure*

sont déterminées. Un ensemble de points de contacts accessibles par une main donnée est ensuite calculé itérativement.

Dans la partie suivante, nous présentons les principaux modèles utilisés pour décrire les corps mous. Nous comparons ces modèles afin d'en synthétiser les avantages et les inconvénients. Les principaux travaux liés à l'interaction robotique avec les objets déformables sont également présentés.

1.4 Modélisation des objets déformables

Comme nous l'avons déjà évoqué, la préhension et la manipulation de corps déformables par une main robotique sont des sujets d'étude très complexe mettant en jeu de nombreux processus. En plus des problématiques évoquées précédemment concernant la saisie et la manipulation de corps rigides, le comportement des matériaux déformables doit être pris en compte. Ceci peut être fait par exemple en utilisant des modèles de déformation comme ceux décrits dans la suite.

Les corps déformables sont omniprésents, que ce soit dans les parties internes de notre corps ou dans notre environnement. En mécanique numérique, de nombreux codes de calcul cherchent à reproduire le comportement d'objets divers : du plus dur au plus souple, du plus compressible à l'incompressible, d'une structure la plus simple à la plus complexe [Duriez04].

Les modèles d'objets déformables sont utilisés pour différentes applications médicales comme par exemple pour les simulateurs pédagogiques destinés à l'apprentissage du geste médical ou dans la chirurgie assistée par ordinateur (chirurgie interventionnelle). Ils sont également utilisés dans divers procédés de fabrication et en particulier dans l'industrie électronique et électrique, ainsi que dans les secteurs de l'automobile, de l'aérospatiale, de l'habillement (textile, cuir, vêtement) et dans les industries agro-alimentaires.

1.4.1 Critères du choix d'un modèle de corps déformable

La manipulation automatique d'objets déformables, sans capteurs extéroceptifs, nécessite l'évaluation préalable de la déformation de ceux-ci par l'utilisation de modèles approchés, avant la phase opérative, afin d'en assurer le succès dans une application réelle. L'utilisation de ces modèles est également importante pour la planification et la définition des stratégies de manipulation des objets déformables.

Le choix d'un modèle approprié, pour la planification des tâches de prise et de manipulation, est alors indispensable. Il est donc nécessaire de définir des critères pour réaliser un choix approprié. Ces derniers concernent

essentiellement le coût calculatoire du modèle et sa fidélité vis-à-vis du comportement réel lors d'interaction avec le système robotique. Nous résumons ces critères en deux popriétés principales attendues :

- *La modélisation réaliste des différents matériaux*

  Le modèle déformable doit être en mesure de représenter plusieurs types d'objets et différents types de comportement (élastique, viscoélastique, hyper-élastique, etc.).
  Le modèle doit représenter correctement les grandes déformations que peut subir un objet suite à des efforts appliqués par une main robotique (à plusieurs endroits) lors d'une opération de prise. Le modèle mécanique doit reproduire avec fidélité et réalisme le comportement mécanique du matériau modélisé lors de changement de topologie [Essahbi13].

  Un bon modèle assure la reproduction des déplacements réels du matériau sur sa version simulée pour des efforts appliqués similaires et par conséquent permet de reproduire la nouvelle géométrie du matériau pour toute interaction. Ce critère permet de satisfaire au mieux les attentes en termes de comportement mécanique global.

- *L'interactivité*

  L'interactivité est un critère important pour le choix du modèle. En effet, les opérations de préhension nécessitent une réactivité importante et donc un coût calculatoire du modèle faible. Le modèle doit donc fournir des estimations immédiates des déformations/déplacements des matériaux. En fait, comme nous le verrons par la suite, une estimation correcte du comportement dynamique de l'objet permet de développer une stratégie efficace de planification de tâche de préhension robotique.

1.4.2 Principaux modèles déformables

Les progrès technologiques récents ont permis d'envisager l'utilisation de simulations par ordinateur d'objets déformables dans le cadre de la formation ou de la planification de diverses opérations médicales. Plusieurs méthodes ont été proposées pour modéliser le comportement mécanique d'objets déformables. Ces modèles peuvent être classés en deux grandes catégories : les modèles non-physiques basés sur des concepts géométriques et les modèles physiques s'appuyant sur les lois de la physique.

- *Modèles non-physiques*

Les premiers modèles utilisés pour reproduire des déformations mécaniques sont basés sur des modèles non-physiques. L'objectif est de mettre en place des simulations et des animations suffisamment réalistes en apparence sans tenir

compte des lois physiques. Dans ces approches, les corps sont de nature géométrique et ne possèdent aucune propriété issue des lois de la physique. Les modèles non-physiques représentent les corps mous par une densité surfacique de points reliés entre eux par des fonctions mathématiques explicites (fonctions d'interpolation, courbes d'interpolation, B-Splines, etc.) ou par des équations scalaires (surfaces implicites).

Pour ces modèles, la courbe ou la surface est représentée par un ensemble de points de contrôle. L'utilisateur peut gérer tout type de mouvement ou de déformation en modifiant la position, l'orientation et la forme de l'objet initial par le déplacement ou la suppression des points de contrôle. Considérons l'exemple de la Spline cubique présenté dans la figure 1.14, cette courbe est définie mathématiquement par le positionnement des points de contrôle (a, b, c et d). Le déplacement d'un des points de contrôle change la courbe d'une manière prédictible.

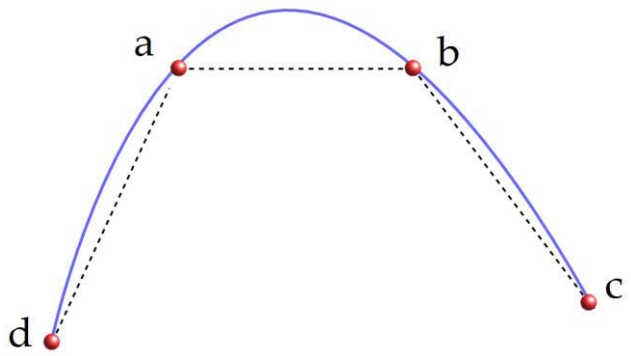

Figure 1-14 Spline d'interpolation

La majorité des techniques de modélisation géométrique des déformations sont présentées dans la thèse de Debunne [Debunne00]. Cependant, un des inconvénients de ces méthodes réside dans le manque de réalisme ce qui leurs donne un caractère plutôt visuel que physique.

Dans le contexte de la manipulation robotisée d'objets déformables, ces modèles ne sont pas adéquats car même s'ils peuvent conduire à des animations réalistes, ils ne tiennent pas compte des lois physiques. Afin d'améliorer le réalisme de la description des déformations, la communauté scientifique a développé de nouvelles méthodes basées sur les lois de la physique. On parle alors de *modèles physiques*.

- *Modèle physique*

Avec l'émergence des besoins de simulation dans le domaine biomédical et industriel, plusieurs travaux de recherche visant à proposer des algorithmes et des techniques de calcul appropriés à la simulation physique des déformations en

temps réel ont été développés. Ces modèles physiques peuvent être scindés en deux groupes :

- Les modèles discrets dans lesquels le solide est représenté par un ensemble de particules auxquelles sont associées un voisinage d'interaction.
- Les modèles continus dans lesquels le solide est décomposé en petits sous domaines appelés éléments (ou cellules) connectés les uns aux autres.

Ces modèles s'appuient sur des concepts issus de la mécanique des milieux continus (MMC). Le système masse-ressort et la méthode des éléments finis sont les principales techniques considérées pour la modélisation physique des objets déformables.

Système masse – ressort

De part sa simplicité et son aspect intuitif, le système masse-ressort a été largement et efficacement utilisé pour la modélisation d'objets déformables. En effet, les objets sont décrits par une combinaison de points (de masse donnée), liés par des ressorts caractérisés par leurs propriétés mécaniques (longueur au repos et coefficients de raideur et d'amortissement).

Les masses ponctuelles étant placées sur les nœuds d'un maillage leur distribution dépend alors de la nature des maillages employés. Les maillages les plus employés sont de type surfacique (Fig. 1-15.a) ou volumique (Figure 1-15.b) car ils fournissent une bonne description de l'objet.

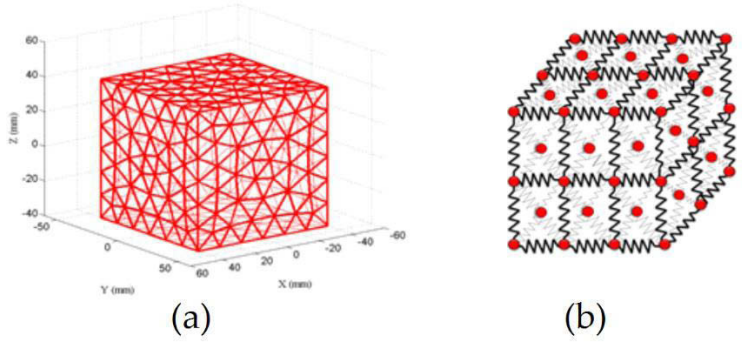

Figure 1-15 Maillages surfaciques triangulaires (a) et maillages volumiques tétraédriques (b)

Dans cette approche, le ressort qui relie une paire de nœuds définit une élasticité locale. Cela permet de calculer la force interne subie par chaque masse à chaque instant en fonction des distances à ses voisins. Ces forces internes sont souvent linéaires, cependant, l'utilisation de ressorts non linéaires permet d'obtenir des comportements élastiques non linéaires (grandes déformations). Ces forces sont définies par :

$$F_{ij}^{int} = \sum_{j \in V(i)} k^{ij} \left(l^{ij} - l_0^{ij}\right) \frac{\overrightarrow{p_i p_j}}{\left\|\overrightarrow{p_i p_j}\right\|} \tag{1.17}$$

où k^{ij} est la raideur du ressort entre le point p_i et son voisin p_j, $l^{ij} = \left\|\overrightarrow{p_i p_j}\right\|$ est sa longueur et $V(i)$ représente les points voisins du point p_i. Ce système décrit le comportement d'un objet déformable par les lois de Newton qui intègrent les forces, les couples et les énergies. Avec ce système dynamique, la seconde loi de Newton gouverne le mouvement de chaque point de masse p_i de l'objet modélisé par un réseau masse-ressort :

$$M_i \ddot{U}_i + D_i \dot{U}_i + F_{ij}^{int} = F_i^{ext} \tag{1.18}$$

Pour chaque nœud i, U_i est le vecteur position, $\dot{U}_i$ et $\ddot{U}_i$ sont sa vitesse et son accélération. M_i est la masse ponctuelle au noeud i, D_i est le coefficient d'amortissement et F^{ext} désigne les forces externes appliquées à l'objet, comme la gravité.

Le modèle masse-ressort a l'avantage d'être facile à implémenter. De plus, il permet de modéliser les grandes déformations et les modifications de changement de topologie de l'objet avec une résolution en temps réel. Par conséquent, ces modèles sont utilisés dans de nombreuses applications, notamment, la simulation des déformations de la peau, des vêtements, des muscles et des tissus [Platt81]. Ces systèmes ont permis aussi à Miller [Miller88] de modéliser le mouvement d'animaux de type serpents, vers ou poissons.

Le modèle masse-ressort a donné lieu à plusieurs travaux dans le domaine médical. On peut citer à titre d'exemple les travaux de simulation du comportement dynamique d'organes humains dans des simulateurs chirurgicaux [Meseure00, Zerbato07, Xu10]. On retrouve également des applications dans la simulation de textiles [Liu11, Hwang11].

Les systèmes masse-ressort présentent cependant certains inconvénients. Les résultats obtenus en termes de comportement mécanique sont parfois peu réalistes si le maillage utilisé est peu dense et le coût calculatoire dépend fortement de la taille et de la résolution du maillage. La réduction du coût calculatoire a donc un prix, celui de la précision. En outre, le comportement du modèle dépend fortement de la topologie du maillage choisi. Une autre difficulté de ce type de modèle réside dans l'identification des paramètres masses, raideurs et coefficients d'amortissement.

Le modèle éléments finis

La méthode des éléments finis (MEF) est la technique la plus répandue pour la modélisation d'un matériau déformable. La performance des outils

informatiques a permis à cette méthode de connaître un formidable essor et elle fait encore l'objet de nombreuses publications en mécanique et en mathématiques appliquées. La formulation des éléments finis est basée sur l'utilisation des équations de la mécanique des milieux continus et intègre naturellement les caractéristiques physiques de l'objet à simuler (module de Young, coefficient de Poisson) permettant d'avoir une simulation réaliste du comportement de l'objet. En effet, cette approche est basée sur la discrétisation (maillage) d'un objet donné en un ensemble de sous-domaines appelés *éléments* et dont la forme géométrique est relativement simple (Fig. 1-16). Ces éléments peuvent être de différentes formes. En 2D, les formes les plus couramment utilisées sont les triangles ou les quadrilatères. En 3D, ce sont les tétraèdres ou les hexaèdres. Les propriétés physiques sont alors estimées en tout point de ces éléments en interpolant leurs valeurs à partir de certains points de contrôle appelés *nœuds*. Dans les cas les plus simples, ces nœuds sont situés aux sommets de l'élément. Puis un processus d'assemblage, prenant en compte la connectivité entre tous les éléments, mène à la construction d'un ensemble d'équations à résoudre.

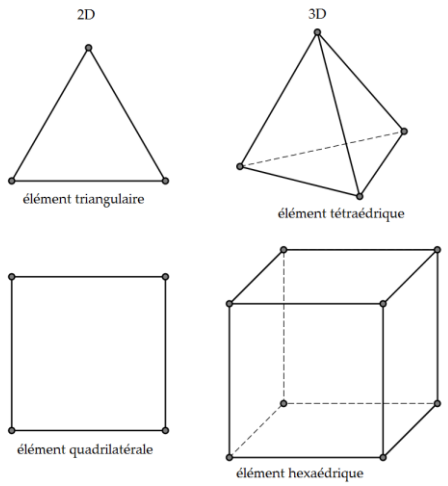

Figure 1-16 Principaux types d'élément

Les champs de forces et de déplacements dans chaque élément sont approximés par des fonctions d'interpolation continues [Chendeb07]. La relation entre les déplacements nodaux et la force appliquée suit la loi de Hooke où une équation d'équilibre continu est approchée pour chaque élément. Par conséquent, les méthodes des éléments finis permettent une précision beaucoup plus élevée que les méthodes basées sur des systèmes masses-ressorts.

Dans le champ de l'informatique graphique, des auteurs [Wu01] ont utilisé la MEF pour la simulation réaliste de l'interaction avec les objets déformables, dans l'objectif de l'appliquer au domaine de la formation en chirurgie. D'autres auteurs [Kosuge95] ont utilisé la modélisation MEF pour contrôler la déformation statique d'une plaque manipulée par un système bi-bras. Luo et

Nelson [Luo01] ont utilisé la MEF et la fusion des informations sensorielles (vision et force) pour le contrôle de la déformation d'un d'objet déformable linéaire sous forme de contours actifs ou de serpent. Cette approche permet de visualiser les changements de forme de l'objet pendant le processus de manipulation. Garg et Dutta [Garg06] ont utilisé la MEF pour contrôler la saisie et la manipulation d'un objet déformable où la déformation dépend des forces appliquées par les doigts. Dans les travaux récents [Jia13, Lin14], la MEF et la théorie d'élasticité linéaire ont été exploitées pour la modélisation des déformations d'objets planaires.

La MEF génère un comportement physique plus réaliste que les méthodes basées sur des systèmes masses-ressorts. Cependant, elle exige un temps de calcul beaucoup plus important et elle est donc difficile à utiliser pour des simulations en temps réel. Les principaux processus consommateur de ressource informatique sont la discrétisation de l'objet et le calcul des matrices de rigidité. De part leurs propriétés, les méthodes basées sur les éléments finis peuvent être réservées à l'étude des positions d'équilibre statique et non à l'évolution dynamique des objets au cours du temps. L'emploi d'un tel modèle nécessite également la spécification des conditions limites de l'objet simulé. Il est alors difficile d'obtenir des temps de calculs compatibles avec l'interactivité requise par nos applications.

Une classification de différentes méthodes de modélisation, en fonction de leurs formalismes, de leurs complexités et de leurs réalismes physique est présentée dans le tableau 1-2 [Chendeb07].

	Masse-Ressort	*Elément finis*
Facilité de mise en œuvre	★★★	★
Temps réel	★★★	★
Réalisme physique	★	★★★
Changement de topologie	★★★	★
Grandes déformations	★★	★★
Grands déplacements	★★★	★

Tableau 1-2 Tableau comparatif des deux méthodes masse-ressort et élément finis

1.5 Interaction robotique avec les objets déformables

En complément de la modélisation et de la simulation d'objets déformables, d'autres efforts de recherche en robotique ont été consacrés au problème de la modélisation du processus physique de manipulation.

Howard et Bekey [Howard97, Howard00] ont présenté un algorithme d'apprentissage généralisé pour la manipulation d'objets déformables 3D, où la connaissance préalable des caractéristiques de l'objet n'est pas nécessaire. Cela permet d'appliquer cette méthode à plusieurs types d'objets. Dans cette approche, la déformation est modélisée par un système masse-ressort. Afin de tenir compte de la gravité pendant la réalisation de la tâche (manipulation et prise), les auteurs ont proposé une démarche en deux étapes. La première étape consiste à calculer les caractéristiques de déformation de l'objet à l'aide d'un modèle physique approprié. La deuxième étape, consiste à calculer la force minimale requise pour soulever l'objet. Ces forces sont obtenues par une technique appelée *levage itératif*. Le principe de cette technique est de répéter la tâche de préhension tout en mesurant les forces appliquées par les doigts. Une fois les caractéristiques de déformation et les forces de levage déterminées, elles sont utilisées comme données d'entrées dans une table d'index pour extraire la force minimale requise pour les prochaines tâches de manipulation.

Hirai, Tsuboi et Wada [Hirai00] ont proposé une méthode de suivi visuelle en temps réel pour la manipulation d'objets déformables planaires. Elle combine des retours tactiles et visuels pour commander le mouvement d'un objet déformable en 2D. Cette approche est basée sur le suivi des positions des marqueurs placés sur la surface de l'objet. Ces marqueurs sont considérés comme points de référence et permettent de déterminer la déformation de l'objet. Des capteurs tactiles permettent de mesurer les forces appliquées par chaque doigt afin de déterminer leurs mouvements.

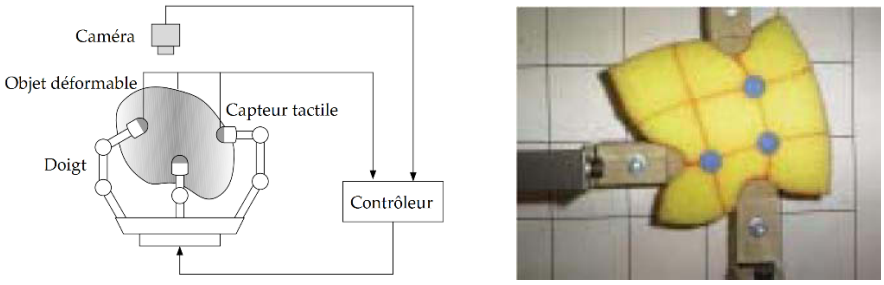

Figure 1-17 Configuration de la prise de l'objet déformable [Hirai01]

Dans cette stratégie, le système de vision est inefficace lorsque les doigts sont occultés et couverts par l'objet déformé. Dans le cas d'objet 3D, il est également très difficile d'observer les déplacements et les rotations des marqueurs.

Doulgeri et Peltekis [Doulgeri04] ont présenté un modèle simplifié pour manipuler les objets déformables par des contacts roulants. Ils ont prouvé et démontré par simulation, qu'à travers des lois simples de contrôle, il est possible de manipuler l'objet avec une configuration de préhension stable.

Wakamatsu et Hirai [Wakamatsu04] ont examiné comment les principes de *force-closure* et de *form closure* pouvaient être appliqués à la saisie d'objets déformables. Ils ont montré que l'approche *form closure* n'est pas applicable aux objets déformables en raison du nombre infini de degrés de liberté.

Gopalakrishnan et Goldberg [Gopalakrishnan05] ont essayé d'étendre le principe de *form closure*, développé pour les objets rigides, à la manipulation des objets déformables. En considérant des objets planaires, modélisés en tant que polygones avec un maillage triangulaire. Un algorithme basé sur le calcul de l'énergie potentielle a été proposé pour obtenir une configuration d'équilibre. Une prise *form closure* est alors définie en considérant deux points de contact sans frottement.

Saha et Isto [Saha06] ont proposé une méthode de planification de mouvement pour la manipulation d'objets déformables linéaires par une coopération de deux bras robotiques pour obtenir une configuration d'équilibre. Une prise de *form closure* est alors considérée avec deux points de contact sans frottement.

F. Khalil et P. Payeur proposent [khalil10] un état de l'art centré sur les stratégies de manipulation d'objets déformables. Dans cet article, les auteurs décrivent les différents travaux liés à la manipulation d'objets déformables avec un focus particulier sur les méthodes intégrants des systèmes multi-sensoriels (capteurs tactiles, d'effort et de vision en particulier). A partir d'une vue d'ensemble des différentes techniques de modélisation et de contrôle appliquées à la manipulation robotique d'objets rigides, cet article montre comment ces approches peuvent être étendues au cas de manipulation des objets déformables. Les auteurs ont recensé que la plupart des méthodes de modélisation et de contrôle sont appliquées à la manipulation d'objets déformables en 1D et 2D et qu'il y a encore peu de travaux sur la manipulation d'objets déformables en 3D. Ils notent également que la dextérité, dans des opérations de préhension des objets déformables, reste un sujet ouvert.

Le problème du contrôle de la déformation se pose également dans les applications où un manipulateur mécanique doit modifier de manière active la forme d'un objet déformable en une forme désirée. Malgré les progrès récents, le problème d'indentification et d'estimation de la déformation active d'un objet déformable reste un sujet ouvert. D'autres auteurs [Navarro13] ont développé un contrôleur de déformation actif basée sur un système de vision pour les robots manipulateurs interagissant avec des objets déformables inconnus. Cette approche exploite un retour visuel pour estimer la matrice Jacobienne de déformation en temps réel, en évitant toutes les étapes d'identification.

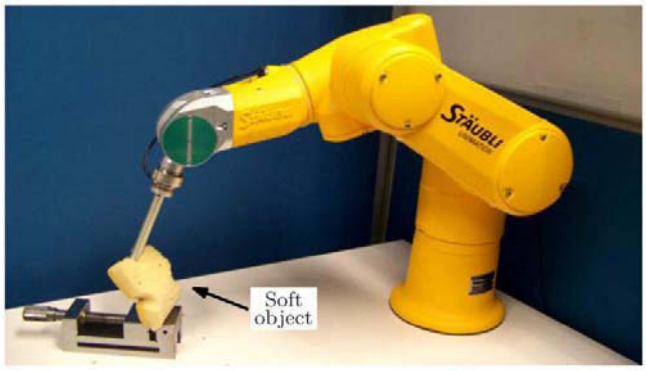

Figure 1-18 Robot manipulateur en interaction avec un objet déformable inconnu [Navarro13].

D'autres auteurs [Frank14] ont proposé une stratégie de planification pour les robots interagissants avec des objets déformables. La stratégie proposée permet d'acquérir les modèles de déformation des objets réels. Au cours de l'interaction physique avec l'objet, en établissant une relation entre les forces appliquées et les déformations de la surface qui en résultent, le robot détermine les paramètres d'élasticité de l'objet. Ces propriétés de déformation sont ensuite sauvegardées et utilisées pour effectuer des simulations physiquement réalistes à l'aide de la méthode des éléments finis. Ceci permet au planificateur d'évaluer les trajectoires du robot et de prédire les déformations des objets durant l'accomplissement de la tâche. Cette méthode permet au robot de naviguer avec succès dans des environnements constitués d'objets déformables.

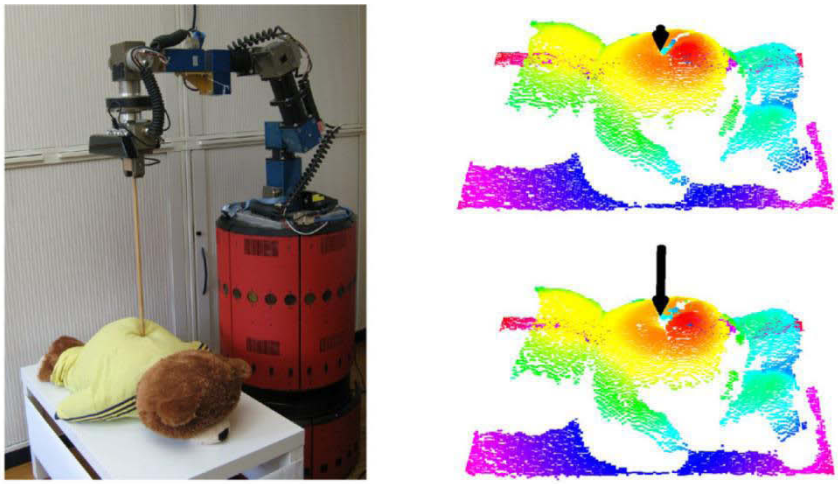

Figure 1-19 Dispositif expérimental (a), exemples de mesures de déformation (b) [Frank14]

Berenson [Berenson13] a présenté une approche dans le cadre de la manipulation d'objets déformables sans modélisation et simulation de la déformation. Cette méthode est basée sur le concept de la diminution de la rigidité afin de calculer la matrice Jacobienne de l'objet déformable et elle a l'originalité d'intégrer des stratégies d'évitement de collision et d'étirement excessif des objets 2D. L'auteur suppose que les doigts se déplacent quasi-

statiquement. Cette méthode ne peut donc pas être appliquée à des situations où un mouvement dynamique est nécessaire pour accomplir la tâche.

Sous l'hypothèse de faibles déformations, d'autres auteurs [Jia13] ont proposé une stratégie pour la préhension d'un objet déformable 2D par deux doigts rigides. Celle-ci est basée sur le contrôle des déplacements des doigts plutôt que des forces dues à l'interaction. La MEF basée sur la théorie d'élasticité linéaire est utilisée pour décrire la déformation de l'objet et les contacts sont considérés avec frottement. On notera que dans ce travail, la gravité et les aspects dynamiques sont ignorés. Les différents phénomènes de contact dus à l'interaction entre les doigts et l'objet, comme le glissement et l'adhésion sont analysés. Une approche basée sur l'énergie de déformation et le travail des forces de contact est proposée pour mesurer la qualité de prise.

Plus récemment d'autres auteurs [Lin14] ont proposé une stratégie pour la préhension d'un objet déformable 3D placé sur une table en utilisant deux doigts rigides. L'hypothèse d'un contact ponctuel avec frottement est adoptée. L'objet est modélisé par la MEF basée sur la théorie de l'élasticité linéaire (Fig. 1-21).

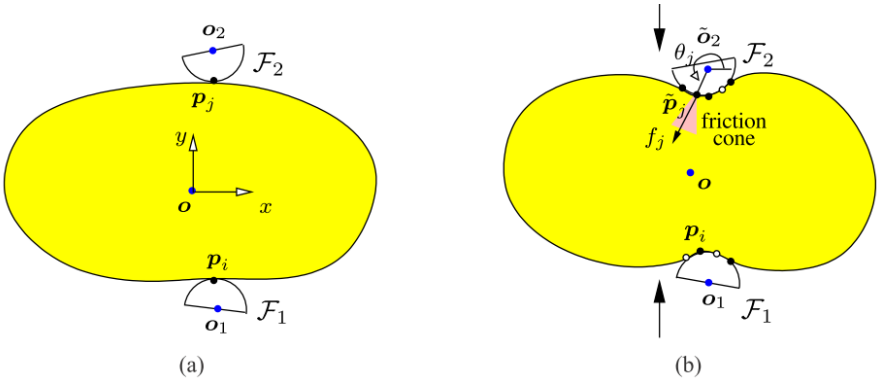

Figure 1-20 Objet à l'état initial (a), durant la tâche de prise (b) [Jia13]

Durant le processus de manipulation, les déformations de l'objet et les contacts avec les doigts et la table sont suivis. Afin d'éviter tout mouvement de l'objet, les deux doigts sont initialement placés de manière à assurer une prise *force closure*. Une fois les doigts positionnés, le processus de prise commence. Les doigts commencent à presser légèrement l'objet vers le bas contre la table. Cela permet d'augmenter les zones de contact et par conséquent de limiter davantage toute rotation ou translation de l'objet. La stratégie de prise peut être décomposée en deux étapes :

- La première étape consiste à trouver les forces nécessaires pour soulever l'objet. Pour cette étape, les auteurs proposent un test de *levage* (*liftability*), dont le principe est de vérifier, à chaque itération, la capacité des forces appliquées par les doigts à soulever l'objet. Une fois le test réussi, les doigts

arrêtent de serrer l'objet et appliquent une translation vers le haut pour le lever.

- La deuxième étape consiste à analyser le contact entre les doigts et l'objet. Cette étape permet la mise à jour des déformations de l'objet à partir des mouvements des doigts. Pour cela les auteurs supposent que l'opération de prise génère de petites déformations de l'objet.

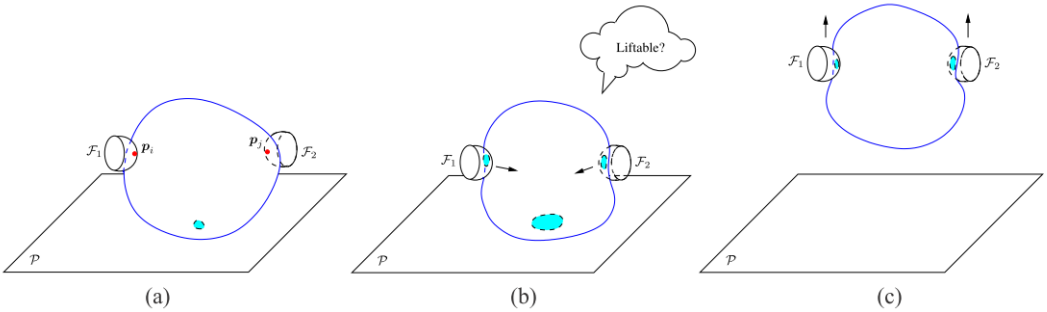

Figure 1-21 Préhension de l'objet déformable (a), configuration initiale du placement des doigts (b) et test de *liftabilaty*, soulèvement de l'objet (c) [Lin14]

Dans ces travaux, le placement des doigts et la relation entre les déformations et les forces ne sont pas traités. En outre, les actions sont supposées quasi-statiques, ce qui ne convient pas pour les applications temps réel et pour les cas où l'objet subit de grandes déformations lors de la saisie.

D'autres auteurs [Papacharalampopoulos15] ont présenté une méthode d'estimation de la forme de câbles flexibles pour une tâche d'assemblage robotisée, en considérant leur comportement mécanique. Les déformations des câbles sont décrites par une équation différentielle du second ordre. Dans ces travaux, le comportement dynamique de la déformation est considéré comme un processus quasi-statique.

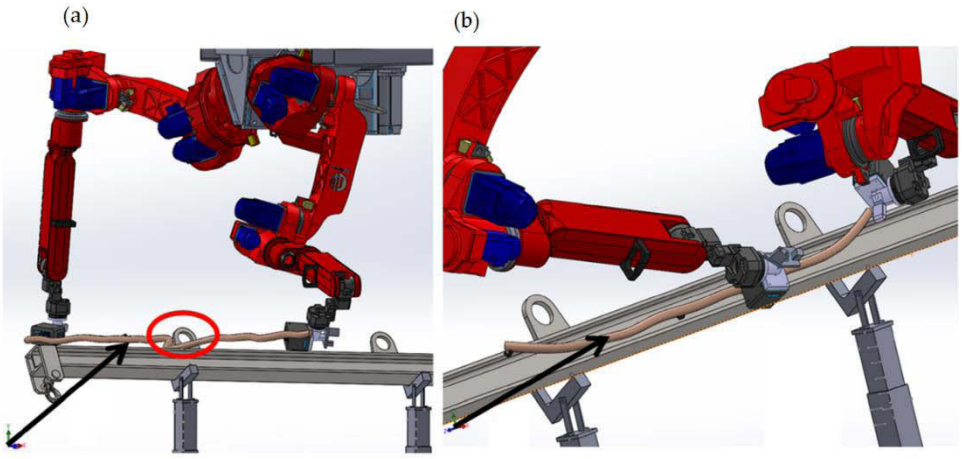

Figure 1-22 Configuration d'assemblage automatique de câble par un robot à deux bras (a), détection de collision au cours de la manipulation et positionnement du câble (b) [Papacharalampopoulos15]

Dans le cadre du projet ANR ARMS : a multi Arms Robotic system for Muscle Separation, les auteurs [Long14] proposent une stratégie de contrôle force/vision pour la découpe d'objets déformables par une tâche de coopération à deux bras. Le premier bras robotique est équipé d'un couteau et d'un système de vision et le deuxième bras robotique est équipé d'un outil de préhension assurant une traction sur l'objet afin d'ouvrir la vallée de coupe. Le système de vision permet la mise à jour de la trajectoire du premier bras robotique afin de suivre une trajectoire antérieure de découpe. Le dispositif de contrôle en effort du second bras est utilisé pour assurer une découpe sans déformation globale ou détérioration de l'objet. Dans cette application, le modèle de déformation de l'objet n'est pas pris en compte et la trajectoire n'est recalée qu'en 2D.

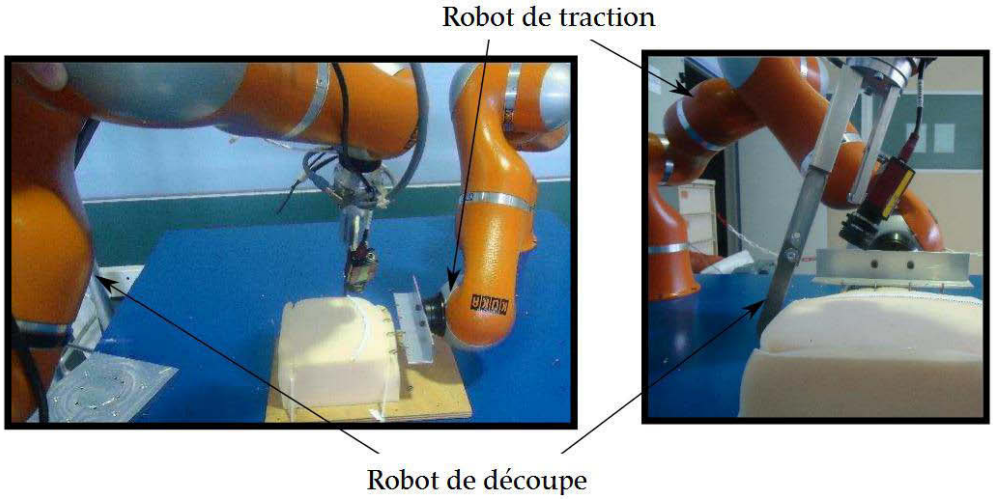

Figure 1-23 Découpe et séparation d'objet déformable [Long14]

L'objectif final de ce projet vise la séparation de deux muscles. Cette tâche nécessite le recalage en 3D de la trajectoire de coupe et la prise en compte du comportement en déformation des muscles soumis à des efforts par le bras de préhension, afin de reproduire le travail de l'opérateur humain (Fig. 1-24). Cette opération étant très complexe, un certain nombre de verrous scientifiques subsistent et concernent nos travaux. Dans le cadre de cette application, il s'agit en particulier de modéliser les déformations de l'objet soumis à des efforts (traction/torsion) et de planifier et contrôler la trajectoire du bras de robot munis du préhenseur.

Figure 1-24 Séparation de deux muscles par système multi-bras

Les matériaux déformables semi-solides tels que les produits alimentaires constituent également une gamme d'objets très répandue. La manipulation robotisée de ce type d'objet a un potentiel applicatif important (par exemple pour la robotique de support domestique). Gemici *et al*. [Gemici14] ont présenté une approche permettant de modéliser et de caractériser les propriétés physiques de matériaux déformables semi-solides tels que les produits alimentaires à partir des capteurs internes du robot. Ces actions impliquent l'utilisation de fourchettes et de couteaux pour obtenir, à partir des données haptiques, des informations sur les propriétés physiques de l'objet (dureté, plasticité, élasticité, résistance à la traction, fragilité, adhérence).

Figure 1-25 Utilisation des capteurs haptiques d'un robot personnel afin d'acquérir les propriétés physiques des objets alimentaires pour la définition des stratégies de manipulation [Gemici14]

Un axe de développement important dans le domaine de la robotique concerne la collaboration entre plusieurs robots pour des tâches de manipulation. Cet axe de développement devrait permettre une grande flexibilité et une automatisation de procédés variés, comme ceux du secteur de l'aéronautique.

Plusieurs approches ont été proposées pour la manipulation d'objets rigides par plusieurs robots mobiles. En revanche, la manipulation d'objets déformables par plusieurs robots en collabaration reste un sujet ouvert.

Alonso-Mora *et al.* [Alonso-Mora15] ont présenté une méthode de manipulation collaborative de toiles de formes variables. L'objet est représenté par un ensemble de triangles (figure 1-26 (a)) et traité comme un polygone reconfigurable. La configuration et la déformation de l'objet sont mises à jour à partir des positions des points de préhension. Cette méthode est basée sur une modélisation purement cinématique des robots et de l'objet pour une vitesse de déplacement constante. Un planificateur global de mouvement est utilisé pour la génération des trajectoires de l'ensemble des robots. Celui-ci tient compte des obstacles statiques et dynamiques, qui peuvent être présents dans l'environnement de la tâche, sans une étape de pré-calcul.

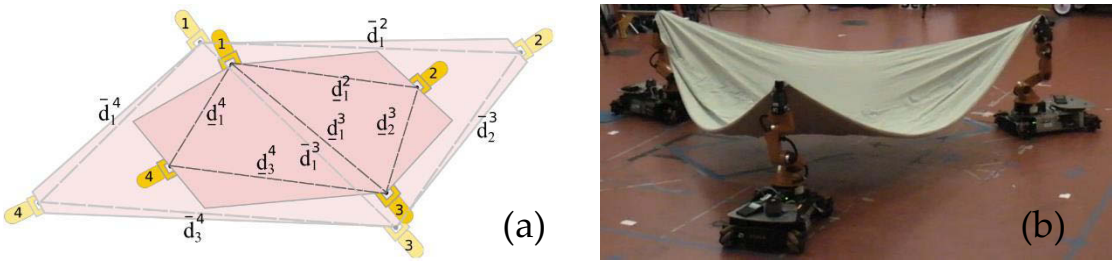

Figure 1-26 Représentation d'un objet déformable avec triangulations de taille minimales et maximales par rapport aux points de préhension (a), trois manipulateurs mobiles portant un drap déformable (b) [Alonso-Mora15]

Une autre application [Kruse15] concerne la manipulation coopérative d'un tissu mou par un robot bi-bras et un homme. Le robot a pour objectif de maintenir le tissu tendu, tout en respectant les mouvements de l'opérateur humain. Le robot détecte les efforts de contact afin de maintenir un effort de traction approprié (suffisamment élevé pour éviter tout affaissement et suffisamment faible pour éviter le déchirement) tout en respectant les mouvements de l'opérateur humain. Pour assurer la réalisation de cette tâche, les auteurs ont utilisé une combinaison de retour d'effort et de retour visuel afin de commander les mouvements du robot.

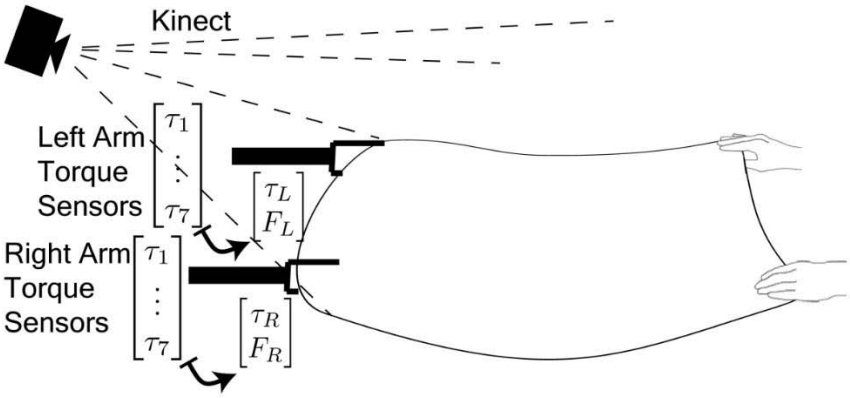

Figure 1-27 Configuration d'une manipulation coopérative homme-Robot [Kruse15]

1.6 Conclusion

Ce chapitre a été consacré aux rappels des concepts relatifs à l'analyse, à la synthèse, aux mesures de la qualité des prises et à l'étude bibliographique relative au domaine de la préhension robotique.

Dans la première partie, après avoir rappelé quelques définitions et notions relatives à la préhension robotique, nous avons présenté les principales propriétés caractérisant une saisie d'objet rigide et les critères fondamentaux de mesure de qualité utilisés pour l'évaluation des prises. Ensuite, nous avons recensé les principaux algorithmes *force closure* de la littérature pour la planification des prises multi-doigts. Finalement, nous avons présenté les différents modèles de contacts utilisés dans ce domaine, ainsi qu'une étude sur le nombre de points de contact nécessaires à la réalisation d'une prise *force closure*.

Dans la deuxième partie, nous avons tout d'abord détaillé les principales méthodes de modélisation d'objets déformables et les travaux récents liés à l'interaction robotique avec des objets déformables. Nous avons également présenté les deux grandes familles de modèles numériques. La première concerne, les modèles dits *discrets*, les plus utilisés par la communauté informatique en raison de leurs simplicités et de leurs coûts calculatoires raisonnables. La seconde concerne, les modèles dits *continus* basée sur la MMC qui conduisent à des résultats de simulation assez fidèles à la réalité mais qui ont un coût calculatoire important.

Cette étude bibliographique montre que malgré les évolutions importantes dans le domaine de la manipulation robotique des objets rigides, le problème de préhension d'objets déformables constitue encore un défi majeur de la recherche. En plus des problématiques relatives à la manipulation rigide, il faut en effet tenir compte des interactions complexes entre les corps déformables et les manipulateurs. Cela constitue un challenge important en particulier dans le cas

d'objet se déformant dans les trois dimensions de l'espace. Ce challenge constitue précisément l'objectif principal de nos travaux. Nous nous intéressons en particulier aux les tâches de préhensions et de manipulations d'objets pouvant subir de grandes déformations alors que les travaux de la littérature considèrent le plus souvent des déformations de faible amplitude.

Nous exploitons des critères de stabilité développés initialement pour des objets rigides. Pour garantir la robustesse de la prise, la configuration initiale des doigts est considérée comme une prise *force closure*. En considère des contacts mous avec frottement, trois doigts sont suffisants pour assurer la stabilité de la prise de l'objet. C'est pourquoi nous limitons notre étude au cas de mains robotiques à trois doigts pour assurer trois contacts avec l'objet déformable.

La manipulation d'un objet déformable nécessite la modélisation de son comportement lorsqu'il est soumis aux efforts des doigts. Dans ce chapitre, nous avons analysé les méthodes de modélisation et synthétisé les résultats dans le tableau 1-2. Ce tableau montre clairement l'avantage(en terme de facilité de mise en œuvre, de rapidité de calcul et d'adaptation pour les grandes déformations) des modèles basés sur des systèmes masse-ressort dans le cadre de notre application. Par conséquent nous adoptons les systèmes masse-ressort pour la modélisation des objets déformables.

Comme nous l'avons déjà mentionné à plusieurs reprises, la modélisation de l'interaction entre la main multi-doigts et l'objet déformable est un enjeu majeur dans notre contexte applicatif. La complexité de l'interaction découle du lien entre le changement de la forme de l'objet et les efforts qui lui sont appliqués. Nous présentons dans le chapitre suivant le modèle de contact développé pour la modélisation de l'interaction entre les doigts et l'objet déformable. La stratégie de planification globale de préhension adoptée sera quant à elle décrite dans le chapitre 3.

2 Modélisation de l'interaction main robotique – objet déformable

Ce chapitre est consacré à l'étude des interactions d'une main robotique avec des objets déformables. La problématique adressée concerne plus particulièrement la modélisation des contacts. En effet, la définition d'un modèle de contact entre une main robotique et un objet à grande déformation reste un problème complexe en raison des non linéarités associées au comportement des objets déformables et aux forces de contacts. Nous nous sommes donc attelés au développement d'un nouveau modèle de contact en vue de simuler et commander des tâches de préhension de corps mous. Le modèle de contact proposé a été vérifié pour le cas simple d'une balle rebondissant sur un plan, puis appliquée à la simulation d'une opération de saisie d'un objet déformable par une main robotique.

2.1 Contexte 53
2.2 Modèles de contact existants 54
2.3 Modèle de contact proposé : doigt rigide – corps déformable 60
2.3.1 Calcul des forces normales 60
2.3.2 Calcul des forces tangentielles 61
2.3.3 Application à un cas simple : bille sur plan 63
2.4 Application à un objet déformable 69
2.4.1 Hypothèses de modélisation 69
2.4.2 Schéma global de simulation du modèle 70
2.4.3 Calcul des forces de contact 71
2.4.4 Distribution des forces de contact sur les nœuds 76
2.4.5 Détermination des forces de prise 77
2.5 Conclusion 78

2.1 Contexte

La maîtrise des procédés robotisés repose sur le contrôle des interactions du système robotique avec son environnement. De nombreux travaux se sont intéressés au contrôle des mouvements et des efforts d'interaction de l'effecteur d'un robot en contact avec des objets généralement rigides [Bicchi00, Mason01, Joonhee12, Gabiccini13, Seo15]. Certains travaux récents relatifs à la préhension avec une main robotique ont considéré la déformation des bouts des doigts lors de la prise d'objets rigides [Shimoga96, Xydas99, Kao04, Ciocarlie07, Garcia-Rodriguez11, Harada14]. Cependant, peu de travaux ont étudié l'interaction de mains robotiques avec des objets déformables. Cela est essentiellement dû à la complexité du comportement mécanique de ces objets.

Dans le cadre de la préhension d'objets déformables, la modélisation de l'interaction entre une main robotique et ces objets nécessite une attention particulière pour représenter le comportement au niveau des contacts à travers des relations effort – déplacement à établir. Nous présentons tout d'abord les

principaux modèles de contact existants et leurs applications pour la modélisation de l'interaction d'une main robotique avec des objets déformables.

2.2 Modèles de contact existants

La prise en compte des forces de contact est primordiale dans plusieurs applications impliquant l'interaction entre plusieurs objets. Les méthodes présentés dans la littérature, permettant de modéliser les contacts dans des systèmes multi-corps peuvent être classées en deux familles [Lankarani90, Flores06, Flores08] : les approches discontinues et les approches continues.

Les approches discontinues supposent que l'interaction se produit instantanément en changeant l'équilibre du système de façon instantanée. Quant aux approches continues, elles sont basées sur des modèles qui relient les forces et les déformations des corps en collision [Hunt75, Pfeiffer96]. Dans les applications où des contacts permanents sont possibles, les méthodes continues sont nécessaires [Ismail08, Butcher00]. Si l'application considérée comprend, en outre, l'interaction avec un objet susceptible de subir de grandes déformations, la modélisation est plus complexe et doit prendre en compte le comportement mécanique des objets. Dans nos travaux, nous retenons les modèles de contact continus car ils permettent de mettre en relations les forces et les déformations des corps en contact.

La modélisation du contact entre corps déformables, à travers la détermination des forces normales et tangentielles à la surface de contact, a été abordée dans plusieurs travaux. La loi la plus connue pour la modélisation de la force normale de contact est la loi de Hertz. Elle est utilisée pour décrire l'interaction entre deux sphères de matériaux isotropes. Cette loi est limitée aux contacts avec des petites déformations élastiques linéaires. Par conséquent, le processus de contact peut être décrit comme deux corps rigides interagissant via un ressort le long de la ligne d'action de la force normale. L'expression originale de ce modèle ne comprend pas l'amortissement. La force normale est donnée par :

$$f_N = \mathrm{k}\delta^{\mathrm{n}} \tag{2.1}$$

où k est la constante de rigidité et δ est la déformation normale relative entre les deux sphères (Fig. 2-1). La valeur de k dépend des propriétés des matériaux et de la forme des surfaces en contact. La constante de rigidité est exprimée en fonction du rayon des deux sphères (R_i et R_j) et des propriétés mécaniques de leurs matériaux [Goldsmith60] comme suit :

$$k = \frac{4}{3\left(\sigma_i + \sigma_j\right)}\left[\frac{R_i\, R_j}{R_i + R_j}\right]^{1/2} \tag{2.2}$$

où les paramètres du matériau σ_i et σ_j sont donnés par :

$$\sigma_k = \frac{1 - v_k}{E_k}, (k = i, j) \tag{2.3}$$

v_k et E_k représentent respectivement le coefficient de Poisson et le module de Young associés à chaque sphère.

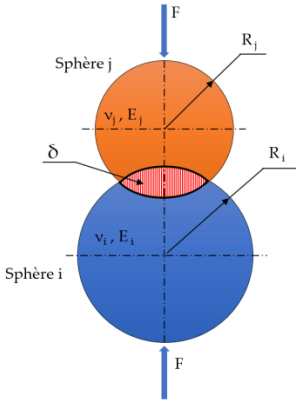

Figure 2-1 Contact entre deux sphères

Par la suite, plusieurs modèles de contact ont été développés pour tenir compte de la dissipation d'énergie à l'impact par l'intégration de l'amortissement comme par exemple le modèle de Kelvin-Voigt. Ce modèle est représenté par un ensemble ressort-amortisseur en parallèle [Zukas82]. Le ressort représente l'élasticité des corps en contact tandis que l'amortisseur rend compte de la dissipation d'énergie cinétique lors de l'impact. Dans la plupart des études, les constantes de rigidité et d'amortissement sont supposées connues. Ce modèle suppose également que le ressort et l'amortisseur sont linéaires.

La force normale de contact donnée par le modèle Kelvin-Voigt, est calculée par :

$$f_N = \begin{cases} k\delta & \text{si } \|\vec{V}_n\| > 0 \\ k\delta c_e & \text{si } \|\vec{V}_n\| < 0 \end{cases} \tag{2.4}$$

où k est la rigidité du contact, δ est la pénétration relative, c_e est le coefficient de restitution et $\vec{V}_n$ est la vitesse relative des deux corps en collision suivant la normale à la surface de contact.

Les avantages du modèle de contact de Hertz par rapport à l'approche de Kelvin-Voigt résident dans son sens physique à travers la prise en compte de la

géométrie (les géométries sont simples dans la théorie de contact de Hertz : cylindres, sphères et plans) d'une part, et des matériaux des objets en contact d'autre part dans la détermination de la constante de rigidité. En revanche, ce modèle ne tient pas compte des effets de perte d'énergie au contact, et par conséquent, n'est pas approprié pour les interactions robotiques avec des corps mous [Bhasin09].

Pour s'affranchir des limites du modèle de Kelvin-Voigt et conserver les avantages du modèle de Hertz, un modèle alternatif a été introduit par Hunt et Crossley [Hunt75]. Les auteurs ont utilisé le modèle de Hertz avec un élément viscoélastique non linéaire pour calculer la force du contact. La force normale calculée par ce modèle est donnée par :

$$f_{\mathrm{N}} = \mathrm{k}\delta^{\mathrm{n}} + \lambda\, \delta^{\mathrm{p}}\dot{\delta}^{q} \tag{2.5}$$

où δ est la déformation, $\dot{\delta}$ est la vitesse de déformation, n, p et q sont des paramètres constants. k est la constante de rigidité et λ la constante d'amortissement donnée par :

$$\lambda = \frac{3\mathrm{k}\,(1 - c_r)}{2\dot{\delta}^{(-)}} \tag{2.6}$$

c_r représente ici le coefficient de restitution et $\dot{\delta}^{(-)}$ est la vitesse initiale d'impact où le contact est détecté.

Un aspect important présenté par ce modèle est lié au fait que l'amortissement dépend de la pénétration. Dans ce modèle, la force de contact ne présente aucune discontinuité au premier contact et à la séparation. Par conséquent, un tel modèle non linéaire peut potentiellement améliorer l'estimation des forces de contact, et donc les performances de nombreuses tâches robotiques, haptiques et télé-robotiques [Haddadi12].

En se basant sur les travaux de Hunt et Crossley [Hunt75], Lankarani et Nikravesh [Lankarani90] ont développé un modèle de contact continu pour l'analyse de contact des systèmes multi-corps. Dans leur modèle, les auteurs ont utilisé la tendance générale de la loi de contact de Hertz modifié par un facteur d'amortissement afin de représenter la dissipation de l'énergie due à l'impact. Les auteurs ont également proposé de représenter la force normale de contact par la relation force-déformation de Hertz et par un élément non-linéaire viscoélastique. Dans ce modèle, le facteur d'amortissement λ dépend aussi de la déformation. Il est donné par :

$$\lambda = \frac{3\mathrm{k}\,(1 - c_e^2)}{4\dot{\delta}^{(-)}} \tag{2.7}$$

L'expression de la force normale est de la forme suivante :

$$f_{\mathrm{N}} = \mathrm{k}\delta^{\mathrm{n}}\left[1 + \frac{3\,(1 - c_r^2)}{4}\frac{\dot{\delta}}{\dot{\delta}^{(-)}}\right] \tag{2.8}$$

L'équation (2.8) est valable uniquement si la vitesse d'impact $\dot{\delta}^{(-)} \leq 10^{-5}\sqrt{E/\rho}$. Avec E le module de Young et ρ la masse volumique [Flores11].

Dans un autre article, Lankarani et Nikravesh [Lankarani94] ont également proposé une approche pour l'analyse du contact prenant en compte la déformation permanente ou plastique dans la zone de contact.

La force normale de contact intègre le phénomène d'amortissement à travers lequel l'énergie est dissipée au cours de la phase d'impact. Il est également important de considérer les effets du frottement agissant le long de la surface des corps en contact dans la zone de contact. En effet, la modélisation du frottement est un aspect essentiel pour l'analyse de l'impact, car les forces dues aux frottements peuvent arrêter et/ou inverser le mouvement. Le modèle de frottement le plus simple est donné par la loi de Coulomb.

$$F_T \leq \mu F_N \tag{2.9}$$

où F_N est la force normale, F_T est la force tangentielle et $\mu > 0$ est le coefficient de frottement statique. Le principal inconvénient de la loi du Coulomb est la discontinuité de la force de frottement introduite par la différence entre les comportements statiques et dynamiques. Pour cette raison, des lois de frottement alternatives ont été proposées. Ces nouvelles approches consistent à utiliser des modèles non linéaires afin d'assurer une transition continue entre les phases d'adhérence et les phases de glissement [Oden83, Haessig91, Howard93]. L'utilisation de ces modèles continus, où la force d'interaction est fonction de la déformation locale, permet de surmonter les problèmes rencontrés dans les formulations discrètes. Ces modèles peuvent être utilisés dans le cas de plusieurs zones ou points de contact mais également lorsque le contact implique des corps flexibles [Kim99].

D'autres auteurs [Armstrong94] ont introduit un modèle qui permet d'analyser les différents phénomènes de frottement, comme le glissement, l'adhérence et l'augmentation de frottement statique. Toutefois, ce modèle n'a été validé que par peu de résultats expérimentaux.

Un modèle de frottement élasto-plastique est présenté par Dupont [Dupont00]. Ce modèle permet de tenir compte à la fois des forces d'adhérence et des frottements statiques.

Azad [Azad10] propose un modèle de prédiction des forces de frottement durant la période de contact entre une sphère et un sol élastique (Fig. 2-2). Ce modèle découle essentiellement du travail de Featherstone [Featherstone08]. Cette approche permet de modéliser les forces de frottement statique du régime de pré-glissement avec une équation non linéaire 2D.

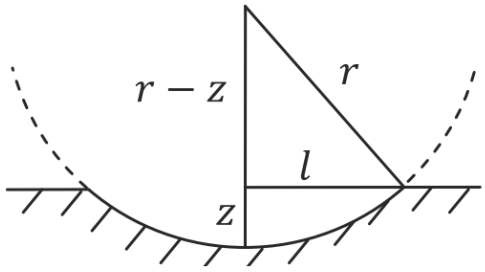

Figure 2-2 Approche de contact [Azad10]

Afin de déterminer la force de frottement, les auteurs proposent d'analyser d'abord le cas de non glissement, en caractérisant la force existante à une vitesse relative nulle. Cette force est appelée $\vec{f}_{stick}$ et est calculée par :

$$\vec{f}_{stick} = -\mathrm{k_t}\, z^{\frac{1}{2}}\, \vec{u} - \mathrm{D_t}\, z^{\frac{1}{2}}\, \vec{V}_t \tag{2.10}$$

où z est la déformation du sol, $\vec{u}$ est un vecteur unitaire qui donne le sens et la direction de la force, $\vec{V}_t$ est la vitesse tangentielle du point de contact, et $\mathrm{k_t}$ et $\mathrm{D_t}$ sont respectivement les constantes de rigidité et d'amortissement tangentiel.

Dans ces travaux, la force de glissement $\vec{f}_{slip}$ est située à l'intérieur du cône de frottement et à la même direction que $\vec{f}_{stick}$. Cette force est alors calculée par :

$$\vec{f}_{slip} = \vec{f}_{stick}\ \frac{\mu\, f_{\mathrm{N}}}{\|\vec{f}_{stick}\|} \tag{2.11}$$

où μ est le coefficient de frottement et f_{N} est le module de la force normale.

La force tangentielle est par la suite calculée par :

$$\vec{f}_t = \begin{cases} \vec{f}_{slip} & \text{Si } \|\vec{f}_{stick}\| \geq \mu\, f_{\mathrm{N}} \\ \vec{f}_{stick} & \text{Sinon.} \end{cases} \tag{2.12}$$

Dopico *et al.* [Dopico11] ont présenté un modèle de contact adapté à des collisions entre des solides massifs avec l'hypothèse d'un contact quasi-statique et une déformation limitée uniquement à la zone de contact des corps en collision. Le modèle de force tangentielle introduit est basé sur la loi de Coulomb y compris les effets d'adhérences. La transition entre les forces d'adhérences et les forces de

glissement est assurée par une fonction proposée par Gonthier *et al.* [Gonthier04]. La forme générale de la force tangentielle est donnée par :

$$\vec{f}_t = \Gamma\, \vec{f}_{stick} + (1 - \Gamma)\, \vec{f}_{slip} \tag{2.13}$$

Les deux composantes $\vec{f}_{slip}$ et $\vec{f}_{stick}$ représentent respectivement les forces de glissement et les forces d'adhérence. Γ représente la fonction de transition entre les deux modes glissement / adhérence. Cette fonction est définie par :

$$\Gamma = \begin{cases} 0; & \|\vec{V}_t\| \gg \mathrm{v_{stic}} \\ 1; & \|\vec{V}_t\| = 0 \end{cases} \tag{2.14}$$

où $\mathrm{v_{stic}}$ est un paramètre du modèle qui représente la vitesse de la transition glissement-adhérence. $\vec{V}_t$ est la vitesse tangentielle, définie au de point de contact p_c, comme suit :

$$\vec{V}_t = \vec{V}_{p_c} - \left(\vec{n}_p^T \cdot \vec{V}_{p_c}\right) \vec{n}_p \tag{2.15}$$

où $\vec{n}_p$ *est* le vecteur normal à la surface en ce point de contact (Fig. 2-3) et $\vec{V}_{p_c}$est la vitesse relative au point de contact.

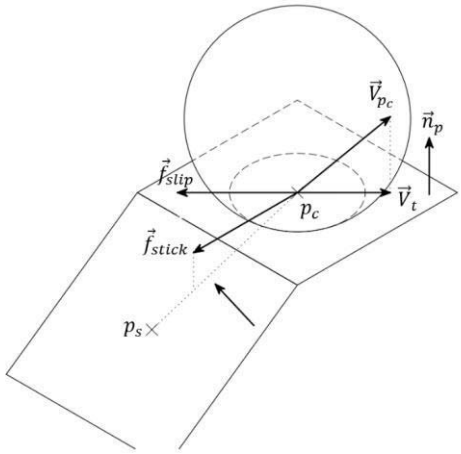

Figure 2-3 Contact tangentiel entre sphère et plan [Dopico11]

Une expression de la fonction de transition Γ est donnée par la forme suivante [Gonthier04] :

$$\Gamma = \mathrm{e}^{-(\mathrm{v_t^T v_t})/\mathrm{v_{stic}^2}} \tag{2.16}$$

La force de glissement est donnée par :

$$\vec{f}_{slip} = \begin{cases} 0\,; & \|\vec{V}_t\| = 0 \\ -\mu|f_N|\dfrac{\vec{V}_t}{\|\vec{V}_t\|}\,; & \|\vec{V}_t\| > 0 \end{cases} \tag{2.17}$$

La force d'adhérence est donnée par :

$$\vec{f}_{stick} = \begin{cases} 0\,; & s = 0 \\ \dfrac{f_{stic}^m}{s}\left(\mathbf{I}_3 - \vec{n}_p\ \vec{n}_p^T\right)\left(\vec{P}_{p_c} - \vec{P}_{p_s}\right); & s > 0 \end{cases} \tag{2.18}$$

Avec μ le coefficient de frottement, f_N la force normale de contact, $s = \|\vec{P}_{p_c} - \vec{P}_{p_s}\|$ la déformation dans la zone de contact, $\vec{P}_{p_s}$ la position du point de contact en régime d'adhérence, $\vec{P}_{p_c}$ la position du point de contact, $\mathbf{I}_3$ la matrice identité de taille de 3 x 3 et f_{stic}^m la fonction qui représente le comportement d'adhérence définie par :

$$f_{stic}^m = -\mathrm{k}_{\mathrm{stic}}\, s\ - \mathrm{c}_{\mathrm{stic}}\, \dot{s} \tag{2.19}$$

où $\mathrm{k}_{\mathrm{stic}}$ et $\mathrm{c}_{\mathrm{stic}}$ sont les coefficients de rigidité et d'amortissement liés à l'adhérence.

Dans cette analyse bibliographique nous avons présenté les modèles de contact utilisés en présence de déformations, et qui sont en relation directe avec notre cas d'étude. Pour plus de détails, nous proposons au lecteur de consulter les articles détaillants l'état de l'art d'Armstrong-Helouvry [Armstrong94] et de Gilardi et Sharf [Giraldi02] ainsi que les ouvrages de K.L Johnson [Johnson85], Roy Featherstone [Featherstone08] et Flores *et al*. [Flores10].

2.3 Modèle de contact proposé : doigt rigide – corps déformable

Le modèle de contact que nous proposons prend en compte les forces normales et les deux modes des forces tangentielles dues au frottement : modes de glissement et d'adhérence. Dans cette étude le bout du doigt est rigide et approché par un hémisphère et l'objet est représenté par une surface plane de contact.

2.3.1 Calcul des forces normales

Nous considérons des corps déformables qui peuvent être discrétisés par éléments finis et dont la modélisation est décrite au chapitre 3. Le modèle de force normale adopté pour ce travail est similaire au modèle de Hunt-Crossley [Hunt75]. Selon ce modèle, la force normale est donnée par :

$$f_N = \begin{cases} 0, & \delta \leq 0 \\ \max(0, k\,\delta^n + c\,\dot{\delta}), & \delta > 0 \end{cases} \tag{2.20}$$

où δ est la déformation dans la zone de contact, $\dot{\delta}$ est la vitesse de déformation, k et c sont respectivement les constantes de rigidité et d'amortissement. La réaction normale à la surface de contact est déterminée en fonction de la pénétration δ, suivant la normale au point de contact et la vitesse de pénétration.

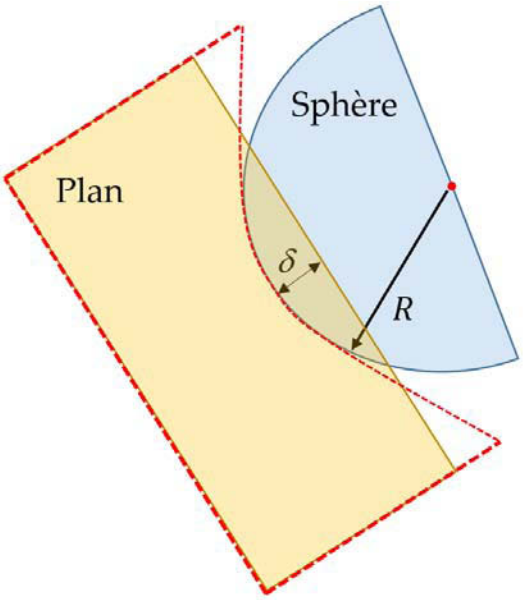

Figure 2-4 Déformation locale dans la zone de contact d'une sphèreet d'un plan

2.3.2 Calcul des forces tangentielles

Pour la prise en compte des forces tangentielles, nous introduisons un modèle rhéologique visco-élasto-plastique, représenté sur la Figure 2-5. Ce modèle est composé d'un ressort et d'un amortisseur en parallèle et en série avec un patin. Le système ressort – amortisseur est attaché d'une coté au solide A (surface de l'objet en contact) par un patin et de l'autre coté au solide B (bout du doigt). Cela permet de suivre le changement dynamique de la position du point de contact lors du glissement. Cependant, dans les méthodes issues de la littérature, le suivi du changement de localisation du point de contact n'est pas possible [Azad10].

Nous introduisons deux variables d'état, u et v, pour chaque paire de contact entre le bout du doigt et la surface de l'objet. Ces variables correspondent aux déplacements relatifs au point de contact, dus respectivement aux glissements et à l'adhérence. Ces variables sont remises à zéro dynamiquement si le contact est rompu.

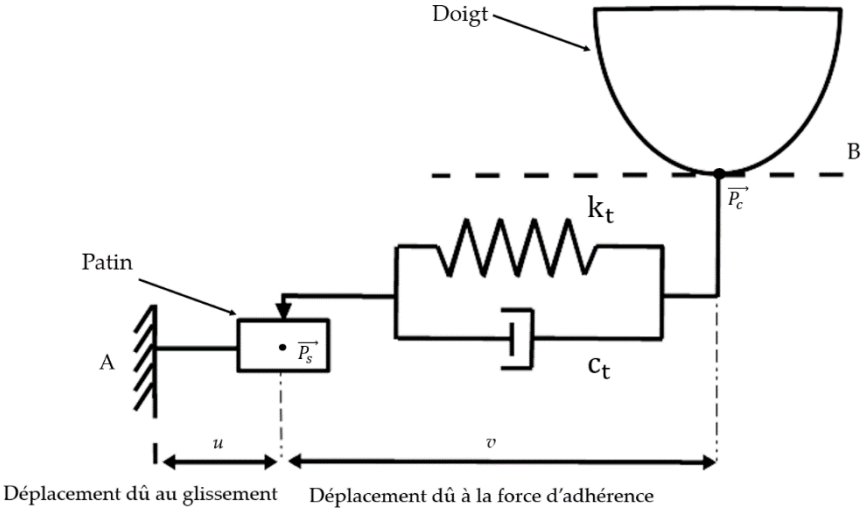

Figure 2-5 Modèle rhéologique de la force tangentielle

Le patin introduit un glissement lorsque la force de contact tangentielle atteint un seuil. Ce seuil dépend de la force normale. La loi de Coulomb est utilisée pour estimer le seuil de l'effort tangentiel transmis par les forces de contact. Un avantage présenté par ce modèle est la stabilité des forces de frottement à faible vitesse tout en assurant la transition entre le glissement et l'adhérence. Cela permet de mieux garantir la stabilité de la saisie puisque des forces normales supérieures seront appliquées si les forces tangentielles d'adhérence sont sous-estimées. Notons qu'il existe d'autres méthodes basées sur des déterminations expérimentales comme celle décrite par Watanabe *et al.* [Watanabe14].

Dans la modélisation proposée, le calcul de la force de frottement commence d'abord par l'étude du cas d'un contact avec une vitesse de glissement nulle. Cela correspond au mode d'adhérence dont la force est définie par :

$$\vec{f}_{stick} = \begin{cases} 0, & v = 0 \\ -(\mathrm{k_t} v - \mathrm{c_t} \dot{v}) \dfrac{\overrightarrow{P_c P_s}}{\|\overrightarrow{P_c P_s}\|}, & v > 0 \end{cases} \tag{2.21}$$

où v est la déformation tangentielle de la zone de contact, $\vec{P_c}$ est le vecteur de la position du point de contact, $\vec{P_s}$ le vecteur de la position du point de contact en régime adhérence, et $\mathrm{k_t}$ et $\mathrm{c_t}$ sont respectivement les constantes d'amortissement et de rigidité tangentielle (Fig. 2-5).

Lorsque la force d'adhérence sort du cône de frottement ($f_{\mathrm{stick}} > \mu f_{\mathrm{N}}$), on est en régime de glissement, et la force de glissement est définie selon la loi de Coulomb comme suit :

$$\vec{f}_{slip} = \begin{cases} 0, & \|\vec{V}_t\| = 0 \\ -\mu f_N \dfrac{\vec{V}_t}{\|\vec{V}_t\|}, & \|\vec{V}_t\| > 0 \end{cases} \tag{2.22}$$

La force tangentielle est calculée de façon dynamique en fonction du changement des conditions du frottement. Dans le régime d'adhérence $\vec{f}_T = \vec{f}_{stick}$ avec une vitesse de déformation égale à la vitesse tangentielle et une vitesse de glissement nulle. Dans le cas de glissement $\vec{f}_T = \vec{f}_{slip}$ avec une vitesse de déformation nulle et une vitesse de glissement égale à la vitesse tangentielle. Le calcul de la force de frottement est exprimé par l'algorithme suivant :

si $\delta < 0$ **alors**
$f_T = 0$
sinon
si $f_{ad} > \mu f_N$ **alors**
$f_T = f_{gl}, \dot{u} = V_t, \dot{v} = 0$
sinon
$f_T = f_{ad}, \dot{v} = V_t, \dot{u} = 0$
fin si
fin si

Algorithme de calcul de la force tangentielle

Nous appliquons notre modèle à deux cas illustratifs. Le premier concerne le rebond d'une balle sur un plan élastique et le deuxième concerne la modélisation de l'interaction d'un doigt avec un objet déformable.

2.3.3 Application à un cas simple : bille sur plan

L'application considérée ici concerne l'exemple classique de la balle qui rebondit sur le sol. Cet exemple permet d'illustrer les effets de perte d'énergie à l'impact ainsi que le glissement et l'adhérence. Nous considérons un mouvement plan d'une balle dans le plan R_O (O,x,y). La position du centre de la balle et son orientation par rapport à R_O sont données par (x_s, y_s, θ).

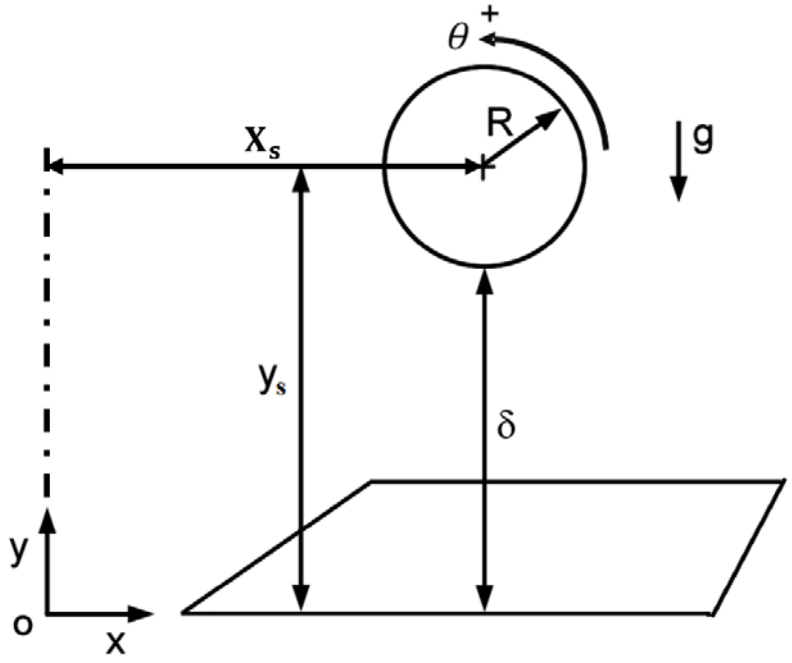

Figure 2-6 Configuration du système bille-plan

La figure 2-6 présente une balle supposée rigide, avec une hauteur initiale égale à 0,4 m, une masse de m=0,5 kg, un moment d'inertie égal à J = 0,02 kg.m^2, un rayon R = 0,2 m. La balle, soumise à l'action de la gravité, est lâchée de sa position initiale. Par conséquent, elle tombe jusqu'à ce qu'elle rentre en collision avec le sol. La pénétration δ de la balle dans le sol est évaluée comme suit :

$$\delta = \mathrm{R} - y_{\mathrm{s}} \tag{2.23}$$

où y_{s} représente la coordonnée du centre du masse de balle selon l'axe y. Les valeurs positives de δ signifient qu'il n'y a pas de contact entre la balle et le sol. Trois équations dynamiques peuvent être écrites pour décrire le mouvement de la balle sur le sol :

$$\begin{aligned} \mathrm{m}\ddot{x}_{\mathrm{s}} &= T \\ \mathrm{m}\ddot{y}_{\mathrm{s}} &= N - \mathrm{mg} \\ \mathrm{J}\ddot{\theta} &= T\mathrm{R} \end{aligned} \tag{2.24}$$

N et T sont respectivement les forces normales et tangentielles dues au contact balle – sol. θ et $\ddot{\theta}$ représentent respectivement l'angle et l'accélération angulaire de la balle. g représente l'accélération de la gravité.

La force normale de contact est donnée par :

$$N = \begin{cases} 0, & Si\ \ y_s \geq R \\ \max(0, k\,\delta - c\,\dot{y}_s)\,, & Sinon \end{cases} \tag{2.25}$$

k et c sont respectivement la rigidité et l'amortissement du contact unilatéral balle – sol. La vitesse relative tangentielle au point de contact entre la balle et le sol est donnée par la relation (2.26) :

$$v_t = \dot{x}_s + R\dot{\theta} \tag{2.26}$$

La figure 2-7 présente le mouvement de la balle. Lors du premier contact on peut observer la pénétration de la balle dans le plan. Ensuite, la balle commence à rebondir et reculer.

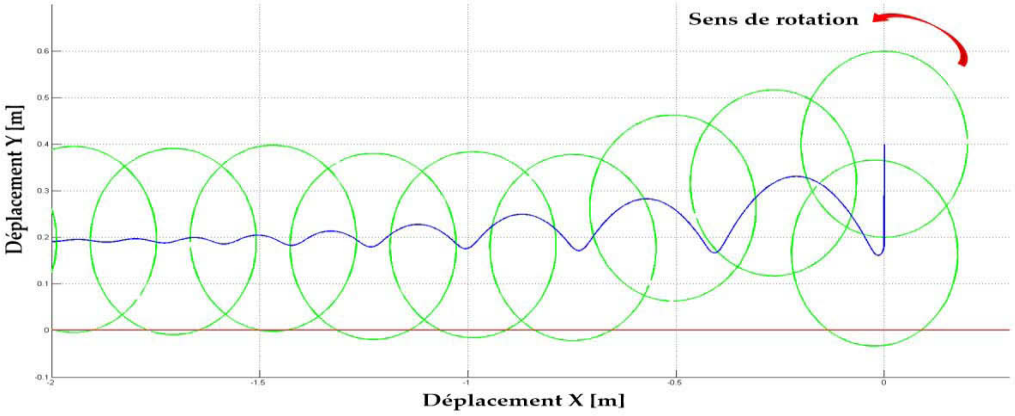

Figure 2-7 Rebondissement de la balle sur le plan

La figure 2-8 montre la variation de la vitesse angulaire de la balle. Initialement, la vitesse imposée est égale à 10 rad/s. Puis la vitesse angulaire commence à diminuer en raison du contact de la balle avec le plan. Finalement, sous l'action de la force tangentielle cette vitesse se stabilise à 5 rad/s à la fin du contact.

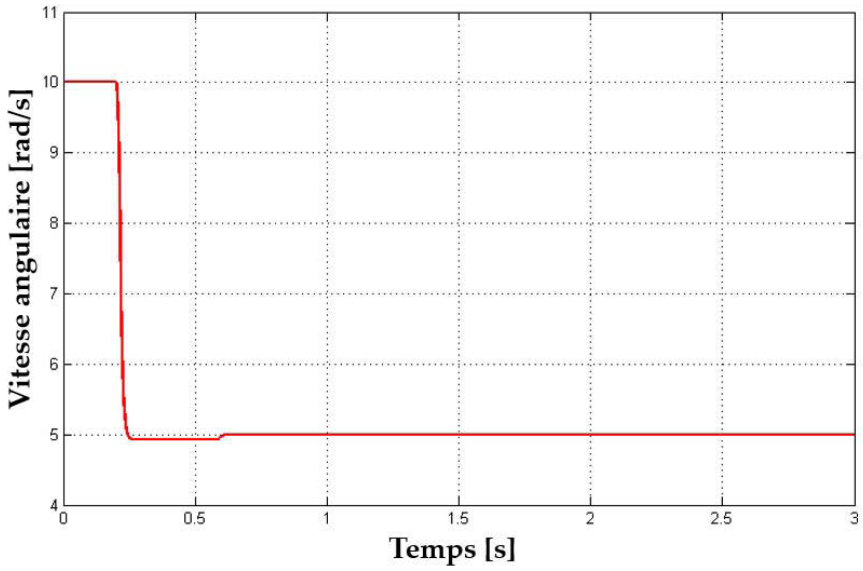

Figure 2-8 Vitesse angulaire (rad/s)

Pour le calcul de la force normale, on doit utiliser les constantes de rigidité et d'amortissement du contact. En s'inspirant des travaux présentés dans la littérature [Johnson85], la constante de rigidité est calculée par :

$$k = 2\Psi\sqrt{R} \tag{2.27}$$

Ψ est un facteur lié aux propriétés mécaniques des deux objets en contact présentées dans le tableau 2-1. Il est calculé par :

$$\Psi = \frac{1}{\frac{1 - v_1^2}{E_1} + \frac{1 - v_2^2}{E_2}} \tag{2.28}$$

	Balle (Aluminium)	Plan (Caoutchouc)
E_i (i=1,2) GPa	69	0.01
v_i (i=1,2)	0.34	0.49

Tableau 2-1 Propriétés mécaniques de la balle et du plan

Le constante d'amortissement est déterminée par :

$$c = 4\pi r\gamma \tag{2.29}$$

où γ est une constante.

La figure 2-9 présente l'évolution de la force normale. Celle-ci a une valeur élevée à l'impact et s'annule lorsque la balle rebondit. Cette figure présente

également une zone d'oscillations due à la rigidité du contact. Finalement, une force résiduelle relative à l'effet de la gravité est observée.

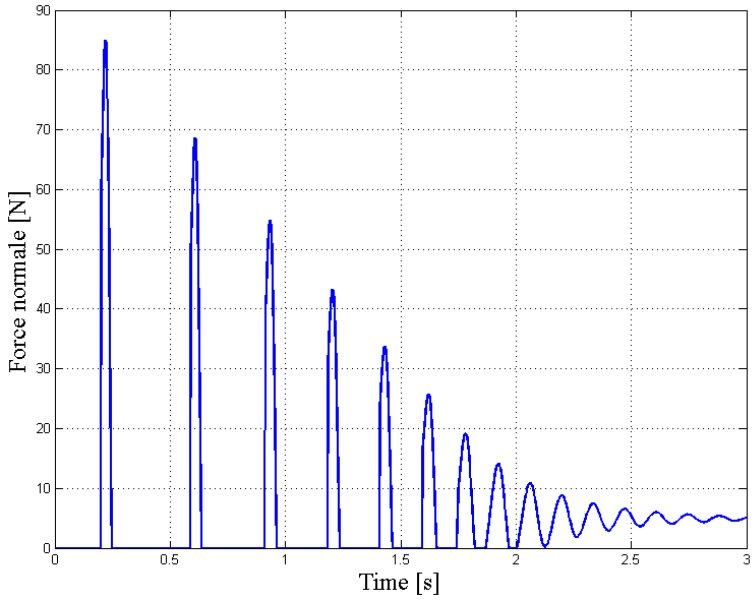

Figure 2-9 Force normale [N]

La détermination de la force normale et de la vitesse relative entre la balle et le plan nous permet de calculer la force de frottement. Cette force est présentée sur la figure 2-10.

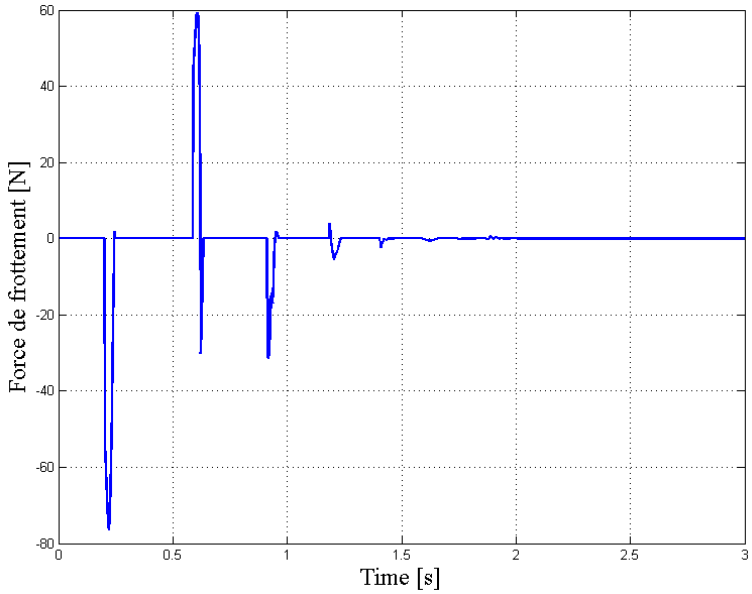

Figure 2-10 Force de frottement [N]

La figure 2-11 présente la force de frottement. Pour le premier rebond, elle montre aussi que le contact commence par le glissement de la balle sur le plan.

Après cela, la balle adhère au plan, puis de nouveau commence à glisser jusqu'à la fin du contact.

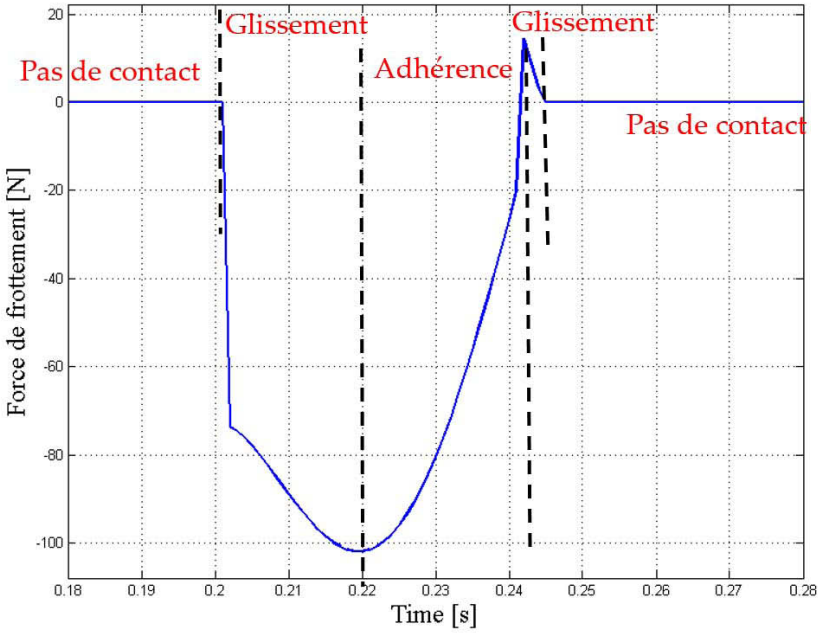

Figure 2-11 Agrandissement du premier rebond dans la figure 2-10

La figure 2-12 présente l'évolution des deux variables d'état u et v. Ces deux variables illustrent la transition entre le mode glissement et adhérence.

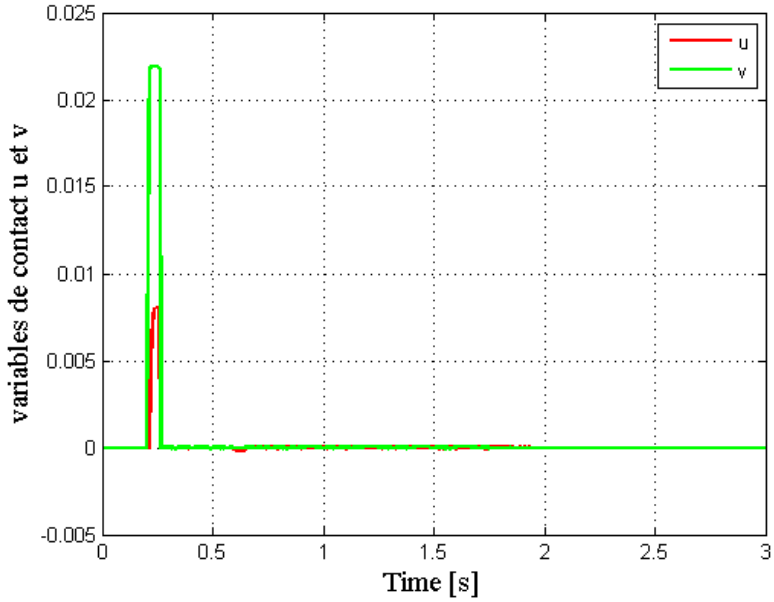

Figure 2-12 Variables d'état u et v

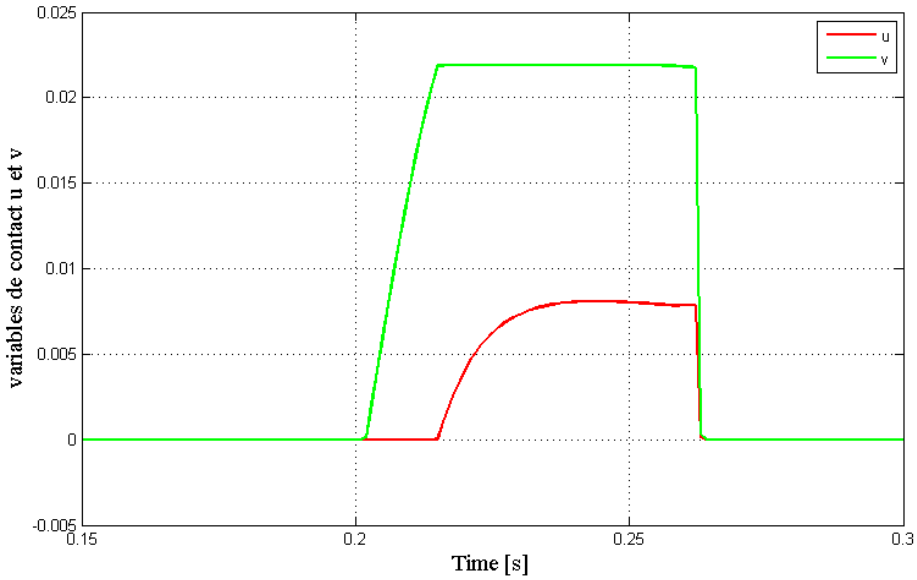

Figure 2-13 Agrandissement de figure 2-14

A travers la figure 2-13, nous pouvons aussi constater le glissement de la balle par le déplacement v. Par la suite, l'évolution de la variable u est due à la déformation élastique de la zone de contact, qui est directement lié à la force d'adhérence.

2.4 Application à un objet déformable

Nous nous intéressons dans ce paragraphe à la modélisation de l'interaction des doigts d'une main robotique avec un objet déformable.

2.4.1 Hypothèses de modélisation

Afin de simplifier l'estimation des forces de contact, les bouts des doigts de la main robotique simulée sont définis par des demi-sphères, ce qui assez proche de leur forme réelle. La surface de l'objet est discrétisée par un maillage triangulaire. A partir de ces approximations, tous les contacts seront considérés localement comme des contacts entre une demi-sphère et une surface plane. Le modèle de contact doit tenir compte des propriétés mécaniques et géométriques des surfaces en collision ainsi que de leurs positions et vitesses relatives, afin de garantir une modélisation réaliste de l'interaction.

Dans notre modélisation, quand il n'y a pas pénétration entre les doigts et l'objet, il n'y a pas de contact, et par conséquent, les forces de contact sont nulles. Les forces de contact et les déformations de l'objet sont considérées comme des fonctions continues pendant la phase de contact.

Dans ce processus dynamique (Fig. 2-14), les déformations de l'objet sont calculées à chaque itération par le suivi des positions des nœuds du maillage en résolvant des équations dynamiques basées sur la seconde loi de Newton (Chapitre-3). L'évaluation des forces de contact est assurée par le modèle de contact proposé, tout en considérant le changement de la configuration de l'objet.

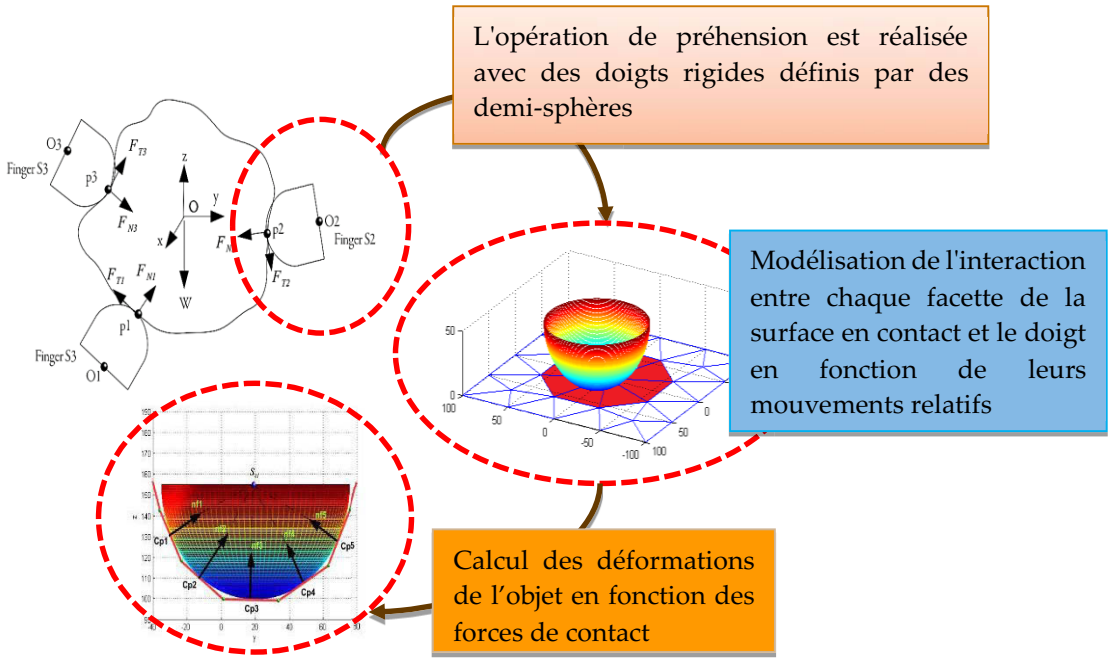

Figure 2-14 Modélisation du contact doigt – objet déformable

2.4.2 Schéma global de simulation du modèle

Dans cette section, nous illustrons les différentes étapes liées à la modélisation et la simulation du processus de la préhension d'un objet déformable. Ce processus peut être décomposé en plusieurs étapes (Fig. 2-15).

La première étape consiste à déterminer la configuration initiale de la prise. Dans cette étape nous déterminons les positions et les vitesses des nœuds constituant l'objet à l'état initial ainsi que la position initiale relative entre les doigts et l'objet. Nous considérons bien sûr que pour toutes les tâches de prises effectuées, les objets sont dans l'espace de travail de la main robotique. Ensuite, nous utilisons une interpolation polynomiale du troisième degré, pour générer les mouvements des doigts point à point. Puis, une boucle itérative est appliquée sur toutes les facettes pour assurer la détection du contact entre l'objet et chaque doigt. Les forces dues à l'interaction des doigts avec l'objet sont alors estimées par l'évaluation de la vitesse relative entre les doigts et l'objet ainsi que les pénétrations des doigts.

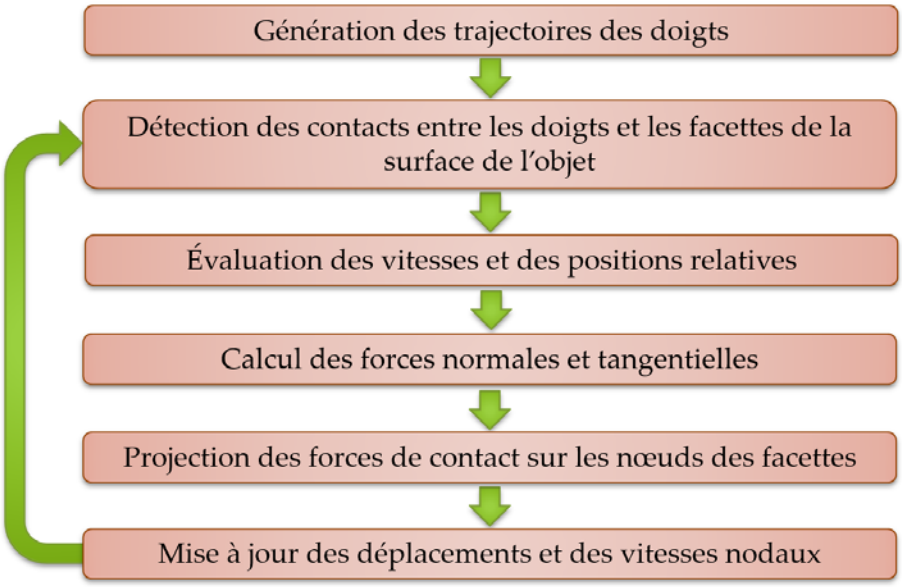

Figure 2-15 Diagramme de la planification de la prise basée sur le modèle de contact

Les forces établies sont ensuite appliquées sur l'objet et engendrent les déformations de celui-ci de façon dynamique. Le changement de la forme de l'objet est alors assuré par la mise à jour des déplacements nodaux en intégrant les équations de la dynamique de l'objet déformable.

2.4.3 Calcul des forces de contact

- **Génération des trajectoires des doigts**

La trajectoire désirée est définie comme une séquence de coordonnées cartésiennes, exprimées dans le repère de l'objet, définie entre un point initial et la position souhaitée (centre de l'objet par exemple). Une simple interpolation linéaire entre les points est utilisée pour obtenir le mouvement. A chaque itération, les paramètres désirés de la position, de la vitesse et de l'accélération sont obtenus en utilisant une fonction d'interpolation *r (t)*. A chaque instant, les positions des doigts et les vitesses sont définis par :

$$\vec{P}(t) = \vec{P}_i + r(t)(\vec{P}_f - \vec{P}_i) \tag{2.30}$$

$$\vec{V}_p(t) = \dot{r}(t)(\vec{P}_f - \vec{P}_i) \tag{2.31}$$

r(t) est défini par des conditions aux limites telles que :

$$\begin{aligned} \vec{P}(t_0) &= \vec{P}_i \\ \vec{P}(t_{final}) &= \vec{P}_f \end{aligned} \tag{2.32}$$

$$\vec{V}_p(t_0) = 0$$

$$\vec{V}_p(t_{final}) = 0$$

L'expression polynomiale de *r(t)* est donnée par :

$$r(t) = 3\left(\frac{t}{t_{final}}\right)^2 - 2\left(\frac{t}{t_{final}}\right)^3 \tag{2.33}$$

- **Détection de contact**

Une étape primordiale avant l'évaluation des forces de contact concerne la détection des facettes entrant en collision avec les doigts. De nombreux travaux, décrivant les différentes techniques développées pour détecter efficacement les collisions, ont été publiées [Lin98, Jimenez00].

L'un des algorithmes de détection de collision est l'algorithme V-Clip proposé par Mirtich98 *et al*. [Mirtich94]. Il est bien adapté à la détection de collision pour la simulation de la dynamique de contact en 3D. En outre, cet algorithme peut facilement être utilisé pour mesurer la distance de pénétration et pour déterminer la direction de la normale du contact quand les objets sont en collision.

Dans nos travaux, la géométrie de l'objet est maillée par un nombre fini d'éléments tétraédriques. Chaque élément du maillage comporte 4 nœuds et 4 facettes triangulaires. Nous ne considérons que les facettes constituant les surfaces frontières délimitant l'objet déformable. Pendant le processus de saisie, chaque doigt peut être en contact avec une ou plusieurs facettes triangulaires.

L'étape de détection consiste à définir les facettes en contact avec les doigts afin de trouver la profondeur de pénétration et la direction de la force normale de contact. L'algorithme utilisé est basé sur la mesure de la distance d_{j} définie entre le centre de la demi-sphère ci et son point de projection sur chaque facette, noté pj (Fig. 2-16).

Pendant la déformation, le vecteur normal de $\vec{n}_j$ de chaque facette en contact avec l'un des doigts est dirigé vers le centre de la demi-sphère ci au point de contact pj. On note R le rayon de la demi-sphère.

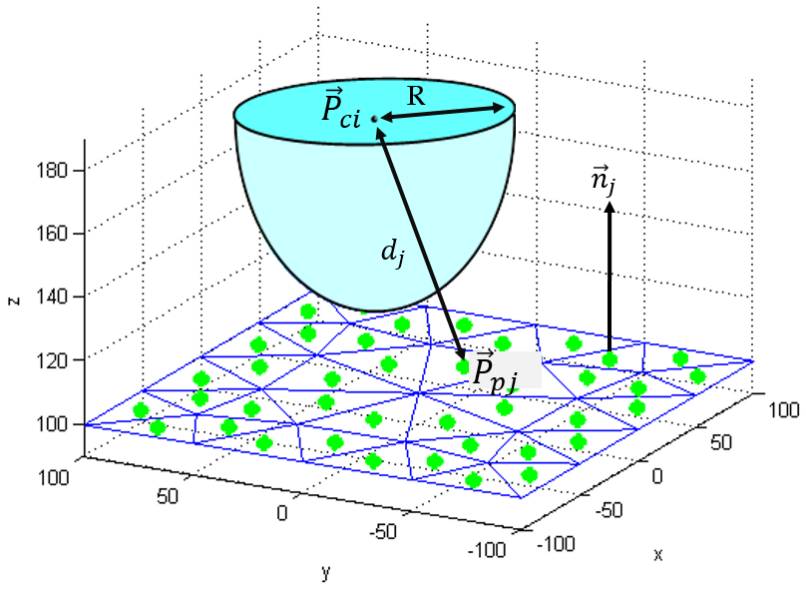

Figure 2-16 Détection de contact doigt-facettes à l'état initiale

La position du point de contact est calculée comme suit :

$$\vec{P}_{pj} = \vec{P}_{ci} - \left(\mathrm{R}.\vec{n}_j\right) \tag{2.34}$$

Où $\vec{P}_{ci}$ est le vecteur de la position du centre de la demi-sphère ci.

- **Calcul de la vitesse tangentielle**

Afin de formuler les équations nécessaires au calcul des forces tangentielles, la détermination de la vitesse relative entre les doigts et l'objet est indispensable. Cette étape est effectuée sur toutes les facettes $j \in \{1,2,\ldots,C\}$ (avec C le nombre de facettes en contact).

La vitesse du point de contact pj relative à un doigt $\mathcal{D}_i$ est calculée par :

$$\vec{V}_{pj\in\mathcal{D}_i/O} = \vec{V}_{ci\in\mathcal{D}_i/O} + \vec{\Omega}_{\mathcal{D}_i/O} \times \overrightarrow{P_{pj}P_{ci}} \tag{2.35}$$

où $\vec{V}_{ci\in\mathcal{D}_i/O}$ est la vitesse du centre du doigt et $\vec{\Omega}_{\mathcal{D}_i/O}$ est la vitesse angulaire du doigt. $\vec{P}_{pj}$ représente la position du point de contact et $\vec{P}_{ci}$ représente la position de centre du doigt $\mathcal{D}_i$.

En exploitant la méthode d'interpolation en éléments finis, la vitesse du point de contact associée à une facette $\mathcal{F}_j$ peut être calculée en utilisant les vitesses des nœuds de la facette considérée. Cette vitesse est alors définie par :

$$\vec{V}_{pj\in\mathcal{F}_j/O} = f(\vec{V}_{N_1}, \vec{V}_{N_2}, \vec{V}_{N_3}) \tag{2.36}$$

L'approche utilisée repose sur l'utilisation des coordonnées des aires de la facette $\mathcal{F}_j$ présentée dans la figure. 2-17. Nous avons interpolé la vitesse du point de contact en fonction des vitesses nodales.

$$\vec{V}_{pj\in\mathcal{F}_j/O} = \frac{A_1}{A_G}\vec{V}_{N_1} + \frac{A_2}{A_G}\vec{V}_{N_2} + \frac{A_3}{A_G}\vec{V}_{N_3} \tag{2.37}$$

avec

$$A_G = \sum_{i=1}^{3} A_i \tag{2.38}$$

où A_i (i = 1,2,3) est l'aire du triangle défini par le point de contact pj et les nœuds de la facette j (Fig. 2-17).

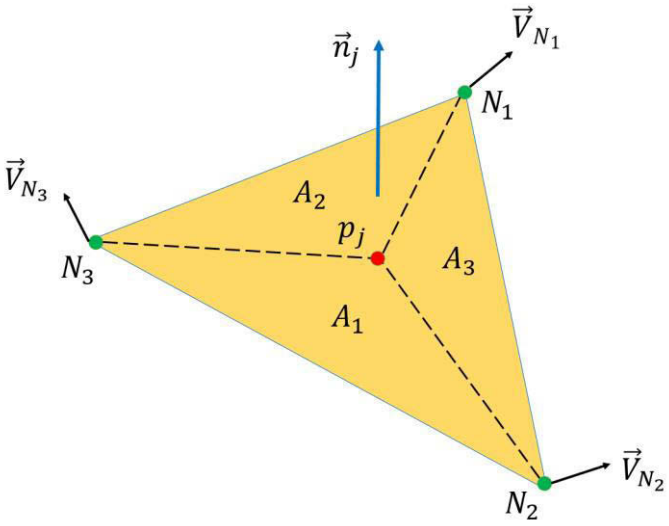

Figure 2-17 Interpolation des vitesses des nœuds d'une facette

La vitesse relative entre un doigt $\mathcal{D}_i$ et une facette $\mathcal{F}_j$, au point de contact, est calculée par :

$$\vec{V}_{r_j} = \vec{V}_{pj\in\mathcal{D}_i/\mathcal{F}_j} = \vec{V}_{pj\in\mathcal{D}_i/O} - \vec{V}_{pj\in\mathcal{F}_j/O} \tag{2.39}$$

Par la suite, la vitesse normale entre le doigt et la facette est donnée par :

$$\vec{V}_{nj} = \left(\vec{V}_{rj}\cdot\vec{n}_j\right)\vec{n}_j \tag{2.40}$$

La vitesse tangentielle est alors obtenue par :

$$\vec{V}_{tj} = \vec{V}_{rj} - \vec{V}_{nj} \tag{2.41}$$

- **Calcul de la force normale**

La détermination du vecteur normal à la facette donne la direction suivant laquelle la pénétration est mesurée. Durant la modélisation de l'interaction, les vecteurs normaux des facettes $\mathcal{F}_j$ sont déterminés de façon dynamique au cours des déformations de l'objet. Par conséquent, les forces de contact normales sont continues et directement liées aux déformations de l'objet.

Notre méthode permet de gérer plusieurs contacts. En effet, chaque doigt peut être en contact avec plusieurs facettes. Notre approche permet de calculer les pénétrations du doigt sur chaque facette. Cette distance de pénétration appelée δ_j est mesurée le long de la direction normale à la surface de la facette qui est définie par $\vec{n}_j$, et elle est donnée par :

$$\delta_j = -\left(\overrightarrow{P_{ci}P_{pj}} + \mathrm{R}\ \vec{n}_j\right) \cdot\ \vec{n}_j \tag{2.42}$$

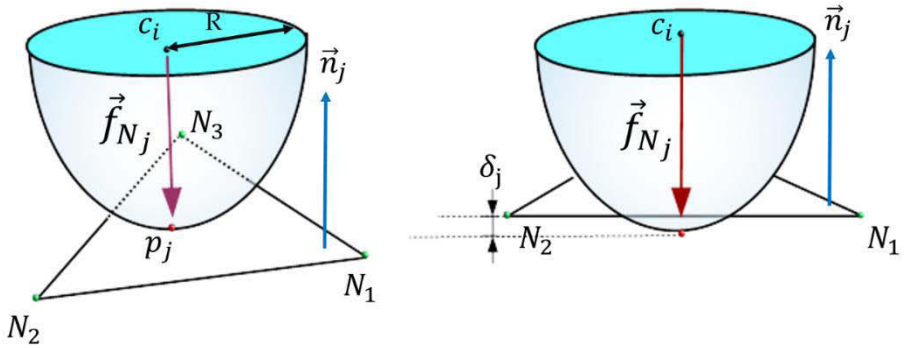

Figure 2-18 Contact entre l'hémisphère et le plan de la facette j

La force normale est donnée par :

$$\vec{f}_{Nj} = f_{Nj}\,\vec{n}_j \tag{2.43}$$

$$f_{Nj} = \max\left(0\,,(\mathrm{k}\delta_j + \mathrm{D}\dot{\delta}_j)\right) \tag{2.44}$$

- **Calcul de la force tangentielle**

La stabilité de la prise d'un corps déformable, soumis à des perturbations, est plus importante que pour un corps rigide. Cela est lié à l'augmentation des zones de contact (augmentation des forces de frottement) et aux concavités de ces régions qui participent à l'augmentation des forces normales de contact.

L'opération de préhension devient plus complexe lors de l'interaction de plusieurs doigts rigides avec un corps déformable. La détermination des forces tangentielles nécessite alors l'intégration des déformations de la zone de contact, ainsi que des mouvements relatifs des surfaces en contact.

Le problème abordé dans cette section est la modélisation de la force tangentielle agissant le long de chaque facette en contact, afin d'éviter tout glissement et de garantir la stabilité de la prise. Durant la phase d'interaction, une facette en adhérence pourra glisser ultérieurement, et inversement une facette en glissement pourra adhérer.

Pour une facette $\mathcal{F}_j$ en contact, la force de glissement est donnée par :

$$\vec{f}_{slip} = \begin{cases} 0, & \|\vec{V}_t\| = 0 \\ -\mu\, f_N \dfrac{\vec{V}_t}{\|\vec{V}_t\|}, & \end{cases} \tag{2.45}$$

De même, la force d'adhérence entre le doigt $\mathcal{D}_i$ et la facette $\mathcal{F}_j$ est calculée par :

$$\vec{f}_{stick} = \begin{cases} 0, & v = 0 \\ -(\mathrm{k_t} v - \mathrm{c_t} \dot{v}) \dfrac{\overrightarrow{P_c P_s}}{\|\overrightarrow{P_c P_s}\|}, & v > 0 \end{cases} \tag{2.46}$$

Le calcul de la force tangentielle pour une facette en contact est effectué par l'algorithme présenté dans la section (2.3.2).

2.4.4 Distribution des forces de contact sur les nœuds

Une fois que les efforts générés par les conditions de contact ont été calculés pour chaque doigt, nous déterminons les forces qui sont appliquées aux nœuds des facettes en contact avec le doigt. Pendant le processus de préhension, nous répartissons la force $\vec{f}_{pj}$ appliquée à la facette j sur les nœuds représentant cette facette. Nous calculons l'équilibre local lié à chaque facette afin de trouver les forces appliquées sur les nœuds.

La force appliquée par le doigt $\mathcal{D}_i$ sur la facette $\mathcal{F}_j$ est exprimée par une composante normale et tangentielle à la facette, de la manière suivante :

$$\vec{f}_{pj} = \vec{f}_{Nj} + \vec{f}_{Tj} \tag{2.47}$$

La force $\vec{f}_{pj}$ ne peut pas être appliquée directement sur l'élément du modèle de l'objet, elle doit être appliquée sous forme des forces nodales. Les forces des doigts sont converties en forces nodales équivalentes. La force appliquée $\vec{f}_{pj}$ est distribuée sur les nœuds représentant la facette $\mathcal{F}_j$ de sorte que l'effort appliqué est équilibré par la somme des forces de réaction $\vec{f}_{lj}$ (l = 1, 2, 3) à partir des nœuds de la facette (Fig. 2-19).

La condition d'équilibre de la force peut donc s'écrire :

$$\vec{f}_{pj} = \sum_{l=1}^{3} \vec{f}_{lj} \tag{2.48}$$

Une fonction de forme linéaire est utilisée pour calculer la distribution nodale équivalente des forces de contact. Les forces nodales sont ensuite calculées en utilisant la matrice de fonctions de formes **H**, basée sur les coordonnées des aires des triangles définis par le point de contact pj et les nœuds de la facette $\mathcal{F}_j$.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{A_1}{A_G} & 0 & 0 & \frac{A_1}{A_G} & 0 & 0 & \frac{A_1}{A_G} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{A_2}{A_G} & 0 & 0 & \frac{A_2}{A_G} & 0 & 0 & \frac{A_2}{A_G} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A_3}{A_G} & 0 & 0 & \frac{A_3}{A_G} & 0 & 0 & \frac{A_3}{A_G} \end{bmatrix} \tag{2.49}$$

Les forces sur les nœuds sont alors calculées par :

$$\mathbf{H}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{f}_{pj} = \boldsymbol{f}_{lj} \tag{2.50}$$

Avec

$$\boldsymbol{f}_{lj} = [f_{1x} \quad f_{1y} \quad f_{1z} \quad f_{2x} \quad f_{2y} \quad f_{2z} \quad f_{3x} \quad f_{3y} \quad f_{3z}]^{\mathrm{T}}_{\mathrm{R_O}} \tag{2.51}$$

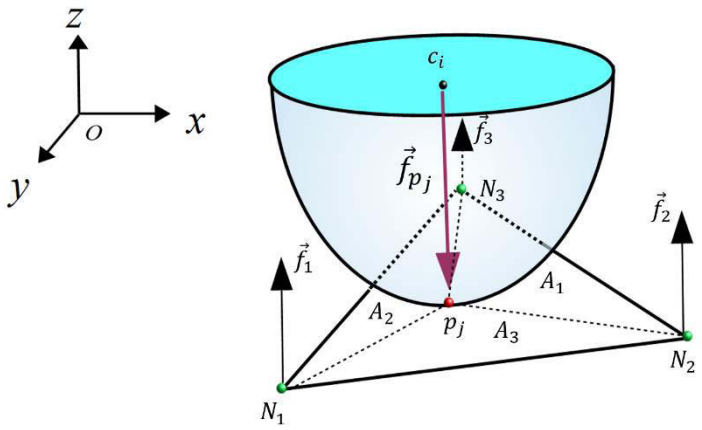

Figure 2-19 Distribution des forces de contact sur les nœuds d'une facette

2.4.5 Détermination des forces de prise

Nous supposons que les caractéristiques du matériau de l'objet et des doigts sont connues. Après le calcul des forces normales et tangentielles pour chaque zone de contact, il est possible de satisfaire les conditions requises pour l'équilibre statique. Afin de lever l'objet, la projection de la résultante des forces de

frottements, générées par les trois doigts, suivant la verticale doit équilibrer le poids de l'objet.

La figure 2-20 montre la configuration du système que nous adopterons pour notre analyse. On suppose que les forces extérieures sont uniquement dues à l'effet de la gravité agissant dans la direction négative de l'axe Z du repère R_O. Les équations d'équilibre sont alors définies par :

$$\sum_{j=1}^{C}(\vec{f}_{Nj}) + \sum_{j=1}^{C}(\vec{f}_{Tj}) + \vec{f}_w = \vec{0} \tag{2.52}$$

$$\sum_{j=1}^{C}(\vec{f}_{Nj} \times \vec{P}_{pj}) + \sum_{j=1}^{C}(\vec{f}_{Tj} \times \vec{P}_{pj}) + \vec{f}_w \times \vec{P}_G = \vec{0} \tag{2.53}$$

où C est le nombre de facettes en contact. $\vec{P}_{pj}$ représente le vecteur de position du point de contact sur la facette j. $\vec{P}_G$ est le vecteur de position du centre de masse de l'objet G par rapport à R_O.

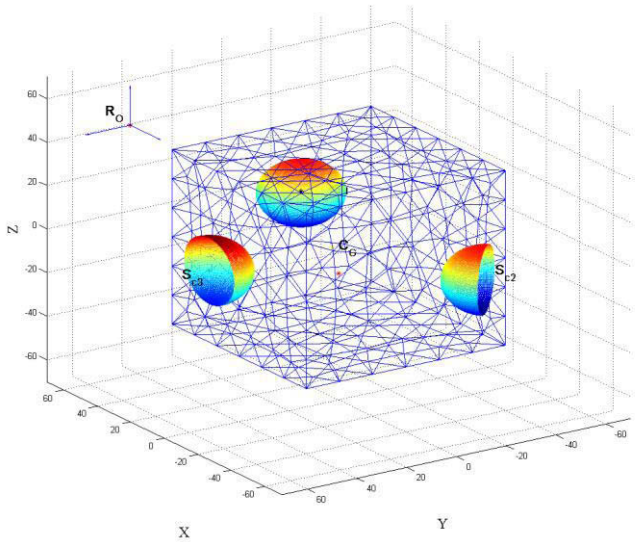

Figure 2-20 Configuration du système de prise

2.5 Conclusion

Après avoir donné un aperçu des méthodes de modélisation des forces de contact, nous avons présenté l'approche développée pour la modélisation de l'interaction entre une main multi-doigts et un objet déformable.

Le modèle utilisé permet de calculer à la fois les forces normales et les forces tangentielles générer par les déformations de la surface de contact. Au cours de la déformation de l'objet, la détection du contact est assurée par l'utilisation des

coordonnées des nœuds et des positions des doigts à chaque itération. Grace à ce système dynamique, les pénétrations des doigts sont calculées précisément et les forces sont évaluées en fonction des déformations de l'objet. L'expression des efforts normaux est basée sur le modèle de Hunt-Crossley dans lequel nous avons considéré la non linéarité du contact entre les deux surfaces. La surface de l'objet est considérée comme contenant une distribution uniforme de paires ressort-amortisseur non-linéaires, de sorte que l'ensemble peut être caractérisé par un coefficient d'amortissement et une raideur non linéaire qui dépend des propriétés mécaniques des objets en contact.

Afin d'assurer la transition entre les deux modes glissement et adhérence, nous avons introduit deux variables d'état, u et v, pour chaque paire de contact. Un avantage présenté par ce modèle est la stabilité des forces de frottement à faible vitesse tout en assurant la transition entre le glissement et l'adhérence. Nous avons validé ce nouveau modèle à travers la simulation d'une balle rebondissant sur un plan élastique.

Dans le contexte d'un objet déformable interagissant avec une main robotique, la théorie non linéaire est plus appropriée pour le cas des grandes déformations générées par l'action de préhension. Pour manipuler adroitement un objet déformable, les forces de contact doivent être contrôlées sur la base de sa géométrie et de la mise à jour dynamique de ces déformations. Nous avons utilisé cette approche pour la modélisation de l'interaction entre une main robotique et un objet de grandes déformations. La modélisation du contact proposée nécessite peu de temps pour la détection des contacts et le calcul des forces dues à l'interaction.

Une autre propriété très intéressante du modèle proposé est qu'il permet d'assurer une continuité en vitesse et en accélération. Cette propriété facilite l'intégration numérique. En outre, le modèle reste suffisamment simple pour envisager son utilisation en ligne pour des tâches de manipulation de corps déformables. En effet, il est possible de mettre à jour la forme de contact local, la forme globale de l'objet, ainsi que la répartition des forces sur la zone de contact à des fréquences raisonnables afin de gérer la planification des forces de contact ainsi que le contrôle des mouvements des doigts.

3 Planification de la préhension d'objets déformables

La première partie de ce chapitre présente la modélisation des objets déformables manipulés. La deuxième partie décrit la stratégie de prise adoptée. A partir de critères géométriques, initialement utilisés pour des objets rigides, nous avons développé une méthode de détermination de la configuration initiale de la main par rapport à l'objet déformable 3D à manipuler.
La validation de cette stratégie est effectuée via une implémentation numérique.

3.1 Modélisation d'objets déformables 81
3.1.1 Modèle masse-ressort 81
3.1.2 Déformation de l'objet 84
3.2 Configuration de saisie de l'objet 85
3.3 Modèle géométrique du robot et de la main 91
3.3.1 Modèles du robot Adept Viper S1700D 91
3.3.2 Modèle de la main Barrett 93
3.4 Stratégie de pré-grasp 94
3.5 Planification de la manipulation d'objet 96
3.6 Conclusion 100

3.1 Modélisation d'objets déformables

La modélisation des objets à manipuler est inspirée des travaux récents sur la modélisation des objets déformables [Boudet06, Chendeb07, Essahbi13]. Nous modélisons ceux-ci par un réseau de système masse-ressort non linéaire.

3.1.1 Modèle masse-ressort

Le modèle masse-ressort se caractérise par la définition des interactions qui existent entre les nœuds du maillage de l'objet considéré. Ces interactions sont modélisées à l'aide de ressorts, caractérisés par leurs propriétés mécaniques (longueurs au repos et constantes de raideur et d'amortissement). L'intégration et la mise en œuvre de ce modèle repose sur deux étapes successives :

- La première étape consiste à réaliser une modélisation géométrique de l'objet considéré. Elle peut être issue d'un modèle CAO 3D basé sur l'identification des surfaces frontières du solide ou être définie par un domaine volumique constitué d'un nuage de points en 3D.
- L'étape suivante consiste à réaliser une discrétisation de l'objet par un maillage éléments finis. Plusieurs types de maillage peuvent être utilisés en fonction des besoins de modélisation et de l'application. Le maillage que

nous avons utilisé est un maillage tétraédrique généré par le logiciel Ansys®.

Les fichiers issus du logiciel Ansys® contiennent les numéros des nœuds du maillage et leurs positions initiales ainsi que les numéros des tétraèdres et les nœuds qui les composent, comme illustré par la figure 3-1.

Structure des nœuds

Numéro	X	Y	Z
1	0	0	40
2	0	0	- 40
3	0	13.68	37.58

Structure des tétraèdres

Élément \ Nœuds	N_1	N_2	N_3	N_4
1	28	47	54	29
2	55	30	56	35
3	55	47	13	29

Figure 3-1 Structure du fichier de maillage utilisé

Le choix de la taille du maillage utilisée est très important. En effet ce dernier a un impact fort sur le temps de calcul et la précision du modèle dans le cas d'une simulation dynamique. De manière générale, l'utilisation de maillages très fins (nombre de nœuds important) implique des temps de calcul importants mais permet de mieux décrire le comportement de l'objet. Dans notre cas, nous avons utilisé des maillages de tailles moyennes (100-500 nœuds) qui assurent une reproduction réaliste de la géométrie des objets et un comportement mécanique fidèle, tout en limitant le temps de calcul.

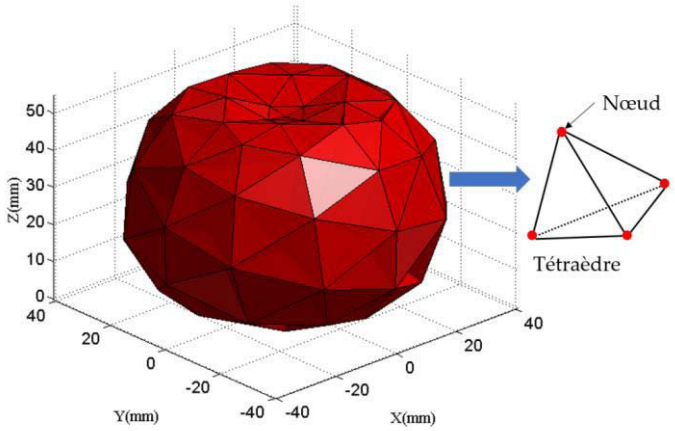

Figure 3-2 Modèle d'objet déformable avec 97 nœuds et 314 éléments.

Pour le paramétrage de notre modèle, nous devons définir les masses ponctuelles à répartir sur les nœuds ainsi que les raideurs à attribuer aux ressorts du maillage. La définition de ces paramètres est basée sur la masse volumique, le module de Young et le coefficient de Poisson de l'objet à modéliser.

La répartition de masse ponctuelle consiste à prendre en compte la masse volumique de l'objet et à calculer la masse de chaque tétraèdre du modèle. Celle-ci est ensuite répartie sur les quatre nœuds de ce tétraèdre. Cette répartition influe directement sur le comportement global du modèle. En effet, la masse apparaît de manière explicite dans les équations du mouvement des nœuds. Les travaux de Chendeb [Chendeb07] propose une méthode d'homogénéisation de masse volumique en 3D valable pour les maillages tétraédriques. Ainsi, la masse m_i au nœud i est déterminée à partir de la masse volumique ρ de l'objet modélisé et des volumes V_{e_j} des éléments e_j auxquels il appartient par :

$$m_i = \sum_{j=0}^{\mathrm{n}} \rho . \frac{V_{e_j}}{4} \tag{3.1}$$

Les résultats présentés par Chendeb [Chendeb07] et Essahbi [Essahbi13] montrent que l'utilisation de cette formulation donne un comportement réaliste de déformation. C'est cette formulation que nous avons retenue pour notre modèle.

La détermination des raideurs à attribuer aux ressorts du maillage est un facteur déterminant afin de garantir des simulations réalistes du comportement mécanique de l'objet modélisé. Parmi les solutions présentées dans la littérature, la méthode de Van Gelder [Gelder98, Gelder04] est basée sur les lois de la mécanique des milieux continus. Van Gelder a proposé une formulation reliant les raideurs des ressorts d'un maillage triangulaire surfacique 2D aux paramètres mécaniques du matériau de l'objet simulé. Baudet [Baudet06] et Chendeb [Chendeb07] ont proposé d'autres approches pour la détermination des raideurs du système masse-ressort. Dans nos travaux, nous adoptons la méthode proposée par Chendeb qui représente une extension de l'étude de Van Gelder [Gelder98] pour le cas de maillages volumiques tétraédriques (Figure 3-3). Cette approche consiste à calculer la raideur K_c pour toute arête de longueur l par l'utilisation du module de Young E du matériau de l'objet défini par :

$$K_c = \frac{\mathrm{E} \, . \sum_e V_e}{|l^2|} \tag{3.2}$$

Où les V_e sont les volumes des tétraèdres qui ont comme arête le ressort c dont nous calculons la raideur. L'avantage de cette approche est la possibilité de lier

ces raideurs aux propriétés mécaniques des matériaux des objets modélisés, ce qui permet d'avoir des simulations plus réalistes [Essahbi13].

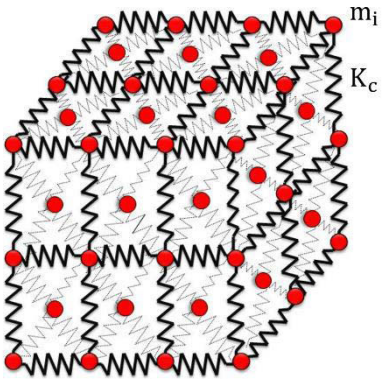

Figure 3-3 Paramétrage du système masse-ressort

Cette modélisation est simple à implémenter, intuitive et efficace au niveau calculatoire. Elle permet d'obtenir des simulations réalistes des objets déformables.

3.1.2 Déformation de l'objet

Nous présentons maintenant la démarche de simulation des déformations des objets modélisés. L'algorithme utilisé (figure 3-4) débute par une étape d'initialisation durant laquelle nous définissons les informations relatives au maillage (liste des nœuds et leurs coordonnées, liste des éléments). Nous définissons ensuite les différentes connectivités (nœuds, facettes, éléments). Puis, nous définissons les paramètres décrivant le matériau de l'objet modélisé (module de Young, coefficient de Poisson, amortissement, masse volumique). Durant cette étape, l'algorithme calcule également les raideurs des ressorts et réalise la distribution des masses sur l'ensemble des nœuds du maillage.

Le passage à la phase dynamique est lié à l'interaction des doigts de la main avec l'objet. Ceci revient à appliquer des conditions aux limites sur le modèle (déplacements, forces extérieures, fixation, vitesses, pressions…). Pour chaque itération, l'ensemble des nœuds est parcouru et les forces élastiques appliquées sont calculées. Ensuite, les nouvelles positions des nœuds sont calculées par intégration numérique des équations dynamiques du mouvement (1.17) (1.18). Ceci permet de mettre à jour les déformations de l'objet. La dernière étape est consacrée à l'exportation des résultats et à l'affichage graphique.

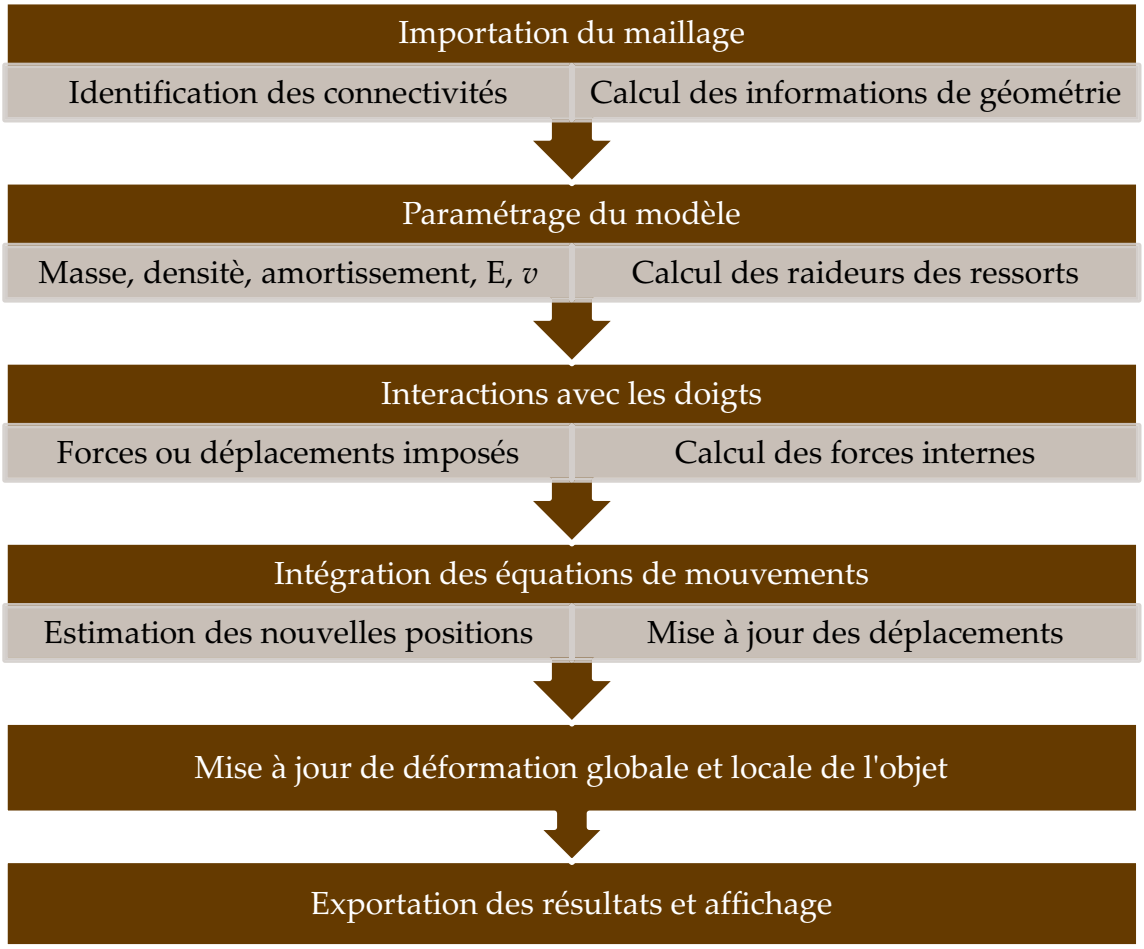

Figure 3-4 Démarche de la simulation du modèle

Cet algorithme est implémenté en utilisant Matlab® et il est intégré dans notre outil de simulation et de planification de trajectoires.

3.2 Configuration de saisie de l'objet

Nous présentons maintenant la procédure utilisée pour la détermination d'une configuration de saisie *force closure* et la définition des points de contact à partir d'un ensemble de points représentant la surface extérieure d'un objet 3D.

Celle-ci repose sur les hypothèses suivantes :

- L'utilisation de trois doigts pour l'opération de prise.
- Les premiers contacts entre les doigts et l'objet sont des contacts ponctuels.
- La surface extérieure de l'objet est représentée par un ensemble de points Ω. Elle est décrite par les vecteurs de positions $\vec{P}_i$ mesurées par rapport au repère de référence situé au centre de masse ($\vec{P}_{co}$) de l'objet.

L'approche proposée dans nos travaux est basée sur l'utilisation des deux critères de prise *force closure* que nous avons présentés au chapitre 1.

- *Définitions des points de saisie*

Une saisie à 3 doigts est plus fiable en terme de stabilité, d'évitement de glissement et d'équilibre des forces quand elle tend vers une saisie équilatérale idéale [Mirtich94]. Ainsi, chaque prise à trois doigts peut être caractérisée par une valeur mesurant sa similarité à un triangle équilatéral.

Nous proposons un algorithme basé sur des critères géométriques pour atteindre une prise équilatérale. Tout d'abord l'ensemble des triangles de prise est déterminé en balayant les points appartenant aux surfaces de contact Ω. Puis, par l'utilisation du critère Q_1 proposé par Park [Park95, Roa14], notre algorithme compare les valeurs d'angles des triangles formés à 60° (π/3 rad), l'angle qui caractérise un triangle équilatéral, afin de choisir la configuration la plus proche d'un triangle équilatéral.

$$Q_1 = \frac{3}{2\pi}\left(\left|\alpha - \frac{\pi}{3}\right| + \left|\beta - \frac{\pi}{3}\right| + \left|\gamma - \frac{\pi}{3}\right|\right) \tag{3.3}$$

Pour une valeur cible d'angle de 3/2π, la valeur minimale possible de Q_1 est 0 pour un triangle équilatéral parfait, 2 pour le cas le plus défavorable (le triangle dégénère en segment) et 1 pour un état intermédiaire.

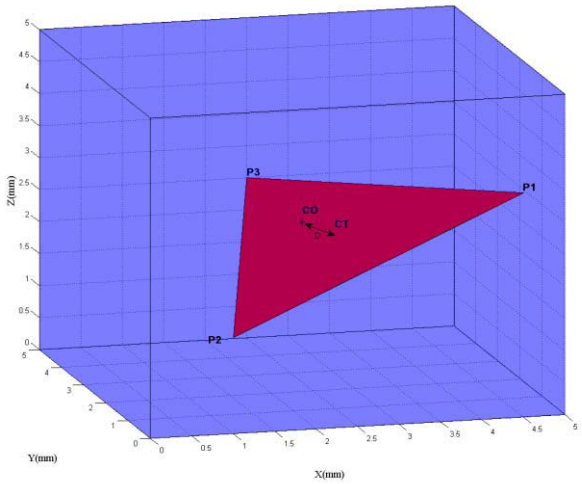

Figure 3-5 Distance entre le centre de masse de l'objet C_O et le centre de plan de prise C_T

Au niveau de l'évaluation des angles du triangle, nous utilisons une marge d'erreur définie par l'intervalle [0 rad, 0.3 rad]. Selon la densité des points de la surface de contact Ω, l'algorithme peut donner plusieurs configurations de prise. Le choix de la configuration finale est assuré par l'utilisation du critère suivant.

- *Centre des efforts*

Nous nommons ce critère Q_2. Il permet de mesurer la distance entre le centre de masse de l'objet C_O et le centre du triangle de saisi C_T (figure 3-5), défini comme :

$$Q_2 = |C_O - C_T| \tag{3.4}$$

Ce critère a été élaboré pour obtenir des saisies stables par rapport aux torseurs générés par les forces gravitationnelles et inertielles [Park95, Roa14].

La synthèse de prise est basée sur les deux critères Q_1 et Q_2. Pour chaque triangle nous calculons Q_1 et Q_2. L'algorithme de détermination d'une configuration de saisie de l'objet est le suivant :

Données d'entrée: points P_i sur les surfaces de contact Ω avec leurs coordonnées 3D

1) Calcul de l'ensemble Γ des triangles de prise définis à partir des points P_i.

2) Calcul de la valeur des angles des triangles de prise de l'ensemble Γ.

3) Choix des triangles de prise les plus proches d'un triangle équilatéral par application du critère Q_1, l'ensemble de ces triangles est nommé Ψ.

4) Calcul du barycentre C_T des triangles de saisie de l'ensemble Ψ.

5) Calcul de la distance entre les centres C_T et C_O des triangles de l'ensemble Ψ par l'application du critère Q_2.

6) Choix du triangle qui minimise Q_2

Output : 3 points de contact initiaux de la configuration de saisie

La méthode a été implémentée avec le logiciel Matlab® pour la détermination de la configuration initiale de prise pour des objets de différentes formes (sphère, cylindre, cube).

Le premier exemple correspond au cas d'un objet sphérique de 80 mm de diamètre. Le modèle comporte 182 nœuds et 675 éléments. Les trois points de contact de la configuration de prise ainsi que la mesure des deux critères Q_1 et Q_2 sont présentés dans le tableau 3-1.

P1 (mm)			P2 (mm)			P3 (mm)		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
-21.74	33.57	-0.11	-22.47	-33.08	0.74	37.22	0	12.55

Q_1	$Q_2(mm)$
0.0491	4.8659

Tableau 3-1 Evaluation de la configuration initiale pour une sphère

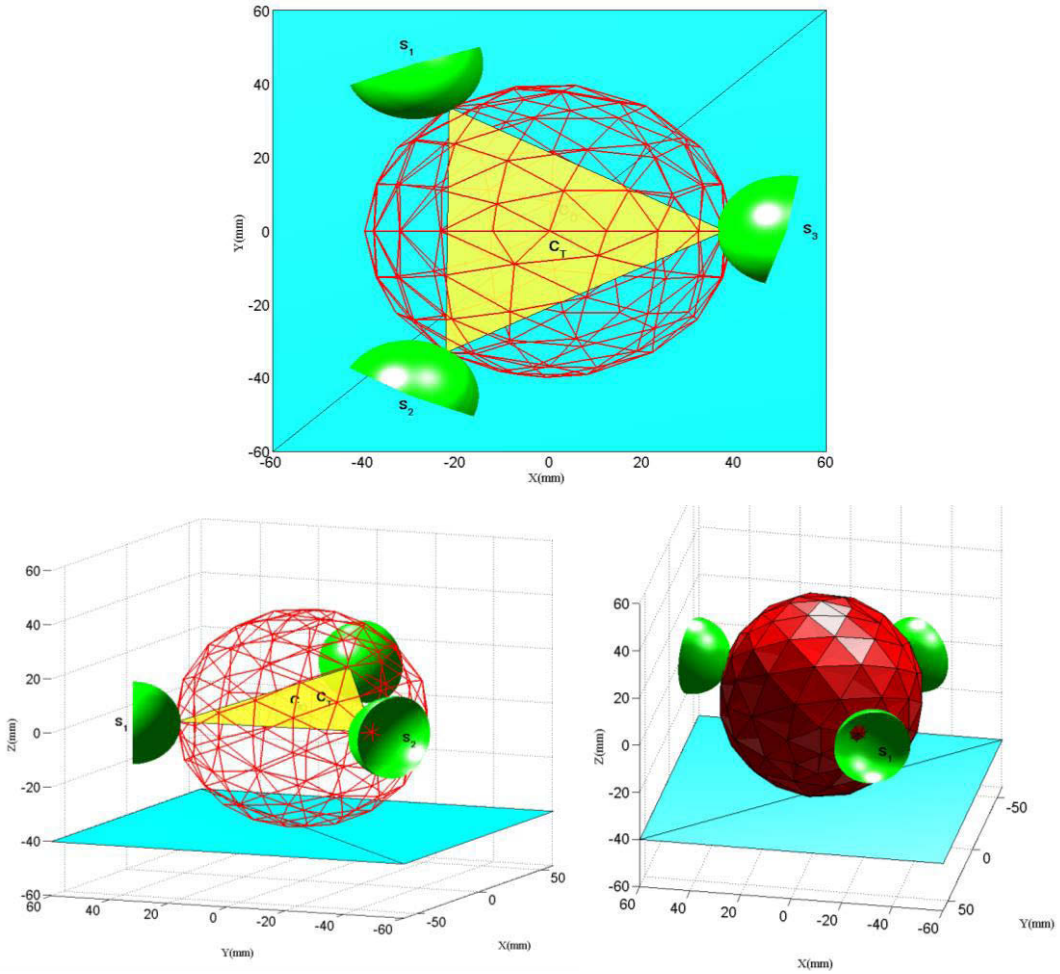

Figure 3-6 Configuration de prise *force closure* d'une sphère

Le deuxième exemple correspond au cas d'un cube de 80 mm de côté. Le modèle comporte 162 nœuds et 539 éléments. Les trois points de contact et la mesure des deux critères Q_1 et Q_2 sont présentés dans le tableau 3-2.

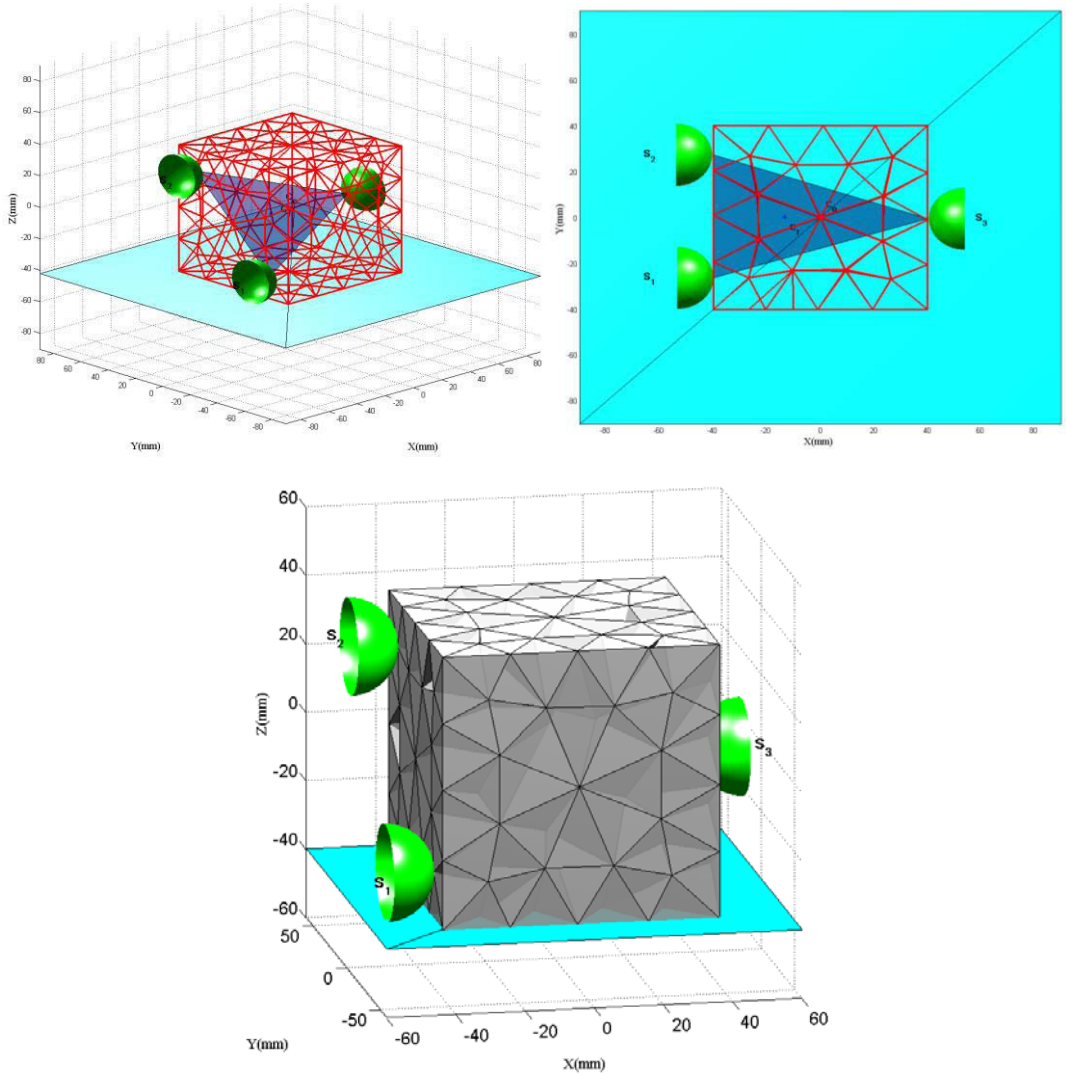

Figure 3-7 Configuration de prise *force closure* d'un cube

P1 (mm)			P2 (mm)			P3 (mm)		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
- 40	26.23	-6.20	-40	27.26	26.80	40	- 0.51	- 0.60

Q_1	$Q_2(mm)$
0.2302	13.334

Tableau 3-2 Evaluation de la configuration initiale pour un cube

Le troisième exemple correspond au cas d'un cylindre de rayon 35 mm et de longueur 140 mm. Le modèle comporte 226 nœuds et 806 éléments. Les trois

points de contact et la mesure des deux critères Q_1 et Q_2 sont présentés dans le tableau 3-3.

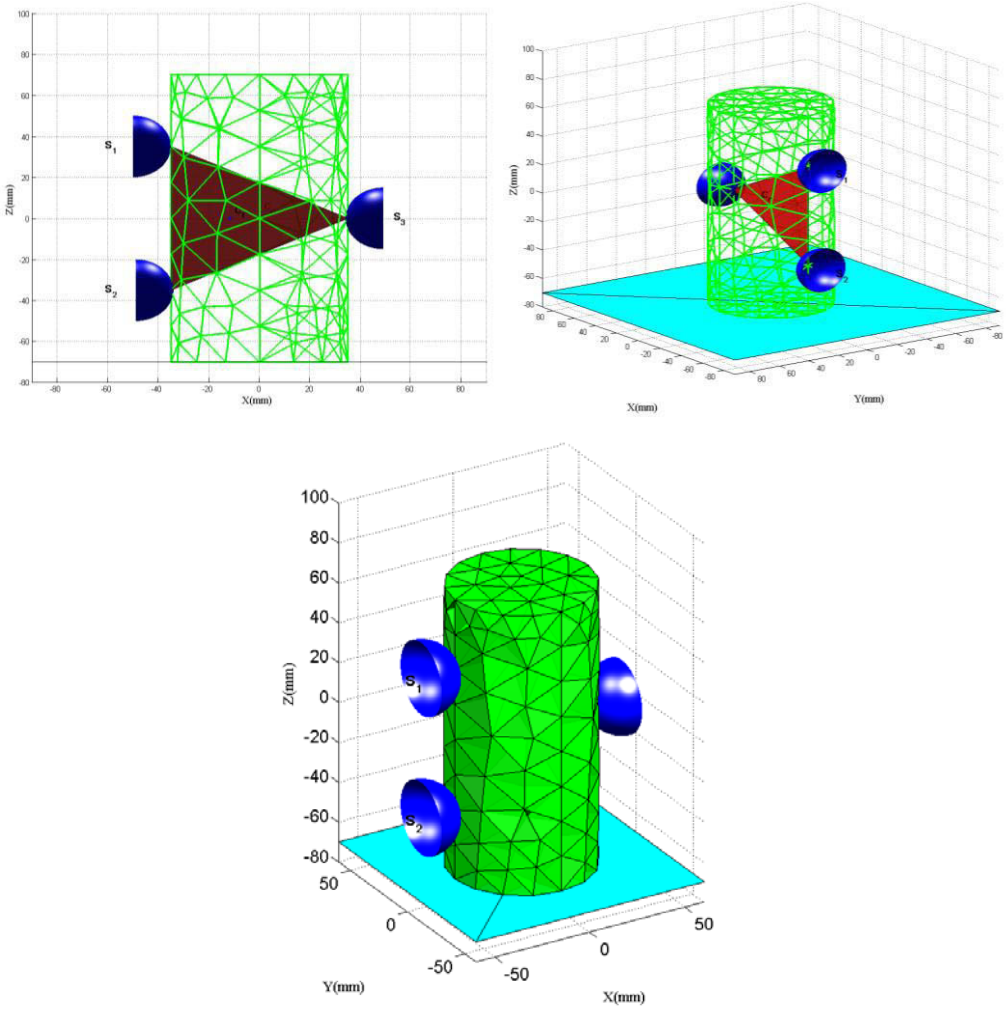

Figure 3-8 Configuration de prise *force closure* d'un cylindre

P1 (mm)			P2 (mm)			P3 (mm)		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
-35	0	35	- 35	0	-35	35	0	0

Q_1	$Q_2(mm)$
0.1145	11.6667

Tableau 3-3 Evaluation de la pose initiale pour un cylindre

Dans cette section, nous avons présenté notre approche pour la détermination de la pose initiale. Cette approche sera utilisée dans la section suivante pour la planification de la prise d'un objet déformable.

La planification d'une prise d'objet nécessite la connaissance des modèles géométriques du robot et de la main que nous rappelons dans le paragraphe suivant.

3.3 Modèle géométrique du robot et de la main

3.3.1 Modèles du robot Adept Viper S1700D

Cette modélisation fait apparaître 6 transformations successives en respectant l'ordre des axes de rotation imposé par la modélisation TCS [Gogu97]. Le repère fixe est le repère ($O_0X_0Y_0Z_0$). On utilise les 6 angles de rotation suivante (Figure 3-9) :

- φ_{10} angle de rotation autour de $Z_1 = Z_0$
- φ_{21} angle de rotation autour de X_2
- φ_{32} angle de rotation autour de X_3
- φ_{43} angle de rotation autour de Y_4
- φ_{54} angle de rotation autour de Z_5
- φ_{65} angle de rotation autour de X_6

Les paramètres géométriques liés à l'architecture du robot sont décrits par :

- b_1 longueur de la normale commune entre les axes des deux liaisons adjacents à l'élément 1
- b_2 longueur de la normale commune entre les axes des deux liaisons adjacents à l'élément 2
- b_3 longueur de la normale commune entre les axes des deux liaisons adjacents à l'élément 3
- a_4 décalage axial entre le centre de la liaison 4 et la liaison 5 suivant Y4
- b_6 représente la valeur de décalage entre le centre du poignet et le point piloté de l'outil TCP suivant X_6.

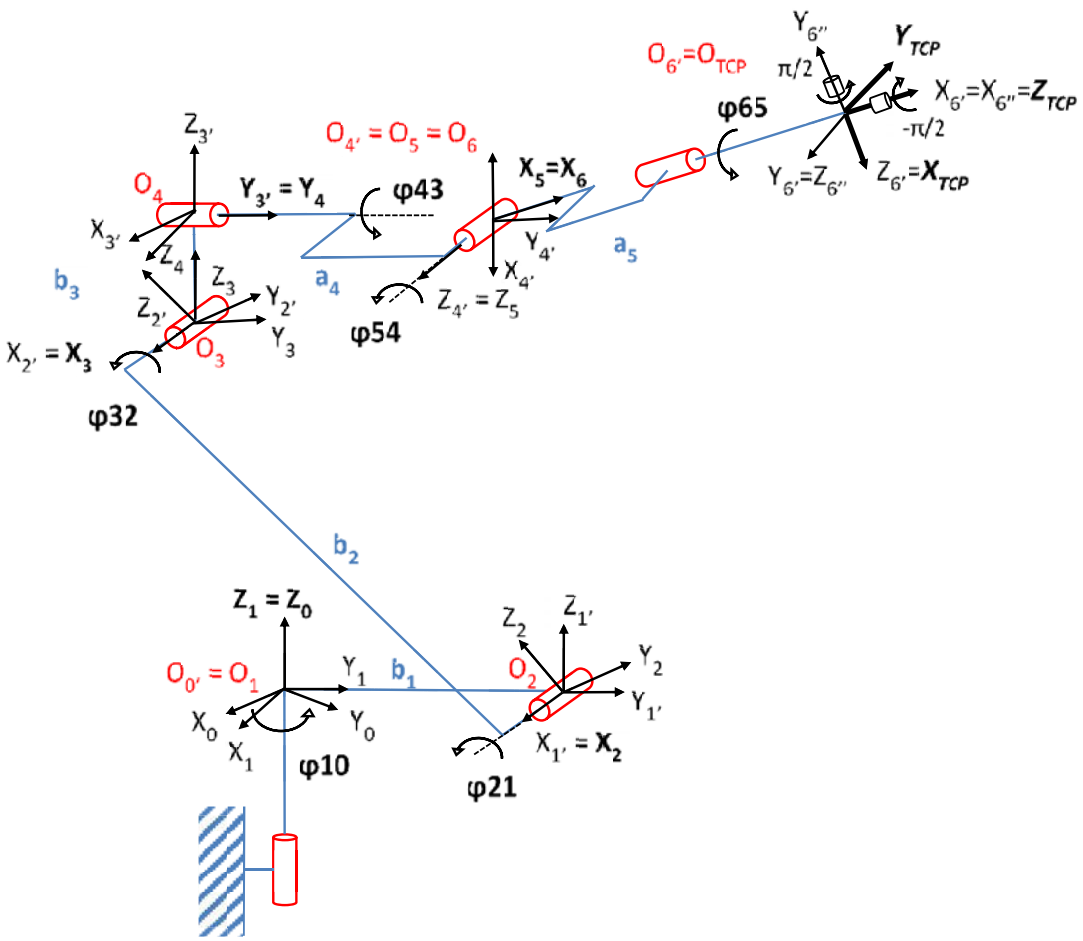

Figure 0-9 Modélisation du robot Adept Viper S1700D par la méthode TCS

Le modèle géométrique direct est obtenu par la multiplication des opérateurs homogènes qui représentent les déplacements finis dans les liaisons. Il est représenté par les transformations du repère de base O au repère outil TCP par :

$$O_0X_0Y_0Z_0 \xrightarrow{R^z_{01}(\varphi_{10})} O_1X_1Y_1Z_1 \xrightarrow{T^y_{1'}(b_1)} O_{1'}X_{1'}Y_{1'}Z_{1'} \xrightarrow{R^x_{1'2}(\varphi_{21})} O_2X_2Y_2Z_2 \xrightarrow{T^y_{22'}(b_2)} O_{2'}X_{2'}Y_{2'}Z_{2'}$$
$$\xrightarrow{R^x_{2'3}(\varphi_{32})} O_3X_3Y_3Z_3 \xrightarrow{T^z_{33'}(b_3)} O_{3'}X_{3'}Y_{3'}Z_{3'} \xrightarrow{R^y_{3'4}(\varphi_{43})} O_4X_4Y_4Z_4 \xrightarrow{T^y_{44''}(a_4)} O_{4''}X_{4''}Y_{4''}Z_{4''}$$
$$\xrightarrow{R^z_{4''5}(\varphi_{54})} O_5X_5Y_5Z_5 \xrightarrow{R^x_{56}(\varphi_{65})} O_6X_6Y_6Z_6 \xrightarrow{T^x_{66''}(a_6)} O_{TCP}X_{TCP}Y_{TCP}Z_{TCP}$$

Le MGD est donné en Annexe A.

- *Modèle géométrique inverse*

Les équations permettant d'extraire les valeurs articulaires φ_{10} à φ_{65} sont basées sur la méthode de Paul. Celles-ci sont présentées en Annexe A.

3.3.2 Modèle de la main Barrett

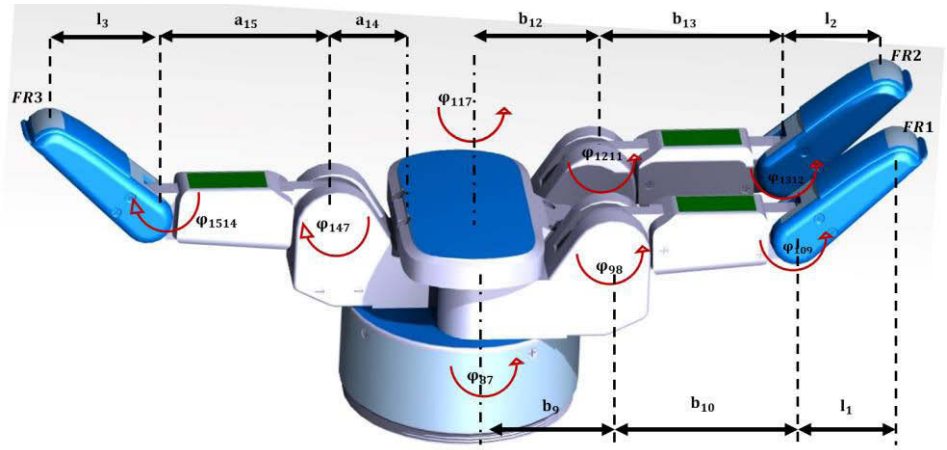

Figure 3-10 Barrett hand

Le mouvement des doigts de la main Barrett est défini uniquement par 4 composantes angulaires $q_{M1} \dots q_{M4}$ reliées aux valeurs articulaires φ_i des doigts (Fig. 3-11) par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{98} \\ \varphi_{109} \\ \varphi_{1211} \\ \varphi_{1312} \\ \varphi_{147} \\ \varphi_{1514} \\ \varphi_{87} \\ \varphi_{117} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/125 & 0 & 0 & 0 \\ 1/375 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/125 & 0 & 0 \\ 0 & 1/375 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/125 & 0 \\ 0 & 0 & 1/375 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2/35 \\ 0 & 0 & 0 & -2/35 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_{M1} \\ q_{M2} \\ q_{M3} \\ q_{M4} \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

avec q_{Mk} = [0, 17500] pour k = [1, 2, 3] est la plage de variation des codeurs des moteurs k, q_{Mk} = [0, 3150] est la plage de variation du moteur 4 d'écartement des doigts FR1 et FR2.

- *Modèle géométrique direct*

Cette modélisation fait apparaître 3 transformations successives pour les doigts FR1 et FR2 et deux transformations successives pour le doigt 3. Le repère fixe est le repère ($O_7X_7Y_7Z_7$) (Figure 3-11).

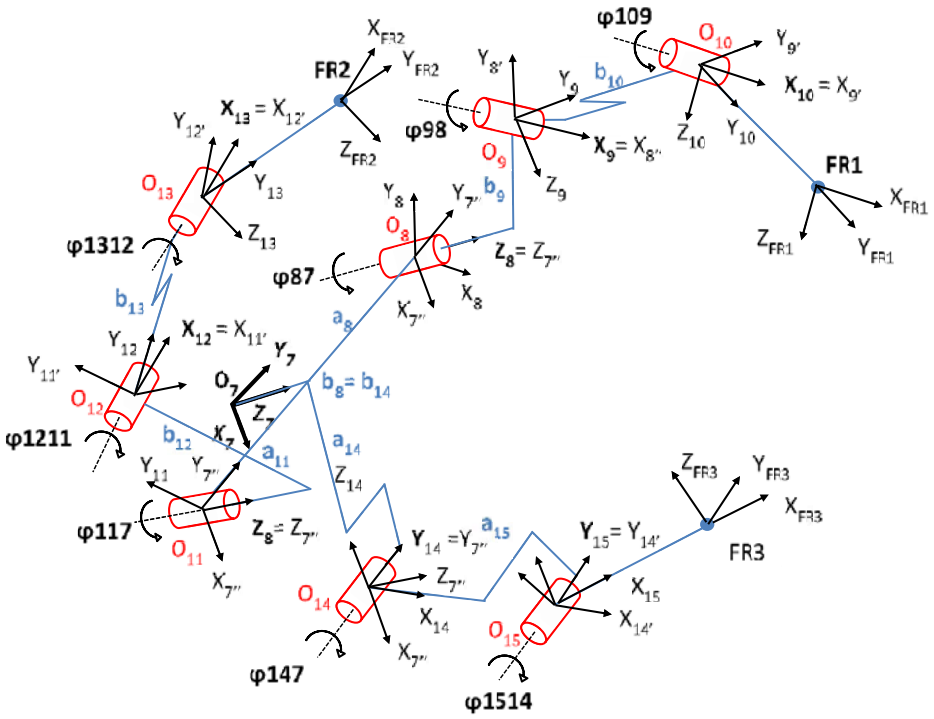

Figure 3-11 Paramétrage de la main Barrett par la méthode TCS

Tous les résultats relatifs à la modélisation de la main Barrett seront présentés dans l'Annexe B.

- *Modèle géométrique inverse* (voir ANNEXE B)

3.4 Stratégie de pré-grasp

Nous présentons dans cette partie la stratégie de pré-grasp utilisée pour définir la configuration de prise pour la main Barrett à trois doigts. Le processus comporte deux étapes : la première permet l'orientation de la main par rapport à l'objet, la seconde définie une solution de prise pour les trois doigts de la main.

- *Positionnement initial de la main*

La première stratégie consiste à orienter la main Barrett afin que le repère du TCP coïncide avec le repère de centre de masse de l'objet C_0 comme présenté à la figure 3-12. La distance initiale entre le centre de la paume et le point piloté TCP est défini arbitrairement afin que celui-ci se trouve dans l'espace de travail de la main.

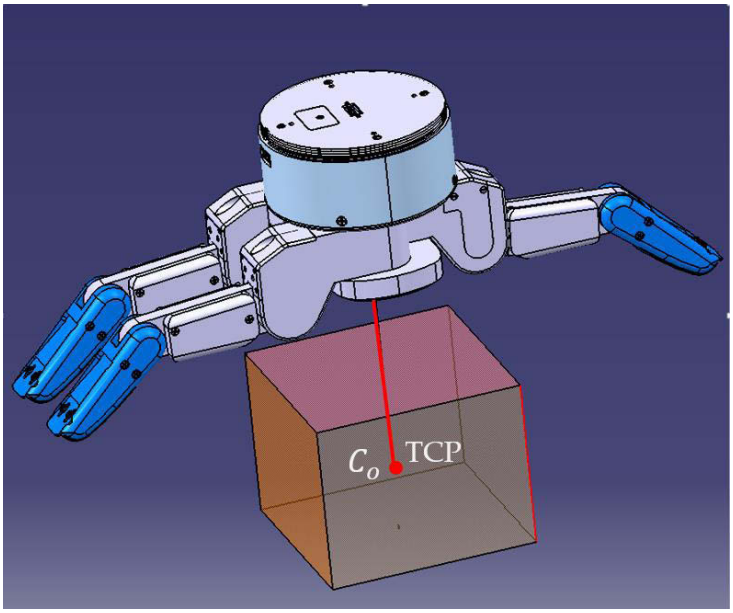

Figure 3-12 Coïncidence de TCP et C_O

La deuxième stratégie consiste à orienter la main afin que le repère du TCP coïncide avec le repère du centre de triangle de prise C_T comme présenté à la figure 3-13.

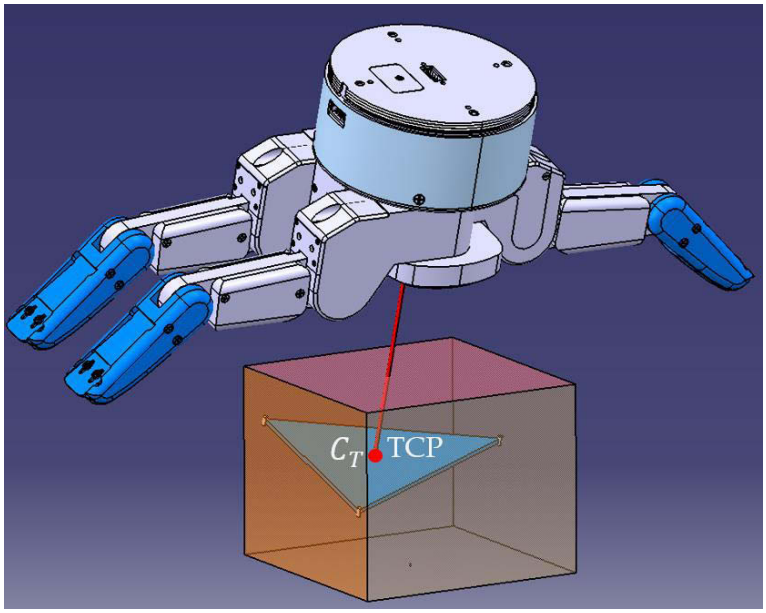

Figure 3-13 Coïncidence de TCP et C_T

Nous avons retenu la deuxième solution pour le positionnement initial de la main Barrett. Celle-ci facilite la recherche d'une solution de prise permettant de définir les vecteurs de déplacement des doigts de la main, lors de la déformation de l'objet, très proche des directions de déplacement (orientés en direction de C_T) définies par les critères de saisie *force closure* retenus.

- *Recherche d'une solution de prise*

La résolution du MGI des doigts permet d'estimer les valeurs articulaires φ_i de chacun des doigts pour atteindre les trois points de saisie (P1, P2 et P3) définis dans le repère O_7 de la main. Cependant, chaque phalange est pilotée par une seule composante articulaire q_{Mk} telle que :

$$\varphi_{98} = 1/125\, q_{Mk} \quad \text{et} \quad \varphi_{109} = 1/375\, q_{M1} \tag{3.6}$$

La définition d'une configuration de prise nécessite la définition des valeurs de q_{Mk}, k = [1, 2, 3] respectant les relations définies à l'équation 3.9 pour chacun des doigts permettant d'atteindre les points de saisie. L'algorithme mis en œuvre est le suivant :

Données d'entrée : Trois points de contact P1, P2 et P3

1) Réorientation de la main dans le plan de saisie et coïncidence de TCP avec C_T

2) Calcul du MGI et définition des valeurs articulaires φ_i et q_{M4}

3) Recherche d'une solution pour q_{M1} et q_{M2} par itération successive sur la longueur L afin de trouver une solution respectant la relation

$$\varphi_{109} \cong 1/3\, \varphi_{98} \text{ et } \varphi_{1312} \cong 1/3\, \varphi_{1211}$$

4) Réorientation de la main autour de Y_{TCP} et ajustement de la distance L afin de définir une solution pour q_{M3} respectant la relation

$$\varphi_{1514} \cong 1/3\, \varphi_{147}$$

Output : Définition des valeurs de q_{M1}, q_{M4} et des 6 composantes de la jauge outil définissant le TCP par rapport à R_6

Dans le cadre de la recherche itérative de solution, nous considérons que la solution est validée pour une valeur d'écart d'angle pour chacun des doigts ($\Delta = \varphi_{109} - 1/3\, \varphi_{98}$) inférieure à 2 degrés.

3.5 Planification de la manipulation d'objet

Nous présentons maintenant la démarche et les résultats des configurations de saisie appliquées à la plateforme robotique utilisée (figure 3-14).

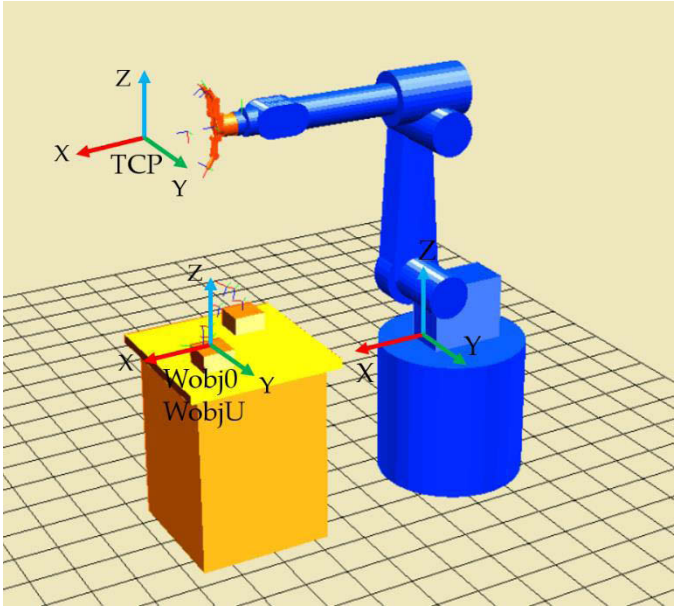

Figure 3-14 Représentation de la plateforme Robot + main sous Matlab®

Dans la commande Adept, la position est exprimée en millimètres et l'orientation est définie par les angles d'Euler ZYZ exprimées en degrés. La pose P_i est définie par une transformation à 6 composantes, les trois premières correspondent à la position (x, y, z) et les trois suivantes aux angles d'Euler (y, p, r). L'ensemble des poses de la trajectoire est calculé dans le repère de base du robot *Wobj0* au travers de la combinaison de deux repères : *WobjU* (repère utilisateur) positionné par rapport au repère de base *Wobj0* et *WobjO* (repère objet) positionné par rapport au repère *WobjU*.

Dans notre cas, le repère *WobjO* et *WobjU* sont confondus (Figure 3-14). Nous donnons à titre d'exemple les composantes du repère *WobjU*.

$$WobjU = Trans(1350.000,200.000,465.000,-135.000,0.000,0.000)$$

Les poses sont exprimées dans le repère *WobjU*. Nous donnons à titre d'exemple deux poses de la trajectoire exprimées dans *WobjU*.

$$P_1 = Trans(100.000,0.000,0.000,-90.000,180.000,0.000)$$

$$P_N = Trans(500.000,0.000,0.000,-90.000,180.000,0.000)$$

Le TCP est également décrit par une transformation à 6 composantes définissant la position et l'orientation du point piloté par rapport au repère R6 du robot (Fig. 3-10).

$$T_Barret = Trans(2.100,0.000,232.700,-5.251,6.528,5.224)$$

La figure 3-15 présente la démarche utilisée pour la planification de la prise.

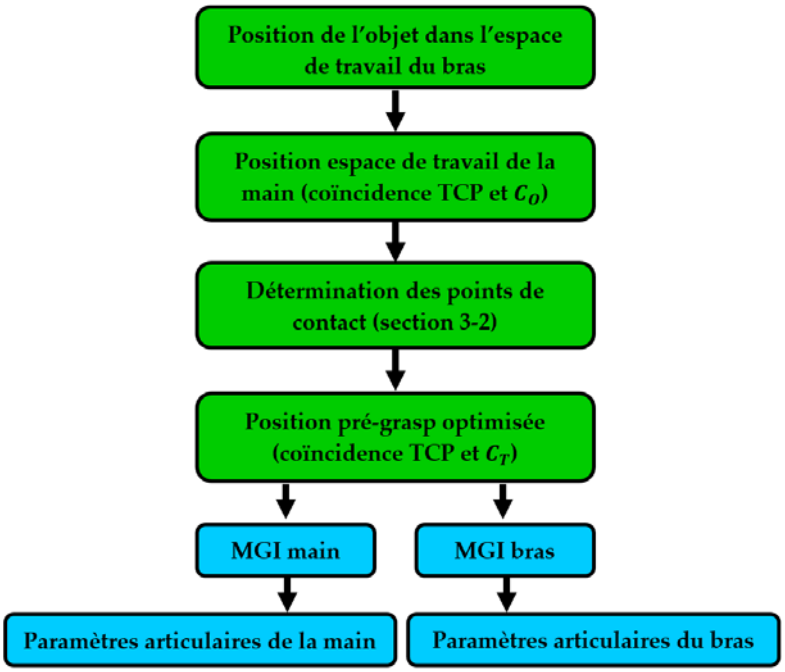

Figure 3-15 Démarche globale pour la planification de la prise initiale

La première étape consiste à préciser la position et l'orientation de l'objet dans l'espace de travail du robot. Le centre et l'orientation de l'objet coïncident avec les poses P_i de la trajectoire. Nous appliquons ensuite la stratégie présentée à la figure 3-12 qui consiste à mettre en coïncidence le TCP avec C_0(Fig.3-12). Nous utilisons les résultats issus de la section 3-2 pour déterminer les points de contact (*P1, P2* et *P3*). Nous calculons le triangle de prise formé par ces trois points de contact ainsi que son barycentre C_T. Nous déterminons ensuite la configuration pré-grasp par la translation et l'orientation de la main. Cette étape consiste à mettre en coïncidence les deux points TCP et C_T et aligner l'axe Z_7 perpendiculaire au triangle de prise.

Pour effectuer la préhension de l'objet, il est nécessaire de déterminer les valeurs articulaires du robot d'une part, et les valeurs articulaires de la main d'autre part. La résolution du MGI du robot permet de calculer les valeurs articulaires qui amènent la main en position pré-grasp. Cette approche est appliquée pour la prise d'un cube et d'un cylindre.

Les différentes configurations du robot Adept et de la main Barrett pour la prise d'un cube et d'un cylindre déformable sont présentées sur les deux figures 3-16 et figures 3-17.

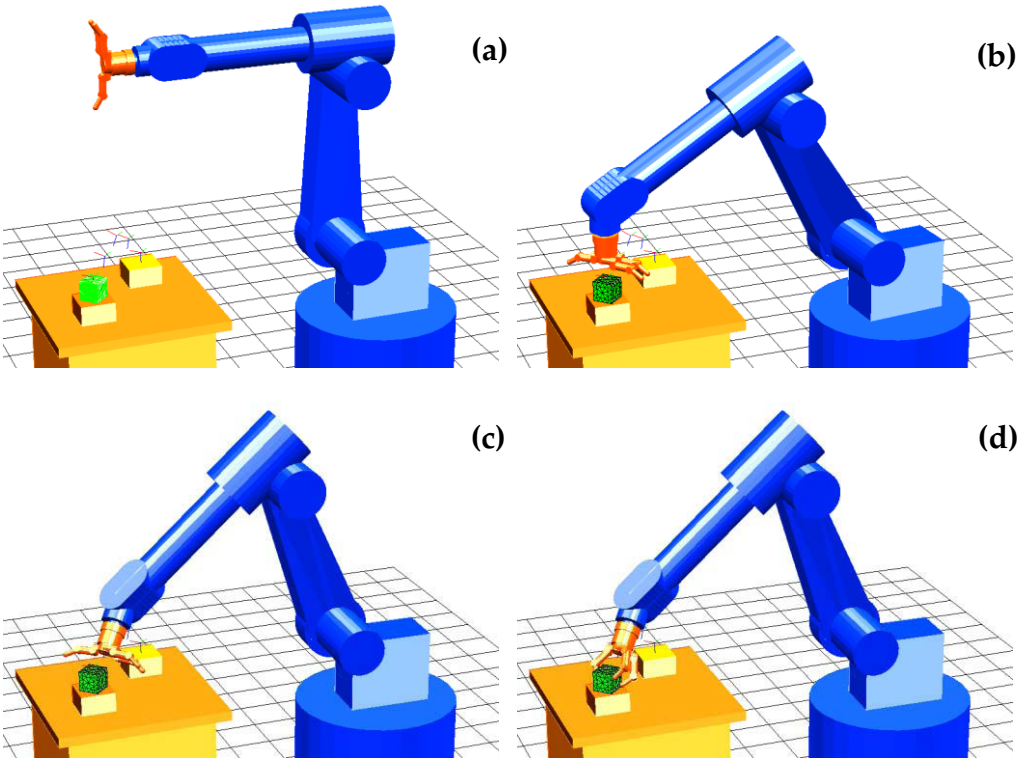

Figure 3-16 Étapes dans la définition de la configuration pré-grasp pour un cube : (b) approche, (c) orientation de la main, (d) configuration de pré-grasp

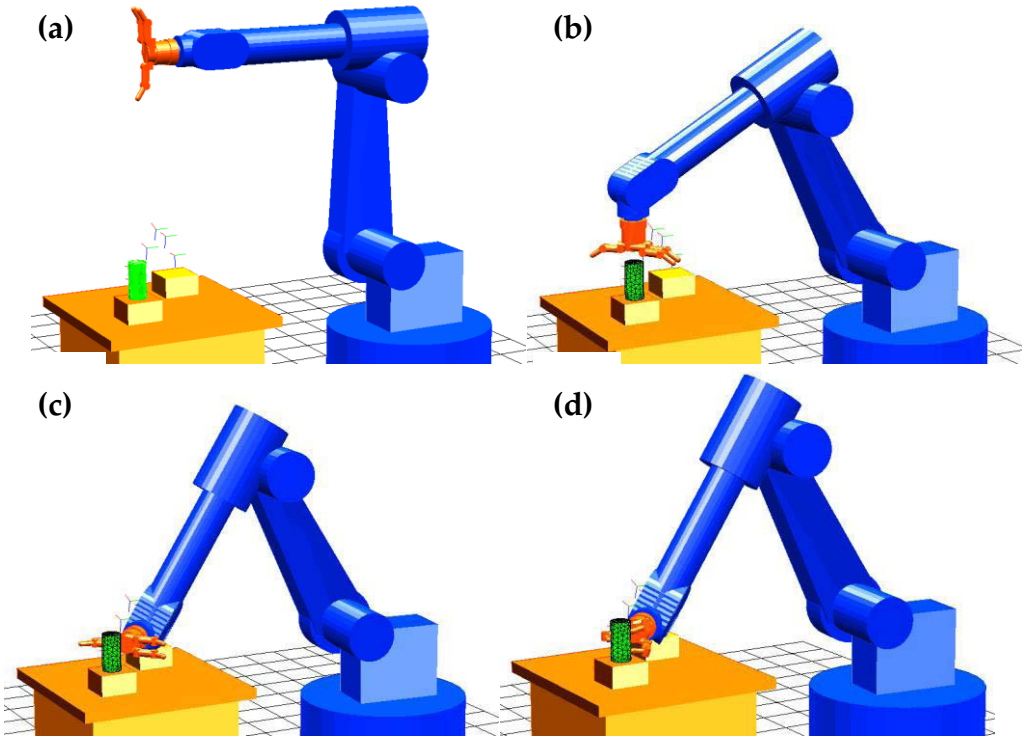

Figure 3-17 Étapes dans la définition de la configuration pré-grasp pour un cylindre : (b) approche, (c) orientation de la main, (d) configuration de pré-grasp

Les valeurs articulaires du robot $[q_1,\ldots,q_6]$ et de la main $[q_{M1},\ldots, q_{M4}]$ sont présentées dans le tableau suivant :

	cube	cylindre
Pose initiale Figure 3-16 (b), 3-17 (b)	$q_{robot(b)} = [5.771, -61.699, 177.808, 0.0, 63.891, 230.771]$ $q_{main\ (b)} = [0, 0, 0, 0]$	$q_{robot(b)} = [5.771, -62.305, 176.487, 0.0, 65.819, 230.771]$ $q_{main\ (b)} = [0, 0, 0, 0]$
Pose pré-grasp Figure 3-16 (c), 3-17 (c)	$q_{robot(c)} = [-1.424, -69.960, 202.024, 68.486, 31.825, 167.134]$ $q_{main\ (c)} = [0, 0, 0, 0]$	$q_{robot(c)} = [-6.13, -62.409, 210.789, 124.465, 70.791, 115.611]$ $q_{main\ (c)} = [0, 0, 0, 0]$
Configuration de saisie	$q_{robot(d)} = [-1.424, -69.960, 202.024, 68.486, 31.825, 167.134]$ $q_{main\ (d)} = [8960, 8960, 7709, 309]$	$q_{robot(d)} = [-6.13, -62.409, 210.789, 124.465, 70.791, 115.611]$ $q_{main\ (d)} = [8758, 8758, 8423, 320]$

Tableau 3-4 Les configurations articulaires du robot et de la main

Les jauges outils issus des résultats de pré-grasp sont présentées dans le tableau suivant :

Cube	*TBarret = Trans(11.7,0.0,239.7,92.852,44.536,-92.039)*
Cylindre	*TBarret = Trans(5.0,0.0,239.6,90.0,90.0,-90.0)*

Tableau 3-5 Jauges outils des résultats de pré-grasp

3.6 Conclusion

Ce chapitre présente la planification de prise d'objet déformable. Celle-ci nécessite tout d'abord la définition des points de saisie de l'objet puis la détermination d'une configuration de prise initiale.

Dans la première partie, nous avons présenté la modélisation de l'objet déformable basée sur le modèle masse-ressort. Celui-ci permet d'obtenir un comportement réaliste dans le cas de grandes déformations tout en ayant un coût calculatoire faible.

Nous avons ensuite présenté notre approche pour la détermination de la configuration de *pré-grasp*. La planification de prise se décompose en deux phases : la détermination de la configuration du robot manipulateur pour amener la

main à proximité de l'objet et la détermination de la configuration adaptée des doigts de la main pour saisir l'objet. Celles-ci nécessitent la modélisation géométrique du bras et de la main. La détermination des valeurs articulaires du bras et de la main est assurée par la résolution des modèles géométriques inverses.

La stratégie mise en œuvre consiste tout d'abord à mettre en coïncidence le TCP avec le centre du triangle de saisie et à aligner celui-ci avec la normale au plan de saisie. La deuxième étape consiste à rechercher itérativement une solution aux valeurs articulaires pilotées des trois doigts de la main Barrett afin d'amener ceux-ci en correspondance avec les points de saisie préalablement définis par des conditions de stabilité de prise de type *force closure*.

La planification de prise d'objet déformable a été appliquée sur deux objets, un cube et un cylindre cela a permis de valider en simulation les algorithmes mis en place. Les résultats de simulation ont confrontés aux résultats expérimentaux et présentés dans le chapitre suivant.

4 Résultats expérimentaux

Ce chapitre présente les différents résultats expérimentaux liés à la planification de prise et la préhension d'objets déformables. Une première partie présente les deux plateformes utilisées, KUKA LWR 4+ portant une main Shadow, Adept Viper portant une main Barrett. Celles-ci ont permis d'une part la validation des simulations relatives au comportement en déformation des objets, l'évaluation des caractéristiques des matériaux et d'autre part la planification de configuration de pré-grasp, de saisie stable et de manipulation de corps déformable.

4.1 Plateforme robotique 103
4.1.1 Mains robotiques 103
4.1.2 Robot KUKA LWR 4+ 106
4.1.3 Robot Adept 106
4.2 Caractérisation expérimentale des objets déformables 107
4.3 Etalonnage du capteur tactile ... 110
4.4 Essai de compression 111
4.5 Prise d'un objet déformable 114
4.6 Planification de préhension 119
4.7 Conclusion 124

4.1 Plateforme robotique

4.1.1 Mains robotiques

Les capacités de l'être humain à réaliser des tâches complexes et difficiles sont très étendues. La mécanisation et la robotisation de ces capacités par des machines est un défi dans le domaine de la robotique. Actuellement les robots remplacent avantageusement l'être humain dans le cadre de tâches manufacturières, de travaux pénibles ou dangereux. Dans notre étude, les préhenseurs robotiques sont des mains multi-doigts. Ce type de préhenseur joue un rôle crucial dans le cadre de la manipulation d'objets déformables. Afin de répondre aux exigences imposées par l'interaction avec les objets déformables, ces mains doivent avoir un nombre suffisant de degrés de liberté. Elles doivent également être équipées de capteurs tactiles pour mesurer les efforts appliqués afin d'assurer la stabilité de la prise ou la planification de la préhension.

Durant les cinq dernières décennies, différentes mains multi-doigts ont été développées. Ces développements ont été accompagnés par l'émergence de nouvelles technologies, principalement dans les domaines de l'électronique, et ont abouti à la conception de mains robotiques dextres avec des capacités pouvant se rapprocher de celles d'une main humaine. Actuellement, nous disposons à l'Institut Pascal de deux mains robotiques dextres, la main Shadow et la main Barrett.

- **La main Shadow**

La société anglaise Shadow Robotics a développé une main robotique à 5 doigts (Fig.4-1). Deux modèles de cette main sont disponibles, l'un est actionné par des muscles pneumatiques et l'autre est actionné par des moteurs électriques. Cette main permet le mouvement de 24 articulations grâce à 20 moteurs. Nous possédons la version actionnée par des moteurs électriques et équipée de capteurs BioTac. L'intégration de ces capteurs réduit le nombre de degrés de liberté de la main. En effet, l'installation du capteur sur le bout du doigt conduit au couplage des deux derniers segments (phalanges) de chaque doigt.

La main Shadow présentée à la figure 4-1 possède donc 19 ddls répartis de la manière suivante : 3 ddls par doigt au niveau de l'index, du majeur et de l'annulaire, 4 ddls par doigt pour l'auriculaire et le pouce et 2 ddls pour le poignet.

Figure 4-1 Main Shadow

Récemment plusieurs capteurs tactiles biomimétiques ont été développés. Embarqués sur une main robotique, ils permettent d'améliorer significativement la robustesse de la manipulation robotique [Tegin05]. Parmi ces capteurs, le capteur BioTac développé par Syntouch est présenté à la figure 4-2. Ce capteur permet de détecter plusieurs types d'informations tactiles comme les efforts, les micro-vibrations et la température. Le capteur BioTac se compose d'un corps rigide hébergeant 19 électrodes entouré par une peau élastique (silicone). Cette peau est gonflée par un fluide conducteur incompressible. Lorsque le capteur entre en contact avec un objet, le fluide se déplace, ce qui entraîne des changements d'impédance répartis sur l'ensemble des électrodes sur la surface de ce contact.

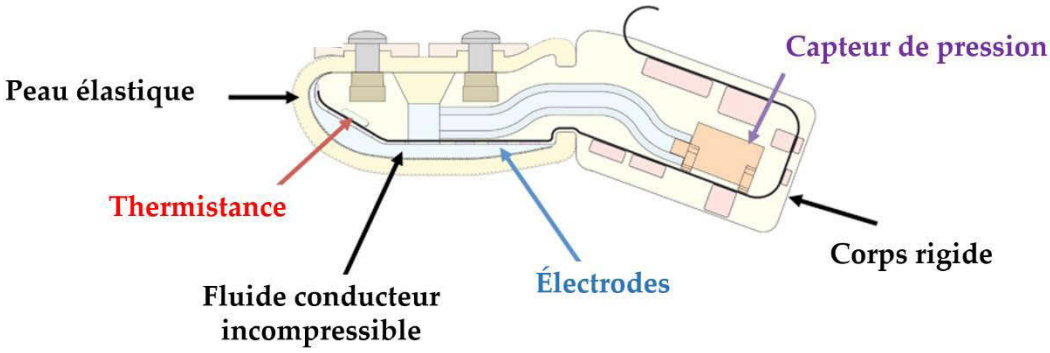

Figure 4-2 Représentation du capteur tactile BioTac

- **La main Barrett**

La main Barrett à 3 doigts présentée à la figure 4-3 est développée par Barrett Technology. Les trois doigts de la main Barrett sont identiques et les dimensions de ces phalanges sont proches de celles de la main humaine. Avec 8 articulations, cette main permet un mouvement de flexion-extension pour chaque doigt FR1/FR2/FR3 et un mouvement de rotation (180°) synchronisé autour de l'axe de la paume pour les deux doigts FR1 et FR2 (figure 4-3). De cette manière, la main dispose de 4 degrés de liberté indépendants. Elle intègre 4 moteurs, un pour chaque doigt et un moteur de déploiement pour la paume.

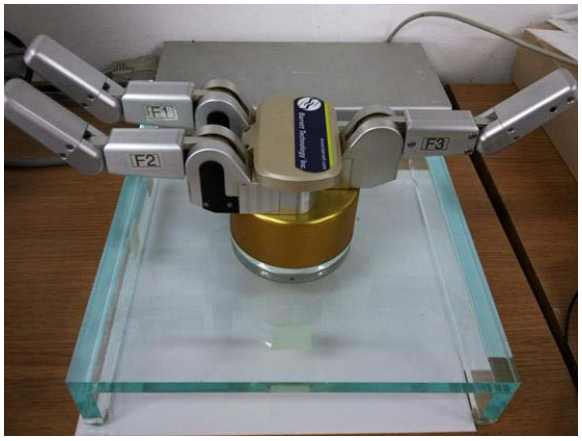

Figure 4-3 Main Barrett à 3 doigts

La main Barrett constitue ainsi un préhenseur rapide et efficace pour tout type d'opération de saisie. Pour autant, en raison des couplages articulaires, la main n'offre pas la possibilité de manipuler des objets en bout de doigt. Mais ses capacités en termes de rapidité, d'adaptation à la forme de l'objet, en font une main sous-actionnée performante et très commercialisée [Daoud11].

4.1.2 Robot KUKA LWR 4+

Dans le cadre du projet Robotex l'Institut Pascal a fait l'acquisition d'une plateforme bi-bras composée des deux robots KUKA Light Weight Robot (LWR) version 4+ à architecture sérielle. Caractérisé par une flexibilité articulaire importante, le robot KUKA LWR+ a été conçu principalement pour des tâches impliquant l'interaction avec l'homme [Bischoff10]. Pour cela, le robot possède une redondance structurale proche de celle d'un bras humain avec 7 articulations rotoïdes. Plusieurs lois de commande sont possibles pour le contrôle de ce robot : commande en position, compensation de la gravité et commande en impédance.

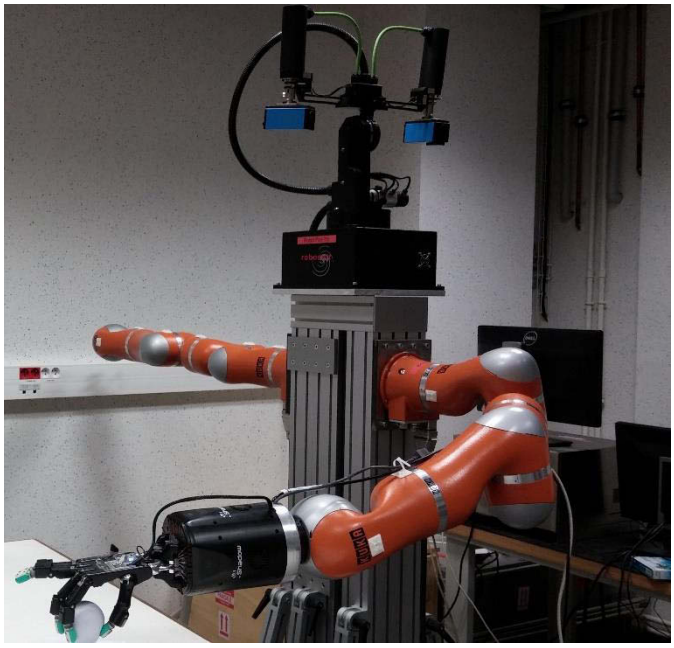

Figure 4-4 Plateforme bi-bras

Cette plateforme est également équipée d'un système de perception par vision stéréoscopique.

4.1.3 Robot Adept

Dans le cadre du projet de recherche ANR Arms (A multi arms robotic system for muscle separation), l'Institut Pascal s'est équipé d'une plateforme bi-bras composée de deux robots industriels Adept Viper S1700D. Ces robots à 6 liaisons rotoïdes se caractérisent par leur rapidité et leur précision. Ces caractéristiques définissent une plateforme performante pour des tâches de manipulation et d'assemblage.

Figure 4-5 Robot Adept Viper 1700d

4.2 Caractérisation expérimentale des objets déformables

Afin de renseigner nos modèles de simulations, il est indispensable d'identifier les valeurs des différents paramètres associés aux propriétés mécaniques des objets à saisir. En effet, la précision de l'estimation de ces paramètres influe directement sur la fiabilité du modèle et conditionne la qualité des prédictions du comportement mécanique de ces objets. Ces valeurs sont également indispensables pour le paramétrage de notre modèle de contact. Notre objectif est donc de caractériser les objets manipulés en compression et/ou en traction afin d'identifier leurs différentes propriétés mécaniques. Les principaux paramètres à identifier sont les modules de Young (module d'élasticité) et les coefficients de Poisson relatifs aux différents objets.

Pour cela, nous avons réalisé des essais de compression selon la direction longitudinale sur les différents objets qui seront utilisés lors des tâches de manipulation. Ces essais sont effectués avec une machine Zwick UTS 20K équipée d'un capteur de force et d'un capteur de déplacement. Pour tous les essais, la vitesse de compression est de l'ordre de 1 mm/s. Les efforts de compression ainsi que les déplacements sont alors mesurés par la machine de compression. Nous utilisons ces mesures pour calculer la contrainte et la déformation. Les différentes courbes présentées dans les figures 4-7, 4-9, 4-11 illustrent les relations force-déplacement et contrainte-déformation.

Le premier essai a été effectué sur un parallélépipède rectangle en mousse de longueur 8 cm, de largeur 5,6 cm et de hauteur 5,7 cm. Les résultats obtenus sont présentés sur les figures 4-6 et 4-7.

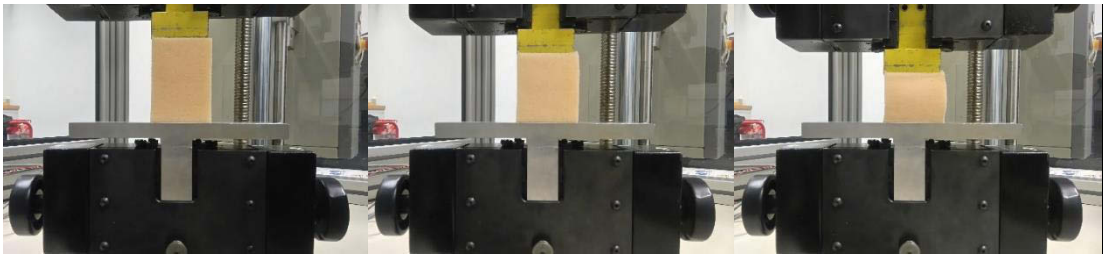

Figure 4-6 Essai de compression d'un parallélépipède rectangle en mousse

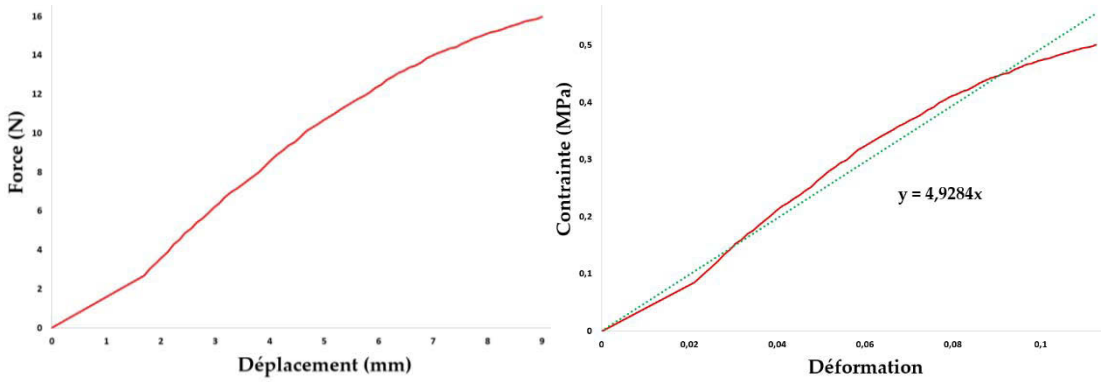

Figure 4-7 Évolution des forces et des contraintes en fonction, respectivement, des déplacements et déformations en compression pour un parallélépipède rectangle en mousse

Le deuxième essai a été effectué sur un cylindre en mousse, qui sera utilisé par la suite. Ce cylindre a un diamètre de 70mm et une longueur de 90mm de (Fig. 4-8, 4-9).

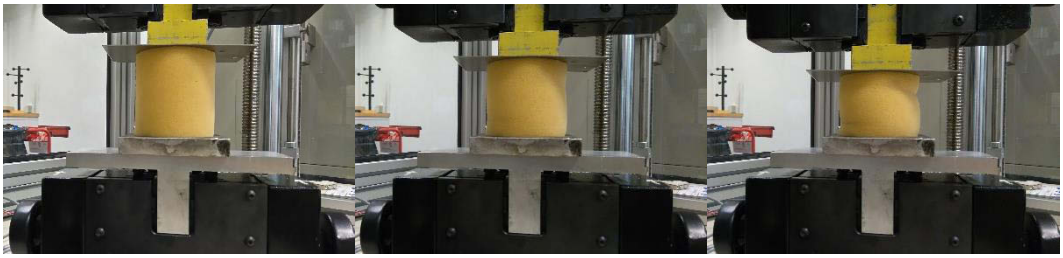

Figure 4-8 Essaie de compression d'un cylindre en mousse

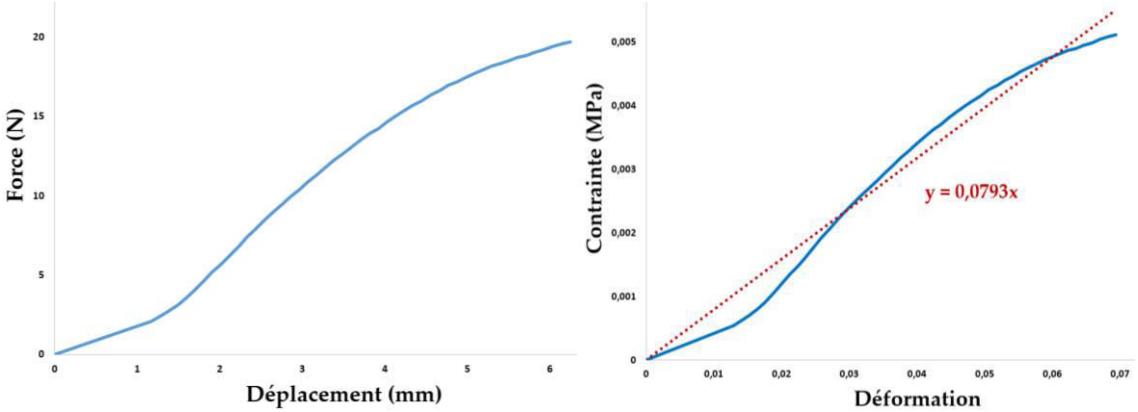

Figure 4-9 Évolution des forces et des contraintes en fonction, respectivement, des déplacements et déformations en compression pour un cylindre en mousse

Pour la tâche de préhension avec la main Shadow, nous avons utilisé une sphère très souple (Fig. 4-10, 4-11). Les estimations des contraintes appliquées et des déformations lors de la compression d'une sphère sont basées sur le travail présenté par Verrall *et al*. [Verrall76].

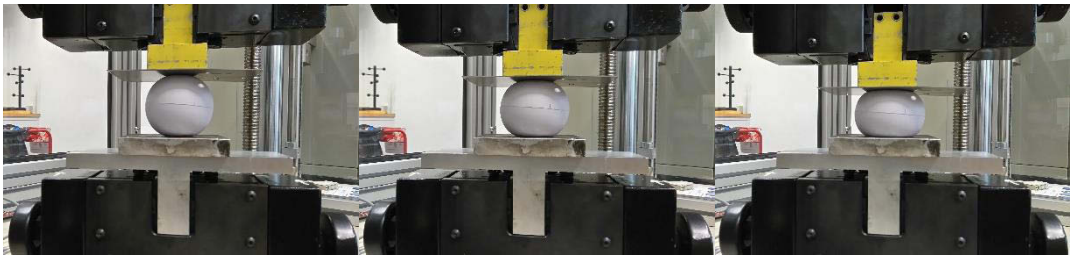

Figure 4-10 Essai de compression d'une sphère

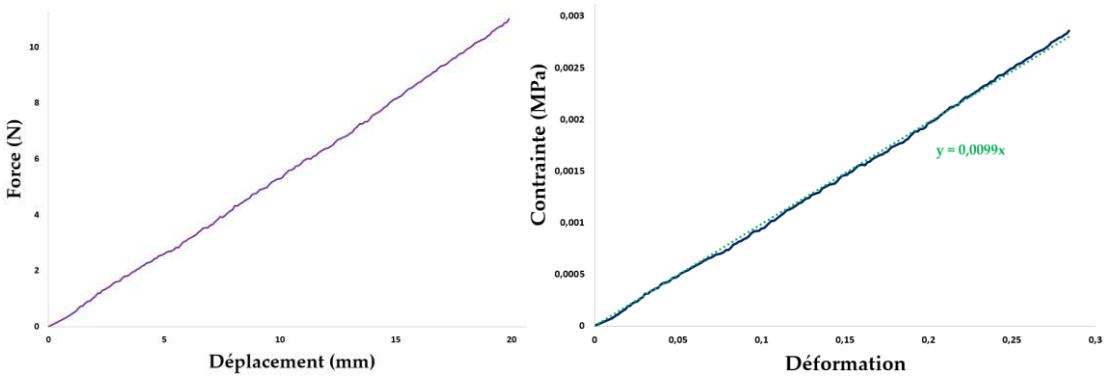

Figure 4-11 Évolution des forces et des contraintes en fonction, respectivement, des déplacements et déformations en compression pour une sphère souple

Pour la détermination du module de Young nous suivons l'évolution de la contrainte en fonction de la déformation. En effet, la proportionnalité entre la déformation et la contrainte s'exprime par le module d'Young E. Ce module est déterminé en utilisant la relation suivante :

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\Delta(force/surface)}{\Delta(déplacement/longueur\ initiale)} \qquad (4.1)$$

où σ et ε sont respectivement la contrainte appliquée et la déformation normale du matériau et E s'exprime en Pa.

Nous avons utilisé une approximation linéaire pour toutes les courbes contraintes/déformations, afin de déterminer le module de Young E de chaque objet. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

$E_{\text{rectangle}}$	4,9284 MPa
E_{cylindre}	0,0793 MPa
E_{sphere}	0,0099 MPa

Tableau 4-1 Modules de Young des mousses testées

Le coefficient de Poisson ν caractérise la contraction du matériau perpendiculairement à la direction de l'effort appliqué (contraction de l'objet) :

$$\nu = \frac{contraction\ transversale\ \ unitaire}{allongement\ axial\ uniataire} \tag{4.2}$$

4.3 Etalonnage du capteur tactile

La deuxième étape consiste à calibrer les capteurs BioTac installés aux bouts des doigts de la main Shadow. Nous proposons d'utiliser une méthode simple qui permet de relier la pression au bout des doigts à des forces appliquées en Newtons. L'idée est basée sur l'utilisation d'une balance pour mesurer la force appliquée par le doigt des retours du capteur BioTac. Cette méthode permet d'étalonner la sensibilité du capteur par rapport au signal mesuré. Le tableau 4-2 et la figure 4-12 présentent les résultats obtenus. A la figure 4-12, la courbe en rouge est une approximation par un polynôme de degré 3 de la relation entre les signaux des capteurs BioTac et les mesures de masse.

Signaux capteur BioTac (mVolt)	Mesure balance (Kg)	Force (N)
2098	0	0
2130	0,03	0,2942
2157	0,06	0,588399
2225	0,1	0,980665
2303	0,14	1,372931
2415	0,21	2,059397
2570	0,42	4,118793

2634	0,55	5,393658
2672	0,69	6,766589

Tableau 4-2 Mesure capteur tactile et balance

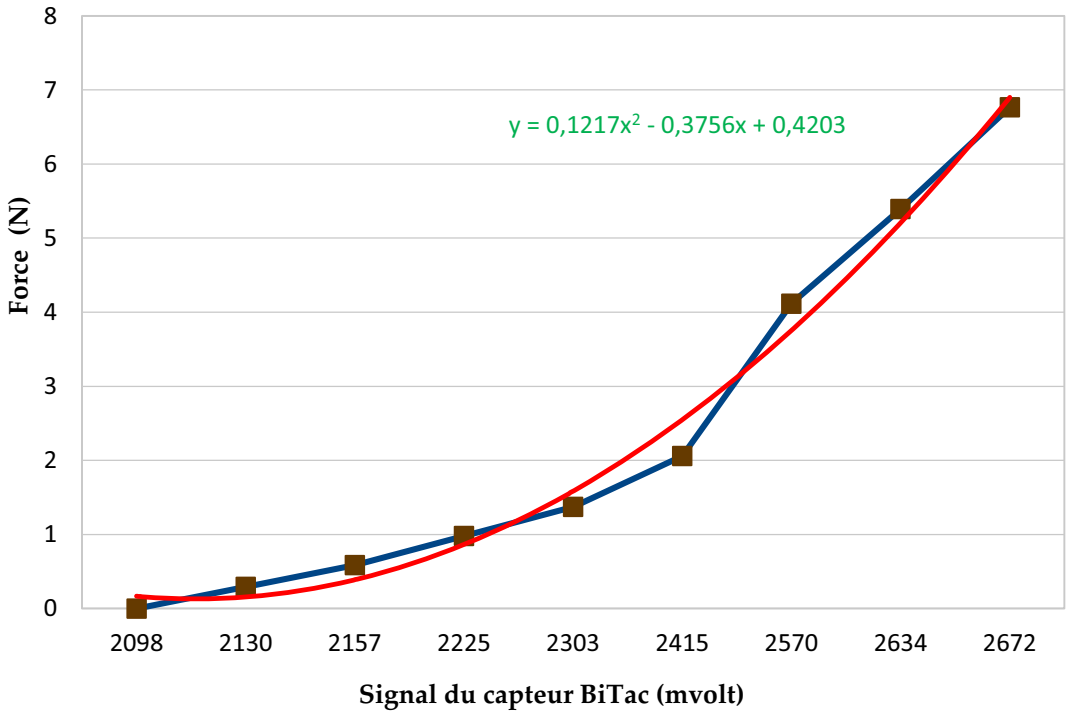

Figure 4-12 Courbe utilisée pour la calibration du signal du capteur Biotac

4.4 Essai de compression

Une fois le modèle de l'objet paramétré dans l'outil de simulation et le capteur tactile calibré, nous avons effectué un test de compression avec un seul doigt (Fig. 4-13). Les résultats de simulations et les résultats expérimentaux sont présentés dans les figures suivantes. Ces résultats montrent la déformation de l'objet suite à l'interaction avec les doigts. La présentation graphique 3D de la main Shadow est implémentée en utilisant la Toolbox Matlab Syngrasp [Malvezzi13].

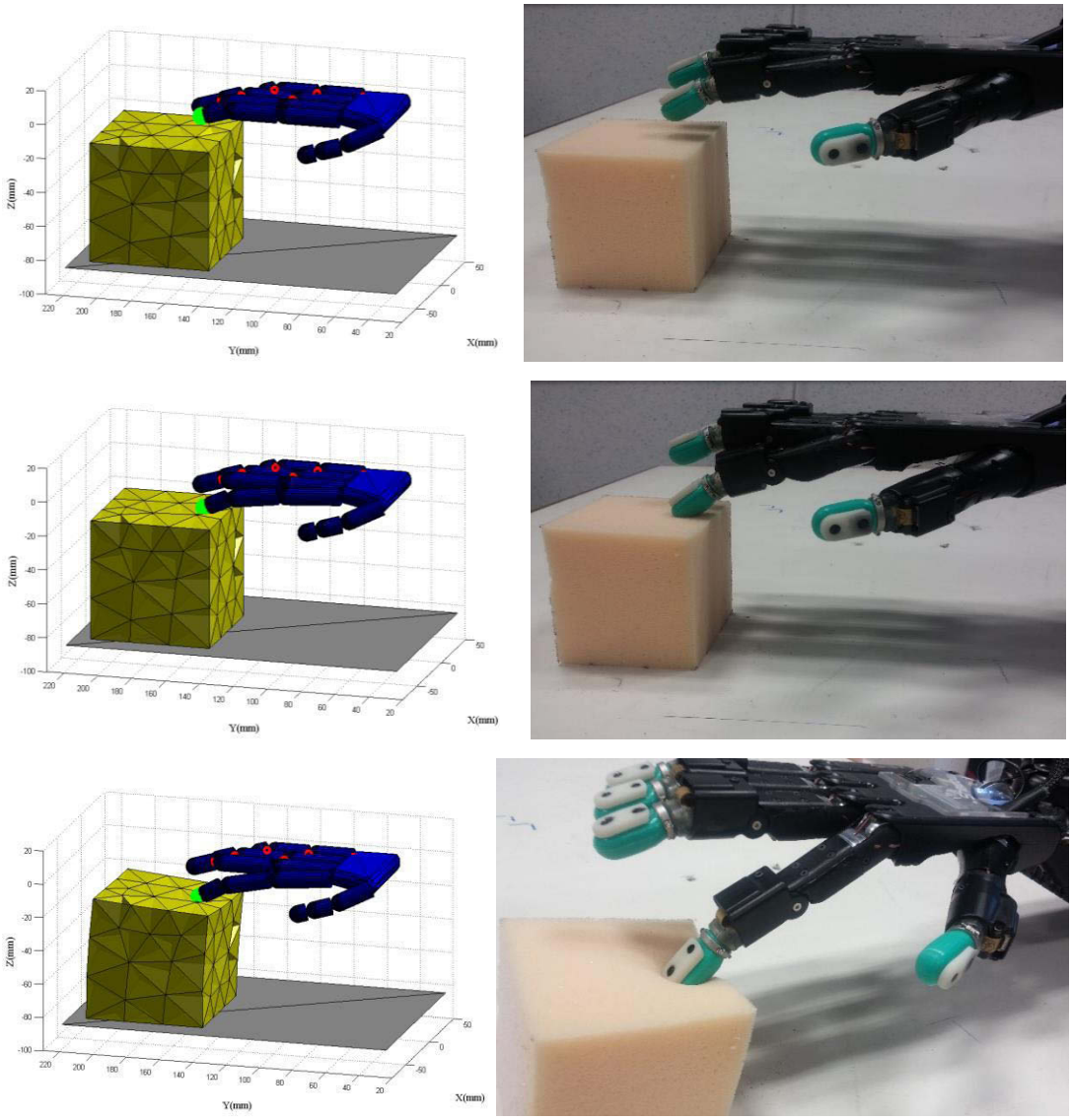

Figure 4-13 Résultats de simulation et expérimentaux

La figure 4-14 donne la variation de la force normale appliquée en fonction du déplacement (pénétration) en réel et en simulation. Nous observons sur cette figure que le modèle d'interaction que nous avons proposé dans le chapitre 2 donne des résultats en accord avec les résultats obtenus expérimentalement.

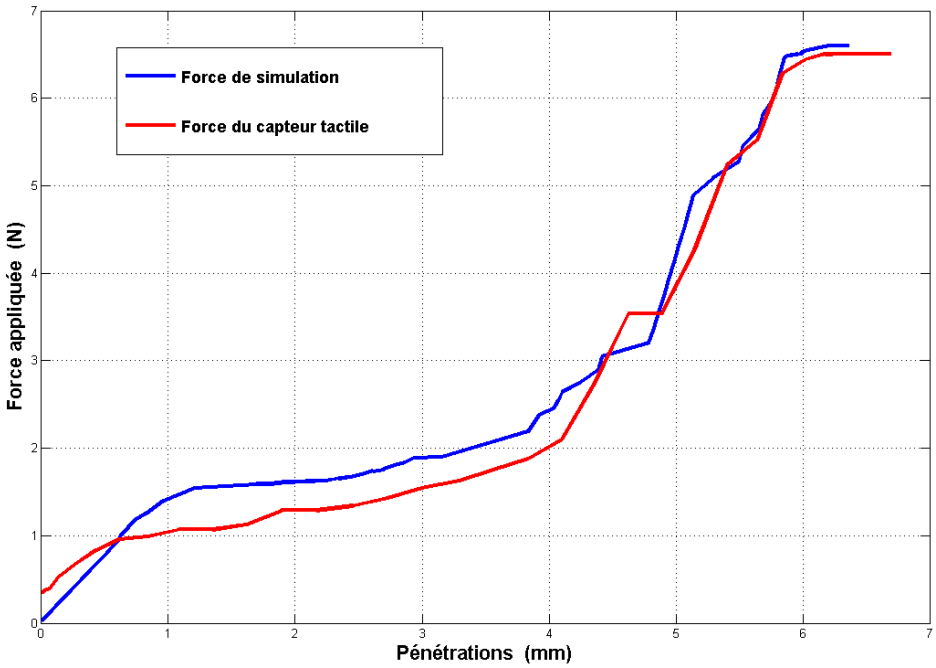

Figure 4-14 Force normale appliquée par le doigt en fonction de la pénétration

La figure 4-15 donne l'écart absolu entre les deux courbes d'effort en fonction de la pénétration. Afin de caractériser la précision de notre modèle, nous avons calculé le pourcentage d'erreur absolue moyen MAPE (Mean Absolute Percentage Error) entre les forces. Le MAPE est de l'ordre de 15% (0.3N). Comme nous le verrons dans la suite, cette précision est suffisante dans le cadre de notre application. Le décalage entre les résultats de simulations et d'expérimentations peut être attribué en partie aux petites déformations des capteurs BioTac qui ne sont pas prises en compte dans la simulation du modèle d'interaction.

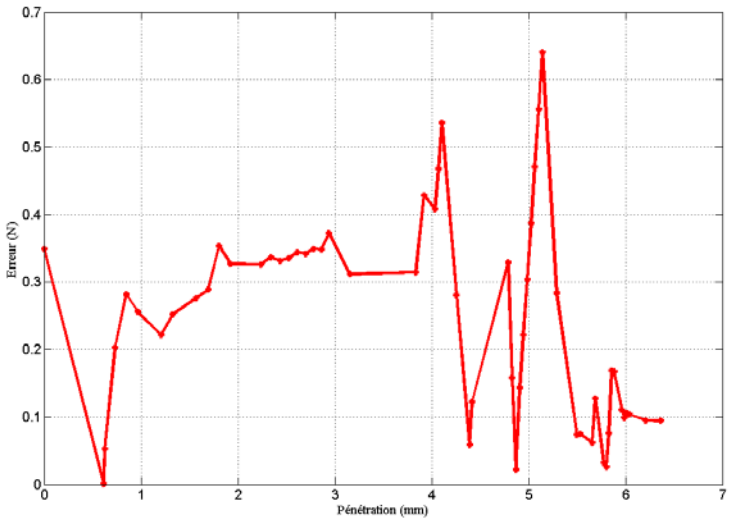

Figure 4-15 Erreur de la force par rapport à la pénétration

4.5 Prise d'un objet déformable

Dans cette partie, nous présentons tout d'abord la simulation d'une opération de prise d'une sphère déformable par la main Shadow. Nous présentons également des résultats expérimentaux afin de valider notre approche de modélisation de l'interaction entre l'objet déformable et la main robotique. Dans toutes les tâches de prise, nous considérons que les objets sont situés dans l'espace de travail de la main robotique.

L'opération de préhension présentée dans la suite, correspond à la prise d'une sphère déformable de diamètre 7 cm. La préhension est assurée par la main Shadow (Fig. 4-16) en utilisant uniquement trois doigts (Thumb (TH), First Finger (FF), Middel Finger (MF)).

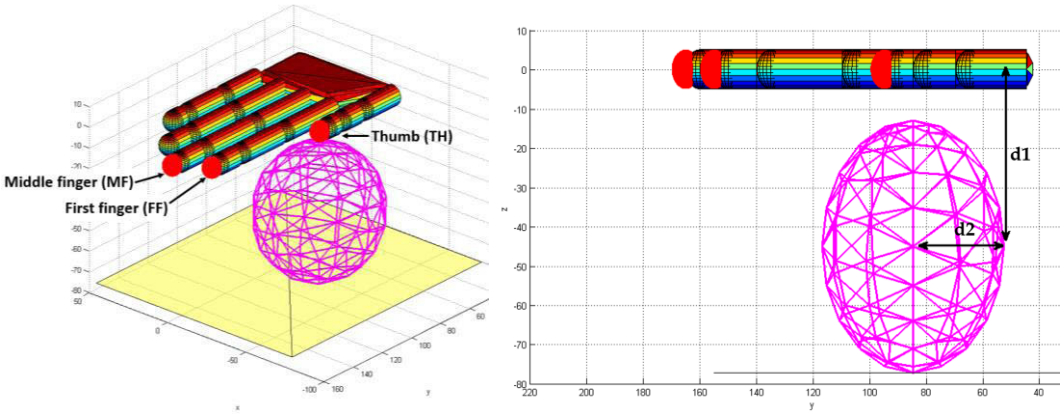

Figure 4-16 Configuration initiale de la prise

La figure 4-16 présente la configuration d'approche de la main définie par les deux distances d_1 et d_2 entre le centre de la paume et le centre de l'objet. Nous utilisons l'approche présentée au chapitre 3 (Section 3-2) afin de déterminer la configuration initiale de la main. La figure 4-17 présente la configuration de prise *force closure*. Les points de contact sont donnés dans le tableau 4-3.

P1 (TH)			P2 (FF)			P3 (MF)		
X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)
-38.26	52.92	-44.30	-48.71	111.5	-44.39	-21.15	118.74	-51.48

Tableau 4-3 Coordonnées des points de contact dans le repère de la paume de la main Shadow

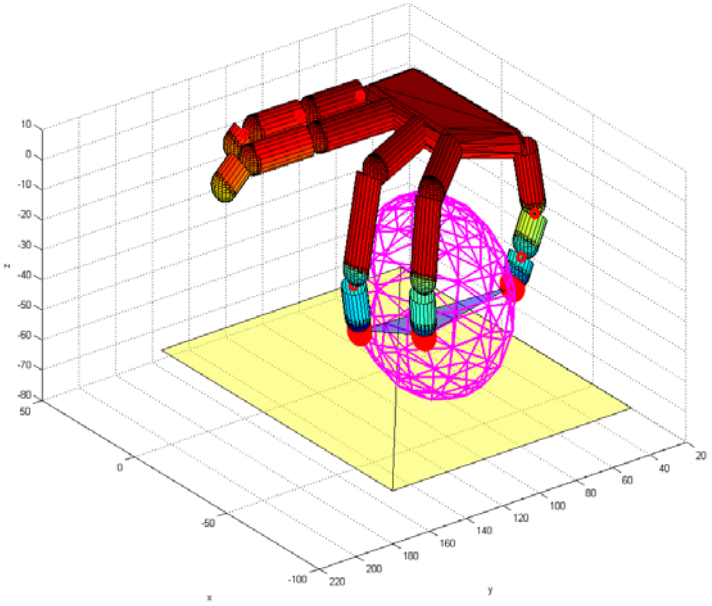

Figure 4-17 Configuration de prise *force closure*

Le passage de la configuration de pré-grasp obtenue en simulation vers la configuration de saisie de l'objet peut être décomposé en deux étapes (avant contact et après contact).

- La première étape concerne la fermeture des doigts pour obtenir la configuration *force closure* (Fig. 4-17). Afin d'atteindre cette configuration, nous avons utilisé un asservissement en position des doigts. Cet asservissement exploite le modèle cinématique inverse du doigt calculé avec la méthode WDLS (Weighted Damped Least-Squares) implémentée dans la librairie KDL (Kinematics Dynamics Library) [Chiaverini94].

- La deuxième étape concerne la saisie de l'objet. Une fois les doigts en contact avec les points désirés sur l'objet, la saisie commence par la fermeture incrémentale des doigts. Les retours tactiles sont alors exploités dans une stratégie de contrôle en impédance pour asservir les efforts exercés par les doigts. Une fois les efforts désirés atteints, la prise est considérée stable et l'objet peut être soulevé sans perte de contact.

Le diagramme (Fig. 4-18) présente les différentes étapes permettant de générer une prise d'objet déformable. La première étape consiste à déterminer la pose initiale de l'objet et à générer les mouvements des doigts afin de les placer sur la surface de l'objet dans la configuration de *pré-grasp*. Puis, une boucle itérative intégrée à la simulation du système main + objet permet de simuler le serrage des doigts sur la surface de l'objet. L'objectif est d'incrémenter les forces de contact jusqu'à l'obtention d'une prise stable au sens du critère de *force closure*. À chaque itération, l'évolution de la déformation de l'objet, dûe à la pénétration de chaque doigt D_i, est calculée et mise à jour en intégrant les équations de la

dynamique. Ensuite, les forces de contact sont calculées en évaluant les vitesses relatives et les pénétrations des doigts (Eq. 2.40, 2.41). La boucle de fermeture des doigts est arrêtée lorsque l'équilibre statique est vérifié afin d'assurer la stabilité de la préhension. Cette vérification de l'équilibre statique est obtenue à partir de l'addition de toutes les forces F_j appliquées par chaque doigt D_i et distribuées à travers des facettes C_i de la surface de l'objet :

$$\vec{F}_{Ni} = \sum_{j=1}^{C_i} \vec{f}_{Nj} \tag{4.3}$$

La norme de la force globale pour chaque doigt (Eq. 4.3) est utilisée comme entrée des validations expérimentales. Une boucle d'asservissement en effort est alors réalisée pour obtenir les forces définies en simulation. Ces forces sont utilisées comme consigne à atteindre pour chaque doigt.

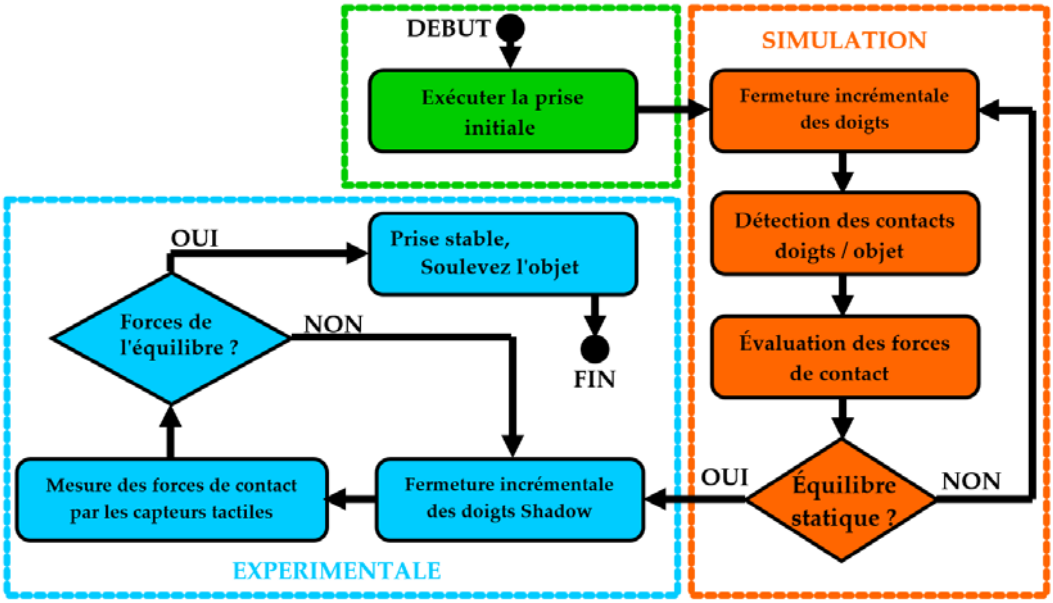

Figure 4-18 Diagramme de planification de prise d'un objet déformable

Les différentes étapes de prise sont présentées à la figure 4-19. Cette figure montre la correspondance entre l'essai réel et la simulation.

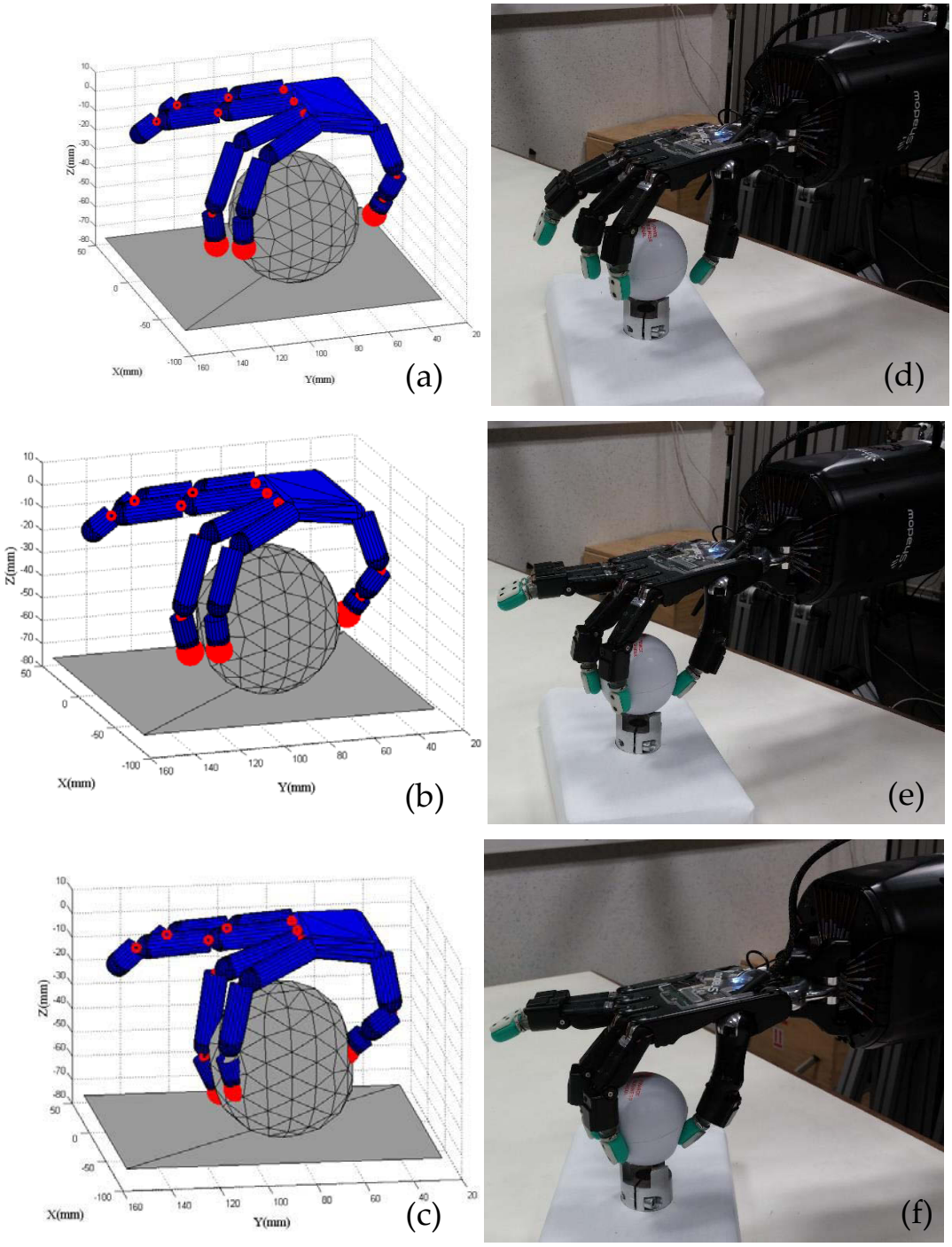

Figure 4-19 Différentes étapes d'une tâche de saisie réelle et simulée : (a) - (d) Configuration de prise initiale, (b) - (e) *Pré-grasp*, (c) - (f) Déformations finale de l'objet

La figure 4-20 montre la variation des trois forces appliquées en fonction des pénétrations pendant la simulation (Figure 4-19 (d)/(e)/(f)). A l'étape initiale, les doigts commencent à se déplacer vers l'objet. Lorsque les doigts entrent en contact avec l'objet, le modèle de contact permet d'évaluer les forces appliquées en fonction des pénétrations. La figure 4-20 montre également que les forces de contact sont continues

et directement liées aux déformations de l'objet. Les doigts continuent à appliquer des forces jusqu'à ce que les conditions d'équilibre soient satisfaites. Une fois cette étape terminée, les doigts maintiennent les forces appliquées sur l'objet afin d'assurer la stabilité de la manipulation.

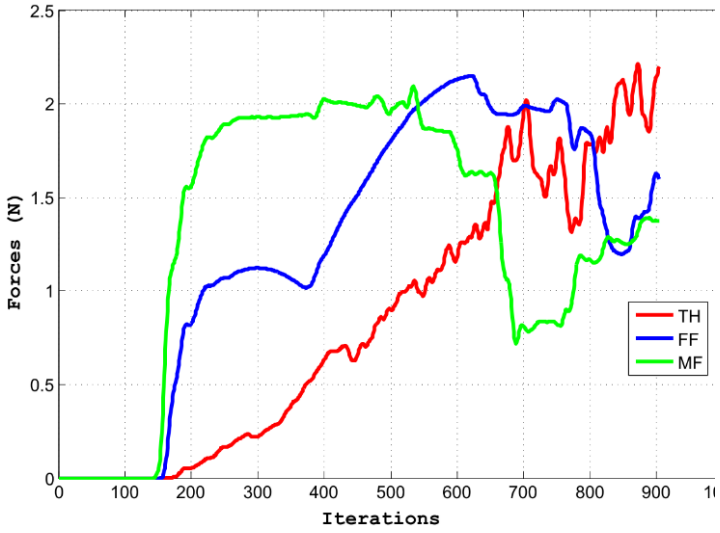

Figure 4-20 Forces simulées appliquées par les doigts

Ensuite, les consignes de forces calculées via la simulation du modèle de contact sont utilisées dans la commande en impédance de chacun des doigts afin d'obtenir une prise stable de la sphère déformable. La relation entre les pénétrations et les forces appliquées aux doigts est représentée à la figure 4-21.

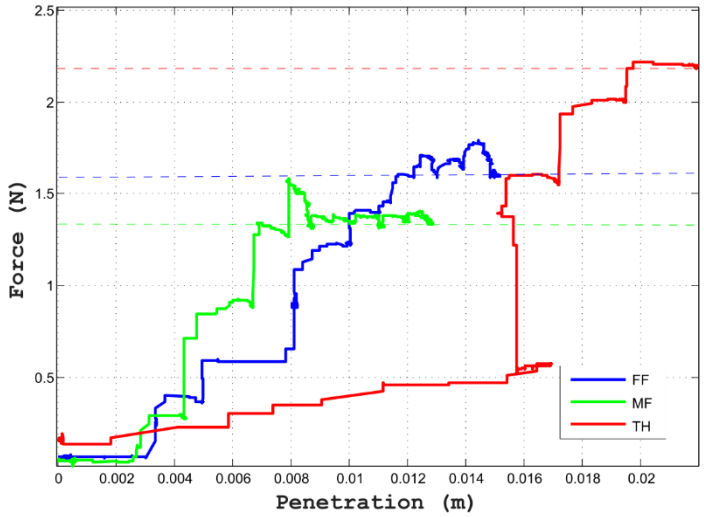

Figure 4-21 Forces appliquées par la main Shadow mesurées expérimentalement

Cette étape expérimentale nous a permis de valider le modèle de simulation par rapport au comportement réel.

4.6 Planification de préhension

Cette section concerne la validation de la stratégie de planification de la prise d'objets déformables et du modèle de déformation en comparant les déformations obtenues en simulation et les déformations obtenues expérimentalement. Pour cela, des tâches de manipulation et de préhension sur différents types d'objets sont réalisées. La figure 4-22 présente le diagramme de planification de préhension.

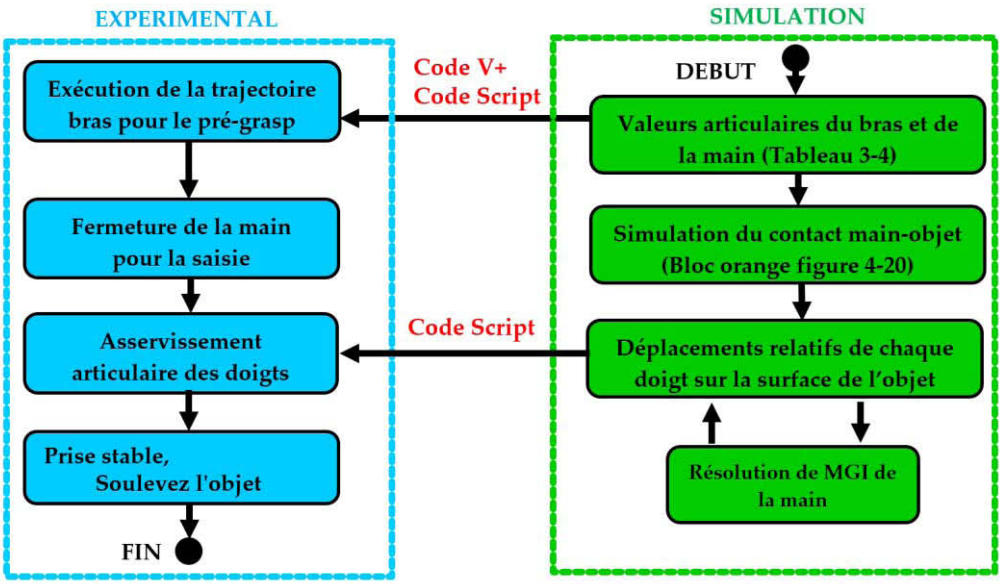

Figure 4-22 Diagramme de planification de préhension

La première étape consiste à générer la trajectoire du bras Adept pour l'amener en configuration de pré-grasp (avant saisie) garantissant que l'objet se trouve dans l'espace de travail de la main Barrett. Cette configuration est obtenue en exploitant les résultats de simulation présentés dans le Tableau 3-4. La trajectoire du bras et la fermeture de la main sont ensuite réalisées (code V+ pour le bras manipulateur et script pour la main Barrett générés automatiquement).

La deuxième étape de la simulation consiste à modéliser l'interaction entre les doigts et l'objet. Pour cela, la démarche résumée par la figure 4-20 a été utilisée. Notons cependant qu'ici, nous récupérons les valeurs articulaires de la main et non les forces sur chaque doigt car la main Barrett n'est pas équipée de capteurs tactiles. Cette seconde étape de simulation donne les déplacements cartésiens relatifs de chaque doigt permettant de générer les déformations désirées et produisant les forces nécessaires pour une saisie stable. Ces déplacements cartésiens et le MGI de la main Barrett sont ensuite utilisés pour estimer les variables articulaires. Enfin, la commande articulaire est réalisée pour atteindre la configuration de saisie garantissant la stabilité de l'objet.

Nous présentons les résultats de planification de prise pour un cube et un cylindre. La figure 4-23 présente les différentes étapes de prise d'un cube par la main Barrett.

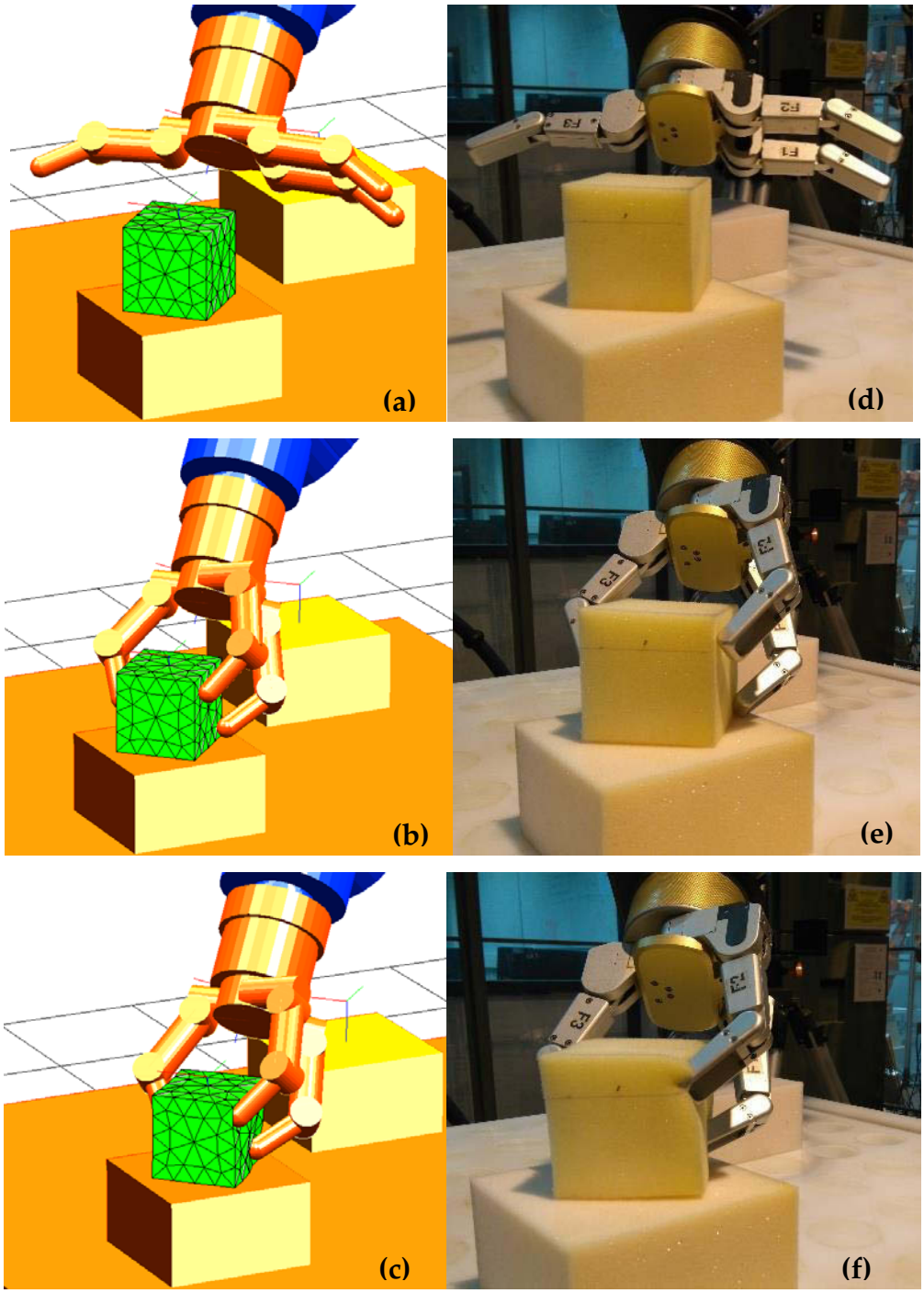

Figure 4-23 Planification de prise d'un cube: (a) - (d) Configuration de pré-grasp du cube, (b) - (e) Contact initiale optimisé, (c) - (f) Déformations finale de l'objet

Le suivi de la déformation des objets nécessite l'utilisation d'un système de vision extérieur. En raison des occultations causées par la présence des doigts

dans la zone de contact, cette tâche est très complexe et ne fait pas partie des objectifs de nos travaux. La figure 4-24 montre la bonne similitude entre les déformations simulées de notre modèle et les déformations réelles sur le cube. Ces déformations correspondent aux forces de contact nécessaires pour réaliser la prise *force closure* planifiée présentées à la section 4.5.

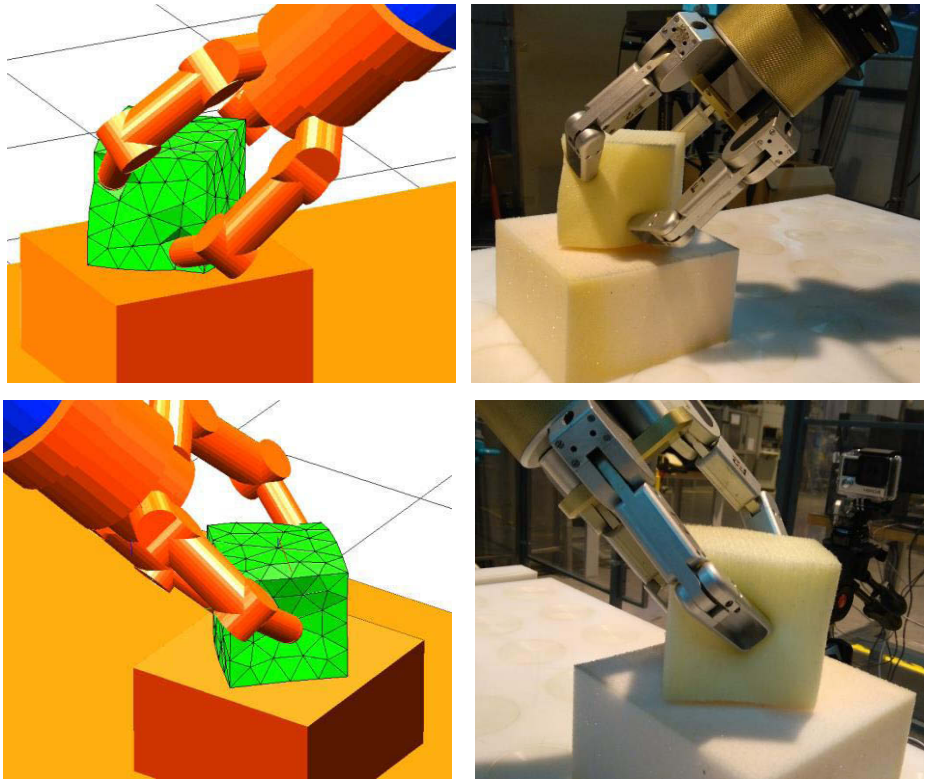

Figure 4-24 Différentes vue de déformation du cube en simulation et en expérimental

La tâche de saisie est suivie par une manipulation de l'objet de type *pick and* place afin d'illustrer la stabilité de la prise de l'objet. Une suite de mouvements du robot est effectuée permettant de déplacer l'objet de sa pose initiale à une pose désirée. La figure 4-25 présente les différentes étapes de manipulation du cube.

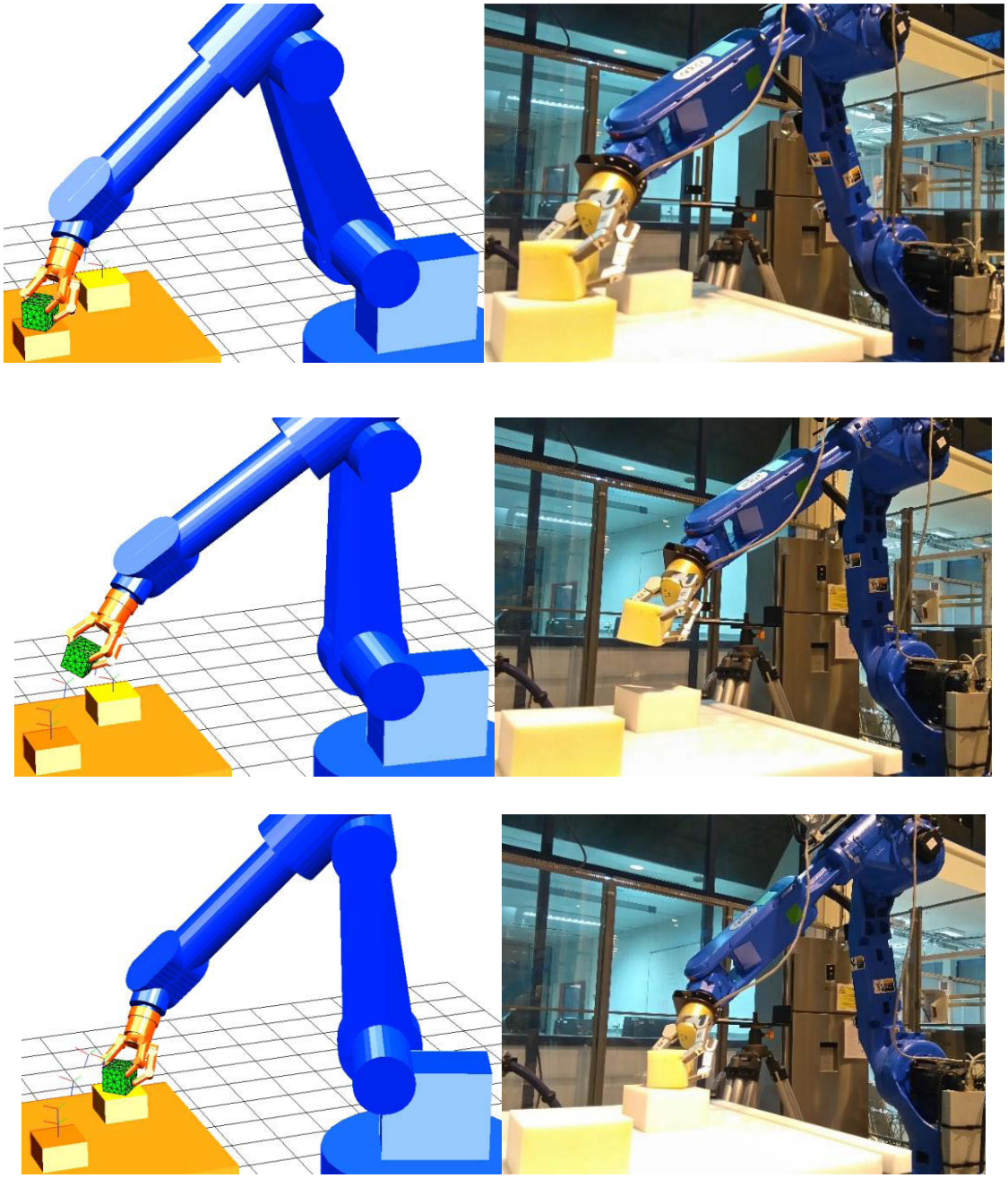

Figure 4-25 Manipulation *pick and place* du cube par le robot Adept et la main Barrett

La planification de prise et de manipulation ont également été appliquées au cas d'un cylindre. Les différents résultats de prise et de manipulation sont illustrés par les figures 4-26 et 4-27.

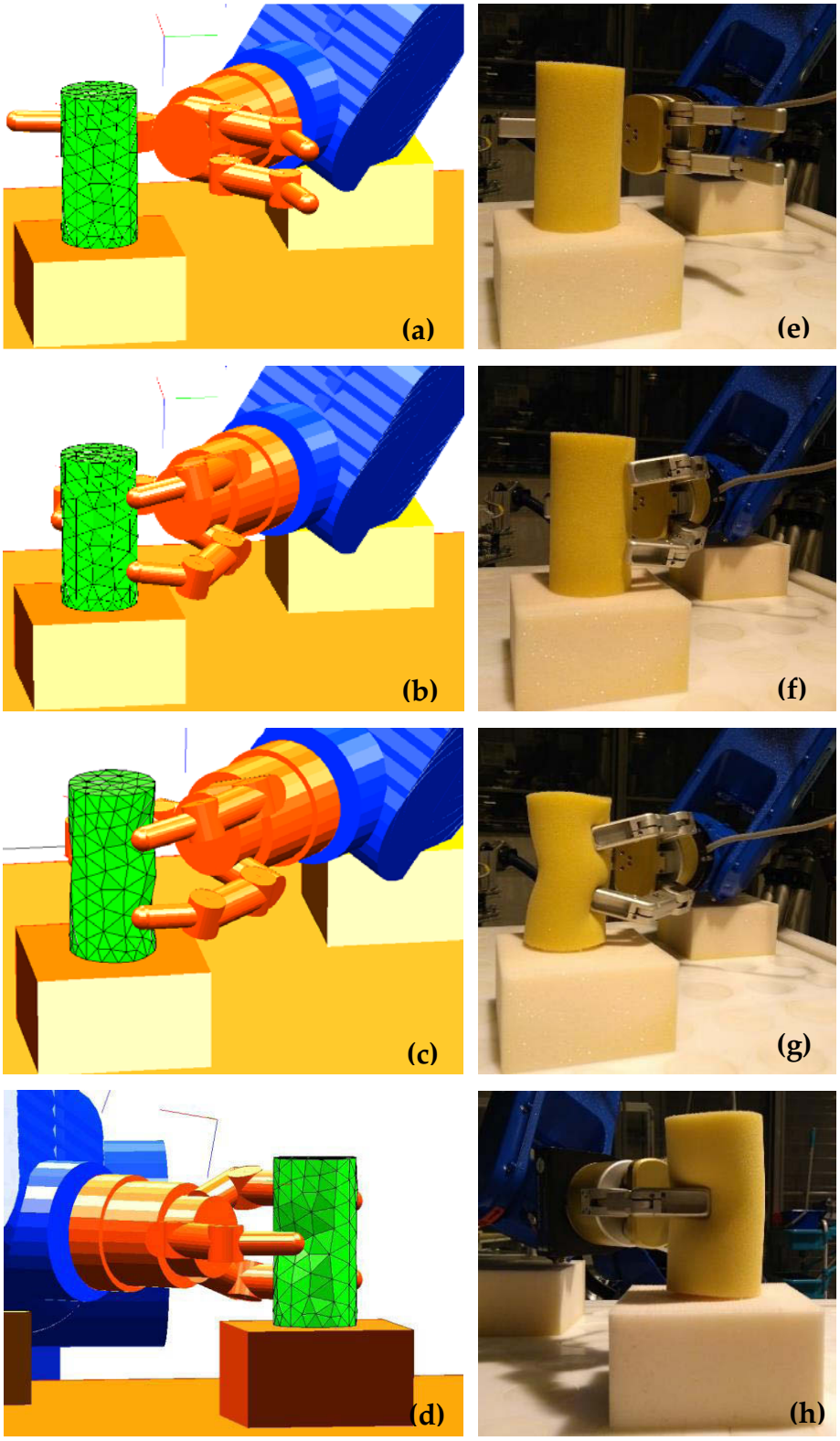

Figure 4-26 Planification de prise d'un cylindre: (a) - (e) Configuration de pré-grasp du cylindre, (b) - (f) Contact initiale optimisé, (c) - (g) - (d) - (h) Déformations finale du cylindre

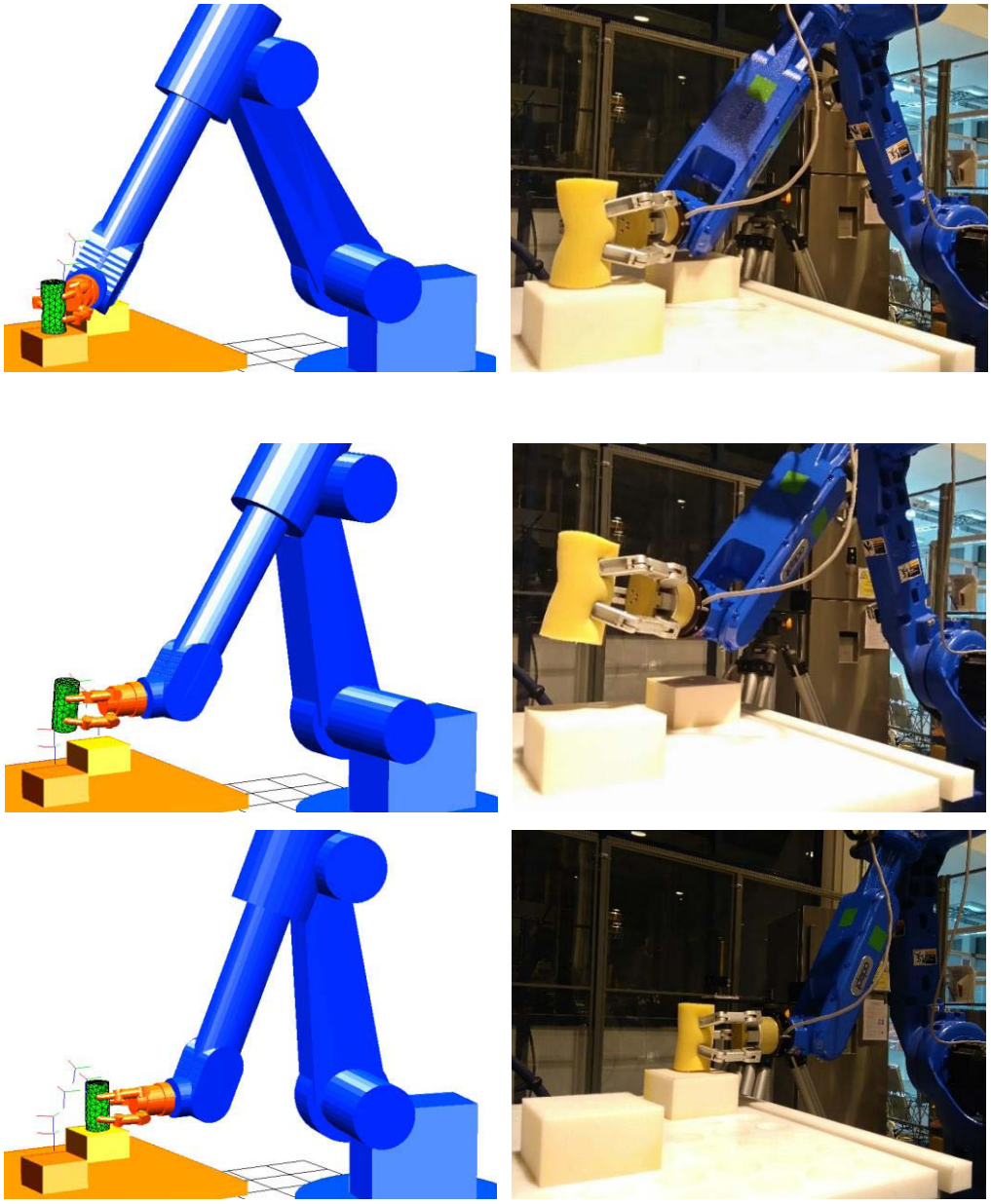

Figure 4-27 Manipulation *pick and place* du cylindre par le robot Adept et la main Barrett

4.7 Conclusion

Ce chapitre présente les différents travaux expérimentaux effectués pour la validation de nos approches de modélisation de l'interaction entre une main robotique et un objet déformable et la planification de prise.

Une étape importante et nécessaire de la modélisation concerne la caractérisation des propriétés mécaniques des objets manipulés et en l'étalonnage des capteurs tactiles. A cette fin, nous avons mis en place des protocoles expérimentaux permettant d'estimer les différents paramètres intervenants dans nos modélisations. Une fois le modèle physique de l'objet paramétré dans l'outil

de simulation et le capteur tactile calibré, nous avons effectué des tests de compression par un seul doigt sur un cube déformable. Les résultats expérimentaux nous ont permis d'ajuster nos modèles afin d'approcher le comportement réel.

La saisie par la main Shadow d'une sphère souple a permis tout d'abord de valider la simulation de l'interaction entre l'objet déformable et la main robotique ainsi que la détermination de la configuration de pré-grasp basée sur les critères de stabilité de prise de type *force closure* présentés au chapitre 3.

La dernière partie est consacrée à la validation expérimentale de la planification de prise présentée au chapitre 3. Les résultats expérimentaux obtenus montrent une très bonne corrélation avec les opérations de prises et de manipulation obtenues en simulation. Les déformations réelles observées sur les objets sont également très proches des déformations simulées. Ceci permet de valider les modèles proposés et les paramètres mécanique identifiés. Les configurations de pré-grasp et de saisie définies par simulation permettent d'assurer une prise de objet déformable stable durant les tâches de manipulation de type *pick and place* validant ainsi le choix du modèle de contact et les critères de prise de type *force closure* présentés.

Conclusions et perspectives

Les travaux présentés dans ce mémoire concernant la modélisation et la définition de stratégies de prise d'objets déformables. Il s'agissait de mettre au point une méthode de modélisation d'interaction entre une main robotique et un objet de grande déformation ainsi qu'une stratégie de planification de prise de ces objets.

Le premier chapitre a été consacré aux rappels de concepts relatifs à l'analyse et la synthèse des prises et à l'étude bibliographique relative au domaine de la préhension robotique des objets déformables. Nous avons présenté dans ce chapitre, les principales propriétés caractérisant une saisie robotisées et les critères fondamentaux de mesure de qualité utilisés pour l'évaluation des prises. Ensuite, nous avons recensé les principaux algorithmes *force closure* de la littérature pour la planification des prises multi-doigts. Finalement, nous avons détaillé les principales méthodes de modélisation d'objets déformables et les travaux récents liés à l'interaction robotique avec ces objets. A travers ce chapitre, nous avons constaté que malgré les évolutions importantes dans le domaine de la manipulation robotique des objets rigides, le problème de préhension d'objets déformables constitue encore un défi important de la recherche. En plus des problématiques relatives à la manipulation d'objet rigide, il faut en effet tenir compte des interactions complexes entre les corps déformables et les manipulateurs.

Ce challenge a précisément constitué l'objectif principal de nos travaux. En effet, la définition d'un modèle de contact entre une main multi-doigts et un objet à grande déformation reste un problème complexe en raison des non linéarités associées au comportement des objets déformables et aux forces de contact. Pour manipuler adroitement un objet déformable, les forces de contact doivent être contrôlées sur la base de sa géométrie et la mise à jour dynamique de ces déformations. Nous avons proposé dans le deuxième chapitre une nouvelle approche de modélisation d'interaction robotique avec les objets déformables, basée essentiellement sur l'évaluation des forces de contact en fonction des déformations de l'objet. La modélisation de contact que nous avons proposé permet une détection efficace des contacts et une bonne estimation des forces d'interactions. En outre, le modèle reste suffisamment simple pour envisager son utilisation en ligne pour des tâches de manipulation de corps déformables. En effet, il est possible de mettre à jour la forme de contact local, la forme globale de l'objet, ainsi que la répartition des forces sur la zone de contact à des fréquences raisonnables. Cela permet de gérer la planification des forces de

contact et le contrôle des mouvements des doigts. Le modèle proposé nous a ainsi permis de simuler et de réaliser des tâches de préhension et de manipulation de corps mous. Notons cependant, que le modèle proposé présente quelques limites. En particulier, il nécessite une caractérisation fine du matériau de chaque objet à manipuler afin de définir les paramètres de contact. En outre, ce modèle a été formulé uniquement pour l'interaction entre le doigt (hémisphère) et la facette et doit être complété pour les contacts éventuels du doigt avec les nœuds ou les arêtes du réseau.

Une autre contribution de cette thèse est relative à la planification de la prise des objets déformables. Celle-ci s'appuie sur une modélisation adéquate des déformations de l'objet. Il est en particulier nécessaire que le modèle de déformation choisi ait un coût calculatoire raisonnable et qu'il représente fidèlement le comportement réel lors d'interaction avec un système robotique. Dans le troisième chapitre, nous avons présenté notre approche de modélisation d'objet déformable. Celle-ci est basée sur un réseau de système masse-ressort et permet d'obtenir un comportement réaliste même dans le cas de grandes déformations. Néanmoins, le coût calculatoire associé à ce type de modélisation dépend fortement de la taille et de la résolution du maillage. La réduction du coût calculatoire a donc un prix, celui de la précision. Une autre difficulté de ce type de modèle réside dans l'identification des paramètres masses, raideurs et coefficients d'amortissement nécessaires pour chaque objet à modéliser.

Pour la planification de prise, nous avons exploité des critères de stabilité développés initialement pour les objets rigides afin de déterminer la configuration initiale de saisie. Pour garantir la robustesse de la prise, la configuration initiale des doigts est considérée comme une prise *force closure*. Une validation des stratégies de prises a été conduite sur une plateforme de simulation intégrant les modèles d'objets déformables, d'un bras manipulateur et d'une main multi-doigts.

Une validation expérimentale de nos approches de modélisation d'interaction et de planification de prise a finalement été présentée. Afin de paramétrer nos modèles, nous avons réalisé une identification des propriétés mécaniques des objets utilisés et étalonné les capteurs BioTac installés sur la main Shadow. Une fois le modèle physique de l'objet paramétré dans l'outil de simulation et le capteur tactile calibré, nous avons effectué des tests de compression d'un doigt sur un cube déformable. Les résultats expérimentaux nous ont permis d'ajuster nos modèles afin d'approcher le comportement réel. Une opération de prise d'une sphère souple en utilisant le robot Kuka LWR4+ et la main Shadow a permis de valider notre approche de modélisation de l'interaction. Une validation expérimentale de notre approche relative à la planification de la prise a été effectuée en utilisant le robot Adept Viper1700D et

la main Barrett. Nous avons constaté que les différentes opérations de prises et de manipulations sur les objets physiques déformables correspondent bien à celles obtenues en simulation. Cela montre que les modèles développés et les paramètres estimés permettent de générer des déformations proches des déformations réelles des objets. Enfin, les résultats de simulation et expérimentaux ont montrés que la prise d'un objet déformable par la main est stable durant une tâche de manipulation de type *pick and place*. Notre approche de modélisation de l'interaction doigts robotiques et objets déformables a en effet permis de réaliser la saisie stable d'un objet déformable avec une main équipée de capteurs tactiles et commandable en effort mais aussi avec une main sans capteurs tactiles et commandable en position.

Perspectives

Concernant la modélisation des objets déformables et du contact, plusieurs perspectives sont envisagées :

- Comme mentionné précédemment, dans notre approche une caractérisation fine du matériau des objets à manipuler est nécessaire. Il serait par conséquent intéressant de développer une stratégie d'identification des paramètres mécaniques de l'objet à partir des capteurs disponibles sur la plateforme robotique (capteurs tactiles, d'efforts et de vision).
- Le modèle de contact utilise une représentation discrète (réseau de nœuds, arêtes et facettes) de l'objet. Le contact est supposé réalisé sur une facette. Il serait intéressant de tenir compte des contacts avec les nœuds et arêtes.
- Le modèle est construit à partir de données 3D (nuages de points ou enveloppes) supposées parfaites. En pratique, ces données ne sont pas connues de manières exactes (par exemple lorsqu'elles sont acquises par un système de vision 3D). Il serait donc intéressant d'évaluer l'impact des incertitudes sur les modèles de contact et de représentation des déformations.
- L'efficacité calculatoire et le réalisme des modèles de contact sont fortement liés à la densité du maillage (nœuds/arêtes). Le choix de la densité du réseau est donc l'objet d'un compromis entre temps de calcul raisonnable et modèles suffisamment réalistes. Une perspective importante serait de gérer cette densité non pas par le compromis mais par une répartition non-homogène des nœuds et facettes (résolution spatiale variable). Dans cette optique, les zones de déformations

importantes et les zones de contacts devraient être les plus denses en nœuds/arêtes.

Une autre perspective à nos travaux concerne la planification de déformation. Dans la continuité des travaux présentés dans ce manuscrit, il est en effet envisageable de développer des critères de stabilité basées sur l'augmentation de l'énergie de déformation. De tels critères pourraient alors être exploités pour planifier la déformation d'un objet par une main multi-doigts. Le principe serait de planifier les mouvements des doigts en contact de l'objet conduisant à une déformation souhaitée. La figure ci-dessus illustre ce principe pour la dépose d'un morceau de mousse déformable entre trois points. L'objectif serait donc de réaliser des tâches de manipulation ou d'assemblage nécessitant une modification contrôlée de la forme de l'objet. La réalisation de ce type de tâche peut également bénéficier avantageusement de l'utilisation de capteurs extéroceptifs (tactiles/efforts/vision). Ceci permettait de s'affranchir de l'étape d'évaluation des caractéristiques mécaniques des matériaux et de contrôler directement les efforts appliqués.

Dans ce contexte, une perspective de notre travail serait d'intégrer au niveau de la commande les informations issues des capteurs et donc de développer des stratégies de commande référencées multi-capteurs.

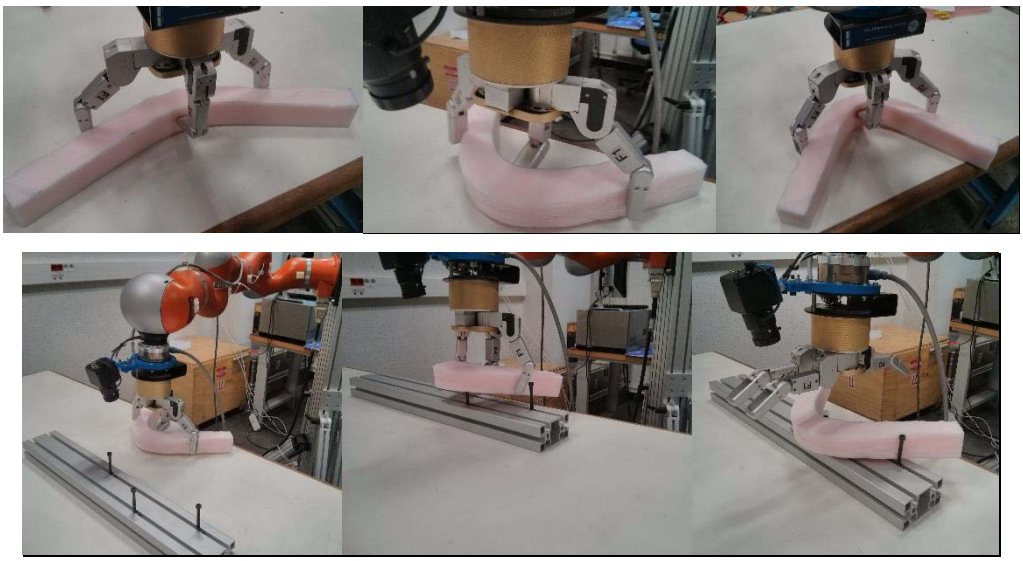

Figure 5-1 Illustration de la planification de déformation souhaitée d'une mousse pour une tâche de positionnement

Références bibliographiques

[Alonso-Mora15] Alonso-Mora, Javier; Knepper, Ross; Siegwart, Roland; Rus, Daniela, "*Local motion planning for collaborative multi-robot manipulation of deformable objects*," Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference on , vol., no., pp.5495,5502, 26-30 May 2015

[Armstrong94] Armstrong-Hélouvry, B., Dupont, P., & De Wit, C. C. (1994). *A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction*. Automatica, 30(7), 1083-1138.

[Azad10] Azad, M., & Featherstone, R. (2010). *Modeling the contact between a rolling sphere and a compliant ground plane*. ACRA, Brisbane, Australia.

[Berenson13] Berenson, Dmitry. *Manipulation of deformable objects without modeling and simulating deformation*. In : Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2013. p. 4525-4532.

[Bergen03] Gino van den Bergen. Collision detection in Interactive 3D Environments, published by Morgan Kaufmann Publishers, 2003

[Bhasin09] Bhasin, S.; Dupree, K.; Wilcox, Z.D.; Dixon, W.E., "*Adaptive control of a robotic system undergoing a non-contact to contact transition with a viscoelastic environment*," in American Control Conference, 2009. ACC '09. , vol., no., pp.3506-3511, 10-12 June 2009

[Bicchi00] Bicchi, Antonio et KumarR, Vijay. *Robotic grasping and contact: A review*. In :ICRA. 2000. p. 348-353.

[Bicchi95] Bicchi, Antonio. *On the closure properties of robotic grasping*. The International Journal of Robotics Research, 1995, vol. 14, no 4, pp. 319-334.

[Bischoff10] R. Bischoff, J. Kurth, G. Schreiber, R. Koeppe, A. Albu-Schaffer, ¨ A. Beyer, O. Eiberger, S. Haddadin, A. Stemmer, G. Grunwald et al., "*The kuka-dlr lightweight robot arm-a new reference platform for robotics research and manufacturing*," in Robotics (ISR), 2010 41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK). VDE, 2010, pp. 1–8.

[Boudet06] Baudet, *Vincent. Modélisation et simulation paramétrable d'objets déformables*. Application aux traitements des cancers pulmonaires. 2006. Thèse de doctorat. Université Claude Bernard-Lyon I.

[Bounab11] Bounab, Belkacem. *Planification de prises pour la manipulation robotisée*. 2011. Thèse de doctorat. Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.

[Butcher00] E.A. Butcher and D.J. Segalman. *Characterizing damping and restitution in compliant impacts via modified K-V and higher-order linear viscoelastic models*. Journal of Applied Mechanics, 67, 831–834, 2000.

[Chendeb07] Chendeb, Safwan. *Chirurgie virtuelle: modélisation temps réel des tissus mous, interactions et systeme haptique dédié*. 2007. Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

[Chiaverini94] Chiaverini, Stefano, SIciliano, Bruno, et Egeland, Olav. *Review of the damped least-squares inverse kinematics with experiments on an industrial robot manipulator*. Control Systems Technology, IEEE Transactions on, 1994, vol. 2, no 2, p. 123-134.

[Chinellato05] E. Chinellato, A. Morales, R. B. Fisher, and A. P. Del Pobil, "*Visual quality measures for Characterizing Planar robot grasps*," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, vol. 35, no. 1, pp. 30–41, Feb. 2005.

[Ciocarlie07] Ciocarlie, M.; Lackner, C.; Allen, P., "*Soft Finger Model with Adaptive Contact Geometry for Grasping and Manipulation Tasks*," in EuroHaptics Conference, 2007 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics 2007. Second Joint , vol., no., pp.219-224, 22-24 March 2007

[Cui07] Tong Cui; Aiguo Song; Wu Juan, "*A minimizing force model based on bounded force closure in multi-fingered grasping deformable object*," Robotics and Biomimetics, 2007. ROBIO 2007. IEEE International Conference on , vol., no., pp.595,600, 15-18 Dec. 2007

[Cui08] Tong Cui; Jing Xiao; Aiguo Song, "*Simulation of grasping deformable objects with a virtual human hand*," Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on , vol., no., pp.3965,3970, 22-26 Sept. 2008

[Cutkosky89] M.R. Cutkosky, *On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks*, IEEE Transaction Robotics and Automation, Vol. 5 (3), pp. 269-279, 1989.

[Daoud11] Daoud, N. (2011). *Contribution à la manipulation dextre et à la synthèse de prise en vue de la commande de mains mécaniques* (Doctoral dissertation, Poitiers).

[Debunne00] Gilles Debunne. Animation multirésolution d'objets déformables en temps-réel. Application

à la simulation chirurgicale. Interface homme-machine. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2000.

[Dopico11] Dopico, D., Luaces, A., Gonzalez, M., & Cuadrado, J. (2011). *Dealing with multiple contacts in a human-in-the-loop application*. Multibody System Dynamics, 25(2), 167-183. 2011

[Doulgeri04] Doulgeri, Zoe et Fasoulas, John. *Grasping control of rolling manipulations with deformable fingertips*. Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on, 2004, vol. 8, no 2, p. 283-286.

[Dupont00] Dupont, P. E., Armstrong, B., & Hayward, V. (2000, June). *Elasto-plastic friction model: contact compliance and stiction*. In Proceedings of the American control conference (Vol. 2, pp. 1072-1077).

[Duriez04] Duriez, Christian, Andriot, Claude, et Kheddar, *Abderrahmane. Signorini's contact model for deformable objects in haptic simulations*. In :Intelligent Robots and Systems, 2004.(IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2004. p. 3232-3237.

[El-Khoury11] El-khoury, s., Sahbani, a., et Bidaud, P. *3d objects grasps synthesis: A survey*. In : 13th World Congress in Mechanism and Machine Science. 2011. p. 573-583.

[Essahbi13] Essahbi Nabil, Bouzgarrou Belhassen-Chedli, Gogu Grigore, *Soft material modeling for robotic task formulation and control in the muscle separation process*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 32, April 2015, pp 37-53.

[Faure12] Faure, F., Duriez, C., Delingette, H., Allard, J., Gilles, B., Marchesseau, S., Talbot, H., Courtecuisse, H., Bousquet, G., Peterlik, I., and Cotin, S. (2012). *SOFA; a Multi-Model Framework*

for Interactive Physical Simulation. In Payan, Y., editor, SoftTissue Biomechanical Modeling for Computer Assisted Surgery, pp 283–321. Springer Berlin Heidelberg.

[Featherstone08] R. Featherstone. *Rigid body dynamics algorithms*. NewYork, USA: Springer, 2008.

[Ferrari92] Ferrari, Carlo et Canny, John. *Planning optimal grasps*. In : Robotics and Automation, 1992. Proceedings., 1992 IEEE International Conference on. IEEE, 1992. p. 2290-2295.

[Flores06] P. Flores, J. Ambrosio, J.C.P. Claro and H.M. Lankarani. *Influence of the contact-impact force model on the dynamic response of multi-body systems*. Proc. Inst. Mech. Eng. Part K: Journal of Multi-body Dynamic, 220, 21–34, 2006.

[Flores08] P. Flores, J. Ambrosio, J.C.P. Claro and H.M. Lankarani. *Kinematics and Dynamics of Multibody Systems with Imperfect Joints*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008.

[Flores10] Flores, Paulo et Ambrósio, Jorge. *On the contact detection for contact-impact analysis in multibody systems*. Multibody System Dynamics, 2010, vol. 24, no 1, p. 103-122.

[Flores11] Flores, Paulo, Machado, Margarida, Silva, Miguel T., et al. *On the continuous contact force models for soft materials in multibody dynamics*.Multibody System Dynamics, 2011, vol. 25, no 3, p. 357-375.

[Frank14] Frank, Barbara, Stachnis, Cyrill, Schmedding, Rüdiger, et al. *Learning object deformation models for robot motion planning*. Robotics and Autonomous Systems, 2014, vol. 62, no 8, p. 1153-1174.

[Gabiccini10] Gabiccini, Marco, Bicchi, Antonio, Prattichizzo, Domenico, et al. *On the role of hand synergies in the optimal choice of grasping forces*. Autonomous Robots, 2010, vol. 31, no 2-3, p. 235-252.

[Gabiccini13] Gabiccini, Marco, Farnioli, Edoardo, et Bicchi, Antonio. Grasp analysis tools for synergistic underactuated robotic hands. The International Journal of Robotics Research, 2013

[Garcia-Rodriguez11] Garcia-Rodriguez, R.; Diaz-Rodriguez, G., "*Grasping and dynamic manipulation by soft finger-tips without object information*," in Control and Automation (ICCA), 2011 9th IEEE International Conference on , vol., no., pp.766-771, 19-21 Dec. 2011

[Garg06] Garg, Sohil et Dutta, Ashish. *Grasping and manipulation of deformable objects based on internal force requirements*. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2006, vol. 3, no 2, p. 107-114.

[Garzón06] M. A. Roa Garzón et R. S. Feijoo. *Grasp synthesis for 3D objects*. Research Repport, vol. IOC-DT-P-2006-23, 2006.

[Gelder04] Viet, Huynh Quang Huy, Hirai, Shinichi, SHIRAI, Yoshiaki, et al. *On the problem of determination of spring stiffness parameters for spring-mesh models*. Studies in health technology and informatics, 2008, vol. 132, p. 180.

[Gelder98] Gelder, Allen Van. *Approximate simulation of elastic membranes by triangulated spring meshes.* Journal of graphics tools, 1998, vol. 3, no 2, p. 21-41.

[Gemici14] Gemici, M.C.; Saxena, A., "*Learning haptic representation for manipulating deformable food objects*," Intelligent Robots and Systems (IROS

2014), 2014 IEEE/RSJ International Conference on , vol., no., pp.638,645, 14-18 Sept. 2014

[Gilart12] Gilart, Fidel et Suárez Feijóo, Raúl. *Determining force-closure grasps reachable by a given hand*. In : Preprints of the 10th IFAC Symposium on Robot Control. 2012.

[Giraldi02] Giraldi, G. et Sharf, I. *Literature survey of contact dynamics modelling.Mechanism and machine theory*, 2002, vol. 37, no 10, p. 1213-1239.

[Gogu97] Gogu, Grigore, Coiffet, Philippe, et Barraco, André. *Représentation des déplacements finis et infinitésimaux des robots*. Hermes, 1997.

[Goldsmith60] W. Goldsmith, Impact: *The Theory and Physical Behaviour of Colliding Solids*. London, U.K.: Edward Arnold, 1960.

[Gonthier04] Gonthier, Y., McPhee, J., Lange, C., & Piedboeuf, J. C. (2004). *A regularized contact model with asymmetric damping and dwell-time dependent friction*. Multibody System Dynamics, 11(3), 209-233. 2004

[Gopalakrishnan05] Goldberg, Ken, et al. *D-space and deform closure grasps of deformable parts*. The International Journal of Robotics Research, 2005, vol. 24, no 11, p. 899-910.

[Haddadi12] Haddadi, A.; Hashtrudi-Zaad, K., "Real-Time Identification of Hunt–Crossley Dynamic Models of Contact Environments," in *Robotics, IEEE Transactions on* , vol.28, no.3, pp.555-566, June 2012

[Haessig91] D.A. Haessig, B. Friedland, *On the modeling and simulation of friction*, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control 113 (1991) 354–362.

[Hans02] Hans, M.; Graf, B.; Schraft, R.D., "*Robotic home assistant Care-O-bot: past-present-future," in Robot and Human Interactive Communication,* 2002. Proceedings. 11th IEEE International Workshop on , vol., no., pp.380-385, 2002

[Harada14] Harada, K.; Tsuji, T.; Uto, S.; Yamanobe, N.; Nagata, K.; Kitagaki, K., "*Stability of soft-finger grasp under gravity," in Robotics and Automation* (ICRA), 2014 IEEE International Conference on , vol., no., pp.883-888, May 31 2014-June 7 2014

[Heidelberger04] Keiser, Bruno Heidelberger Matthias Teschner Richard, and Matthias Miiller Markus Gross. "*Consistent penetration depth estimation for deformable collision response*." Vision, Modeling, and Visualization 2004: Proceedings, November 16-18, 2004, Standford, USA. IOS Press, 2004.

[Hester99] R.D. Hester, M. Cetin, C. Kapoor, D. Tesar., *A criteria-based approach to grasp synthesis*, In Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, pp. 1255-1260, IEEE/ICRA, 1999.

[Hirai00] Hirai, Shinichi, Tsubol, Tatsuhiko, et Wada, Takahiro. *Robust grasping manipulation of deformable objects.* In : Proc. IEEE Symposium on Assembly and Task Planning. 2000. p. 411-416.

[Howard00] Howard, Ayanna MacCalla. *Recursive learning for deformable object manipulation*. 2000. Thèse de doctorat. University of Southern California.

[Howard93] W.S. Howard, V. Kumar, *A minimum principle for the dynamic analysis of systems with frictional contacts*, IEEE International Conference on Robotics and Automation 1 (1993) 437–442.

[Howard97] Howard, Ayanna M. et Bekey, George A. Recursive learning for deformable object

manipulation. In : Advanced Robotics, 1997. ICAR'97. Proceedings., 8th International Conference on. IEEE, 1997. p. 939-944.

[Hunt75] Hunt K.H. and Crossley F.R.E. *Coefficient of restitution interpreted as damping in vibroimpact*. Journal of Applied Mechanics, 7, 440–445, 1975.

[Hwang11] Hwang, Seon-Min, Song, Bok-Hee, et YUN, Han-Kyung. *Fuzzy inference of textile animation based on mass-spring model*. In : Nano, Information Technology and Reliability (NASNIT), 2011 15th North-East Asia Symposium on. IEEE, 2011. p. 130-135.

[Ismail08] Ismail K.A. and Stronge W.J. *Impact of Viscoplastic bodies: dissipation and restitution*. Journal of Applied Mechanics, 75, 1–5, 2008.

[Jia13] Jia, Yan-Bin, GUO, Feng, et LIN, Huan. *Grasping deformable planar objects: Squeeze, stick/slip analysis, and energy-based optimalities.* The International Journal of Robotics Research, 2013, vol. 33, no 6, p. 866-897.

[Jimenez00] P. Jimenez, F. Thomas, and C. Torras, "*3D Collision Detection: A Survey*," Computers and Graphics, 25(2): 269-285, 2000.

[Johnson85] Johnson, K. L.: 1985, *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, London.

[Joonhee12] Joonhee Jo; Sung-Kyun Kim; Yonghwan Oh; Sang-Rok Oh, "Contact force control of a robotic hand using F/T sensory feedback with a rigid object," in Automation Science and Engineering (CASE), 2012 IEEE International Conference on , vol., no., pp.436-441, 20-24 Aug. 2012

[Kao04] Imin Kao; Fuqian Yang, "*Stiffness and contact mechanics for soft fingers in grasping and manipulation*," in Robotics and Automation, IEEE

Transactions on , vol.20, no.1, pp.132-135, Feb. 2004

[khalil10] Khalil, Fouad F., Payeur, Pierre, et Cretu, Ana-Maria. *Integrated multisensory robotic hand system for deformable object manipulation*. In :International Conference Robotic and Applications, Cambridge, Massachusetts. 2010.

[kim01] Kim, Byoung-Ho, OH, Sang-Rok, YI, Byung-Ju, et al. *Optimal grasping based on non-dimensionalized performance indices.* In : Intelligent Robots and Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2001. p. 949-956.

[Kim02] Kim Y.J, Lin M.C, D. Mancha. " *DEEP: dual-space expansion for estimating penetration depth between convex polytopes*", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.921 -925, 2002

[Kim04] Kim, Byoung-Ho, YI, Byung-Ju, OH, Sang-Rok, et al. *Non-dimensionalized performance indices based optimal grasping for multi-fingered hands*.Mechatronics, 2004, vol. 14, no 3, p. 255-280.

[Kim99] Kim S.W. *Contact Dynamics and Force Control of Flexible Multi-Body Systems*, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, McGill University, Montreal, 1999.

[Kosuge95] Kosuge, k., yoshida, h., fukuda, t., sakai, m., and kanitani, k. 1995. *Manipulation of a flexible object by dual manipulators*. In Proc. 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 1, IEEE, 318–323.

[Kruse15] Kruse, Daniel; Radke, Richard J.; Wen, John T., "*Collaborative human-robot manipulation of highly deformable materials*," Robotics and Automation

(ICRA), 2015 IEEE International Conference on , vol., no., pp.3782,3787, 26-30 May 2015

[Kumar12]. Kumar K Anand et DUA, Rajeshwar Lal. *Review of Control Mechanism of Multi-fingered Robotic Arm and Proposal of New Design*.

[Lankarani90] Lankarani H.M. and Nikravesh P.E.. *A contact force model with hysteresis damping for impact analysis of multibody systems*. Journal of Mechanical Design, 112, 369–376, 1990.

[Lankarani94] Lankarani, H.M., Nikravesh, P.E.: *Continuous contact force models for impact analysis in multibody systems*. Nonlinear Dyn. 5, 193–207 (1994)

[Lee15] Lee, Alex X.; Lu, Henry; Gupta, Abhishek; Levine, Sergey; Abbeel, Pieter, "*Learning force-based manipulation of deformable objects from multiple demonstrations*," Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference on , vol., no., pp.177,184, 26-30 May 2015

[Li03] Jia-Wei Li, Hong Liu et He-Gao Cai. *On computing three-finger force-closure grasps of 2D and 3D objects.* IEEE Transaction Robotics and Automation, vol. 19, no. 1, pp 155–161, 2003.

[Li87] LI, Zexiang et Sastry, S. Shankar. *Task-oriented optimal grasping by multifingered robot hands*. Robotics and Automation, IEEE Journal of, 1987, vol. 4, no 1, p. 32-44.

[Lin14] Lin, Huan, Guo, Feng, Wang, Feifei, et al. *Picking up soft 3D objects with two fingers*. In : Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on. IEEE, 2014. p. 3656-3661.

[Lin98] M.C. Lin, S. Gottschalk, "*Collision Detection between Geometric Models: A Survey*," IMA Conf:

on Mathematics of Surfaces, Vol. 1, pp.602-608, 1998.

[Liu11] Liu Zhengdong; Shang Shuyuan, *A mass-spring model for real time cloth deformation*," in Multimedia Technology (ICMT), 2011 International Conference on , vol., no., pp.2845-2848, 26-28 July 2011

[Long14] Long, P.; Khalil, W.; Martinet, P., "*Force/vision control for robotic cutting of soft materials*," Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), 2014 IEEE/RSJ International Conference on , vol., no., pp.4716,4721, 14-18 Sept. 2014

[Luo01] Luo, Yanhong et Nelson, Bradley J. *Fusing force and vision feedback for manipulating deformable objects*. Journal of Robotic Systems, 2001, vol. 18, no 3, p. 103-117.

[Malvezzi13] Malvezzi M., Gioioso G., G. Salvietti, D. Prattichizzo, and A. Bicchi,“ *Syngrasp: a matlab toolbox for grasp analysis of human and robotic hands*,” in Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on. IEEE, 2013, pp. 1088–1093.

[Markenscoff99] X. Markenscoff, L. Ni et C. H. Papadimitnou. *The geometry of grasping*. International Journal of Robotics Research, vol. 9, no. 1, pp 61–74, 1999.

[Markenscoff99] Markenscoff .X, L. Ni et C. H. Papadimitnou. *The geometry of grasping.* International Journal of Robotics Research, vol. 9, no. 1, pp 61–74, 1999.

[Mason01] Manson, Matthew T. *Mechanics of robotic manipulation*. MIT press, 2001.

[Meseure00] P. Meseure and C. Chaillou. A deformable body model for surgical simulation. Visualization and Computer Animation, (11):197–208, 2000.

[Miller04] Miller A, P. Allen, *Graspit: a versatile simulator for robotic grasping*, Robotics Automation Magazine, IEEE, Vol. 11 (4), pp. 110-122, 2004.

[Miller88] Miller A, Gavin SP. *The motion dynamics of snakes and worms.* In : ACM Siggraph Computer Graphics. ACM, 1988. p. 169-173.

[Miller99] A. T. Miller et P.K. Allen. *Examples of 3D grasp quality computations.* In Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, pp 1240–1246. IEEE/ICRA, 1999.

[Mirtich94] Mirtich, Brian et Canny, John. *Easily computable optimum grasps in 2-D and 3-D. In* : Robotics and Automation, 1994. Proceedings., 1994 IEEE International Conference on. IEEE, 1994. p. 739-747.

[Mishra87] Mishra B. Schwartz J. T et Sharir M. *On the existence and synthesis of multifinger positive grips*. Algorithmica, vol. 2, no. 4, pp 541–558, 1987.

[Morales02] Morales, Antonio, Sanz, Pedro J., Del pobil, Angel P., et al. *An experiment in constraining vision-based finger contact selection with gripper geometry*. In : Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2002. p. 1693-1698.

[Navarro13] Navarro-alarcon, David, LIU, Yunhui, Romero, José Guadalupe, Et Al. *Visually Servoed Deformation Control By Robot Manipulators*. In : Robotics And Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference On. IEEE, 2013. P. 5259-5264.

[Niparnan04] Niparnan, Nattee et SUDSANG, Attawith. *Fast computation of 4-fingered force-closure grasps from surface points*. In : Intelligent Robots and Systems, 2004.(IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ

International Conference on. IEEE, 2004. p. 3692-3697.

[Oden83] Oden J.T, E.B. Pires, *Non-local and non-linear friction laws and variational principles for contact problems in elasticity*, Journal of Applied Mechanics 50 (1983) 67–76.

[Okamura00] Okamura A.M., Smaby N., Cutkosky M.R., *An overview of dexterous manipulation*, In Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, pp. 255-262, IEEE/ICRA, 2000.

[Papacharalampopoulos15] Papacharalampopoulos, a., Makris, s., bitzios, A., et al. *Prediction of cabling shape during robotic manipulation.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, vol. 82, no 1-4, p. 123-132.

[Park92] Y. Park and G. Starr, "*Grasp synthesis of polygonal objects using a three-fingered robot hand*," Intl. J. Robotics Research, vol. 11, no. 3, pp. 163–184, 1992.

[Pfeiffer96] Pfeiffer F. and Glocker C. *Multi-body dynamics with unilateral constraints*. John Wiley and Sons, New York, 1996.

[Platt81] Platt, Stephen M. et Badler, Norman I. *Animating facial expressions.* In :ACM SIGGRAPH computer graphics. ACM, 1981. p. 245-252.

[Pollard04] Pollard N.S, "*Closure and quality equivalence for efficient synthesis of grasps from examples*," International Journal of Robotics Research, vol. 23, no. 6, pp. 595-613, 2004.

[Ponce91] Ponce J and Faverjon B, "*On computing three-finger force-closure grasps of polygonal objects*," in , Fifth International Conference on Advanced Robotics, 1991. "Robots in Unstructured

Environments", 91 ICAR, 1991, pp. 1018–1023 vol.2.

[Ponce95] Ponce, Jean et Faverjon, Bernard. *On computing three-finger force-closure grasps of polygonal objects*. Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 1995, vol. 11, no 6, p. 868-881.

[Provenzale14] Provenzale, A.; Cordella, F.; Zollo, L.; Davalli, A.; Sacchetti, R.; Guglielmelli, E., "*A grasp synthesis algorithm based on postural synergies for an anthropomorphic arm-hand robotic system*," in Biomedical Robotics and Biomechatronics (2014 5th IEEE RAS & EMBS International Conference on , vol., no., pp.958-963, 12-15 Aug. 2014

[Rambow12] Rambow, M.; Schauss, T.; Buss, M.; Hirche, S., "*Autonomous manipulation of deformable objects based on teleoperated demonstrations*," Intelligent Robots and Systems (IROS), 2012 IEEE/RSJ International Conference on , vol., no., pp.2809,2814, 7-12 Oct. 2012

[Reuleaux63] Reuleaux F. *The Kinematics of Machinery : Outline of a Theory of Machines*, 1876, 1963.

[Roa07] Roa, Máximo A. et Suarez, Raúul. *Geometrical approach for grasp synthesis on discretized 3d objects*. In : Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2007. p. 3283-3288.

[Saha06] Saha, Mitul et Isto, Pekka. *Motion planning for robotic manipulation of deformable linear objects*. In : Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on. IEEE, 2006. p. 2478-2484.

[Seo15] Seo, Jungwon, Yim, Mark, et Kumar, Vijay. *A theory on grasping objects using effectors with curved contact surfaces and its application to whole-arm*

grasping. The International Journal of Robotics Research, 2015

[Shimoga96] Shimoga, Karun B.. et GOLDENBERG, Andrew A. *Soft robotic fingertips part II: modeling and impedance regulation*. The International journal of robotics research, 1996, vol. 15, no 4, p. 335-350.

[Stewart00] Stewart D. et Trinkle J. C. *An implicit time-stepping scheme for rigid body dynamics with coulomb friction*. In Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, pp 162–169. IEEE/ICRA, 2000.

[Suárez06] Suárez, Raúl, Cornella, Jordi, et Garzón, Máximo Roa. *Grasp quality measures*. Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials, 2006.

[Tegin05] Tegin J and Wikander J, *Tactile sensing in intelligent robotic manipulation* — a review, Ind. Robot 32, 64–70 (2005)

[Verrall76] Vverrall, R. J. *A sphere compression test for measuring the mechanical properties of dental composite materials.* Journal of dentistry, 1976, vol. 4, no 1, p. 11-14.

[Wakamatsu04] Wakamatsu, Hidefumi et Hirai, Shinichi. *Static modeling of linear object deformation based on differential geometry*. The International Journal of Robotics Research, 2004, vol. 23, no 3, p. 293-311.

[Watanabe14] Watanabe, T., & Fujihira, Y. (2014, May). *Experimental investigation of effect of fingertip stiffness on friction while grasping an object*. In Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on (pp. 889-894). IEEE.

[Wu01] Wu, Xunlei, Downes, Michael S., Goktekin, Tolga, et al. *Adaptive nonlinear finite elements for deformable body simulation using dynamic*

progressive meshes. In : Computer Graphics Forum. Blackwell Publishers Ltd, 2001. p. 349-358.

[Xu10] S. Xu, X. P. Liu, H. Zhang and L. Hu, "An improved realistic mass-spring model for surgery simulation," *Haptic Audio-Visual Environments and Games (HAVE), 2010 IEEE International Symposium on*, Phoenix, AZ, 2010, pp. 1-6.

[Xydas99] Xydas, Nicholas et Kao, Imin. *Modeling of contact mechanics and friction limit surfaces for soft fingers in robotics, with experimental results*. The International Journal of Robotics Research, 1999, vol. 18, no 9, p. 941-950.

[Zukas82] Zukas J. A, Nicholas T . Greszczuk L. B and Curran D. R. *Impact dynamics*. John Wiley and Sons, New York, 1982.

[Zerbato07] D. Zerbato, S. Galvan and P. Fiorini, "Calibration of mass spring models for organ simulations," *Intelligent Robots and Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on*, San Diego, CA, 2007, pp. 370-375.

ANNEXE A : Modélisation associée au robot ADEPT

A) Modèle Géométrique Direct

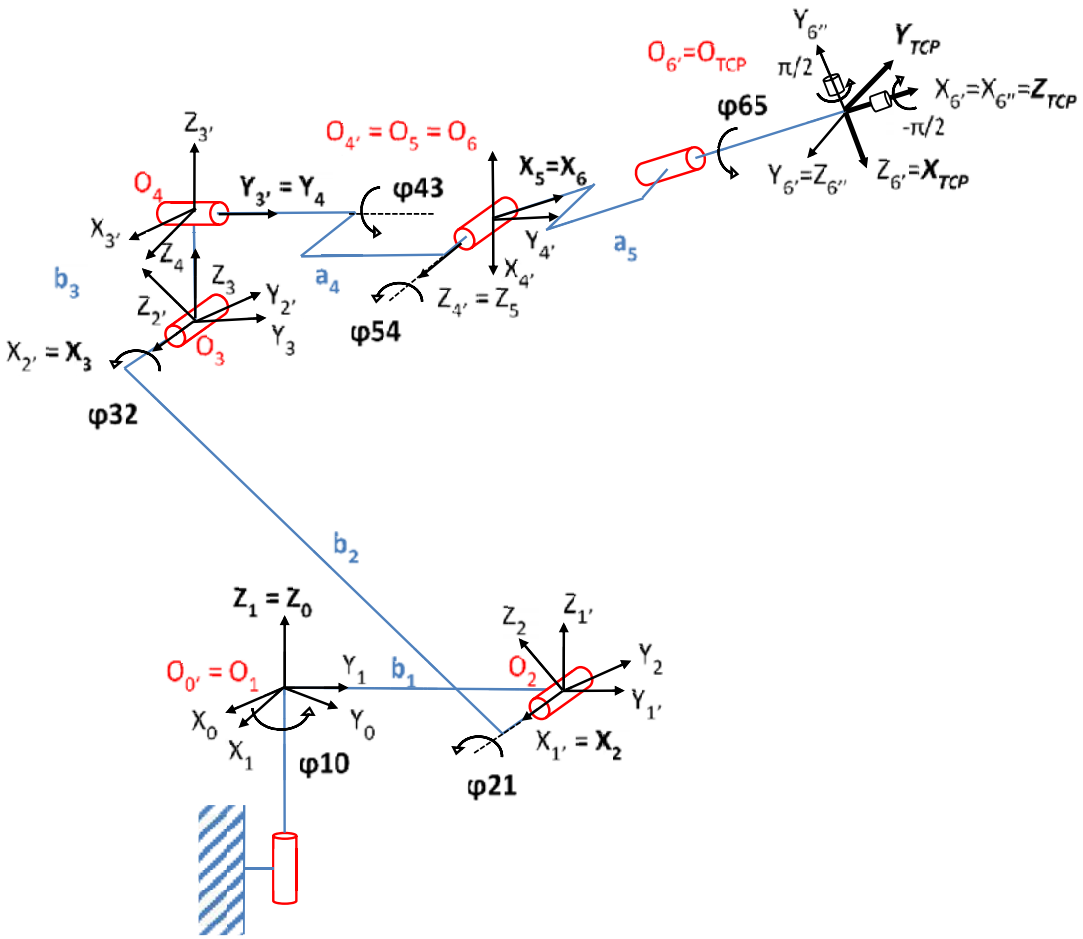

Figure A-1 Modélisation TCS du robot Adept Viper S1700D

L'expression du MGD s'exprime par la concaténation de l'ensemble des opérateurs suivants :

$$A_{0TCP} = R^{z}_{01}(\varphi_{10})T^{y}_{1'1'}(b_1)R^{x}_{1'2}(\varphi_{21})T^{y}_{22'}(b_2)R^{x}_{2'3}(\varphi_{32})T^{z}_{33'}(b_3)R^{y}_{3'4}(\varphi_{43})T^{y}_{44'}(a_4)R^{z}_{4'5}(\varphi_{54})R^{x}_{5'6}(\varphi_{65})$$
$$T^{x}_{66''}(a_6)$$

Le calcul de A_{06} est le résultat de la multiplication matricielle des opérateurs élémentaires

$$A_{06} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ x_6 & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ y_6 & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ z_6 & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

$$X_6=-S_{10}*b_1+C_{10}*(C_{43}*(C_{54}*a_6-S_{54}*C_{65}*b_6)+S_{43}*S_{65}*b_6)-S_{10}*(C_{21}*b_2+C_{21}*(-S_{32}*b_3+C_{32}*(a_4+S_{54}*a_6+C_{54}*C_{65}*b_6)-S_{32}*(-S_{43}*(C_{54}*a_6-S_{54}*C_{65}*b_6)+C_{43}*S_{65}*b_6))-S_{21}*(C_{32}*b_3+S_{32}*(a_4+S_{54}*a_6+C_{54}*C_{65}*b_6)+C_{32}*(-S_{43}*(C_{54}*a_6-S_{54}*C_{65}*b_6)+C_{43}*S_{65}*b_6)))$$

$$Y_6=C_{10}*b_1+S_{10}*(C_{43}*(C_{54}*a_6-S_{54}*C_{65}*b_6)+S_{43}*S_{65}*b_6)+C_{10}*(C_{21}*b_2+C_{21}*(-S_{32}*b_3+C_{32}*(a_4+S_{54}*a_6+C_{54}*C_{65}*b_6)-S_{32}*(-S_{43}*(C_{54}*a_6-S_{54}*C_{65}*b_6)+C_{43}*S_{65}*b_6))-S_{21}*(C_{32}*b_3+S_{32}*(a_4+S_{54}*a_6+C_{54}*C_{65}*b_6) +C_{32}*(-S_{43}*(C_{54}*a_6-S_{54}*C_{65}*b_6)+C_{43}*S_{65}*b_6)))$$

$$Z_6=S_{21}*b_2+S_{21}*(-S_{32}*b_3+C_{32}*(a_4+S_{54}*a_6+C_{54}*C_{65}*b_6)-S_{32}*(-S_{43}*(C_{54}*a_6-S_{54}*C_{65}*b_6)+C_{43}*S_{65}*b_6))+C_{21}*(C_{32}*b_3+S_{32}*(a_4+S_{54}*a_6+C_{54}*C_{65}*b_6)+C_{32}*(-S_{43}*(C_{54}*a_6-S_{54}*C_{65}*b_6)+C_{43}*S_{65}*b_6))$$

$$a_{11} = C_{10}*C_{43}*C_{54}-S_{10}*(C_{21}*(C_{32}*S_{54}+S_{32}*S_{43}*C_{54})-S_{21}*(S_{32}*S_{54}-C_{32}*S_{43}*C_{54}))$$

$$a_{21} = S_{10}*C_{43}*C_{54}+C_{10}*(C_{21}*(C_{32}*S_{54}+S_{32}*S_{43}*C_{54})-S_{21}*(S_{32}*S_{54}-C_{32}*S_{43}*C_{54}))$$

$$a_{31} = S_{21}*(C_{32}*S_{54}+S_{32}*S_{43}*C_{54})+C_{21}*(S_{32}*S_{54}-C_{32}*S_{43}*C_{54})$$

$$a_{12} = C_{10}*(-C_{43}*S_{54}*C_{65}+S_{43}*S_{65})-S_{10}*(C_{21}*(C_{32}*C_{54}*C_{65}-S_{32}*(S_{43}*S_{54}*C_{65}+C_{43}*S_{65}))-S_{21}*(S_{32}*C_{54}*C_{65}+C_{32}*(S_{43}*S_{54}*C_{65}+C_{43}*S_{65})))$$

$$a_{22} = S_{10}*(-C_{43}*S_{54}*C_{65}+S_{43}*S_{65})+C_{10}*(C_{21}*(C_{32}*C_{54}*C_{65}-S_{32}*(S_{43}*S_{54}*C_{65}+C_{43}*S_{65}))-S_{21}*(S_{32}*C_{54}*C_{65}+C_{32}*(S_{43}*S_{54}*C_{65}+C_{43}*S_{65})))$$

$$a_{32} = S_{21}*(C_{32}*C_{54}*C_{65}-S_{32}*(S_{43}*S_{54}*C_{65}+C_{43}*S_{65}))+C_{21}*(S_{32}*C_{54}*C_{65}+C_{32}*(S_{43}*S_{54}*C_{65}+C_{43}*S_{65}))$$

$$a_{13} = C_{10}*(C_{43}*S_{54}*S_{65}+S_{43}*C_{65})-S_{10}*(C_{21}*(-C_{32}*C_{54}*S_{65}-S_{32}*(-S_{43}*S_{54}*S_{65}+C_{43}*C_{65}))-S_{21}*(-S_{32}*C_{54}*S_{65}+C_{32}*(-S_{43}*S_{54}*S_{65}+C_{43}*C_{65})))$$

$$a_{23} = S_{10}*(C_{43}*S_{54}*S_{65}+S_{43}*C_{65})+C_{10}*(C_{21}*(-C_{32}*C_{54}*S_{65}-S_{32}*(-S_{43}*S_{54}*S_{65}+C_{43}*C_{65}))-S_{21}*(-S_{32}*C_{54}*S_{65}+C_{32}*(-S_{43}*S_{54}*S_{65}+C_{43}*C_{65})))$$

$$a_{33} = S_{21}*(-C_{32}*C_{54}*S_{65}-S_{32}*(-S_{43}*S_{54}*S_{65}+C_{43}*C_{65}))+C_{21}*(S_{32}*C_{54}*S_{65}+C_{32}*(-S_{43}*S_{54}*S_{65}+C_{43}*C_{65}))$$

B) Modèle Géométrique Inverse

La détermination des angles φ_{10} à φ_{65} est obtenue à l'aide de la méthode de Paul. On pose :

$$U_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ p_x & a_x & n_x & s_x \\ p_y & a_y & n_y & s_y \\ p_z & a_z & n_z & s_z \end{bmatrix} \quad \text{avec} \quad U_0 = A_{01}A_{12}A_{23}A_{34}A_{45}A_{56}$$

Pour trouver φ_{10}, on multiplie par la gauche soit :

$$A_{01}^{-1}U_0 = A_{12}A_{23}A_{34}A_{45}A_{56} \quad \text{soit} \quad A_{10}U_0 = A_{12}A_{23}A_{34}A_{45}A_{56}$$

On obtient alors l'équation :

$$\varphi_{10} = Arc\tan(\frac{-p_x}{p_y}) + k\pi \text{ , } k=1, 2,...$$

Pour trouver φ_{21}, on multiplie par la gauche soit :

$$A_{12}^{-1}A_{01}^{-1}U_0 = A_{23}A_{34}A_{45}A_{56} \quad \text{soit} \quad A_{21}A_{10}U_0 = A_{23}A_{34}A_{45}A_{56}$$

On pose

$K = -b_1-S_{10}*p_x+C_{10}*p_y$ $\quad X = -2*b_2*p_z$ $\quad Y = -2*K*b$ $\quad Z = b_3^2+a_4^2-b_2^2-p_z^2-K^2$

ε=+/-1

$S_{21} = (X*Z+ \varepsilon *Y*((X^2+Y^2-Z^2) \wedge (1/2)))/(X^2+Y^2)$

$C_{21} = (Y*Z- \varepsilon *X*((X^2+Y^2-Z^2) \wedge (1/2)))/(X^2+Y^2)$

$$= Arc\tan(\frac{S_{21}}{C_{21}}) + k\pi \text{ , } k=1, 2,...$$

Pour trouver φ_{32}, on multiplie par la gauche soit :

$$A_{23}^{-1}A_{12}^{-1}A_{01}^{-1}U_0 = A_{34}A_{45}A_{56} \quad \text{soit} \quad A_{32}A_{21}A_{10}U_0 = A_{34}A_{45}A_{56}$$

On pose

$X_1 = -b_2+C_{21}*(-b_1-S_{10}*p_x+C_{10}*p_y)+S_{21}*p_z$ $\quad Y_1 = -S_{21}*(-b_1-S_{10}*p_x+C_{10}*p_y)+C_{21}*p_z$

$S_{32} = (Y_1*a_4- X_1*b_3)/(Y_1^2+ X_1^2)$

$C_{32} = (Y_1*b_3+ X_1*a_4)/(Y_1^2+ X_1^2)$

$$= Arc\tan(\frac{S_{32}}{C_{32}}) + k\pi \text{ , } k=1, 2,...$$

Pour trouver φ_{43}, On multiplie par la gauche soit :

$$A_{34}^{-1}A_{23}^{-1}A_{12}^{-1}A_{01}^{-1}U_0 = A_{45}A_{56} \text{ soit } A_{43}A_{32}A_{21}A_{10}U_0 = A_{45}A_{56}$$

On pose

$X_2 = C_{10}*s_x+S_{10}*s_y$

$Y_2 = -S_{32}*(C_{21}*(-S_{10}*s_x+C_{10}*s_y)+S_{21}*s_z)+C_{32}*(-S_{21}*(-S_{10}*s_x+C_{10}*s_y)+C_{21})*s_z);$

$\varphi_{43} = Arc\tan(\frac{-Y_2}{X_2}) + k\pi$, k=1, 2,...

Pour trouver φ_{54} et φ_{65}, on multiplie par la gauche soit :

$A_{45}^{-1}A_{34}^{-1}A_{23}^{-1}A_{12}^{-1}A_{01}^{-1}U_0 = A_{56}$ soit $A_{54}A_{43}A_{32}A_{21}A_{10}U_0 = A_{56}$

On pose

$C_{54} = (C_{43}*(C_{10}*s_x+S_{10}*s_y)-S_{43}*(-S_{32}*(C_{21})*(-S_{10}*s_x+C_{10}*s_y)+S_{21}*s_z)$
$+C_{32}*(-S_{21}*(-S_{10}*s_x+C_{10}*s_y)+C_{21}*s_z)))$

$S_{54} = (C_{32}*(C_{21})*(-S_{10}*s_x+C_{10}*s_y)+S_{21}*s_z)+S_{32}*(-S_{21}*(-S_{10}*s_x+C_{10}*s_y)+C_{21}*s_z))$

$\varphi_{54} = Arc\tan(\frac{S_{54}}{C_{54}}) + k\pi$, k=1, 2,...

$S_{65} = S_{43}*(C_{10}*n_x+S_{10}*n_y)+C_{43}*(-S_{32}*(C_{21}*(-S_{10}*n_x+C_{10}*n_y)+S_{21}*n_z)$
$+C_{32}*(-S_{21}*(-S_{10}*n_x+C_{10}*n_y)+C_{21}*n_z))$

$C_{65} = S_{43}*(C_{10}*a_x+S_{10}*a_y)+C_{43}*(-S_{32}*(C_{21}*(-S_{10}*a_x+C_{10}*a_y)+S_{21}*a_z)$
$+C_{32}*(-S_{21}*(-S_{10}*a_x+C_{10}*a_y)+C_{21}*a_z))$

$= Arc\tan(\frac{S_{65}}{C_{65}}) + k\pi$, k=1, 2,...

ANNEXE B : Modélisation associée à la main Barrett

A) Modèle Géométrique Direct

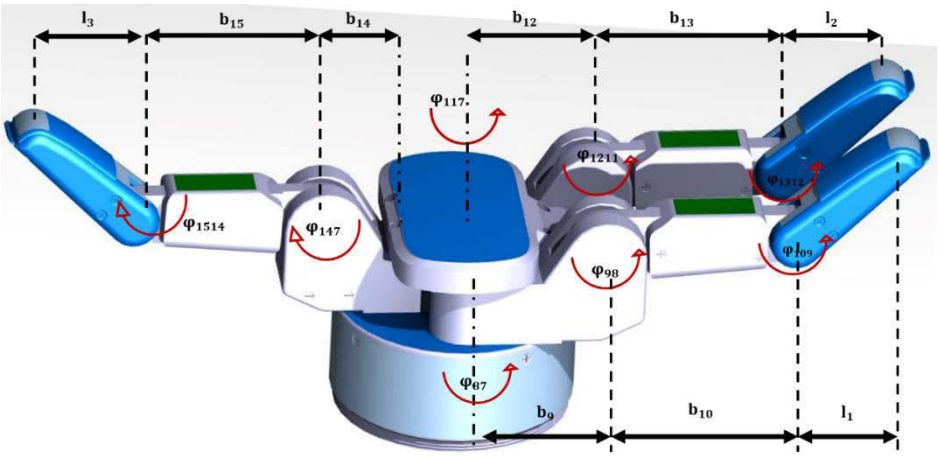

Figure B-1 Main Barrett

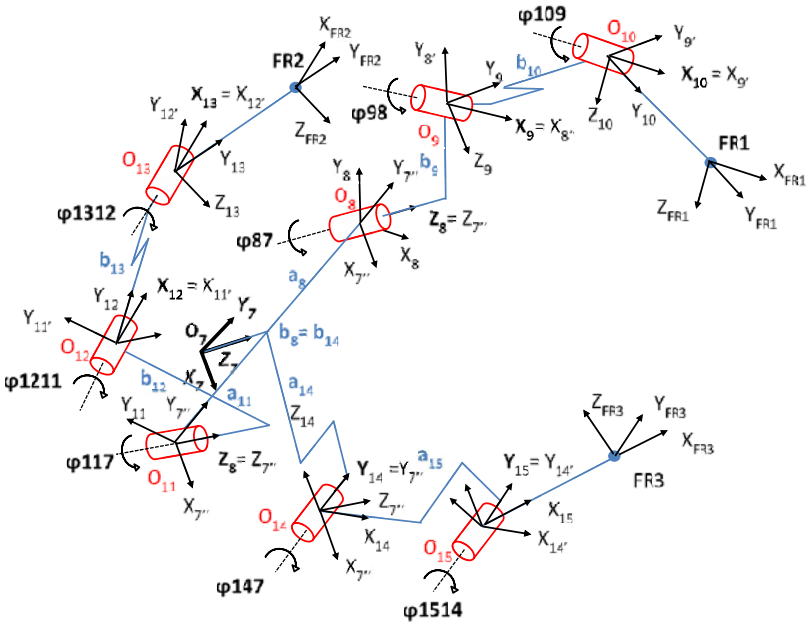

Figure B-2 Modélisation TCS de la main Barrett

Doigt FR1: L'expression du MGD s'exprime par la concaténation de l'ensemble des opérateurs suivants :

$$A_{7FR1} = \underbrace{T^{z}_{77'}(b_8)T^{y}_{7'7''}(a_8)R^{z}_{7''8}(\varphi_{87})}_{A_{78}}\underbrace{T^{y}_{88'}(b_9)R^{x}_{8'9}(\varphi_{98})}_{A_{89}}\underbrace{T^{y}_{99'}(b_{10})R^{x}_{9'10}(\varphi_{109})}_{A_{910}}\underbrace{T^{y}_{10FR1}(l_1)}_{A_{10FR1}}$$

Le calcul de A_{7FR1} est le résultat de la multiplication matricielle des opérateurs élémentaires

$$A_{7FR1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ x_{FR1} & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ y_{FR1} & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ z_{FR1} & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

$x_{FR1} = l_1*(S_{109}*S_{87}*S_{98} - C_{109}*C_{98}*S_{87}) - b_9*S_{87}) - b_{10}*C_{98}*S_{87}$

$y_{FR1} = a_8 - l_1*(C_{87}*S_{109}*S_{98} - C_{109}*C_{87}*C_{98}) + b_9*C_{87} + b_{10}*C_{87}*C_{98}$

$z_{FR1} = b_8 + l_1*(C_{109}*S_{98} + C_{98}*S_{109}) + b_{10}*S_{98}$

$a_{11} = C_{87}$

$a_{12} = S_{109}*S_{87}*S_{98} - C_{109}*C_{98}*S_{87}$

$a_{13} = C_{109}*S_{87}*S_{98} + C_{98}*S_{109}*S_{87}$

$a_{21} = S_{87}$

$a_{22} = C_{109}*C_{87}*C_{98} - C_{87}*S_{109}*S_{98}$

$a_{23} = -C_{109}*C_{87}*S_{98} - C_{87}*C_{98}*S_{109}$

$a_{31} = 0$

$a_{32} = C_{109}*S_{98} + C_{98}*S_{109}$

$a_{33} = C_{109}*C_{98} - S_{109}*S_{98}$

Doigt FR2: L'expression du MGD s'exprime par la concaténation de l'ensemble des opérateurs suivants :

$$A_{7FR2} = \underbrace{T^{z}_{77'}(b_8)T^{y}_{7'7''}(a_{11})R^{z}_{7''11}(\varphi_{117})}_{A_{711}}\underbrace{T^{y}_{1111'}(b_{12})R^{x}_{11'12}(\varphi_{1211})}_{A_{1112}}\underbrace{T^{y}_{12'13}(b_{13})R^{x}_{12'13}(\varphi_{1213})}_{A_{1213}}\underbrace{T^{y}_{13FR2}(l_1)}_{A_{13FR2}}$$

Les composantes de A_{7FR2} sont analogues à A_{7FR1}

Doigt FR3: L'expression du MGD s'exprime par la concaténation de l'ensemble des opérateurs suivants :

$$A_{7FR3} = \underbrace{T^{z}_{77'}(b_{14})T^{x}_{7'7''}(a_{14})R^{y}_{7''14}(\varphi_{147})}_{A_{714}}\underbrace{T^{y}_{1111'}(b_{15})R^{y}_{14'15}(\varphi_{1514})}_{A_{1415}}\underbrace{T^{y}_{15FR3}(l_1)}_{A_{15FR3}}$$

Le calcul de A_{7FR3} est le résultat de la multiplication matricielle des opérateurs élémentaires :

$$A_{7FR3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ x_{FR3} & a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ y_{FR3} & a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ z_{FR3} & a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

$x_{FR3} = a_{14} + l_1*(C_{148}*C_{1514} - S_{148}*S_{1514}) + a_{15}*C_{148}$

$y_{FR3} = 0$

$z_{FR3} = b_8 - l_1*(C_{148}*S_{1514} + C_{1514}*S_{148}) - a_{15}*S_{148}$

$a_{11} = C_{148}*C_{1514} - S_{148}*S_{1514}$

$a_{12} = 0$

$a_{13} = C_{148}*S_{1514} + C_{1514}*S_{148}$

$a_{21} = 0$

$a_{22} = 1$

$a_{23} = 0$

$a_{31} = -C_{148}*S_{1514} - C_{1514}*S_{148}$

$a_{32} = 0$

$a_{33} = C_{148}*C_{1514} - S_{148}*S_{1514}$

B) Modèle Géométrique Inverse

Les points pilotés des doigts FR1, FR2 et FR3 sont exprimées dans le repère R_7 de la main et définis par les position FRK= $[x_{7k}, y_{7k}, z_{7k}]$ pour k = 1,2,3.

Dans le cas des deux doigts FR1 et FR2, les coordonnées articulaires de φ_{87} et φ_{117} (Fig.B-1) sont obtenus par l'expression suivante :

$$\varphi_{87} = \varphi_{117} = arctan\,(y_{7k}\,/x_{7k})\ pour\ k = 1,2$$

Pour définir les autres composantes articulaires, nous nous positionnons dans le plan π contenant les deux liaisons articulaires des phalanges des doigts pour k = 1,2,3 (Fig. B-2).

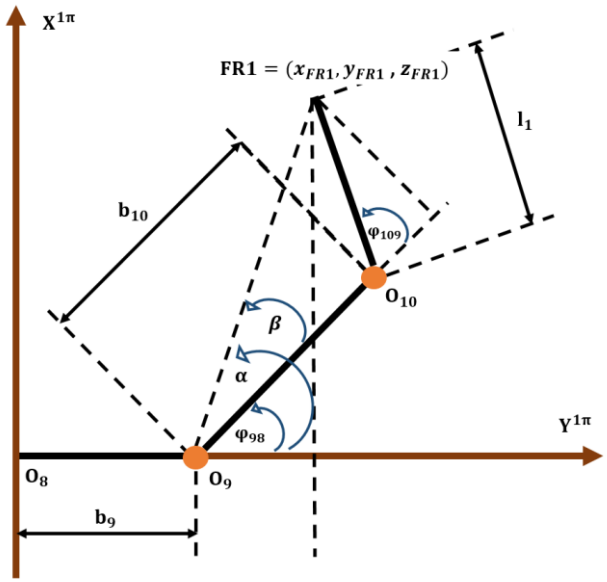

Figure B-3 Relations géométriques entre les phalanges de la main Barrett

Ainsi, en appliquant la relation des cosinus dans le triangle O_9, O_{10} et FR1 nous en déduisons φ_{109} puis φ_{98} par les expressions suivantes :

$$\varphi_{109} = arccos\left(\frac{\left(\sqrt{{}^{1\Pi}x_{FR1}^2 + {}^{1\Pi}y_{FR1}^2} - b_9\right)^2 + {}^{1\Pi}z_{FR1}^2 - b_{10}^2 - \mathrm{l}_1^2}{2b_{10}\mathrm{l}_1}\right)$$

$$\varphi_{98} = \alpha - \beta = arctan\left(\frac{{}^{1\Pi}z_{FR1}^2}{\sqrt{{}^{1\Pi}x_{FR1}^2 + {}^{1\Pi}y_{FR1}^2} - b_9}\right) - arctan\left(\frac{\mathrm{l}_1 \sin(\varphi_{109})}{b_{10} + \mathrm{l}_1 \cos(\varphi_{109})}\right)$$

Résumé

La manipulation dextre est un sujet important dans la recherche en robotique et dans lequel peu de travaux ont abordé la manipulation d'objets déformables. De nouvelles applications en chirurgie, en industrie agroalimentaire ou encore dans les services à la personne nécessitent la maîtrise de la saisie et la manipulation d'objets déformables.

Cette thèse s'intéresse à la manipulation d'objets déformables par des préhenseurs mécaniques anthropomorphiques tels que des mains articulées à plusieurs doigts. Cette tâche requière une grande expertise en modélisation mécanique et en commande : modélisation des interactions, perception tactile et par vision, contrôle des mouvements des doigts en position et en force pour assurer la stabilité de la saisie.

Les travaux présentés dans cette thèse se focalisent sur la modélisation de la saisie d'objets déformables. Pour cela, nous avons utilisé une discrétisation par des systèmes masses-ressorts non-linéaires pour modéliser des corps déformables en grands déplacements et déformations tout en ayant un coût calculatoire faible. Afin de prédire les forces d'interactions entre main robotique et objet déformable, nous avons proposé une approche originale basée sur un modèle rhéologique visco-élasto-plastique pour évaluer les forces tangentielles de contact et décrire la transition entre les modes d'adhérence et de glissement. Les forces de contact sont évaluées aux points nodaux en fonction des mouvements relatifs entre les bouts des doigts et les facettes du maillage de la surface de l'objet manipulé.

Une autre contribution de cette thèse consiste à utiliser de cette modélisation dans la planification des tâches de manipulation d'objets déformables 3D. Cette planification consiste à déterminer la configuration optimale de la main pour la saisie de l'objet ainsi que les trajectoires à suivre et les efforts à appliquer par les doigts pour contrôler la déformation de l'objet tout en assurant la stabilité de l'opération.

La validation expérimentale de ces travaux a été réalisée sur deux plateformes robotiques : une main Barrett embarquée sur un bras manipulateur Adept S1700D et une main Shadow embarquée sur un bras manipulateur Kuka LWR4+.

Mots clés: grande déformation, Force-closure, analyse et synthèse de prises, main robotisée, modèle de contact, planification de prise.

Abstract

Modeling and grasping strategy for manipulation of deformable objects

Dexterous manipulation is an important issue in robotics research in which few works have tackled deformable object manipulation. New applications in surgery, food industry or in service robotics require mastering the grasping and manipulation of deformable objects.

This thesis focuses on deformable object manipulation by anthropomorphic mechanical graspers such as multi-fingered articulated hands. This task requires a great expertise in mechanical modeling and control: interaction modeling, tactile and vision perception, force / position control of finger movements to ensure stable grasping.

The work presented in this thesis focuses on modeling the grasping of deformable objects. To this end, we used a discretization by non-linear mass-spring systems to model deformable bodies in large displacements and deformations while having a low computational cost. To predict the interaction forces between robot hand and deformable object, we proposed an original approach based on a visco-elasto-plastic rheological model to evaluate tangential contact forces and describe the transition between the sticking and slipping modes. The contact forces are evaluated at nodes as function of the relative movements between the fingertips and the surface mesh facets of the manipulated object.

Another contribution of this thesis is the use of this model in the planning of 3D deformable object manipulation tasks. This planning consists in determining the optimal configuration of the hand for grasping the objects as well as the paths to track and the efforts to be applied by the fingers to control the deformation of the object while ensuring the stability of the operation.

The experimental validation of this work has been carried out on two robotic platforms: a Barrett hand embedded on a Adept S1700D ® manipulator and a Shadow hand embedded on a Kuka LWR4+® manipulator.

Keywords: large deformation, Force-closure, grasp analysis and synthesis, multi-fingered hands, contact model, grasping planning.