



HAL
open science

Planification et mise en oeuvre de mouvements de micromanipulation dextre

Jean-Antoine Séon

► **To cite this version:**

Jean-Antoine Séon. Planification et mise en oeuvre de mouvements de micromanipulation dextre. Automatique / Robotique. Université Bourgogne Franche-Comté, 2017. Français. NNT : 2017UBFCD062 . tel-03227406

HAL Id: tel-03227406

<https://theses.hal.science/tel-03227406>

Submitted on 17 May 2021

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.



SPIM

Thèse de Doctorat



UFC

école doctorale **sciences pour l'ingénieur et microtechniques**
UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

Planification et mise en œuvre de mouvements de micromanipulation dextre

■ JEAN-ANTOINE SEON

SPIM

Thèse de Doctorat

UFC

école doctorale sciences pour l'ingénieur et microtechniques
UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

N° X | X | X

THÈSE présentée par

JEAN-ANTOINE SEON

pour obtenir le

Grade de Docteur de

l'Université de Bourgogne Franche-Comté

Spécialité : **Automatique**

Planification et mise en œuvre de mouvements de micromanipulation dextre

Unité de Recherche :
Laboratoire FEMTO-ST

Franche-Comté Electronique, Mécanique, Thermique et Optique - Sciences et Technologies

A soutenir le 17 Mai 2017 devant le Jury composé de :

YASSINE HADDAB	Rapporteur	Prof. des universités, LIRMM, Univ. de Montpellier
DANIEL SIDOBRE	Rapporteur	Maître de conférences HDR, LAAS, Univ. Paul Sabatier
YOUCEF MEZOUAR	Examineur	Prof. des universités, Institut Pascal, SIGMA
QUAN ZHOU	Examineur	Professor, AALTO Univ., Finlande
ANNE DELETTRE	Examineur	Responsable R&D, Percipio-Robotics SA
MICHAËL GAUTHIER	Directeur de thèse	Directeur de recherche CNRS, FEMTO-ST
REDWAN DAHMOUCHE	Co-encadrant	Maître de conférences, FEMTO-ST, Univ. de Franche-Comté

SOMMAIRE

Introduction générale	3
1 État de l'art	7
1.1 Introduction	8
1.2 La manipulation robotique à l'échelle micrométrique	10
1.2.1 Le micro-monde	10
1.2.2 La manipulation sans contact	11
1.2.2.1 La manipulation magnétique	11
1.2.2.2 La manipulation à l'aide de principes électriques	12
1.2.2.3 La manipulation optique	12
1.2.2.4 La manipulation acoustique	13
1.2.3 La manipulation avec contact	14
1.2.3.1 Les méthodes pour vaincre les effets d'adhésion	15
1.2.3.2 Les méthodes qui utilisent les effets d'adhésion	18
1.2.4 Quelle stratégie pour le micro-assemblage ?	21
1.3 La manipulation robotique à l'échelle macroscopique	25
1.3.1 Les préhenseurs macroscopiques	25
1.3.2 Techniques de manipulation	26
1.3.2.1 Le roulement	26
1.3.2.2 Le glissement	27
1.3.2.3 Le pivotement	28
1.3.2.4 Le repositionnement	28
1.3.2.5 Quelle stratégie pour la micromanipulation dextre ?	29
1.4 Vers la micromanipulation dextre	29
1.5 L'automatisation en manipulation robotique	30
1.5.1 L'automatisation en micromanipulation	30
1.5.1.1 Les méthodes de planification	30
1.5.1.2 Les méthodes de commande	34
1.5.1.3 Synthèse	35

1.5.2	L'automatisation en macro-manipulation dextre	36
1.5.2.1	Planification de la saisie	36
1.5.2.2	Planification de la manipulation dextre	37
1.5.2.3	Synthèse	38
1.6	Conclusion	39
2	La micro-manipulation multi-digitale dextre	41
2.1	Présentation du problème	42
2.1.1	La manipulation dextre	42
2.1.2	La micromanipulation dextre	43
2.2	La modélisation du contact objet-doigt	44
2.2.1	Les différents modèles	44
2.2.2	Quel modèle pour la micromanipulation ?	46
2.3	Équilibre de prises	47
2.3.1	Équilibre statique	47
2.3.1.1	Mise en équation	47
2.3.1.2	Évaluation de la stabilité	49
2.3.2	Détachement stable	51
2.3.2.1	Détachement d'un doigt	52
2.3.2.2	Détachement du support	52
2.4	Cartographie de l'espace de planification	52
2.4.1	Carte d'équilibre, de reconfiguration et de prises initiales	53
2.4.1.1	Génération des cartes	53
2.4.1.2	Exemples de cartes	54
2.4.2	Influence du système de manipulation	56
2.4.2.1	Prise en compte et détection des collisions	56
2.4.2.2	Exemples de cartes avec collisions	58
2.4.3	Influence de l'orientation de l'objet	62
2.4.3.1	Cartographie multi-couches	62
2.4.3.2	Exemples de cartes	62
2.5	Conclusion	67
3	Génération de trajectoires pour la micromanipulation dextre planaire	69
3.1	Approche méthodologique	70
3.2	Planification de la séquence de prises	70
3.2.1	Représentation du problème sous forme de graphe	71

3.2.1.1	Représentation des nœuds	71
3.2.1.2	Création des arêtes	71
3.2.2	Algorithme de parcours de graphe	73
3.2.2.1	Définition des coûts et de l'heuristique	74
3.2.2.2	Optimisation globale	76
3.2.2.3	Exemple d'une séquence de prises	77
3.2.3	Synthèse	78
3.3	Planification des trajectoires	79
3.3.1	Présentation du problème	79
3.3.1.1	Retrait d'un doigt	79
3.3.1.2	Placement d'un ou plusieurs doigts	80
3.3.1.3	Repositionnement d'un doigt	81
3.3.2	Génération des mouvements	81
3.3.2.1	Planification des mouvements libres	81
3.3.2.2	Planification des mouvements contraints	82
3.3.3	Exemple de trajectoires planaires	82
3.3.4	Synthèse	85
3.4	Optimisation des forces de serrage	85
3.4.1	Formulation du problème d'optimisation	86
3.4.2	Fonction d'optimisation	87
3.5	Discussion sur la méthode proposée	88
3.6	Conclusion	89
4	Validation et analyse des trajectoires de micromanipulations dextres	91
4.1	Simulations et analyse du fonctionnement de l'algorithme	92
4.1.1	Trajectoires sans reconfiguration	92
4.1.2	Trajectoires avec reconfiguration	94
4.1.2.1	Reconfiguration due aux limites du cône de frottement	95
4.1.2.2	Reconfiguration due aux limites de collision	98
4.1.2.3	Configuration en cul-de-sac	99
4.2	Influences des paramètres physiques sur la génération de trajectoires	101
4.2.1	Présentation de la manipulation de référence	101
4.2.2	Influence de la friction	103
4.2.2.1	Influence de la friction sur l'espace de planification	103
4.2.2.2	Influence de la friction sur la manipulation	104

4.2.3	Influence de l'adhésion	104
4.2.3.1	Influence de l'adhésion sur l'espace de planification	105
4.2.3.2	Influence de la présence d'adhésion sur la manipulation	107
4.2.4	Influence de l'effort extérieur	107
4.2.4.1	Influence de l'effort extérieur sur l'espace de planification	107
4.2.4.2	Influence de l'effort extérieur sur la manipulation	109
4.2.5	Influence de la géométrie	109
4.3	Discussions sur les résultats simulés	111
4.4	Résultats expérimentaux	112
4.4.1	Plate-forme expérimentale de manipulation	112
4.4.1.1	Présentation de la plate-forme	112
4.4.1.2	Calibration du dispositif	113
4.4.2	Manipulation d'objets millimétriques	113
4.4.2.1	Objet tridimensionnel	114
4.4.2.2	Objet quelconque planaire	116
4.4.3	Manipulation d'objets micrométriques	119
4.5	Discussion générale des résultats et de la méthode	119
4.6	Conclusion	121
	Conclusion & Perspectives	123
	A Modélisation des effets d'adhésion	127
	B Détection de collisions	131
	C Présentation de l'algorithme A^*	133
	D Trajectoires simulées de micromanipulation	137

TABLE DES FIGURES

1.1	Photographies de robots industriels munis d'un préhenseur simple.	8
1.2	Photographie de mains robotiques dextres (© Shadow Robot Company). . .	9
1.3	Illustration de la manipulation via les champs magnétiques (Femto-ST institute, France [Dkhil et al., 2015]).	12
1.4	Illustration de la manipulation via les faisceaux optiques (Université du Maryland, Etats-Unis [Dawood et al., 2012]).	13
1.5	Illustration de la manipulation via les forces acoustiques (Université d'Aalto, Finlande [Zhou et al., 2016])	14
1.6	Photographies de différentes pinces : a) [Andersen et al., 2008] b) [Beyeler et al., 2007] c) [Hériban et al., 2008] d) [Bütefisch et al., 2002]. . .	15
1.7	Illustration du principe de manipulation par changement de pression (ETHZ, Suisse [Zesch et al., 1997]).	16
1.8	Illustration du principe de manipulation par changement de phase à l'interface doigt-objet (Projet européen Microgrip [Kochan, 1997]).	17
1.9	Illustration de la manipulation par effet dynamique (Université de Soochow, Chine [Chen et al., 2012]).	18
1.10	Illustration de la manipulation utilisant les forces de tension de surface (Univsersité d'Aalto, Finlande [Sariola et al., 2011]).	19
1.11	Illustration de la manipulation par effets électrostatiques (Université technique de Braunschweig, Allemagne [Hesselbach et al., 2001]).	20
1.12	Illustration de la manipulation via les forces de van der Waals (Université de Toronto, Canada [Chu et al., 2012]).	21
1.13	Photographies des systèmes de micromanipulation les plus dextres développés jusqu'à présent. a) Université de Californie, Etats-Unis [Shimada et al.,], b) Université d'Aalto, Finlande [Zhou et al., 2006], c) Institut Polytechnique Rensselaer, Etats-Unis [Wason et al., 2007], d) Université Yamagata, Japon [Inoue et al., 2012], e) Institut de Technologie Stevens, Etats-Unis [Cappelleri et al., 2011].	23
1.14	Photographie de différents préhenseurs macroscopiques.	25
1.15	Illustration de manipulation dextre par roulement (Université de Yale, États-Unis [Odhner et al., 2011])	27
1.16	Illustration de manipulation dextre par glissement.	27
1.17	Illustration de manipulation dextre par pivotement.	28

1.18	Illustration de manipulation dextre par repositionnement.	29
1.19	Représentation du problème d'orientation par Moll [Moll et al., 2002].	32
1.20	Photographie de la séquence d'assemblage telle que planifiée et exécutée dans les travaux de Cappelleri [Cappelleri et al., 2011].	33
2.1	Schématisation du problème de manipulation dextre par une main robotique munie de plusieurs doigts.	42
2.2	Illustration des trois modèles de contact : a) modélisation sans frottement, b) modélisation avec frottement, c) modélisation avec frottement et déformation.	45
2.3	Illustration de l'influence de l'adhésion sur le cône de frottement.	46
2.4	Linéarisation d'un cône de frottement. a) représentation du cône linéarisé à la surface de l'objet, b) représentation du cône dans l'espace des torseurs (seuls trois dimensions (f_x, f_y, m_z) sur six $(f_x, f_y, f_z, m_x, m_y, m_z)$ sont représentées).	48
2.5	Illustration de l'enveloppe convexe représentant l'ensemble des efforts applicables à l'objet dans le cas d'une prise planaire à deux doigts sans adhésion. a) représentation de la prise et des cônes de frottement, b) représentation de l'enveloppe convexe résultante	50
2.6	Illustration de l'enveloppe convexe représentant l'ensemble des efforts applicables à l'objet dans le cas d'une prise planaire à deux doigts sans adhésion. a) représentation de la prise et des cônes de frottement, b) représentation de l'enveloppe convexe résultante sans prise en compte de l'effort tangentiel supplémentaire, c) représentation de l'enveloppe convexe résultante avec prise en compte de l'effort tangentiel supplémentaire	51
2.7	Représentation de l'ensemble $M_{(1,2)}$ (carte d'équilibre) dans le cas d'un cercle sans considérer de perturbations externes ($w_{ext} = 0$) ni de forces d'adhésion ($\forall i, w_{adi} = 0$).	55
2.8	Représentation de l'ensemble $D_{(1,2,3)}$ (carte de reconfiguration) pour une position prédéfinie du doigt retiré et en présence de forces d'adhésion ($\forall i, w_{adi} \neq 0$).	56
2.9	Illustration d'un manipulateur et de certaines collisions internes et externes.	57
2.10	Illustration de la carte d'équilibre $M_{(1,2)}$ lorsque les collisions sont prises en compte.	59
2.11	Illustration des cartes de détachement $D_{(1,2,3)_1}$, $D_{(1,2,3)_2}$ et $D_{(1,2,3)_3}$ lorsque les collisions sont prises en compte.	60
2.12	Illustration des cartes initiales $I_{(1,2)}$, $I_{(1,3)}$ et $I_{(2,3)}$ lorsque les collisions sont prises en compte.	61
2.13	Illustration de diverses strates de la carte d'équilibre $M_{(1,2)}$, obtenue pour des angles de $0^\circ, 33^\circ, 74^\circ$ et 115°	64
2.14	Illustration de la carte d'équilibre $M_{(1,2)}$ complète entre les orientations $\theta = 0^\circ$ et $\theta = 180^\circ$	65

2.15	Illustration de diverses strates de la carte de reconfiguration $D_{(1,2,3)_1}$ pour la position du doigt1 = 10 μ m et les orientations $\theta = 0^\circ$, $\theta = 30^\circ$, $\theta = 60^\circ$ et $\theta = 90^\circ$	66
3.1	Illustration du lien entre rotation de l'objet et déplacement dans l'espace des configurations.	71
3.2	Schématisation des liens entre les différents nœuds du graphe (à partir d'un nœud dans $I_{(1,2,3)}$).	73
3.3	Illustration d'une séquence de prises.	78
3.4	Schématisation du processus menant à la génération de la séquence de prises optimale.	79
3.5	Illustration du processus de déplacement lors du retrait d'un doigt. La trajectoire représentée n'est pas la trajectoire optimale.	80
3.6	Illustration du processus de déplacement lors de l'ajout d'un doigt. La trajectoire représentée n'est pas la trajectoire optimale.	80
3.7	Illustration du processus de déplacement lors du changement de la position de contact d'un doigt. La trajectoire représentée n'est pas la trajectoire optimale.	81
3.8	Illustration du graphe à parcourir lors de la planification de mouvement libre. Chaque intersection représente un nœud du graphe.	82
3.9	Illustration des trajectoires des doigts pour la manipulation d'un carré. La trajectoire du doigt 1 est représentée par la couleur bleue, celle du doigt 2 par la couleur cyan et celle du doigt 3 par la couleur jaune.	83
3.10	Schématisation du processus menant à la génération des trajectoires optimales.	85
3.11	Exemple planaire du calcul des distances entre une force appliquée et les limites du cône de frottement.	87
4.1	Séquence d'images illustrant la saisie et la rotation d'un cylindre par deux doigts. La marque sur l'objet représente l'origine de l'abscisse curviligne	93
4.2	Représentation de la manipulation du cylindre dans l'espace de planification.	94
4.3	Séquence d'images illustrant la saisie et la rotation d'un parallépipède rectangle possédant deux cotés de 48 μ m.	96
4.4	Représentation de la reconfiguration lors de la manipulation du parallépipède rectangle dans l'espace de planification.	97
4.5	Séquence d'images illustrant la saisie et la rotation d'un cylindre par trois doigts.	98
4.6	Séquence d'images illustrant la saisie et la rotation d'un objet quelconque par deux doigts.	100
4.7	Séquence d'images illustrant la manipulation de référence.	102

4.8	Évolution du nombre de prises contenues dans les cartes d'équilibre à deux doigts et dans la carte de reconfiguration du doigt 3 en fonction du coefficient de friction.	103
4.9	Séquence d'images illustrant une rotation de 180° dans le cas d'une friction élevée ($\mu = 1$) entre les doigts et l'objet.	104
4.10	Représentation de la carte d'équilibre $M_{(1,2)}$ (pour l'orientation 0°) avec et sans forces d'adhésion.	105
4.11	Représentation de la carte de reconfiguration $D_{(1,2,3)_3}$ (pour l'orientation 0°) avec et sans forces d'adhésion.	106
4.12	Évolution du nombre de prises contenues dans les cartes d'équilibre à deux doigts et dans la carte de reconfiguration du doigt 3 en fonction de la force d'adhésion.	107
4.13	Séquence d'images illustrant une rotation de 180° lorsque des effets d'adhésion existent entre les doigts et l'objet.	108
4.14	Évolution du nombre de prises stables dans les cartes d'équilibre à deux doigts et dans la carte de reconfiguration du doigt 3 en fonction du poids de l'objet.	108
4.15	Évolution du nombre de prises stables dans les cartes d'équilibre à deux doigts et dans la carte de reconfiguration du doigt 3 en fonction du poids de l'objet et lorsque l'adhésion est présente ($f_{po} = 2.5\mu\text{N}$).	109
4.16	Séquence d'images illustrant une rotation de 180° lorsque des effets d'adhésion existent entre les doigts et l'objet et que le poids de l'objet n'est pas négligé.	110
4.17	Courbe illustrant l'évolution du coût des manipulations en fonction de la complexité de l'objet.	110
4.18	Photographie du prototype expérimental de micro-main à trois doigts. a) vue globale du système de micromanipulation, b) vue de côté d'un objet (200 μm de côté), des doigts (fibre de carbone de 7 μm de diamètre) et des supports triangulaires.	112
4.19	Photographie des objets millimétriques manipulés a) une brique nanoblock TM , b) un objet quelconque planaire.	113
4.20	Séquence d'images illustrant une manipulation d'un objet en présence des effets d'adhésion entre les doigts et l'objet.	114
4.21	Séquence d'images illustrant la manipulation expérimentale d'un objet tridimensionnel en présence d'effets d'adhésion entre les doigts et l'objet.	115
4.22	Graphique représentant l'évolution de la position et de l'orientation de l'objet tridimensionnel au cours de la manipulation expérimental (bleu) par rapport à la trajectoire planifiée (violet).	116
4.23	Séquence d'images illustrant une manipulation d'un objet quelconque en présence d'effets d'adhésion entre les doigts et l'objet.	117
4.24	Séquence d'images illustrant la manipulation expérimentale d'un objet de forme quelconque en présence d'effets d'adhésion entre les doigts et l'objet.	118

4.25	Graphique représentant l'évolution de la position et de l'orientation d'un objet de forme quelconque au cours de la manipulation dans le cas expérimental (bleu) par rapport à la trajectoire planifiée (violet).	118
4.26	Séquence d'images illustrant le retournement d'un cube de silicium réalisée expérimentalement.	120
A.1	Illustration schématique du phénomène de capillarité lors d'un contact entre un doigt manipulateur et un objet.	128
B.1	Représentation hiérarchique d'un segment à l'aide des boites de délimitation orientée.	131
C.1	Représentation d'un graphe utilisable par l'algorithme A^*	135
D.1	Séquence d'images illustrant la saisie et la rotation d'un cylindre par deux doigts. La marque sur l'objet représente l'origine de l'abscisse curviligne	138
D.2	Séquence d'images représentant les trajectoires des doigts utilisées pour réaliser la manipulation illustrée sur la figure D.1.	138
D.3	Représentation de la manipulation du cylindre dans l'espace des configurations.	139
D.4	Séquence d'images illustrant la saisie et la rotation d'un parallépipède rectangle de $48\mu\text{m}$ de coté.	140
D.5	Séquence d'images représentant les trajectoires des doigts utilisées pour réaliser la manipulation illustrée sur la figure D.3.	141
D.6	Représentation de la première rotation de 90° lors de la manipulation du parallépipède rectangle dans l'espace de planification.	143
D.7	Représentation de la reconfiguration lors de la manipulation du parallépipède rectangle dans l'espace de planification.	144
D.8	Représentation de la seconde rotation de 90° lors de la manipulation du parallépipède rectangle dans l'espace de planification.	145
D.9	Séquence d'images illustrant la saisie et la rotation d'un cylindre de $50\mu\text{m}$ de diamètre par trois doigts.	146
D.10	Séquence d'images représentant les trajectoires des doigts utilisées pour réaliser la manipulation illustrée sur la figure D.9.	147
D.11	Représentation de la première rotation de 30° lors de la manipulation du cylindre dans l'espace de planification.	149
D.12	Représentation de la reconfiguration lors de la manipulation du cylindre dans l'espace de planification.	150
D.13	Représentation de la seconde rotation de 210° lors de la manipulation du cylindre dans l'espace de planification.	151
D.14	Séquence d'images illustrant la saisie et la rotation d'un objet de forme quelconque par trois doigts.	152

D.15 Séquence d'images représentant les trajectoires des doigts utilisées pour réaliser la manipulation illustrée sur la Fig. D.13.	153
D.16 Représentation de la première rotation de 100° lors de la manipulation d'un objet de forme quelconque dans l'espace de planification.	154
D.17 Représentation de la reconfiguration lors de la manipulation d'un objet de forme quelconque dans l'espace de planification.	155
D.18 Représentation de la seconde rotation de 100° lors de la manipulation d'un objet de forme quelconque dans l'espace de planification.	156

LISTE DES TABLES

1.1	Vue d'ensemble du niveau de dextérité en micromanipulation.	24
3.1	Tableau de synthèse des différents coûts utilisés pour l'exploration du graphe de manipulation dextre.	76
C.1	Tableau détaillant le parcours de graphe par l'algorithme A^* sur le graphe représenté en Fig. C.1	136

LISTE DES PUBLICATIONS

La liste ci dessous énumère toutes les publications scientifiques qui ont été réalisées au cours de cette thèse.

PUBLICATIONS EN LIEN AVEC LA THÈSE

– Publiées

– Article dans des journaux internationaux

1. J.-A. Seon, R. Dahmouche and M. Gauthier, “*On the contribution of adhesion and friction in planning dexterous in-hand micromanipulation*,” *Journal of Micro-Bio Robotics*, disponible en ligne, 2017,
2. B. Brazey, R. Dahmouche, J.-A. Seon and M. Gauthier, “*Experimental validation of in-hand planar orientation and translation in microscale*,” *Intelligent Service Robotics*, vol. 9, n° 2, pp. 101-112, 2015,

– Article dans des conférences à comité de lecture

1. J.-A. Seon, R. Dahmouche and M. Gauthier, “*Planning Trajectories for Dexterous in-Hand Micro-Manipulation using Adhesion Forces*,” *IEEE International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales*, 2016,
2. J.-A. Seon, R. Dahmouche, B. Brazey and M. Gauthier, “*Finger Trajectory Generation for Planar Dexterous Micro-Manipulation*,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2016,

– Non publiées

– Article dans des journaux internationaux

1. J.-A. Seon, R. Dahmouche and M. Gauthier, “*Enhancing Dexterous Micro-Manipulation Strategies by Exploiting Adhesion Forces*,” *IEEE Transaction on Robotics*, 2017, soumis
2. J. Bafumba Liseli, J.-A. Seon, R. Dahmouche and M. Gauthier, “*Fast Trajectory Planning for Dexterous in-Hand Micro-Manipulation*,” *Robotics and Autonomous Systems*, 2017, en cours d’écriture

AUTRES PUBLICATIONS AU COURS DE LA THÈSE

– Publications en lien avec le stage de master

1. J.-A. Seon, B. Tamadazte and N. Andreff, “*Decoupling Path Following and Velocity Profile in Vision-guided Laser Steering*,” *IEEE Transaction on Robotics*, vol. 31, n° 2, pp. 280-289, 2015,

2. J.-A. Seon, B. Tamadazte and N. Andreff, "*Path following : from mobile robotics to laser surgery*," *ViCoMor - 3rd Workshop on Visual Control of Mobile Robots - In conjunction with IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2014.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les systèmes fabriqués aujourd'hui nécessitent de plus en plus de fonctionnalités dans des volumes de plus en plus réduits. Cette miniaturisation, qui offre de nouveaux défis pour les scientifiques comme pour les industriels, s'applique à une très grande variété de produits allant des ordinateurs et téléphones portables aux dispositifs médicaux et aux outils de chirurgie. Les systèmes miniaturisés présentent l'avantage de fournir des performances améliorées, une réduction de la consommation énergétique ainsi qu'un coût de fabrication faible du fait de leur fabrication par lots. L'intérêt de cette miniaturisation a permis l'émergence de nouveaux types de produits tels que les MEMS¹ ou les MOEMS². Économiquement parlant, ces micro-systèmes représentent un marché en forte croissance qui est estimé à près de 25 milliards de dollars à l'horizon 2020.

Actuellement, les micro-systèmes sont limités à des structures planaires essentiellement en raison des techniques de micro-fabrication et de manipulation. Cependant, les besoins de fonctionnalités et de miniaturisation nécessitent d'étendre progressivement les micro-systèmes à des structures tridimensionnelles. Une voie pour obtenir ses structures tridimensionnelles consistent à passer par des étapes d'assemblage. Il est alors nécessaire de réaliser des assemblages de composants dont la taille est comprise entre $1\mu\text{m}$ et 1mm . Or, l'assemblage de composants de taille micrométrique demeure une étape mal contrôlée et très limitée. En effet, la majorité des opérations de manipulation de micro-composants est encore limitée à des opérations de prise-dépose réalisées manuellement à l'aide de pinces brucelles. Ces limitations s'expliquent, d'une part, par les contraintes technologiques qui ne permettent pas de reproduire les structures robotiques existantes à l'échelle humaine avec une précision et une répétabilité acceptables pour des opérations de micro-assemblage et, d'autre part, en raison des comportements physiques observables aux petites échelles. Plus précisément, sous la barre du millimètre, les forces liées au volume des objets, telles que l'inertie ou le poids, ne sont plus prépondérantes et les forces liées aux surfaces, telles que les forces de van der Waals, deviennent non négligeables. De ce fait, le paradigme de la manipulation change radicalement puisque des effets d'adhésion apparaissent entre le préhenseur et l'objet. Du fait de ces phénomènes, considérés comme des sources de perturbations, les stratégies de manipulation généralement réalisées à l'échelle de l'Homme ne sont plus opérantes aux échelles micrométriques.

Les opérations de micro-assemblage soulèvent donc plusieurs défis : la compréhension et la prise en compte des phénomènes physiques visibles à l'échelle micrométrique, la prise en compte des particularités technologiques de l'échelle considérée dans la conception des systèmes d'assemblages, la réalisation d'opérations de manipulations complexes incluant des rotations et des translations et enfin l'automatisation des tâches d'assemblage. Les travaux développés au cours de cette thèse s'inscrivent donc dans ce contexte.

1. Micro-Systèmes Electro-Mécanique ou en anglais Micro-Electro-Mechanical Systems

2. Micro-Systèmes Opto-Electro-Mécanique ou en anglais Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems

Cette thèse, financée par la région Bourgogne Franche-Comté, a été réalisée au sein du département AS2M (Automatique des Systèmes Micro-Mécatroniques) de l'institut FEMTO-ST³ dont les thématiques de recherche incluent, entre autres, la commande avancée, la micro-mécatronique, la micro-robotique et la micromanipulation.

L'objectif de ces travaux de thèse est de proposer des stratégies de micromanipulation permettant de réaliser des opérations de manipulation dextre planaire de manière automatique. Pour ce faire, un planificateur de trajectoires pour les doigts d'une micro-main a été développé. Ce planificateur prend en compte les caractéristiques physiques de l'échelle micrométrique et permet d'obtenir des trajectoires de manipulation adaptées à la manipulation de micro-composants. Des opérations de micromanipulations, validant les trajectoires générées et l'approche proposée, ont également été réalisées. Ce manuscrit se décompose en quatre chapitres pouvant être résumés comme suit.

Le chapitre 1 présente les spécificités de la micromanipulation et de l'échelle micrométrique en comparaison avec l'échelle de l'Homme. Les différentes techniques de micromanipulation développées jusqu'à présent sont également passées en revue afin de comprendre les limitations technologiques mais également afin d'identifier une approche adaptée à la réalisation de micro-assemblages. Ce chapitre présente également les techniques de manipulation dextre développées à l'échelle macrométrique afin d'analyser dans quelle mesure elles peuvent venir enrichir les techniques de micromanipulation. Enfin, le degré d'automatisation et de dextérité des robots (aussi bien micrométrique que macrométrique) est discuté afin d'identifier les limites des systèmes actuels.

Le chapitre 2 s'intéresse à la formalisation du problème qu'est la génération automatique des déplacements des doigts lors d'une opération de micromanipulation dextre. Ce chapitre met en avant les différences entre manipulation dextre et micromanipulation dextre et l'impact de ces différences sur la formalisation du problème. La formalisation originale proposée se base sur l'utilisation d'un modèle de contact et de frottement prenant en compte les phénomènes physiques observables à l'échelle micrométrique. Enfin, à l'aide de ce formalisme, un espace adapté à la planification des déplacements des doigts dans le cas de la micromanipulation dextre est proposé. Le processus de génération de cet espace ainsi que sa représentation sont illustrés au cours de ce chapitre.

Le chapitre 3 présente la méthode de planification de trajectoires mise en œuvre sur l'espace explicité dans le chapitre 2. La méthode proposée permet de planifier n'importe quel mouvement d'un objet dans le plan quelle que soit la forme de l'objet. Le processus de génération de trajectoires se base sur l'exploration de graphes construits à l'aide des contraintes propres à la micromanipulation et mises en avant au chapitre 1. Ce processus se décompose en trois étapes successives. La première consiste à générer une séquence de prises représentant l'opération de micromanipulation dextre. La seconde étape permet de générer les déplacements des doigts pour relier ces différentes prises. Finalement, la dernière étape est utilisée pour calculer et optimiser les forces exercées par les doigts durant la micromanipulation.

Le chapitre 4 valide et analyse les trajectoires générées à l'aide de la méthode originale présentée dans le chapitre 3. Différents paramètres, en particulier les effets d'adhésion, le coefficient de friction et les efforts extérieurs, sont analysés afin de comprendre leurs impacts sur les trajectoires générées. L'étude des effets d'adhésion permet également de mettre en avant leurs influences sur le paradigme de la manipulation. Enfin, les trajec-

3. Franche-Comté Électronique, Mécanique, Thermique et Optique - Sciences et Technologies, UMR CNRS, UFC, ENSMM, UTBM

toires planifiées sont validées expérimentalement à l'échelle millimétrique et à l'échelle micrométrique. Les limites de l'approche sont également discutées au cours de ce chapitre.

Pour terminer ce manuscrit, une conclusion générale synthétisant les contributions scientifiques développées au cours de ces travaux ainsi que diverses perspectives, incluant aussi bien des axes de recherche que des applications industrielles possibles, sont présentées.

Sommaire

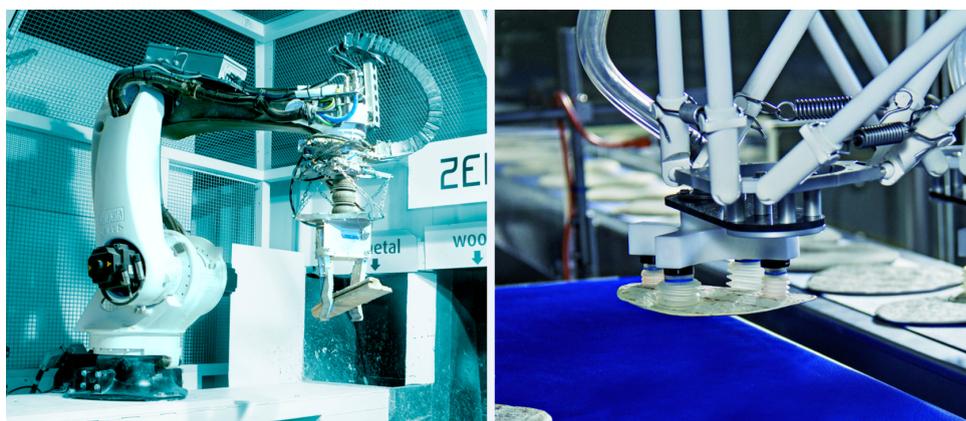
1.1 Introduction	8
1.2 La manipulation robotique à l'échelle micrométrique	10
1.2.1 Le micro-monde	10
1.2.2 La manipulation sans contact	11
1.2.2.1 La manipulation magnétique	11
1.2.2.2 La manipulation à l'aide de principes électriques	12
1.2.2.3 La manipulation optique	12
1.2.2.4 La manipulation acoustique	13
1.2.3 La manipulation avec contact	14
1.2.3.1 Les méthodes pour vaincre les effets d'adhésion	15
1.2.3.2 Les méthodes qui utilisent les effets d'adhésion	18
1.2.4 Quelle stratégie pour le micro-assemblage ?	21
1.3 La manipulation robotique à l'échelle macroscopique	25
1.3.1 Les préhenseurs macroscopiques	25
1.3.2 Techniques de manipulation	26
1.3.2.1 Le roulement	26
1.3.2.2 Le glissement	27
1.3.2.3 Le pivotement	28
1.3.2.4 Le repositionnement	28
1.3.2.5 Quelle stratégie pour la micromanipulation dextre ?	29
1.4 Vers la micromanipulation dextre	29
1.5 L'automatisation en manipulation robotique	30
1.5.1 L'automatisation en micromanipulation	30
1.5.1.1 Les méthodes de planification	30
1.5.1.2 Les méthodes de commande	34
1.5.1.3 Synthèse	35
1.5.2 L'automatisation en macro-manipulation dextre	36
1.5.2.1 Planification de la saisie	36
1.5.2.2 Planification de la manipulation dextre	37
1.5.2.3 Synthèse	38
1.6 Conclusion	39

Ce chapitre propose une vision unifiée de la manipulation robotique aussi bien à l'échelle micrométrique que macrométrique. La présentation des différentes techniques de manipulation ainsi que leurs analyses par le prisme des enjeux relatifs à chacune des échelles va permettre d'identifier une manière adaptée de réaliser des tâches de micro-assemblage. Enfin, le degré d'automatisation et de dextérité des robots actuels sera discuté afin de comprendre les limites des systèmes développés jusqu'à présent.

1.1/ INTRODUCTION

La manipulation robotique consiste à saisir, déplacer, positionner et reposer un objet à l'aide d'un robot. Quelle que soit l'échelle de l'objet manipulé, deux grandes approches sont retenues. D'un côté, celle consistant à utiliser un préhenseur simple fixé sur un robot porteur possédant de nombreux degrés de liberté. De l'autre, celle consistant en un préhenseur dextre monté sur un robot plus sommaire.

Préhenseur simple L'architecture composée d'un préhenseur simple (typiquement une pince à deux doigts de serrage ou une ventouse) monté sur un robot à plusieurs degrés de libertés est la plus répandue actuellement dans l'industrie. Le robot porteur est généralement constitué soit d'un bras robotique (Fig.1.1a) soit d'un robot parallèle (Fig.1.1b). Dans cette approche, l'organe terminal fournit uniquement une fonction de préhension. En effet, contrairement aux préhenseurs dextres, concentrer le préhenseur sur une unique fonction va permettre de minimiser sa complexité tout en maximisant son efficacité à la tâche demandée [Wright et al., 1989]. Toutefois, cette approche réduit sensiblement la polyvalence du manipulateur puisque il est fréquemment nécessaire de changer de préhenseur lorsque la forme de l'objet à manipuler est modifiée. De même, les capacités de manipulation sont très vite restreintes au niveau des limites articulaires et des singularités du robot porteur [Tournassoud et al., 1987]. Cette vision de la manipulation est donc adaptée à des tâches répétées à l'identique en grand nombre ce qui est le cas sur les grandes chaînes de production (par exemple les chaînes de conditionnement).



a) Robot industriel de tri des déchets

b) Robot industriel de packaging

FIGURE 1.1 – Photographies de robots industriels munis d'un préhenseur simple.

Préhenseur dextre Contrairement à l'architecture précédente, la seconde approche repose sur des préhenseurs dextres, c'est-à-dire un organe terminal composé de plusieurs doigts capables de réaliser des mouvements dans l'espace de travail du préhenseur (Fig.1.2) [Kochan, 2005]. Grâce à cet ajout de dextérité, le manipulateur dispose d'une meilleure maniabilité au niveau des obstacles et des singularités de la structure porteuse [Okamura et al., 2000]. De plus ce type de préhenseur est polyvalent puisque il n'est pas conçu pour saisir un objet spécifique [Ma et al., 2011]. Cependant, contrôler et planifier les déplacements de ce type de préhenseurs est plus difficile. En effet, les préhenseurs dextres disposent de doigts à plusieurs degrés de liberté et sont donc plus complexes à commander [Bicchi, 2000]. De même, pour réaliser des rotations à l'aide du préhenseur, il est nécessaire de déterminer les placements et les mouvements des doigts ce qui complexifie la planification de mouvements en raison du caractère non-holonyme du roulement en trois dimensions [Bicchi et al., 2002]. Industriellement, ce type de manipulateur est donc adapté pour des manipulations complexes et/ou variables pour des petites ou moyennes séries qui ne justifient pas l'emploi d'un robot spécifique. De même, cette approche permet à l'Homme de réaliser des opérations de manipulation dans des milieux auxquels il n'a pas accès (comme par exemple les fond marins, les zones radioactives, le micro-monde ou encore l'espace [Lovchik et al., 1999]). Enfin, il est à noter que ce type de système est également pertinent dans le cas des "robots compagnons" qui ont vocation à assister l'homme au quotidien.



FIGURE 1.2 – Photographie de mains robotiques dextres (© Shadow Robot Company).

Différentes échelles De manière évidente, la manipulation à l'échelle de l'homme ne présente pas les mêmes contraintes que la micromanipulation¹. D'un côté, la manipulation peut s'inspirer des manipulations opérées par la main humaine (approche anthropomorphe), de l'autre côté, des solutions originales doivent être trouvées sans comparaison possible avec l'Homme. De même, à l'échelle macrométrique, la conception de robots manipulateurs (aussi bien à préhenseur simple que dextre) repose sur un savoir-faire suffisamment développé permettant de réaliser des robots précis et capables de manipuler selon différentes directions et orientations. À l'inverse, à l'échelle micrométrique,

1. Manipulation d'objets dont la taille caractéristique est comprise entre $1\mu\text{m}$ et 1mm .

la conception de manipulateurs à plusieurs degrés de liberté est plus récente et reste difficile et limitée. Ainsi, les enjeux ne sont pas similaires entre les deux échelles. L'objectif de ce chapitre est alors de présenter les différentes manières de réaliser des tâches de manipulation en fonction de l'échelle de l'objet. Cet état de l'art permettra d'explicitier les freins au développement du micro-assemblage ainsi que les voies de recherche possibles afin de dépasser ces limitations.

1.2/ LA MANIPULATION ROBOTIQUE À L'ÉCHELLE MICROMÉTRIQUE

1.2.1/ LE MICRO-MONDE

Description du micro-monde Le micro-monde regroupe l'ensemble des objets dotés d'une taille comprise entre un micromètre et un millimètre. Cet ensemble, qui s'étale sur trois ordres de grandeur, est sensiblement différent du monde dans lequel nous évoluons. Bien que les lois physiques qui gouvernent ces deux mondes soient identiques, les comportements observés sont radicalement différents [Trimmer, 1989]. En effet, à l'échelle macrométrique, lorsque un objet est lâché, ce dernier va inévitablement tomber au sol. A l'inverse, à l'échelle micrométrique, l'objet peut rester en contact avec le préhenseur [Fearing, 1995] [Arai et al., 1995]. Ce changement de comportement est dû aux effets d'échelle. Pour illustrer ceci, il est intéressant d'observer l'évolution de la surface et du volume d'une sphère en fonction de son rayon. Si la sphère dispose d'un rayon de $1m$ alors sa surface est de $12.56m^2$ et son volume de $4.18m^3$. Lorsque son rayon est réduit à $1mm$ alors son volume est un milliard de fois plus petit tandis que sa surface est "seulement" un million de fois plus petite. Or, quelle que soit l'échelle, il existe des phénomènes liés aux surfaces tout comme des phénomènes liés aux volumes. La dimension de l'objet va alors influencer sur les phénomènes qui seront prépondérants. A l'échelle macrométrique, ce sont les effets volumiques qui prédominent et c'est pourquoi l'objet tombe du fait de la gravité lorsqu'il est lâché. A l'échelle micrométrique, les effets surfaciques deviennent non négligeables. Le micro-monde se situe ainsi à l'intersection des zones d'influences des forces surfaciques et volumiques et il est possible d'observer différents comportements.

Lorsque les effets surfaciques sont prédominants, deux phénomènes deviennent visibles. Premièrement, le poids et l'inertie de l'objet sont négligeables ce qui permet de concevoir des manipulateurs dotés d'une très grande dynamique. Deuxièmement, les effets surfaciques génèrent des effets d'adhésion entre les différents objets [Lai et al., 2008] ce qui permet aux objets de "coller" entre eux. Ces effets d'adhésion sont majoritairement engendrés par trois familles de forces [Israelachvili, 2011] :

- **van der Waals** : Ces forces sont issues des interactions électriques de faibles intensités entre les molécules des différents objets,
- **Capillarité** : Ces forces résultent de la présence d'un film liquide à la surface des objets,
- **Électrostatique** : Ces dernières forces sont générées par des particules chargées à la surface des objets.

Ces phénomènes changent donc fondamentalement le paradigme de la manipulation et, avec lui, les manipulateurs et les manières de manipuler. Pour mettre au point des manipulateurs et des techniques de micromanipulation adaptées au micro-monde, il est utile de comprendre ces effets d'adhésion. Il est important de noter qu'une modélisation

complète est complexe. En effet, certains paramètres sont difficiles à quantifier (comme par exemple la répartition des particules chargées sur une surface [Schein, 2007]). L'utilisation de modèles simples permet, toutefois, d'obtenir un ordre de grandeur des interactions présentes dans le micro-monde pour développer des manipulateurs adaptés. Des modèles expliquant le comportement des effets d'adhésion sont proposés en Annexe 1 et ne seront pas développés dans le corps de ce chapitre.

Problématiques Les phénomènes d'adhésion soulèvent plusieurs problématiques directement liées à la manipulation [Arai et al., 1997] [Arai et al., 1996]. En effet, lorsque ces phénomènes sont visibles, l'objet et le préhenseur subissent les effets d'adhésion. Ceci peut être vu comme un avantage puisque il est alors possible de tenir un objet à l'aide d'un seul doigt. Mais, cela peut être également vu comme un inconvénient car relâcher l'objet en desserrant simplement la prise n'est plus possible. Pour pouvoir réaliser des opérations de micromanipulation il est donc nécessaire de répondre aux questions suivantes :

- **Saisir** : Comment faire pour saisir l'objet sachant qu'il existe des effets d'adhésion entre l'objet et le support ?
- **Manipuler** : Comment manipuler l'objet sachant qu'il existe des effets d'adhésion entre les doigts et l'objet et que l'inertie est négligeable ?
- **Déposer** : Comment déposer/assembler un objet sachant qu'il existe des effets d'adhésion entre le préhenseurs et l'objet ?

Comme ces problématiques n'existent pas à l'échelle macrométrique, il est nécessaire de mettre au point des techniques de manipulation, spécifiquement adaptées au micro monde et à la micromanipulation, différentes des solutions proposées à l'échelle macroscopique.

1.2.2/ LA MANIPULATION SANS CONTACT

Les effets d'adhésion sont souvent considérés comme une force perturbatrice en particulier lors des phases de lâcher. Or, cette phase est considérée par une majorité de la communauté micro-roboticienne comme l'étape la plus importante de la micromanipulation. De ce fait, l'adhésion est perçue comme un phénomène qui doit être surmonté. Partant de ce postulat, de nombreux travaux ont cherché à manipuler l'objet sans le toucher pour, justement, supprimer la problématique du lâcher. Cette approche de la micromanipulation peut être réalisée selon différentes méthodes : manipulation magnétique, électrique, optique ou encore acoustique.

1.2.2.1/ LA MANIPULATION MAGNÉTIQUE

Cette stratégie de manipulation repose sur l'utilisation d'un champ magnétique généré à l'aide d'aimants, d'électroaimants ou de bobines comme illustré sur la Fig.1.3. L'effort magnétique ainsi appliqué par le champ va permettre de déplacer l'objet dans l'espace de travail des aimants [Bouchebout et al., 2012]. Cette approche peut être employée dans un milieu ambiant [Shameli et al., 2008], liquide [Gosse et al., 2002] ou à l'interface entre les deux [Dkhil et al., 2015]. Ce type de manipulation permet d'exercer les efforts les

plus importants (compris entre le micronewton et le nanonewton) sur l'objet par rapport aux autres méthodes de manipulation sans contact. La manipulation magnétique permet de contrôler les déplacements d'un objet avec précision et vitesse. Il est à noter que les micro-robots les plus rapides sont déplacés à l'aide de ce mode d'actionnement [Ivan et al., 2013]. Certains travaux ambitieux imaginent se servir de ce type de manipulation pour contrôler de multiples micro-robots directement dans le corps humain [Yesin et al., 2005] [Martel et al., 2009]. Toutefois, cette stratégie n'est applicable qu'à des objets sensibles aux champs magnétiques.

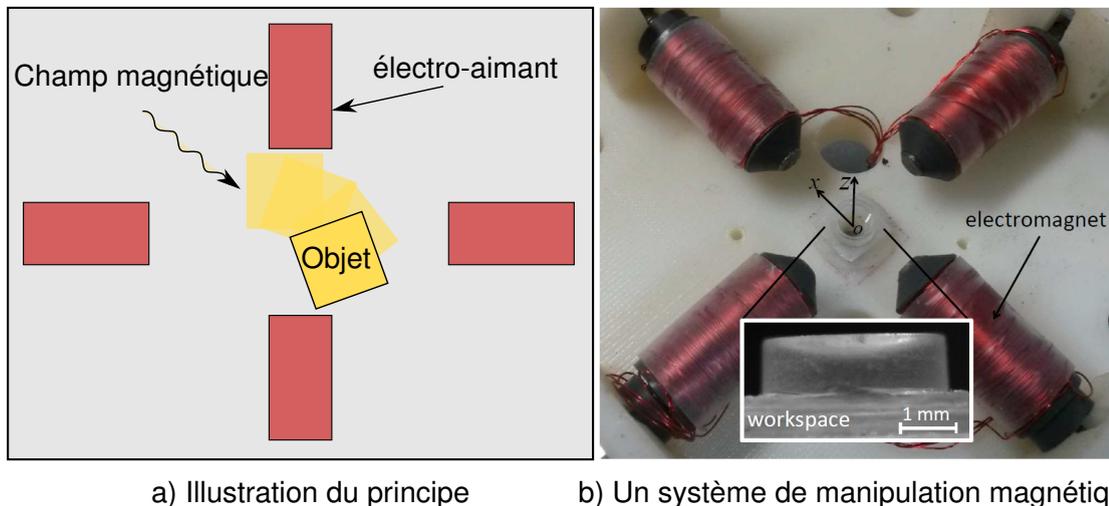


FIGURE 1.3 – Illustration de la manipulation via les champs magnétiques (Femto-ST institute, France [Dkhil et al., 2015]).

1.2.2.2/ LA MANIPULATION À L'AIDE DE PRINCIPES ÉLECTRIQUES

De manière similaire à la manipulation par champ magnétique, il est possible de manipuler des objets à l'aide de champs électriques. Suivant le type de signaux électriques utilisés on parle d'électrophorèse ou de diélectrophorèse [Kharboutly et al., 2009]. Cette méthode est principalement utilisée lors de la manipulation d'objets biologiques [Frenea et al., 2003] [Nikolic-Jaric et al., 2013]. Tous les objets étant soit conducteurs soit diélectriques, cette méthode peut être employée pour manipuler n'importe quel type d'objets. Elle présente néanmoins un inconvénient qui est caractérisé par des forces exercées plus faibles (typiquement de l'ordre du nanonewton) que dans le cas de la manipulation magnétique.

1.2.2.3/ LA MANIPULATION OPTIQUE

Une autre manière de manipuler sans toucher l'objet consiste à utiliser des faisceaux optiques (Fig.1.4). En effet, la pression lumineuse exercée par un faisceau lumineux focalisé permet de piéger l'objet et ainsi de le manipuler [Grier, 2003]. Les premiers travaux réalisés en ce sens sont ceux de Ashkin [Ashkin et al., 1986] dans lesquels il manipule des particules comprises entre 25nm et 10 μ m à l'aide d'un seul faisceau. Par la suite de nombreux travaux se sont intéressés à cette technique de manipu-

lution en utilisant plusieurs faisceaux [Malagnino et al., 2002] ou pour manipuler plusieurs objets simultanément [Curtis et al., 2002]. L'utilisation de plusieurs faisceaux permet de reproduire un système de manipulation avec contact [Chowdhury et al., 2012] sans toutefois subir les inconvénients liés à l'adhésion. C'est pourquoi il est courant de voir l'appellation de "pince optique" utilisée pour qualifier cette méthode. En revanche cette approche ne permet pas d'exercer des forces très importantes puisque, au mieux, elles ne dépassent pas quelques nanonewtons. La manipulation optique est donc particulièrement adaptée à la manipulation de cellules [Zhong et al., 2013] ou de très petites particules [Dawood et al., 2012] mais est inapplicable pour des tâches de micro-assemblage.

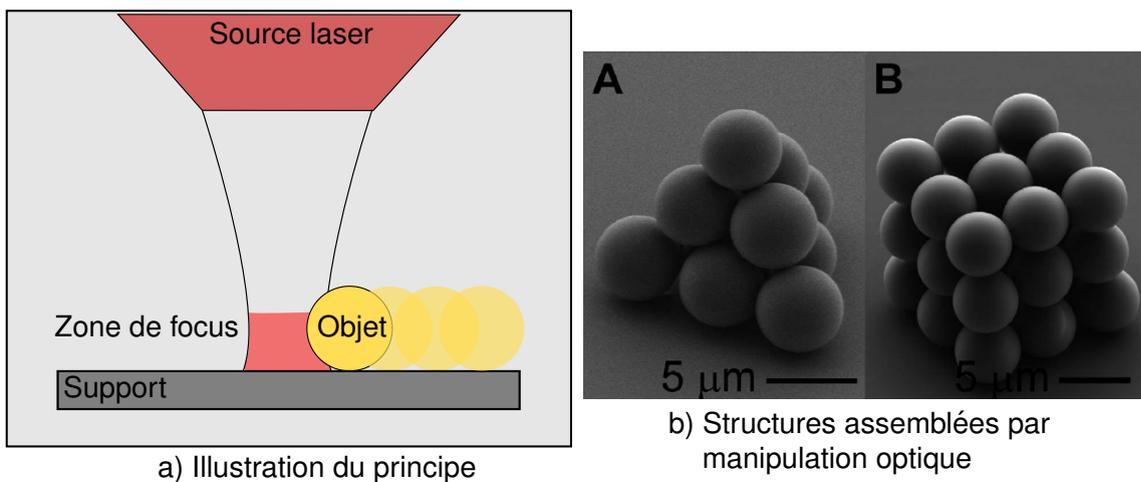


FIGURE 1.4 – Illustration de la manipulation via les faisceaux optiques (Université du Maryland, Etats-Unis [Dawood et al., 2012]).

1.2.2.4/ LA MANIPULATION ACOUSTIQUE

La dernière grande catégorie de manipulation sans contact consiste à exploiter les forces acoustiques. En effet, à l'aide d'ondes acoustiques, il est possible d'appliquer des forces sur l'objet pour le faire léviter et ainsi le manipuler [Zhou et al., 2016] (Fig.1.5). Deux configurations sont possibles dans le cas de la manipulation acoustique : la manipulation par onde stationnaire et la manipulation par champ proche. Dans le premier cas, la manipulation se fait grâce à une onde stationnaire générée entre une source et un réflecteur. Cette onde permet, à certaines distances, d'exercer des forces suffisantes pour compenser le poids de l'objet [Reinhart et al., 2000]. Dans le second cas, l'onde est générée entre l'objet et la source ce qui permet de générer des forces importantes de répulsion tant que la distance entre la source et l'objet est petite. Cette approche est souvent utilisée à une échelle plus grande pour déplacer les wafers utilisés lors des micro-fabrications en salle blanche [Reinhart et al., 2000] [Ueha et al., 2000]. Le principal inconvénient de cette approche est qu'elle n'est pas adaptée à toutes les formes d'objet. De plus, de manière évidente, les tâches d'assemblages ne semblent pas réalisables avec cette méthode.

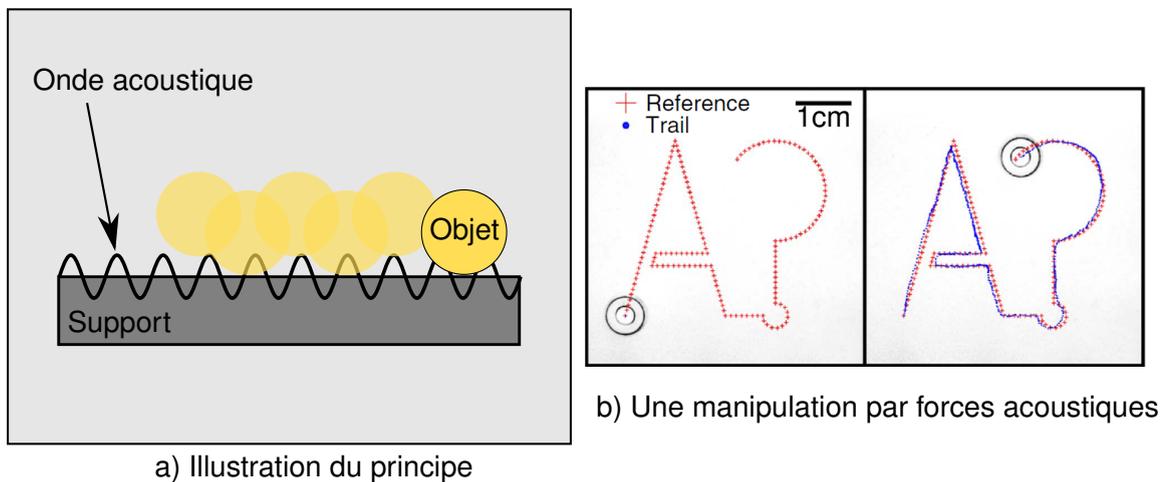


FIGURE 1.5 – Illustration de la manipulation via les forces acoustiques (Université d'Aalto, Finlande [Zhou et al., 2016])

1.2.3/ LA MANIPULATION AVEC CONTACT

Une autre manière de manipuler des micro-objets consiste à venir le manipuler en le touchant. Historiquement cette technique de manipulation est la première à avoir été développée. L'idée est de miniaturiser les préhenseurs robotiques existants à l'échelle macroscopique (en particulier les pinces à doigts de serrage). Initialement, l'une des principales préoccupations de la communauté micro-roboticienne était de disposer de méthodes d'actionnement fiables et répétables. De ce fait, de nombreux travaux se sont principalement orientés sur le développement d'actionneurs adaptés à la micromanipulation. Ainsi le large spectre des méthodes d'actionnement envisagées pour la micromanipulation inclus, entre autre, les actionneurs électrothermiques [Andersen et al., 2008] [Duc et al., 2007] [Mayyas et al., 2007], piézoélectriques [Agnus et al., 2003] [Menciassi et al., 2003] [Zhou et al., 2005] [Hériban et al., 2008] [Haddab et al., 2000], pneumatiques [Bütefish et al., 2002] [Schlick et al., 2001] ou encore électrostatiques [Beyeler et al., 2007] [Mita et al., 2003] [Sun et al., 2002] [Boudaoud et al., 2013]. Cependant, dans ces travaux, le préhenseur réalisé était composé d'un ou deux doigts actionnés et aucune technique de manipulation optimisée pour la micromanipulation n'était proposée (voir la Fig.1.6 pour divers exemples de micro-pinces).

Par ailleurs, des méthodes permettant d'améliorer la répétabilité des opérations de prise-dépose ont été développées. Ces méthodes peuvent être scindées en deux catégories : d'un côté les méthodes visant à contrer les forces d'adhésion afin de retomber dans le cas de manipulation à l'échelle de l'Homme, et de l'autre les méthodes qui cherchent à exploiter les propriétés spécifiques du micro monde.

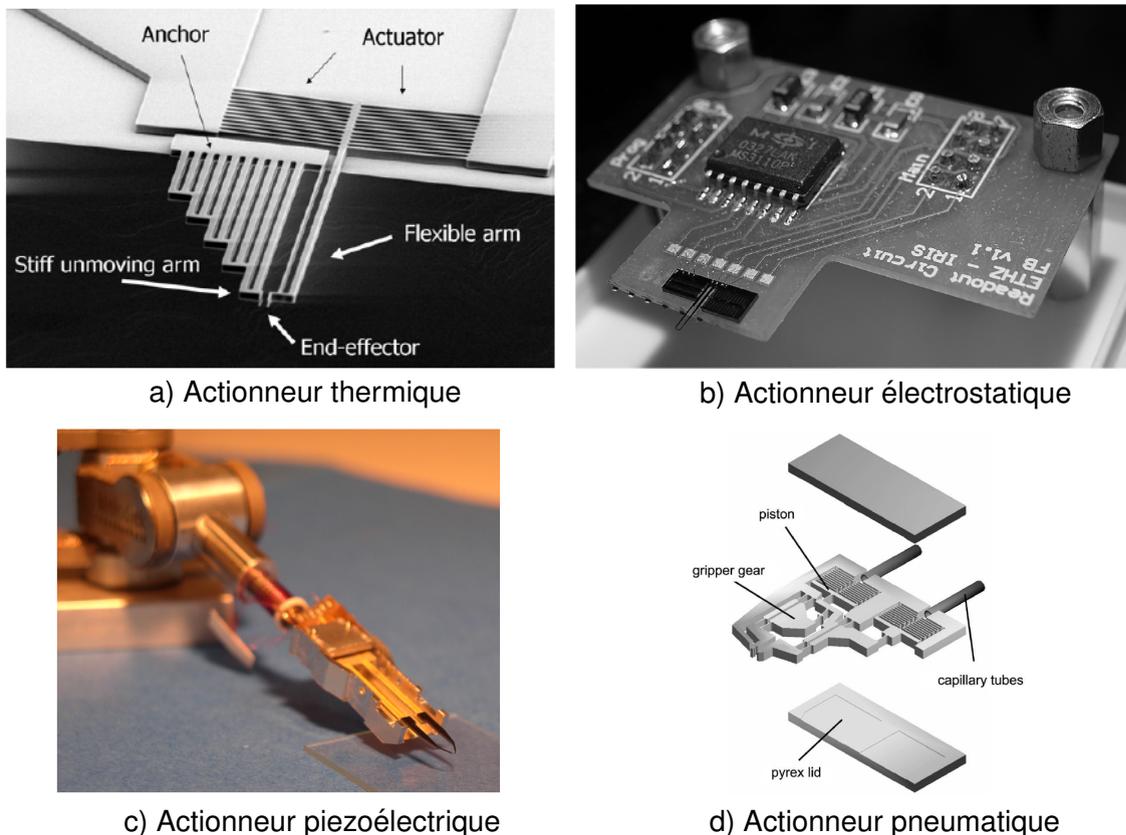


FIGURE 1.6 – Photographies de différentes pinces : a) [Andersen et al., 2008] b) [Beyeler et al., 2007] c) [Hériban et al., 2008] d) [Bütefish et al., 2002].

1.2.3.1/ LES MÉTHODES POUR VAINCRE LES EFFETS D'ADHÉSION

Contre les effets d'adhésion peut être réalisé de deux manières : soit en exerçant une force supérieure soit en réduisant les forces d'adhésion. La première catégorie regroupe les méthodes basées sur les dépressions ou le changement de phase à l'interface objet-doigt. Tandis que la deuxième catégorie regroupe les méthodes qui permettent de contrôler les facteurs environnementaux et/ou de surface ainsi que l'utilisation des effets dynamiques.

Dépression La manipulation par dépression, dont le principe est illustré sur la Fig.1.7a, consiste à utiliser une force de succion afin de saisir l'objet. Cette force doit permettre de vaincre les effets d'adhésion entre le sol et l'objet. L'un des premiers systèmes de micromanipulation utilisant les changements de pression a été réalisé par Zesch [Zesch et al., 1997]. Dans ses travaux, Zesch présente un préhenseur composé d'une micropipette en verre et d'un système de mise sous vide contrôlé par ordinateur. Avec ce système, des micro-diamants d'une taille supérieure à $100\mu\text{m}$ ont pu être saisis. Toutefois l'inconvénient majeur de ce type de manipulation réside dans la phase de dépose des composants. En effet, appliquer une force de pression dans le sens opposé ne permet pas de déposer l'objet de manière précise. Pour effectuer un positionnement précis, un outil supplémentaire doit être utilisé. Dans le cas des travaux de

Zesch un doigt supplémentaire est utilisé pour venir pousser l'objet afin de le relâcher (Fig.1.7b). Cette méthode de manipulation par micropipette a également été étudiée par Vikramaditya [Vikramaditya et al., 2001], Petrovic [Petrovic et al., 2002] et Guoliang [Guoliang et al., 2004] et est généralement utilisée pour manipuler des objets biologiques. Ces préhenseurs appartiennent à la catégorie des préhenseurs simples puisque seule la fonction de saisie peut être réalisée.

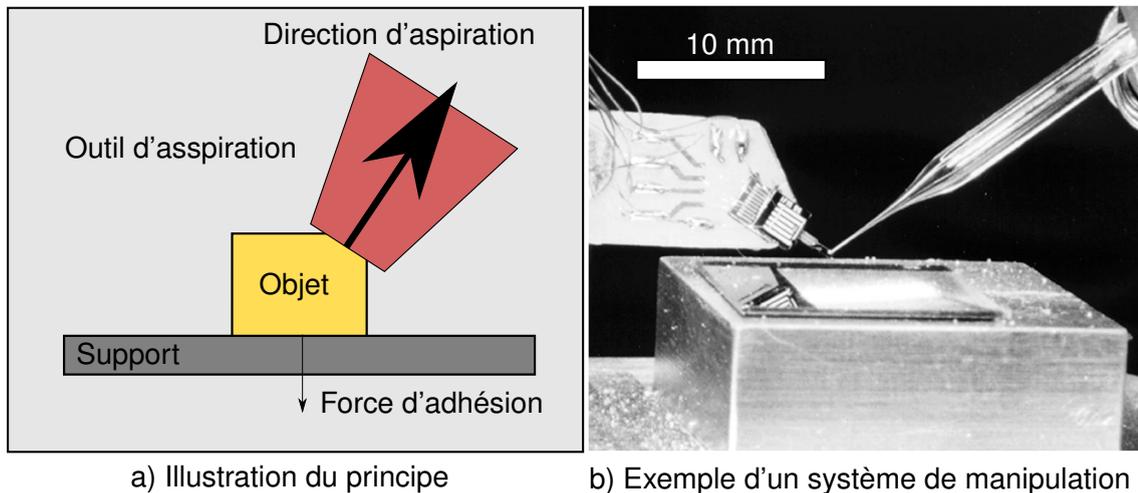


FIGURE 1.7 – Illustration du principe de manipulation par changement de pression (ETHZ, Suisse [Zesch et al., 1997]).

Une autre approche de la manipulation par changement de pression a été présentée par Arai [Arai et al., 1997]. Dans ce système, l'outil est un doigt de préhenseur classique dans lequel des micro-trous ont été réalisés. A l'aide d'un système permettant de contrôler la température du doigt, la pression à l'intérieur des micro-trous peut être contrôlée. De cette façon, avant de saisir l'objet, le doigt est chauffé afin d'expulser l'air des trous. Puis, une fois en contact avec l'objet, le doigt est refroidi et la pression générée par ce changement permet de saisir l'objet. Bien qu'élégante, cette méthode présente l'inconvénient majeur d'être très dépendante des "fuites d'air" qui peuvent survenir si les trous ne sont pas recouverts entièrement. De même, les variations de température affectent la qualité des résultats.

Changement de phase Exercer des forces supérieures aux forces d'adhésion est également possible en contrôlant l'interface entre le doigt manipulateur et l'objet. Cette opération s'effectue en général grâce à la solidification d'une fine couche de liquide autour du préhenseur (voir Fig.1.8). De cette manière, l'objet et le manipulateur sont reliés l'un à l'autre par un pont solide qu'il suffit de casser ou de faire fondre pour relâcher l'objet. Les premiers travaux sur ce type de pince ont été réalisés par un groupe de chercheurs européens [Kochan, 1997]. Dans ces travaux, l'effet Peltier est utilisé pour geler une fine couche d'eau entre le doigt et l'objet. Les pressions générées par cette méthode peuvent monter jusqu'à $1N/mm^2$ et s'avèrent suffisantes pour dépasser les effets d'adhésion. Toutefois, le type de matériaux ainsi que l'état de surface modifient les forces exercées [Lang et al., 2005]. Plus récemment, Lopez-Walle a étendu ce principe de manipulation aux milieux liquides [López-Walle et al., 2008]. De manière générale, cette technique de manipulation s'avère très intéressante puisqu'elle n'impose aucune contrainte sur la forme de l'objet à manipuler [Ru et al., 2007]. Il est à noter que la for-

mation d'un pont solide entre le préhenseur et l'objet limite ce type de préhenseur à des opérations de prise-dépose.

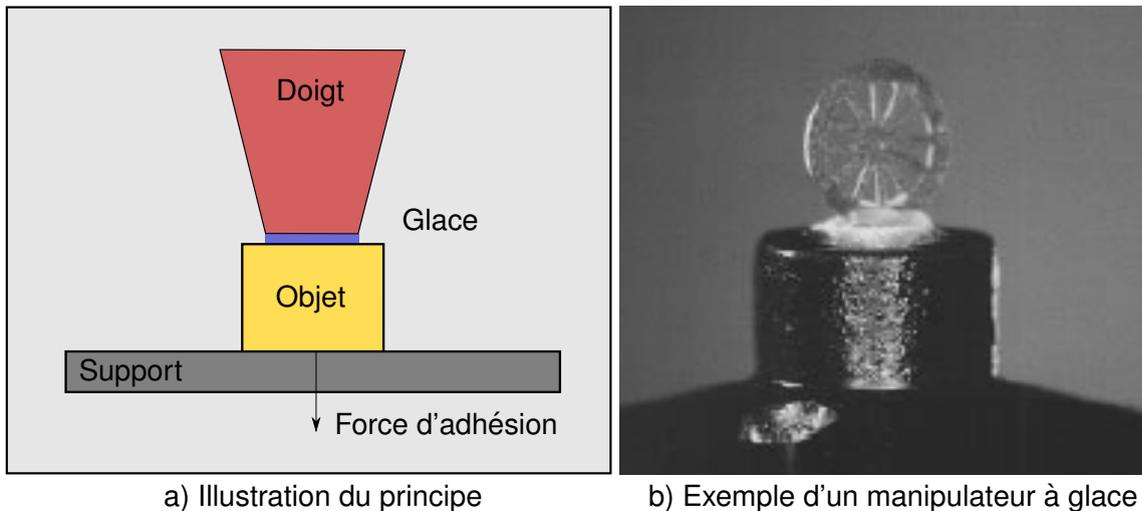


FIGURE 1.8 – Illustration du principe de manipulation par changement de phase à l'interface doigt-objet (Projet européen Microgrip [Kochan, 1997]).

Paramètres environnementaux et de surface Les effets d'adhésion peuvent également être minimisés. Pour cela, il est possible de contrôler certains paramètres environnementaux ou de surface. Par exemple, l'humidité joue un rôle important dans l'apparition des effets de capillarité. Ainsi en chauffant le préhenseur et/ou l'objet, il est possible de réduire les effets d'adhésion. Plusieurs travaux évaluent qu'en chauffant l'objet à près de 200° , l'adhésion peut être réduite d'un facteur 10 [Danuser et al., 1997] [Vögeli et al., 2000]. Cette approche reste limitée, puisque l'objet doit être soumis à de fortes chaleurs ce qui, pour certains matériaux, peut l'endommager. De plus, dans le cas de certains matériaux, les hautes températures peuvent engendrer l'effet inverse, c'est-à-dire une augmentation de l'adhésion. En effet, en chauffant suffisamment une surface, il est possible de la ramollir ce qui augmente la zone de contact entre l'objet et le préhenseur et donc augmente les effets d'adhésion [Miyazaki et al., 2000]. Dans tous les cas, opérer en environnement contrôlé (en taux d'humidité et en température) permet un meilleur contrôle des forces d'adhésion [Zhou et al., 2002].

En outre, divers travaux ont permis de mettre en avant qu'un contrôle des surfaces permet également de diminuer les forces d'adhésions. Ainsi, l'utilisation de revêtements hydrophobes permet de réduire la contribution de la capillarité dans les effets d'adhésion [Danuser et al., 1997] [Vögeli et al., 2000]. De même, l'utilisation de matériaux conducteurs permet de réduire les forces électrostatiques [Fearing, 1995] [Zhou et al., 2000]. Les forces de van der Waals, quant à elles, peuvent être réduites en contrôlant l'état de surface des matériaux. Arai a notamment proposé des doigts manipulateurs sur lesquels des micro-pyramides d'une dizaine de micromètres de hauteur sont disposées [Arai et al., 1996]. De cette façon, les forces de van der Waals deviennent négligeables devant le poids de l'objet et les stratégies de manipulation de l'échelle macroscopique peuvent être utilisées.

Effets dynamiques Une autre approche consistant à rendre les forces d'adhésions négligeables passe par l'utilisation des effets dynamiques présents aux petites échelles. En effet, à l'échelle micrométrique il est possible d'atteindre des accélérations extrêmement élevées de telle sorte que les forces d'inerties deviennent prépondérantes devant les forces d'adhésions. Cette approche a été utilisée par Haliyo [Haliyo et al., 2003], Chen [Chen et al., 2012] et Sun [Chen et al., 2009] pour détacher des micro-objets du préhenseur. Dans les deux premiers cas le manipulateur est excité en vibration pour atteindre une accélération de l'ordre de $10^6 m/s^2$ ce qui est suffisant pour relâcher l'objet. Dans le troisième cas, un doigt supplémentaire est utilisé pour fournir à l'objet l'inertie nécessaire pour se libérer. La Fig.1.9 illustre cette approche avec une vue sur l'un des dispositifs expérimentaux utilisés. Dans tous les cas, cette méthode permet de venir déposer l'objet (Chen fait même état d'une précision de moins d'un micromètre) mais reste largement inapplicable dans le cas de micro assemblage notamment pour des tâches d'insertions.

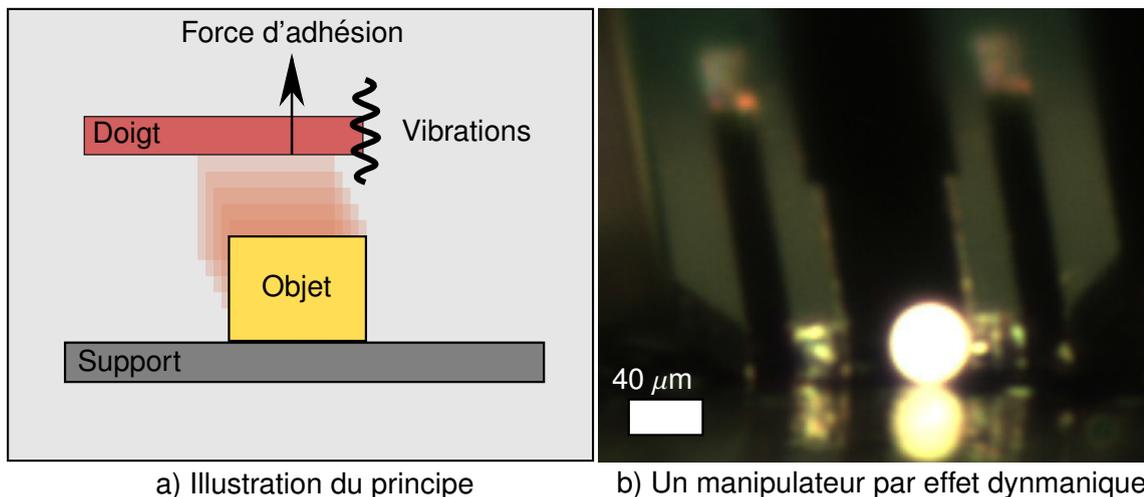


FIGURE 1.9 – Illustration de la manipulation par effet dynamique (Université de Soochow, Chine [Chen et al., 2012]).

1.2.3.2/ LES MÉTHODES QUI UTILISENT LES EFFETS D'ADHÉSION

Les méthodes précédentes permettent de surmonter les effets d'adhésion soit en les réduisant soit en utilisant des forces de plus grandes amplitudes. Une seconde façon de réaliser des opérations de micromanipulation consiste à exploiter ces forces d'adhésion. En effet, il est possible de développer des méthodes qui exploitent les tensions de surface, les effets électrostatiques ou encore les forces de van der Waals.

Les tensions de surface La présence d'une couche liquide entre deux objets va entraîner l'apparition d'une force qui peut être utilisée pour manipuler des micro-objets (voir Annexe 1 pour plus de détails). En effet, cette force permet à l'objet et au préhenseur de rester en contact et même de s'aligner l'un en face de l'autre. Cette méthode permet donc de saisir et de positionner facilement l'objet sur le doigt manipulateur [Bark et al., 1998] [Sariola et al., 2011]. Cette propriété d'auto-alignement permet également de réaliser des tâches d'auto-assemblage de micro-composants [Sariola et al., 2009] [Xiong et al., 2003]

(voir Fig.1.10). La manipulation à l'aide des effets de capillarité a été étudiée par Lambert et son équipe [Corney et al., 2005] [Lambert et al., 2003]. Plus particulièrement, ils se sont intéressés à l'optimisation de cette méthode en étudiant l'impact de la forme du préhenseur sur la manipulation. L'inconvénient de cette approche de la micromanipulation est qu'il est nécessaire de rompre le pont liquide entre le préhenseur et l'objet lors de la dépose. Cette phase de lâcher est généralement réalisée à l'aide des méthodes utilisant les effets dynamiques. Obata propose également de réaliser le lâcher en utilisant les forces de tension de surface [Obata et al., 2003]. Il s'agit alors de créer une liaison liquide entre le support et l'objet dont la force d'adhésion est supérieure à celle existante entre le préhenseur et l'objet. Expérimentalement cette approche est compliquée puisque il est nécessaire de contrôler précisément la quantité de liquide entre les différentes pièces.

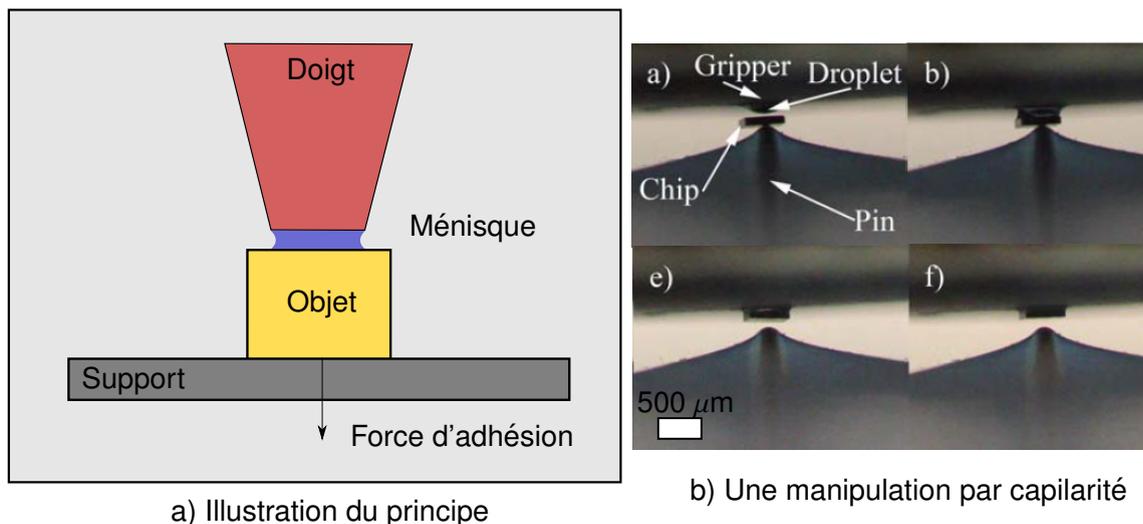


FIGURE 1.10 – Illustration de la manipulation utilisant les forces de tension de surface (Université d'Aalto, Finlande [Sariola et al., 2011]).

Les forces électrostatiques Une autre approche de la micromanipulation exploitant les effets d'adhésion est obtenue en utilisant les forces électrostatiques. En effet, toute surface chargée exerce une force sur une particule chargée (voir Annexe 1 pour plus de détails sur les forces électrostatiques). De ce fait, grâce à des électrodes positionnées sur le préhenseur, il est possible d'exercer une force électrostatique qui va être fonction de la tension utilisée. Cette force peut être aussi bien attractive que répulsive. Par exemple, Hesselbach a développé un micro-préhenseur composé d'un unique doigt sur lequel sont disposés des électrodes. Cette configuration lui permet de réaliser des opérations de prise-dépose de manière précise [Hesselbach et al., 2001]. Dans ce cas, la forme des électrodes utilisées permet également de centrer l'objet sur le doigt. Expérimentalement, cette méthode permet de saisir et déposer des objets sphériques compris entre 100 et 800 μm (Fig.1.11). Sur le même principe, Enikov a utilisé un doigt muni d'électrodes pour réaliser des tâches d'insertion avec des objets de plus de 500 μm [Enikov et al., 2005]. Le détachement de micro-objets peut également être réalisé à l'aide des forces électrostatiques. Gauthier, Subramanian et Saito ont montré qu'il est possible de relâcher des objets compris entre 20 et 100 μm à l'aide cette méthode. Toutefois, cette approche est dépendante des paramètres environnementaux puisque, dans le cas des travaux d'Hesselbach, les objets de plus de 400 μm ne peuvent plus être saisis lorsque

l'humidité relative est supérieure 65%. Cette méthode nécessite également d'utiliser des voltages élevés pour générer des forces suffisantes ce qui, dans certains cas, peut entraîner une dissipation de chaleur et par conséquent endommager l'objet ou le manipulateur.

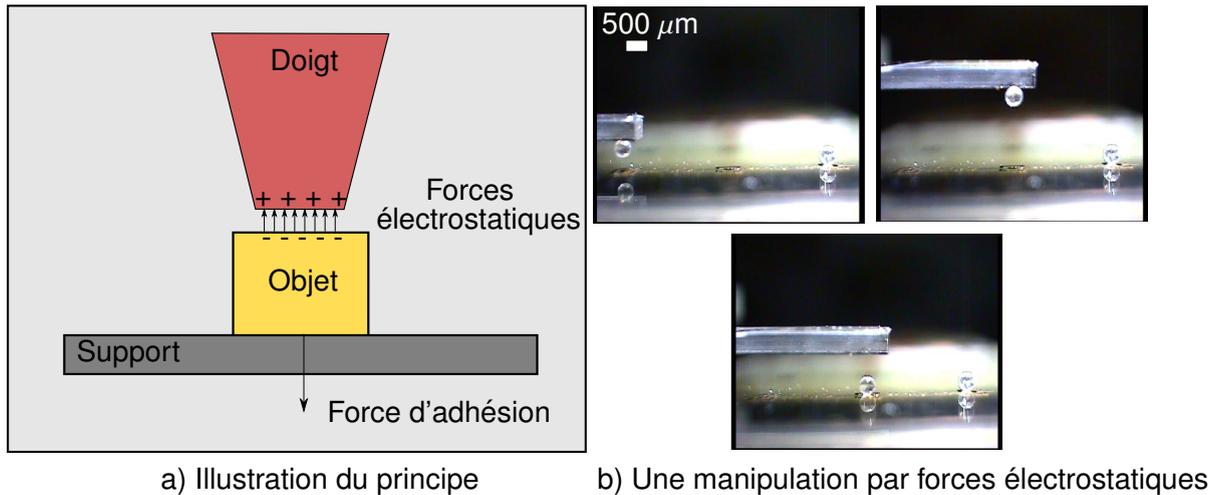


FIGURE 1.11 – Illustration de la manipulation par effets électrostatiques (Université technique de Braunschweig, Allemagne [Hesselbach et al., 2001]).

Les forces de van der Waals Les forces de van der Waals correspondent aux interactions attractives entre les différentes particules (voir Annexe 1) et peuvent être utilisées comme principe de manipulation. Cette force va dépendre de la géométrie du contact entre les différents objets. L'idée est donc de contrôler la surface de contact entre l'objet et le préhenseur pour saisir ou relâcher l'objet. Les premiers travaux dans ce sens sont ceux de Feddema [Feddema et al., 2001] dans lesquels un unique doigt rectangulaire est utilisé pour saisir et lâcher des objets sphériques. Pour les phases de saisies, le doigt est positionné de manière à avoir le maximum de contact avec l'objet afin de maximiser les forces de van der Waals. A l'inverse, pour les phases de lâcher, la zone de contact est réduite en changeant la position du doigt sur l'objet comme illustré par la Fig.1.12. D'autres travaux ont par la suite repris l'idée développée par Feddema pour manipuler des objets avec un seul doigt [Saito et al., 2002] [Rollot et al., 2001] ou avec plusieurs doigts [Chu et al., 2012]. Cette approche est toutefois très dépendante de l'état de surface du préhenseur et de l'objet puisque les effets d'adhésion diminuent grandement dès que la rugosité des objets augmente.

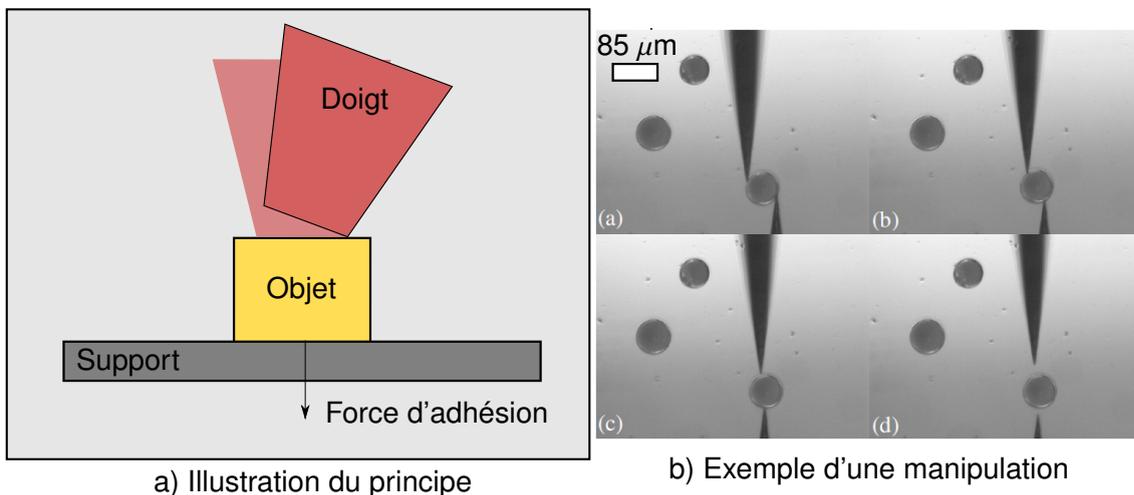


FIGURE 1.12 – Illustration de la manipulation via les forces de van der Waals (Université de Toronto, Canada [Chu et al., 2012]).

1.2.4/ QUELLE STRATÉGIE POUR LE MICRO-ASSEMBLAGE ?

Cette thèse s'inscrit dans le contexte du micro-assemblage et c'est pourquoi il est nécessaire d'analyser ces méthodes de manipulation à travers le prisme de l'application visée. Lors d'une opération de micro-assemblage, l'objectif est de saisir l'objet dans une configuration (position, orientation) aléatoire puis de le déplacer dans la configuration requise pour finalement effectuer l'assemblage. Cette tâche requiert donc de manipuler l'objet en translation et en rotation mais également d'appliquer des efforts pour, par exemple, l'insérer dans une autre pièce.

Différentes approches sont possibles lorsqu'il s'agit de manipuler des micro-objets. Toutefois, aussi bien pour les stratégies favorisant la manipulation par contact que pour celles favorisant la manipulation sans contact, il n'est pas possible d'extraire une technique qui permet facilement de manipuler n'importe quel objet. Dans les deux cas, le principal avantage est également le principal défaut. En effet, une manipulation sans contact permet de rendre trivial les problèmes d'adhésion mais cela au prix d'une réduction drastique des efforts applicables sur l'objet. En revanche, lors d'une manipulation avec contact, la force applicable sur l'objet est suffisamment grande pour réaliser n'importe quelle tâche d'assemblage mais il faut alors gérer les problèmes d'adhésion. Ainsi, au vu du contexte dans lequel se placent ces travaux, les stratégies de manipulation sans contact ne semblent donc pas envisageables.

Même si la manipulation avec contact demeure la plus adaptée pour le micro-assemblage, il faut noter que les stratégies développées jusqu'à présent s'intéressent très peu à la réalisation de manipulation permettant l'assemblage de composants. Les tâches de micro-assemblage nécessitent souvent des opérations plus complexes que de simples tâches de prise-dépose. De même, les objets manipulés ne sont pas nécessairement sphériques ou rectangulaires. Enfin, la problématique du lâcher ne se pose pas souvent puisque les pièces sont généralement collées ou insérées. En réalité, la problématique la plus contraignante pour le micro-assemblage concerne l'obtention des rotations. En effet, pour réaliser des micro-systèmes encore plus fonctionnels, des rotations précises

doivent être obtenues [Rabenorosa et al., 2009] [Zhang et al., 2015].

Comme expliqué précédemment, les rotations peuvent être obtenues de deux façons : soit à l'aide d'un robot porteur muni de plusieurs degrés de liberté soit à l'aide d'un préhenseur dextre. Les contraintes de la micromanipulation limitent fortement l'utilisation d'un robot porteur capable d'orienter le préhenseur et donc l'objet. En effet, l'utilisation de robots porteurs complexes pose des problèmes d'encombrement puisque toute la structure doit être déplacée pour effectuer seulement une rotation locale de l'objet. Les jeux et les excentricités présentes dans les micro-robots limitent également l'utilisation de robots complexes dotés de nombreux degrés de liberté [Tan et al., 2014]. En particulier, les actionneurs rotatifs utilisés en micromanipulation n'atteignent pas le même niveau de précision relative que ceux utilisés en macro-manipulation. Pour obtenir un système fiable et répétable il est donc nécessaire d'utiliser les actionneurs les plus précis c'est-à-dire les actionneurs en translation. Une manière originale de réaliser des rotations à partir de translations peut se faire grâce à des manipulations par le préhenseur. C'est pourquoi, il nous apparaît plus pertinent de développer des micro-préhenseurs dextres et des techniques de micromanipulation dans la main.

L'utilisation d'un préhenseur dextre pour réaliser des rotations de micro-objets a été abordé par plusieurs chercheurs. Shimada [Shimada et al.,] a été l'un des premiers à développer un micro-préhenseur dextre. Son approche consistait à utiliser deux doigts en translation positionnés à 90° l'un de l'autre. De cette façon, il est capable de réaliser des rotations d'au maximum 90° en utilisant seulement deux doigts. Par la suite Wason [Wason et al., 2007] a développé un préhenseur dextre composé également de deux doigts en translation. Là encore, la rotation est limitée à 90° au maximum. Toutefois, contrairement au travaux de Shimada, Wason propose d'utiliser un troisième doigt fixe pour réaliser des rotations en dehors du plan de doigts. Contrairement aux préhenseurs précédents, Zhou [Zhou et al., 2006] et Inoue [Inoue et al., 2012] ont développé des préhenseurs à deux doigts munis de plus de degrés de liberté. En effet, en plus des translations les doigts peuvent réaliser des rotations autour d'un axe. De cette manière, il est possible de faire tourner l'objet autour de deux axes différents. Zhou propose également d'utiliser un troisième doigt fixe pour venir réaliser la rotation manquante. Dans les deux cas, les rotations réalisables restent inférieures à 90° . Cappelleri [Cappelleri et al., 2011] a également proposé d'utiliser un système à quatre doigts pour réaliser des opérations de micromanipulation. Dans son système, les rotations sont réalisées en utilisant seulement deux doigts tandis que les translations et la saisie de l'objet sont effectuées en utilisant l'intégralité des doigts. La manipulation s'effectuant sur un plan il est alors possible d'obtenir des rotations supérieures à 90° . En effet, en lâchant l'objet après une première rotation de 90° , il est toujours possible de venir replacer les doigts pour répéter l'opération. Dans tous les cas, les rotations effectuées dans le préhenseur restent limitées à 90° et les objets manipulés restent relativement simples (Fig.1.13). Le tableau 1.2.4 dresse un récapitulatif des différentes plates-formes.

Même si le développement de préhenseurs dextres est pertinent et nécessaire, la dextérité des plates-formes de micromanipulation actuellement capables de réaliser des rotations est faible. Toutefois, la manipulation dextre est un sujet étudié depuis longtemps à l'échelle macro-métrique, c'est pourquoi, il apparaît pertinent d'analyser les méthodes de manipulation employées à cette échelle afin d'améliorer celle développées pour le micro-monde.

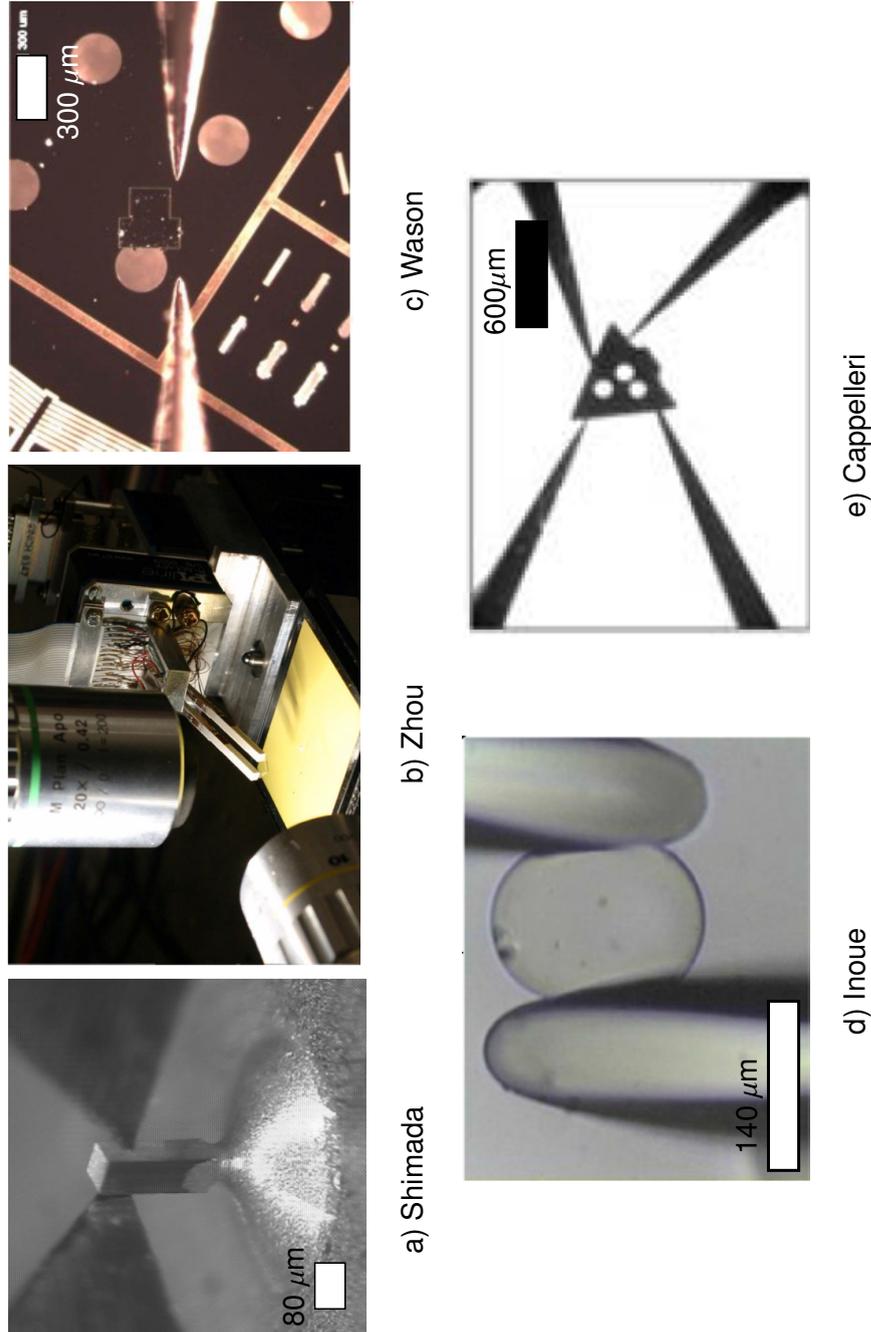


FIGURE 1.13 – Photographies des systèmes de micromanipulation les plus dextres développés jusqu'à présent. a) Université de Californie, Etats-Unis [Shimada et al.,], b) Université d'Aalto, Finlande [Zhou et al., 2006], c) Institut Polytechnique Rensselaer, Etats-Unis [Wason et al., 2007], d) Université Yamagata, Japon [Inoue et al., 2012], e) Institut de Technologie Stevens, Etats-Unis [Cappelleri et al., 2011].

Forme d'objet	Outil	Translation	Rotation	Remarques	Référence
Cube	2 doigts	3 axes	1 axe $\leq 90^\circ$	Axe de rotation supplémentaire en utilisant un outil externe	[Shimada et al.,]
Rectangle	2 doigts	3 axes	2 axes $< 90^\circ$	Axe de rotation supplémentaire en utilisant un outil externe	[Zhou et al., 2006]
Polygone 2D	2 doigts	3 axes	1 axe $< 90^\circ$	Axe de rotation supplémentaire en utilisant un outil externe Polygone à faces parallèles	[Wason et al., 2007]
Sphère	2 doigts	3 axes	2 axes $< 90^\circ$	Rotation inférieure à 90° expérimentalement Manipulation avec l'objet en contact avec le support	[Inoue et al., 2012]
Polygone 2D	4 doigts	3 axes	1 axe $\leq 90^\circ$	Manipulation avec l'objet en contact avec le support Deux doigts seulement pour les rotations	[Cappelleri et al., 2011]

TABLE 1.1 – Vue d'ensemble du niveau de dextérité en micromanipulation.

1.3/ LA MANIPULATION ROBOTIQUE À L'ÉCHELLE MACROSCOPIQUE

Les systèmes robotiques macroscopiques disposent des niveaux de dextérité requis pour effectuer des tâches d'assemblage complexes. C'est pourquoi nous présentons ici un panorama des structures et des méthodes de manipulation macrométrique afin de définir, d'une part, les méthodes susceptibles d'être ré-exploitées à l'échelle micrométrique et, d'autre part, d'illustrer les spécificités d'échelles. Cette analyse est focalisée sur les préhenseurs dextres en cohérence avec les travaux développés dans ce manuscrit.

1.3.1/ LES PRÉHENSEURS MACROSCOPIQUES

La conception de préhenseurs robotiques dextres est une thématique très active à l'échelle macroscopique ces trois dernières décennies. En effet, en 1986, Jacobsen [Jacobsen et al., 1986] propose l'une des premières mains robotiques à quatre doigts : la main UTAH MIT (Fig.1.14a). Cette dernière, composée de seize articulations et trente-deux actionneurs, a été développée dans le but d'étudier la dextérité et la manipulation par des machines. Par la suite, de nombreuses mains robotiques ont été développées dont le spectre s'étend des mains sous actionnées (dont le nombre d'actionneurs est plus faible que le nombre de degrés de liberté) aux mains anthropomorphes totalement actionnées.

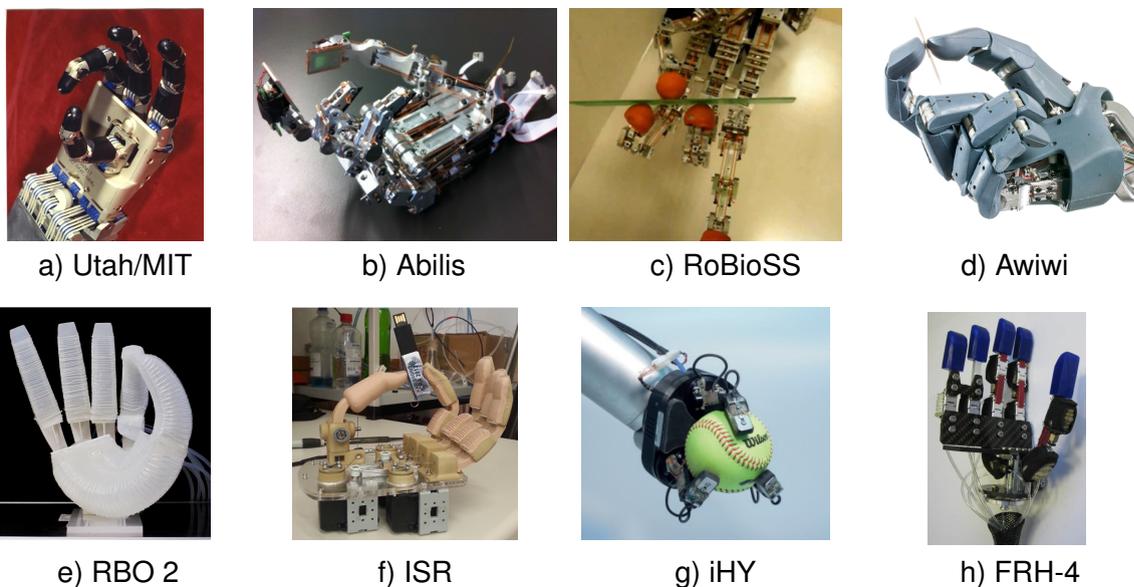


FIGURE 1.14 – Photographie de différents préhenseurs macroscopiques.

Les mains sous actionnées présentent l'avantage d'être mécaniquement plus simples (Fig.1.14e-h) et donc souvent plus simples à commander [Deimel et al., 2015] [Tavakoli et al., 2014] [Odhner et al., 2014]. Ces mains robotiques sont généralement compliantes grâce à des matériaux élastiques ou flexibles [Gaiser et al., 2008] [Dollar et al., 2010] [Giannaccini et al., 2014]. Cette approche permet de développer des systèmes de préhension à moindre coût capables de s'adapter à la forme de l'objet à saisir. On parle alors de saisie dextre. Il est à noter que les opérations de manipulation dans

la main ne sont pas forcément réalisables avec ce type de main puisque il est nécessaire de contrôler précisément les mouvements de chaque doigt.

Une autre approche des préhenseurs macroscopiques consiste à réaliser des mains robotiques où un très grand nombre de degrés de libertés peut être contrôlé [Koganezawa et al., 2016] [Mnyusiwalla et al., 2016] [Chaigneau et al., 2008]. Cette approche permet d'obtenir une grande dextérité et une grande compliance à l'aide d'une commande précise et rapide des doigts. Cette approche aboutit généralement à des mécanismes très complexes et souvent très chers à réaliser (Fig.1.14a-d) [Markus, 2012] [Bae et al., 2012]. Il est également possible de remarquer que très peu de ces mains sont utilisées pour réaliser des tâches de manipulation dans la main (même si elles demeurent les plus adaptées à cette opération).

En dépit des avantages que seule une main robotique peut offrir (dextérité, polyvalence, etc.) [Controzzi et al., 2014], l'industrie est, aujourd'hui, loin de développer et d'utiliser des préhenseurs avec des propriétés similaires à la main humaine. Dans la majorité des cas, les préhenseurs industriels sont développés pour répondre à des tâches limitées et leurs architectures se résument à des pinces à deux doigts de serrage. La robotisation des tâches de manipulation reste donc limitée à des opérations simples.

1.3.2/ TECHNIQUES DE MANIPULATION

A l'échelle macroscopique, la manipulation robotique s'effectue sous les mêmes contraintes que la manipulation humaine, c'est-à-dire qu'il faut résister au poids de l'objet pour pouvoir le saisir et le manipuler. L'objectif étant de réaliser des opérations de rotation à l'aide d'un préhenseur dextre, nous nous intéresserons donc seulement aux stratégies de mouvement dans la main.

1.3.2.1/ LE ROULEMENT

Cette approche consiste à faire rouler les doigts sur la surface de l'objet pour le mettre en mouvement tout en évitant le glissement (Fig.1.15). Les premiers travaux en ce sens sont ceux de Bicchi [Bicchi et al., 1995] dans lesquels il met en déplacement une sphère à l'aide de deux plaques parallèles. Grâce à la prise en compte de l'aspect non holonome du roulement de la sphère, il a pu planifier des trajectoires pour effectuer des rotations précises. Cette approche ne fonctionne pas pour toutes les formes d'objets, en particulier à cause de la forme du manipulateur. Par la suite, cette approche de manipulation par roulement a été reprise pour manipuler des objets sphériques [Han et al., 1998] [Han et al., 1997] [Odhner et al., 2011] ou polyédriques [Cherif et al., 2001] [Daoud et al., 2012]. Même si aucune contrainte n'empêche l'utilisation de cette stratégie à l'échelle micrométrique, aucun système de micromanipulation développé jusqu'à présent ne prend en compte le roulement.

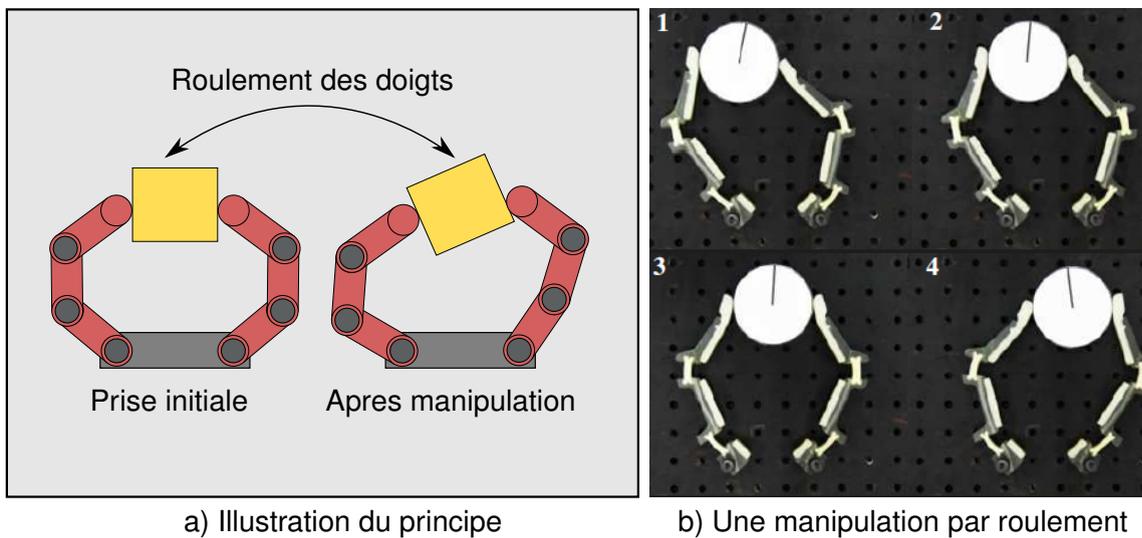


FIGURE 1.15 – Illustration de manipulation dextre par roulement (Université de Yale, États-Unis [Odhner et al., 2011])

1.3.2.2/ LE GLISSEMENT

Contrairement à la méthode précédente où le glissement doit être empêché, cette seconde méthode l'utilise pour déplacer l'objet dans la main (Fig.1.16).

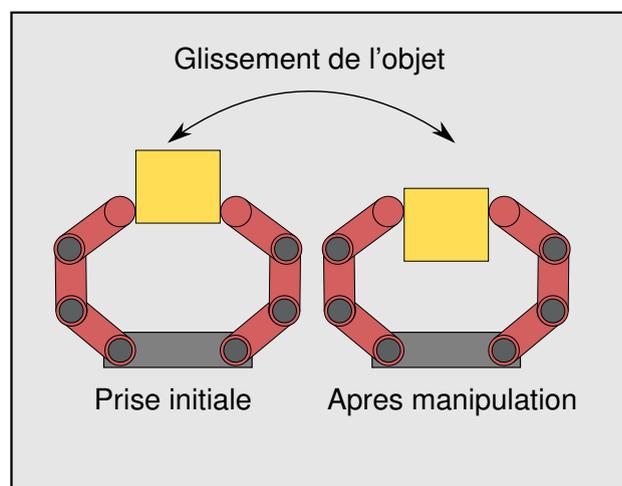


FIGURE 1.16 – Illustration de manipulation dextre par glissement.

Bien que formalisable [Shi et al., 2015], cette approche de la manipulation reste complexe à mettre en œuvre expérimentalement. Fearing [Fearing, 1986] a utilisé le glissement pour adapter la position des doigts et de l'objet vers un état stable lors de la saisie de polygones avec deux doigts. De même, Brock [Brock, 1988] s'est intéressé à l'utilisation du glissement sur une main robotique à trois doigts pour en améliorer la dextérité. Cette approche nécessite toutefois de connaître avec précision les phénomènes de friction et de glissement au niveau des contacts des doigts. C'est pourquoi, cette technique est difficilement envisageable à l'échelle micrométrique en raison de l'absence de capteurs

tactiles capables de détecter avec précision le glissement. Il est à noter que lorsque l'Homme manipule des objets dans sa main, les opérations réalisées sont en général des combinaisons de roulement et de glissement.

1.3.2.3/ LE PIVOTEMENT

Une autre façon de réaliser une manipulation dextre est de créer un axe de rotation à l'aide de plusieurs doigts puis d'utiliser un autre doigt pour venir pousser l'objet et ainsi le faire tourner autour de cet axe (Fig.1.17). Cette approche a été formalisée par Rus [Rus, 1992] pour mettre en rotation des polyèdres quelconques. A l'échelle micrométrique cette approche a déjà été utilisée par Zhou [Zhou et al., 2006] et Wason [Wason et al., 2007] pour réaliser des rotations. Comme expliqué précédemment, dans les deux cas, un doigt fixe est utilisé pour effectuer la rotation. Ce type de manipulation, très courante avec la main humaine, est par exemple utilisée lors de la réorientation d'ustensiles.

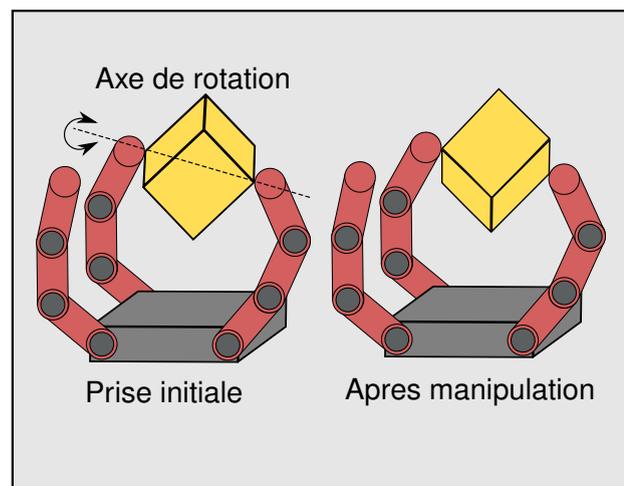


FIGURE 1.17 – Illustration de manipulation dextre par pivotement.

1.3.2.4/ LE REPOSITIONNEMENT

Une dernière approche de la manipulation dextre consiste à venir changer les doigts en contact avec l'objet lorsque ceux-ci atteignent des limites physiques (collisions, limite du cône de frottement, etc.) [Leveroni, 1997]. Cette approche est généralement utilisée de concert avec une manipulation par roulement. Grâce à cette méthode, la main robotique peut, en théorie, réaliser n'importe quel mouvement d'objet [Saut et al., 2007] [Han et al., 1998] (Fig.1.18). Cette opération est faite naturellement par l'homme lorsqu'il manipule mais reste toutefois complexe à planifier pour les mains robotiques. Il est à noter que cette tâche, envisageable à l'échelle micrométrique, devient toutefois plus difficile puisque l'adhésion vient fortement perturber le retrait des doigts.

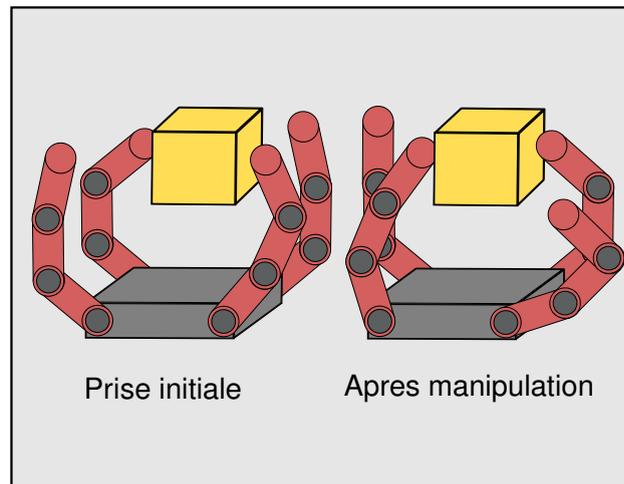


FIGURE 1.18 – Illustration de manipulation dextre par repositionnement.

1.3.2.5/ QUELLE STRATÉGIE POUR LA MICROMANIPULATION DEXTRE ?

Parmi les quatre grandes stratégies de manipulation dans la main utilisées à l'échelle macro-métrique seules trois sont envisageables pour la micromanipulation. En effet, le glissement contrôlé n'est pas pertinent du fait de l'absence de capteurs suffisamment précis et de la nature complexe des phénomènes présents au niveau des contacts. La micromanipulation dans la main est donc possible en utilisant le roulement, le pivotement ou le repositionnement (ou une combinaison de ces trois méthodes). Il est même possible de restreindre la manipulation dans la main aux roulement et repositionnement. Le roulement permet effectivement de réaliser n'importe quelle rotation à condition que les doigts aient une forme adaptée, et le repositionnement permet de dépasser les limites du manipulateur (collisions, limites d'actionnement, limites de friction, etc.). Une manière polyvalente de réaliser des opérations de micromanipulation dextre consiste donc à ne considérer que la manipulation par roulement et repositionnement.

À l'échelle micrométrique, la manipulation par roulement et repositionnement n'a encore jamais été étudiée et fait apparaître de nouvelles contraintes. En particulier, le retrait d'un doigt doit prendre en compte les effets d'adhésion pour garantir que l'objet ne reste pas en contact avec le doigt retiré.

1.4/ VERS LA MICROMANIPULATION DEXTRE

L'examen des différentes méthodes de manipulation montre que l'amélioration de la dextérité des micro-préhenseurs est une approche prometteuse pour améliorer la complexité des micro-assemblages et qu'il est possible de s'inspirer des travaux menés à l'échelle macro-métrique. L'approche proposée dans cette thèse consiste à utiliser un préhenseur multi-digital (une micro-main) pour réaliser des opérations de roulement et repositionnement afin de manipuler n'importe quelle forme d'objet. Plusieurs axes de recherche sont alors possibles :

- **Conception** : Conception et caractérisation d'un micro-préhenseur multi-digital permettant de réaliser des manipulations dans la main,

- **Planification** : Planification et génération des déplacements pour les doigts d'une micro-main dans le but d'automatiser la manipulation,
- **Commande** : Développement de lois de commande afin de garantir la précision et la répétabilité de la micro-main et des trajectoires de manipulation.

Les travaux développés dans cette thèse s'articulent principalement autour de la planification. C'est pourquoi, la suite de ce chapitre passe en revue les différentes méthodes d'automatisation et de planification utilisées en manipulation robotique aux différentes échelles.

1.5/ L'AUTOMATISATION EN MANIPULATION ROBOTIQUE

Les différentes méthodes utilisées pour automatiser et planifier des manipulations sont présentées ci-dessous. Cette section se décompose en deux parties. D'un côté les méthodes utilisées à l'échelle micrométrique et de l'autre celles utilisées à l'échelle macrométrique. Il est à noter que de nombreuses méthodes utilisées à l'échelle micrométrique le sont également à l'échelle macrométrique.

1.5.1/ L'AUTOMATISATION EN MICROMANIPULATION

Les opérations de micromanipulation les plus courantes sont encore réalisées soit manuellement à l'aide de pince brucelles soit de manière télé-opérées. Toutefois, d'importants progrès ont été réalisés ces dernières années dans la mise en œuvre de techniques d'automatisation. Ces dernières peuvent être catégorisées en deux domaines distincts : d'un côté les méthodes de planification de tâches et de l'autre les méthodes de contrôle-commande. Une méthode peut être qualifiée de planification si elle génère des chemins, prises ou séquences de tâches de manière globale pour un ou plusieurs objets. Les méthodes de contrôle fournissent les transitions locales ou bien les tâches individuelles associées à un objet. Ainsi, la planification se concentre sur les objectifs comme par exemple l'évitement d'obstacle, la minimisation du temps de réalisation tandis que le contrôle s'assure que les actions voulues soient exécutées tout en optimisant certains paramètres du système. Le système automatique optimal couple donc des opérations de planification avec des opérations de contrôle.

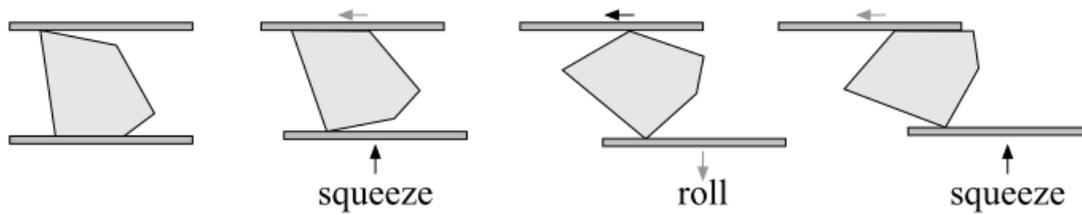
1.5.1.1/ LES MÉTHODES DE PLANIFICATION

L'intérêt de la planification en micromanipulation a été évoqué pour la première fois par Feddema [Feddema et al., 2001]. Dans ses travaux, il montre l'utilité de la planification de mouvement dans des tâches de saisie, maintien et lâcher d'objets micrométriques avec un doigt rectangulaire. La conclusion de ses travaux est la suivante : "*même si les techniques de planification peuvent être directement reprises du domaine macroscopique, il est nécessaire de développer des méthodes qui prennent en compte les spécificités d'échelle*" [Feddema et al., 2001]. Feddema a donc posé les fondations pour le développement de méthodes de planification sophistiquées et adaptées au paradigme du micromonde.

Chemin minimal La méthode de planification dite du "chemin minimal" est certainement l'une des plus simples. Considérant une position de départ et une position d'arrivée, cette méthode consiste à générer un chemin rectiligne entre les deux états. L'un des défauts de cette approche est que les collisions sont très mal gérées. Dans le cadre d'opérations de micromanipulation par deux pointes AFM (Atomic Force Microscopy), Xie a utilisé cette méthode pour planifier les déplacements de la pince lors d'opérations de prise-dépose pour des micro-sphères de $4\mu\text{m}$ de diamètre [Xie et al., 2009]. Xie a réutilisé cette approche pour planifier des opérations de prise-dépose successives afin de réaliser des assemblages pyramidaux de micro-sphères [Xie et al., 2011a]. Zhou [Zhou et al., 2006] s'est également servi de cette méthode pour planifier des translations et des rotations de micro-objets avec une pince à deux doigts. Dans le cas des translations, le mouvement planifié est identique pour les deux doigts tandis que dans le cas des rotations un chemin est généré pour chaque doigt. Dans ces travaux, les rotations sont planifiées en considérant que le point de contact entre l'objet et le doigt est constant, c'est-à-dire sans roulement. Cette approximation simplifie grandement l'opération de planification, ce qui explique en partie l'utilisation de cette méthode.

La recherche de graphe La façon la plus courante de planifier une tâche est d'utiliser un graphe. Un graphe est un ensemble de points nommés nœuds (ou sommets) reliés par des segments nommés arêtes qui permet de modéliser un problème. Par exemple dans le cas d'un problème de micromanipulation par une pince à deux doigts, les nœuds représentent l'état du manipulateur (position des doigts) et de l'objet (position et orientation de l'objet) et les arêtes les liens entre les différents états. L'objectif est alors de trouver la séquence qui permet de passer d'un état initial à un état final désiré. La solution se trouve en explorant ce graphe. De nombreux algorithmes ont été développés pour assurer cette étape d'exploration. Les plus couramment utilisés sont le parcours en profondeur, le parcours en largeur, l'algorithme de Dijkstra [Sniedovich, 2006], de Kruskal [Kruskal, 1956], de Prim [Prim, 1957] ou encore les algorithmes A^* [Dechter et al., 1985], D^* [Stentz, 1994], B^* [Berliner, 1979] (ainsi que leurs variantes). Chaque approche dispose d'avantages et d'inconvénients qui dépendent directement du problème modélisé et du type de solution désirée. Par exemple, A^* et D^* permettent de fournir des chemins complets et optimaux en se basant sur des heuristiques et des coûts lors de l'exploration du graphe.

Ces méthodes ont montré leur efficacité à l'échelle macroscopique notamment dans le cas de la planification de mouvements pour les robots mobiles [Kambhampati et al., 1985] [Li et al., 2013]. A l'échelle micrométrique, l'une des premières utilisations des parcours de graphes se trouve dans les travaux de Moll [Moll et al., 2002]. L'objectif, dans ces recherches, est d'orienter des polygones plans à l'aide de deux doigts. Pour ce faire, les objets peuvent être manipulés en utilisant deux primitives : le roulement ou la pression (voir Fig.1.19a). Connaissant ces deux opérations, un graphe modélisant le problème est proposé (voir Fig.1.19b) et un algorithme permettant de trouver le plus court chemin (en nombre d'opérations) est développé. Bien qu'élégante, cette approche n'a jamais été validée expérimentalement et les propriétés du micro monde, comme l'adhésion, n'étaient pas prises en compte. De manière similaire, Mitra [Mitra et al., 2012] a utilisé un parcours de graphe pour résoudre le problème du nettoyage de micro-bio-puces. Dans ces travaux, l'objectif est de trouver le chemin le plus court pour une ou plusieurs gouttelettes afin de parcourir toute la surface à nettoyer de la puce. Il est à noter que ce problème est similaire au célèbre problème du voyageur



a) Description des deux opérations possibles

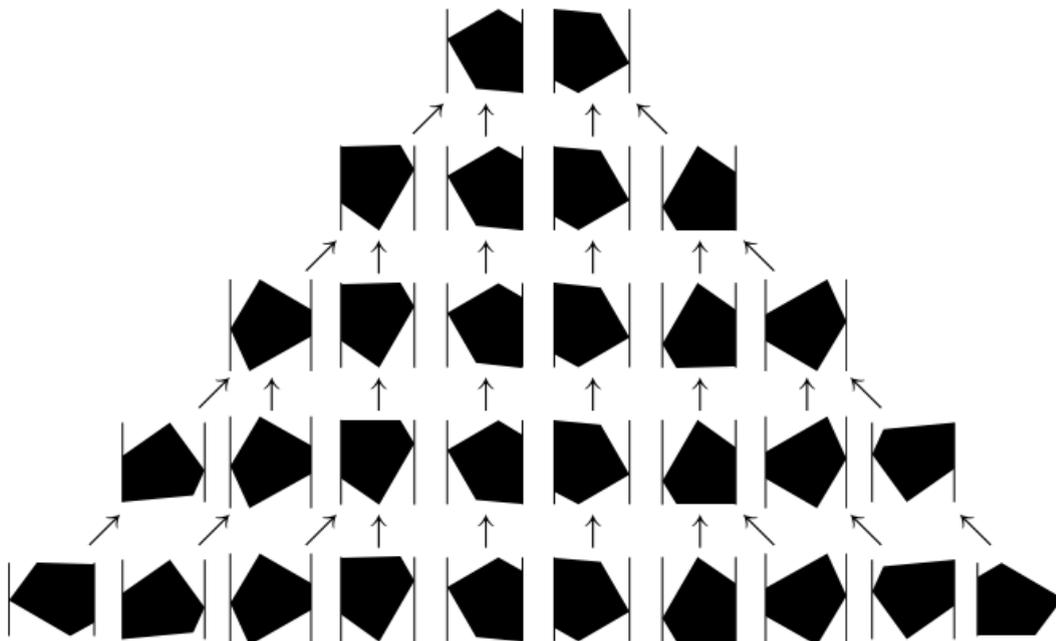
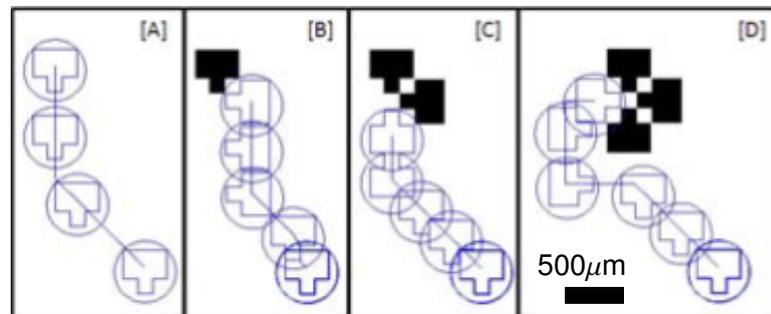
b) Graphe représentant le problème de manipulation
(les configurations initiales sont en bas)

FIGURE 1.19 – Représentation du problème d'orientation par Moll [Moll et al., 2002].

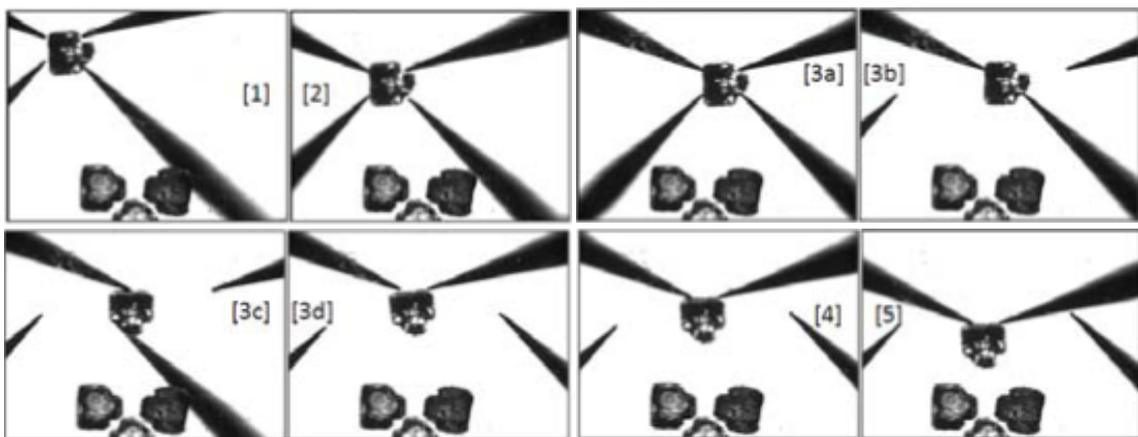
de commerce en informatique. Toutefois, dans ces travaux également, l'approche n'a pas été validée expérimentalement.

Dans le cadre du micro-assemblage, des méthodes de planification ont également été utilisées. Les premiers travaux en ce sens sont ceux de Makaliwe [Makaliwe et al., 2001] dans lesquels une formalisation simple du problème de nano-assemblage de particules est présentée. L'objectif est de déplacer des objets dans le plan en les poussant à l'aide d'un unique doigt. Dans ces travaux, la planification peut se résumer à trouver la succession de position pour atteindre la position désirée tout en évitant les obstacles dans la scène. Ces positions sont ensuite simplement reliées par des droites. Inspiré par ces premiers travaux, Malima [Malima et al., 2007] a développé un simulateur pour planifier les déplacements de micro-objets dans le plan. L'objectif est, ici aussi, de déplacer des particules en les poussant tout en évitant des obstacles statiques dans l'espace de travail. Les trajectoires, obtenues à l'aide d'un algorithme A^* , sont des successions de droites dans le plan. De même, Cappelleri [Cappelleri et al., 2011] a utilisé un algorithme A^* pour déterminer la séquence optimale de translation-rotation pour réaliser l'assem-

blage plan de quatre objets polygonaux de $600\mu\text{m}$ de côté (voir Fig.1.20). Dans cette approche, les objets sont toujours poussés et les étapes de rotation ne sont pas planifiées puisque des séquences préenregistrées sont utilisées à cette fin. Récemment, Das et Popa [Das et al., 2010] ont développé un planificateur pour réaliser l'assemblage d'un micro-spectromètre. Contrairement aux travaux précédents où la distance parcourue par le manipulateur est minimisée pendant le parcours du graphe, Das et Popa utilisent la précision du chemin comme mesure pour déterminer le meilleur chemin. D'après eux, le chemin le plus fiable, et donc le plus à même de permettre un rendement maximal pour la tâche d'assemblage, n'est pas le plus court. Il est possible de citer de nombreux autres travaux utilisant des méthodes de parcours de graphe, notamment ceux de Pawashe et Sitti [Pawashe et al., 2006], Cappelleri [Cappelleri et al., 2006] ou encore Ju [Ju et al., 2011]. Toutefois, aucune approche précédemment citée ne prend en compte les effets d'adhésion durant l'étape de planification. Il s'agit donc simplement d'une application des techniques existantes à l'échelle macroscopique. De plus, dans l'intégralité de ces travaux les rotations ne sont pas planifiées. Dans le meilleur cas, il s'agit d'opérations préenregistrées.



a) Illustration de la trajectoire planifiée



b) Photographie de la manipulation

FIGURE 1.20 – Photographie de la séquence d'assemblage telle que planifiée et exécutée dans les travaux de Cappelleri [Cappelleri et al., 2011].

Primitive de manipulation L'étape de planification peut être simplifiée en utilisant des primitives de manipulation. Ces primitives sont des actions préenregistrées comme

par exemple le déplacement des doigts dans une direction prédéfinie sur une distance prédéfinie (ce qui correspond à une primitive de translation sur un axe donné). L'objectif est alors de planifier l'enchaînement de ces primitives pour réaliser la manipulation. C'est avec cette approche que Fearing [Thompson et al., 2001] a réalisé des opérations automatiques de micromanipulation sur des cubes de $200\mu\text{m}$. Dans ces travaux comme dans ceux de Cappelleri [Cappelleri et al., 2011], des trajectoires de doigts permettant une rotation de l'objet à 90° sont préenregistrées. L'intérêt de cette approche est que si la tâche à effectuer est toujours la même alors une planification plus complexe n'est pas nécessaire. Cette approche manque de flexibilité et dès lors que certains paramètres changent (dimensions ou forme de l'objet par exemple) les primitives ne sont plus assurées de fonctionner.

Planification probabiliste Dans le cas où de grandes incertitudes existent, la méthode de parcours de graphe classique peut être améliorée en utilisant une planification probabiliste. Ce type de problèmes est souvent modélisé sous la forme d'un processus de décision Markovien [Thrun et al., 2005]. Par exemple, supposons qu'un objet soit manipulé par des doigts. A chaque instant le système est dans un état donné (position, orientation de l'objet) et il existe une probabilité que le système change d'état en fonction de l'action effectuée (mouvement des doigts). L'objectif est de passer l'objet d'un état initial à un état final et pour chaque mouvement des doigts sur l'objet une récompense est attribuée. Cette récompense, positive ou négative, est fonction du nouvel état dans lequel se trouve l'objet. Le processus de décision Markovien se résume alors par : sachant mon objet dans l'état A et effectuant un mouvement des doigts m , il y a alors une probabilité x que l'objet se retrouve dans l'état B avec une récompense r . Le choix des actions va être directement influencé par une politique qui dépend évidemment des récompenses obtenues. A l'échelle micrométrique, cette approche de la planification a surtout été utilisée par Banerjee dans le cadre de la manipulation d'objet par pince optique [Banerjee et al., 2010] [Banerjee et al., 2012]. Dans ces travaux, le processus de décision de Markov est utilisé pour gérer la probabilité de conserver l'objet dans la pince optique en fonction de la distance de l'objet le faisceau laser. Cette approche lui a permis de manipuler des billes de silicium de $2\mu\text{m}$ de diamètre tout en évitant des obstacles formés par d'autres billes. Toutefois, l'auteur pointe lui-même une limitation majeure à cette approche : plus le problème devient complexe (en augmentant le nombre d'objets par exemple) et moins cette méthode est adaptée pour de la planification en temps réel.

1.5.1.2/ LES MÉTHODES DE COMMANDE

L'automatisation passe nécessairement par l'intégration d'un contrôleur dans le système de manipulation. En effet, la planification permet de décider des actions à réaliser mais, pour les exécuter avec précision, l'utilisation de méthodes de commande est requise. Parmi l'ensemble des méthodes de commande existantes, deux sont couramment utilisées à l'échelle micrométrique : la commande en force et l'asservissement visuel.

La commande en force Les premiers travaux en ce sens sont ceux de Fearing [Zesch et al., 1998] dans lesquels il a réussi à aligner des micro-objets avec une précision de l'ordre du micron. Grâce à un capteur piézorésistif et une pointe AFM, l'opération

de manipulation, qui consistait à pousser les micro-objets, a pu être réalisée efficacement. Cette approche de mesure de force a, par la suite, été reproduite avec des capteurs similaires [Komati, 2014] ou de nature différente (visuel [Reddy et al., 2010], laser [Xie et al., 2009], thermique [Zhu et al., 2011], électrostatique [Liu et al., 2009] ou encore piézoélectrique [Shen et al., 2004]). De même, de nombreuses variantes de lois de commande ont été mises en œuvre : proportionnel-intégral [Carrozza et al., 2000], proportionnel-intégral-dérivé [Liu et al., 2009], H_∞ [Rakotondrabe et al., 2011] ou bien par impédance [Komati et al., 2014] [Xie et al., 2011b]. Malgré les bonnes précisions obtenues à l'aide de ces méthodes, les opérations réalisées restent simples (prise-dépose de composants) et la mesure des forces d'interaction durant la manipulation reste un enjeu majeur. Il faut cependant noter que d'importants progrès ont été réalisés ces dernières années avec l'apparition de capteurs de forces multi degrés de liberté [Billot et al., 2015] ainsi que le développement de mesure de forces à haute résolution par vision [Guelpa et al., 2015].

L'asservissement visuel Une autre façon de contrôler les micro-robots est d'utiliser l'asservissement visuel. Cette technique consiste à utiliser l'information contenue dans une image prise par une caméra pour contrôler les déplacements du micro-robot. Dans le contexte du micro-assemblage, Tamadazte [Tamadazte et al., 2010] a utilisé un asservissement visuel pour manipuler des objets de forme polygonale. Grâce à cette technique de commande, une précision en position inférieure au micron a pu être atteinte. Tamadazte [Tamadazte et al., 2011] a également utilisé cette même approche pour réaliser l'assemblage 3D de ces mêmes objets sans toutefois contrôler la phase de rotation. D'autres assemblages de microstructures ont été réalisés par cette méthode [Wason et al., 2010]. Cette approche a également été utilisée pour la manipulation d'objets biologiques [Ouyang et al., 2007] avec en particulier le contrôle de tâche d'injection intracellulaire [Wang et al., 2007] [Liu et al., 2011] dont le taux de succès dépasse les 95%. De même, l'asservissement visuel est très souvent utilisé pour contrôler les déplacements dans le cas d'une manipulation sans contact [Xu et al., 2015]. Toutefois, cette méthode se heurte rapidement aux problèmes intrinsèques de l'optique à petite échelle. En effet, il n'est pas possible d'obtenir de forts grossissements tout en ayant une grande profondeur de champ. Cela pose notamment problème lors de tâches d'assemblage où une vision tridimensionnelle est souvent requise.

1.5.1.3/ SYNTHÈSE

Les méthodes de planification développées à l'échelle micrométrique permettent de planifier et réaliser des opérations de manipulation, voir même d'assemblage, de manière automatique. Toutefois, les méthodes utilisées ne sont pas spécifiques au micro-monde et à son paradigme. En effet, les planificateurs sont conçus à partir de méthodes issues du macro-monde (en particulier du monde de la robotique mobile). De plus, peu de travaux s'intéressent à la planification de rotation dans la main. De ce fait, les tâches planifiées ne permettent pas de réaliser des opérations complexes et ne sont pas forcément adaptées au micro-monde. En revanche, les lois de commande développées pour l'exécution précise de micromanipulation prennent de plus en plus compte des phénomènes du micro-monde en particulier l'adhésion à l'aide des capteurs de force.

1.5.2/ L'AUTOMATISATION EN MACRO-MANIPULATION DEXTRE

De manière similaire à la micromanipulation, l'automatisation est nécessaire à l'échelle macroscopique pour améliorer l'intégration de robots dans la société. Cela est particulièrement vrai pour les robots dit d'assistance à la personne (comme le robot ROMEO d'Aldebaran, par exemple) qui doivent pouvoir saisir et manipuler une gamme d'objet très variée. De même, industriellement, des robots dextres et autonomes peuvent être utilisés pour réaliser des tâches complexes et surtout variées. Actuellement, les robots manquent de flexibilité et sont donc principalement utilisés sur des chaînes d'assemblages pour des grandes séries de production. L'ajout de dextérité et donc de flexibilité couplé à une automatisation peut permettre l'intégration de robots dans les petites et moyennes entreprises. A l'échelle macroscopique, il est important de planifier deux éléments en manipulation dextre : la saisie de l'objet puis son déplacement.

1.5.2.1/ PLANIFICATION DE LA SAISIE

Saisir l'objet est certainement une des étapes les plus importantes lors de la manipulation à l'échelle macroscopique. C'est pourquoi de nombreux travaux s'articulent autour de la recherche de la "meilleure" prise possible. Plus précisément, il est relativement facile de tester si une prise permet de saisir l'objet [Bicchi, 1995] mais il est sensiblement plus compliqué de déterminer quelle est la prise optimale. Pour ce faire, deux approches sont possibles [Sahbani et al., 2012] : i) des approches analytiques qui visent à étudier les prises par le prisme de leurs caractéristiques géométriques, cinématiques ou dynamiques ou ii) en utilisant des méthodes empiriques qui visent à reproduire la gestuelle humaine et à "apprendre" par mimétisme de l'Homme à saisir les objets.

Planification analytique Le principe sous-jacent de cette méthode est de calculer un ensemble de prises acceptables au vue des propriétés géométriques de l'objet et des caractéristiques de la main robotique. Historiquement cette méthode a été utilisée en premier pour déterminer les prises possibles pour des objets de type polygones ou polyèdres. Ainsi, en utilisant les propriétés géométriques des objets, des algorithmes ont été développés pour déterminer toutes les configurations acceptables pour des prises à trois doigts [Ponce et al., 1995], quatre doigts [Argall et al., 2009a] ou même n doigts [Liu, 1999]. Ces approches ont été étendues à des objets plus complexes aussi bien 2D que 3D [Li et al., 2003] [El-Khoury et al., 2009]. Toutefois, en raison de la complexité des objets 3D, ces approches ne permettent pas de déterminer l'ensemble des prises possibles en un temps de calcul raisonnable. C'est pourquoi, au lieu de tester l'ensemble des possibilités (de manière exhaustive), un ensemble de prises est généré aléatoirement [Borst et al., 2003] ou selon des règles prédéfinies. Finalement, l'algorithme d'optimisation cherche alors une solution sur un sous-ensemble de prises. Cette sélection s'effectue en mesurant la qualité des prises au travers de plusieurs critères dépendant de l'objet, du manipulateur et de la tâche [Roa et al., 2015]. Par exemple, il est possible de quantifier si les points de contact sont plus ou moins distribués uniformément sur la surface de l'objet [Park et al., 1992]. De même, il est possible de déterminer l'influence de chaque doigt sur la saisie [Kim et al., 2001] sachant qu'idéalement, tous les doigts contribuent de la même façon. Cette approche de la planification de prises présente l'avantage de pouvoir calculer l'ensemble des prises. Toutefois, la taille de cet ensemble constitue le principal inconvénient de cette méthode, et choisir la meilleure prise nécessite de prendre en

compte la tâche à réaliser. Or, il est très compliqué de trouver des critères capables de quantifier l'efficacité d'une prise pour une tâche donnée [Sahbani et al., 2012].

Planification empirique Cette méthode de planification considère qu'il n'est pas nécessaire de calculer les configurations utilisables mais, au contraire, qu'il est possible de trouver des prises en se basant sur des bases de connaissances (comme par exemple en observant l'homme saisir les objets [Argall et al., 2009b]). Basée sur des méthodes d'apprentissage, cette approche s'accommode plus facilement des incertitudes sur la forme de l'objet et sur l'exécution [Bohg et al., 2014]. Il est alors possible de distinguer trois cas de planification : pour les objets connus, similaires ou inconnus. Dans le cas des objets connus l'idée est de générer un ensemble de prises construit soit par simulation (en utilisant des méthodes similaires à la planification analytique), soit par démonstration [Romero et al., 2009] [Ekvall et al., 2007], ou soit par essai et erreur [Kroemer et al., 2010] [Stulp et al., 2011]. Une fois cet ensemble obtenu, la planification de saisie est réalisée en identifiant l'objet et en estimant sa pose dans l'environnement. Ceci permet alors de choisir la prise la plus adaptée à la position actuelle de l'objet. Dans le cas des objets similaires, l'idée est d'extraire des caractéristiques communes entre différents objets afin de déterminer quelle prise utiliser. A l'aide de fonctions discriminantes, il est possible de déterminer les zones qui peuvent être utilisées pour saisir les objets [El-Khoury et al., 2008] [Saxena et al., 2008]. Il est également possible de comparer l'objet à manipuler avec ceux présents dans la base de connaissances pour trouver celui qui s'en rapproche le plus [Li et al., 2005] [Dang et al., 2012]. Ainsi, les meilleures prises de l'objet issues de la base de données pourront être utilisées. Enfin, lorsque l'objet n'est similaire à aucun autre, la planification utilise une représentation partielle de l'objet afin de générer des prises potentielles. L'idée est ici d'approximer l'objet par des primitives (sphère, rectangle par exemple) sur lesquelles des prises acceptables peuvent être générées à l'aide d'heuristiques [Lippiello et al., 2013]. Évidemment toutes ces approches sont itératives puisque les nouvelles prises viennent enrichir la base de connaissances.

1.5.2.2/ PLANIFICATION DE LA MANIPULATION DEXTRE

La planification de mouvement dextre avec la main est un problème qui a clairement été formalisé depuis de nombreuses années [Li et al., 1989] [Han et al., 2000]. Ce problème est toutefois peu étudié par la communauté roboticienne qui préfère se focaliser sur les tâches de saisie. Néanmoins, des solutions diverses et variées existent. Il est possible de regrouper la majorité de ces méthodes dans deux ensembles : d'un côté les approches déterministes et de l'autre les approches probabilistes.

Les approches déterministes Les approches déterministes, dont sont issues les méthodes de planification à l'échelle micrométrique présentées précédemment, sont majoritairement basées sur l'exploitation de graphes tels que décrit dans la section 1.5.1. Le problème à résoudre est alors décrit complètement à l'aide du graphe. Ainsi l'ensemble des positions des doigts sur l'objet sont considérées et la planification de mouvement s'effectue en naviguant dans cet espace. Cette méthode permet de retourner des déplacements optimaux globalement [Trinkle et al., 1991] [Zhang et al., 1996] [Cherif et al., 1998], c'est-à-dire sur l'ensemble des prises décrivant le problème, ou bien localement [Hwang et al., 1992]. Cette différence s'explique uniquement par la méthode

utilisée pour naviguer dans le graphe modélisant le problème. L'avantage des approches déterministes est qu'elles garantissent que la manipulation planifiée est toujours la même et que s'il existe une solution elle sera forcément trouvée. Toutefois, plus le problème devient complexe et plus cette approche devient coûteuse en temps de calcul.

Les approches probabilistes A l'inverse, les approches probabilistes se basent sur une description aléatoire et partielle du problème. Dans cette approche, les nœuds du graphe sont générés itérativement de manière aléatoire puis un planificateur local cherche à les relier [Yashima et al., 2003]. Ainsi, les nœuds représentent une prise et une pose de l'objet dans l'espace tandis que les arêtes représentent le moyen de passer d'une configuration à une autre. De manière générale, ce type de planificateur ne prend pas en compte le roulement des doigts sur la surface de l'objet et suppose que le contact est ponctuel et ne change pas pendant le déplacement de l'objet [Saut et al., 2006]. Les approches probabilistes présentent l'avantage de générer des solutions rapidement. Toutefois, il n'est pas possible de déterminer si ces trajectoires sont optimales pour le problème complet. La solution obtenue dépend du graphe généré et donc pour un même problème il est possible d'obtenir différentes solutions. Il est à noter que peu de ces travaux (aussi bien pour les approches probabilistes que déterministes) ont été validés expérimentalement.

Autres approches Parmi les approches ne se basant pas sur l'exploration d'un graphe, il est possible de citer les travaux de Daoud [Daoud et al., 2012] dans lesquels la trajectoire de l'objet est pré-calculée puis décomposée en succession de petits déplacements (en position et en orientation). Le planificateur agit alors localement pour calculer le déplacement des doigts sur la surface de l'objet pour effectuer les translations et rotations de chaque déplacement. Si le déplacement des doigts n'est pas acceptable (collision ou limite des actionneurs par exemple) alors la prise est modifiée en utilisant les doigts qui ne sont pas en contact avec l'objet. La manipulation dextre est alors optimisée localement (pour chaque déplacement élémentaire) et non pas globalement. De plus, des techniques d'apprentissage par renforcement ont plus récemment été mise en œuvre afin d'apprendre au robot à effectuer les mouvements désirés à l'aide de quatre doigts [Schädle et al., 2013]. De manière générale, le problème de la planification pour la manipulation dextre n'est qu'un sous problème d'une thématique plus large qu'est la planification de mouvement (aussi bien pour les robots mobiles que manipulateurs). De ce fait, un panel de techniques très large existe [Latombe, 2012] et peut être aménagé pour fonctionner avec les contraintes de la manipulation dextre.

1.5.2.3/ SYNTHÈSE

Différentes méthodes existent pour planifier aussi bien la saisie que la manipulation dans la main. À l'échelle macro-métrique, la majorité des travaux sont focalisés sur la planification de la saisie tandis que la planification de manipulation dans la main reste souvent limitée à des simulations. De plus, ces planificateurs ne prennent pas en compte les comportements existant à l'échelle micrométrique. Il est donc nécessaire de mettre au point des méthodes de planification de manipulation dans la main utilisable à l'échelle micrométrique.

1.6/ CONCLUSION

Bilan de l'état de l'art La manipulation à l'échelle micrométrique a été fortement influencée par les techniques de manipulation macroscopique. En effet, les premiers micromanipulateurs étaient des micro-pinces à deux doigts de serrage similaire aux préhenseurs industriels. Toutefois, les problématiques inhérentes au micromonde ont poussé la communauté micro-roboticienne à développer de nouveaux modes de manipulation. De ce fait, une grande partie des travaux menés en micromanipulation sont actuellement orientés vers la manipulation sans contact (magnétique, optique, acoustique, etc.) qui permet de réduire significativement l'influence des phénomènes adhésifs. Dans le cadre de la réalisation de micro-assemblages, la manipulation sans contact n'est pas adaptée en raison des faibles forces de blocage qu'il est possible d'appliquer. De même, les micromanipulateurs capables de réaliser des opérations de micro-assemblage manquent de dextérité dans la mesure où les types d'objets manipulés et les mouvements réalisés ne sont pas suffisants pour espérer construire des microsystèmes complexes. L'explosion du marché des microsystèmes ces dernières années a montré que la miniaturisation des produits et des fonctionnalités était un besoin extrêmement fort et c'est pourquoi il est pertinent de concevoir des micromanipulateurs disposant d'un haut niveau de dextérité.

A l'échelle macroscopique, ce haut niveau de dextérité est atteint avec des systèmes robotiques complexes capable de reproduire des mouvements similaires à ceux de la main humaine. Il est alors naturel de vouloir s'inspirer des préhenseurs macroscopiques pour imaginer des micro-préhenseurs dextres. Toutefois, ces préhenseurs sont principalement utilisés pour des tâches de saisie et les rotations sont obtenues à l'aide du robot porteur. C'est pourquoi, les micro-préhenseurs dextres ne peuvent être conçu sur le même modèle.

Afin d'accroître la pénétration des systèmes de micromanipulation dans le domaine industriel, il est important d'améliorer leur autonomie. En effet, le développement des tâches de planification et de contrôle permet une meilleure réalisation des opérations de manipulation qu'elles soient télé-opérées ou totalement automatisées. Les méthodes développées actuellement, en particulier les méthodes de planification, ne prennent pas en compte les phénomènes du micromonde et se limitent à des tâches simples ce qui réduit le spectre des micromanipulations réalisables.

Positionnement de mes travaux Pour rappel, la thématique générale dans laquelle s'inscrit cette thèse est la micromanipulation dextre. Cette nouvelle thématique peut être scinder en trois axes de recherche :

- **Conception** : Conception et caractérisation d'un micro-préhenseur multi-digital permettant de réaliser des manipulations dans la main,
- **Planification** : Planification et génération des déplacements pour les doigts d'une micro-main dans le but d'automatiser la manipulation,
- **Commande** : Développement de lois de commande afin de garantir la précision et la répétabilité de la micro-main et des trajectoires de manipulation.

Mes travaux relèvent de l'axe planification. L'objectif est de proposer et d'analyser les performances de nouvelles méthodes de génération de trajectoires des doigts pour la micromanipulation dextre. L'originalité de ces travaux s'appuie sur l'utilisation de micro-

préhenseurs munis de plus de deux doigts et sur un nouveau paradigme de la micro-manipulation dextre, à savoir, l'exploitation des phénomènes d'adhésion. Cette approche permet de générer des processus de manipulation originaux, optimaux et spécifiquement adaptés au paradigme du micromonde. Cette thèse présente également une validation expérimentale des approches proposées sur un prototype simple de micro-main.

LA MICRO-MANIPULATION MULTI-DIGITALE DEXTRE

Sommaire

2.1	Présentation du problème	42
2.1.1	La manipulation dextre	42
2.1.2	La micromanipulation dextre	43
2.2	La modélisation du contact objet-doigt	44
2.2.1	Les différents modèles	44
2.2.2	Quel modèle pour la micromanipulation ?	46
2.3	Équilibre de prises	47
2.3.1	Équilibre statique	47
2.3.1.1	Mise en équation	47
2.3.1.2	Évaluation de la stabilité	49
2.3.2	Détachement stable	51
2.3.2.1	Détachement d'un doigt	52
2.3.2.2	Détachement du support	52
2.4	Cartographie de l'espace de planification	52
2.4.1	Carte d'équilibre, de reconfiguration et de prises initiales	53
2.4.1.1	Génération des cartes	53
2.4.1.2	Exemples de cartes	54
2.4.2	Influence du système de manipulation	56
2.4.2.1	Prise en compte et détection des collisions	56
2.4.2.2	Exemples de cartes avec collisions	58
2.4.3	Influence de l'orientation de l'objet	62
2.4.3.1	Cartographie multi-couches	62
2.4.3.2	Exemples de cartes	62
2.5	Conclusion	67

Ce chapitre présente les éléments nécessaires pour formaliser le problème de la génération automatique des déplacements des doigts lors d'une opération de micromanipulation dextre. L'objectif est de présenter en détail le problème que cette thèse cherche à résoudre ainsi que les équations régissant ce problème. Tout d'abord le problème de la micromanipulation dextre sera explicité ainsi que ses spécificités par rapport au cas plus classique de la manipulation dextre à l'échelle macro-métrique. Par la suite, le choix d'un modèle de contact adapté au micro-monde sera effectué afin de formaliser le problème de la manipulation dextre aux petites échelles. Enfin, l'espace sur lequel les déplacements sont générés sera modélisé et illustré. La méthode de résolution de ce problème de planification sera présentée et illustrée dans le chapitre suivant.

2.1/ PRÉSENTATION DU PROBLÈME

Cette section s'intéresse à la description du problème à résoudre ainsi qu'à l'impact du micromonde sur ce problème.

2.1.1/ LA MANIPULATION DEXTRE

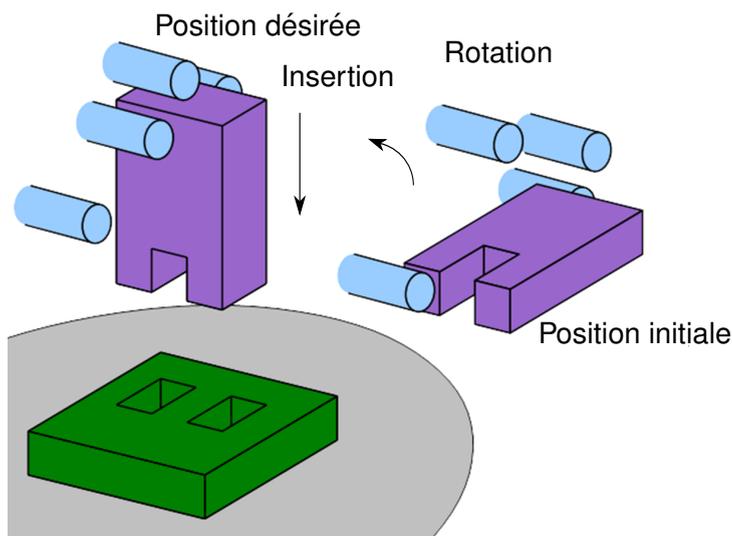


FIGURE 2.1 – Schématisation du problème de manipulation dextre par une main robotique munie de plusieurs doigts.

Nous considérons le cas général d'un objet manipulé par une main robotique munie de plusieurs doigts comme représenté sur la Fig. 2.1. Dans cet exemple, l'objectif est de manipuler un objet à l'aide de 4 doigts afin de le saisir depuis une configuration (position et orientation) donnée vers une configuration désirée. Ainsi deux étapes doivent être adressées afin de résoudre ce problème :

- **La saisie** : Où faut-il placer les doigts afin de saisir l'objet de manière optimale pour la tâche à réaliser ?
- **La manipulation** : Quels doivent être les déplacements des différents doigts afin de réaliser de manière optimale le passage de la configuration initiale vers la configuration finale ?

La réalisation de la manipulation dextre passe donc par l'obtention des déplacements des doigts. Ces déplacements, ou plus précisément ces trajectoires, sont des fonctions temporelles qui représentent les mouvements des doigts dans l'espace de travail.

A l'échelle macroscopique, le problème de la manipulation a été clairement posé par Li en 1989 [Li et al., 1989]. En effet, en considérant que l'objet est muni d'un repère R_o et qu'il existe un repère de référence R_{ref} lié à la main robotique, l'espace des configurations de l'objet par rapport à la main est représenté par le groupe spécial Euclidien $SE_o(3)$. De la même manière, l'espace des configurations de chaque doigt i par rapport à la main est également représenté par le groupe spécial Euclidien $SE_i(3)$. Dès lors, l'espace des configurations du système complet (objet plus doigts) est représenté par l'ensemble suivant :

$$G = SE_o(3) \times SE_1(3) \times \dots \times SE_N(3), \quad (2.1)$$

où N représente le nombre de doigts de la main robotique. Une prise de l'objet $g \in G$ par la main est donc de la forme $g = (g_o, g_1, \dots, g_N)$. Il est à noter que la notion de prise inclut également les doigts lorsqu'ils ne sont pas en contact avec l'objet. De même, aucune hypothèse n'est faite sur la nature de la prise qui peut donc être, par exemple, en équilibre ou instable.

De manière similaire, il est possible de définir l'espace des configurations des doigts par :

$$C = SE_1(3) \times \dots \times SE_N(3). \quad (2.2)$$

Comme les déplacements des doigts sont contrôlés par les mouvements des actionneurs de la main, cet espace est appelé l'espace de contrôle. De ce fait, une trajectoire dans C peut être réalisée en spécifiant les déplacements adéquats aux actionneurs.

Ainsi le problème de la manipulation dextre est le suivant [Li et al., 1989] :

Problème 1 : La manipulation dextre

Étant données deux prises $(g_1, g_2) \in G \times G$, construire une trajectoire $\gamma(t) \in C$ ($t \in [0, t_f]$) admissible et continue par morceaux telle que γ soit projetable en une courbe $\alpha(t) \in P$ reliant g_1 à g_2 (i.e $\alpha(0) = g_1$ et $\alpha(t_f) = g_2$).

La notion d'admissibilité renvoie ici au respect des différentes contraintes de mouvement. Par exemple, pour une manipulation par glissement, il est nécessaire que la trajectoire définie dans C respecte les contraintes cinématiques et dynamiques imposées par ce mode de manipulation. Il est également nécessaire que les contraintes cinématiques de la main robotique soient respectées (toutes les configurations de $SE(3)$ ne sont pas forcément atteignables). De même, les contraintes de collisions doivent être respectées pour obtenir une trajectoires admissible.

Évidemment, cette définition du problème par Li ne prend pas en compte le problème de la saisie, à savoir quelle prise effectuer pour former g_1 .

2.1.2/ LA MICROMANIPULATION DEXTRE

La définition du problème présentée précédemment est très générique puisqu'elle n'impose aucune contraintes sur les prises, les modes de manipulation ou même les objets.

Cependant, le problème que cette thèse cherche à adresser est plus spécifique. Ainsi plusieurs hypothèses sont retenues dans notre cas :

Problème micro-métrique : Comme expliqué dans le chapitre précédent, les effets d'échelle vont limiter les modes de manipulation possibles. En effet, du fait de l'absence de capteurs de force suffisamment précis, la manipulation par glissement n'est pas adaptée. De plus, toutes les rotations sont réalisables par une combinaison de roulements sans glissement et de repositionnements. C'est pourquoi la manipulation est réduite à ces deux modes. En outre, certaines forces (en particulier l'inertie) deviennent négligeables aux petites échelles. Ainsi, la micromanipulation peut être considérée comme une manipulation quasi-statique c'est-à-dire comme une succession de prises où l'objet est en équilibre. De ce fait, l'espace sur lequel la trajectoire doit être planifiée, nommé espace de planification, est plus restreint que dans le cas général. Ce nouvel espace est donc un sous ensemble de l'espace des configurations et contient uniquement les prises qui garantissent une saisie à l'équilibre de l'objet.

Application aux micro-assemblages : Le cadre applicatif de cette thèse concerne l'automatisation de tâches de micro-assemblage. Les objets à manipuler sont, dès lors, considérés comme connus et rigides. Il ne s'agit donc pas de planifier des tâches de manipulation pour des objets de formes inconnues. Ainsi, les espaces de configurations sont bien identifiés et parfaitement connus en particulier celui de l'objet. Nous veillons cependant à développer une méthode générique qui puisse être utilisée pour n'importe quelle forme d'objet.

Ainsi, afin de proposer une formalisation du problème de la micro-manipulation dextre, il est nécessaire d'explicitier l'espace de planification lié au micro-objet à manipuler. Les sections suivantes décrivent comment nous avons choisi de formaliser cet espace qui sera ensuite exploité pour générer les trajectoires des doigts lors de la manipulation dextre. La formalisation utilisée permet de traiter le cas général de la manipulation tri-dimensionnelle. Toutefois, les illustrations, tout comme les résultats présentés dans les chapitres suivants, concernent seulement des problèmes de manipulations planaires.

2.2/ LA MODÉLISATION DU CONTACT OBJET-DOIGT

L'espace de planification contient les prises qui garantissent l'équilibre de l'objet dans la micro-main. Pour évaluer cette propriété, il est nécessaire de modéliser le contact entre les doigts et l'objet.

2.2.1/ LES DIFFÉRENTS MODÈLES

A l'échelle macroscopique, il est possible de modéliser ce contact de trois manières différentes comme illustré par la Fig. 2.2 : a) sans frottement, b) avec frottement et c) avec frottement et déformation.

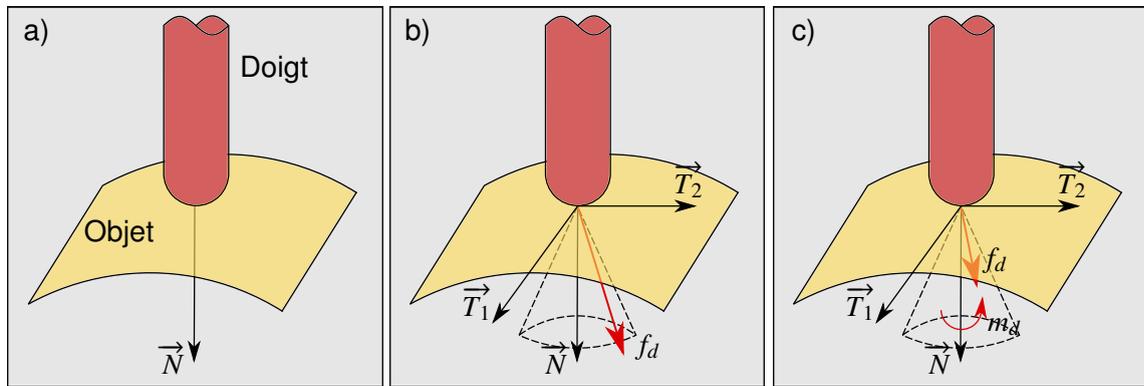


FIGURE 2.2 – Illustration des trois modèles de contact : a) modélisation sans frottement, b) modélisation avec frottement, c) modélisation avec frottement et déformation.

Modèle sans frottement La modélisation la plus simple du contact objet-doigt peut se faire à l'aide d'un modèle dit sans frottement. De ce cas, le contact se produit en un point et le doigt peut uniquement appliquer une force le long de la normale au contact. La force, \vec{f}_d , appliquée par un doigt est donc de la forme :

$$\begin{cases} \vec{f}_d = f_n \vec{N} \\ f_n > 0 \end{cases}, \quad (2.3)$$

où \vec{N} représente le vecteur normal à la surface de l'objet et f_n l'amplitude de la force appliquée par le doigt.

Modèle avec frottement Une autre manière de modéliser le contact objet-doigt est de considérer un contact ponctuel avec frottement. Ce type de contact est alors modélisé par la loi de *Coulomb*. Dans ce modèle, le point de contact reste fixe tant que la force appliquée est incluse dans un cône dit de frottement. Ainsi, la force appliquée par le doigt au point de contact peut contenir des composantes tangentielles. Dès lors, la force appliquée par un doigt, \vec{f}_d , peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \vec{f}_d = f_{t1} \vec{T}_1 + f_{t2} \vec{T}_2 + f_n \vec{N} \\ \sqrt{f_{t1}^2 + f_{t2}^2} \leq \mu f_n \\ f_n > 0 \end{cases}, \quad (2.4)$$

où f_{t1} et f_{t2} représentent les forces appliquées dans les directions tangentielles (\vec{T}_1 et \vec{T}_2) à la surface de contact et μ est le coefficient de frottement entre l'objet et le doigt.

Modèle avec frottement et déformation Dans le cas de contact suffisamment large, il est possible de prendre en compte le moment de frottement, c'est-à-dire que le doigt peut alors exercer sur l'objet un moment, \vec{m}_d , porté par la normale au contact. La force de contact exercée reste, quant à elle, similaire au modèle avec frottement. Ainsi l'action du doigt sur l'objet peut s'écrire de la manière suivante :

$$\begin{cases} \vec{f}_d = f_{t_1} \vec{T}_1 + f_{t_2} \vec{T}_2 + f_n \vec{N} \\ \vec{m}_d = m_n \vec{N} \\ f_n > 0 \end{cases}, \quad (2.5)$$

où m_n représente l'amplitude du moment appliqué par le doigt.

Dans ce modèle, la force de contact est toujours modélisée par la loi de *Coulomb* et reste systématiquement incluse dans le cône de frottement.

2.2.2/ QUEL MODÈLE POUR LA MICROMANIPULATION ?

Dans les modèles présentés précédemment, la force appliquée par un doigt le long de la normale ne peut être que dirigée vers l'objet ($f_n > 0$). Ainsi, il est uniquement possible de pousser un objet avec un doigt. Cette modélisation, en accord avec la physique du macro-monde, ne prend pas en compte la spécificité du micro-monde : l'adhésion. En effet, les forces d'adhésion permettent, en plus, de venir tirer l'objet et donc d'appliquer une force normale négative. Il faut donc modifier ce modèle afin qu'il tienne compte des propriétés de l'échelle micrométrique [Ando et al., 1997] [Régnier et al., 2008].

Dans le cas du modèle sans frottement, l'intégration des forces d'adhésion se fait de la façon suivante :

$$\begin{cases} \vec{f}_d = f_n \vec{N} \\ f_n > -f_{po} \end{cases}, \quad (2.6)$$

où f_{po} représente l'effort dit de "pull-off" nécessaire pour rompre le contact entre le doigt et l'objet. Il est à noter qu'il n'est pas possible de tirer sur l'objet avec une force plus grande que la force de pull-off.

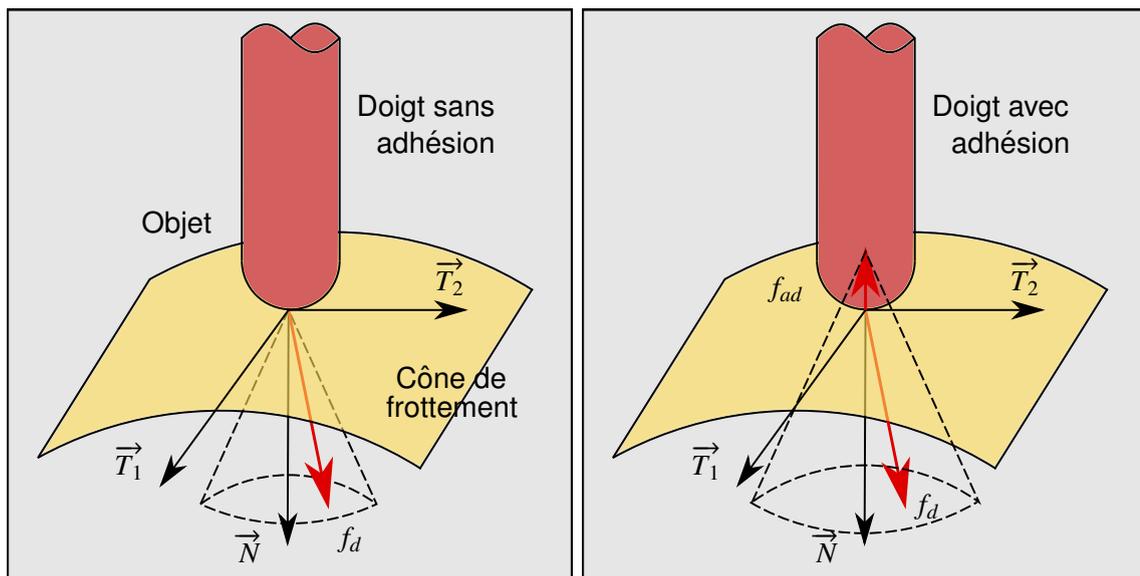


FIGURE 2.3 – Illustration de l'influence de l'adhésion sur le cône de frottement.

De même, les modèles avec frottement et adhésion peuvent se formuler de la manière suivante :

$$\begin{cases} \vec{f}_d = f_{t1}\vec{T}_1 + f_{t2}\vec{T}_2 + f_n\vec{N} \\ \sqrt{f_{t1}^2 + f_{t2}^2} \leq \mu(f_n + f_{po}) \end{cases} \quad (2.7)$$

Le modèle ainsi proposé est spécifique aux échelles micrométriques et peut être considéré comme un modèle enrichi de la loi de *Coulomb* utilisée à l'échelle macroscopique. La Fig. 2.3 illustre ce nouveau modèle par rapport au modèle classique.

La suite de ce manuscrit ne considérera que le modèle enrichi de contact ponctuel avec frottement. En effet, les objets utilisés en micro-assemblage sont souvent réalisés à base de silicium qui est un matériau dur induisant du frottement mais dont la déformation locale peut être négligée. Ainsi, nous avons fait l'hypothèse que le contact entre les micro-doigts et le micro-objet peut être considéré comme ponctuel.

2.3/ ÉQUILIBRE DE PRISES

A l'échelle micrométrique, puisque nous considérons la manipulation quasi-statique, l'espace de planification est composé des prises garantissant l'équilibre de l'objet. Il est donc nécessaire de définir lorsqu'une prise est à l'équilibre. Pour ce faire, il est possible de se servir du modèle de contact retenu dans la section précédente. De plus, dans le cas du problème micrométrique, deux cas d'équilibre sont à considérer :

- **L'équilibre statique** : qui permet de déterminer si une prise utilisant N doigts permet de maintenir l'objet en équilibre.
- **Le détachement stable** : qui permet de savoir si le retrait d'un doigt peut être réalisé sans que l'objet reste en contact avec le doigt retiré.

Le premier problème existe quelle que soit l'échelle de manipulation considéré tandis que le second est une conséquence des effets d'adhésion.

2.3.1/ ÉQUILIBRE STATIQUE

2.3.1.1/ MISE EN ÉQUATION

Dans le cas général d'une prise réalisée par N doigts en présence d'efforts extérieurs, l'équilibre statique est obtenu si et seulement si les efforts appliqués par les N doigts plus les efforts extérieurs appliqués sur l'objet sont nuls. Ce qui, une fois exprimé dans un repère $R(x, y, z)$ lié à l'objet, s'écrit sous la forme suivante :

$$- w_{ext} = \sum_{i=1}^N w_{c_i}, \quad (2.8)$$

où w_{ext} représente le torseur (forces et moments) des efforts externes appliqué sur l'objet et $w_{c_i} \in \mathfrak{R}^6$ représente le torseur résultant appliqué par le i^{eme} doigt¹. Ce torseur peut également être exprimé en fonction du point de contact, c_i , et des forces appliquée au contact \vec{f}_{c_i} :

1. Tous les torseurs doivent être exprimés au même point O de référence.

$$w_{c_i} = \begin{bmatrix} \vec{f}_{c_i} \\ \vec{O}_{c_i} \times \vec{f}_{c_i} \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

Or chacune des forces est contrainte par les conditions de contact établies par l'équation (2.7). Ainsi, une prise à N doigts est à l'équilibre statique si et seulement si il existe un ensemble de forces de serrage f_c qui respecte l'équation (2.8) et la contrainte de non glissement définie par l'équation (2.7). Nous allons par la suite combiner ces deux équations afin d'obtenir une formulation unique intégrant les deux contraintes.

Cas sans adhésion Afin d'introduire de manière pédagogique notre représentation, nous considérons premièrement un contact sans adhésion. Le problème peut alors être réécrit à l'aide de l'équation (2.4). En effet, le torseur résultant, w_{c_i} issu de l'action du doigt i peut s'exprimer comme une combinaison linéaire des torseurs qui approximent le cône de frottement :

$$\begin{cases} w_{c_i} = \sum_j \alpha_{i,j} w_{l_j,i} \\ \alpha_{i,j} \geq 0 \end{cases}, \quad (2.10)$$

où $w_{l_j,i}$ sont des torseurs qui approximent le cône de frottement (voir Fig. 2.4) et $\alpha_{i,j}$ des coefficients positifs qui garantissent que la résultante reste dans le cône de frottement.

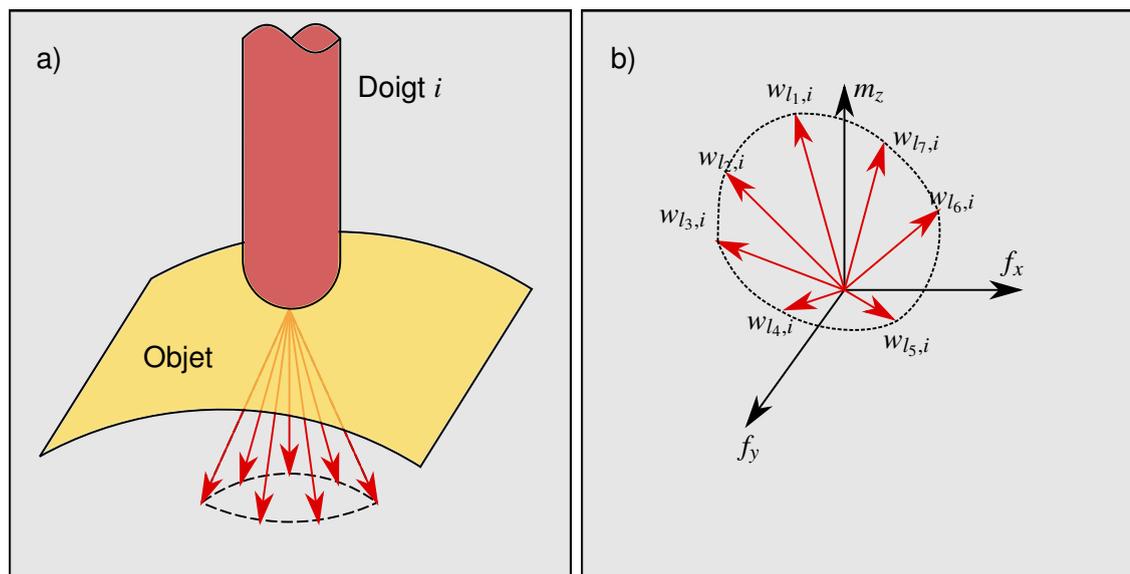


FIGURE 2.4 – Linéarisation d'un cône de frottement. a) représentation du cône linéarisé à la surface de l'objet, b) représentation du cône dans l'espace des torseurs (seuls trois dimensions (f_x, f_y, m_z) sur six $(f_x, f_y, f_z, m_x, m_y, m_z)$ sont représentées).

L'équation (2.8) peut alors se mettre sous la forme suivante :

$$\begin{cases} -w_{ext} = \sum_{i=1}^N w_{c_i} = \sum_{i=1}^N \left(\sum_j \alpha_{i,j} w_{l_j,i} \right) \\ \alpha_{i,j} \geq 0 \end{cases}. \quad (2.11)$$

Le problème de l'équilibre statique revient alors à chercher un ensemble de coefficients positifs $\alpha_{i,j}$ (pas tous égaux à zéro) vérifiant l'équation précédente.

Cas avec adhésion L'adhésion et les spécificités d'échelle du micro-monde modifient légèrement le formalisme précédent. En effet, lorsque l'adhésion est présente, un torseur supplémentaire, le torseur d'adhésion noté w_{poi} , est ajouté dans l'équation (2.10). De ce fait, le torseur résultant pour l'action d'un doigt i s'écrit alors :

$$\begin{cases} w_{c_i} = \sum_j \alpha_{i,j} \cdot w_{l_{j,i}} + \beta_i \cdot w_{poi} \\ \alpha_{i,j} \geq 0 \\ 1 > \beta_i \geq 0 \end{cases}, \quad (2.12)$$

où β_i correspond à un coefficient quantifiant l'impact de l'adhésion dans le contact : $\beta_i = 0$ l'adhésion n'a pas d'impact, $\beta_i = 1$ l'adhésion est maximale.

Dès lors, la forme générale de l'équation (2.11) devient alors fonction des torseurs d'adhésion :

$$\begin{cases} -w_{ext} = \sum_{i=1}^N w_{c_i} = \sum_{i=1}^N \left(\sum_j \alpha_{i,j} \cdot w_{l_{j,i}} + \beta_i \cdot w_{poi} \right) \\ \alpha_{i,j} \geq 0 \\ 1 > \beta_i \geq 0 \end{cases}. \quad (2.13)$$

Une prise fait donc partie de l'espace de planification s'il existe un ensemble de coefficients $(\alpha_{i,j}, \beta_i)$ satisfaisant l'équation (2.13).

2.3.1.2/ ÉVALUATION DE LA STABILITÉ

Le système d'équations (2.13) présente généralement plus d'inconnues que d'équations rendant le calcul des solutions de manière algébrique impossible. Il est donc nécessaire d'utiliser des techniques d'optimisation afin de trouver des solutions numériques. Cependant, la construction de l'espace de planification ne requiert pas de calculer explicitement les forces. Il suffit de prouver l'existence de cette solution pour déterminer si une prise est à l'équilibre ou non.

Cette opération peut s'effectuer à l'aide des torseurs des cônes de frottement. Dans le cas sans adhésion, l'enveloppe convexe formée par les torseurs $w_{l_{i,j}}$ représente l'ensemble des efforts applicables sur l'objet par le doigt i . Dès lors, pour une saisie à N doigts, l'effort total applicable sur l'objet par la main est caractérisé par l'enveloppe convexe [Ponce et al., 1995]. Ainsi pour garantir l'existence d'une solution au problème d'équilibre il faut s'assurer que l'inverse du torseur des efforts extérieurs ($-w_{ext}$) est inclus dans cette enveloppe convexe. La Fig. 2.5 illustre cette propriété dans le cas d'une prise planaire. Dans cet exemple, les torseurs sont représentés par des forces sur les axes x et y et des moments sur l'axe z . L'objectif est de déterminer si la prise à deux doigts (Fig. 2.5a) est une prise stable. L'enveloppe convexe représentée sur la Fig. 2.5b est formée par les torseurs $w_{l_{1,1}}$, $w_{l_{2,1}}$, $w_{l_{1,2}}$ et $w_{l_{2,2}}$ qui délimitent les cônes de frottement. En l'absence de forces extérieures, il suffit que l'origine soit incluse dans l'enveloppe pour garantir l'existence d'une solution. On remarque alors que cette prise n'est pas stable.

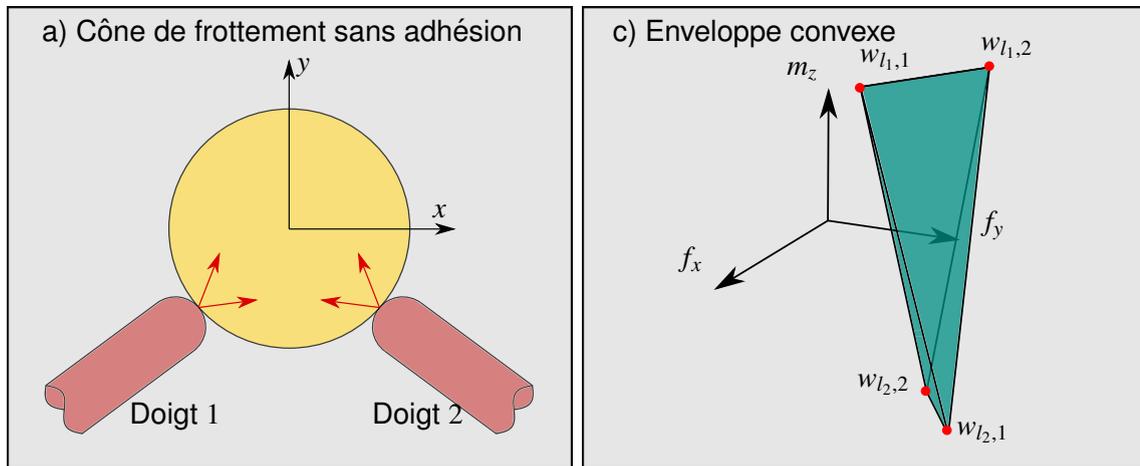


FIGURE 2.5 – Illustration de l'enveloppe convexe représentant l'ensemble des efforts applicables à l'objet dans le cas d'une prise plane à deux doigts sans adhésion. a) représentation de la prise et des cônes de frottement, b) représentation de l'enveloppe convexe résultante

Dans le cas avec adhésion, l'enveloppe convexe formée par les torseurs $w_{l_{i,j}}$ et w_{poi} ne représente pas exactement l'ensemble des efforts applicables. Pour décrire entièrement l'enveloppe convexe liée au modèle de contact présenté précédemment, il est nécessaire de considérer des torseurs $w_{l_{i,j}}$ légèrement modifiés. En effet, la composante tangentielle correspondant au décalage du cône de frottement doit leur être ajoutée. Ces nouveaux torseurs sont notés $w_{l_{i,j}}^*$. La Fig. 2.6 illustre les enveloppes convexas avec et sans prise en compte de la composante tangentielle supplémentaire dans le cas d'une prise plane. On remarque que les deux enveloppes sont légèrement différentes et qu'il en est donc de même pour les efforts applicables. Il est à noter que cette prise est à l'équilibre en l'absence d'efforts extérieurs puisque l'origine est incluse dans l'enveloppe.

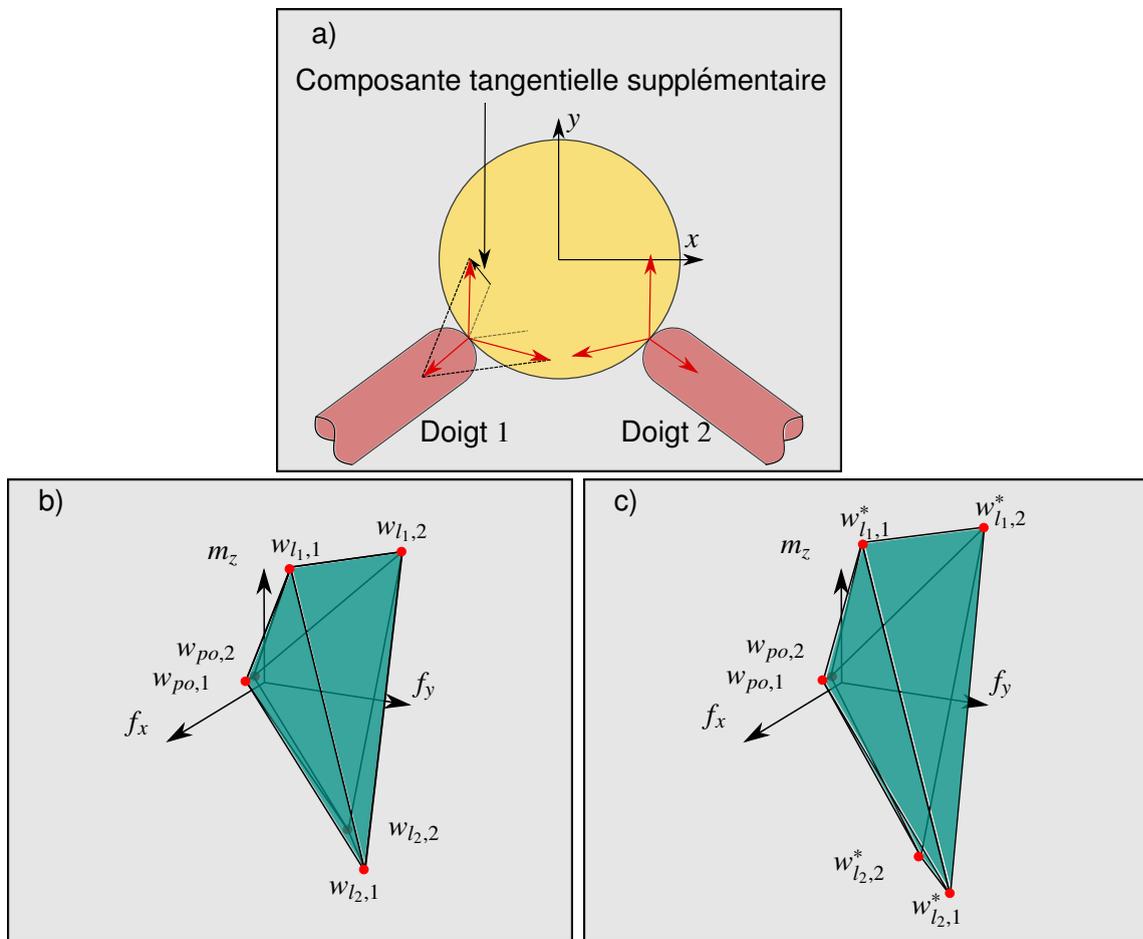


FIGURE 2.6 – Illustration de l’enveloppe convexe représentant l’ensemble des efforts applicables à l’objet dans le cas d’une prise plane à deux doigts sans adhésion. a) représentation de la prise et des cônes de frottement, b) représentation de l’enveloppe convexe résultante sans prise en compte de l’effort tangentielle supplémentaire, c) représentation de l’enveloppe convexe résultante avec prise en compte de l’effort tangentielle supplémentaire

2.3.2/ DÉTACHEMENT STABLE

Pour la micromanipulation, considérer uniquement les prises garantissant l’équilibre de l’objet ne suffit pas. Lors d’une opération de manipulation dextre, les doigts sont généralement repositionnés pour palier à certaines limites (course des actionneurs, limite du cône de frottement, etc.). Or à l’échelle micrométrique, le retrait d’un doigt peut perturber l’équilibre de la prise. En effet, en raison de l’adhésion, le détachement d’un doigt engendre un effort sur l’objet qui peut engendrer une perte d’équilibre. Ainsi, la planification de trajectoire nécessite l’identification d’un sous ensemble de prises que nous nommerons les prises de reconfiguration incluant les prises à l’équilibre pour lesquelles un des doigts peut être retiré.

2.3.2.1/ DÉTACHEMENT D'UN DOIGT

Considérons le cas d'une prise à N doigts pour laquelle, le doigt N est retiré. Pour garantir l'équilibre de l'objet, il est nécessaire que les $N - 1$ doigts restant résistent à l'effort engendré par les forces d'adhésion au niveau du N^{ieme} contact ainsi qu'aux autres efforts extérieurs qui agissent sur l'objet. Cela peut se traduire sous la forme suivante :

$$-w_{ext} - w_{poN} = \sum_{i=1}^{N-1} w_{c_i}, \quad (2.14)$$

où w_{poN} représente le torseur induit par le détachement du N^{ieme} doigt (force de pull-off).

De manière similaire au problème d'équilibre de prise précédent, il est possible de réécrire l'équation (2.14) en fonction des cônes de frottement des $N - 1$ doigts restants. Le problème du détachement du N^{ieme} doigt consiste alors à trouver des coefficients $(\alpha_{i,j}, \beta_i)$ positifs vérifiant l'équation suivante :

$$\begin{cases} -w_{ext} - w_{poN} = \sum_{i=1}^{N-1} w_{c_i} = \sum_{i=1}^{N-1} \left(\sum_j \alpha_{i,j} \cdot w_{l_{j,i}} + \beta_i \cdot w_{po_i} \right) \\ \alpha_{i,j} \geq 0 \\ 1 > \beta_i \geq 0 \end{cases} . \quad (2.15)$$

L'ensemble des prises de reconfiguration est donc constitué des prises qui admettent une solution au problème de l'équilibre statique (2.13) et au problème du détachement (2.15). De manière similaire au problème de l'équilibre statique, il est possible d'utiliser l'enveloppe convexe formée par les $N - 1$ doigts restant afin de tester si une solution au problème (2.15) existe.

2.3.2.2/ DÉTACHEMENT DU SUPPORT

A l'échelle micrométrique, une autre problématique induite par l'adhésion est le détachement de l'objet du support. Ce cas spécifique correspond au fait que la prise initiale doit permettre de contrer la force d'adhésion entre l'objet et le support. En considérant que le support représente un doigt d'un rayon infini, le problème du détachement du support est identique à celui du détachement d'un des doigts pendant une prise. Ainsi, les mêmes méthodes peuvent être utilisées pour tester si une prise est admissible comme prise initiale.

2.4/ CARTOGRAPHIE DE L'ESPACE DE PLANIFICATION

La section précédente a détaillé les prises qui sont incluses dans l'espace de planification ainsi qu'une méthode pour vérifier si une prise appartient à cet ensemble. Considérant que la forme de l'objet à manipuler est connue (typiquement un modèle CAO du micro-objet), il est possible d'expliciter cet espace sous la forme d'une cartographie. Ainsi, trois type de cartes sont nécessaires :

- **Les cartes d'équilibre (notées M)** : qui regroupent l'ensemble des prises garantissant l'équilibre statique de l'objet en utilisant 1, 2, ..., N doigts,

- **Les cartes de reconfiguration (notées D)** : qui représentent l'ensemble des prises garantissant l'équilibre statique et pour lesquelles un des doigts peut être retiré sans perturber l'équilibre de la prise,
- **Les cartes de prises initiales (notées I)** : qui regroupent l'ensemble des prises garantissant l'équilibre statique ainsi que le détachement du support.

Dans un soucis de clarté pédagogique, ces cartes seront présentées tout d'abord en ne considérant que les doigts. Cela permettra au lecteur de se familiariser avec la représentation choisie. Par la suite, les cartes seront modifiées afin de prendre en compte la structure de la micro-main ainsi que la configuration de l'objet.

2.4.1/ CARTE D'ÉQUILIBRE, DE RECONFIGURATION ET DE PRISES INITIALES

2.4.1.1/ GÉNÉRATION DES CARTES

Carte d'équilibre M Afin de construire les différentes cartes, nous supposons que l'objet est connu et représenté numériquement par un ensemble de points espacés régulièrement sur sa surface. Ces points déterminent les positions sur lesquelles les doigts peuvent venir se poser. Dans le cas d'un problème quelconque ($w_{ext} \in \mathfrak{R}^6$), l'obtention des cartes d'équilibre se fait en testant, pour l'intégralité des combinaisons de prises, si l'enveloppe convexe formée par les torseurs des cônes de frottement ($w_{l_j,i}$ et $w_{ad,i}$) contient le torseur des forces extérieures ($-w_{ext}$). Ainsi, la carte d'équilibre $M_{1,\dots,k}$, correspondant aux prises de l'objet à l'équilibre utilisant les doigts 1 à k , peut être formalisée de la manière suivante :

$$M_{(1,\dots,k)} = \left\{ c = (c_1, \dots, c_k) \in \mathfrak{R}^{(3 \times k)} \mid \right. \quad (2.16)$$

$$\left. -w_{ext} \in \text{Conv hull}(w_{l_1,1}^*, \dots, w_{l_j,k}^*, w_{po_1}, \dots, w_{po_k}) \right\},$$

où c est un vecteur contenant les coordonnées cartésiennes (x, y, z) des points de contact sur la surface de l'objet et $\text{Conv hull}(w_{l_1,1}, \dots, w_{l_k,j}, w_{po_1}, \dots, w_{po_k})$ l'enveloppe convexe.

Dans le cas général d'une micro-main à N doigts, il existe $2^N - 1$ cartes d'équilibre différentes (une carte correspond à une combinaison de k doigts en contact avec $k \in [1, \dots, N]$). Lorsque tous les doigts sont considérés identiques, le nombre de cartes peut être réduit à N .

Carte de reconfiguration D Lors d'une reconfiguration, pour garantir qu'un doigt i puisse être retiré de l'objet sans perturber la saisie, il est nécessaire que le torseur résultant $-w_{po_i}$, induit par la force de pull-off f_{po_i} , soit inclus dans l'enveloppe convexe formée par les torseurs des cônes de frictions des contacts restants (2.15). Il est alors possible de formaliser l'ensemble des prises correspondant au détachement du doigt i lors d'une saisie utilisant les doigts 1 à k . Il est à noter que les prises de départ (à k doigts) et d'arrivés (à $k - 1$ doigts) doivent être stables et donc incluses respectivement dans $M_{(1,\dots,k)}$ et $M_{(1,\dots,i-1,i+1,\dots,k)}$.

$$\begin{aligned}
D_{(1,\dots,k)_i} = & \left\{ c = (c_1, \dots, c_i, \dots, c_k) \in \mathfrak{R}^{(3 \times k)} \mid \right. \\
& (c_1, \dots, c_i, \dots, c_k) \in M_{(1,\dots,k)}, \\
& (c_1, \dots, c_{i-1}, c_{i+1}, \dots, c_k) \in M_{(1,\dots,i-1,i+1,\dots,k)}, \\
& \left. -w_{ext} - w_{po,i} \in \text{Conv hull}(w_{l_1,1}^*, \dots, w_{l_j,i-1}^*, w_{l_j,i+1}^*, \dots, w_{l_j,k}^*, w_{po_1}, \dots, w_{po_{i-1}}, w_{po_{i+1}}, \dots, w_{po_k}) \right\}.
\end{aligned} \tag{2.17}$$

Dès lors la carte de reconfiguration pour une prise utilisant les doigts 1 à k s'exprime comme l'union des ensembles $D_{(1,\dots,k)_i}$:

$$D_{(1,\dots,k)} = \bigcup_{i=1}^k D_{(1,\dots,k)_i} \tag{2.18}$$

et il existe $2^{N-1}N - N$ cartes de reconfiguration dans le cas d'un manipulateur à N doigts. De manière évidente, il n'existe pas de carte de reconfiguration lorsque moins de deux doigts sont utilisés.

Carte de prises initiales I Lorsqu'il existe des effets d'adhésion entre le support et l'objet, la carte des prises initiales utilisant les doigts 1 à k est définie par l'ensemble suivant :

$$\begin{aligned}
I_{(1,\dots,k)} = & \left\{ c = (c_1, \dots, c_k) \in \mathfrak{R}^{(3 \times k)} \mid \right. \\
& (c_1, \dots, c_k) \in M_{(1,\dots,k)}, \\
& \left. -w_{ext} - w_{ad,sup} \in \text{Conv hull}(w_{l_1,1}^*, \dots, w_{l_j,k}^*, w_{ad_1}, \dots, w_{ad_k}) \right\}.
\end{aligned} \tag{2.19}$$

De manière similaire aux cartes d'équilibre, pour un manipulateur à N doigts, il existe $2^N - 1$ cartes de prises initiales. Dans le cas où les effets d'adhésion ne sont pas présent entre le support et l'objet, les cartes de prises initiales I sont réduites aux cartes d'équilibre M .

Ainsi, il est possible d'expliciter l'ensemble des prises utilisables lors de la tâche de micro-manipulation dextre. Ces prises sont réparties en trois ensembles : les prises initiales qui permettent de saisir l'objet depuis son support, les prises d'équilibre qui permettent de maintenir l'objet pendant la manipulation et les prises de reconfiguration qui permettent de changer les doigts en contact. Pour un objet et des doigts donnés, il est donc possible d'obtenir une cartographie de l'espace de planification.

2.4.1.2/ EXEMPLES DE CARTES

Afin d'illustrer ces ensembles de manière lisible, il a été fait le choix de considérer un problème de manipulation dextre planaire. L'objet à saisir est un cercle, il faut donc déterminer toutes les configurations de doigts qui permettent de maintenir l'objet à l'équilibre. Dans le cas d'un problème plan, la position du doigt est représentée par ses coordonnées cartésiennes x et y . Toutefois, lorsque le doigt est en contact avec l'objet il est possible de se ramener à une représentation unidimensionnelle en utilisant l'abscisse

curviligne qui correspond à la longueur d'arc entre le point de contact et une origine arbitrairement choisie sur la surface de l'objet. De cette façon une prise est définie par les positions curvilignes des doigts sur l'objet. Contrairement à la représentation cartésienne, la représentation curviligne permet d'illustrer facilement les prises. En effet, la position d'un doigt est alors représentée par un seul paramètre ce qui permet d'illustrer les prises à deux doigts dans un plan et les prises à trois doigts dans un volume.

Carte d'équilibre La Fig. 2.7(gauche) illustre la carte d'équilibre associée aux doigts 1 et 2 ($M_{(1,2)}$) dans le cas de la manipulation d'un cercle. Les zones vertes correspondent aux configurations d'équilibre, c'est-à-dire pour lesquelles il existe une solution à l'équation (2.13). Pour cet exemple, les forces d'adhésion sont considérées nulles ($\forall i, w_{ad_i} = 0$) tout comme les perturbations externes ($w_{ext} = 0$). Cette carte est symétrique puisque le fait de permuter les deux doigts mène à une prise identique. Ainsi en considérant seulement l'objet et les doigts, on a $M_{(1,2)} = M_{(i,j)}, \forall (i, j)$. Du fait de l'absence de forces d'adhésion, les bandes vertes, qui représentent les prises stables, ont une largeur proportionnelle à l'ouverture du cône de frottement. La Fig. 2.7(droite) montre une prise incluse dans $M_{1,2}$ qui permet de maintenir l'objet à l'équilibre.

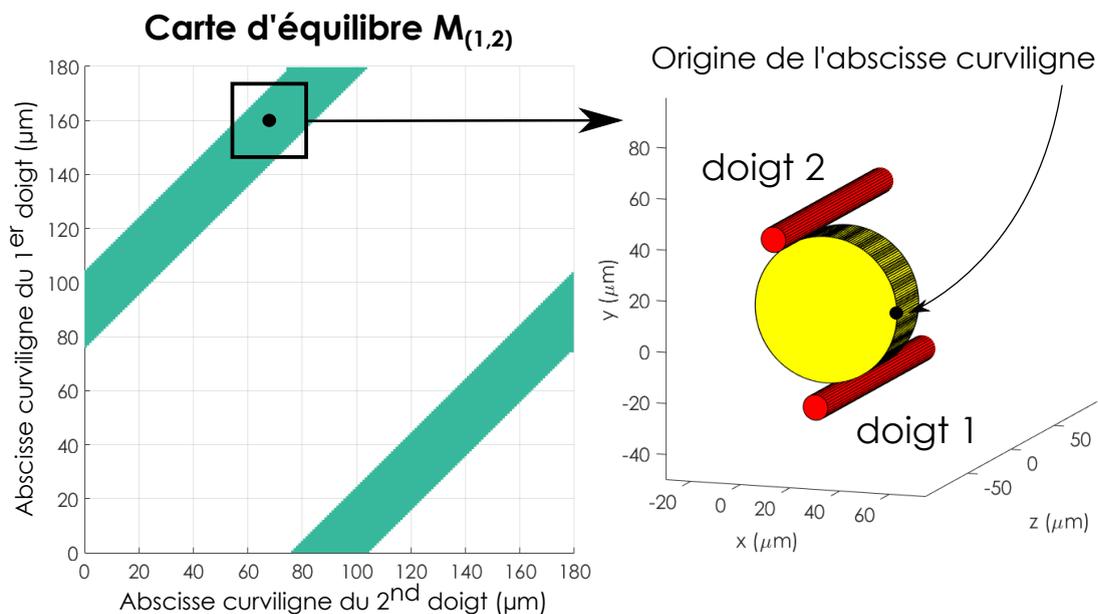


FIGURE 2.7 – Représentation de l'ensemble $M_{(1,2)}$ (carte d'équilibre) dans le cas d'un cercle sans considérer de perturbations externes ($w_{ext} = 0$) ni de forces d'adhésion ($\forall i, w_{ad_i} = 0$).

Carte de reconfiguration Afin d'illustrer les cartes de reconfiguration, considérons le cas des prises à trois doigts pour lesquelles un des doigts est retiré. Dans cet exemple, aucune force extérieure n'est considérée mais les forces d'adhésion sont non nulles. Pour des raisons de clarté de représentation graphique, la Fig. 2.8(gauche) montre seulement un sous-ensemble de la carte de reconfiguration associée au détachement du doigt 3 $D_{(1,2,3)_3}$. Ce sous ensemble correspond aux prises garantissant l'équilibre lorsque le doigt retiré est situé à une position curviligne prédéfinie (en l'occurrence $70\mu\text{m}$). De manière évidente, lorsque la position du doigt retiré change, les zones représentées dans la carte

de reconfiguration vont également changer. Là encore, la permutation des doigts ne change pas la carte et donc $D_{(1,2,3)_3} = D_{(1,2,3)_2} = D_{(1,2,3)_1}$. Lorsque les forces d'adhésion sont présentes, la prise représentée sur la Fig. 2.8(droite) est à l'équilibre aussi bien en utilisant les trois doigts qu'en utilisant seulement les doigts 1 et 2. Toutefois, la carte montre que cette prise ne garantit pas l'équilibre de l'objet lorsque le doigt 3 est retiré. Cette prise n'est donc pas admissible lors d'une reconfiguration de prise.

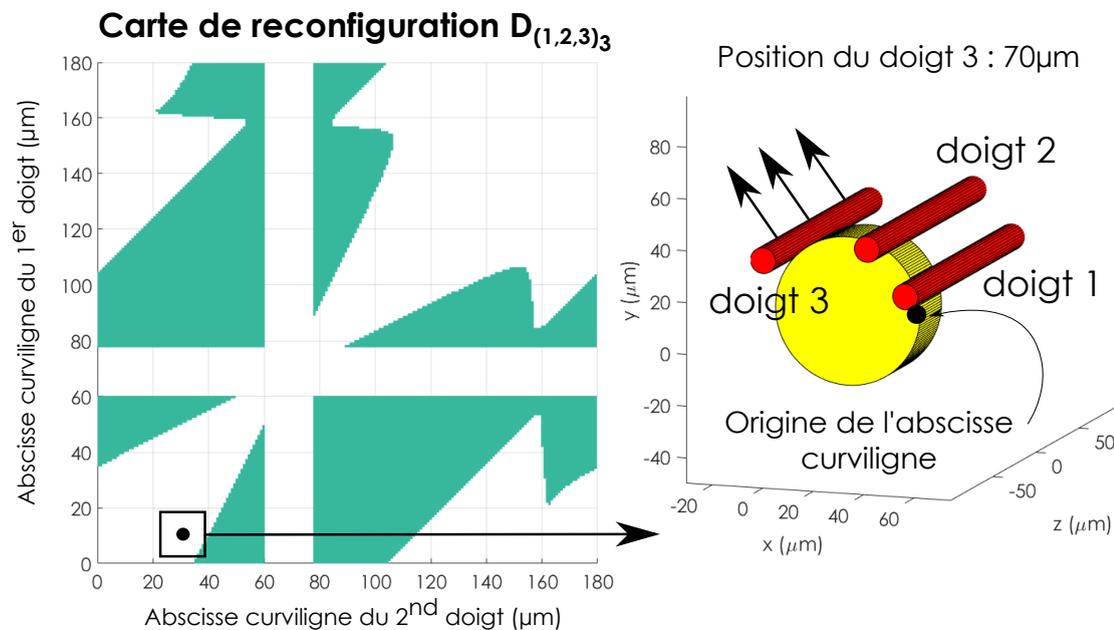


FIGURE 2.8 – Représentation de l'ensemble $D_{(1,2,3)_3}$ (carte de reconfiguration) pour une position prédéfinie du doigt retiré et en présence de forces d'adhésion ($\forall i, w_{ad_i} \neq 0$).

Carte de prise initiale Les cartes de prises initiales correspondent à un sous-ensemble des cartes d'équilibre. En particulier, lorsque les effets d'adhésion ne sont pas présents entre le support et l'objet, la carte de prise initiale est égale à la carte d'équilibre.

2.4.2/ INFLUENCE DU SYSTÈME DE MANIPULATION

2.4.2.1/ PRISE EN COMPTE ET DÉTECTION DES COLLISIONS

Les cartes présentées précédemment sont symétriques étant donné que les doigts sont considérés comme ayant le même comportement. Or cette approche est vraie seulement lorsque aucune collision n'est considérée. Or, pour un système réel, de nombreuses collisions sont possibles. En effet, il est possible de les distinguer en deux catégories :

- **Collisions internes** : Pour les collisions entre les composants de la micro-main,
- **Collisions externe** : Pour les collisions entre les composants de la micro-main et l'extérieur.

Les collisions internes correspondent aux collisions propres à la main c'est-à-dire entre les "phalanges" et les doigts de la micro-main. Les collisions externes correspondent aux collisions entre la main et son environnement, c'est-à-dire entre la micro-main, l'objet, le

support et tout autre élément présent dans l'espace de manipulation. Ces collisions vont contraindre les prises contenues dans les ensembles M , D et I . De ce fait, l'espace de planification ne saurait être complet sans tenir compte des contraintes technologiques de la micro-main robotique et de son environnement d'utilisation. Il est donc nécessaire de déterminer si les prises contenues dans les cartes sont réalisables. Une méthode classique de détection de collision a été utilisée (voir détails en Annexe 2).

Pour illustrer ces collisions, considérons le système de manipulation planaire représenté sur la Fig. 2.9a. Ce manipulateur est composé de trois doigts cylindriques montés sur des supports triangulaires. Dans ce cas, chaque doigt peut se déplacer dans le plan et l'on suppose que les seules collisions possibles sont entre les supports, les doigts, le substrat et l'objet. Les autres éléments du système (non visible sur la figure) ont été conçus pour ne pas entrer en collision. La Fig. 2.9 illustre également différents types de collisions. Ainsi, la Fig. 2.9b montre une collision interne entre deux supports de doigt. De même, la Fig. 2.9c représente une collision entre un doigt et un support. Ces prises ne sont évidemment pas admissibles. Certaines positions des doigts sont également exclues de l'espace de planification. En effet, lorsqu'un doigt est en collision avec de multiples points de l'objet alors cette position est exclue. La Fig. 2.9d donne un exemple lors d'un double contact entre l'objet et le doigt 1.

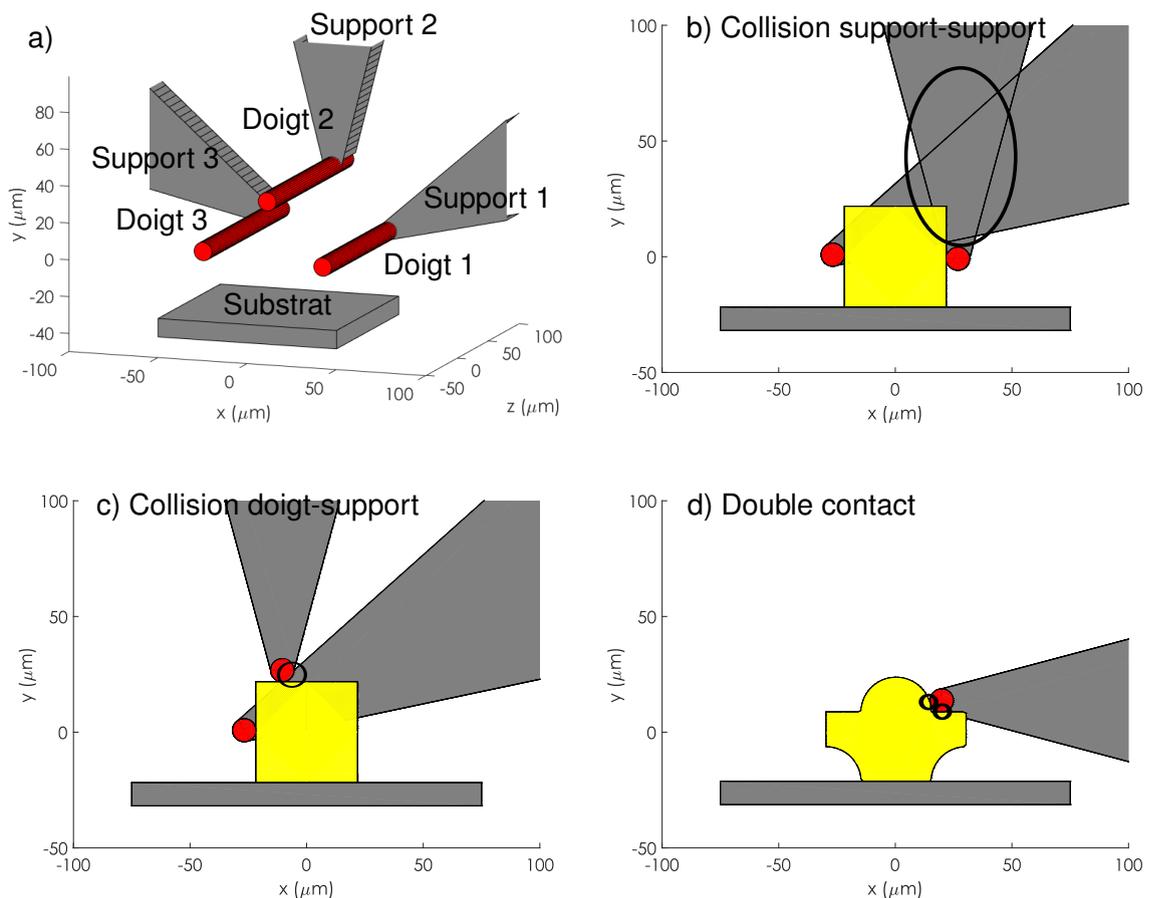


FIGURE 2.9 – Illustration d'un manipulateur et de certaines collisions internes et externes.

2.4.2.2/ EXEMPLES DE CARTES AVEC COLLISIONS

Les figures ci-dessous illustrent les différentes cartes lorsque les collisions sont prises en compte. Comme pour les exemples précédents de cartes, un problème de manipulation dextre planaire est considéré. La position des doigts est toujours représentée en utilisant l'abscisse curviligne et le manipulateur considéré est le même que celui représenté dans la Fig. 2.9.

Cartes d'équilibre La Fig. 2.10 reprend la carte d'équilibre à deux doigts $M_{(1,2)}$ montrée précédemment. Lorsque les collisions sont considérées, on remarque que la carte n'est plus symétrique. Ainsi, les cartes $M_{(1,2)}$, $M_{(1,3)}$ et $M_{(2,3)}$ ne sont plus équivalentes. Ainsi, la prise en compte des collisions réduit le nombre de prises admissibles et contraint l'espace de planification.

Cartes de reconfiguration De manière similaire, la Fig. 2.11 illustre l'influence des collisions sur la carte de reconfiguration présentée précédemment. En particulier, les cartes $D_{(1,2,3)_1}$, $D_{(1,2,3)_2}$ et $D_{(1,2,3)_3}$ sont visibles sur cette figure. Les cartes de reconfiguration varient donc en fonction de la position du doigt retiré.

Cartes de prises initiales Les collisions permettent également de déterminer les zones accessibles lors de la prise initiale. Ainsi, dans ce cas, les collisions entre les différents éléments du manipulateur sont déterminées tout comme les collisions avec le substrat. La Fig. 2.12 donne une illustration des configurations à deux doigts utilisables pour détacher l'objet lorsqu'il existe des effets d'adhésion entre le substrat et l'objet seulement. On remarque donc qu'il existe différentes prises en fonction des doigts utilisés.

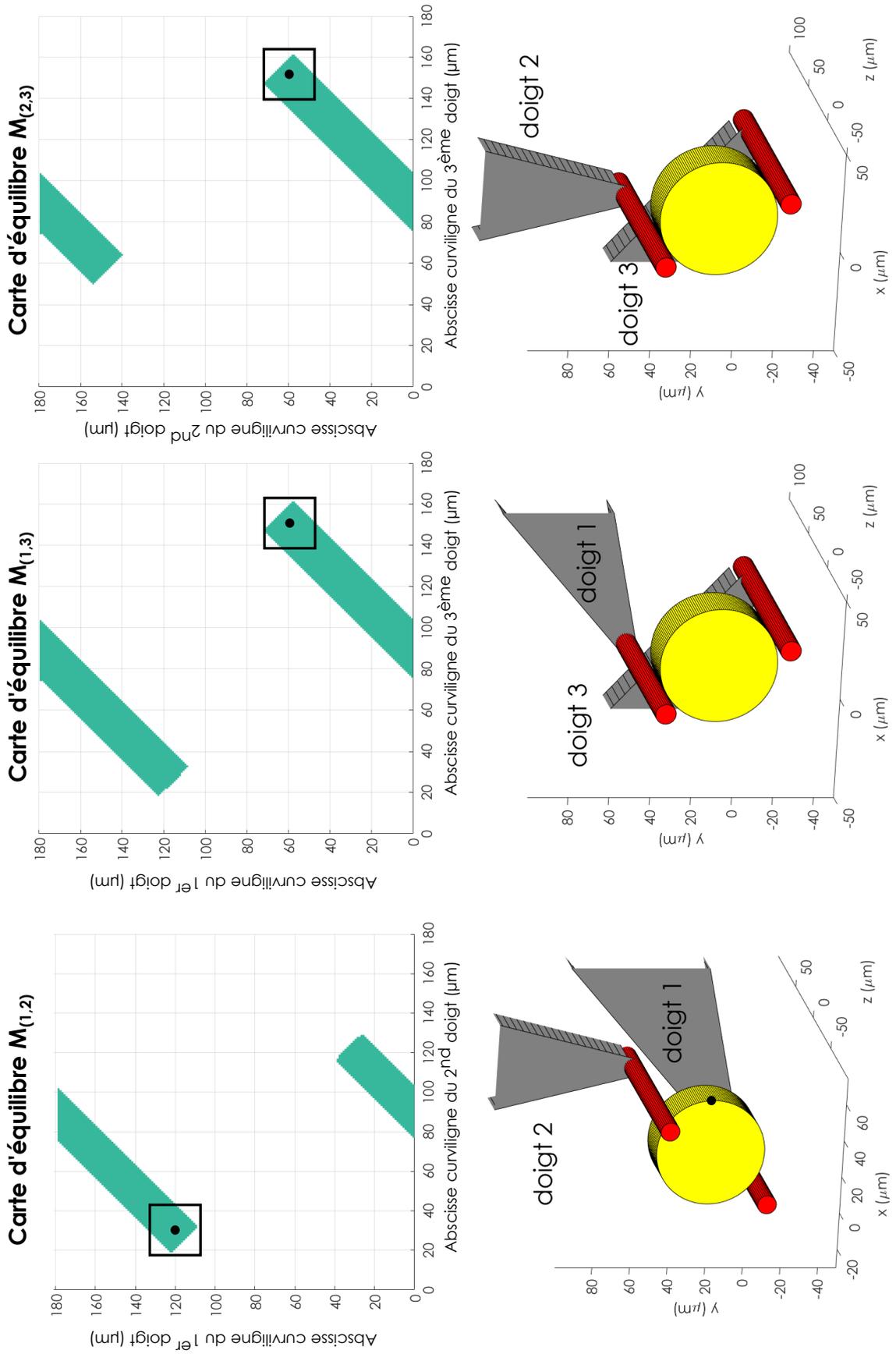


FIGURE 2.10 – Illustration de la carte d'équilibre $M_{(1,2)}$ lorsque les collisions sont prises en compte.

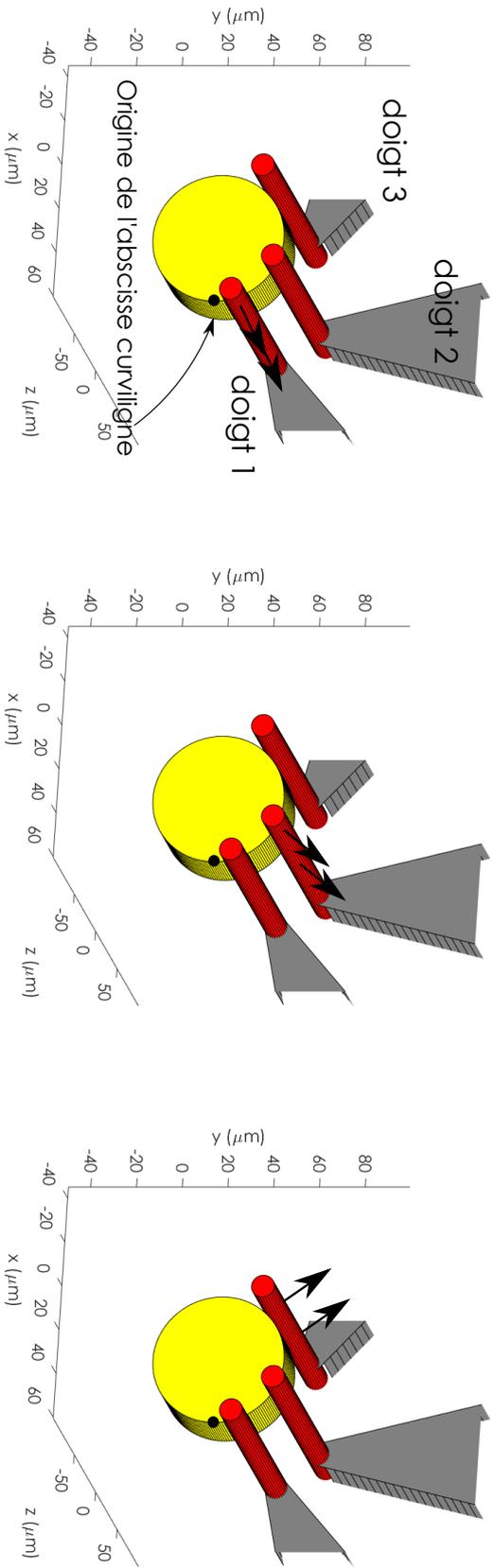
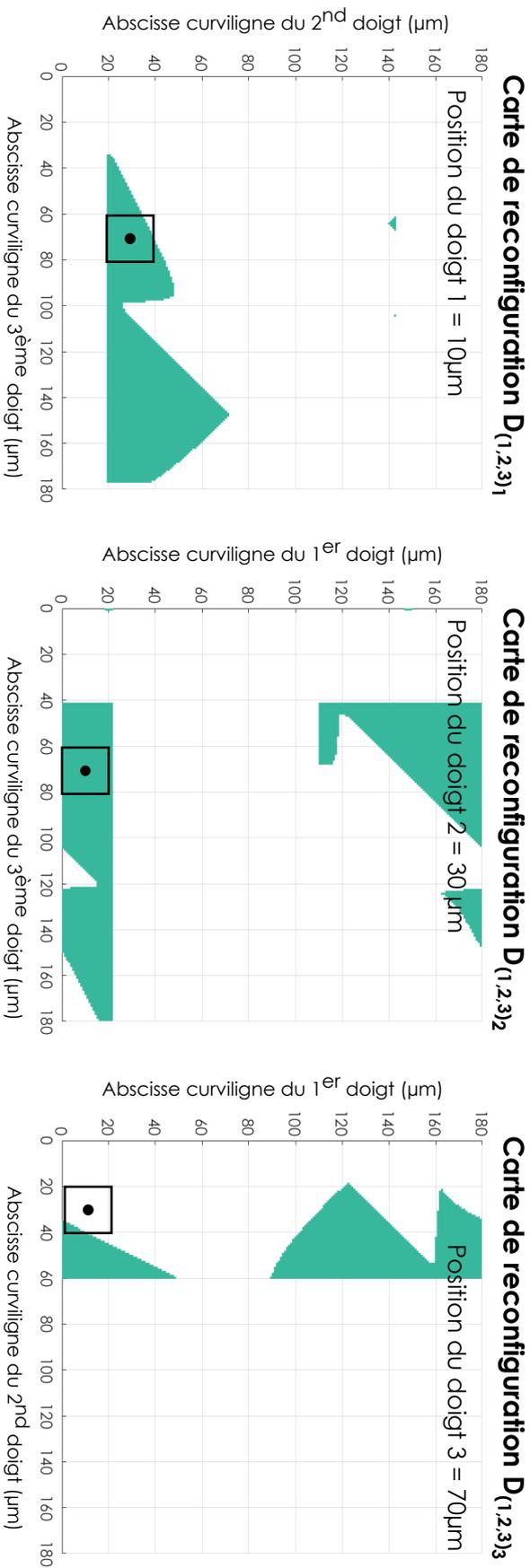


FIGURE 2.11 — Illustration des cartes de détachement $D_{(1,2,3)_1}$, $D_{(1,2,3)_2}$ et $D_{(1,2,3)_3}$ lorsque les collisions sont prises en compte.

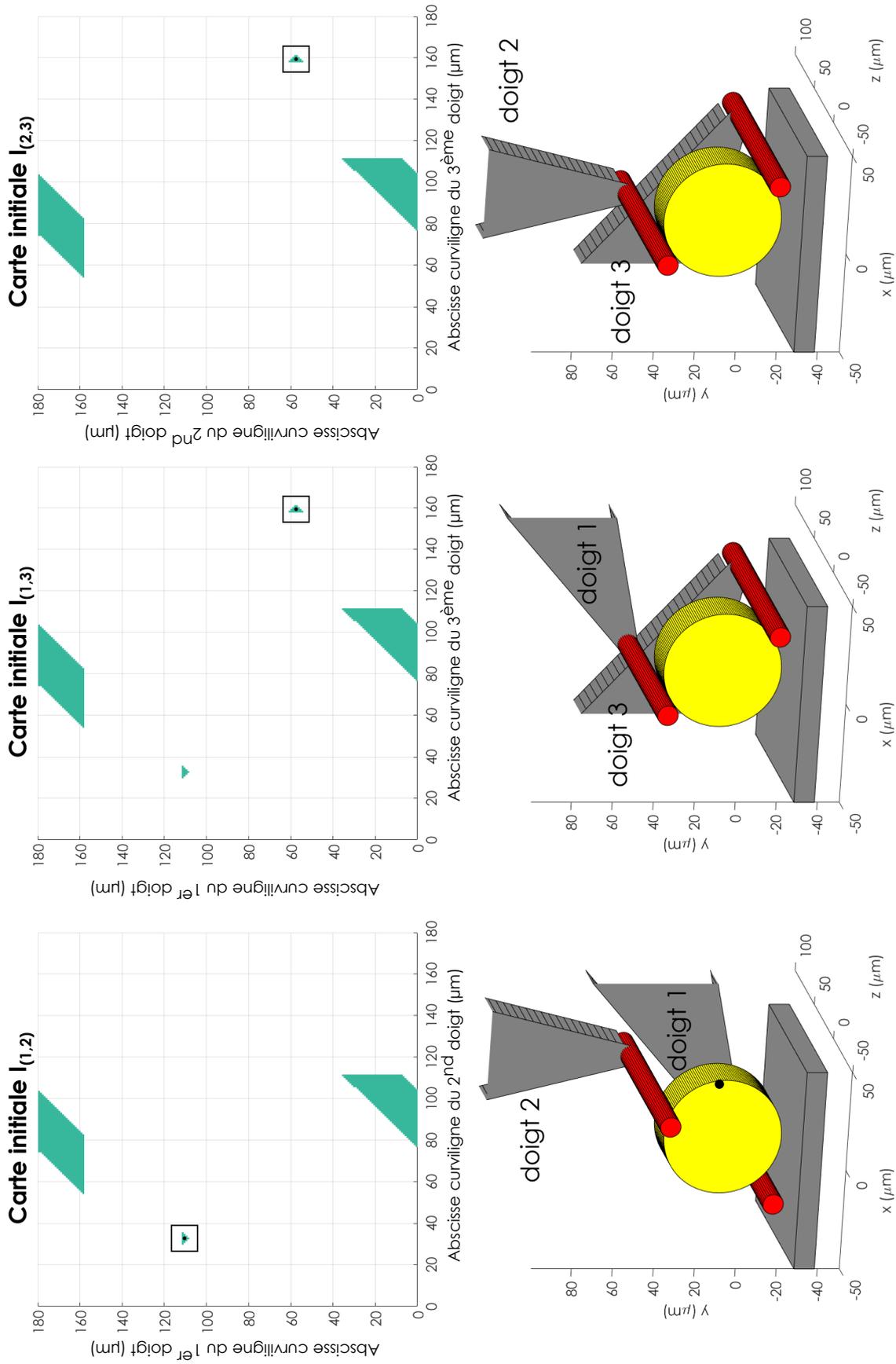


FIGURE 2.12 – Illustration des cartes initiales $I_{(1,2)}$, $I_{(1,3)}$ et $I_{(2,3)}$ lorsque les collisions sont prises en compte.

2.4.3/ INFLUENCE DE L'ORIENTATION DE L'OBJET

Les éléments développés précédemment ont montré qu'il était possible de cartographier l'ensemble des configurations à l'équilibre et accessibles pour un objet et un manipulateur donné. Cependant, les cartes présentées jusqu'à présent considèrent un objet dans une position et une orientation données. Or pour planifier des tâches de manipulation dextre, il est nécessaire de considérer les déplacements de l'objet. L'orientation de l'objet va aussi bien jouer sur les collisions que sur les prises admettant une solution au problème d'équilibre et de détachement. En effet, le repère de référence étant lié à l'objet, les forces et moments applicables sur l'objet vont dépendre de son orientation. De même certaines configurations peuvent être en collision pour une orientation donnée mais pas pour une autre.

2.4.3.1/ CARTOGRAPHIE MULTI-COUCHES

Une façon de prendre en compte cet aspect consiste à générer des cartographies pour différentes orientations. Dès lors, l'espace de toutes les configurations admissibles pour résoudre le problème de la micromanipulation dextre est obtenu en générant des cartographies balayant une orientation θ allant de 0° jusqu'à 360° . Cela revient à ajouter une dimension dans les cartes d'équilibre, de reconfiguration et de prises initiales. Ainsi, la carte d'équilibre (ou de reconfiguration ou de prises initiales) à N doigts est un espace à $3N + 1$ dimensions. En effet, $3N$ dimensions sont utilisées pour représenter la position des N doigts (x, y, z) sur l'objet et une dimension pour représenter l'orientation de l'objet. Une fois obtenu, cet ensemble de cartes permet de représenter intégralement l'espace de planification.

Toutefois, expliciter l'espace de planification de cette manière est soumis à une limitation : la précision. En effet, que ce soit pour les orientations ou la position des doigts sur l'objet, les configurations retenues dépendent du pas de discrétisation choisi pour représenter l'objet. Or comme cet espace est utilisé pour générer les trajectoires des doigts, il est nécessaire qu'il décrive l'ensemble des prises garantissant l'équilibre de la façon la plus fidèle possible. Bien que ces cartes puissent être calculées en pré-traitement, il est important de trouver un compromis entre précision de l'espace de planification et temps de calcul. Idéalement, il est nécessaire de limiter la dimension de l'espace de planification afin de ne pas ralentir la recherche de trajectoire.

2.4.3.2/ EXEMPLES DE CARTES

Cartes d'équilibre La Fig. 2.13 représente la carte d'équilibre $M_{(1,2)}$ précédente pour différentes orientations de l'objet (visible par le déplacement de l'origine de l'abscisse curviligne). La carte d'équilibre $M_{(1,2)}$ représentant toutes les prises stables utilisables pour les orientations de l'objet allant de 0 à 180° est visible sur la Fig. 2.14. Le pas d'échantillonnage en rotation de cet espace est de 10° .

Carte de reconfiguration La Fig. 2.15 illustre différentes couches de la carte de reconfiguration $D_{(1,2,3)_1}$, pour une position fixe du premier doigt (sur la surface de l'objet). On remarque donc que l'orientation joue un rôle majeur dans le domaine des prises stables

et accessibles lors d'un détachement. On peut remarquer que pour l'orientation $\theta = 90^\circ$ il n'existe aucune prise permettant de détacher le doigt 1 (lorsqu'il est à l'abscisse curviligne $10\mu\text{m}$).

Cartes de prises initiales Les cartes de prises initiales étant similaires aux cartes d'équilibre, elles ne seront pas illustrées ici.

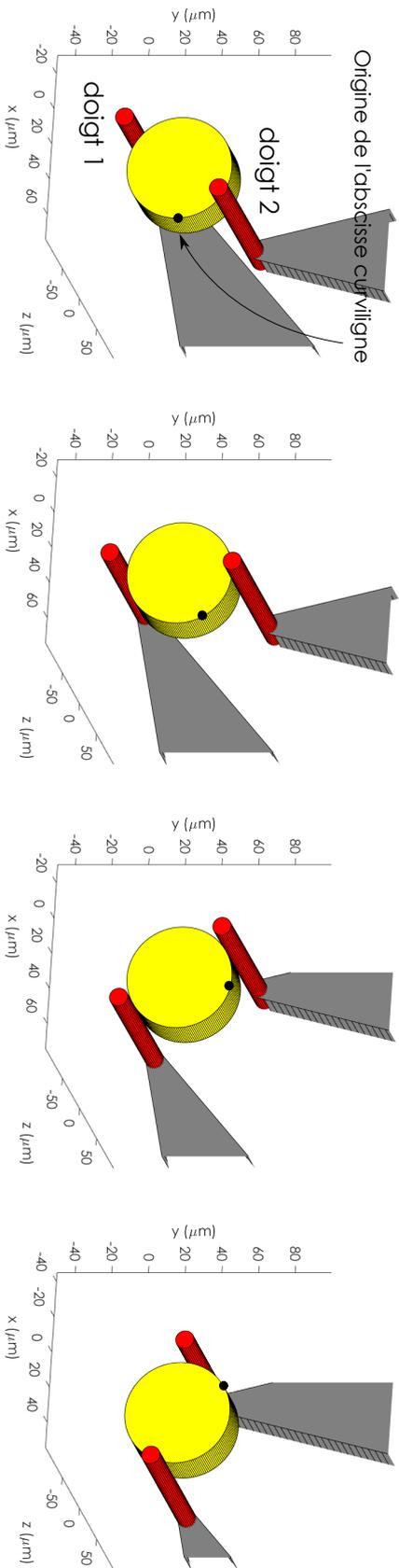
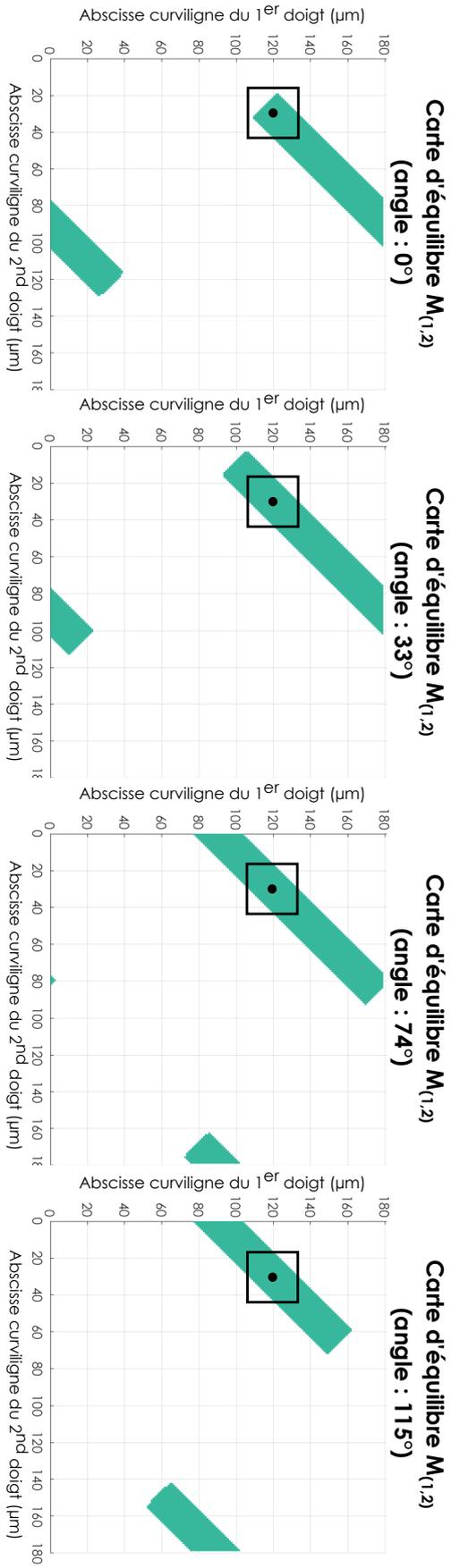


FIGURE 2.13 – Illustration de diverses strates de la carte d'équilibre $M_{(1,2)}$, obtenue pour des angles de 0°, 33°, 74° et 115°.

Carte d'équilibre $M_{(1,2)}$ (angle θ : 0 à 180°)

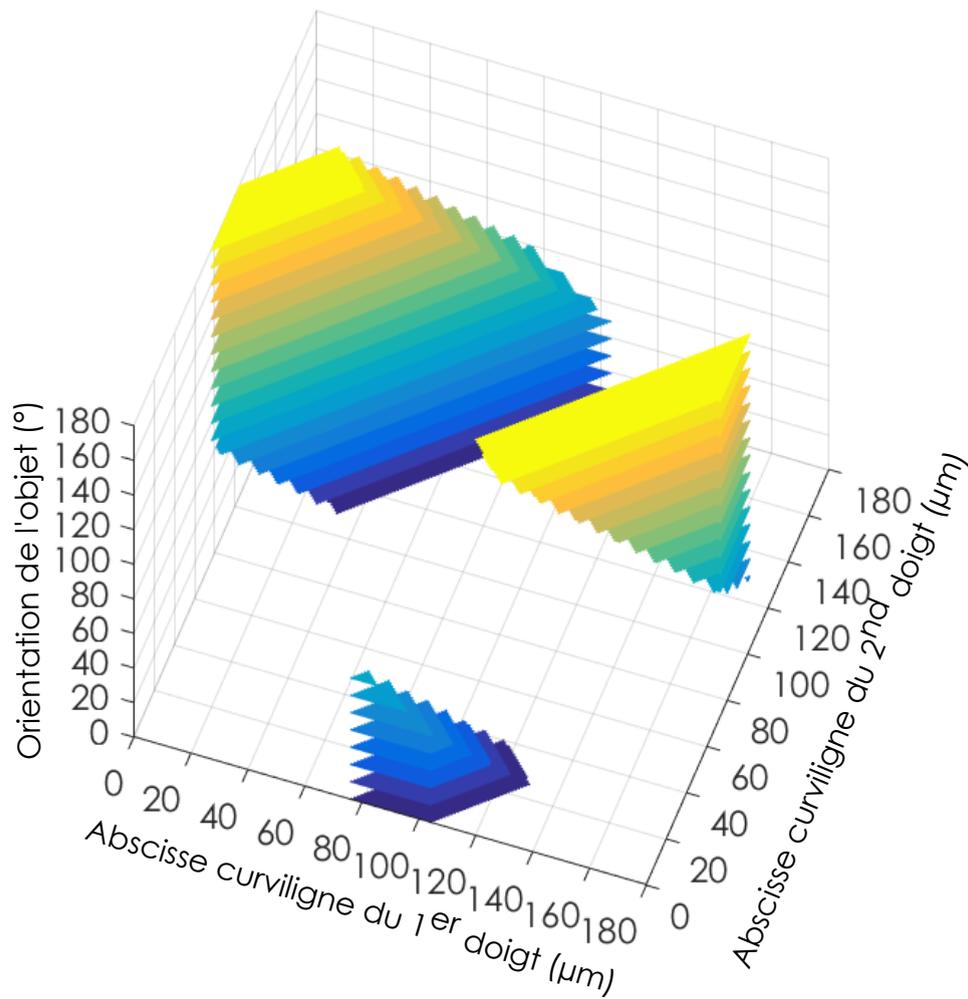


FIGURE 2.14 – Illustration de la carte d'équilibre $M_{(1,2)}$ complète entre les orientations $\theta = 0^\circ$ et $\theta = 180^\circ$.

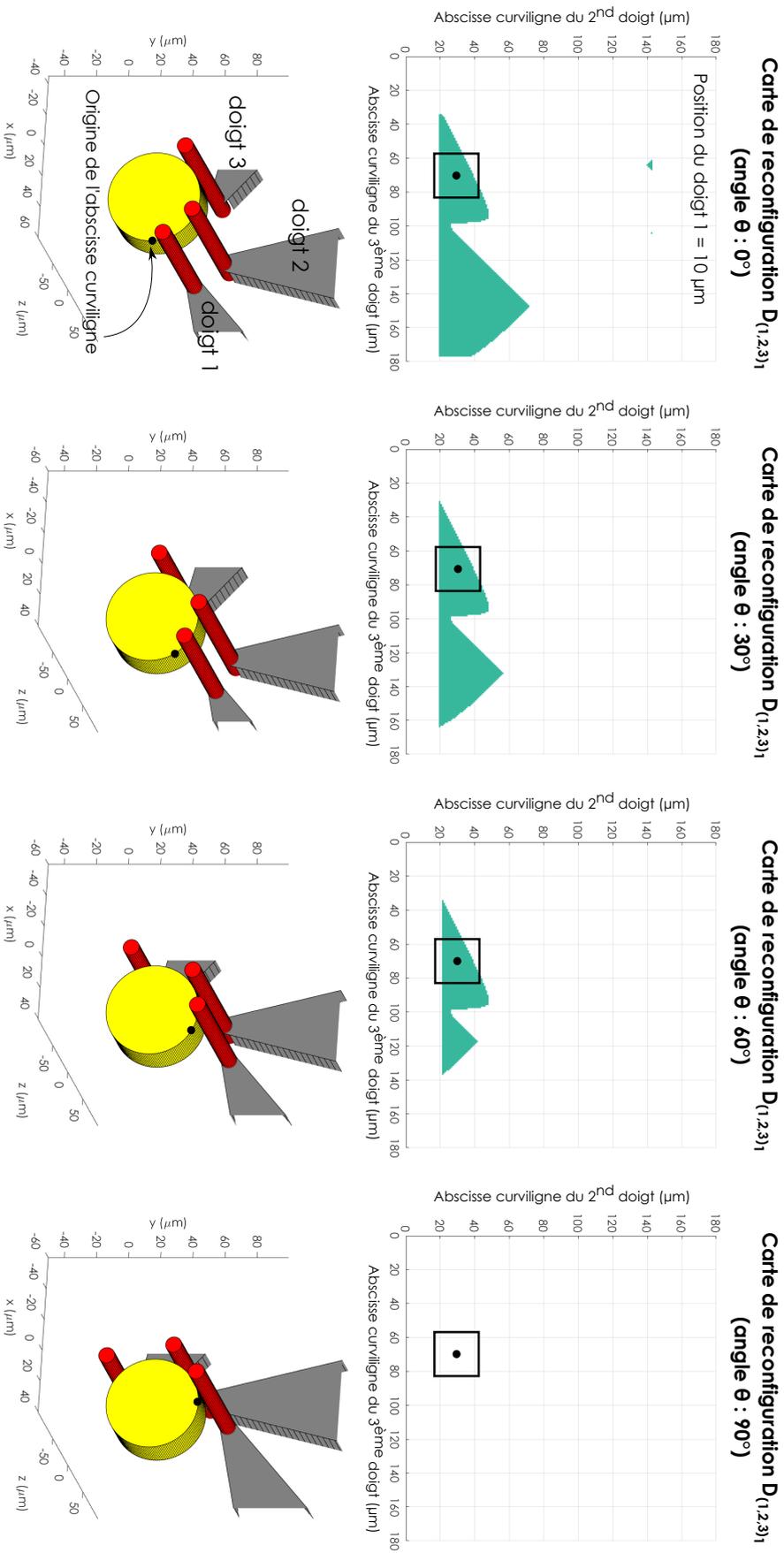


FIGURE 2.15 – Illustration de diverses strates de la carte de reconfiguration $D_{(1,2,3)}$ pour la position du doigt1 = 10 μm et les orientations $\theta = 0^\circ$, $\theta = 30^\circ$, $\theta = 60^\circ$ et $\theta = 90^\circ$.

2.5/ CONCLUSION

Une analyse originale de l'impact des spécificités de l'échelle micrométrique sur le problème de la manipulation dextre a été présentée dans ce chapitre. La prise en compte des effets d'adhésion change le paradigme de la manipulation et la rend quasi-statique. De ce fait, la micromanipulation dextre peut être vue comme une succession de prises à l'équilibre. L'espace sur lequel vont être planifiées les trajectoires est donc composé des prises garantissant que l'objet est maintenu à l'équilibre. Afin de construire cet espace, il est nécessaire de modéliser le contact entre les doigts et l'objet de façon à prendre en compte les phénomènes d'adhésion. C'est pourquoi un modèle de frottement de Coulomb modifié a été présenté. Grâce à ce modèle, il est possible d'identifier les prises appartenant à l'espace de planification. Cet espace a, par la suite, été formalisé de manière originale sous la forme de trois types de cartes :

- **Les cartes d'équilibre** : pour représenter les prises à l'équilibre statique,
- **Les cartes de reconfiguration** : pour déterminer les prises à l'équilibre statique pour lesquelles un des doigts peut être retiré sans perturber l'équilibre,
- **Les cartes de prises initiales** : qui représentent les prises permettant de saisir l'objet sur son substrat.

Finalement, ces cartes représentent l'ensemble des prises utilisables pour réaliser une opération de micromanipulation dextre et intègrent les différentes contraintes, à savoir, l'adhésion, la friction et les collisions.

La formalisation du problème nouveau qu'est la micro-préhension dextre sous forme de cartes d'équilibre et de reconfiguration représente une première contribution en vue de la génération automatique de trajectoires des doigts qui sera abordée dans le chapitre suivant.

GÉNÉRATION DE TRAJECTOIRES POUR LA MICROMANIPULATION DEXTRE PLANAIRE

Sommaire

3.1	Approche méthodologique	70
3.2	Planification de la séquence de prises	70
3.2.1	Représentation du problème sous forme de graphe	71
3.2.1.1	Représentation des nœuds	71
3.2.1.2	Création des arêtes	71
3.2.2	Algorithme de parcours de graphe	73
3.2.2.1	Définition des coûts et de l'heuristique	74
3.2.2.2	Optimisation globale	76
3.2.2.3	Exemple d'une séquence de prises	77
3.2.3	Synthèse	78
3.3	Planification des trajectoires	79
3.3.1	Présentation du problème	79
3.3.1.1	Retrait d'un doigt	79
3.3.1.2	Placement d'un ou plusieurs doigts	80
3.3.1.3	Repositionnement d'un doigt	81
3.3.2	Génération des mouvements	81
3.3.2.1	Planification des mouvements libres	81
3.3.2.2	Planification des mouvements contraints	82
3.3.3	Exemple de trajectoires planaires	82
3.3.4	Synthèse	85
3.4	Optimisation des forces de serrage	85
3.4.1	Formulation du problème d'optimisation	86
3.4.2	Fonction d'optimisation	87
3.5	Discussion sur la méthode proposée	88
3.6	Conclusion	89

Ce chapitre détaille la méthode utilisée pour générer les trajectoires des doigts lors d'une opération de micromanipulation dextre. Plus spécifiquement, la méthode développée permet de générer des trajectoires pour n'importe quelle manipulation planaire. Le processus original de génération de trajectoires se décompose en trois étapes. La manipulation étant quasi-statique, la première étape consiste à générer la séquence de prises décrivant la tâche de manipulation dextre. Cette séquence est obtenue grâce à un graphe construit à l'aide des cartes présentées dans le chapitre précédent et de la contrainte de roulement sans glissement. La seconde étape permet de générer les déplacements des doigts afin de relier ces prises entre elles. La dernière étape permet de calculer et d'optimiser les forces de serrage appliquées par les différents doigts au cours de la manipulation. Des exemples de trajectoires de manipulations dextres planaires ainsi qu'une évaluation de l'impact des paramètres de l'algorithme sur les trajectoires seront étudiés dans le chapitre suivant.

3.1/ APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Le chapitre précédent a permis de modéliser l'espace de planification sous forme de cartes. Trois types de cartes sont utilisées pour modéliser l'espace de planification : les cartes d'équilibre M , les cartes de reconfiguration D et les cartes de prises initiales I . L'objectif est alors de les utiliser afin de construire les trajectoires des doigts lorsqu'ils sont en contact avec l'objet. En effet, la micromanipulation étant considérée comme quasi-statique, il est possible de considérer la tâche de manipulation comme une succession de prises à l'équilibre et donc comme un déplacement dans les différentes cartes. Par exemple, considérons la prise et le problème de manipulation plan représentés sur la Fig. 3.1a. De cette prise, il est possible de réaliser une rotation dans le sens anti-horaire pour obtenir la prise illustrée par la Fig. 3.1b. Cette rotation est obtenue grâce au roulement des doigts sur la surface de l'objet. Les deux prises, représentant deux éléments de la carte $M_{(1,2)}$, sont donc reliées par un déplacement dans cette carte (Fig. 3.1c).

La méthode de planification présentée dans ce chapitre, s'intéresse uniquement au problème de la manipulation dextre planaire.

3.2/ PLANIFICATION DE LA SÉQUENCE DE PRISES

La première étape de la génération de trajectoire consiste à générer la séquence de prises permettant de réaliser la tâche de manipulation désirée. Cette étape consiste à naviguer dans et entre les différentes cartes. Plus précisément, les rotations sont obtenues en se déplaçant dans les cartes M tandis que les reconfigurations correspondent à un changement de cartes. Cette planification peut être réalisée en représentant les cartes comme un graphe.

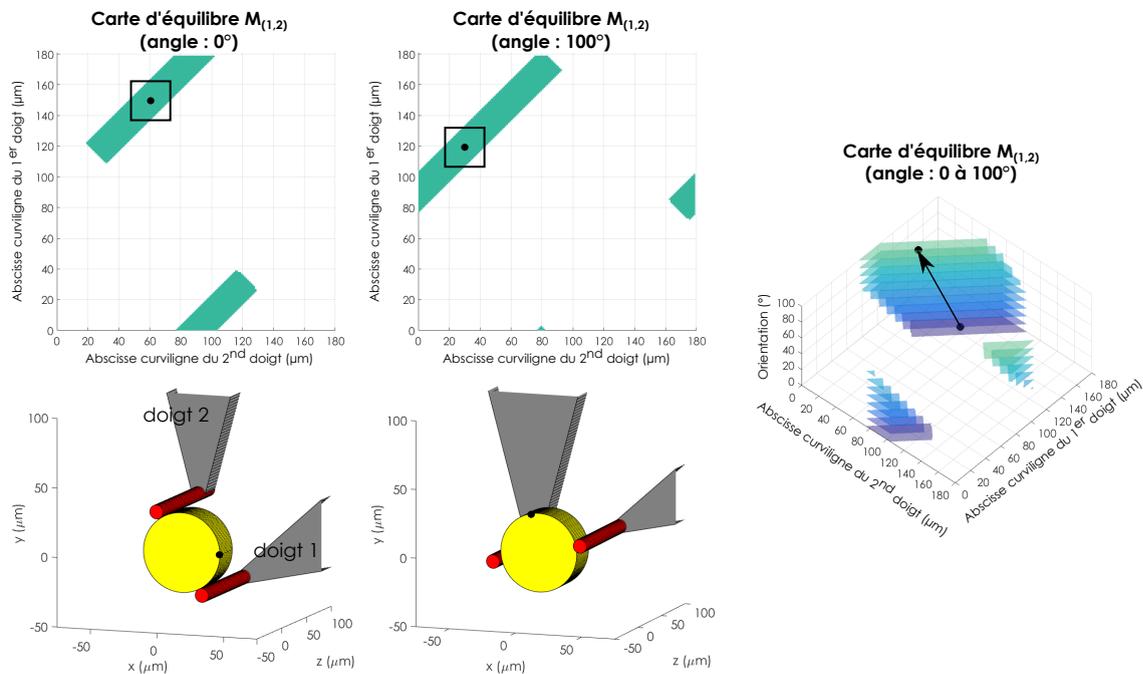


FIGURE 3.1 – Illustration du lien entre rotation de l'objet et déplacement dans l'espace des configurations.

3.2.1/ REPRÉSENTATION DU PROBLÈME SOUS FORME DE GRAPHE

3.2.1.1/ REPRÉSENTATION DES NŒUDS

Considérons un graphe $G(N, A)$ où N représente les nœuds du graphe et A les différentes arêtes. Dans ce graphe, chaque configuration d'équilibre représente un nœud. Ainsi, les nœuds sont de la forme suivante : $N(C) = [C, Or, d_1, d_2, d_3, \dots, d_n]$ où C désigne le type de carte duquel est issu le nœud, Or représente l'orientation de l'objet et d_j la position curviligne du doigt j . Il existe donc des nœuds issus des cartes M , D et I introduites au chapitre 2. Les points d'entrées du graphe sont les nœuds issus des cartes I qui représentent les configurations admissibles et permettent le détachement de l'objet du support.

Dans la suite de cette section, un manipulateur composé de trois doigts est considéré. Ainsi tous les nœuds sont de la forme $N(C) = [C, Or, d_1, d_2, d_3]^1$. Par exemple, les deux prises planaires représentées sur la Fig. 3.1 correspondent aux nœuds $N_1(M) = [M, 0, 150, 60, -1]$ et $N_2(M) = [M, 100, 120, 30, -1]$. L'orientation est représentée par un angle exprimé en degrés et les coordonnées des doigts sont exprimées à l'aide de l'abscisse curviligne en μm .

3.2.1.2/ CRÉATION DES ARÊTES

Afin d'utiliser ce graphe, il est nécessaire de lier les nœuds entre eux pour savoir comment le parcourir. Trois types de liaisons sont possibles entre les différents nœuds :

1. Dans le cas où un des doigts n'est pas utilisé la valeur -1 lui est attribuée

- **Entre I et M** : ce qui correspond à un lien entre une carte de prises initiales et une carte d'équilibre,
- **Entre M et M** : ce qui correspond à un lien entre une ou différentes cartes d'équilibre,
- **Entre M et D** : ce qui correspond à un lien entre une carte d'équilibre et une carte de reconfigurations.

Liaisons I - M Les nœuds initiaux du graphe sont directement reliés à leurs homologues issus des cartes d'équilibre. Par exemple, le nœud $[I_{(1,2,3)}, Or, d_1, d_2, d_3]$ est en lien avec $[M_{(1,2,3)}, Or, d_1, d_2, d_3]$. Ce lien direct découle du fait que les cartes initiales I sont créées de façon à intégrer uniquement des éléments qui appartiennent également aux cartes d'équilibre (afin d'assurer la continuité de stabilité lors du détachement de l'objet). Chaque nœud I est donc toujours connecté avec un unique nœud M .

Liaisons M - M Les nœuds M sont liés entre eux de deux manières différentes. Le premier lien est associé à la rotation de l'objet dans les doigts. En effet, la manipulation par roulement sans glissement est équivalente à lier deux nœuds dans une même carte d'équilibre. Ce lien est contraint par le fait que les doigts doivent tous rouler dans le même sens et de la même amplitude. De ce fait, pour un nœud donné, le roulement sans glissement est caractérisé par un unique chemin dans une carte M (dépendant du rayon des doigts). Par exemple, le nœud $[M_{(1,2,3)}, Or, d_1, d_2, d_3]$ est lié à seulement deux autres nœuds : $[M_{(1,2,3)}, Or - \delta\theta, d_1 + \delta R, d_2 + \delta R, d_3 + \delta R]$ et $[M_{(1,2,3)}, Or + \delta\theta, d_1 - \delta R, d_2 - \delta R, d_3 - \delta R]$ (où $\delta\theta$ correspond à la rotation et δR à la distance de roulement équivalente à la rotation). Ces deux nœuds correspondent aux deux rotations possibles (une dans le sens horaire et l'autre dans le sens anti-horaire). Il est à noter que lorsque deux éléments roulent l'un sur l'autre, leurs sens de rotation sont opposés d'où la différence de signe entre $\delta\theta$ et δR .

Ajouter un doigt à une prise revient également à lier deux nœuds M . Dans ce second cas, le lien s'effectue entre différentes cartes d'équilibre. Par exemple, il s'agit de lier un nœud dans $M_{(1,2)}$ avec un ou plusieurs nœuds dans $M_{(1,2,3)}$. Ainsi, chaque nœud $[M_{(1,2)}, Or, d_1, d_2, -1]$ est en lien avec tous les nœuds du type $[M_{(1,2,3)}, Or, d_1, d_2, d_3]$ quelle que soit la valeur de d_3 .

Liaisons M - D La dernière liaison entre les nœuds correspond au détachement d'un doigt. Cette action lie les nœuds issus d'une carte M avec les nœuds issus d'une carte D . Par exemple supposons que l'on souhaite détacher le troisième doigt du nœud $[M_{(1,2,3)}, Or, d_1, d_2, d_3]$, il faut donc qu'il existe un nœud du type $[D_{(1,2,3)3}, Or, d_1, d_2, d_3]$. Le nœud $[D_{(1,2,3)3}, Or, d_1, d_2, d_3]$ est, lui, directement lié à $[M_{(1,2)}, Or, d_1, d_2, -1]$. En effet, la carte de reconfiguration est créée de sorte que les prises soient en équilibre pendant et après le détachement du doigt. De cette façon, tous les liens entre les différents nœuds sont établis.

De manière évidente, tous les liens présentés ci-dessus n'existent que si les nœuds reliés existent. Afin de créer le graphe, il s'agit donc de parcourir l'ensemble des cartes pour en extraire les nœuds puis de les relier en utilisant les relations décrites dans cette section. La Fig. 3.2 donne une représentation synthétique des liens entre les différents nœuds du graphe ainsi créé.

Une fois obtenu, ce graphe est le point de départ de la génération de trajectoire puisque

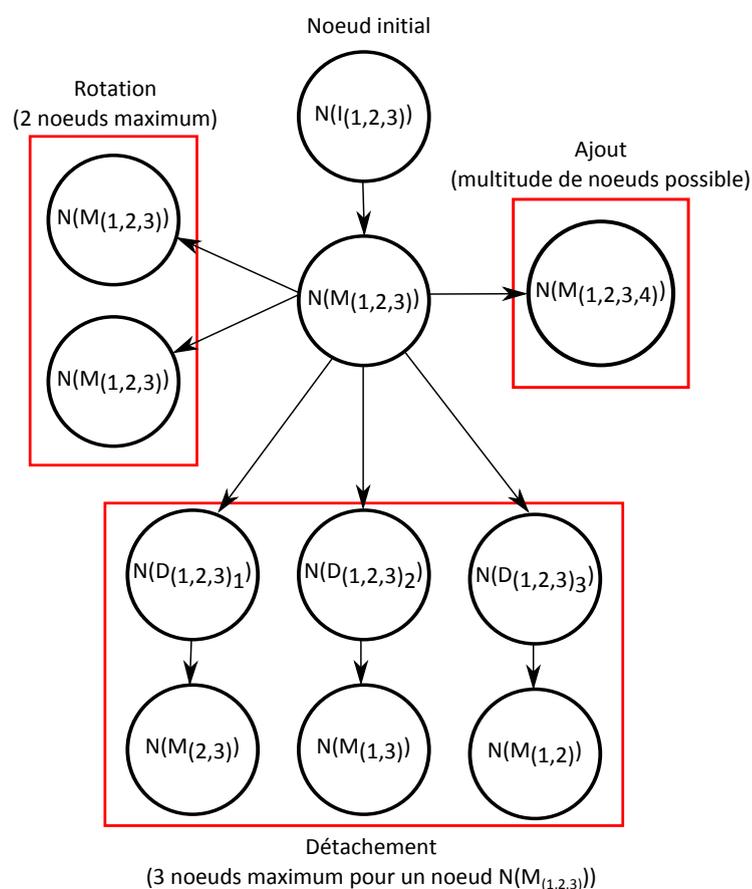


FIGURE 3.2 – Schématisation des liens entre les différents nœuds du graphe (à partir d'un nœud dans $I_{(1,2,3)}$).

son exploration va permettre de déterminer la séquence de mouvement à effectuer au niveau de la surface de l'objet (roulement et positionnement des doigts sur l'objet).

3.2.2/ ALGORITHME DE PARCOURS DE GRAPHE

La génération de trajectoires consiste donc à parcourir ce graphe qui modélise aussi bien des opérations de rotation que de reconfiguration. Pour ce faire, différents algorithmes sont envisageables comme évoqué dans le Chapitre 1. Pour notre application, une version modifiée de l'algorithme A^* a été choisie (son fonctionnement ainsi qu'un exemple sont décrit en Annexe 3). Cet algorithme complet, basé sur une exploration du graphe guidée par une heuristique et des coûts, permet de retourner une solution optimale², si elle existe, pour un minimum de nœuds explorés. Toutefois, pour obtenir de telles solutions, il est nécessaire de stocker les nœuds explorés et explorables pouvant nécessiter de grandes quantités de mémoire. Dans le cas du problème de manipulation dextre planaire, cet inconvénient de stockage reste maîtrisable ce qui justifie ce choix.

Les problèmes de planification classiques considèrent un nœud de départ et un nœud d'arrivée fixes. Dans notre cas, il existe plusieurs nœuds de départ possibles et plusieurs nœuds d'arrivée. Lors d'une opération de micro-assemblage, l'objectif est de saisir l'objet

2. pour les coûts choisis

dans une orientation initiale et de le faire tourner d'un angle donné. Le point de départ est alors constitué de tous les nœuds issus des cartes I correspondant à l'orientation initiale de l'objet. De même, le point d'arrivée est composé de l'ensemble des nœuds issus des cartes M dont le paramètre orientation est le même que l'orientation désirée. Ainsi, l'algorithme doit être légèrement modifié pour optimiser non seulement le chemin mais également le point de départ et le point d'arrivée. Il est également nécessaire de définir une heuristique et des coûts adaptés à notre graphe et au problème que l'on cherche à résoudre.

3.2.2.1/ DÉFINITION DES COÛTS ET DE L'HEURISTIQUE

En reprenant l'illustration de la Fig. 3.2, on remarque qu'il existe différentes liaisons entre les nœuds :

- entre les nœuds I et M ,
- entre les nœuds M d'une même carte,
- entre les nœuds M de deux cartes différentes,
- entre les nœuds M et D ,
- entre les nœuds D et M .

Afin de pouvoir utiliser l'algorithme A^* , il est nécessaire de définir un coût pour chacune de ces liaisons. Dans le cadre d'une opération de micro-assemblage, supposons que l'objectif soit de réaliser la manipulation avec le moins de déplacements des doigts. Une façon simple de mesurer le déplacement des doigts est, alors, d'utiliser la distance parcourue par chaque doigt. Il faut donc que chaque liaison représente la distance parcourue par les doigts.

Au sein du graphe, il existe deux liaisons qui ne font intervenir aucun mouvement des doigts sur l'objet : la liaison entre les nœuds issus des cartes I et M ainsi que la liaison entre les nœuds issus des cartes M et D . En effet, la prise et l'orientation de l'objet sont identiques pour ces nœuds liés. De ce fait, il est possible de leur affecter un coût nul. Les trois liaisons restantes représentent les trois actions qu'il est possible d'effectuer depuis une prise : mettre en rotation l'objet, ajouter un doigt ou en détacher un.

Coût de rotation Dans le cas d'une rotation (liaison entre deux nœuds issus d'une même carte M), le déplacement des doigts est directement lié à l'amplitude de la rotation et au rayon des doigts. En effet, la rotation est liée au roulement des doigts sur la surface de l'objet par la relation suivante : $d_r = r_d \cdot \theta$ (où r_d est le rayon des doigts, d_r la distance de roulement sur l'objet et θ l'angle de rotation). Ainsi, le coût de la liaison entre deux nœuds d'une même carte M est équivalent à la distance de roulement entre les deux nœuds. Dans notre cas, cette distance correspond à la différence d'abscisse curviligne entre les positions des doigts. Si les doigts possèdent tous le même rayon alors cette distance est la même pour tous les doigts. Ce coût, noté c_{rot} , est fonction du nombre de doigts en contact et s'exprime donc sous la forme suivante :

$$c_{rot}(N_k(M), N_l(M)) = \sum_i d_{r_i} = \sum_{i=1}^N r_{d_i} \cdot \theta, \quad (3.1)$$

où $(N_k(M), N_l(M))$ désigne les deux nœuds M liés, r_{d_i} le rayon du i ème doigt et N le nombre de doigts utilisés.

Coût d'ajout d'un doigt Lors de l'ajout d'un doigt, qui correspond à la liaison de deux nœuds issus de différentes cartes M , deux cas peuvent survenir. Dans le premier cas, il s'agit de venir ajouter un doigt qui n'était pas utilisé précédemment. Dans cette situation le coût est la distance euclidienne entre la position de contact avec l'objet et la position de repos du doigt. La position de repos correspond à la position du doigt lorsqu'il n'est pas utilisé pour manipuler l'objet. Il est à noter que cette distance ne représente pas réellement la distance parcourue par le doigt. En effet, ce coût, noté c_{a_1} , représente la distance minimale parcourue par le doigt pour être mis en contact avec l'objet. Il est possible de l'exprimer de la façon suivante :

$$c_{a_1}(N_k(M), N_l(M)) = \left\| \overrightarrow{P_0 P_c} \right\|, \quad (3.2)$$

où $(N_k(M), N_l(M))$ désigne les deux nœuds M liés, P_0 la position de repos du doigt et P_c la position de contact.

Le second cas concerne la réutilisation d'un doigt qui vient d'être retiré. Dans ce cas, un des doigts de la prise est retiré puis repositionné sur l'objet sans passer par la position de repos. La distance parcourue peut être évaluée comme la distance euclidienne entre les deux positions de contact sur la surface de l'objet. Encore une fois, le coût ne représente pas la distance réellement parcourue mais constitue la limite inférieure à la distance parcourue par le doigt pour atteindre sa nouvelle position. Ce coût, noté c_{a_2} , s'exprime alors sous la forme suivante :

$$c_{a_2}(N_k(M), N_l(M)) = \left\| \overrightarrow{P_{c_1} P_{c_2}} \right\|, \quad (3.3)$$

où $(N_k(M), N_l(M))$ désigne les deux nœuds M liés et (P_{c_1}, P_{c_2}) représentent les positions de contact.

Coût de détachement d'un doigt Finalement, la dernière action, qui lie un nœud D avec un nœud M , correspond au retrait d'un doigt. Dans ce cas le coût, c_d , correspond à la distance parcourue pour garantir que le doigt est suffisamment éloigné de la surface de l'objet. Cette distance, notée λ , est principalement fonction de la précision de positionnement des doigts. Lorsque des forces d'adhésion, f_{po} , sont présentes, le coût est également fonction de ces forces. Le coût de détachement c_d s'écrit alors :

$$c_d(N_k(D), N_l(M)) = \lambda(f_{po}), \quad (3.4)$$

où $(N_k(D), N_l(M))$ désigne les deux nœuds D et M liés.

La table 3.1 synthétise les différents coûts choisis pour représenter la distance parcourue par les doigts lors de l'exploration du graphe.

Heuristique Chaque liaison disposant d'un coût, il est maintenant nécessaire de définir l'heuristique qui guidera l'exploration du graphe. Dans notre cas, l'exploration des cartes a pour objectif la réalisation d'une rotation. Il est donc possible d'exprimer la distance

Liaison	Action	Coût associé	Remarque
$I - M$	Détachement du support	0	-
$M - D$	Pré-validation du détachement	0	-
$M - M$	Roulement / Rotation	c_{rot}	Evalue la distance de roulement parcourue par les doigts
$M - M$	Ajout d'un doigt	c_{a_1}	Evalue la distance entre la position de repos et la position de contact
		c_{a_2}	Evalue la distance entre deux positions de contact
$D - M$	Détachement d'un doigt	c_d	Evalue la distance requise pour s'assurer du détachement

TABLE 3.1 – Tableau de synthèse des différents coûts utilisés pour l'exploration du graphe de manipulation dextre.

à l'objectif comme étant la rotation restante à effectuer. Toutefois, comme tous les coûts doivent être homogènes, il faut exprimer cette rotation en terme de longueur. Tout comme pour les actions de rotation, cet angle peut être évalué comme une longueur à l'aide du rayon des doigts. Ainsi, en chaque nœud, l'heuristique correspond à la distance de roulement requise pour atteindre l'angle désiré. Cette heuristique ne surestime jamais la distance à l'objectif puisque elle représente la distance minimale. En effet, dans le meilleur des cas, aucune reconfiguration n'est requise (c'est-à-dire aucun ajout ou retrait de doigt) et donc la distance à l'objectif est égale à la distance de roulement.

3.2.2.2/ OPTIMISATION GLOBALE

Contrairement à l'algorithme de base, le nœud de départ et le nœud d'arrivé ne sont pas spécifiés. L'algorithme A^* doit être modifié pour optimiser aussi bien le chemin que la prise initiale et la prise finale. La prise finale est directement optimisée à l'aide de l'algorithme de base. En effet, le premier nœud exploré dont l'orientation est celle désirée est nécessairement le nœud d'orientation désirée le plus rapidement atteignable. Concernant l'optimisation de la prise initiale, une solution consiste à affecter d'un coût non nul tous les nœuds issus des cartes I . Ce coût, noté c_{ini} , va permettre d'évaluer la distance parcourue par les doigts pour atteindre l'objet depuis la position de repos des doigts et réaliser la prise initiale. Le coût total est donc simplement la distance totale parcourue par les doigts lors de la saisie :

$$c_{ini}(N(I)) = \sum_i c_{a_i}, \quad (3.5)$$

où $N(I)$ désigne le nœud issu d'une carte I et c_{a_i} le coût affecté au i ème doigt.

De cette façon, l'algorithme retourne le chemin de coût minimal en incluant le coût requis pour réaliser la prise initiale. L'annexe 3 présente également le pseudo code de cette variante de l'algorithme A^* .

3.2.2.3/ EXEMPLE D'UNE SÉQUENCE DE PRISES

L'exploration du graphe par l'algorithme choisi permet de retourner une liste de nœuds représentant le processus de manipulation. Cette liste représente la séquence de prises optimale³. La liste ci-dessous (3.6) illustre une de ces séquences de nœuds. Il est à noter que cette séquence est purement illustrative. Cette liste permet de décomposer le processus de manipulation en plusieurs étapes :

- saisie,
- rotations,
- reconfigurations.

$$\begin{aligned}
 (1) & [I_{(2,3)}, 0, -1, d_2, d_3] \\
 (2) & [M_{(2,3)}, 0, -1, d_2, d_3] \\
 (3) & [M_{(2,3)}, \theta, -1, d_2 + \Delta R, d_3 + \Delta R] \\
 (4) & [M_{(2,3)}, 2\theta, -1, d_2 + 2\Delta R, d_3 + 2\Delta R] \\
 (5) & [M_{(1,2,3)}, 2\theta, d_1, d_2 + 2\Delta R, d_3 + 2\Delta R] \\
 (6) & [D_{(1,2,3)3}, 2\theta, d_1, d_2 + 2\Delta R, d_3 + 2\Delta R] \\
 (7) & [M_{(1,2)}, 2\theta, d_1, d_2 + 2\Delta R, -1] \\
 (8) & [M_{(1,2)}, 3\theta, d_1 + \Delta R, d_2 + 3\Delta R, -1]
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

La phase de saisie est définie par les nœuds (1) et (2). Plus particulièrement, le nœud (1) représente la prise initiale de l'objet sur son support et le nœud (2) correspond à la prise lorsque l'objet n'est plus en contact avec le sol. Dans cet exemple, la phase de saisie s'effectue à l'aide de deux doigts sur les trois utilisables. Les doigts 2 et 3 sont positionnés aux coordonnées curvilignes d_2 et d_3 respectivement.

Ensuite, deux étapes de rotations sont listées. Le passage du nœud 2 au nœud 3 ainsi que le passage du nœud 3 au nœud 4 représentent les rotations. En effet, les positions curvilignes des contacts évoluent et donc l'orientation change. Pour chaque étape de rotation, l'abscisse curviligne augmente de ΔR ce qui permet de réaliser une rotation de θ (ΔR et θ sont liés par le rayon des doigts). Dans un cas réel, les rotations sont représentées par une plus grande série de nœuds (plus le nombre de prises est important plus la rotation est échantillonnée).

Par la suite, deux étapes de reconfiguration s'enchaînent. La première, réalisée lors du passage du nœud 4 au nœud 5, consiste à rajouter le premier doigt à la position curviligne d_1 . La seconde étape de reconfiguration permet le détachement du doigt 3. En effet, le passage du nœud 5 au nœud 6 permet de s'assurer que le détachement est réalisable puis le passage du nœud 6 au nœud 7 valide le détachement. Ces reconfigurations permettent donc de passer d'une prise utilisant les doigts 2 et 3 à une prise utilisant les doigts 1 et 2.

Finalement une dernière rotation est réalisée lors du passage du nœud 7 au nœud 8. De la même manière que pour les rotations précédentes, l'abscisse curviligne des doigts 1 et 2 augmente et donc l'orientation de l'objet évolue. Cette séquence de prises permet donc de réaliser une rotation de 3θ .

3. Pour les coût et l'heuristique définies dans ce chapitre.

La Fig. 3.3 donne une illustration d'une telle séquence de prises dans le cas de la manipulation d'un parallélépipède rectangle. Cette figure représente l'ensemble des prises (1) à (8) (la prise (6) est identique à la prise (5)).

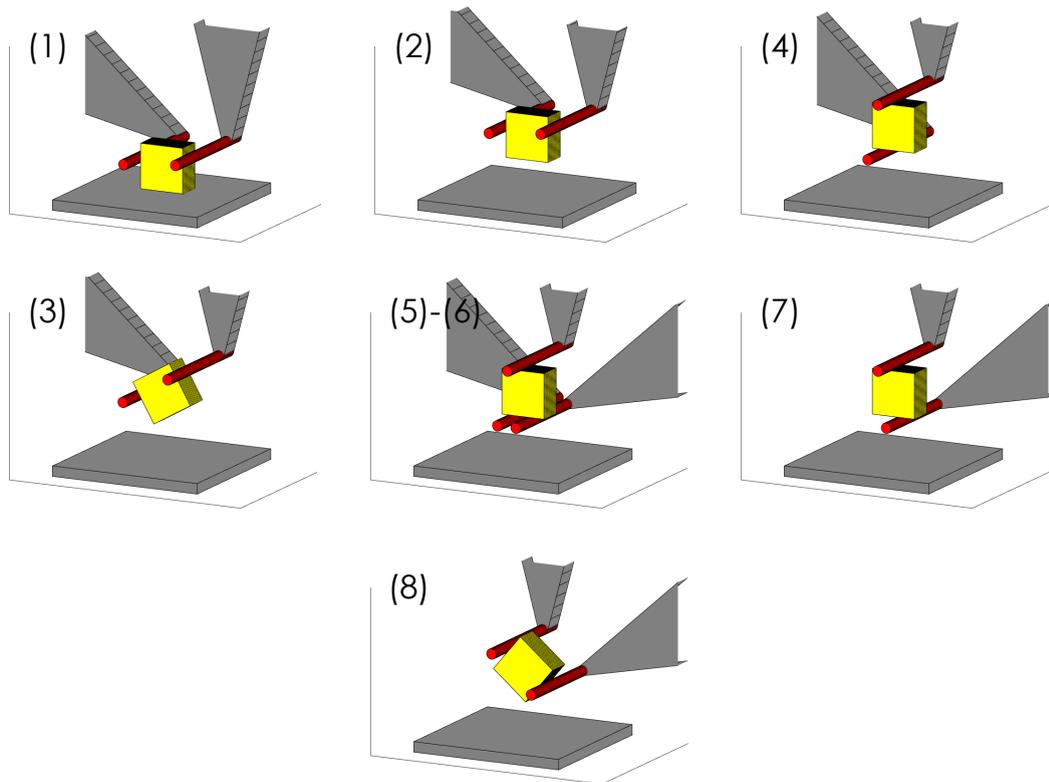


FIGURE 3.3 – Illustration d'une séquence de prises.

3.2.3/ SYNTHÈSE

Les différentes cartes représentant l'espace de planification permettent donc d'obtenir une séquence de prises décrivant une rotation. Plus précisément, la représentation du problème sous forme de graphe à l'aide des cartes et de la contrainte de roulement sans glissement permet de générer la séquence optimale de prises pour réaliser une rotation. Le critère optimisé est la distance parcourue par les différents doigts. Ainsi les séquences optimales sont celles nécessitant le moins de déplacements des doigts. La Fig. 3.4 synthétise le processus utilisé pour obtenir ces séquences de prises.

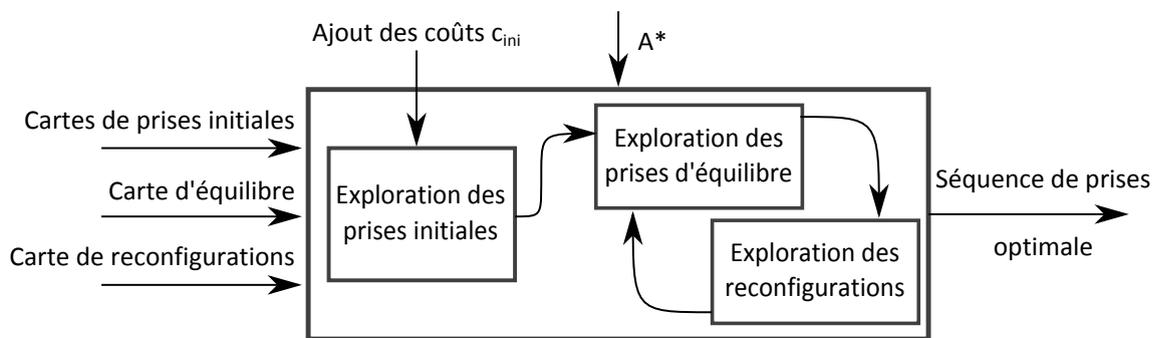


FIGURE 3.4 – Schématisation du processus menant à la génération de la séquence de prises optimale.

3.3/ PLANIFICATION DES TRAJECTOIRES

3.3.1/ PRÉSENTATION DU PROBLÈME

La section précédente a montré qu'il était possible de générer les positions de contact des doigts au niveau de la surface de l'objet. Toutefois, l'objectif étant d'obtenir des trajectoires de manipulation, il est nécessaire de générer les coordonnées (x, y) des doigts dans le plan de manipulation. L'obtention des trajectoires des doigts en contact avec l'objet est directe. En effet, connaissant les positions des doigts sur la surface de l'objet ainsi que l'orientation de l'objet, il est possible de remonter aux coordonnées cartésiennes des doigts et donc à leurs trajectoires. L'étape de planification concerne plus particulièrement la génération des déplacements des doigts lors des opérations de retrait d'un doigt, saisie et placement des doigts. Ainsi, trois mouvements distincts sont à planifier :

- le retrait d'un doigt,
- le placement d'un ou plusieurs doigts,
- le repositionnement d'un doigt.

3.3.1.1/ RETRAIT D'UN DOIGT

Le mouvement à planifier lors du retrait d'un doigt est illustré sur la Fig. 3.5 (la trajectoire représentée est fictive). Pour retirer un doigt, en particulier lorsque les forces d'adhésion sont présentes, il est important de s'assurer que le doigt n'est plus en contact avec l'objet. Pour ce faire, le déplacement à planifier peut être décomposé en deux étapes. Dans un premier temps, il s'agit de détacher le doigt, situé en une position notée P_c , en se déplaçant le long de la normale au contact jusqu'à une position notée P_a . Puis, dans un second temps, il est nécessaire de déplacer le doigt jusqu'à une position de repos notée P_0 (aucune contrainte n'est imposée sur ce déplacement). Le choix de se déplacer le long de la direction normale au contact, est fait pour simplifier l'étape d'optimisation des forces appliquées par chaque doigt (détaillée dans la section 3.4 de ce chapitre). Se déplacer le long de la normale permet de considérer la même force à appliquer pour rompre le contact quelle que soit la position du doigt sur l'objet. La distance parcourue le long de la normale doit être suffisante pour garantir que le contact entre l'objet et le doigt est rompu.

Dans le cas où les forces d'adhésion sont négligeables, cette contrainte de déplacement est évidemment inutile.

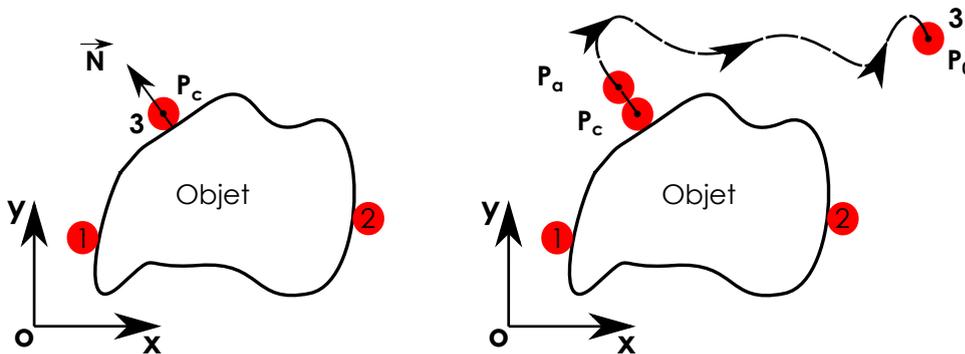


FIGURE 3.5 – Illustration du processus de déplacement lors du retrait d'un doigt. La trajectoire représentée n'est pas la trajectoire optimale.

3.3.1.2/ PLACEMENT D'UN OU PLUSIEURS DOIGTS

Illustré sur la Fig. 3.6, le placement d'un doigt consiste à générer la trajectoire d'un doigt pour relier sa position de repos à la position de contact sur la surface de l'objet. Dans cette situation le processus de mise en contact peut être décomposé en deux étapes. En considérant que P_O est la position du doigt au repos, la première étape va permettre de générer une trajectoire entre P_O et P_a , une position située dans la direction normale au point de contact (P_c) et à une distance arbitraire. La seconde étape permet de générer la trajectoire entre P_a et P_c afin de mettre le doigt en contact avec l'objet en se déplaçant le long de la normale au point de contact. Ce processus de déplacement ressemble sensiblement au détachement d'un doigt. Contrairement au détachement, le placement le long de la normale n'est pas indispensable mais il permet d'utiliser un même algorithme pour planifier les deux mouvements. Lorsque plusieurs doigts doivent être placés simultanément, comme lors de la prise initiale, les doigts sont tout d'abord tous déplacés vers leur positions P_a un par un puis mis en contact simultanément afin de toucher l'objet au même moment.

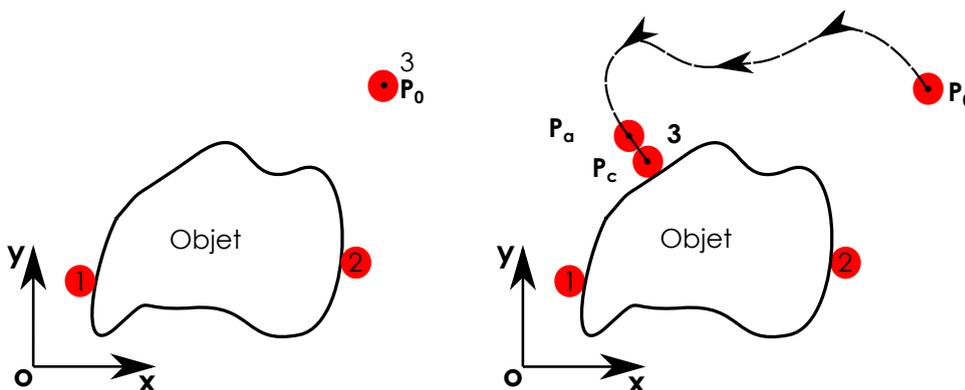


FIGURE 3.6 – Illustration du processus de déplacement lors de l'ajout d'un doigt. La trajectoire représentée n'est pas la trajectoire optimale.

3.3.1.3/ REPOSITIONNEMENT D'UN DOIGT

Le dernier déplacement à planifier concerne le repositionnement d'un doigt. Plus particulièrement, il s'agit du cas où un doigt est successivement retiré puis remis en contact sur l'objet à une nouvelle position. Le processus de déplacement peut être vu comme la combinaison d'un retrait de doigt et d'un placement de doigt. Le processus de déplacement, illustré sur la Fig. 3.8, se décompose donc en trois étapes. La première consiste à détacher le doigt le long de la normale au contact jusqu'à un point P_{a1} . La seconde, permet de se déplacer librement dans l'espace de travail afin de lier la position P_{a1} avec la position P_{a2} qui correspond à une position dans la direction normale au second contact. Finalement, il ne reste plus qu'à se déplacer le long de la normale afin de mettre l'objet et le doigt en contact.

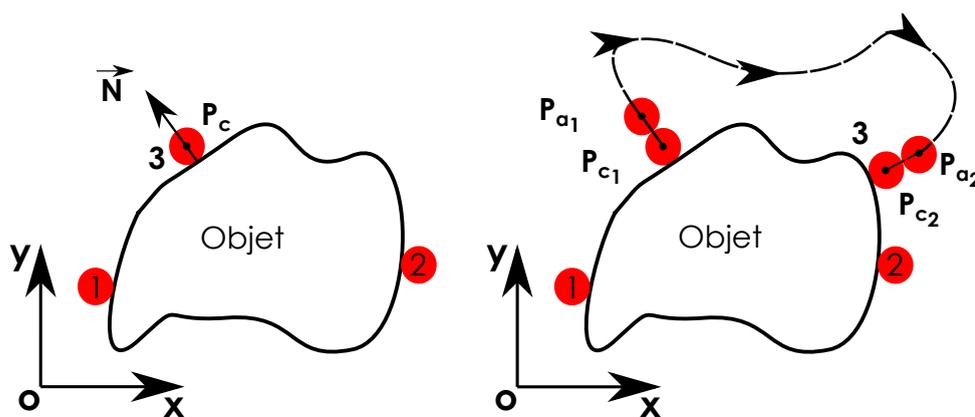


FIGURE 3.7 – Illustration du processus de déplacement lors du changement de la position de contact d'un doigt. La trajectoire représentée n'est pas la trajectoire optimale.

3.3.2/ GÉNÉRATION DES MOUVEMENTS

Chacun des mouvements présentés précédemment est décomposé en deux catégories : d'une part les mouvements libres dans l'espace de travail pour rejoindre soit la position de repos P_0 , soit la position P_a et d'autre part les déplacements contraints le long de la normale au contact.

3.3.2.1/ PLANIFICATION DES MOUVEMENTS LIBRES

Le problème de planification des mouvements libres ressemble à un problème de planification classique pour lequel des points de départ et d'arrivée sont spécifiés. Le but étant de trouver un chemin liant les deux extrémités en évitant les obstacles. Dans notre cas, le point de départ est P_0 (ou P_a) et le point d'arrivée P_a (ou P_0 inversement). Pour cette étape de planification, les obstacles représentent toutes les collisions entre les différents composants. En effet, lors de la phase de mouvement libre le doigt ne doit entrer en collision avec aucun autre élément que ce soit l'objet ou les autres doigts.

Ces trajectoires peuvent être générées en réutilisant la même approche que pour la génération de la séquence de prises. En effet, il est également possible de représenter ce problème comme un parcours de graphe. L'algorithme A^* est donc parfaitement adapté à

cette situation. Toutefois, il reste à construire le graphe à explorer. Une façon très simple de construire le graphe consiste à réaliser un échantillonnage du plan cartésien avec une distance d'échantillonnage sur chaque axe égale à la précision de positionnement que l'on souhaite obtenir (voir Fig. 3.8).

De manière générale, d'autres algorithmes permettent de retourner une solution pour ce problème. Toutefois, l'utilisation de l'algorithme A^* permet de réutiliser le même type d'algorithme que pour la génération de prises. Ainsi l'implémentation est simplifiée.

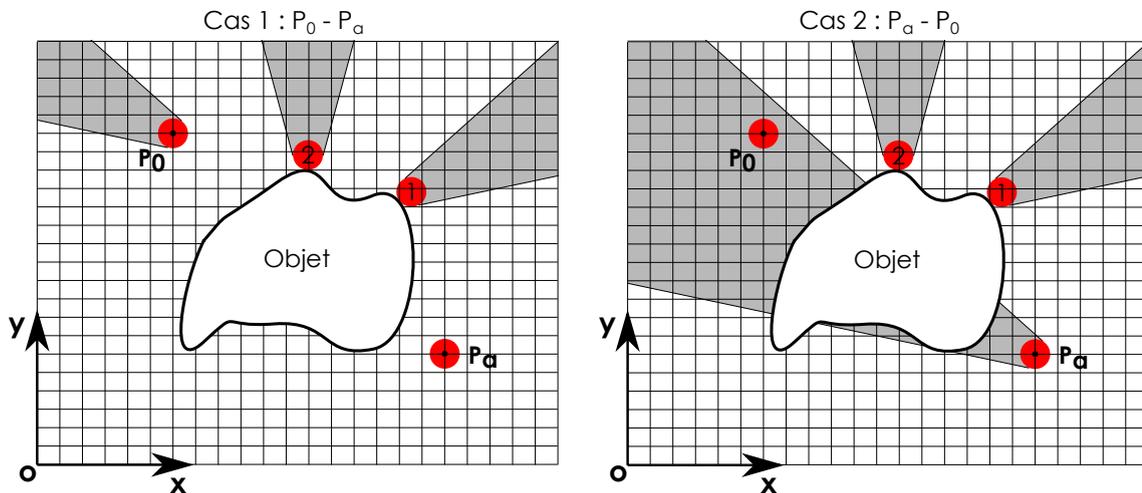


FIGURE 3.8 – Illustration du graphe à parcourir lors de la planification de mouvement libre. Chaque intersection représente un nœud du graphe.

3.3.2.2/ PLANIFICATION DES MOUVEMENTS CONTRAINTS

La planification des mouvements le long de la normale à l'objet est sensiblement plus simple à réaliser que dans le cas précédent. En effet, la direction du mouvement étant contrainte, il suffit d'échantillonner la distance à parcourir afin de générer le déplacement.

De même, la planification de mouvements contraints permet de planifier tous les déplacements de type translation de l'objet. Dans le cas d'une translation, il s'agit de déplacer tous les doigts dans la même direction et sur la même distance. C'est pourquoi, il suffit, là encore, d'échantillonner la distance à parcourir afin d'obtenir la trajectoire de manipulation. De manière évidente, l'échantillonnage doit être le même pour tous les doigts afin qu'ils se déplacent simultanément de la même distance.

3.3.3/ EXEMPLE DE TRAJECTOIRES PLANAIRES

A partir de la séquence de prises, il est possible d'obtenir les trajectoires des doigts. Afin d'illustrer cela, reprenons la séquence de prises utilisée précédemment (équation (3.6), page 77). Cette séquence de huit prises est composée de six étapes pour lesquelles les trajectoires doivent être générées :

- Saisie,
- Rotation,
- Rotation,

- Ajout d'un doigt.
- Retrait d'un doigt.
- Rotation.

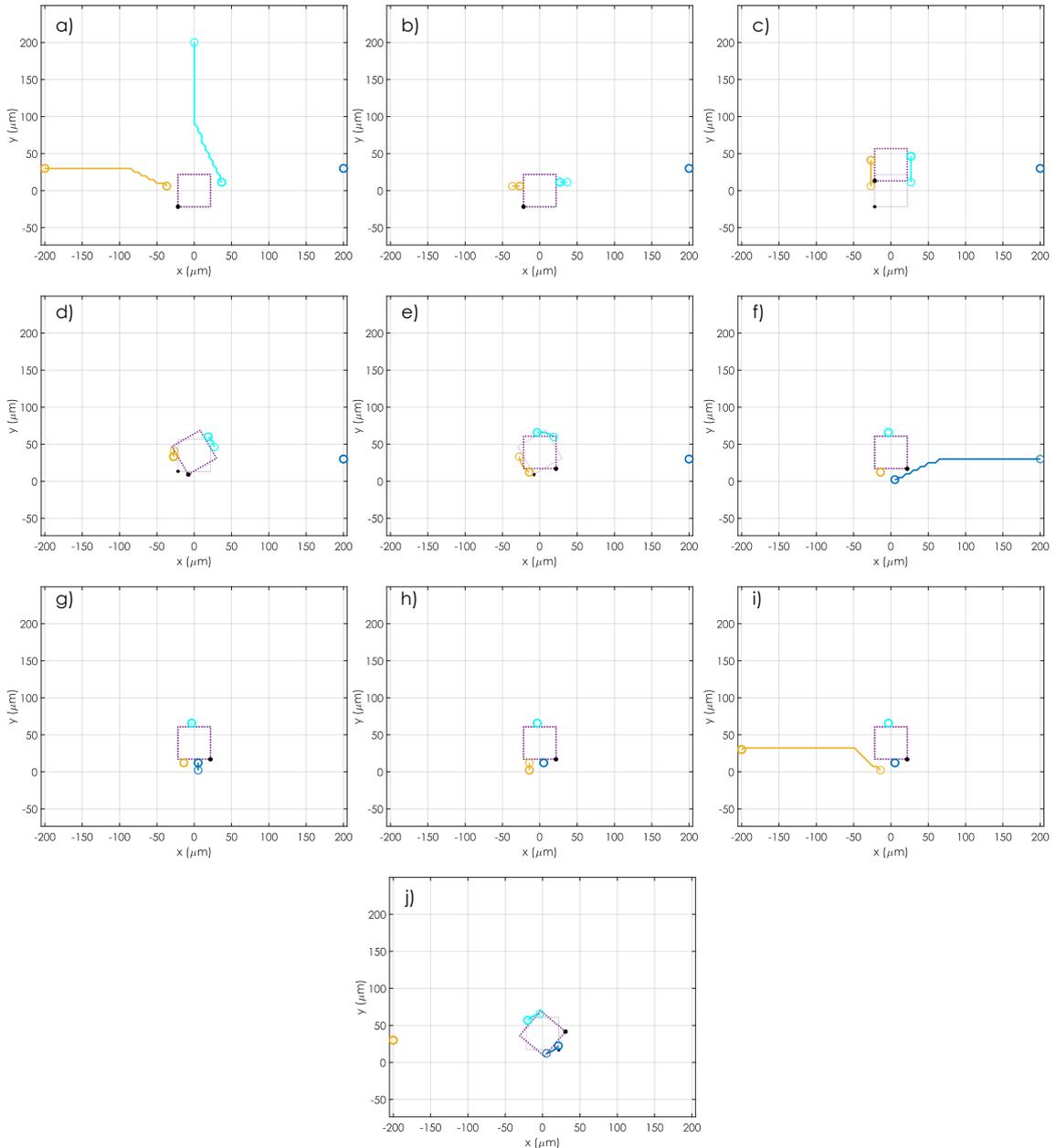


FIGURE 3.9 – Illustration des trajectoires des doigts pour la manipulation d'un carré. La trajectoire du doigt 1 est représentée par la couleur bleue, celle du doigt 2 par la couleur cyan et celle du doigt 3 par la couleur jaune.

Phase de saisie La phase de saisie consiste à venir saisir l'objet en utilisant les doigts 2 et 3. Cette étape peut également être décomposée en sous-étapes : approche des doigts, mise en contact et détachement du support.

Les phases d'approche consistent à générer les trajectoires des doigts depuis leur po-

sition initiale (P_0) vers les positions d'approche (P_a). Dans ce cas un seul doigt bouge librement dans le plan de manipulation tandis que les autres sont considérés comme des obstacles fixes. Ainsi, la trajectoire du doigt 2 est générée en premier en considérant le doigt 3 en position initiale puis la trajectoire du doigt 3 est générée en considérant que le doigt 2 se trouve à sa position d'approche.

Une fois les deux doigts positionnés sur les positions d'approche, il est nécessaire de réaliser la saisie de l'objet. Pour ce faire, les doigts, positionnés sur leurs positions d'approche respectives, doivent rejoindre leurs positions de contact P_c . Cette mise en contact avec l'objet doit être réalisée par les deux doigts simultanément. Dans cette phase de mise en contact, les déplacements sont contraints le long de la normale au contact.

Finalement une fois l'objet saisi, il doit être détaché de son support. Pour cela, une étape de translation est générée afin de lever l'objet suffisamment haut afin qu'il ne percute pas le sol lors de sa rotation.

Afin d'illustrer ces trajectoires, l'exemple de manipulation illustré sur la Fig. 3.3 est réutilisé. Pour cette manipulation, les trajectoires correspondant à la phase de saisie sont illustrées sur la Fig. 3.9. L'étape d'approche des doigts est représentée sur la Fig. 3.9a, l'étape de mise en contact sur la Fig. 3.9b et enfin le détachement du support sur la Fig. 3.9c.

Phase de rotation Les trajectoires de rotation sont obtenues directement à partir de la séquence de prise. En effet, les étapes de rotation sont représentées par les changements de prises suivants : (2) > (3) > (4) puis (7) > (8). Étant donné que chaque prise permet de connaître les coordonnées curvilignes des doigts et l'orientation de l'objet, alors il est facile de connaître la position des doigts dans le plan. Ainsi, pour la séquence (2) > (3) > (4), les doigts changent de position deux fois. La rotation est donc décrite par trois points. De manière générale, une rotation doit être représentée par un grand nombre de points en particulier si l'amplitude est importante.

Dans le cas de l'exemple illustré sur la Fig. 3.3, les trajectoires de rotation correspondant aux changements de prises (2) > (3) > (4) et (7) > (8) sont également illustrées dans la Fig. 3.9. La Fig. 3.9d illustre le passage de la prise (2) vers la prise (3) tandis que la Fig. 3.9e représente le passage de la prise (3) vers la prise (4). Les trajectoires représentées dans ces figures utilisent plus de trois points mais servent à illustrer le principe général. De même, le passage de la prise (7) vers la prise (8) est représenté sur la Fig. 3.9j.

Phase d'ajout d'un doigt Dans cet exemple, l'ajout d'un doigt correspond au placement du doigt 1 sur l'objet. Cet ajout se décompose en deux étapes : l'approche et la mise en contact. De manière similaire à la phase de saisie, l'approche est réalisée en considérant que seul le doigt 1 se déplace. Tous les autres éléments sont considérés comme des obstacles. Le doigt 1 se déplace donc librement dans le plan de manipulation afin de rejoindre la position d'approche P_a . Une fois cette position atteinte, la mise en contact est réalisée le long de la normale au contact en liant les positions d'approche (P_a) et de contact (P_c).

Dans le cas de la manipulation du carré, la trajectoire correspondant à l'ajout du doigt 1 est visible sur la Fig. 3.9. La Fig. 3.9f correspond à la phase d'approche tandis que la Fig. 3.9g correspond à la mise en contact.

Phase de retrait d'un doigt Le retrait du doigt 3 se décompose en deux étapes : le détachement puis le retour à la position initiale. Le détachement est contraint le long de la normale au contact et permet de générer la trajectoire entre P_c , la position de contact du doigt 3, et P_a la position d'approche. Une fois atteinte, le doigt 3 retourne à sa position initiale P_0 . Dans ce cas, le mouvement est libre et les autres doigts représentent les obstacles à éviter.

Comme pour les phases précédentes, l'exemple de la phase de retrait dans le cas de la manipulation du cube est illustré sur la Fig. 3.9. La Fig. 3.9h illustre le détachement contraint du doigt et la Fig. 3.9i représente la trajectoire générée pour rejoindre la position de repos.

3.3.4/ SYNTHÈSE

La séquence de prises générée représente les différentes étapes de l'opération de micromanipulation. Afin d'obtenir les trajectoires des doigts, il est nécessaire de générer les déplacements des doigts entre les prises. Les séquences de prises représentant des rotations permettent de remonter directement aux trajectoires des doigts. Cependant pour les placements et reconfigurations des doigts, il est nécessaire de générer les déplacements des doigts dans l'espace de travail. Pour cela, il est possible de réutiliser une approche de planification par graphe. Dans ce cas, le graphe représente l'espace cartésien et l'algorithme A^* est utilisé pour se déplacer dans cet espace afin de générer les trajectoires des doigts. Comme pour la génération de la séquence de prises, la distance parcourue par les doigts est minimisée afin d'obtenir la manipulation nécessitant le moins de déplacement. Le processus de génération des trajectoires est synthétisé sur la Fig. 3.10.

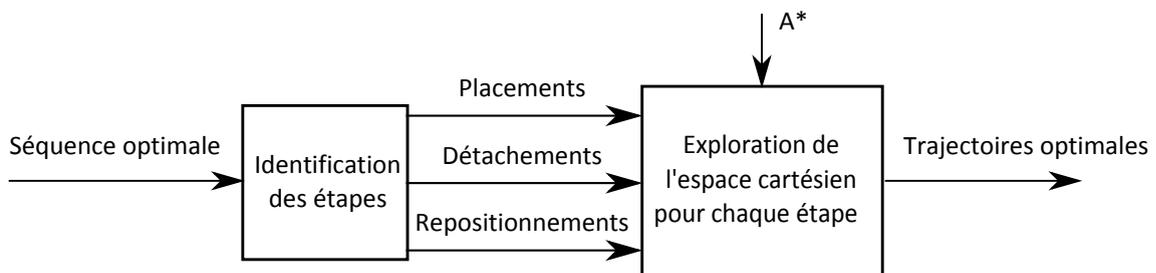


FIGURE 3.10 – Schématisation du processus menant à la génération des trajectoires optimales.

3.4/ OPTIMISATION DES FORCES DE SERRAGE

Les trajectoires obtenues dans la section précédente prennent en compte uniquement la position des doigts. Or, pour garantir que l'objet soit maintenu à l'équilibre, il est nécessaire d'appliquer des forces lors de la réalisation d'une prise afin de garantir l'équilibre. Pour ce faire, nous considérons que les doigts sont compliants. Les efforts appliqués engendrent alors une déformation des doigts. Il est ainsi possible de différencier les trajectoires de l'extrémité des doigts (en contact avec l'objet) de celles de la base des doigts. Les trajectoires de l'extrémité des doigts ont été établies dans les sections

précédentes. Cette section s'attache à définir les trajectoires de la base des doigts qui nécessitent la définition des efforts de manipulation.

3.4.1/ FORMULATION DU PROBLÈME D'OPTIMISATION

Comme présenté dans le chapitre précédent, le problème de la stabilité à N doigts est modélisé par l'équation (2.13) en page 49 :

$$\begin{cases} -w_{ext} = \sum_{i=1}^N w_{c_i} = \sum_{i=1}^N \left(\sum_j \alpha_{i,j} \cdot w_{l_{j,i}} + \beta_i \cdot w_{p_{o_i}} \right) \\ \alpha_{i,j} \geq 0 \\ 1 > \beta_i \geq 0 \end{cases},$$

où w_{ext} englobe aussi bien les forces extérieures que les forces induites par le détachement d'un doigt ou du support.

Pour chaque nœud du graphe, la génération des cartes permet d'assurer l'existence d'une solution à cette équation. Dès lors, il s'agit de déterminer les coefficients $\alpha_{i,j}$ et β_i pour chaque prise réalisée pendant la manipulation. Prenons le cas simple d'une prise planaire à deux doigts sans forces extérieures, l'équation peut alors s'écrire comme suit :

$$\begin{cases} \alpha_{1,1} \cdot w_{l_{1,1}} + \alpha_{1,2} \cdot w_{l_{2,1}} + \beta_1 \cdot w_{p_{o_1}} + \alpha_{2,1} \cdot w_{l_{1,2}} + \alpha_{2,2} \cdot w_{l_{2,2}} + \beta_2 \cdot w_{p_{o_2}} = 0 \\ \alpha_{i,j} \geq 0 \\ 1 > \beta_i \geq 0 \end{cases}. \quad (3.7)$$

Le système ayant un nombre d'inconnues (six) plus grand que le nombre d'équations (trois), une infinité de solutions existe. En effet, dans le cas d'un problème planaire les cônes de frottement sont décomposés en deux torseurs ($w_{l_{1,i}}$ et $w_{l_{2,i}}$) et chaque torseurs comporte trois composantes (force sur x , force sur y et moment sur z).

Ce problème peut s'exprimer facilement sous une forme matricielle. En effet, les torseurs sont connus et peuvent être explicités à l'aide des positions de contact des doigts ($x_{p_{c,i}}$, $y_{p_{c,i}}$), du coefficient de friction μ entre les doigts et l'objet et de la force d'adhésion $f_{p_{o}}$. Ainsi, le torseur de l'action du doigt i sur l'objet peut se mettre sous la forme suivante :

$$w_{c_i} = \alpha_{i,1} w_{l_{1,i}} + \alpha_{i,2} w_{l_{2,i}} + \dots + \alpha_{i,j} w_{l_{j,i}} + \beta_i \cdot w_{p_{o_i}} \quad (3.8)$$

$$= [w_{l_{1,i}} \ w_{l_{2,i}} \ \dots \ w_{l_{j,i}} \ w_{p_{o_i}}] \times [\alpha_{i,1} \ \alpha_{i,2} \ \dots \ \alpha_{i,j} \ \beta_i]^T \quad (3.9)$$

Dès lors, dans le cas d'une prise à plusieurs doigts, le problème de stabilité s'écrit sous forme matricielle de la façon suivante :

$$-w_{ext} = [w_{l_{1,1}} \ \dots \ w_{l_{j,1}} \ w_{ad_1} \ \dots \ w_{l_{1,n}} \ \dots \ w_{l_{j,n}} \ w_{p_{o_n}}] \times [\alpha_{1,1} \ \dots \ \alpha_{j,1} \ \beta_1 \ \dots \ \alpha_{n,1} \ \dots \ \alpha_{n,j} \ \beta_n]^T = A \times X^T \quad (3.10)$$

Ainsi, le calcul des forces de serrage revient à résoudre le problème d'optimisation suivant :

$$\begin{aligned} & \underset{X}{\text{maximiser}} && f(X) \\ & \text{sujet à} && A \times X^T = -w_{ext}, \\ & && \forall i, \forall j, \alpha_{i,j} \geq 0, 1 > \beta_i \geq 0, . \end{aligned}$$

3.4.2/ FONCTION D'OPTIMISATION

Il reste donc à déterminer la fonction d'optimisation. À l'échelle macro-métrique, l'objectif est souvent de s'éloigner au plus des positions singulières de la structure. En revanche, dans notre cas, nous considérons que la structure robotique, composée de trois doigts, est déplacée à l'aide d'actionneurs linéaires dont la plage de déplacement est largement plus grande que l'objet à manipuler. De ce fait, les positions singulières sont limitées. C'est pourquoi, nous nous intéressons uniquement aux limites de stabilité de la prise.

La limite de stabilité est caractérisée par le cône de frottement en chaque point de contact. Plus précisément, les cônes de frottement représentent les limites de modèle de contact choisi. Ainsi, il est pertinent d'optimiser les efforts appliqués afin qu'ils soient les plus éloignés de ces limites. De cette façon, les forces générées seront plus robustes aux erreurs de modèle. Pour le doigt i , la distance aux limites peut être quantifiée à l'aide de j longueurs ($h_{i,1}, \dots, h_{i,j}$) qui représentent les distances entre la force appliquée et chacun des j vecteurs qui approximent les limites du cône de frottement dans l'espace cartésien. Ces vecteurs sont notés $\vec{f}_{1,i}, \dots, \vec{f}_{j,i}$. La Fig. 3.11 donne un exemple dans un cas planaire.

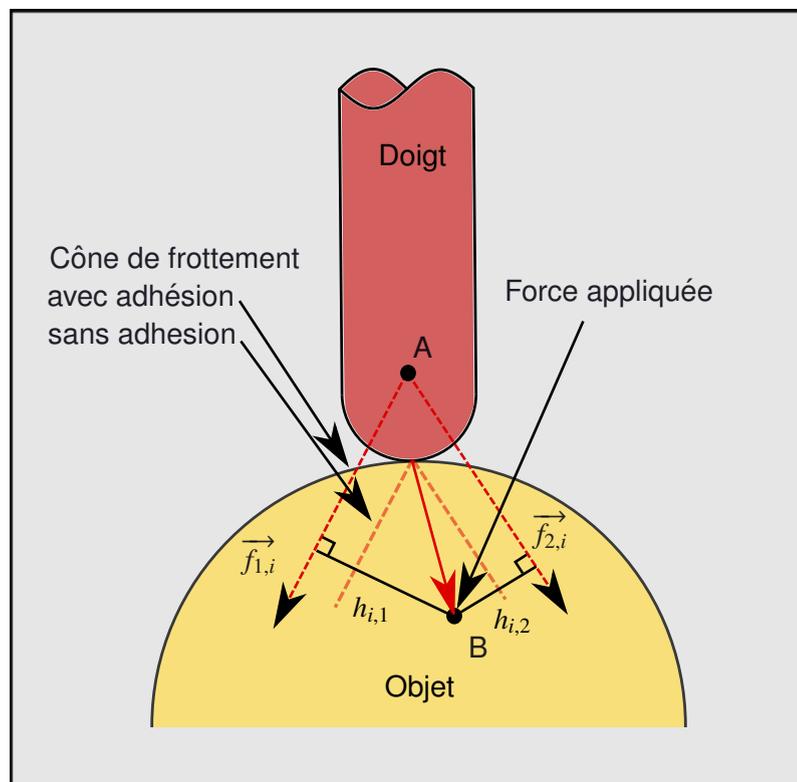


FIGURE 3.11 – Exemple planaire du calcul des distances entre une force appliquée et les limites du cône de frottement.

La force appliquée par le doigt i étant entièrement caractérisée par les coefficients $\alpha_{i,j}$ et β_i ainsi que les torseurs $w_{l_j,i}$, il est donc possible d'exprimer les distances h en fonction de ces coefficients à l'aide de la formule suivante :

$$h_{i,j} = \frac{\|\vec{f}_{j,i} \wedge \vec{BA}\|}{\|\vec{f}_{j,i}\|} \quad (3.11)$$

où \vec{BA} représente le vecteur entre l'extrémité de la force appliquée et le sommet du cône de frottement.

Pour obtenir les forces les plus éloignées des limites des cônes de frottement, il suffit alors de maximiser ces distances. La fonction d'optimisation a donc été choisie avec la forme suivante :

$$f(X) = \sum_i \sum_j |h_{i,j}| \quad (3.12)$$

Cette optimisation est réalisée en utilisant des méthodes de programmation non linéaire. En appliquant cette optimisation pour chaque étape de la manipulation, il est donc possible d'obtenir des trajectoires qui garantissent, qu'en chaque point de la trajectoire, l'objet est saisi de manière à garantir sa stabilité.

3.5/ DISCUSSION SUR LA MÉTHODE PROPOSÉE

La méthode proposée permet d'obtenir des trajectoires de manipulation. Toutefois certains points méritent d'être commentés.

Optimalité de la solution L'algorithme A^* utilisé pour générer les prises ainsi que les trajectoires permet de retourner des solutions optimales pour les coûts et les heuristiques choisies. Néanmoins, dans notre cas, le processus de génération est scinder en deux étapes de planification. De ce fait, les deux séquences prises indépendamment sont optimales mais pas nécessairement la trajectoire globale. En effet, les coûts utilisés lors de la planification de la séquence de prises correspondent à l'heuristique utilisée lors de la planification des déplacements des doigts. De ce fait, les trajectoires retournées ne sont pas globalement optimales sur l'espace cartésien mais la solution obtenue s'en rapproche. Ces deux étapes de planification pourraient être unifiées dans un seul graphe afin de retourner la solution optimale.

Planification des déplacements dans l'espace cartésien Le choix d'utiliser un échantillonnage régulier du plan afin de planifier les déplacements des doigts n'est pas nécessairement la méthode la plus pertinente. En effet, cette approche force l'exploration d'un très grand nombre de nœuds. Tandis que d'autres approches, par exemple basées sur des graphes de visibilité, semblent peut être plus adaptées.

Contrainte de simultanéité Lorsque les doigts saisissent l'objet sur son support, ils doivent se mettre en contact simultanément. Cette contrainte forte, peut dans certains cas, en particulier les cas expérimentaux, ne pas être obtenue. Dès lors, le doigt en contact risque de déplacer l'objet et de perturber la manipulation. C'est pourquoi, il pourrait être pertinent de rechercher la séquence de mise en contact qui permet de garantir que la manipulation ne sera pas impactée.

3.6/ CONCLUSION

Ce chapitre a permis de présenter une approche originale de la planification de micromanipulation dextre planaire. L'approche développée permet de générer des trajectoires de manipulation pour des objets de géométrie quelconque et pour n'importe quel déplacement dans le plan. Cette approche se décompose en trois étapes :

- Génération de la séquence de prises,
- Génération des trajectoires des doigts pour relier les différentes prises,
- Optimisation des forces de préhension le long de la trajectoire,

Les deux premières étapes se basent sur une représentation sous forme de graphes du problème de micromanipulation dextre. L'exploration de ces graphes, à l'aide d'un algorithme A^* , permet de retourner la séquence optimale de prises⁴ ainsi que les trajectoires des doigts pour réaliser l'opération de micromanipulation. Dans notre cas, il a été choisi d'optimiser les déplacements des doigts afin d'obtenir la manipulation nécessitant le moins de déplacement. La dernière étape consiste à générer les efforts appliqués par les doigts durant la manipulation. Cette étape permet d'optimiser les efforts afin de s'éloigner au maximum des limites du modèle de frottement utilisé.

A notre connaissance, la méthode de planification proposée représente également une contribution majeure et est la première méthode intégrant les phénomènes d'adhésion et permettant de considérer des objets planaires quelconques. Le chapitre suivant illustre et analyse les trajectoires obtenues à l'aide de cette méthode.

4. pour les coûts spécifiés

VALIDATION ET ANALYSE DES TRAJECTOIRES DE MICROMANIPULATIONS DEXTRES

Sommaire

4.1 Simulations et analyse du fonctionnement de l'algorithme	92
4.1.1 Trajectoires sans reconfiguration	92
4.1.2 Trajectoires avec reconfiguration	94
4.1.2.1 Reconfiguration due aux limites du cône de frottement	95
4.1.2.2 Reconfiguration due aux limites de collision	98
4.1.2.3 Configuration en cul-de-sac	99
4.2 Influences des paramètres physiques sur la génération de trajectoires	101
4.2.1 Présentation de la manipulation de référence	101
4.2.2 Influence de la friction	103
4.2.2.1 Influence de la friction sur l'espace de planification	103
4.2.2.2 Influence de la friction sur la manipulation	104
4.2.3 Influence de l'adhésion	104
4.2.3.1 Influence de l'adhésion sur l'espace de planification	105
4.2.3.2 Influence de la présence d'adhésion sur la manipulation	107
4.2.4 Influence de l'effort extérieur	107
4.2.4.1 Influence de l'effort extérieur sur l'espace de planification	107
4.2.4.2 Influence de l'effort extérieur sur la manipulation	109
4.2.5 Influence de la géométrie	109
4.3 Discussions sur les résultats simulés	111
4.4 Résultats expérimentaux	112
4.4.1 Plate-forme expérimentale de manipulation	112
4.4.1.1 Présentation de la plate-forme	112
4.4.1.2 Calibration du dispositif	113
4.4.2 Manipulation d'objets millimétriques	113
4.4.2.1 Objet tridimensionnel	114
4.4.2.2 Objet quelconque planaire	116
4.4.3 Manipulation d'objets micrométriques	119
4.5 Discussion générale des résultats et de la méthode	119
4.6 Conclusion	121

Ce chapitre vise à remplir trois objectifs. Premièrement, il s'agit d'illustrer les trajectoires générées ainsi que le comportement caractéristique de l'algorithme de planification. Une fois cette étape remplie, les différents paramètres physiques de l'algorithme, à savoir les forces d'adhésion, le coefficient de friction ou encore les forces extérieures, sont analysés afin de comprendre leurs impacts sur les différentes cartes ainsi que sur les trajectoires générées. Finalement, plusieurs validations expérimentales sont présentées afin d'illustrer la pertinence d'un tel planificateur et l'impact des effets adhésifs sur la micromanipulation dextre.

4.1/ SIMULATIONS ET ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DE L'ALGORITHME

La méthodologie présentée dans les chapitres précédents a été implémentée et testée pour générer des trajectoires de manipulation dextre planaire. Cette section présente différents exemples afin d'illustrer deux types de trajectoires :

- Trajectoires sans reconfiguration,
- Trajectoires avec reconfiguration.

Pour ce faire, nous considérons plusieurs géométries d'objets et de manipulateur ainsi que plusieurs jeux de paramètres physiques qui sont détaillés dans la suite de cette section. Néanmoins, tous les exemples ci-dessous considèrent un manipulateur composé de trois doigts cylindriques. De ce fait l'espace de planification est représenté par quatre cartes d'équilibre (trois à deux doigts et une à trois doigts), trois cartes de reconfigurations (une pour le détachement de chaque doigt lors d'une prise à trois doigts) et quatre cartes de prises initiales. Il est à noter que les paramètres de l'algorithme (coûts et heuristique) sont systématiquement comme dans le Chapitre 3, en page 74.

4.1.1/ TRAJECTOIRES SANS RECONFIGURATION

Afin d'illustrer le comportement d'une trajectoire sans reconfiguration, nous considérons un objet de forme simple illustré sur la Fig. 4.1a. Dans cet exemple, ce cylindre de $50\mu\text{m}$ de diamètre est manipulé dans le but de réaliser une rotation de 150° dans le sens horaire. Afin de pouvoir générer les déplacements des doigts, il est nécessaire de connaître les différents paramètres influant sur la manipulation. Ainsi, on considère l'existence d'effets d'adhésion (aussi bien entre le support et l'objet qu'entre les doigts et l'objet), l'absence d'efforts extérieurs et une friction constante entre les doigts et l'objet. Plus précisément, les valeurs retenues de ces paramètres sont les suivantes :

- $f_{po,sup}$: la force d'adhésion entre l'objet et le support est de $2\mu\text{N}$,
- f_{po} : la force d'adhésion entre les doigts et l'objet est de $1\mu\text{N}$.
- w_{ext} : les efforts extérieurs sont de $0\mu\text{N}$.
- μ : la friction entre les doigts et l'objet est de $0,5$.
- r_d : le rayon des doigts est de $5\mu\text{m}$.

La Fig. 4.1 montre la manipulation générée par l'algorithme. La prise initiale permet d'exercer une force suffisante afin de détacher l'objet de son support (Fig. 4.1a-d). Ensuite, aucune reconfiguration n'est nécessaire pour réaliser la rotation de 150° et seule-

ment deux doigts sont utilisés (Fig. 4.1d-f). Dans le cas de cette manipulation, la trajectoire faisant intervenir les plus faibles déplacements des doigts est donc une trajectoire sans reconfiguration. Bien que des effets d'adhésion existent entre les doigts et l'objet, on remarque que cette manipulation ne fait pas intervenir de prise exploitant cette propriété. Les trajectoires des doigts pendant la manipulation sont illustrées en Annexe 4.

La Fig. 4.2 illustre la trajectoire réalisée du point de vue de l'espace de planification. La prise initiale, choisie par l'algorithme, correspond donc à un élément de coordonnées $(3,5\mu\text{m}; 87,2\mu\text{m})$ dans la carte initiale $I_{1,3}$. Cette prise est directement liée à la prise correspondante dans la carte d'équilibre $M_{1,3}$. De cette configuration, la rotation s'effectue en parcourant une droite dans la carte d'équilibre pour atteindre la prise de coordonnées $(16,6\mu\text{m}; 100,3\mu\text{m})$. La distance parcourue par les doigts sur la surface de l'objet est de $13,1\mu\text{m}$. Sur cette figure sont également représentées les positions de la prise initiale et finale dans leurs cartes respectives. On remarque alors que la prise finale se situe aux limites de la carte d'équilibre $M_{1,3}$. Ainsi pour une rotation de plus grande amplitude deux options sont possibles : garder la même prise initiale et effectuer une reconfiguration où trouver une prise initiale qui permet d'effectuer la rotation sans reconfiguration.

Le coût de roulement étant généralement plus faible que le coût d'une reconfiguration, la distance parcourue dans les cartes d'équilibre est donc maximisée au risque d'obtenir une configuration finale proche des limites.

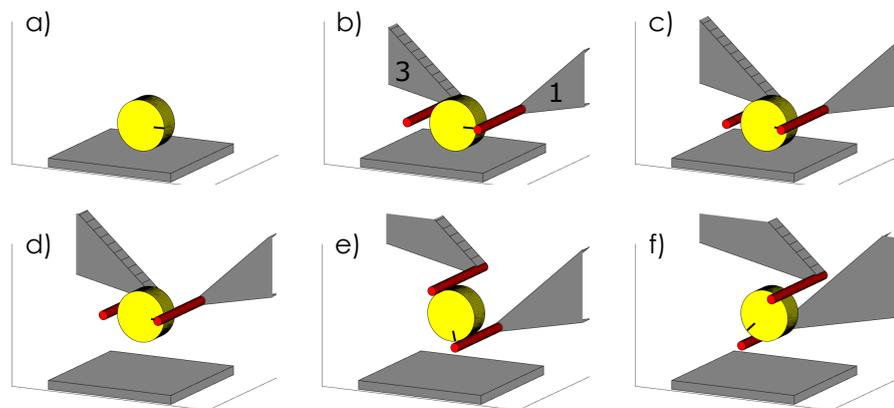


FIGURE 4.1 – Séquence d'images illustrant la saisie et la rotation d'un cylindre par deux doigts. La marque sur l'objet représente l'origine de l'abscisse curviligne

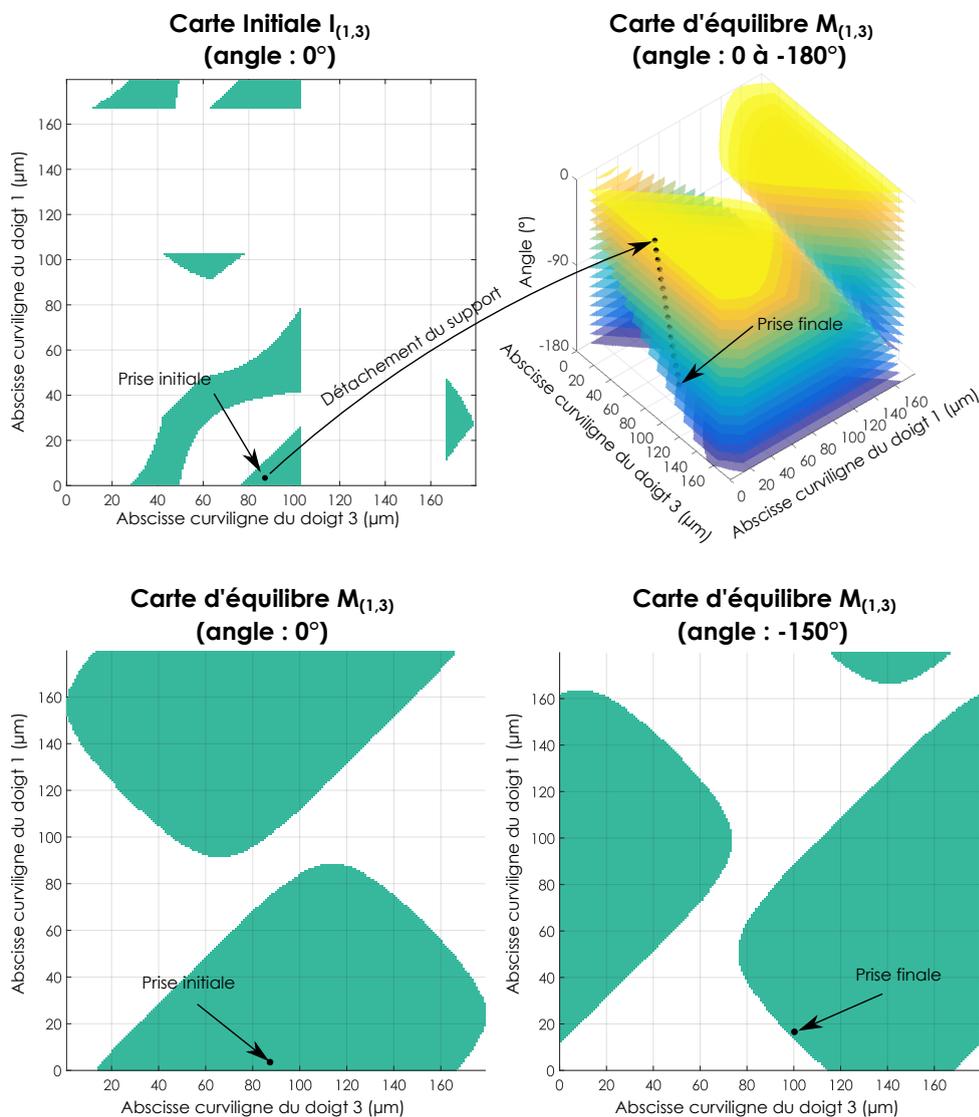


FIGURE 4.2 – Représentation de la manipulation du cylindre dans l'espace de planification.

4.1.2/ TRAJECTOIRES AVEC RECONFIGURATION

Le coût d'une rotation étant plus faible que celui d'une reconfiguration, l'algorithme privilégie les rotations sans reconfiguration. Lorsque aucune prise initiale ne permet de manipuler l'objet sans reconfiguration, l'algorithme sélectionne les meilleures reconfigurations possibles, c'est-à-dire, celles qui minimisent le coût global de la manipulation. Dans notre cas il s'agit des reconfigurations requérant, au total, le moins de déplacement des doigts. Ces reconfigurations sont nécessaires lorsque la prise atteint soit les limites de collision, soit les limites d'équilibre liées au cône de frottement.

4.1.2.1/ RECONFIGURATION DUE AUX LIMITES DU CÔNE DE FROTTEMENT

Afin d'illustrer les reconfigurations dues aux limites des cônes de frottement, nous considérons un objet de forme polygonal. Cet objet, visible sur la Fig. 4.3, est un parallépipède rectangle possédant deux cotés de $48\mu\text{m}$. Nous considérons également les paramètres de manipulation suivants :

- $f_{po,sup}$: la force d'adhésion entre l'objet et le support est de $0\mu\text{N}$,
- f_{po} : la force d'adhésion entre les doigts et l'objet est de $0\mu\text{N}$.
- w_{ext} : les efforts extérieurs sont de $0\mu\text{N}$.
- μ : la friction entre les doigts et l'objet est de $0,3$.
- r_d : le rayon des doigts est de $5\mu\text{m}$.

La manipulation considérée est une rotation de 180° dans le sens anti-horaire. La séquence générée est visible sur la Fig. 4.3. Cette manipulation se décompose en trois phases : deux phases de rotation et une phase de reconfiguration. La première phase de rotation consiste à réaliser une rotation de 90° , telle que représentée sur la Fig. 4.3d-f. Une fois cette rotation réalisée, la prise est reconfigurée (Fig. 4.3f-j) en raison des limites du cône de frottement. Une fois cette reconfiguration terminée, l'objet est de nouveau retourné de 90° (Fig. 4.3j-l).

Les trajectoires des doigts ainsi que l'ensemble des cartes utilisées lors de cette manipulation sont disponibles en Annexe 4. L'objectif de cet exemple est de décrire le fonctionnement de notre algorithme lors d'une reconfiguration. De ce fait, les explications sont focalisées sur cette phase.

Les cartes liées à la reconfiguration de la prise sont représentées dans la Fig. 4.4. La prise à deux doigts (doigt 2 et doigt 3) obtenue suite à la rotation va fortement limiter les positions sur lesquelles le doigt 1 peut être placé. En effet, comme le montre la carte d'équilibre $M_{(1,2,3)}$ seules quelques positions de contact sont admissibles. La carte d'équilibre $M_{(1,2,3)}$ représentée sur cette figure ne comporte qu'une seule dimension car la position des autres doigts ainsi que l'orientation de l'objet sont fixés afin d'en simplifier la compréhension. Parmi ces positions, l'algorithme va alors choisir celle qui permet de réaliser les 90° restant avec le moins de déplacement des doigts. Deux options sont alors possibles : soit réaliser la rotation restante avec les trois doigts, soit repasser à deux doigts pour ensuite effectuer la rotation. Dans notre cas, la rotation à trois doigts n'est pas choisie par l'algorithme car la rotation réalisable est très limitée (quelle que soit la position choisie du doigt 1). C'est pourquoi, le doigt 1 est placé à la position curviligne $158\mu\text{m}$ puis le doigt 3 est retiré. Ce retrait est possible puisque la prise de coordonnées $(158\mu\text{m}; 68,9\mu\text{m}; 138,7\mu\text{m})$ appartient bien à la carte de reconfiguration $D_{(1,2,3)_3}$.

Finalement, la prise à deux doigts obtenue permet de réaliser la rotation restante (voir Annexe 4 pour plus de détails).

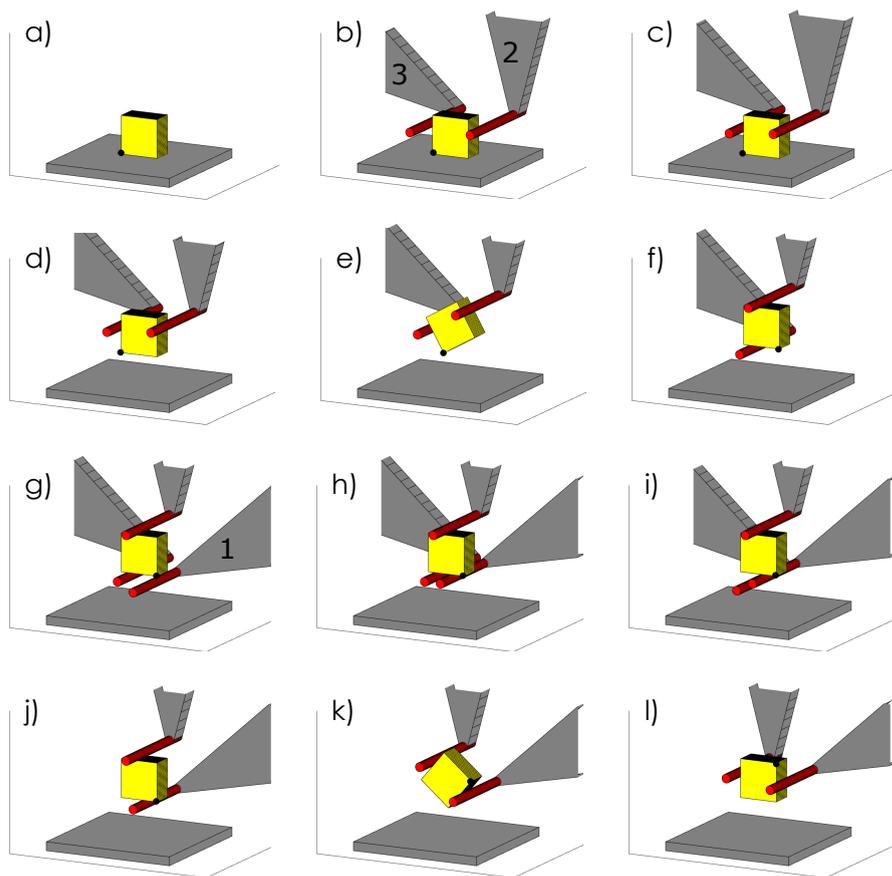


FIGURE 4.3 – Séquence d'images illustrant la saisie et la rotation d'un parallélépipède rectangle possédant deux cotés de $48\mu\text{m}$.

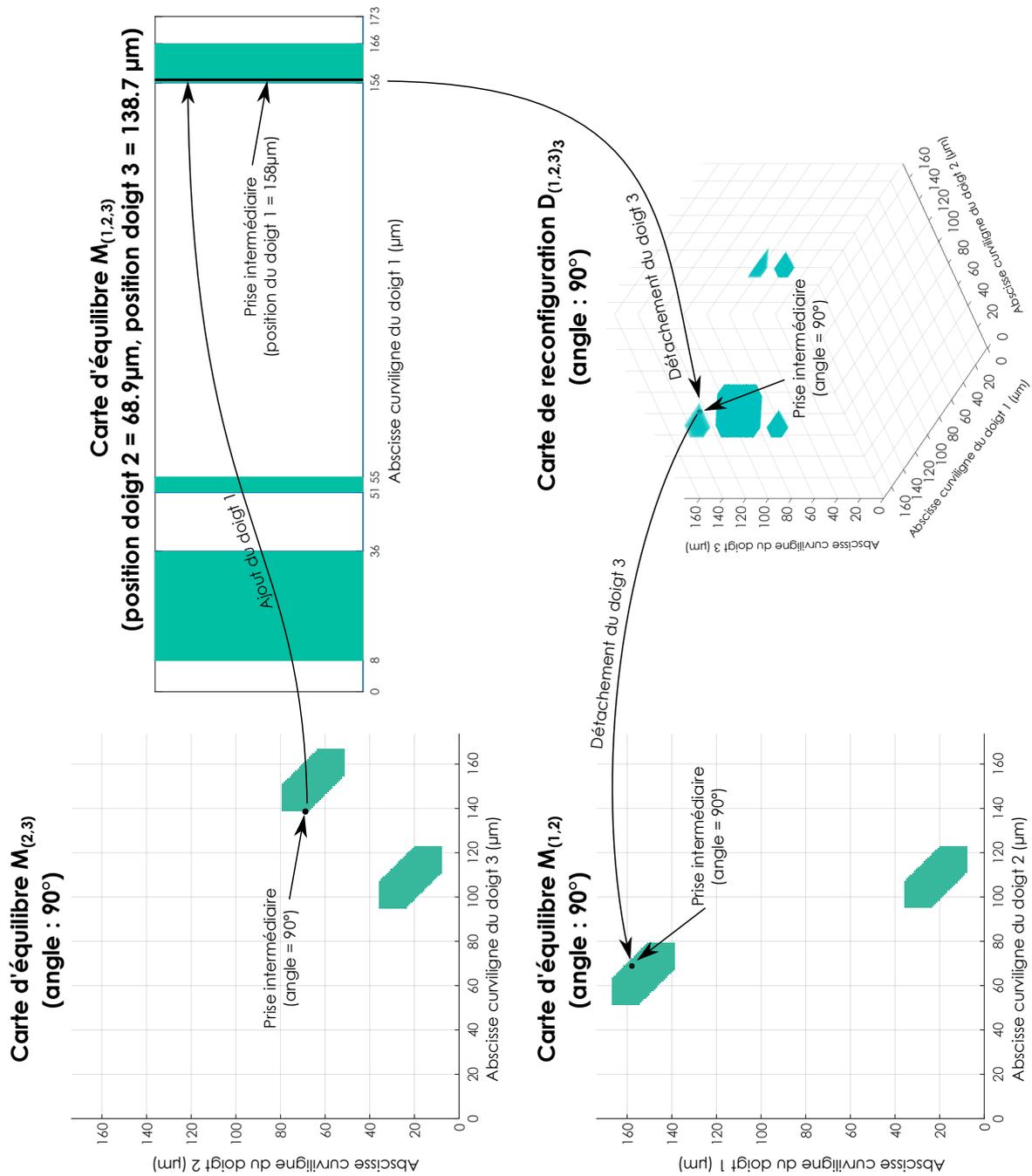


FIGURE 4.4 – Représentation de la reconfiguration lors de la manipulation du parallélépipède rectangle dans l'espace de planification.

4.1.2.2/ RECONFIGURATION DUE AUX LIMITES DE COLLISION

L'autre cas nécessitant une reconfiguration est lorsque les doigts atteignent leurs limites de collision. Pour illustrer ce phénomène, nous considérons le cylindre de $50\mu\text{m}$ de diamètre manipulé précédemment et les paramètres de manipulation suivants :

- $f_{po,sup}$: la force d'adhésion entre l'objet et le support est de $2\mu\text{N}$,
- f_{po} : la force d'adhésion entre les doigts et l'objet est de $0\mu\text{N}$.
- w_{ext} : les efforts extérieurs sont de $0\mu\text{N}$.
- μ : la friction entre les doigts et l'objet est de $0,5$.
- r_d : le rayon des doigts est de $5\mu\text{m}$.

Le cylindre est la géométrie la plus adaptée pour illustrer ces reconfigurations. En effet, les limites du cône de frottement ne peuvent pas être dépassées lorsque les doigts roulent sur la surface de l'objet puisque les doigts restent toujours l'un en face de l'autre à la même distance.

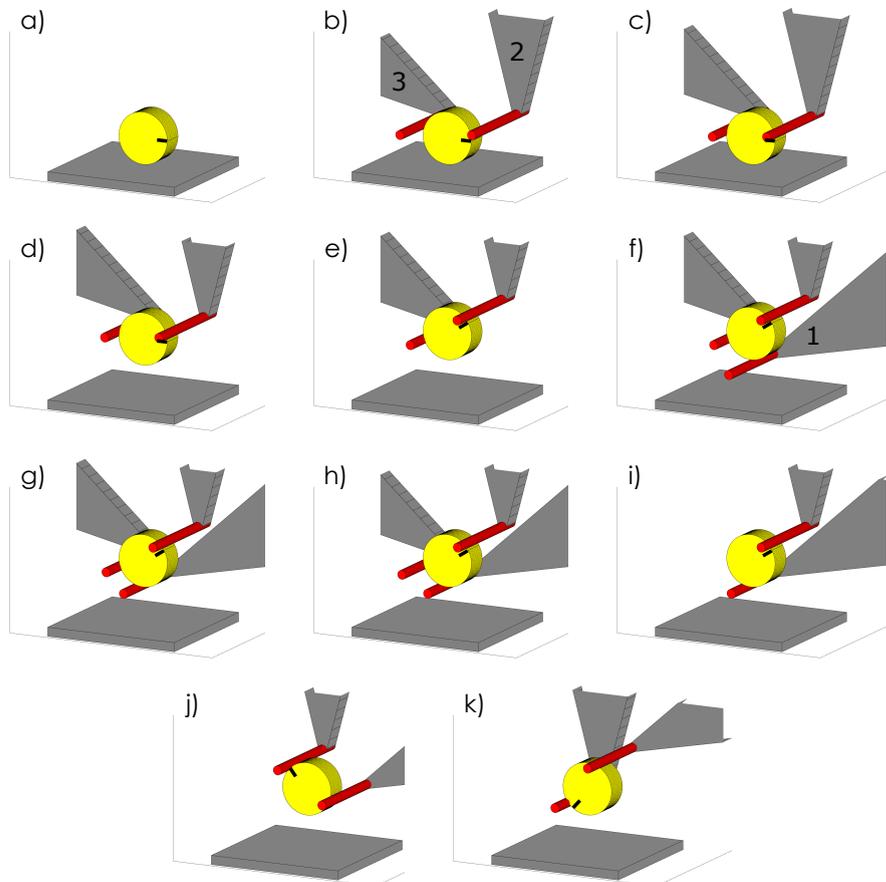


FIGURE 4.5 – Séquence d'images illustrant la saisie et la rotation d'un cylindre par trois doigts.

La Fig. 4.5 montre la manipulation générée pour réaliser une rotation de 240° dans le sens anti-horaire. Pour réaliser cette manipulation une reconfiguration est nécessaire. Cette dernière, visible sur les figures 4.5e-i, ne semble pourtant pas être liée à un

problème de collision. Toutefois, si l'on observe la prise finale obtenue après la rotation (Fig. 4.5k), on remarque que les doigts sont à la limite de collision. Ainsi, l'algorithme n'a pas planifié de reconfiguration pour éviter les collisions entre les doigts 2 et 3 mais pour garantir que les doigts 1 et 2 puissent aller au terme de la rotation. L'algorithme n'attend donc pas de rencontrer une collision pour planifier les reconfigurations mais, au contraire, optimise la manipulation dans son ensemble afin d'obtenir une manipulation optimale sans collision.

Cette manipulation est très similaire à la manipulation du parallélépipède rectangle et ne sera donc pas illustrée dans l'espace de planification. La trajectoire est toutefois illustrée en Annexe 4 pour les curieux.

4.1.2.3/ CONFIGURATION EN CUL-DE-SAC

Une dernière caractéristique de l'algorithme proposé est la génération de trajectoires pouvant conduire à des configurations en frontière des cartes d'équilibre M et où aucune reconfiguration n'est possible. Pour illustrer ce phénomène, nous considérons une géométrie de manipulateur différente des précédents exemples et les paramètres de manipulation suivants :

- $f_{po,sup}$: la force d'adhésion entre l'objet et le support est de $0\mu\text{N}$,
- f_{po} : la force d'adhésion entre les doigts et l'objet est de $5,5\mu\text{N}$.
- w_{ext} : les efforts extérieurs sont de $0\mu\text{N}$.
- μ : la friction entre les doigts et l'objet est de $0,3$.
- r_d : le rayon des doigts est de $5\mu\text{m}$.

L'existence de ces configurations cul-de-sac est illustré sur la Fig. 4.6. La première trajectoire visible permet de réaliser une rotation de 180° sans reconfiguration. La configuration finale de cette trajectoire (visible sur la Fig. 4.6f) est caractérisé par la proximité imminente d'une collision et l'impossibilité de réaliser une reconfiguration. Ainsi, si l'on planifie une rotation de plus grande amplitude, par exemple 200° , la configuration cul-de-sac ne sera plus empruntée (voir la seconde trajectoire sur la Fig. 4.6). Dans ce cas, une reconfiguration est nécessaire à l'étape d) afin de réaliser la rotation de 200° . Il est à remarquer que la configuration finale de la seconde trajectoire est elle aussi une configuration cul-de-sac. L'annexe 4 présente également en détail la trajectoire de 200° .

Ainsi, une modification de quelques degrés sur l'amplitude de rotation peut sensiblement modifier la trajectoire générée.

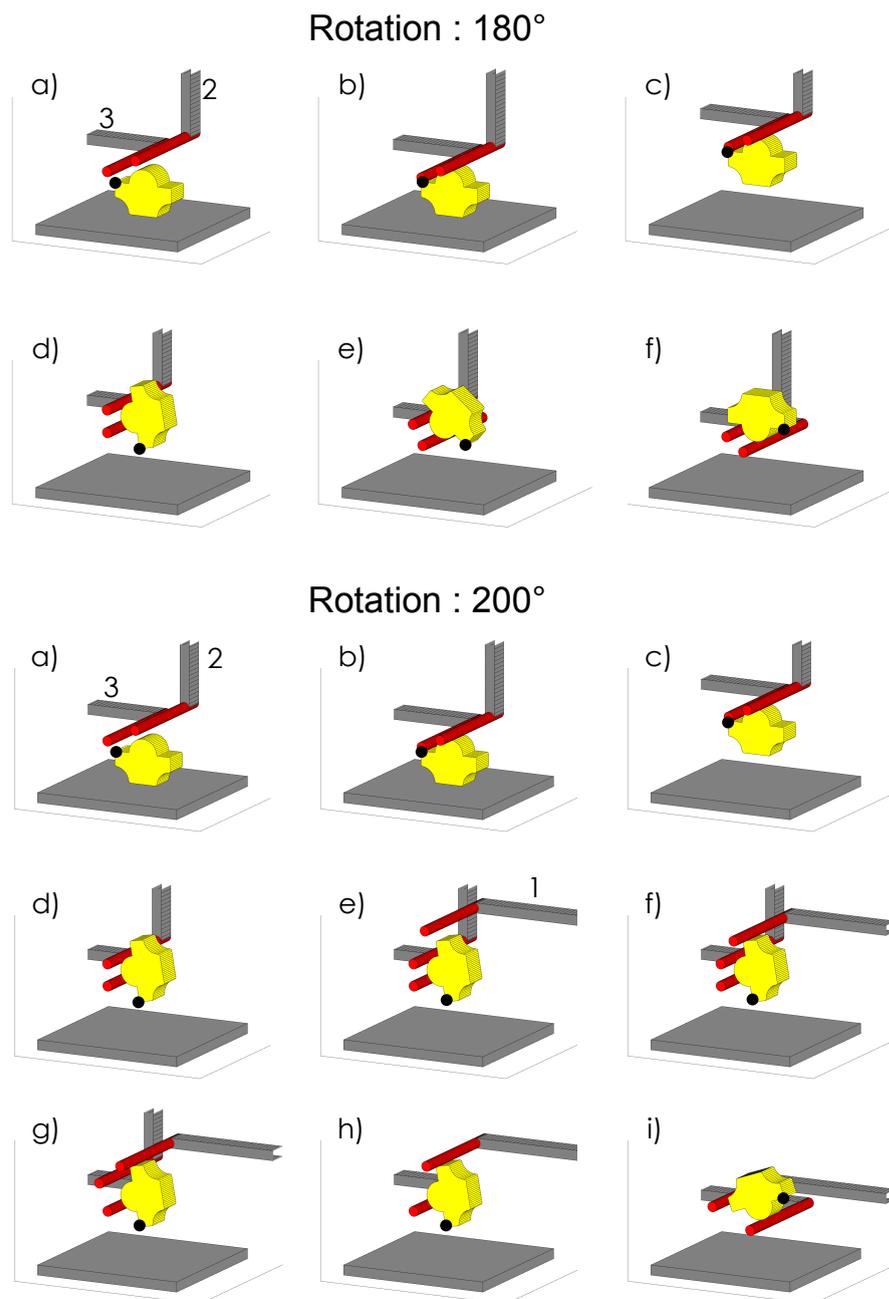


FIGURE 4.6 – Séquence d'images illustrant la saisie et la rotation d'un objet quelconque par deux doigts.

4.2/ INFLUENCES DES PARAMÈTRES PHYSIQUES SUR LA GÉNÉRATION DE TRAJECTOIRES

La section précédente a permis d'illustrer le fonctionnement de l'algorithme à travers divers exemples. Toutefois, dans les différents exemples, les paramètres physiques de simulation sont différents et il est intéressant de comprendre leurs impacts sur les manipulations générées. Dans cette section, les questions suivantes seront donc étudiées :

- **Friction** : dans quelle mesure la valeur de la friction impacte la manipulation ?
- **Adhésion** : l'adhésion change-elle réellement le paradigme de la manipulation dextre ?
- **Effort externe** : l'influence d'un effort externe tel que le poids est-il négligeable ?
- **Géométrie** : la géométrie de l'objet influe-t-elle sur la distance parcourue par les doigts pendant la manipulation ?

4.2.1/ PRÉSENTATION DE LA MANIPULATION DE RÉFÉRENCE

Afin d'analyser l'influence des différents paramètres, nous considérerons une manipulation de référence basée sur des paramètres dits "nominaux". L'impact de la variation de chaque paramètre sera effectué en comparaison avec cette situation de référence.

Nous choisissons un objet de forme quelconque, décrit sur la Fig. 4.7, manipulé par trois doigts. La rotation planifiée est de 180° et les trajectoires sont générées en considérant les paramètres nominaux suivants :

- $f_{po, sup}$: la force d'adhésion entre l'objet et le support est de $0\mu\text{N}$,
- f_{po} : la force d'adhésion entre les doigts et l'objet est de $0\mu\text{N}$.
- w_{ext} : les efforts extérieurs sont de $0\mu\text{N}$.
- μ : la friction entre les doigts et l'objet est de 0,3.
- r_d : le rayon des doigts est de $5\mu\text{m}$.

Cette manipulation de 180° , visible sur la Fig. 4.7, se décompose donc en quatre étapes de rotation et trois étapes de reconfiguration. L'objet est tout d'abord saisi à l'aide des doigts 2 et 3 (Fig. 4.7a-d). Ensuite, une première étape de rotation est réalisée (Fig. 4.7d-e). Cette rotation place les deux doigts (2 et 3) aux limites de stabilité. Le doigt 1 est ensuite ajouté (Fig. 4.7f). L'ajout du doigt 1 permet d'effectuer la deuxième étape de rotation à l'aide des trois doigts (Fig. 4.7f-g). Afin d'éviter d'atteindre une configuration cul-de-sac, le doigt 2 est remplacé sur une nouvelle position (Fig. 4.7h). Cette nouvelle prise à trois doigts permet de réaliser la troisième étape de rotation (Fig. 4.7h-i). Les limites de collision sont quasiment atteintes dans la configuration i) (Fig. 4.7i). Le doigt 3 est alors retiré et la rotation est terminée à l'aide des doigts 1 et 2 (Fig. 4.7i-k).

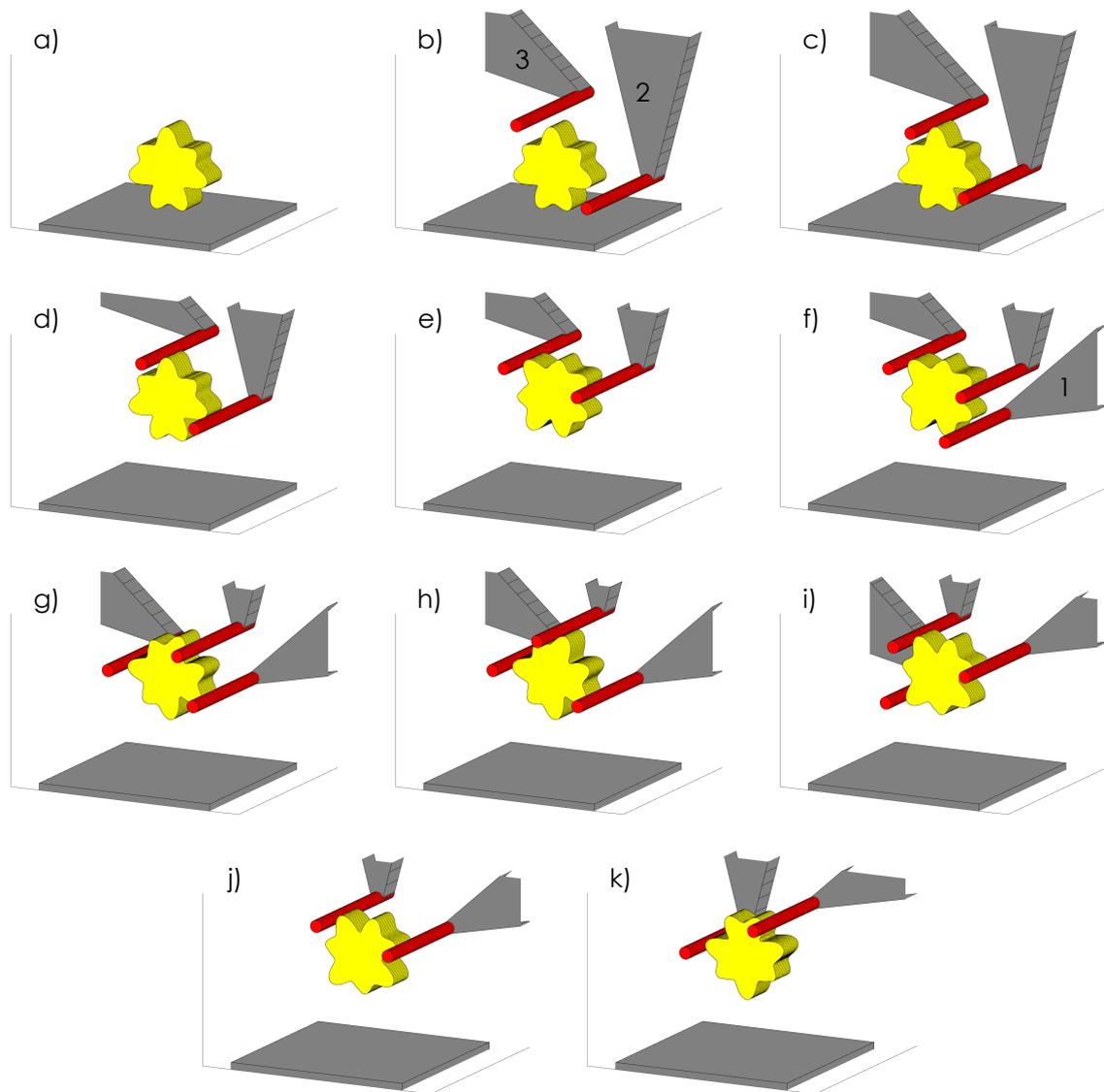


FIGURE 4.7 – Séquence d'images illustrant la manipulation de référence.

4.2.2/ INFLUENCE DE LA FRICTION

Le coefficient de friction est directement lié à l'angle du cône de frottement. En effet, plus la friction est élevée plus le cône de frottement est large. Ainsi, la friction va nécessairement avoir un impact sur les différentes cartes et donc sur les trajectoires. L'objectif de cette section est d'étudier l'influence de ce paramètre sur les cartes et sur les manipulations.

4.2.2.1/ INFLUENCE DE LA FRICTION SUR L'ESPACE DE PLANIFICATION

Tout d'abord l'influence de la friction sur les cartes utilisées pour générer les mouvements dextres est étudiée. Pour cela, nous avons généré les différentes cartes pour une friction variant entre 0,05 et 2. Les autres paramètres sont identiques à ceux de la trajectoire de référence. La Fig. 4.8 montre l'évolution du nombre de prises¹, pour l'orientation 0°, contenues dans les cartes d'équilibre à deux doigts ($M_{(1,2)}$, $M_{(1,3)}$ et $M_{(2,3)}$) et dans la carte de reconfiguration du doigt 3 $D_{(1,2,3)_3}$. Comme attendu, plus la friction est grande, plus le nombre de prises à l'équilibre est grand. L'évolution du nombre de prises est quasi-linéaire dans les deux cas.

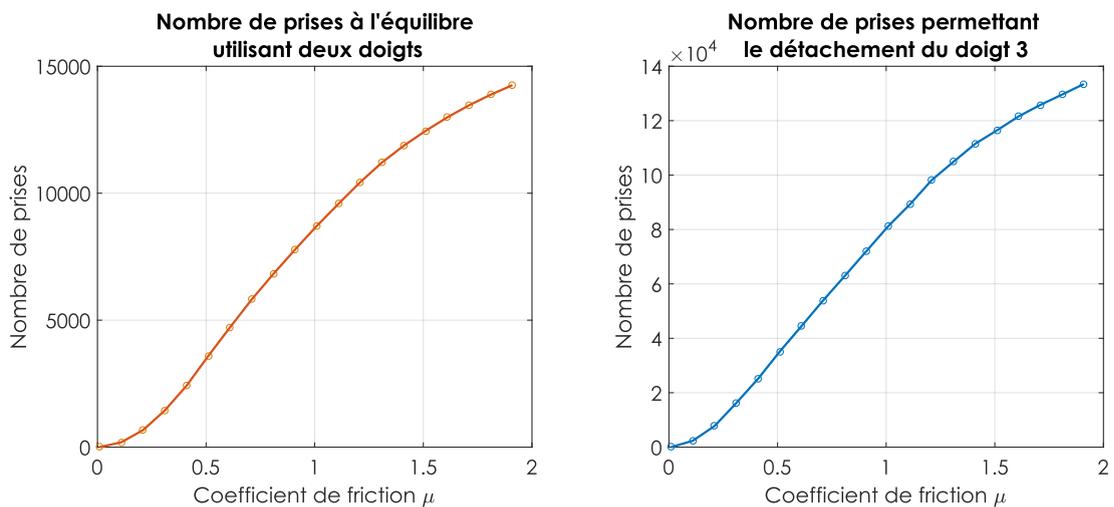


FIGURE 4.8 – Évolution du nombre de prises contenues dans les cartes d'équilibre à deux doigts et dans la carte de reconfiguration du doigt 3 en fonction du coefficient de friction.

Ainsi, plus la friction entre les doigts et l'objet est grande et plus les possibilités de manipulation augmentent. Cela signifie également qu'une mauvaise estimation de la friction peut conduire à l'utilisation de prises qui ne peuvent pas garantir l'équilibre. Comme attendu, il est nécessaire d'avoir toujours une valeur de friction utilisée par le planificateur de trajectoires qui ne surestime jamais la valeur réelle.

1. Le nombre de prises dépend de l'échantillonnage de l'objet. Dans cet exemple, l'objet est représenté par 275 points. Il existe donc 226875 ($275 \times 275 \times 3$) possibilités de prises à deux doigts pour une orientation donnée de l'objet.

4.2.2.2/ INFLUENCE DE LA FRICTION SUR LA MANIPULATION

Afin d'illustrer l'influence de la friction sur les manipulations générées, il est possible de comparer la trajectoire de référence avec une trajectoire générée pour une valeur de friction beaucoup plus élevée. La Fig. 4.9 montre la manipulation obtenue pour un coefficient de friction $\mu=1$. On remarque alors que, pour la même rotation, la trajectoire est sensiblement différente. En effet, réaliser cette rotation ne requiert plus que deux étapes de rotation et une étape de reconfiguration. Comme pour la manipulation de référence, l'objet est saisi en utilisant les doigts 2 et 3 (Fig. 4.9a-d). La prise initiale est d'ailleurs identique dans les deux cas. Ensuite une rotation de 90° est réalisée (Fig. 4.9d-e). Dans le cas de la trajectoire de référence seulement 45° sont parcourus lors de la première rotation. Ensuite, la reconfiguration est réalisée en ajoutant le doigt 1 puis en retirant le doigt 2 (Fig. 4.9e-g). Finalement, les 90° restant sont réalisés avec les doigts 1 et 3. L'augmentation de la friction a donc permis d'utiliser des positions qui n'étaient pas stables précédemment. Toutefois, il est à noter que la valeur de friction choisie sert uniquement à illustrer l'impact de ce paramètre sur les trajectoires.

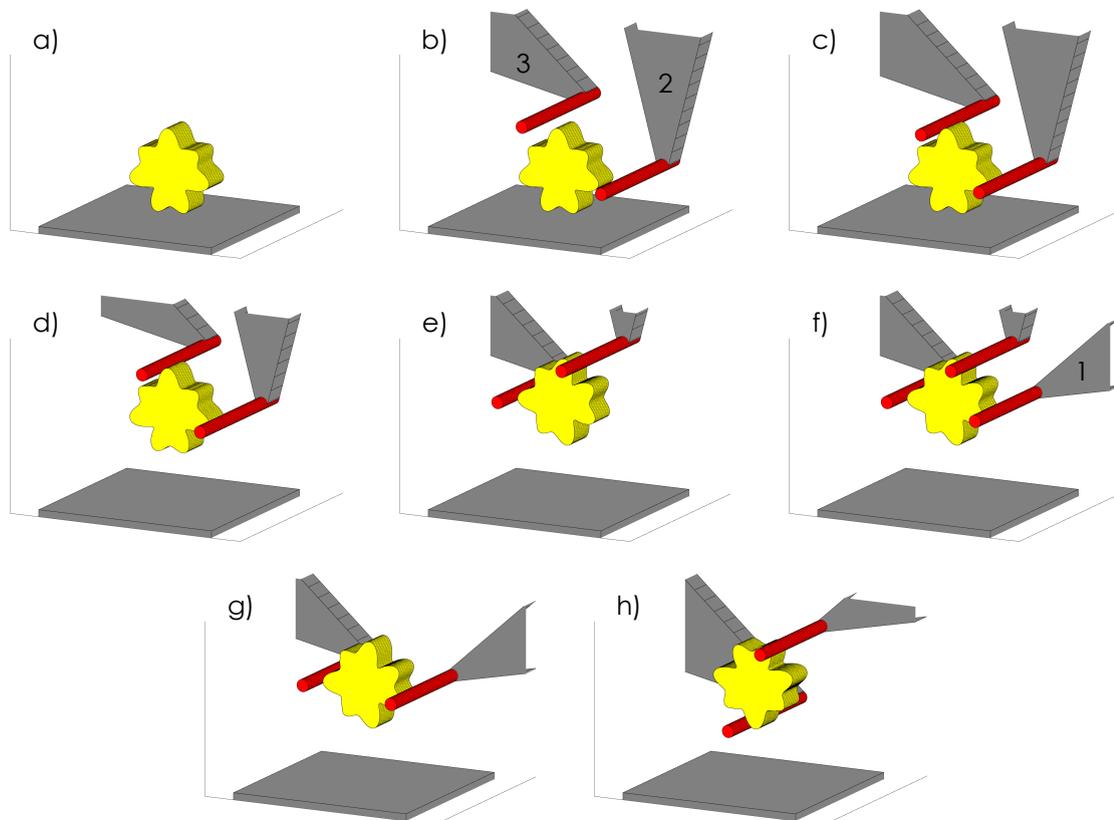


FIGURE 4.9 – Séquence d'images illustrant une rotation de 180° dans le cas d'une friction élevée ($\mu = 1$) entre les doigts et l'objet.

4.2.3/ INFLUENCE DE L'ADHÉSION

Contrairement à la friction qui a uniquement un impact positif sur les cartes et la manipulation, l'adhésion peut s'avérer aussi bien utile pour la manipulation que néfaste. En effet, la

présence d'effets d'adhésion permet de "tirer" avec un doigt sur l'objet et donc d'ouvrir de nouvelles possibilités de manipulation. Cependant, le détachement d'un doigt nécessite d'utiliser des positions spécifiques pour lesquelles la prise est capable de résister aux forces d'adhésion. Déterminer le degré d'influence des effets positifs et négatifs est donc nécessaire pour comprendre la manipulation dextre aux petites échelles.

4.2.3.1/ INFLUENCE DE L'ADHÉSION SUR L'ESPACE DE PLANIFICATION

Tout d'abord, il est intéressant de comparer les cartes d'équilibre et de reconfiguration en fonction de la présence, ou non, d'effets d'adhésion entre les doigts et l'objet. Dans le cas de la manipulation de référence, la carte d'équilibre $M_{(1,2)}$ (pour l'orientation 0°) est visible en jaune sur la Fig. 4.10. De même, dans le cas d'une adhésion de $2,5\mu\text{N}$ entre les doigts et l'objet, la carte d'équilibre correspondante est visible en bleu sur la Fig. 4.10. Comme prévu, le nombre de configurations appartenant à la carte $M_{(1,2)}$ augmente très fortement dans le cas où l'adhésion est présente. Plus précisément, comme les efforts extérieurs sont nuls, toutes les configurations de prises sans collision forment des prises d'équilibre. Ainsi, l'adhésion aide à stabiliser les prises et offre plus de possibilités de saisie et de manipulation.

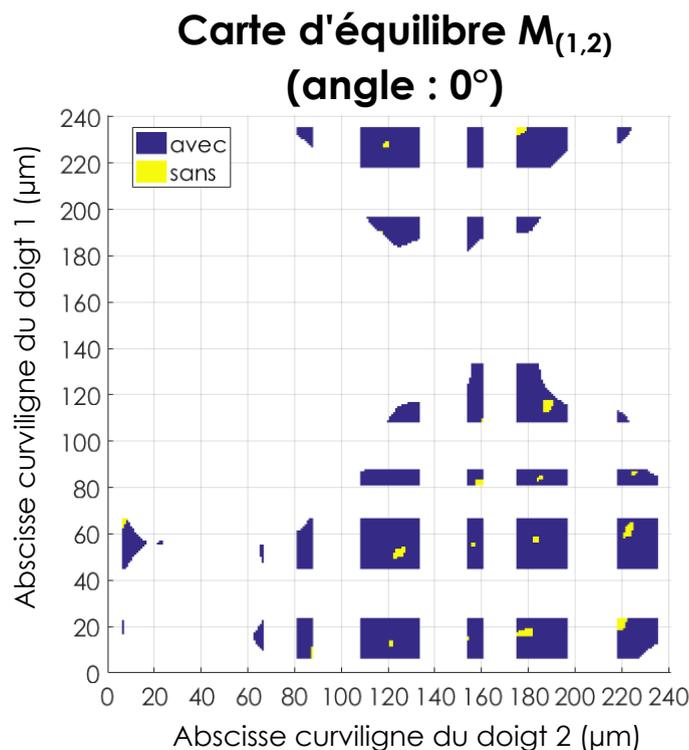


FIGURE 4.10 – Représentation de la carte d'équilibre $M_{(1,2)}$ (pour l'orientation 0°) avec et sans forces d'adhésion.

Afin d'illustrer l'influence de l'adhésion sur les reconfigurations, nous considérons le détachement du doigt 3 dont la position est fixée telle que représentée sur la Fig. 4.11a. Toutes les positions des doigts 1 et 2 qui garantissent que le doigt 3 puisse être retiré sont représentées sur la Fig. 4.11b. Les prises appartenant à la carte de reconfiguration $D_{(1,2,3)_3}$ sont représentées en bleu lorsque les effets d'adhésion sont présents et en

jaune lorsqu'ils ne le sont pas. On remarque ainsi que même si l'adhésion perturbe le détachement, il existe paradoxalement plus de prises pour réaliser le détachement.

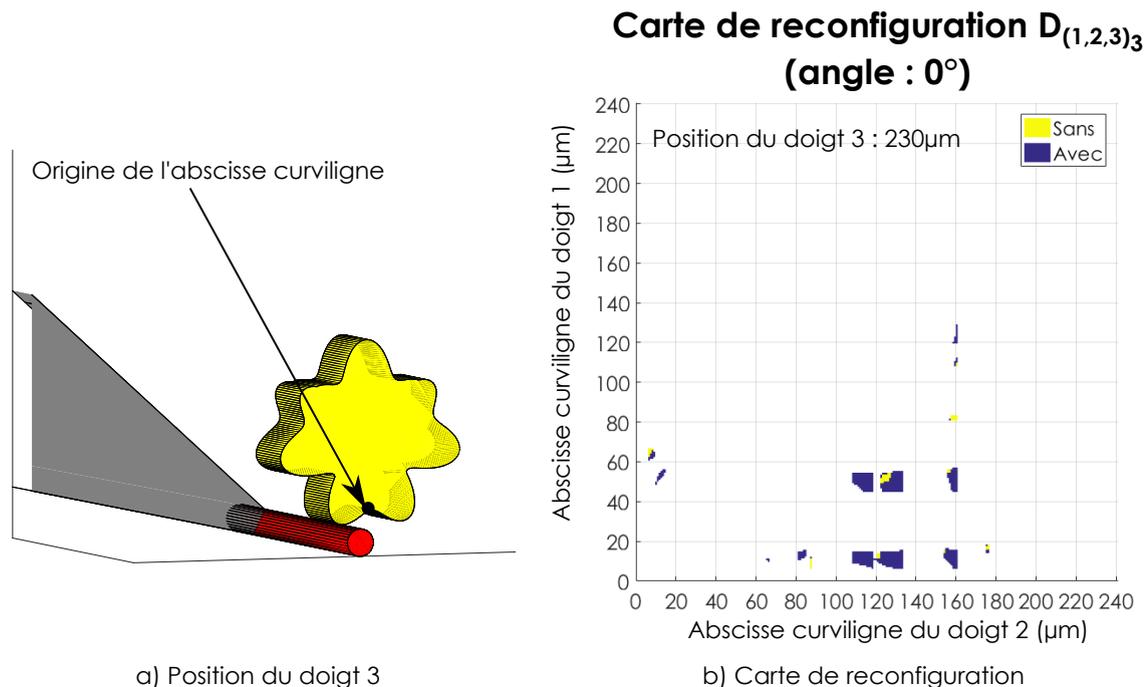


FIGURE 4.11 – Représentation de la carte de reconfiguration $D_{(1,2,3)_3}$ (pour l'orientation 0°) avec et sans forces d'adhésion.

L'analyse précédente se base sur une adhésion de $2.5\mu\text{N}$. Or, il est également important de savoir si l'amplitude des effets d'adhésion influe sur les différentes cartes. Pour évaluer l'influence de la force d'adhésion, il est possible, comme dans le cas de l'étude du coefficient de friction, d'observer l'évolution du nombre de prises à l'équilibre en fonction de l'amplitude de la force d'adhésion. Les autres paramètres sont maintenus identiques à ceux de la trajectoire de référence. La Fig. 4.12 montre ainsi que quelle que soit la valeur d'adhésion, le nombre de prises à l'équilibre utilisant deux doigts ne varie pas. En effet, en l'absence d'effort externe, l'impact de l'adhésion est le même que ce soit pour une adhésion de $1\mu\text{N}$ ou pour une adhésion de $10\mu\text{N}$. De même, le nombre de prises permettant la reconfiguration reste également stable en fonction de l'adhésion. Cela signifie donc que tant que l'adhésion est prépondérante devant les efforts extérieurs, l'amplitude de la force d'adhésion n'a quasiment aucun impact sur les cartes et donc par conséquent sur la séquence de prises obtenue. Cette propriété est particulièrement intéressante car l'amplitude des effets d'adhésion est en général peu prédictible.

La Fig. 4.12 permet également d'illustrer le fait que, lorsque l'adhésion est présente, le nombre de prises stables à deux doigts est toujours plus élevé que dans le cas sans adhésion et ce quelle que soit la valeur de la friction (Fig. 4.9). De même, pour cet exemple, il est nécessaire d'avoir un coefficient de friction trois fois plus élevé dans le cas sans adhésion pour obtenir le même nombre de prises de reconfiguration avec adhésion.

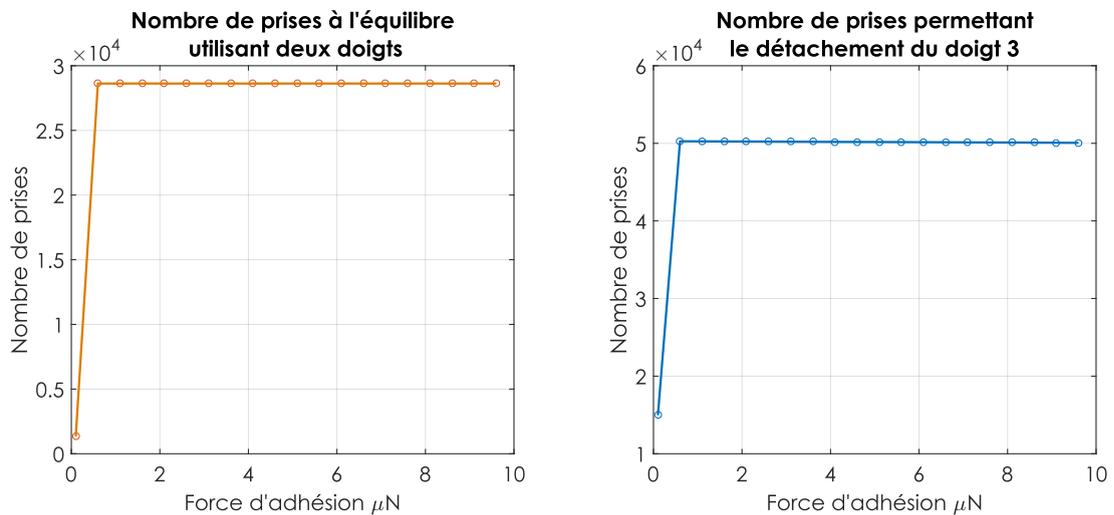


FIGURE 4.12 – Évolution du nombre de prises contenues dans les cartes d'équilibre à deux doigts et dans la carte de reconfiguration du doigt 3 en fonction de la force d'adhésion.

4.2.3.2/ INFLUENCE DE LA PRÉSENCE D'ADHÉSION SUR LA MANIPULATION

La Fig. 4.13 illustre la manipulation obtenue lorsque les forces d'adhésion sont présentes et égales à $2.5\mu\text{N}$. Contrairement à la manipulation de référence, la rotation en présence d'effets d'adhésion peut être réalisée sans reconfiguration. En effet, seuls les doigts 2 et 3 sont utilisés pour saisir et retourner l'objet. Ainsi, l'adhésion change significativement le paradigme de la manipulation.

4.2.4/ INFLUENCE DE L'EFFORT EXTÉRIEUR

Les efforts extérieurs représentent toutes les forces et moments auxquels est soumis l'objet (hormis ceux des doigts). Ainsi, ils représentent aussi bien le poids que n'importe quelle autre action mécanique qui agit sur l'objet. Évaluer l'impact de ces efforts permet de comprendre l'influence du poids de l'objet sur la manipulation. Contrairement aux cas précédents, l'influence de l'effort extérieur est couplé à la présence d'effets d'adhésion. De ce fait, deux cas sont étudiés dans cette section : avec et sans adhésion.

4.2.4.1/ INFLUENCE DE L'EFFORT EXTÉRIEUR SUR L'ESPACE DE PLANIFICATION

La Fig. 4.14 montre l'évolution du nombre de prises à l'équilibre utilisant deux doigts en fonction de la valeur de l'effort externe et pour une adhésion nulle. Pour des raisons de simplifications de l'analyse, nous considérons que l'effort externe est uniquement le poids dirigé suivant la direction fixe de la gravité. On remarque alors que la présence d'un faible effort externe va permettre d'équilibrer certaines prises pour les rendre utilisables. Cependant dès que l'effort devient suffisamment grand son impact est négatif puisque il va réduire le nombre de prises garantissant l'équilibre. La Fig. 4.14 montre également que ce phénomène se vérifie sur les prises permettant la reconfiguration.

Lorsque l'adhésion est présente, l'influence des efforts externes est différente. En effet,

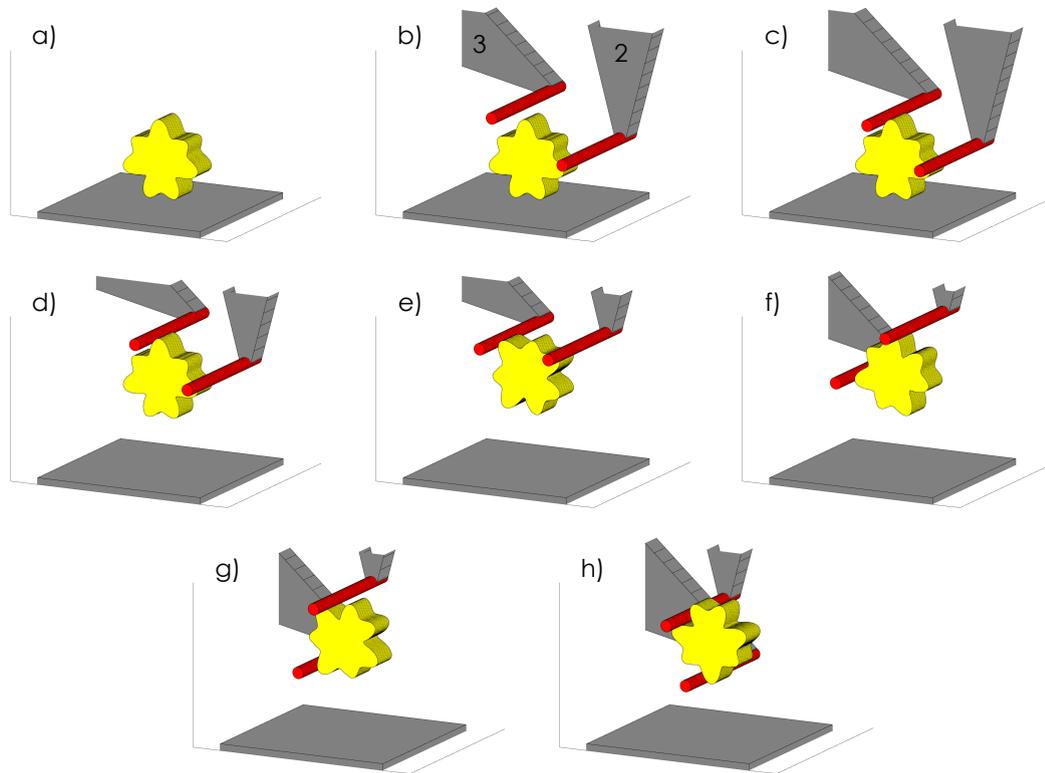


FIGURE 4.13 – Séquence d’images illustrant une rotation de 180° lorsque des effets d’adhésion existent entre les doigts et l’objet.

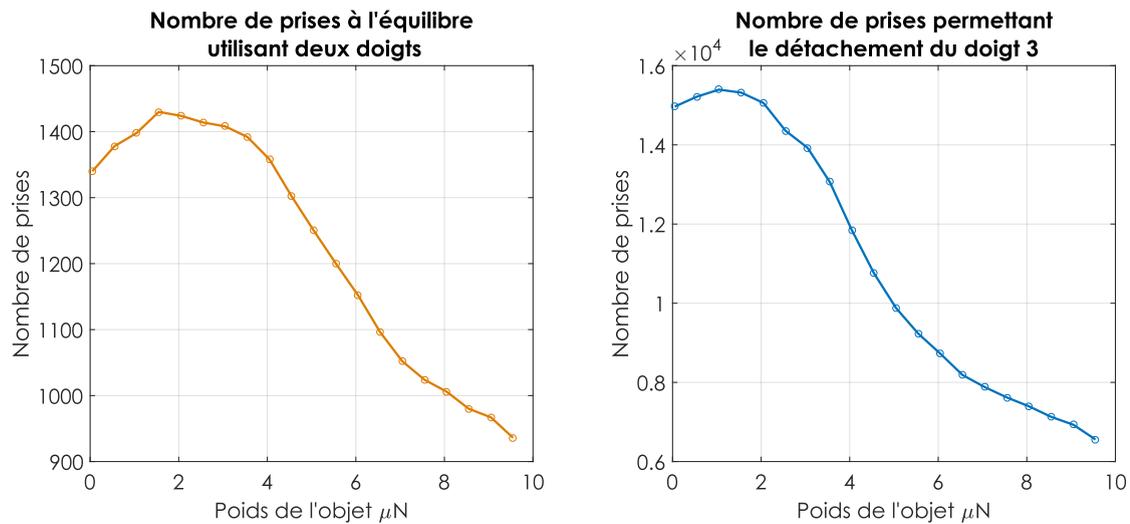


FIGURE 4.14 – Évolution du nombre de prises stables dans les cartes d’équilibre à deux doigts et dans la carte de reconfiguration du doigt 3 en fonction du poids de l’objet.

la Fig. 4.15 montre l’évolution du nombre de prises stables lorsque l’on considère une adhésion de $2,5\mu\text{N}$ et un effort externe variable. On remarque alors que, tant que l’effort est négligeable devant l’adhésion, l’influence est marginale. Cependant dès que les deux forces sont du même ordre de grandeur, le nombre de prises stables change signi-

ficativement et diminue. Il est à remarquer que le nombre de prises stables est toutefois supérieur au cas où l'adhésion n'est pas considérée (Fig. 4.13). Ainsi l'adhésion à un impact positif quelles que soient les conditions d'utilisation.

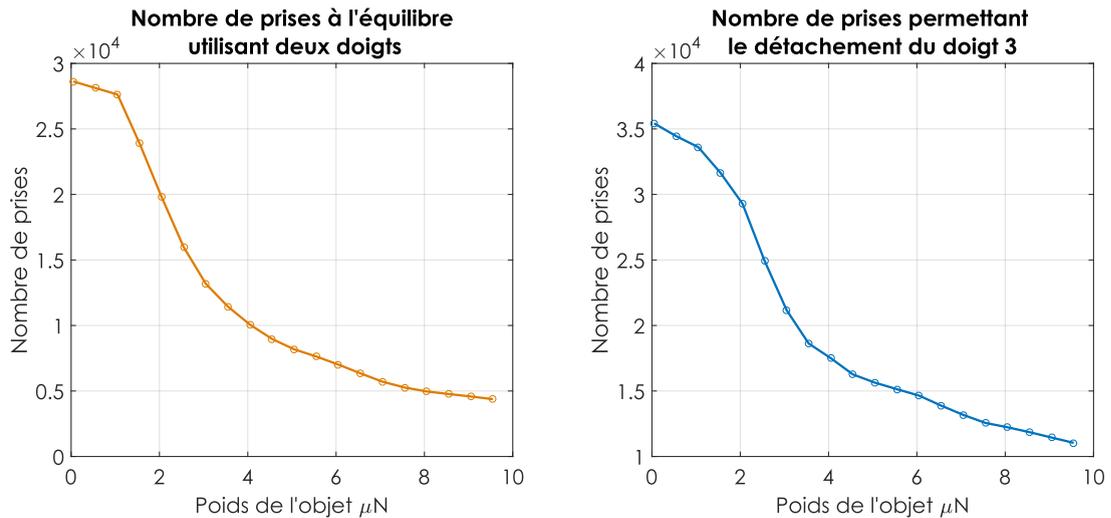


FIGURE 4.15 – Évolution du nombre de prises stables dans les cartes d'équilibre à deux doigts et dans la carte de reconfiguration du doigt 3 en fonction du poids de l'objet et lorsque l'adhésion est présente ($f_{po} = 2.5\mu\text{N}$).

4.2.4.2/ INFLUENCE DE L'EFFORT EXTÉRIEUR SUR LA MANIPULATION

Par rapport au cas de référence, le poids de l'objet n'a pas d'incidence. En effet, la séquence générée par l'algorithme est telle qu'elle est valable pour différentes valeurs du poids.

Dans le cas où l'on considère aussi bien de l'adhésion ($2.5\mu\text{N}$) que le poids de l'objet ($5\mu\text{N}$), on remarque que la manipulation est impactée (Fig. 4.16). En comparant au cas où l'adhésion est présente mais sans effort externe (Fig. 4.13), on remarque que la manipulation est plus longue puisque il est nécessaire d'effectuer deux reconfigurations.

4.2.5/ INFLUENCE DE LA GÉOMÉTRIE

Le dernier paramètre intéressant à considérer est la géométrie de l'objet et en particulier sa complexité. La Fig. 4.17 montre l'évolution du coût de la trajectoire, c'est-à-dire la distance parcourue par les doigts pendant la manipulation, en fonction de la complexité de l'objet et de la présence d'adhésion. On remarque alors que dans le cas de la manipulation sans adhésion, la géométrie de l'objet joue un rôle important sur le coût de la manipulation. Pour des objets simples, comme les cylindres, la manipulation est rapide et nécessite peu ou pas de reconfiguration. En revanche, plus l'objet est complexe et plus la distance parcourue par les doigts et le nombre de reconfigurations sont importants. Par contre, dans le cas où l'adhésion est présente, la géométrie a peu d'impact sur la manipulation. En effet, les coûts sont relativement similaires quelle que soit la forme de l'objet.

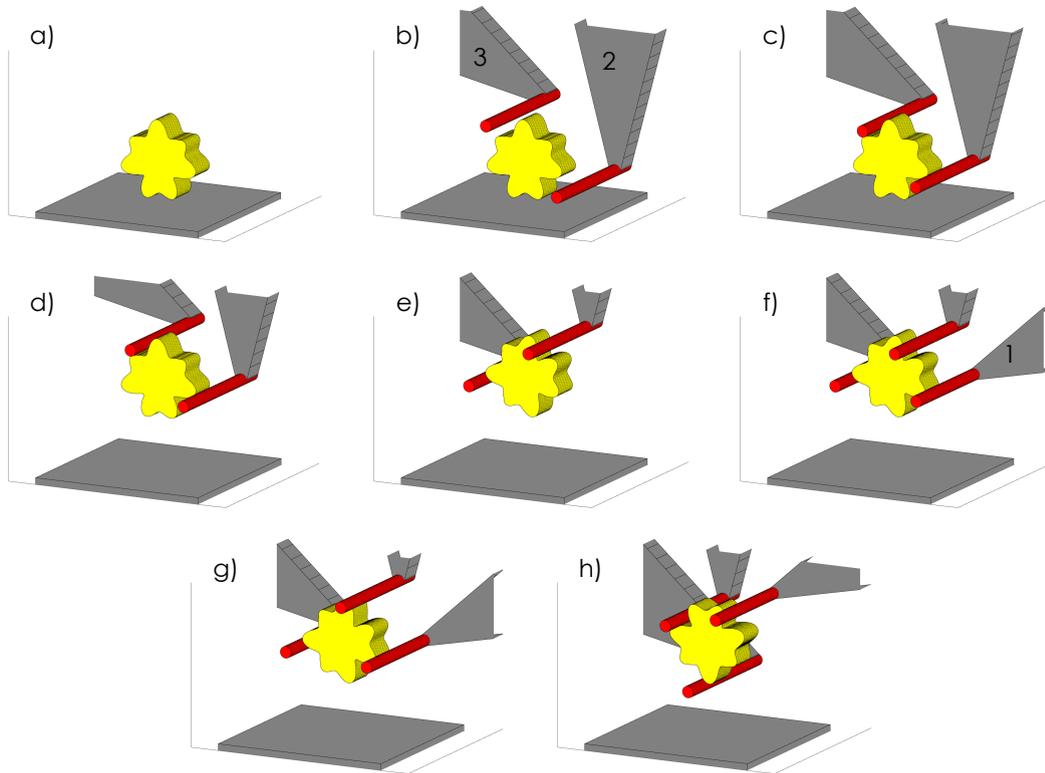


FIGURE 4.16 – Séquence d’images illustrant une rotation de 180° lorsque des effets d’adhésion existent entre les doigts et l’objet et que le poids de l’objet n’est pas négligé.

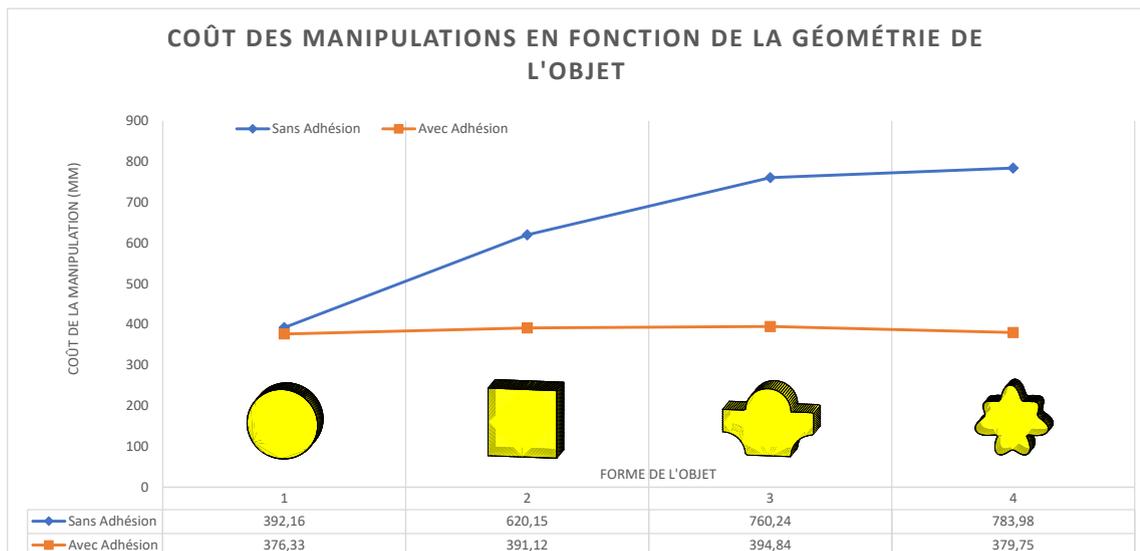


FIGURE 4.17 – Courbe illustrant l’évolution du coût des manipulations en fonction de la complexité de l’objet.

4.3/ DISCUSSIONS SUR LES RÉSULTATS SIMULÉS

La section précédente a permis de montrer que l'adhésion, la friction et le poids de l'objet ont un rôle important sur les trajectoires générées. Toutefois, en micromanipulation, le coefficient de friction et l'adhésion ne sont, en général, pas précisément estimés. Il est donc important de déterminer comment les incertitudes sur le coefficient de friction et la force d'adhésion peuvent être pris en compte afin de réaliser des manipulations robustes.

Incertitude sur l'adhésion Concernant l'adhésion, il a été montré que sa valeur n'a pas d'impact tant que les forces d'adhésion sont prédominantes devant le poids ou tout autre effort extérieur. En effet, dans le cas d'un effort externe négligeable, les différentes cartes ne sont pas impactées par un changement de la force d'adhésion. L'élément discriminant dans ce cas est simplement la présence ou non des effets d'adhésion. En revanche, dès que l'adhésion et les efforts externes sont du même ordre de grandeur, les cartes changent, et avec elles la manipulation. Toutefois, cette hypothèse d'efforts extérieurs négligeables peut être reproduite expérimentalement. Pour cela, il suffit d'utiliser des traitements chimiques sur les doigts ou l'objet pour augmenter les effets d'adhésion [Cot et al., 2013]. Cette fonctionnalisation de surface permet de garantir que les forces d'adhésion sont largement prépondérantes devant tout autre effort. Ainsi, l'incertitude sur les forces d'adhésion peut être gérée en s'assurant d'être dans un cas où l'adhésion est dominante. De plus, même en supposant que cette hypothèse ne peut pas être validée, il est toujours possible de générer les trajectoires en considérant un scénario dit du cas le plus défavorable. Dans ce cas, les rotations sont planifiées en supposant qu'il n'existe pas d'effet d'adhésion tandis que les reconfigurations sont planifiées en supposant que le doigt retiré est hautement "adhésif". Cela permettrait d'être robuste aux variations des paramètres physiques.

Incertitude sur le coefficient de friction Le coefficient de friction joue un rôle important sur le nombre de prises permettant l'équilibre lorsque l'adhésion n'est pas présente et sur les prises permettant la reconfiguration lorsque l'adhésion est présente. Une mauvaise estimation du coefficient de friction pourrait donc avoir des conséquences importantes sur la robustesse des trajectoires générées. Une façon simple de gérer cette incertitude consiste à sous estimer la valeur du coefficient de friction entre les doigts et l'objet. De cette façon, il est possible de garantir que les prises utilisées permettent effectivement de maintenir l'objet dans un état d'équilibre.

Intérêt de l'adhésion Les simulations permettent également de mettre en avant l'aspect positif de l'adhésion sur la manipulation. En effet, la présence d'adhésion modifie le paradigme de la manipulation en permettant l'utilisation de prises non-intuitives. De plus, ces nouvelles prises améliorent également la rapidité de manipulation puisque elles permettent de réaliser des rotations de grande amplitude (180° ou plus) sans reconfiguration de la prise. De même, ces effets d'adhésion permettent également de manipuler des objets complexes de façon plus simple et plus rapide.

4.4/ RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les résultats précédents ont permis de valider l'approche utilisée pour générer des manipulations dextres et également de mettre en avant l'intérêt des effets d'adhésion lors de la manipulation dextre. Néanmoins, pour valider les résultats et en particulier les manipulations originales en présence d'adhésion, il a été nécessaire de réaliser des expérimentations.

4.4.1/ PLATE-FORME EXPÉRIMENTALE DE MANIPULATION

4.4.1.1/ PRÉSENTATION DE LA PLATE-FORME

Pour valider expérimentalement les méthodes de micromanipulation présentées dans cette thèse, un prototype expérimental de micromanipulation dextre à trois doigts a été réalisé. Ce système, visible sur la Fig. 4.18, est un système de manipulation planaire. Chacun des trois doigts est capable de se déplacer dans le plan à l'aide de deux actionneurs stick-slip SmarAct SLC-1730 dont la répétabilité est de $1.5\mu\text{m}$. La scène est observée en utilisant des caméras JAI haute résolution (2560×2018 pixels). Ce système de micromanipulation a été développé dans le but de valider les trajectoires planifiées. De ce fait, nous ne nous sommes pas attaché à concevoir une main de petite taille.

Ce système présente l'avantage d'être modulaire afin de tester différentes géométries pour le support des doigts. Comme illustré dans les trajectoires de référence, deux géométries sont expérimentées. La première consiste simplement à fixer les doigts cylindriques aux extrémités d'une tige rectangulaire. De cette façon l'encombrement lié au support est réduit. La seconde géométrie utilise des supports triangulaires au bout desquels les doigts sont fixés. L'utilisation de différents supports permet de montrer la généralité de l'approche proposée.

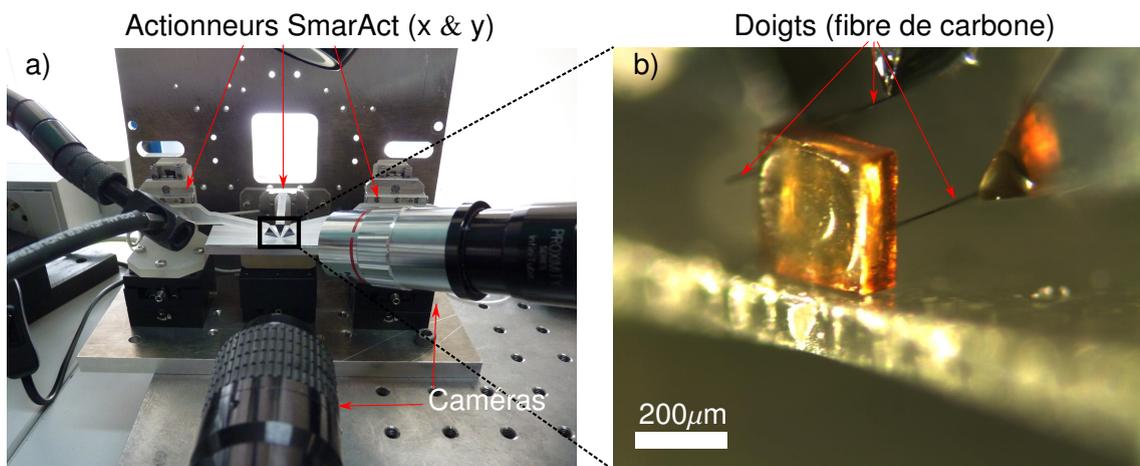


FIGURE 4.18 – Photographie du prototype expérimental de micro-main à trois doigts. a) vue globale du système de micromanipulation, b) vue de côté d'un objet ($200\mu\text{m}$ de côté), des doigts (fibre de carbone de $7\mu\text{m}$ de diamètre) et des supports triangulaires.

Cette micro-main est utilisée pour manipuler des objets aussi bien millimétriques que micrométriques. La taille des doigts ainsi que les optiques des caméras sont adaptées

à la taille des objets manipulés. Les actionneurs et le logiciel de commande sont, en revanche, communs à toutes les échelles. Pour les manipulations micrométriques, les doigts sont des fibres de carbone de $7\mu\text{m}$ de diamètre. Dans le cas des manipulations millimétriques, les doigts sont des tiges d'acier de 1mm de diamètre.

4.4.1.2/ CALIBRATION DU DISPOSITIF

Les déplacements réalisés par les doigts sont générés par rapport à un repère de référence lié à la position initiale de l'objet. Pour pouvoir exécuter ces déplacements, il est donc nécessaire de calibrer le système de manipulation. Une fois réalisée, cette calibration doit permettre d'exprimer les déplacements des doigts dans les repères liés aux actionneurs et ainsi réaliser la manipulation.

La manipulation étant planaire, il est possible d'exprimer ces changements de repères à l'aide d'homographies. Plus précisément, il s'agit de calculer quatre homographies : trois entre les repères liés aux doigts (et donc aux actionneurs) et la caméra et une entre le repère objet et la caméra. De cette façon, les déplacements planifiés dans le repère objet sont exprimés dans le repère caméra puis convertis dans le repère actionneurs correspondant. L'ensemble des homographies sont calculées à l'aide de la plate-forme d'asservissement visuel ViSP [Marchand et al., 2005].

4.4.2/ MANIPULATION D'OBJETS MILLIMÉTRIQUES

Tout d'abord, l'approche et les trajectoires ont été validées expérimentalement à l'échelle millimétrique. A cette échelle, les forces d'adhésion ne sont pas prédominantes. De ce fait, pour reproduire le comportement existant à l'échelle micrométrique, un revêtement adhésif est appliqué sur les doigts. Même si ce revêtement ne permet pas reproduire à l'identique l'adhésion à l'échelle micrométrique, il permet toutefois de "simuler" un cas similaire où l'adhésion est prédominante devant toutes les autres forces. Cette expérimentation a été effectuée en premier lieu pour des raisons de simplicité de mise en œuvre.

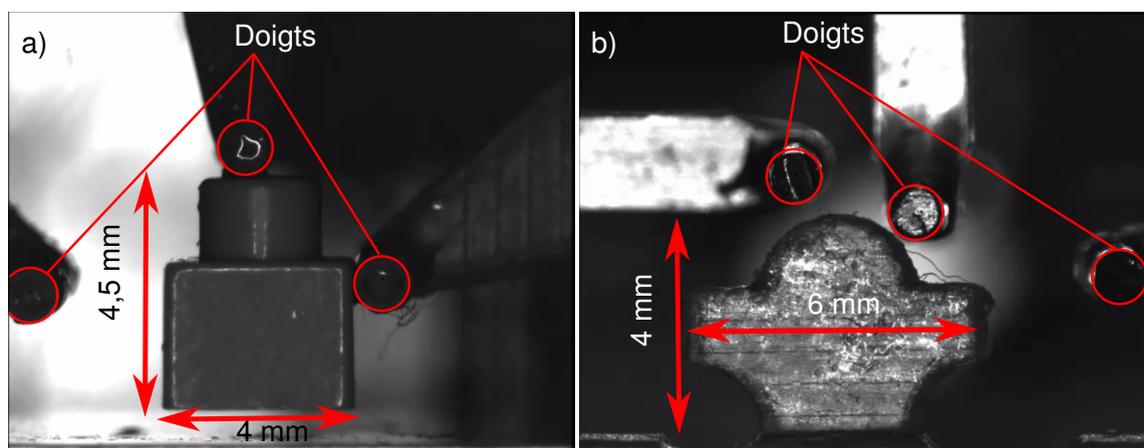


FIGURE 4.19 – Photographie des objets millimétriques manipulés a) une brique nanoblock™, b) un objet quelconque planaire.

4.4.2.1/ OBJET TRIDIMENSIONNEL

Trajectoire générée La première manipulation concerne la mise en rotation de l'objet représenté sur la Fig. 4.19a. Cet objet est une brique nanoblockTM 2 dont les dimensions caractéristiques sont les suivantes : 4mm de long et $4,5\text{mm}$ de haut. La particularité de cet objet est qu'il n'est pas planaire contrairement aux cas étudiés précédemment. Cette expérimentation permettra ainsi de démontrer que les méthodes proposées peuvent partiellement s'étendre à des objets non planaires. l'algorithme de planification nécessite la définition d'une forme planaire "équivalente" à l'objet tridimensionnel manipulé. Dans cet exemple, nous choisissons simplement la forme planaire de même contour. Dans ce cas, le contour revient à considérer un objet planaire de type polygonal représenté sur la Fig. 4.20. L'objectif choisi consiste à réaliser une rotation de 206° . Les trajectoires des doigts sont générés en considérant les paramètres physiques suivants :

- $f_{po,sup}$: la force d'adhésion entre l'objet et le support est négligée et donc de $0\mu\text{N}$,
- f_{po} : la force d'adhésion entre les doigts et l'objet est de $1,5\text{mN}$,
- w_{ext} : les efforts extérieurs sont négligés et donc de $0\mu\text{N}$,
- μ : la friction entre les doigts et l'objet est de $0,26$.
- r_d : le rayon des doigts est de $500\mu\text{m}$.

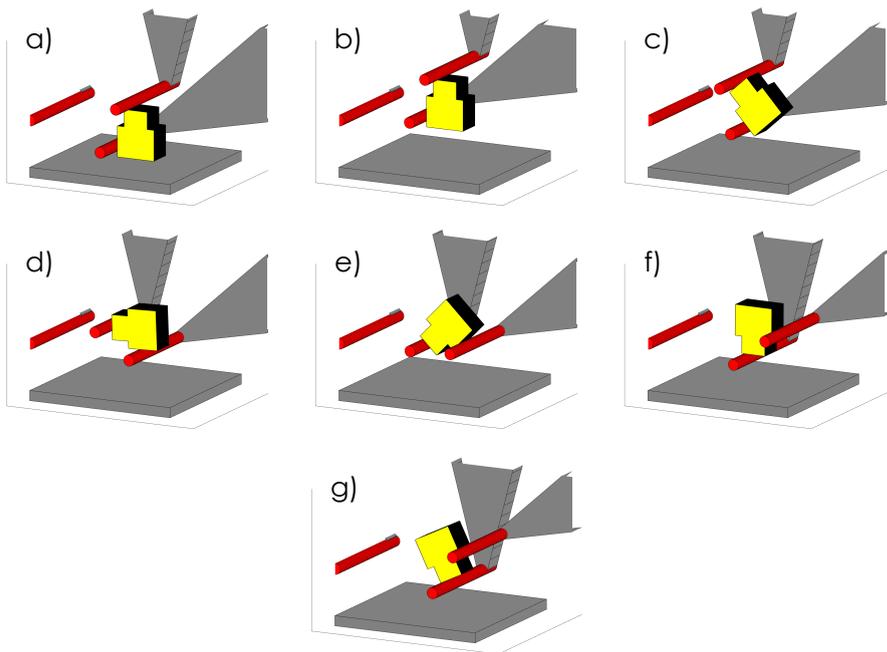


FIGURE 4.20 – Séquence d'images illustrant une manipulation d'un objet en présence des effets d'adhésion entre les doigts et l'objet.

La force d'adhésion et le coefficient de friction ont été estimés empiriquement. Nous considérons également que l'adhésion est grandement prépondérante devant tous les efforts extérieurs. La manipulation ainsi générée consiste en une seule étape de rotation qui permet de réaliser l'intégralité des 206° . La trajectoire de manipulation générée par notre algorithme est visible sur la Fig. 4.20. Il est à noter que la manipulation obtenue

2. pièce en plastique similaire aux briques Lego mais de plus petite taille.

passer par des configurations qui ne sont à l'équilibre qu'en présence d'adhésion.

Validation expérimentale La manipulation présentée ci-dessus a été testée sur la plate-forme expérimentale. Les trajectoires des doigts générées par l'algorithme ont été transmises à l'ordinateur de commande qui a piloté les axes de déplacements pour réaliser la manipulation. Aucun asservissement visuel n'a été mis en place, les systèmes de vision permettent uniquement de mesurer la trajectoire réalisée. La Fig. 4.21 montre les images enregistrées par la caméra de face pendant la manipulation qui a été réalisée en boucle ouverte. On remarque ainsi que la trajectoire a été exécutée et que la rotation de 206° a été réalisée validant notre approche. Cette manipulation illustre l'avantage de l'adhésion lors des opérations de manipulation dextre puisqu'une rotation de 206° est réalisable expérimentalement sans reconfiguration. Cette expérimentation montre également qu'il est possible de manipuler certains types d'objets non planaires en considérant leurs contours.

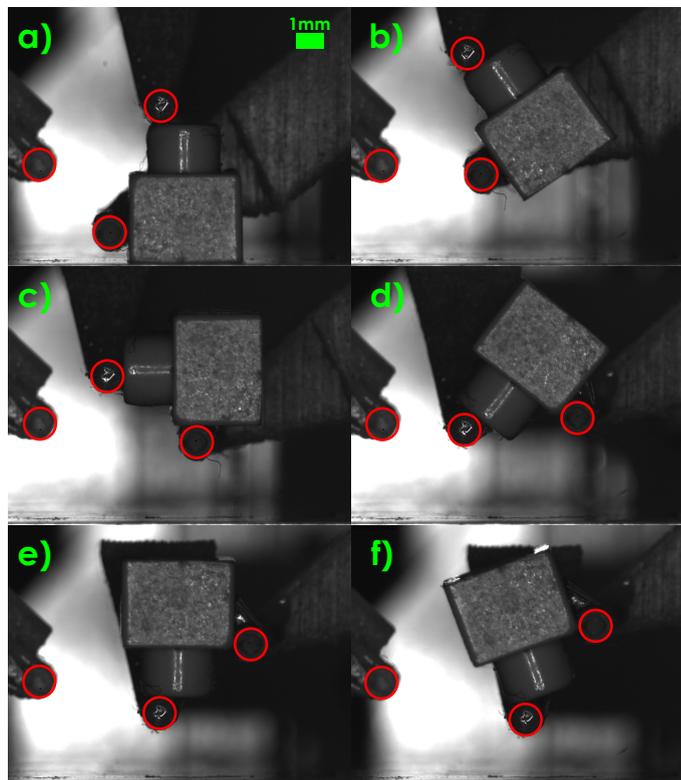


FIGURE 4.21 – Séquence d'images illustrant la manipulation expérimentale d'un objet tridimensionnel en présence d'effets d'adhésion entre les doigts et l'objet.

Afin d'analyser le résultat et de comparer la manipulation expérimentale avec la manipulation planifiée, l'algorithme ESM [Benhimane et al., 2007] est utilisé pour suivre la position et l'orientation de l'objet pendant la manipulation. La Fig. 4.22 représente l'évolution de l'orientation et de la position de l'objet au cours de la manipulation. On remarque alors que la rotation réalisée expérimentalement est de $199,25^\circ$ ce qui correspond à une erreur de 3,6% par rapport à la rotation désirée. En revanche, une erreur plus importante est observable sur la position de l'objet. En effet, la position finale de l'objet est excentrée de $500\mu\text{m}$ sur l'axe x et de 2mm sur l'axe y par rapport à la trajectoire de référence. Ces

erreurs peuvent s'expliquer par le fait que les caractéristiques des doigts et de l'objet (dimension, raideur, etc.) ne sont pas identiques entre la simulation et l'expérimentation. Néanmoins, l'erreur en position peut être facilement corrigée en réalisant un asservissement visuel.

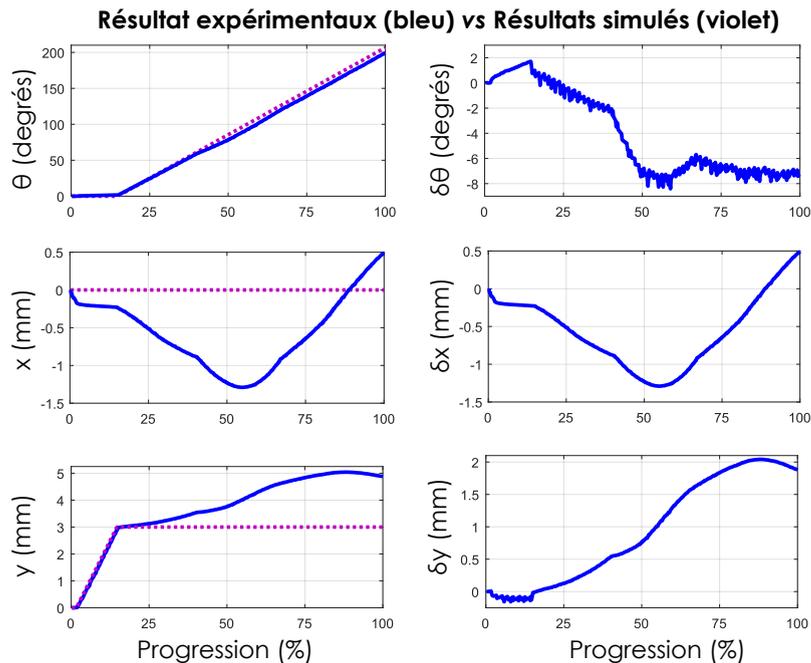


FIGURE 4.22 – Graphique représentant l'évolution de la position et de l'orientation de l'objet tridimensionnel au cours de la manipulation expérimental (bleu) par rapport à la trajectoire planifiée (violet).

4.4.2.2/ OBJET QUELCONQUE PLANAIRE

Trajectoire générée Cette manipulation concerne le second objet visible sur la Fig. 4.19b. Cet objet, fabriqué en impression 3D et composé d'acrylique, dispose des dimensions suivantes : 6mm de long et 4mm de haut. L'objectif fixé est de réaliser une rotation de 132° tout en imposant la prise initiale. Pour cela, nous considérons les paramètres physiques de manipulation suivants :

- $f_{po,sup}$: la force d'adhésion entre l'objet et le support est négligée et donc de 0N,
- f_{po} : la force d'adhésion entre les doigts et l'objet est de 6mN,
- w_{ext} : les efforts extérieurs sont négligés et donc de 0N,
- μ : la friction entre les doigts et l'objet est de 0,3.
- r_d : le rayon des doigts est de 500 μ m.

Comme dans l'expérience précédente, l'adhésion et le coefficient de friction sont obtenus de manière empirique. La manipulation générée, visible sur la Fig. 4.23, se décompose alors en quatre étapes. La première est une rotation utilisant les effets d'adhésion des doigts 2 et 3. Puis, le doigt 1 est ajouté afin de reconfigurer la prise et de réaliser une seconde rotation. Ensuite, le doigt 2 est retiré afin de passer à une configuration à deux doigts. Enfin, la rotation est terminée en utilisant les doigts 1 et 3. Cette manipulation repose sur des prises à l'équilibre uniquement en présence d'adhésion entre les doigts

et l'objet. Il est à noter que, comme la prise initiale est imposée, cette trajectoire n'est probablement pas la trajectoire optimale pour réaliser cette rotation (elle l'est toutefois pour cette prise initiale). Cette manipulation permet d'illustrer les effets de l'adhésion pendant la manipulation.

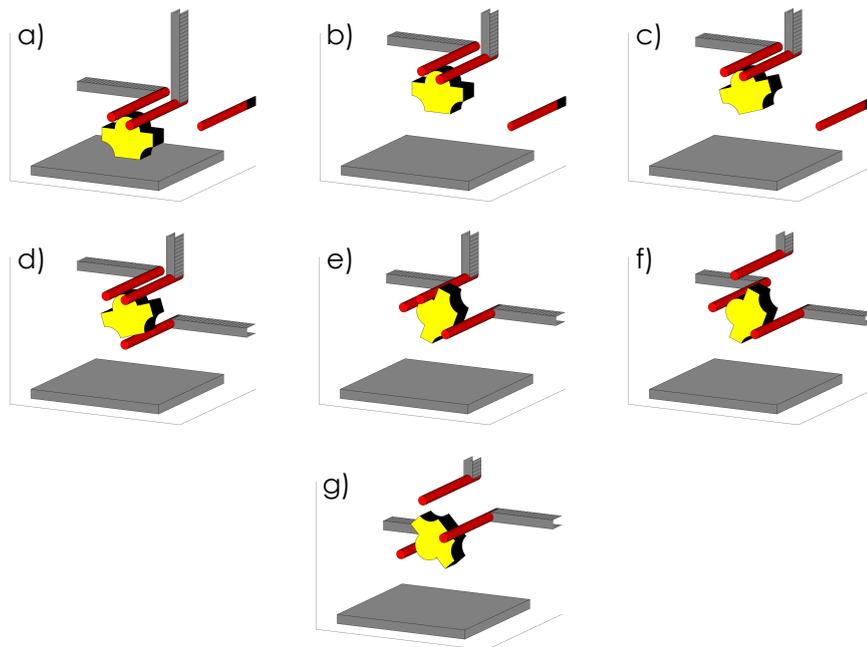


FIGURE 4.23 – Séquence d'images illustrant une manipulation d'un objet quelconque en présence d'effets d'adhésion entre les doigts et l'objet.

Validation expérimentale L'expérimentation a été reproduite pour la forme d'objet quelconque. La manipulation obtenue est visible sur la Fig. 4.24. Comme pour l'expérimentation précédente, la manipulation est réalisée avec succès en boucle ouverte et ce grâce à l'adhésion présente entre les doigts et l'objet. Cette manipulation illustre que les problèmes de détachement peuvent être gérés et pris en compte lors de la planification.

Comme pour l'objet précédent, la trajectoire réalisée est comparée à la trajectoire simulée. La Fig. 4.25 représente les erreurs de suivi de trajectoire pour l'objet. On remarque que, dans ce cas, la rotation finale obtenue est de $129,7^\circ$ ce qui correspond à une erreur angulaire de seulement 1,79%. Cette expérimentation montre également qu'en boucle ouverte la position de l'objet est sujette à des erreurs importantes. En effet, la position finale est excentrée d'une distance de $400\mu\text{m}$ sur l'axe x et d'une distance de $400\mu\text{m}$ sur l'axe y par rapport à la trajectoire de référence. Comme dans le cas précédent, ces erreurs de position peuvent être réduites à l'aide d'un asservissement visuel.

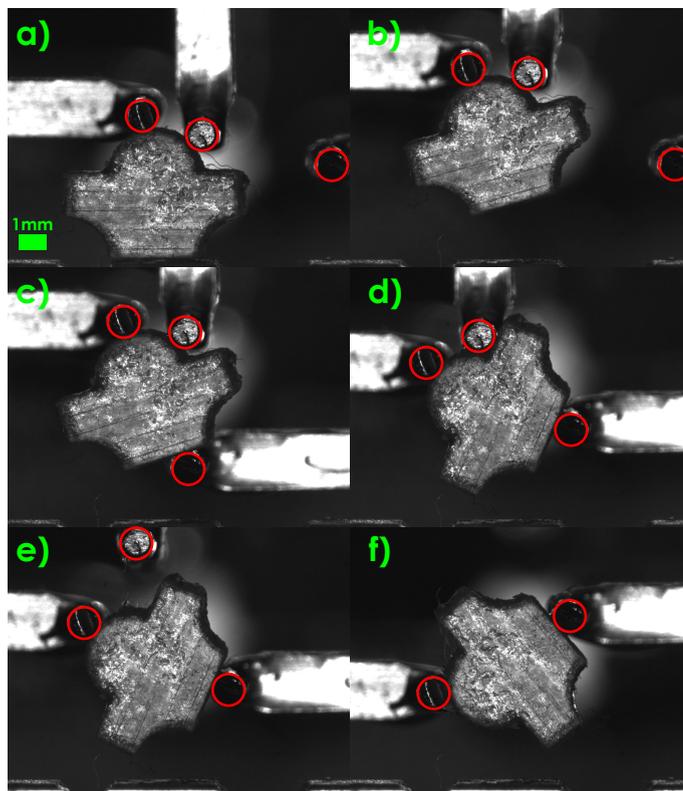


FIGURE 4.24 – Séquence d’images illustrant la manipulation expérimentale d’un objet de forme quelconque en présence d’effets d’adhésion entre les doigts et l’objet.

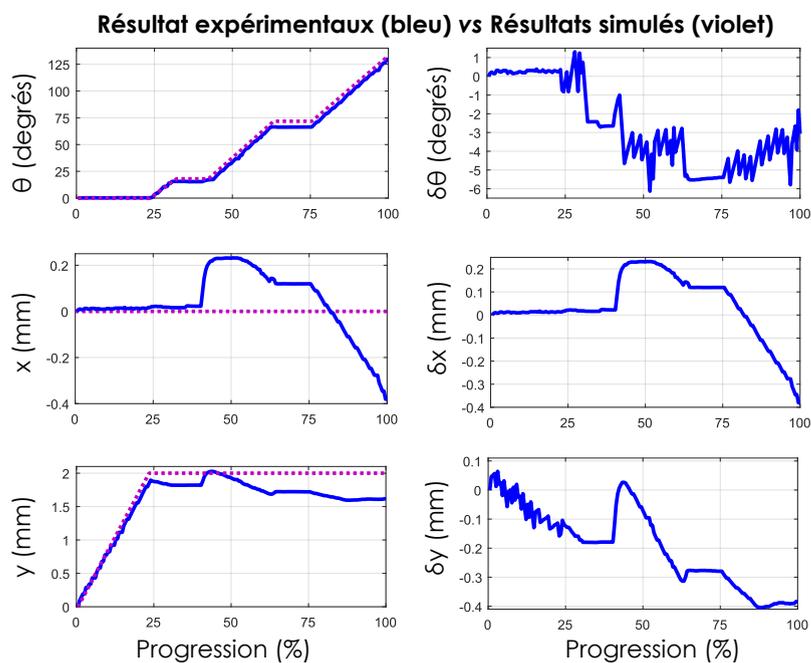


FIGURE 4.25 – Graphique représentant l’évolution de la position et de l’orientation d’un objet de forme quelconque au cours de la manipulation dans le cas expérimental (bleu) par rapport à la trajectoire planifiée (violet).

4.4.3/ MANIPULATION D'OBJETS MICROMÉTRIQUES

Les expérimentations à l'échelle millimétrique ont montré que l'approche développée permet de générer des trajectoires réalisables et exploitant la propriété d'adhésion existante au niveau du contact. Pour valider totalement l'approche, il reste néanmoins à manipuler des objets micrométriques. Pour cela, nous considérons alors un cube de silicium de $220\mu\text{m}$ de côté manipulé par des doigts de $7\mu\text{m}$ de diamètre. L'objectif est de réaliser une rotation de 180° en supposant les paramètres physiques suivants :

- $f_{po,sup}$: la force d'adhésion entre l'objet et le support est négligée et donc de $0\mu\text{N}$,
- f_{po} : la force d'adhésion entre les doigts et l'objet existe mais n'est pas homogène et n'est pas quantifiée,
- w_{ext} : les efforts extérieurs sont négligés et donc de $0\mu\text{N}$,
- μ : la friction entre les doigts et l'objet est de 0,33.
- r_d : le rayon des doigts est de $3.5\mu\text{m}$.

Le cas considéré est donc l'un des plus complexes puisque tous les doigts ne disposent pas de la même adhésion. Plus précisément, dans cette expérimentation, le doigt 2 est fortement adhésif tandis que les deux autres le sont moins. La manipulation générée doit donc prendre en considération ces paramètres. Pour ce faire, les rotations sont planifiées en considérant le cas le plus défavorable évoqué précédemment (adhésion nulle lors des rotations et adhésion maximale lors des reconfigurations).

La Fig. 4.26 montre la manipulation générée et réalisée avec succès. On remarque ainsi que la manipulation est similaire à la manipulation représentée sur la Fig. 4.3. En effet, une reconfiguration apparaît une fois que l'objet est retourné de 90° (Fig. 4.26e). Ceci s'explique par le fait que l'adhésion n'est pas considérée pendant l'étape de rotation. La prise choisie pour retirer le doigt 3 (Fig. 4.26f) correspond à la prise sur laquelle l'effort de serrage est maximum et donc permet de résister à une valeur élevée d'adhésion.

Chronologiquement, cette expérimentation a été réalisée avant la finalisation du planificateur de trajectoire. Les trajectoires utilisées ont donc été planifiées manuellement. Cependant il est intéressant de noter que les trajectoires retournées par le planificateur sont identiques à celles générées manuellement et testées expérimentalement. Cette validation expérimentale montre la pertinence de l'approche proposée sur une géométrie simple à l'échelle micrométrique. Elle démontre la faisabilité d'opération de micromanipulation robotique dextre et que celles-ci sont robustes à l'absence de connaissance sur les effets d'adhésion.

4.5/ DISCUSSION GÉNÉRALE DES RÉSULTATS ET DE LA MÉTHODE

L'ensemble de ce chapitre a permis de valider expérimentalement l'approche de micromanipulation robotique dextre développée dans ce manuscrit. Ainsi, il a été montré que les forces d'adhésion pouvaient être utilisées pour manipuler les objets différemment et même plus rapidement. Toutefois, plusieurs points et questionnements limitent l'approche présentée :

- **Lâcher** : La tâche du lâcher de l'objet n'est pas traitée dans nos travaux,
- **Manipulation planaire** : les mouvements réalisés sont uniquement planaires,

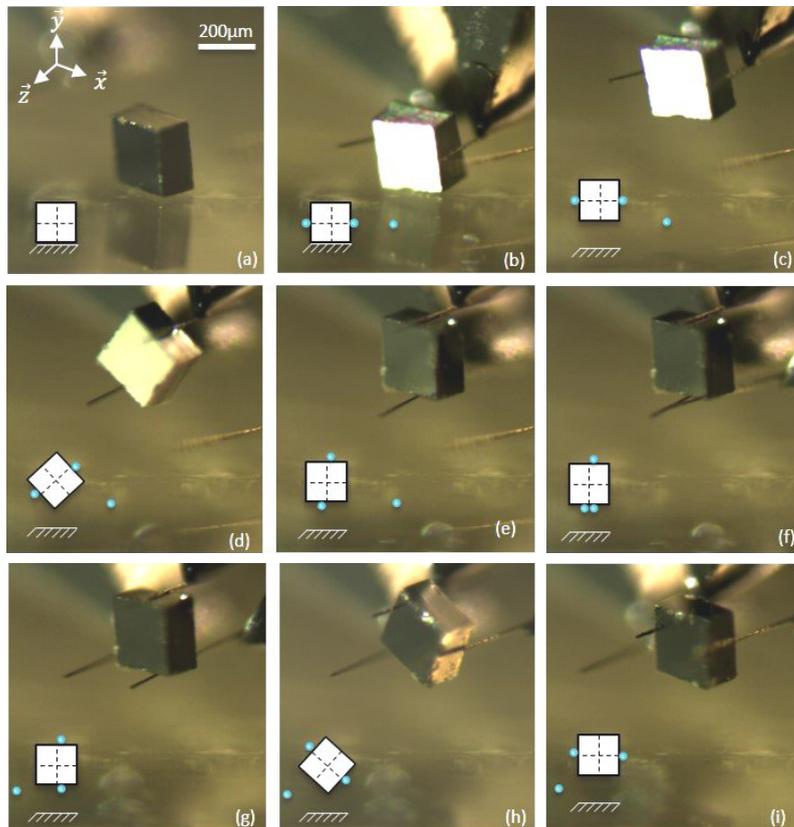


FIGURE 4.26 – Séquence d'images illustrant le retournement d'un cube de silicium réalisée expérimentalement.

Le lâcher Cette opération n'est pas directement adressée par la méthode développée. En effet, seul le retrait d'un doigt est étudié. Or cette tâche a longtemps été un point clé des recherches réalisées dans le domaine de la micromanipulation. De nombreuses techniques, présentées dans le premier chapitre, permettent de garantir le détachement de l'objet. Toutefois, dans le cas du micro-assemblage, l'objet manipulé est inséré, soudé ou collé avec une autre pièce. Dans ces cas, l'adhésion entre les deux pièces est largement supérieure à l'adhésion entre les doigts et l'objet. La tâche du lâcher constitue donc une problématique mineure pour bon nombres de cas concrets de micro-assemblage.

Manipulation planaire Le problème général a été formalisé pour une manipulation dans l'espace (Chapitre 2). Toutefois, l'algorithme proposé et les résultats s'intéressent actuellement uniquement à des manipulations planaires. Les résultats présentés consistent en une première validation de l'approche originale de la micromanipulation dextre et ont vocation à être étendus aux cas tridimensionnels. Toutefois, considérant le fait que les procédés de micro-fabrication sont majoritairement limités à des fabrications planaires, les manipulations présentées restent intéressantes.

4.6/ CONCLUSION

Ce chapitre a permis de valider et d'analyser les trajectoires obtenues à l'aide de la méthode développée dans le chapitre précédent. Plus précisément, l'analyse des trajectoires a montré que les effets d'adhésion, lorsqu'ils sont pris en considération, changent significativement le paradigme de la manipulation. De ce fait, des trajectoires originales peuvent être planifiées afin de réaliser des opérations de micromanipulation de manière simple et rapide et ce quelle que soit la forme de l'objet. L'approche a également été validée expérimentalement à l'échelle millimétrique sur différents objets et pour différentes amplitudes de rotation. Lors de ces expérimentations, les effets d'adhésion ont été "simulés" à l'aide d'adhésifs déposés sur les doigts. Finalement, une première étape de validation à l'échelle micrométrique a été présentée.

Les validations expérimentales présentées dans ce chapitre montrent des rotations dans les doigts de la main d'une amplitude nettement supérieure à l'état de l'art. Elles représentent ainsi une contribution majeure démontrant la faisabilité applicative de notre approche.

CONCLUSION & PERSPECTIVES

CONCLUSION GÉNÉRALE

La réalisation de microsystèmes complexes et tridimensionnels nécessite de réaliser des opérations de micro-assemblage. Ce type d'opérations soulève de nombreux défis tels que la compréhension et la prise en compte des phénomènes présents à l'échelle micrométrique, la réalisation de mouvements dextres pour les objets manipulés ainsi que l'automatisation des tâches d'assemblage. Mes travaux s'inscrivent dans ce contexte et concernent, plus précisément, la planification de mouvements de manipulation dextre adaptée à la micromanipulation. À l'échelle micrométrique, les forces surfaciques ne sont pas négligeables et font apparaître des phénomènes d'adhésion entre les objets en contact. De même, le poids des objets et l'inertie deviennent négligeables. Ainsi, le paradigme de la micromanipulation est considérablement différent du paradigme de la manipulation à l'échelle de l'Homme.

Ce manuscrit propose une approche originale de la planification des trajectoires des doigts d'une micro-main lors d'une opération de micromanipulation dextre. Les trajectoires générées prennent en compte les spécificités du micro-monde et permettent de réaliser n'importe quel mouvement planaire pour des objets de formes arbitraires. Les effets d'adhésion sont considérés par une grande partie de la communauté micro-roboticienne comme un effet perturbateur pendant la manipulation. Paradoxalement, les trajectoires obtenues mettent en avant l'aspect positif des effets d'adhésion sur la micromanipulation. En effet, une manipulation en présence des forces d'adhésion est sensiblement plus simple et plus rapide qu'une manipulation effectuée en l'absence d'adhésion. Les contributions scientifiques de chaque chapitre sont détaillées ci-dessous.

Le premier chapitre a été consacré à l'étude bibliographique de la micromanipulation, du micro-assemblage et de la manipulation dextre à l'échelle de l'Homme. Il a ainsi été montré que les techniques de micromanipulation, aussi bien avec et sans contact, développées jusqu'à présent sont principalement limitées à des opérations de manipulation simples telles que les prises-déposes et pour des objets sphériques ou rectangulaires. De ce fait, les rotations sont difficilement réalisables et les opérations de micro-assemblages sont limitées. Par la suite, l'analyse des techniques de manipulation dextre à l'échelle macrométrique a permis de montrer que la manipulation par roulement et reconfigurations peut être envisagée à l'échelle micrométrique. Finalement, l'étude des méthodes de planification des tâches de manipulation a montré qu'aucun travail de planification de trajectoires ne prenait en compte les spécificités du micro-monde et que la planification de manipulation dextre est marginale aussi bien à l'échelle micrométrique qu'à l'échelle macrométrique. Ceci a donc permis de montrer la pertinence des travaux développés dans cette thèse.

Le second chapitre a proposé une formalisation du problème de la planification de manipulation dextre spécifique à l'échelle micrométrique et basée sur un modèle de contact

intégrant les effets d'adhésion. Cette formalisation a permis de modéliser l'espace sur lequel la trajectoire est planifiée de manière originale à l'aide de trois types de cartes : les cartes d'équilibre, de reconfiguration et de prises initiales.

Le troisième chapitre a été dédié à la présentation de la méthode utilisée pour générer les trajectoires des doigts lors d'une opération de micromanipulation dextre planaire. L'approche originale développée dans ce chapitre se base sur un processus en trois étapes : i) génération de la séquence de prises minimisant les déplacements des doigts, ii) génération des trajectoires des doigts permettant de réaliser et relier ces prises et enfin iii) calcul et optimisation des forces appliquées par les doigts durant la manipulation. Les deux premières étapes sont réalisées en utilisant des algorithmes de parcours de graphe tandis que la troisième est obtenue à l'aide de méthodes de programmation linéaire. Cette approche permet de générer n'importe quel déplacement planaire tant que l'espace de planification de l'objet est explicite.

Finalement, le dernier chapitre a été consacré à la validation des trajectoires générées ainsi qu'à l'analyse des performances des manipulations réalisées. Les simulations ont montré que les effets d'adhésion ont un impact significatif sur l'espace de planification et les trajectoires générées. Plus précisément, les trajectoires exploitant les effets d'adhésion permettent de manipuler des objets plus simplement et plus rapidement qu'avec des trajectoires ne prenant pas en compte les phénomènes du micro-monde. Les trajectoires originales obtenues à l'aide de l'approche développée dans le chapitre 3 ont également été validées expérimentalement à l'échelle millimétrique et micrométrique. Ainsi, une trajectoire permettant une rotation de 132° pour un objet planaire de taille millimétrique et de forme quelconque a pu être réalisée. En boucle ouverte, la rotation de l'objet a été effectuée à plus de 98% avec une erreur d'orientation finale de seulement $2,36^\circ$. Une seconde validation expérimentale à l'échelle millimétrique a également été obtenue avec un objet tridimensionnel. Dans ce cas la trajectoire a été générée en considérant le contour de l'objet. Lors de l'expérimentation, une rotation de près de 200° a été réalisée en exploitant les propriétés d'adhésion présentes entre les doigts et l'objet. À l'échelle micrométrique, le planificateur a été capable de générer des trajectoires de manipulation identiques à des trajectoires précédemment validées. L'approche proposée permet donc de générer des trajectoires de micromanipulation originales qui sont réalisables expérimentalement.

PERSPECTIVES

Ces travaux ouvrent la voie à de nombreuses perspectives aussi bien sur le plan scientifique que sur le plan applicatif.

PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

Vers le micro-assemblage La perspective scientifique la plus proche de ces travaux est la planification et la réalisation expérimentale de tâches de micro-assemblage planaire entièrement automatisées. Pour réaliser un assemblage de manière automatisé, il est nécessaire de planifier la séquence d'assemblage optimale (c'est-à-dire minimisant les déplacements des doigts). Cette séquence correspond aux déplacements des objets les uns par rapport aux autres. Pour ce faire, il est possible de réutiliser la méthode

présentée dans ce manuscrit en considérant que les positions et orientations initiales des objets sont connues. Le planificateur actuel permettrait donc de déplacer et d'orienter les pièces depuis une configuration quelconque vers la configuration désirée tout en optimisant l'ordre des objets et les trajectoires des doigts pour réaliser l'assemblage.

Vers la micromanipulation tridimensionnelle Une seconde perspective naturelle à ces travaux est la mise en œuvre de méthodes de planification pour la micromanipulation tridimensionnelle. Contrairement à la manipulation planaire, la manipulation tridimensionnelle par roulement est non-holonyme ce qui complexifie grandement le problème de planification. Une manière de simplifier le problème consiste à considérer la manipulation tridimensionnelle comme une combinaison de manipulations planaires autour d'axes de rotation prédéfinis. Ainsi, une manipulation dans l'espace peut être vue comme une succession de manipulations planifiées à l'aide de la méthode proposée. Du fait des contraintes sur les axes de rotation, cette approche de la manipulation tridimensionnelle ne permettrait pas de construire la séquence de manipulation la plus optimale.

Un second problème apparaît lors de la planification de micromanipulation tridimensionnelle : le nombre de nœuds dans le graphe. En effet, considérer un cas tridimensionnel augmente considérablement le nombre de nœuds dans le graphe de planification. Une manière de réduire cet inconvénient consiste à considérer qu'un nœud représente une succession de prises à l'équilibre. Dès lors, un nœud contenant plus d'une prise correspond à une rotation et l'exploration du graphe permet de retourner une séquence de rotations. Du point de vue des cartes d'équilibre, les nœuds ainsi créés représentent des segments de courbe. Le graphe est alors constitué des plus grands segments qui vont représenter les rotations maximales qu'il est possible d'obtenir sans interruption (c'est-à-dire sans collisions ni franchissement des limites de stabilité). Nous avons montré lors de travaux exploratoires que cette représentation permet de réduire sensiblement le nombre de nœuds présents dans le graphe.

Vers l'apprentissage A l'instar des travaux développés à l'échelle de l'Homme, l'intégration d'algorithmes d'apprentissage pourrait améliorer le système de planification. En effet, les paramètres, en particulier physiques, caractérisant une micromanipulation dextre peuvent être difficiles à identifier et peuvent également varier significativement dans le temps. Ainsi la méthode de planification proposée dans cette thèse pourrait être enrichie par des méthodes d'apprentissage en ligne permettant de faire évoluer l'espace de planification et les trajectoires en fonction des paramètres comme l'adhésion constatée sur les doigts.

Vers la macromanipulation dextre Les expérimentations à l'échelle millimétrique montrent qu'il est possible de reproduire les particularités de l'échelle micrométrique (en utilisant des adhésifs sur les doigts par exemple). Or les manipulations en présence d'effets d'adhésion offrent des avantages dans certaines applications tel que montré dans cette thèse. Il peut donc être intéressant de reproduire ces effets sur des manipulateurs de plus grandes dimensions. Par exemple, une main robotique munie d'un système de succion à l'extrémité des doigts permettrait de découpler les possibilités de manipulation de cette main. Incidemment, cette approche a été utilisée avec succès lors du concours Amazon Picking Challenge lors de la conférence ICRA en 2015.

PERSPECTIVES APPLICATIVES

A l'échelle millimétrique Plusieurs applications sont envisageables à l'échelle millimétrique. En particulier dans l'industrie horlogère où des composants de petite taille (typiquement des mobiles) doivent être saisis, orientés puis insérés dans un axe. Actuellement ce type d'opération est effectué manuellement et nécessite une très grande précision de la part de l'opérateur. L'utilisation d'un système de manipulation dextre autonome est donc tout à fait envisageable pour améliorer l'efficacité et la vitesse d'assemblage. Ce volet applicatif est actuellement en cours de développement en partenariat avec l'entreprise Percipio Robotics SA. D'autres applications sont également envisageables dans le domaine médical. En effet, certaines opérations chirurgicales nécessitent de manipuler des objets millimétriques dans des zones très restreintes. C'est notamment le cas pour la chirurgie réparatrice de l'oreille lorsque les osselets, appartenant à l'oreille moyenne, doivent être remplacés. Ces osselets représentent des objets tridimensionnels de taille millimétrique qui doivent être correctement assemblés afin de garantir la transmission des signaux sonores. Actuellement ces opérations sont lourdes et ne garantissent pas que les patients retrouvent l'intégralité de leurs capacités auditives. Il est donc intéressant de pouvoir réaliser des opérations de manipulation dextre précises et automatisées à l'intérieur de l'oreille humaine.

A l'échelle micrométrique De nombreuses applications existent à l'échelle micrométrique mais il est intéressant d'en préciser quelques unes afin de comprendre l'intérêt applicatif de la manipulation dextre. Dans le domaine de l'instrumentation scientifique, certains microsystèmes nécessitent des opérations de rotation précise. C'est notamment le cas lors de l'assemblage de micro-interféromètres où les micro-miroirs doivent être correctement et précisément alignés afin de garantir le fonctionnement du microsystème. Dans le domaine des télécommunications, l'utilisation de techniques de micromanipulation dextre peut également être intéressante. En effet, lors de l'assemblage de deux fibres optiques à maintien de polarisation, il est nécessaire que les fibres soient correctement orientées l'une par rapport à l'autre pour garantir une transmission de la lumière de manière efficace et sans perte. A plus long terme, la micro-préhension dextre pourra également trouver des cadres applicatifs dans le domaine des nanotechnologies en permettant l'assemblage de nanocomposants complexes sous microscope électronique à balayage.

A

MODÉLISATION DES EFFETS D'ADHÉSION

Cette annexe, en lien avec le chapitre 1 de ce manuscrit, présente différentes modélisations des phénomènes d'adhésion prédominants à l'échelle micrométrique. Les trois grandes forces engendrant des effets d'adhésion sont modélisées : les forces de van der Waals, les forces de capillarité et enfin les forces électrostatiques.

LES FORCES DE VAN DER WAALS

Les forces de van der Waals correspondent aux interactions attractives entre les différentes particules. Elle peut se représenter comme la somme de trois effets : l'effet d'orientation (Keesom), l'effet d'induction (Debye) et enfin l'effet de dispersion (London). De manière générale, l'effet de dispersion est prédominant puisqu'il s'exerce entre tous les atomes (ou molécules) quelles que soient leur propriétés [London, 1937]. Ainsi pour deux molécules polaires dans le vide, l'énergie potentielle d'interaction peut s'écrire sous la forme suivante :

$$w_{vdW}(r) = -\frac{[C_{ind} + C_{orient} + C_{disp}]}{r^6} = \frac{C}{r^6} \quad (\text{A.1})$$

où C_{ind} , C_{orient} et C_{disp} représentent respectivement les effets d'induction, d'orientation et de dispersion, et r représente la distance entre les deux molécules.

Pour représenter les interactions entre deux objets, le modèle le plus couramment utilisé est celui de Hamaker [Hamaker, 1937]. Dans ce modèle l'énergie d'interaction entre deux éléments contenant q_1 et q_2 atomes par cm^3 est donné en intégrant l'équation A.1 :

$$W_{vdW} = \int_{V_1} \int_{V_2} dv_1 dv_2 q_1 q_2 w_{vdW} \quad (\text{A.2})$$

où V_1 et V_2 représentent les volumes des deux éléments.

Il est alors possible de calculer le potentiel d'interaction entre différents objets. Par exemple pour une interaction Sphère-Plan [Loskill et al., 2012] [Adamson et al., 1967] l'énergie potentielle de la force de van der Waals est donnée par :

$$W_{vdW} = -\frac{AR}{6r} \quad (\text{A.3})$$

où $A = \pi^2 C q_1 q_2$ représente la constante de Hamaker [Hamaker, 1937], R le diamètre de la sphère et r la distance Sphère-Plan.

Une fois l'énergie calculée, il est possible de remonter à la force de van der Waals en dérivant simplement le résultat de l'équation A.2 (par rapport à la distance de séparation des corps). Ainsi dans le cas d'une interaction Sphère-Plan, la force de van der Waals est la suivante :

$$F_{vdW} = -\frac{AR}{6r^2} \quad (\text{A.4})$$

Il existe évidemment d'autres modèles plus complets pour décrire les forces de van der Waals. On peut citer celui de Lifshitz qui est plus complexe mais plus réaliste que celui de Hamaker [Lifshitz, 1956]. De plus, les forces de van der Waals dépendent des matériaux (type, rugosité, etc.), de leur géométrie mais également du milieu.

Ces forces intéressent grandement la communauté scientifique car elles permettent au gecko (un petit reptile) de s'agripper à n'importe quelle surface [Huber et al., 2005]. Ainsi plusieurs dispositifs adhésifs, basés sur les forces de van der Waals, ont été développés [Geim et al., 2003] [Yu et al., 2011].

LES FORCES DE CAPILLARITÉ

La force de capillarité est due à la présence d'une liaison liquide appelée ménisque entre deux surfaces en contact (Fig.A.1). La force générée par cette liaison peut être vue comme la somme de deux contributions : la force de Laplace et la force de tension.

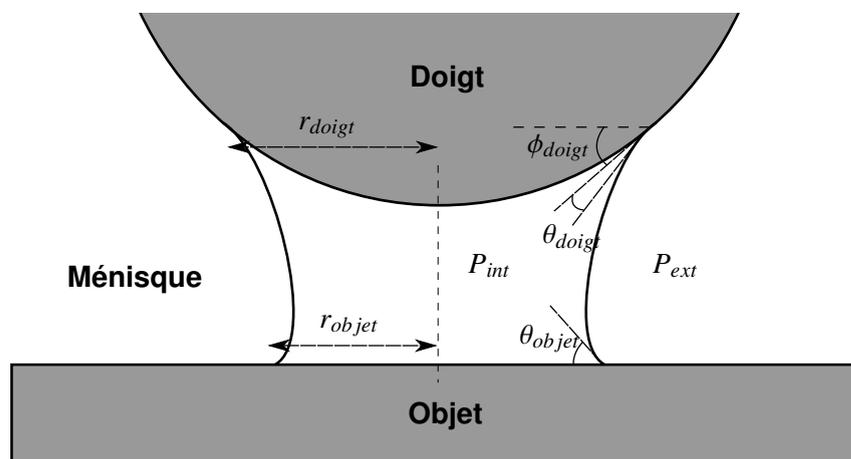


FIGURE A.1 – Illustration schématique du phénomène de capillarité lors d'un contact entre un doigt manipulateur et un objet.

La force de Laplace découle directement de la différence de pression engendrée par le ménisque. Cette différence de pression peut s'écrire [Lambert et al., 2003] :

$$\Delta P = P_{int} - P_{ext} = 2\gamma H \quad (\text{A.5})$$

où P_{int} et P_{ext} correspondent respectivement à la pression interne et externe du ménisque, γ représente la tension de surface du fluide et H la valeur moyenne de courbure du ménisque.

Cette différence de pression s'applique sur toute la surface de contact du fluide. Ainsi, dans le cas du contact ménisque-objet la force de Laplace s'exprime comme suit :

$$F_L = \pi r^2 \Delta P == 2\pi r_{\text{objet}}^2 \gamma H \quad (\text{A.6})$$

La force de tension, quant à elle, correspond à la somme des forces exercées verticalement le long de la ligne de contact entre le fluide et l'objet. Dans le cas d'un ménisque axisymétrique cette force peut s'exprimer sous la forme suivante [Lambert et al., 2003] :

$$F_T = 2\pi r \gamma \sin \theta \cos \phi \quad (\text{A.7})$$

où θ représente l'angle de contact entre le ménisque et la surface et ϕ l'inclinaison de la surface.

Finalement, la force de capillarité est simplement la somme de ces deux composantes. Dans le cas du contact ménisque-objet on obtient alors la formulation suivante :

$$F_C = F_P + F_T = 2\pi r_{\text{objet}}^2 \gamma H + 2\pi r_{\text{objet}} \gamma \sin \theta \cos \phi \quad (\text{A.8})$$

Il est à noter que cette force dépend très fortement des matériaux et du liquide en présence. En effet, les angles de contact et la tension de surface sont contraints par le type de fluide et de matériaux. De plus, comme c'est le cas avec les forces de van der Waals, les forces de capillarité sont dépendantes de la rugosité ainsi que de la géométrie des surfaces.

Ces forces, dès lors qu'elles sont présentes, constituent la partie prépondérante des forces d'adhésions et soulèvent de nombreux problèmes. C'est notamment le cas dans certains processus de micro-fabrication (lithographie tridimensionnelle) ou la force de capillarité est responsable de la distorsion des motifs [Kondo et al., 2005].

LES FORCES ÉLECTROSTATIQUES

La troisième grande famille des forces d'adhésions concerne les forces électrostatiques. Ces dernières apparaissent uniquement en présence de particules chargées. Ce qui peut intervenir dans deux cas : lorsque deux corps chargés entrent en interaction ou lors de la génération de charge par triboélectrification [Kemp et al., 2013]. Dans les deux cas, l'interaction peut être modélisée en utilisant la loi de Coulomb.

Dans le cas d'une interaction entre deux particules chargées, la force électrostatique s'exprime de la façon suivante :

$$\vec{F}_{12} = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon r^2} \vec{e}_{12} \quad (\text{A.9})$$

où q_1, q_2 représentent les charges des deux particules, ϵ caractérise la permittivité du milieu, r la distance entre les deux particules et \vec{e}_{12} le vecteur unitaire entre les deux charges.

De la même manière que pour les forces gravitationnelles, le champ électrique permet de modéliser l'action à distance. Ainsi la particule 1 exerce sur la particule 2 le champ électrique suivant :

$$\vec{E}_1(2) = \frac{q_1}{4\pi\epsilon r^2} \vec{e}_{12} \quad (\text{A.10})$$

Ainsi, le champ causé par un volume chargé V de densité volumique de charge ρ s'exprime en un point P de l'espace de la manière suivante :

$$\vec{E}(P) = \iiint_V \frac{\rho(x, y, z)}{4\pi\epsilon r(x, y, z)^2} dx dy dz \quad (\text{A.11})$$

La grande difficulté dans le calcul de ces forces réside dans le fait que la densité de charge n'est jamais réellement connue. En effet, la répartition et même la connaissance des charges dans les micro-objets n'est pas prédictible. C'est pourquoi dans de nombreux cas, les valeurs mesurées expérimentalement peuvent varier d'un ordre de grandeur par rapport aux estimations [Schein, 2007]. Afin de palier à ce problème, d'autres modèles plus complets et beaucoup plus complexes que celui de Coulomb permettent d'obtenir des estimations jusqu'à cinq fois meilleures [Kemp et al., 2013].

B

DÉTECTION DE COLLISIONS

Cette annexe présente une méthode de détection des collisions basée sur une représentation hiérarchique des objets. Cette méthode a été implémentée pour réaliser la détection des collisions présentées dans le chapitre 2.

REPRÉSENTATION DES OBJETS

De manière générale, les objets tri-dimensionnels sont représentés sous forme d'un maillage triangulaire. A partir de ce maillage, il est possible de construire une représentation hiérarchique de l'objet [Gottschalk et al., 1996] qui facilite la détection des collisions. Le niveau 0 de cette représentation hiérarchique est constitué d'une boîte rectangulaire orientée qui englobe l'objet. Cette boîte appelée boîte englobante orientée est ensuite décomposée en sous boîtes qui vont englober une partie du maillage. Cette descente en niveau s'effectue jusqu'à ce que les boîtes finissent par ne contenir plus qu'un seul triangle du maillage. Les boîtes du plus haut niveau représentent donc les extrémités de la représentation hiérarchique. Un exemple simplifié de décomposition en boîtes englobantes est visible sur la Fig. B.1

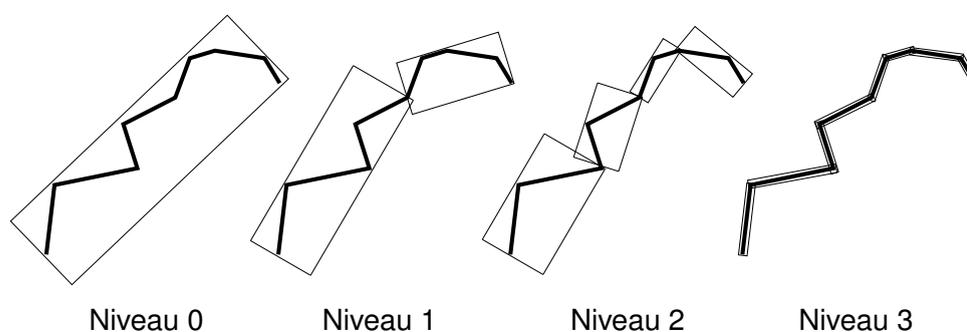


FIGURE B.1 – Représentation hiérarchique d'un segment à l'aide des boîtes de délimitation orientée.

DÉTECTION HIÉRARCHIQUE

A l'aide de cette représentation hiérarchique, la détection de collisions s'effectue, elle aussi, de manière hiérarchique. Si les deux boîtes représentant la racine de l'arbre ne

sont pas en collision alors les objets ne sont pas en collision. A l'inverse, si les deux boîtes sont en collision alors il se peut que les objets soient également en collision. Pour vérifier cette propriété, il suffit de tester les collisions sur le niveau suivant de l'arbre et de continuer ainsi tant que les boîtes sont en collision. Si la détection des collisions va jusqu'à l'extrémité de l'arbre alors les deux objets sont en collision.

Cette détection de collisions peut s'effectuer à l'aide du théorème de l'axe séparateur :

Theorème 1 : Théorème de l'axe séparateur

Deux objets convexes ne sont pas en collision s'il existe un axe sur lequel les projections des objets ne se chevauchent pas.

Il suffit alors de tester différents axes pour vérifier si deux objets sont en collision. Grâce à des considérations géométriques, le nombre d'axes à tester peut être réduit à 15 ce qui rend la détection rapide.

PRÉSENTATION DE L'ALGORITHME A^*

Cette annexe détaille le fonctionnement de l'algorithme A^* et de la variante proposée pour réaliser la planification de tâche de micromanipulation dextre. Ces algorithmes sont utilisés pour réaliser les parcours de graphe présentés dans le chapitre 3.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE L'ALGORITHME A^*

Considérant un nœud de départ et un nœud d'arrivée, l'algorithme A^* cherche le plus court chemin dans le graphe afin de relier les deux nœuds choisis. Cet algorithme d'exploration est basé sur une estimation heuristique de chaque nœud, c'est-à-dire qu'à chaque nœud est affecté une valeur, h , qui estime sa distance jusqu'au nœud d'arrivée. De même, à chaque arête du graphe est affecté un coût, c_{i-j} , qui représente la distance entre les nœuds i et j . Ainsi, lorsqu'un nœud est exploré, il est possible de lui affecter une valeur g qui correspond à la distance parcourue pour atteindre ce nœud (somme des coûts) plus l'estimation de la distance restante à parcourir pour atteindre l'objectif (heuristique du nœud). Cette valeur représente le coût total du nœud et est utilisée afin d'explorer le graphe. En effet, l'objectif étant de trouver le chemin optimal (de coût minimal), le coût total permet alors de sélectionner le nœud le plus prometteur, c'est-à-dire celui avec le coût g le plus faible. De plus, pour que le chemin trouvé soit optimal il est nécessaire que l'heuristique choisie ne surestime jamais la distance au nœud final. Le pseudo code de cet algorithme est détaillé dans l'Algorithme 1.

L'exploration du graphe repose donc sur l'utilisation de deux listes : *Liste_Ouvert* et *Liste_Ferme*. Ces listes permettent de garder en mémoire d'un côté les nœuds qui peuvent être explorés et de l'autre ceux qui ont déjà été explorés. Lorsqu'un nœud est stocké dans une des listes, son parent (le nœud duquel il est issu) est également stocké. Cela permet de connaître le chemin effectué pour atteindre ce nœud. Initialement, seul le nœud de départ est explorable, c'est pourquoi *Liste_Ouvert* est initialisée en lui ajoutant ce nœud (dans ce cas le nœud père est le nœud fils). Par la suite, à chaque itération, le nœud choisi correspond au nœud de coût total minimal présent dans *Liste_Ouvert*. Une fois ce nœud choisi, tous ses successeurs (c'est-à-dire les nœuds fils) sont passés en revue avant d'être ajoutés à la liste des nœuds explorables. En effet, un fils est ajouté à la liste des nœuds utilisables si il n'est présent ni dans *Liste_Ouvert* et ni dans *Liste_Ferme*. Si le nœud fils est déjà présent dans un des listes cela signifie qu'un autre chemin menant jusqu'à ce nœud a déjà été exploré. Cependant, si le coût actuel nécessaire pour accéder à ce nœud est plus faible que le coût du précédent chemin alors le nœud doit

Algorithme 1: Pseudo code de l'algorithme A***Data :** G : Graphe, I : nœud initial, F : nœud final.**Result :** $P = (I, \dots, F)$: Chemin de cout minimal.**begin**

```

   $g(I) \leftarrow h(I)$ 
   $Liste\_Ouvert \leftarrow I$ 
   $Liste\_Ferme \leftarrow \emptyset$ 
  while  $Liste\_Ouvert \neq \emptyset$  do
     $nœud\_Actuel \leftarrow Min(Liste\_Ouvert, g)$ 
    if  $nœud\_Actuel = F$  then
       $P \leftarrow Reconstruire\_Chemin(Liste\_Ferme, nœud\_Actuel)$ 

    foreach  $S = nœud\_Successeur(nœud\_Actuel, G)$  do
       $Cout\_Actuel \leftarrow h(S) + c(nœud\_Actuel) + cout(nœud\_Actuel, S)$ 
      if  $S \in Liste\_Ouvert$  then
        if  $Cout\_Actuel < g(S)$  then
           $g(S) \leftarrow Cout\_Actuel$ 
           $Parent(S) \leftarrow nœud\_Actuel$ 
        else
          if  $S \in Liste\_Ferme$  then
            if  $Cout\_Actuel < g(S)$  then
               $Liste\_Ouvert \leftarrow S$ 
            else
               $Liste\_Ouvert \leftarrow S$ 

       $Liste\_Ferme \leftarrow nœud\_Actuel$ 
       $Liste\_Ouvert \leftarrow Liste\_Ouvert \setminus nœud\_Actuel$ 

```

être ajouté à la liste des nœuds utilisables. L'opération se répète ainsi jusqu'à obtenir le nœud d'arrivée. A chaque fois qu'un nœud est choisi, il est ajouté à *Liste_Ferme* et retiré de *Liste_Ouvert*. De cette façon, pour reconstruire le chemin, il suffit de prendre le dernier nœud ajouté dans *Liste_Ferme* puis de remonter de père en père jusqu'à atteindre le nœud initial.

EXEMPLE

Afin d'illustrer le fonctionnement de cet algorithme, considérons le graphe représenté sur la Fig. C.1. À chaque nœud i est associée une heuristique h_i et à chaque liaison un coût c_{i-j} . Le nœud 1, par exemple, est affecté d'une heuristique estimée à 4¹. De même, la liaison entre le nœud 1 et le nœud 2 est affectée d'un coût valant 3. *Liste_Ouvert* est donc initialisée avec le nœud 1.

À la première itération, le nœud 1 est sélectionné et ses successeurs sont ajoutés à la liste des nœuds explorables. Trois nœuds sont ainsi ajoutés : le nœud 2, le nœud

1. l'unité importe peu dans cet exemple tant que toutes les valeurs sont homogènes

3 et le nœud 4. Ces trois nœuds ont les coûts suivants : $g_2 = h_2 + c_{1-2} = 6 + 3 = 9$, $g_3 = h_3 + c_{1-3} = 2 + 6 = 8$ et $g_4 = h_4 + c_{1-4} = 5 + 5 = 10$. Lors de l'itération suivante, le nœud le plus prometteur est donc le nœud 3. Ce nœud ne disposant que d'un seul fils (le nœud 6 de coût $g_6 = 12$), trois nœuds sont alors explorables : les nœuds 2, 4 et 6. Ainsi, le nœud 2 est sélectionné lors de la troisième itération. En sélectionnant ce nœud, on remarque que le nœud 3 est de nouveau sélectionnable. Cependant, le coût associé au nœud 3 en venant du nœud 2 est de $g_3 = 9$. Or le précédent chemin menant à ce nœud avait un coût $g_3 = 8$ c'est-à-dire plus faible. Ainsi, le nœud 3 ne peut pas être ajouté aux nœuds utilisables. A cette itération, l'algorithme a donc cessé d'explorer ce chemin puisqu'il ne peut pas être le chemin de coût minimal. Il reste donc seulement deux nœuds explorables : le nœud 4 et le nœud 6. L'itération suivante sélectionne donc le nœud 4 qui ne dispose que d'un seul successeur le nœud 5 de coût $g_5 = 15$. Le coût de ce nœud étant supérieur au coût du nœud 6, ce dernier est donc choisi lors de l'itération 5. Le successeur du nœud 6 est le nœud final. Toutefois, le coût de ce nœud est supérieur au coût du nœud 5 ($g_7 = 17$). De ce fait, même si le nœud objectif est sélectionnable, l'algorithme ne le choisit pas et préfère explorer un chemin qui semble plus prometteur. Le nœud 5 a lui aussi pour fils le nœud final dont le coût est de $g_7 = 16$. On remarque alors que le coût pour atteindre l'objectif est plus faible en venant du nœud 5 qu'en venant du nœud 6. C'est pourquoi le nœud 7 venant du nœud 5 remplace le précédent nœud 7 dans la liste des nœuds explorables. Finalement, le nœud final est sélectionné et il ne reste plus qu'à reconstruire le chemin optimal qui est donc : nœud 1 ; nœud 4 ; nœud 5 ; nœud 7. La table C.1 synthétise le parcours de ce graphe par l'algorithme A^* .

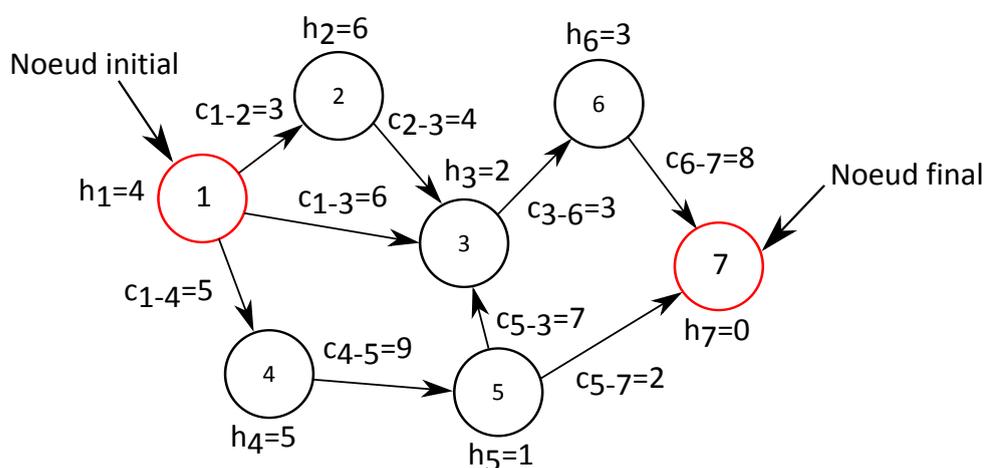


FIGURE C.1 – Représentation d'un graphe utilisable par l'algorithme A^* .

PRÉSENTATION DE L'ALGORITHME A^* ADAPTÉ À AUX MICRO-ASSEMBLAGES

L'algorithme A^* doit être modifié pour optimiser aussi bien le chemin que la prise initiale et finale qui ne sont pas spécifiées. La prise finale est automatiquement optimisée à l'aide de l'algorithme de base. L'optimisation de la prise initiale peut se faire ajoutant à *Liste_Ouvert* l'ensemble des nœuds associés à la carte de prises initiales et en leur affectant un coût non nul c_{ini} . De cette façon, l'algorithme dispose d'un ensemble de nœuds dès la première itération. La reconstruction du chemin dans le graphe s'effectue

Itération	nœud actuel	nœud successeur	nœuds visitables	Coût des nœuds
0	[]	[]	1	$g_1 = 4$
1	1	2, 3, 4	2, 3, 4	$g_2 = 9, g_3 = 8, g_4 = 10$
2	3	6	2, 4, 6	$g_2 = 9, g_4 = 10, g_6 = 12$
3	2	3	4, 6	$g_3 = 9, g_4 = 10, g_6 = 12$
4	4	5	5, 6	$g_5 = 15, g_6 = 12$
5	6	7	5, 7	$g_5 = 15, g_7 = 17$
6	5	7	7	$g_7 = 16$

TABLE C.1 – Tableau détaillant le parcours de graphe par l'algorithme A* sur le graphe représenté en Fig. C.1

également de la même manière en remontant de père en père jusqu'à atteindre un nœud I . Cette variante de l'algorithme A* peut se synthétiser avec le pseudo code 2.

Algorithme 2: Pseudo code de l'algorithme A* modifié

Data : G : Graphe, θ_i : Orientation initial θ_f : Orientation finale.

Result : $P = (I, \dots, F)$: Chemin de cout minimal.

begin

foreach $nœud_I \in G$ **do**

$g(nœud_I) = h(nœud_I) + c_{ini}(nœud_I)$

$Liste_Ouvert \leftarrow nœud_I$

$Liste_Ferme \leftarrow \emptyset$

while $Liste_Ouvert \neq \emptyset$ **do**

$nœud_Actuel \leftarrow Min(Liste_Ouvert, g)$

if $Orientation(nœud_Actuel) = \theta_f$ **then**

$P \leftarrow Reconstituer_Chemin(Liste_Ferme, nœud_Actuel)$

foreach $S = nœud_Successeur(nœud_Actuel, G)$ **do**

$Cout_Actuel \leftarrow h(S) + c(nœud_Actuel) + cout(nœud_Actuel, S)$

if $S \in Liste_Ouvert$ **then**

if $Cout_Actuel < g(S)$ **then**

$g(S) \leftarrow Cout_Actuel$

$Parent(S) \leftarrow nœud_Actuel$

else

if $S \in Liste_Ferme$ **then**

if $Cout_Actuel < g(S)$ **then**

$Liste_Ouvert \leftarrow S$

else

$Liste_Ouvert \leftarrow S$

$Liste_Ferme \leftarrow nœud_Actuel$

$Liste_Ouvert \leftarrow Liste_Ouvert \setminus nœud_Actuel$

D

TRAJECTOIRES SIMULÉES DE MICROMANIPULATION

Cette annexe présente de manière détaillée les trajectoires utilisées au cours du chapitre 4. Ainsi, la manipulation générée, les trajectoires des doigts ainsi que la représentation de la manipulation dans l'espace de planification sont illustrées dans cette annexe. Toutes les simulations présentées ici utilisent les paramètres de l'algorithme (coûts et heuristique) tels que définis dans le Chapitre 3.

MANIPULATION D'UN CYLINDRE (150°)

Cette simulation concerne la manipulation d'un cylindre de $50\mu\text{m}$ de diamètre par trois doigts. L'objectif est de réaliser une rotation de 150° . Les paramètres physique de simulation sont le suivants :

- $f_{po,sup}$: la force d'adhésion entre l'objet et le support est de $2\mu\text{N}$,
- f_{po} : la force d'adhésion entre les doigts et l'objet est de $1\mu\text{N}$.
- w_{ext} : les efforts extérieurs sont de $0\mu\text{N}$.
- μ : la friction entre les doigts et l'objet est de 0.5 .
- r_d : le rayon des doigts est de $5\mu\text{m}$.

De plus, les paramètres de l'algorithme (coûts et heuristique) sont pris tels que décrit dans le Chapitre 4.

La Fig. D.1 illustre la séquence de manipulation générée pour obtenir une rotation de 150° . La manipulation garantissant que l'objet puisse être détaché du support et nécessitant les plus faibles déplacements des doigts est donc une manipulation sans reconfiguration.

La figure D.2 montre, quant à elle, les déplacements des doigts générés pour obtenir cette manipulation. Chaque élément de la figure D.2 correspond aux déplacements effectués par les doigts pour lier deux étapes de la figure D.1. Sur cette figure, les configurations initiales sont représentées par des traits fins tandis que les configurations finales sont représentées par des traits épais. De même, le point noir présent sur l'objet représente l'origine de l'abscisse curviligne.

La figure D.3 illustre la trajectoire réalisée du point de vue de l'espace de planification. La prise initiale est de coordonnées $(3,5\mu\text{m}; 87,2\mu\text{m})$ dans la carte initiale $I_{1,3}$. De cette prise,

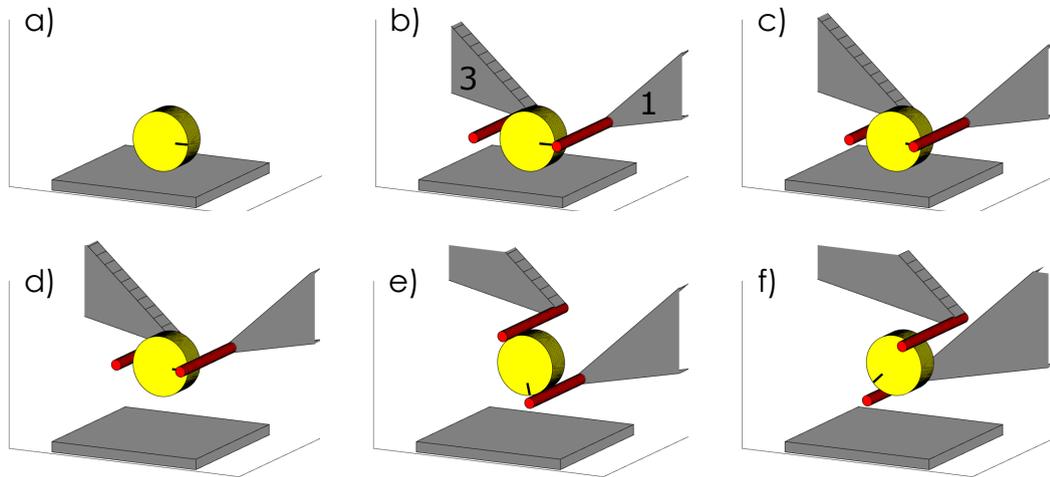


FIGURE D.1 – Séquence d’images illustrant la saisie et la rotation d’un cylindre par deux doigts. La marque sur l’objet représente l’origine de l’abscisse curviligne

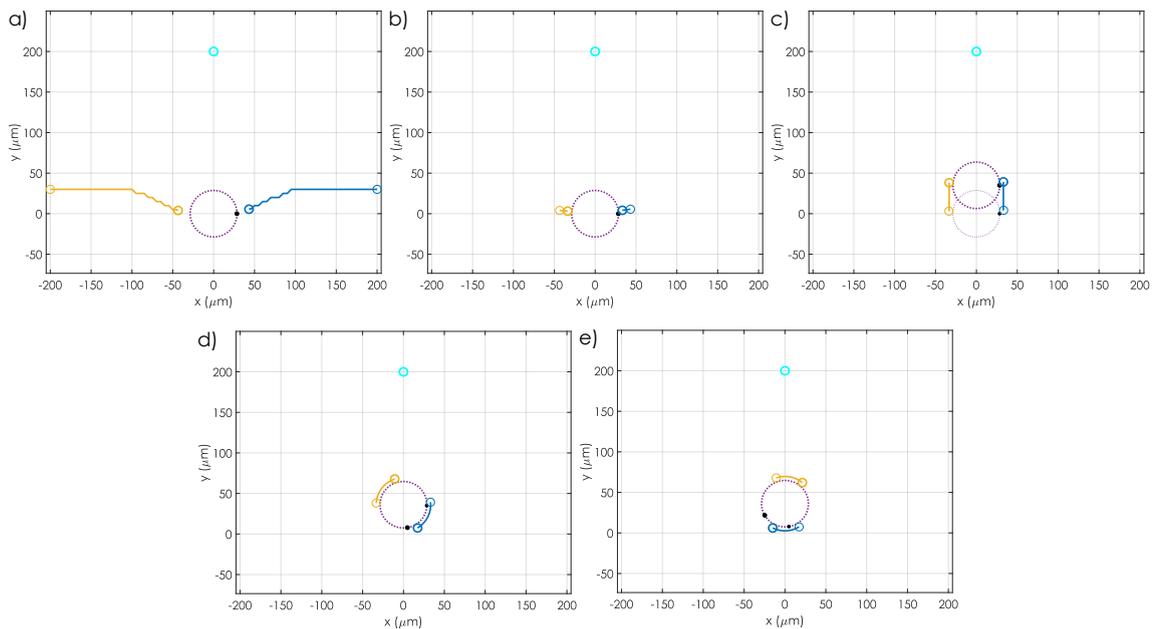


FIGURE D.2 – Séquence d’images représentant les trajectoires des doigts utilisées pour réaliser la manipulation illustrée sur la figure D.1.

la rotation s’effectue en parcourant une droite dans la carte d’équilibre pour atteindre la prise de coordonnées $(16,6\mu\text{m}; 100,3\mu\text{m})$. La distance parcourue par les doigts sur la surface de l’objet est de $13,1\mu\text{m}$. Sur cette figure sont également représentées les positions de la prise initiale et finale dans leur carte respective.

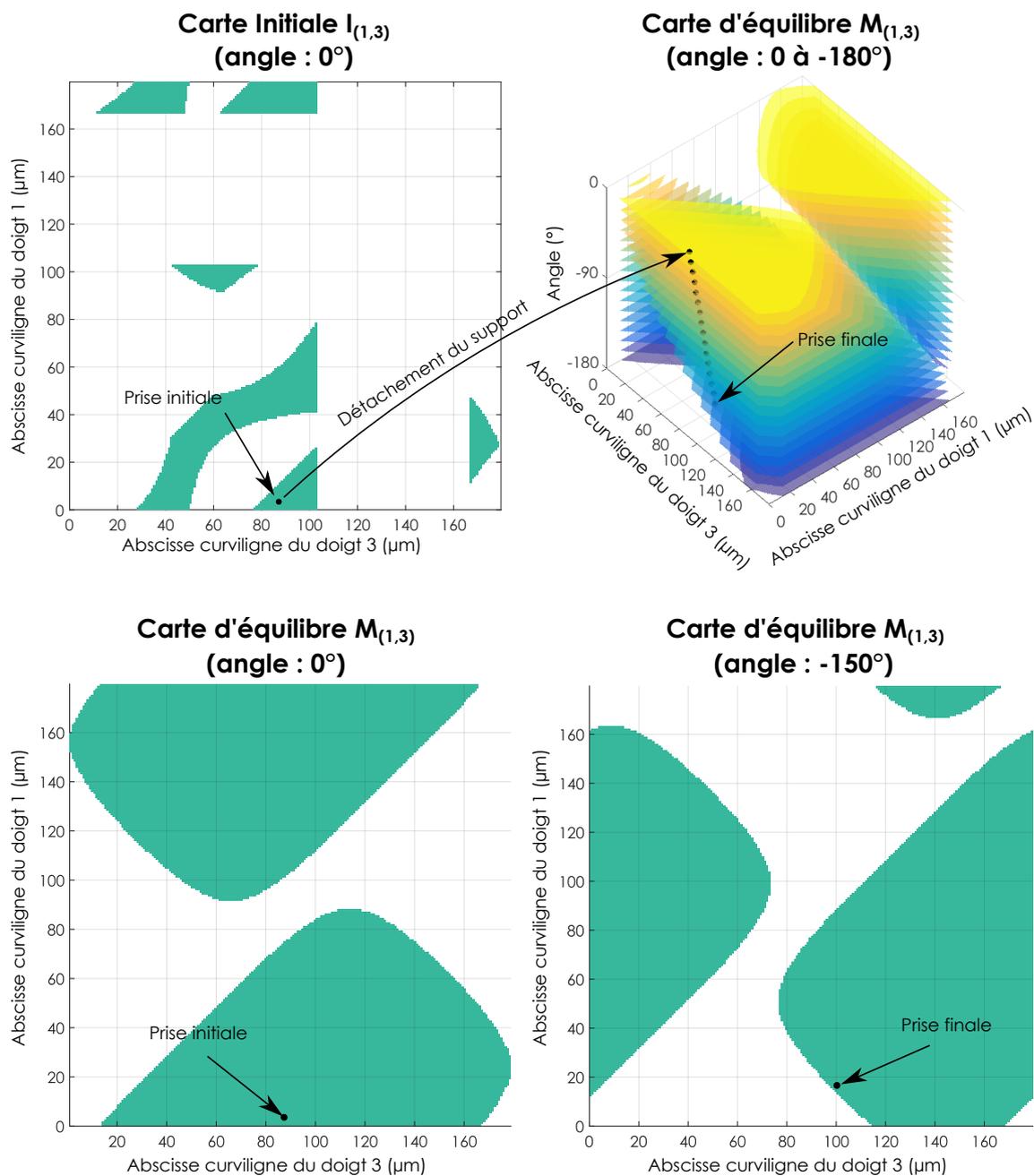


FIGURE D.3 – Représentation de la manipulation du cylindre dans l'espace des configurations.

MANIPULATION D'UN PARALLÉLÉPIPÈDE RECTANGLE (180°)

Cette simulation permet de générer les trajectoires garantissant une rotation de 180° pour un objet de type parallélépipède rectangle (48μm de coté). Les paramètres physiques de simulation sont les suivants :

- $f_{po,sup}$: la force d'adhésion entre l'objet et le support est de 0μN,
- f_{po} : la force d'adhésion entre les doigts et l'objet est de 0μN.
- w_{ext} : les efforts extérieurs sont de 0μN.
- μ : la friction entre les doigts et l'objet est de 0.3.
- r_d : le rayon des doigts est de 5μm.

La séquence générée est visible sur la figure D.4. Cette manipulation combine deux rotations de 90° et une reconfiguration. La manipulation optimale ne peut donc être réalisée sans reconfiguration.

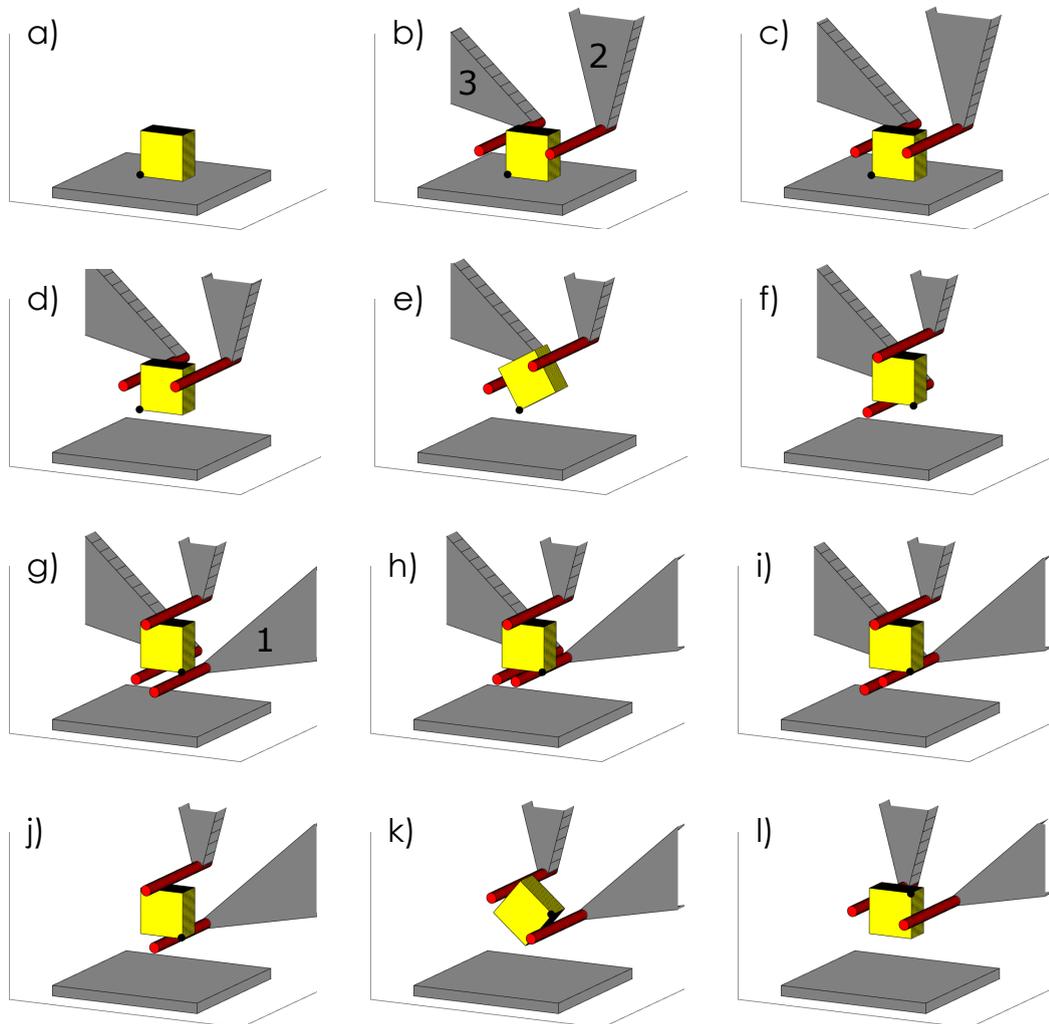


FIGURE D.4 – Séquence d'images illustrant la saisie et la rotation d'un parallélépipède rectangle de 48μm de coté.

La figure D.5 permet de voir les déplacements des doigts pendant chaque étape de la manipulation. Sur cette figure, les configurations initiales sont représentées par des traits fins tandis que les configurations finales sont représentées par des traits épais. Le point noir présent sur l'objet représente l'origine de l'abscisse curviligne.

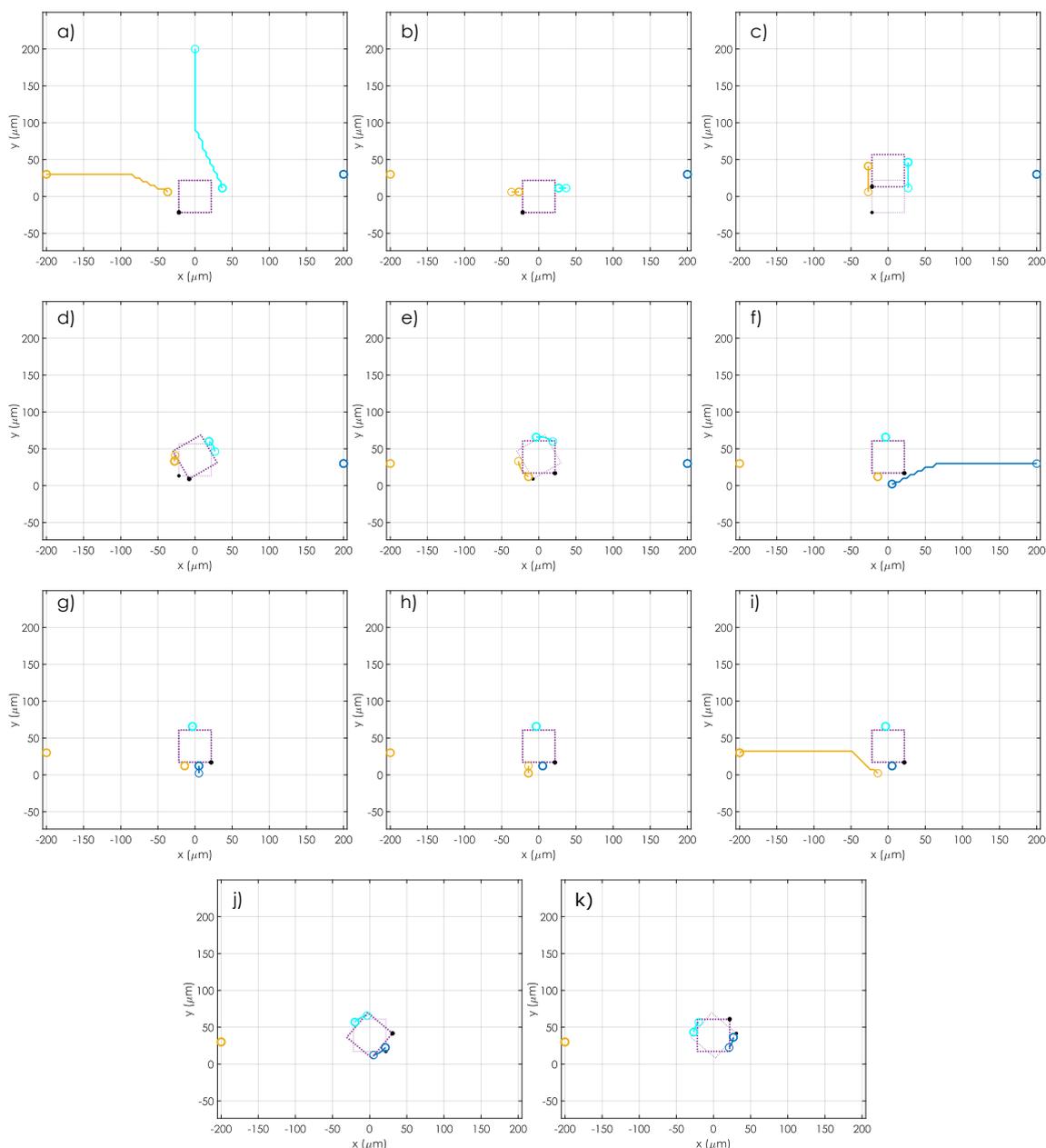


FIGURE D.5 – Séquence d'images représentant les trajectoires des doigts utilisées pour réaliser la manipulation illustrée sur la figure D.3.

Afin de comprendre pourquoi cette manipulation a été obtenue, regardons la manipulation du point de vue des cartes d'équilibre et de reconfiguration. Dans un but de clarté de présentation, décomposons cette trajectoire en trois étapes. La première étape, illustrée sur la figure D.6 décrit la première rotation de 90° . On remarque ainsi que la prise initiale est sélectionnée relativement proche des limites de la carte initiale. En l'absence de force d'adhésion (aussi bien entre le support et l'objet qu'entre les doigts et l'objet), cette prise

se trouve être également proche des limites dans la carte d'équilibre à deux doigts $M_{(2,3)}$. Sélectionner cette prise permet à la fois de réaliser une rotation de grande amplitude mais également d'obtenir une prise convenable pour la reconfiguration. On remarque alors que la rotation réalisée correspond en fait à la rotation d'amplitude maximale qu'il est possible d'obtenir à partir de cette prise de départ. En effet, la prise obtenue après la rotation de 90° se situe à l'extrémité de la carte d'équilibre $M_{(2,3)}$. Comme évoqué précédemment, cette limite est, dans ce cas, due aux cônes de frottement et non aux collisions (bien que l'algorithme ne fasse pas de différence entre ces deux contraintes).

Par la suite, il est nécessaire d'engager la seconde étape de la manipulation : la reconfiguration de la prise. Cette étape est représentée dans la figure D.7. La prise à deux doigts obtenue suite à la rotation va fortement limiter les positions sur lesquelles le doigt 1 va pouvoir être placé. En effet, comme le montre la carte d'équilibre $M_{(1,2,3)}$ seules quelques positions de contact sont admissibles. Parmi ces positions, l'algorithme va alors choisir celle qui permet de réaliser le plus rapidement possible les 90° restant. Deux options sont alors possibles : soit réaliser la rotation restante avec les trois doigts, soit repasser à deux doigts pour ensuite effectuer la rotation. Dans notre cas, la rotation à trois doigts n'est pas choisie par l'algorithme car la rotation réalisable est très limitée (quelle que soit la position du doigt 1 choisie). C'est pourquoi, le doigt 1 est placé à la position curviligne $158\mu\text{m}$ puis le doigt 3 est retiré. Ce retrait est possible puisque la prise de coordonnées $(158\mu\text{m}; 68,9\mu\text{m}; 138,7\mu\text{m})$ appartient à la carte de reconfiguration $D_{(1,2,3)_3}$.

Finalement, la prise à deux doigts obtenue permet de réaliser la rotation restante comme illustré sur la figure D.8. En effet, la prise résultant du détachement du doigt 3 est choisie proche des extrémités de la carte d'équilibre $M_{(1,2)}$. Cela permet alors d'effectuer les 90° restant sans reconfiguration. La prise finale dans la carte d'équilibre $M_{(1,2)}$ montre qu'il est même encore possible de continuer la rotation depuis cette prise.

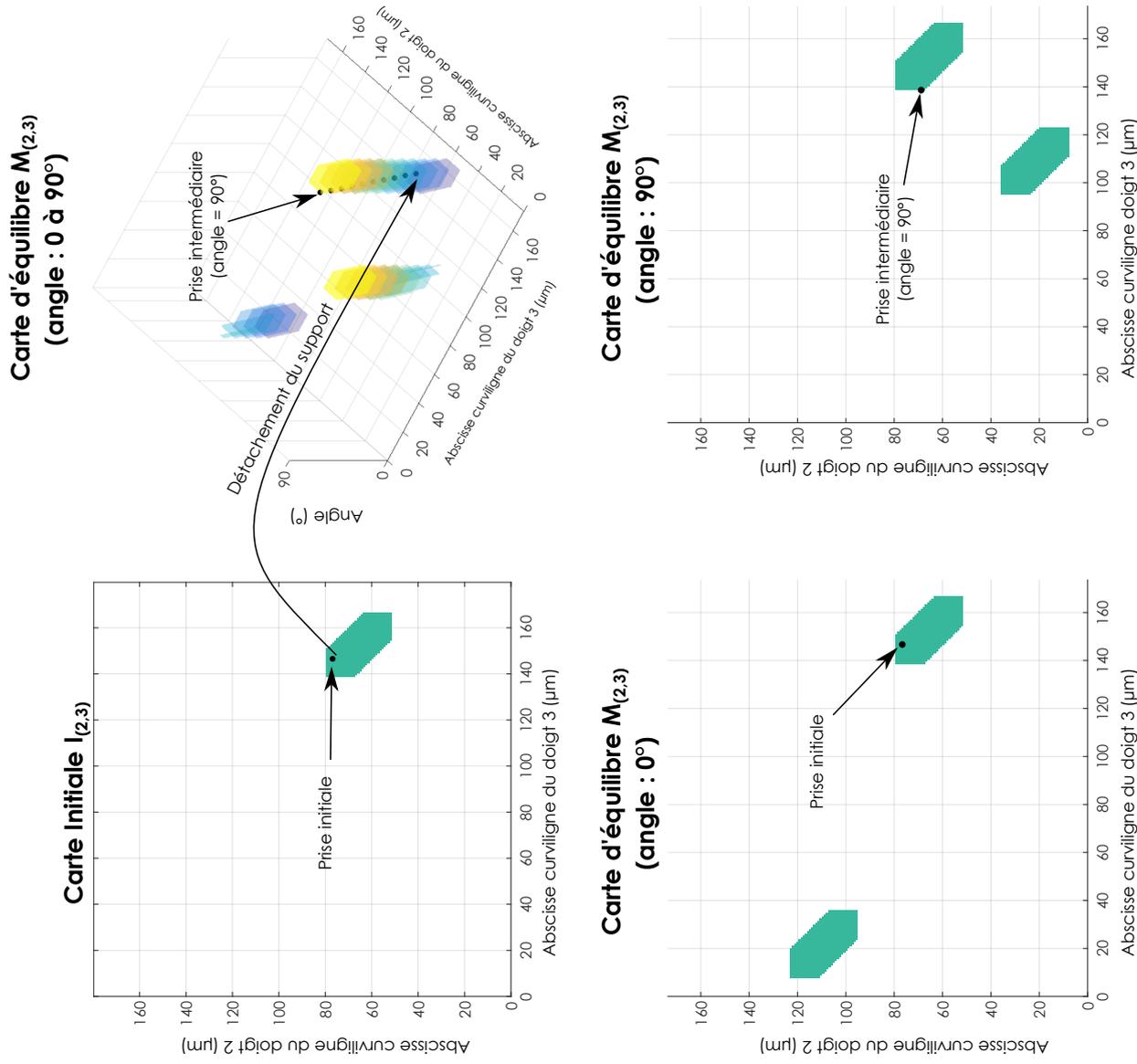


FIGURE D.6 – Représentation de la première rotation de 90° lors de la manipulation du parallélépipède rectangle dans l'espace de planification.

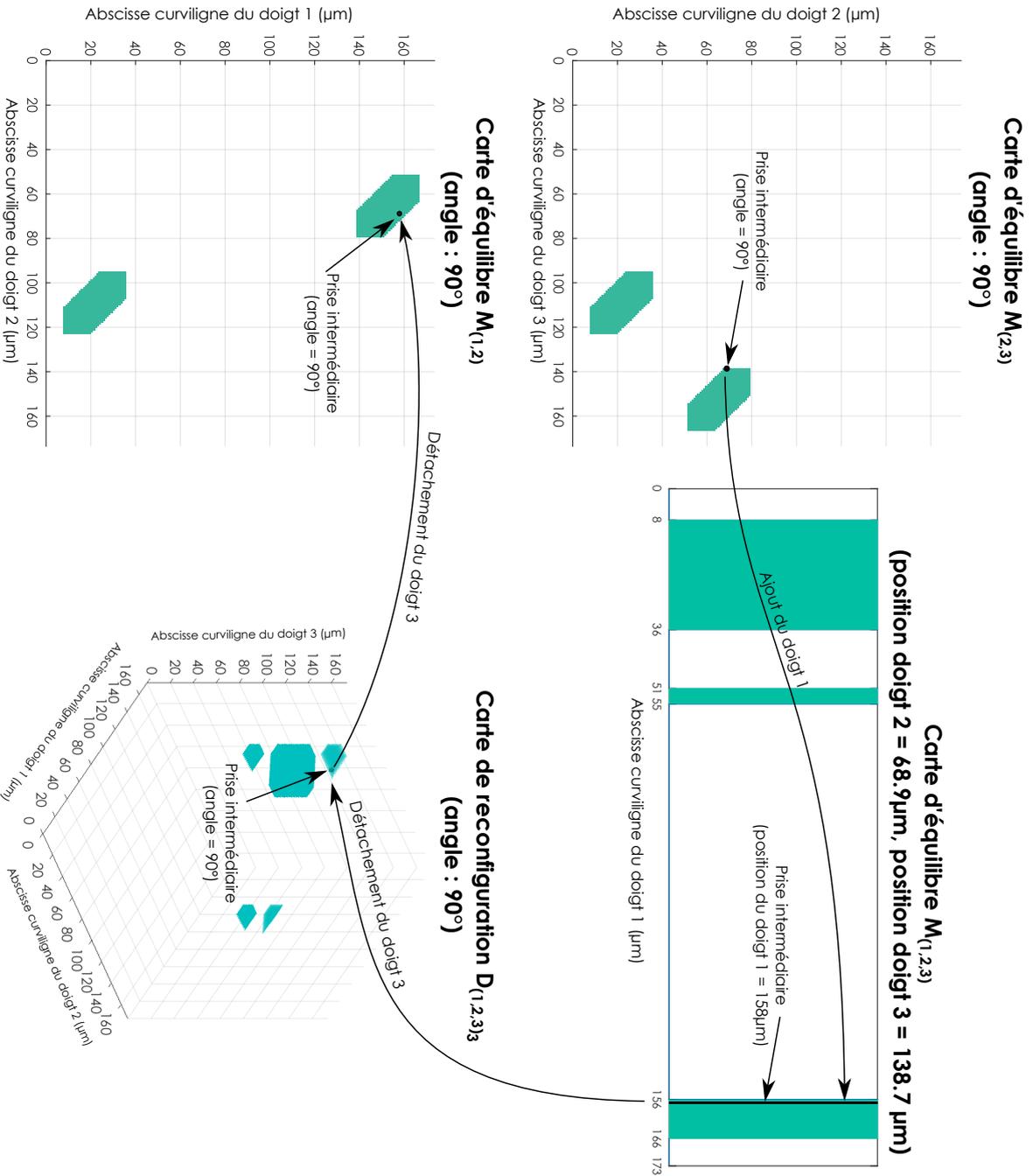


FIGURE D.7 – Représentation de la reconfiguration lors de la manipulation du parallépipède rectangle dans l'espace de planification.

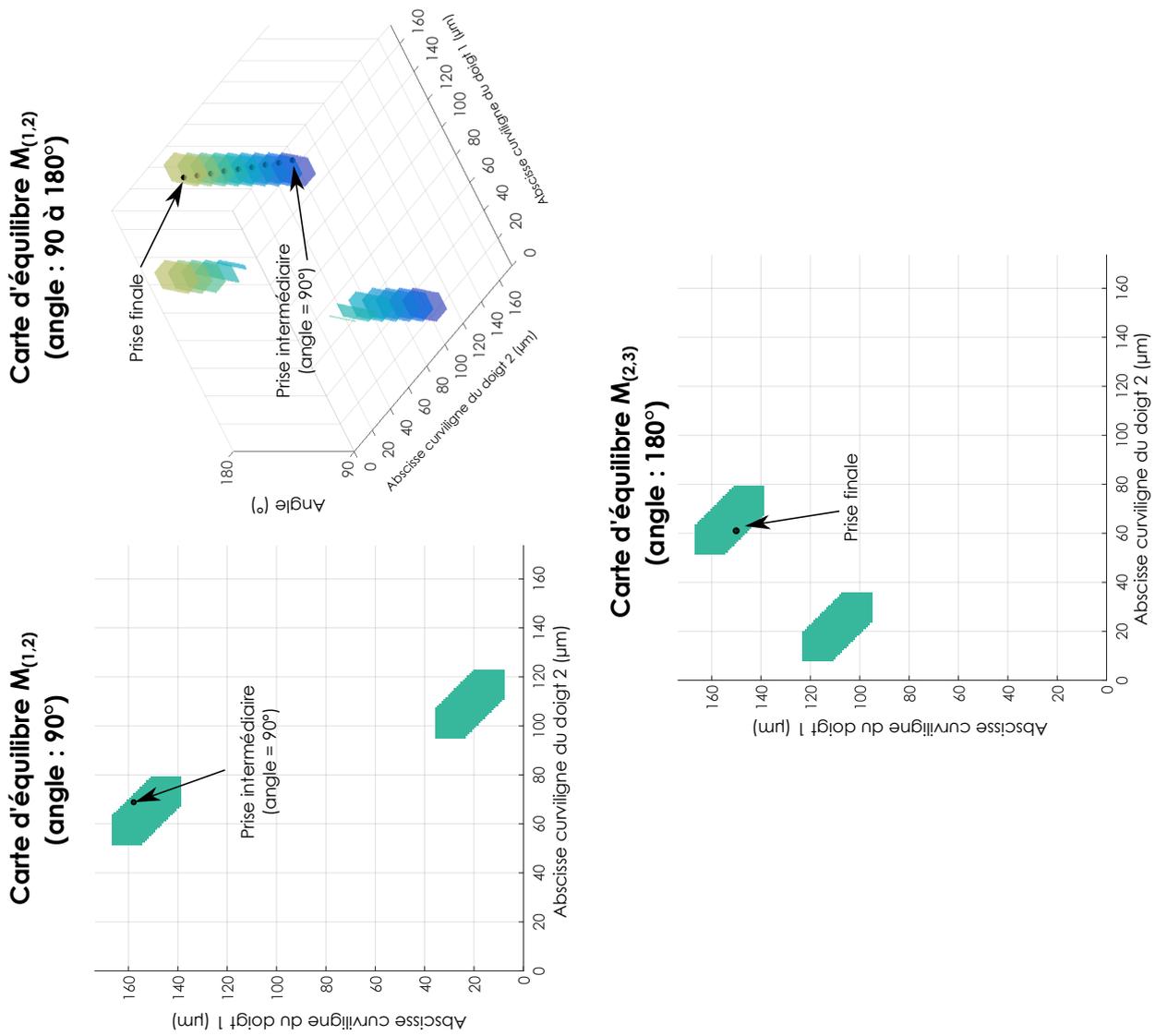


FIGURE D.8 – Représentation de la seconde rotation de 90° lors de la manipulation du parallélépipède rectangle dans l'espace de planification.

MANIPULATION D'UN CYLINDRE (240°)

Cette simulation concerne la manipulation d'un cylindre de $50\mu\text{m}$ de diamètre par trois doigts. L'objectif est de réaliser une rotation de 240° . Les paramètres physique de simulation sont le suivants :

- $f_{po,sup}$: la force d'adhésion entre l'objet et le support est de $2\mu\text{N}$,
- f_{po} : la force d'adhésion entre les doigts et l'objet est de $0\mu\text{N}$.
- w_{ext} : les efforts extérieurs sont de $0\mu\text{N}$.
- μ : la friction entre les doigts et l'objet est de 0.5 .
- r_d : le rayon des doigts est de $5\mu\text{m}$.

La séquence générée est visible sur la figure D.9. Cette manipulation combine deux rotations et une reconfiguration. La première rotation est de 30° et la seconde de 210° . La manipulation optimale ne peut donc être réalisée sans reconfiguration.

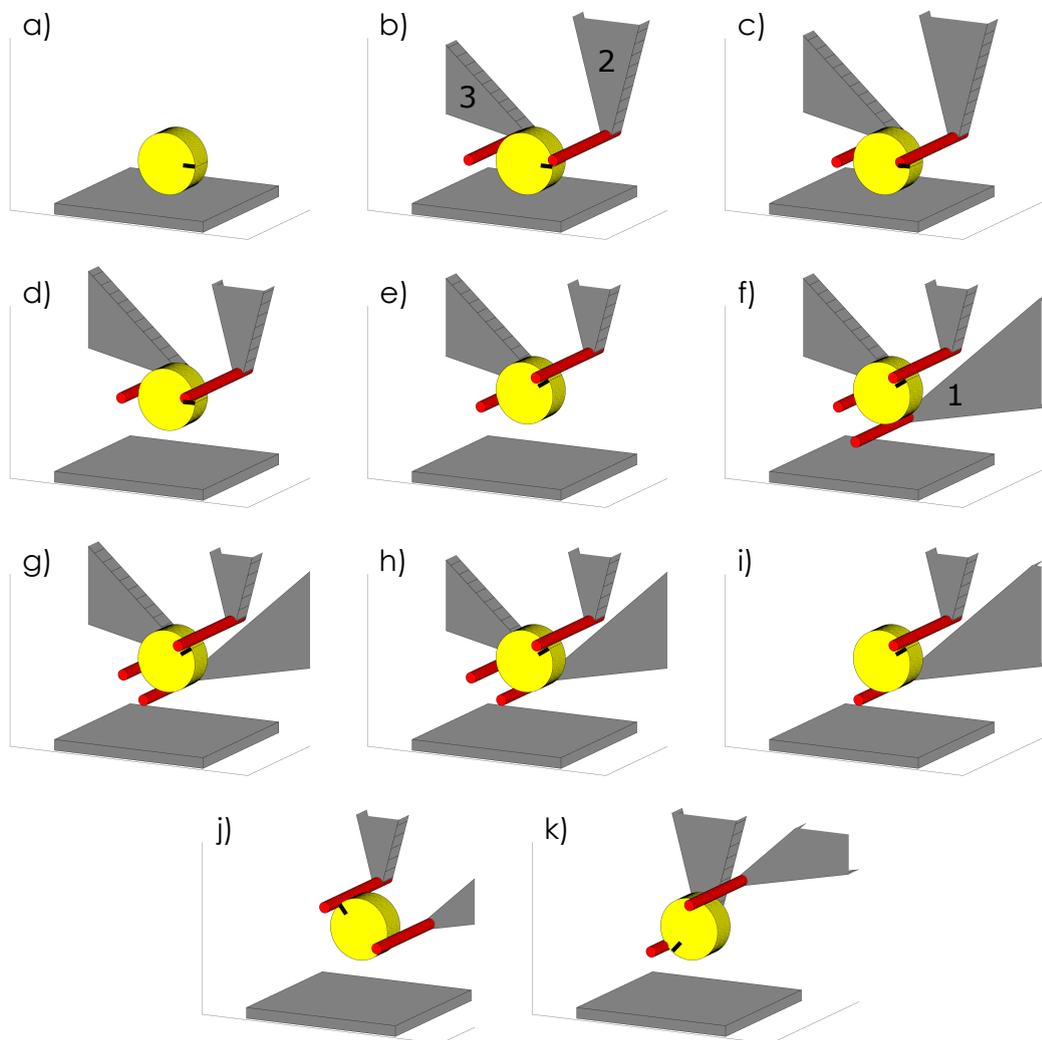


FIGURE D.9 – Séquence d'images illustrant la saisie et la rotation d'un cylindre de $50\mu\text{m}$ de diamètre par trois doigts.

La figure D.10 permet de voir les déplacements des doigts pendant chaque étape de la manipulation. Sur cette figure, les configurations initiales sont représentées par des traits fins tandis que les configurations finales sont représentées par des traits épais. Le point noir présent sur l'objet représente l'origine de l'abscisse curviligne.

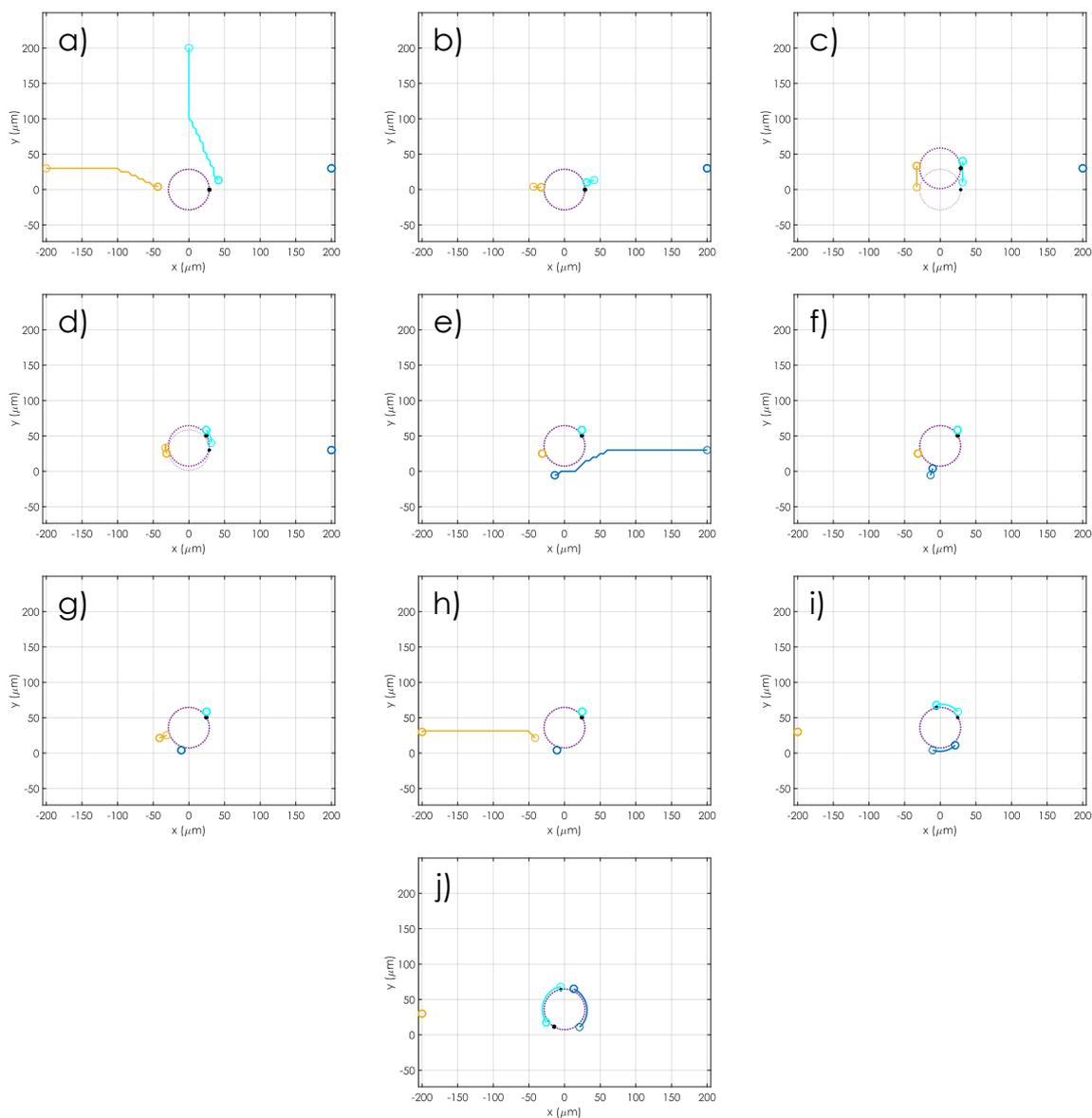


FIGURE D.10 – Séquence d'images représentant les trajectoires des doigts utilisées pour réaliser la manipulation illustrée sur la figure D.9.

La Fig. D.11 illustre la première rotation dans l'espace de planification. La prise initiale est réalisée dans la carte initiale $I_{2,3}$. De cette prise, une rotation de 30° s'effectue en parcourant une droite dans la carte d'équilibre $M_{(2,3)}$. Sur cette figure la positions de la prise initiale et de la prise intermédiaire sont visibles dans leur carte respective.

Par la suite la prise est reconfigurée en ajout tout d'abord le doigt 1 à la position curviligne $110,8\mu\text{m}$ puis en retirant le doigt 3. Cette étape est illustrée par la Fig. D.12. Les positions intermédiaires sont également représentées dans leur carte respective.

Enfin, la prise formée par les doigt 1 et 2 permet de réaliser la rotation restante de 210° . Cette étape est visible sur la Fig. D.13. La prise finale est également représentée. Il est à noter que lors de la rotation, l'abscisse curviligne du doigt 2 passe par l'origine des coordonnées curviligne.

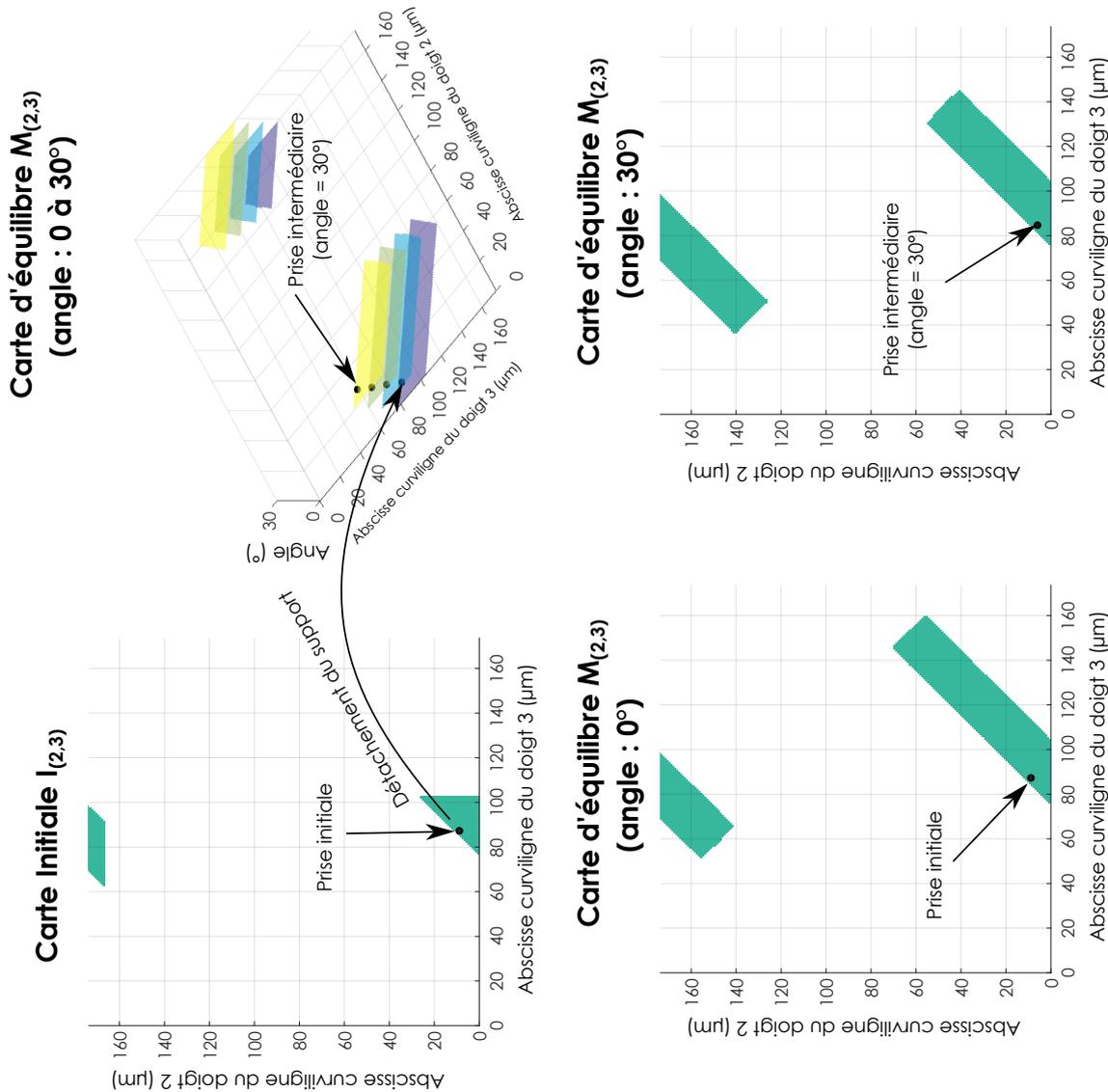


FIGURE D.11 – Représentation de la première rotation de 30° lors de la manipulation du cylindre dans l'espace de planification.

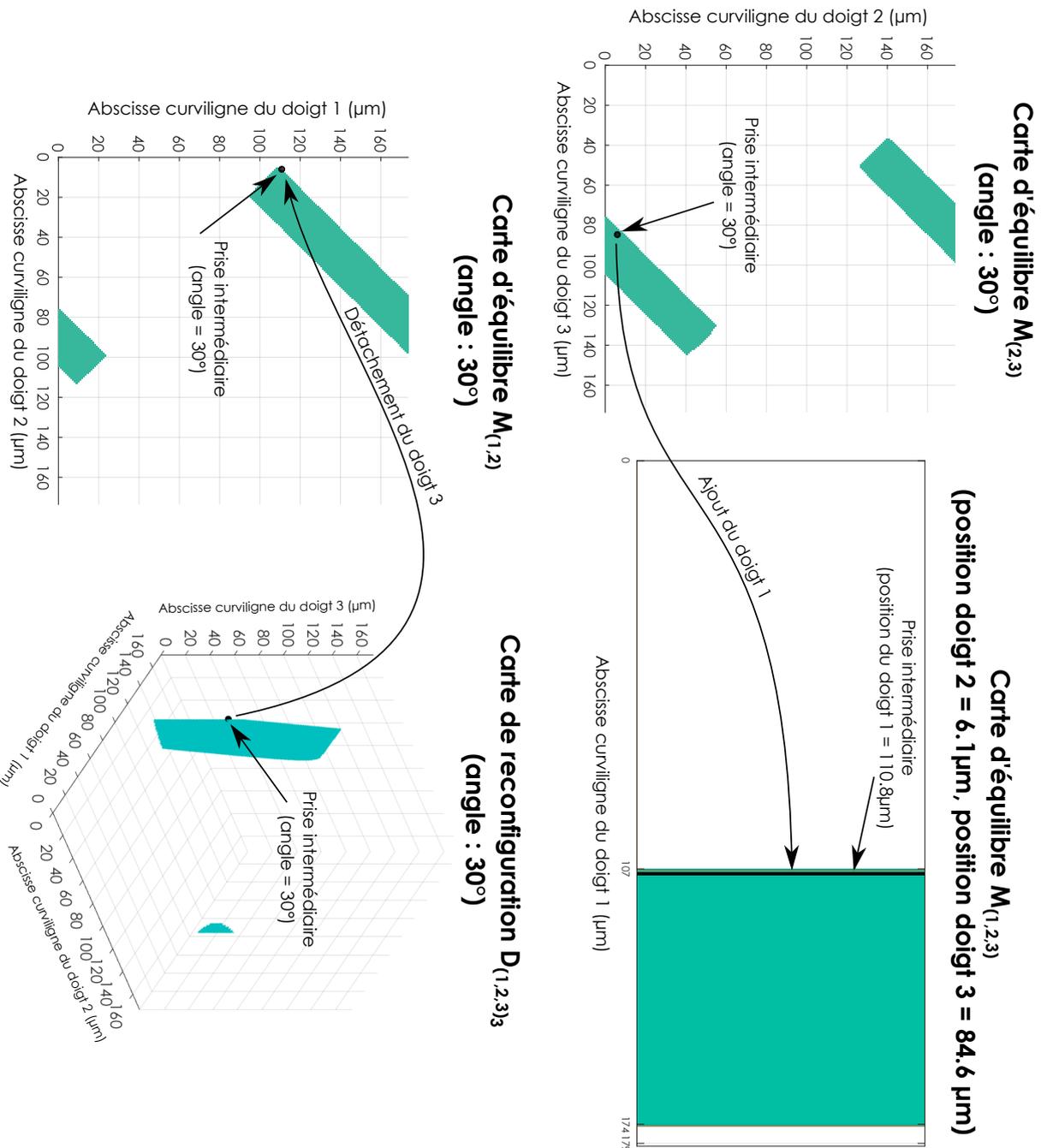


FIGURE D.12 – Représentation de la reconfiguration lors de la manipulation du cylindre dans l'espace de planification.

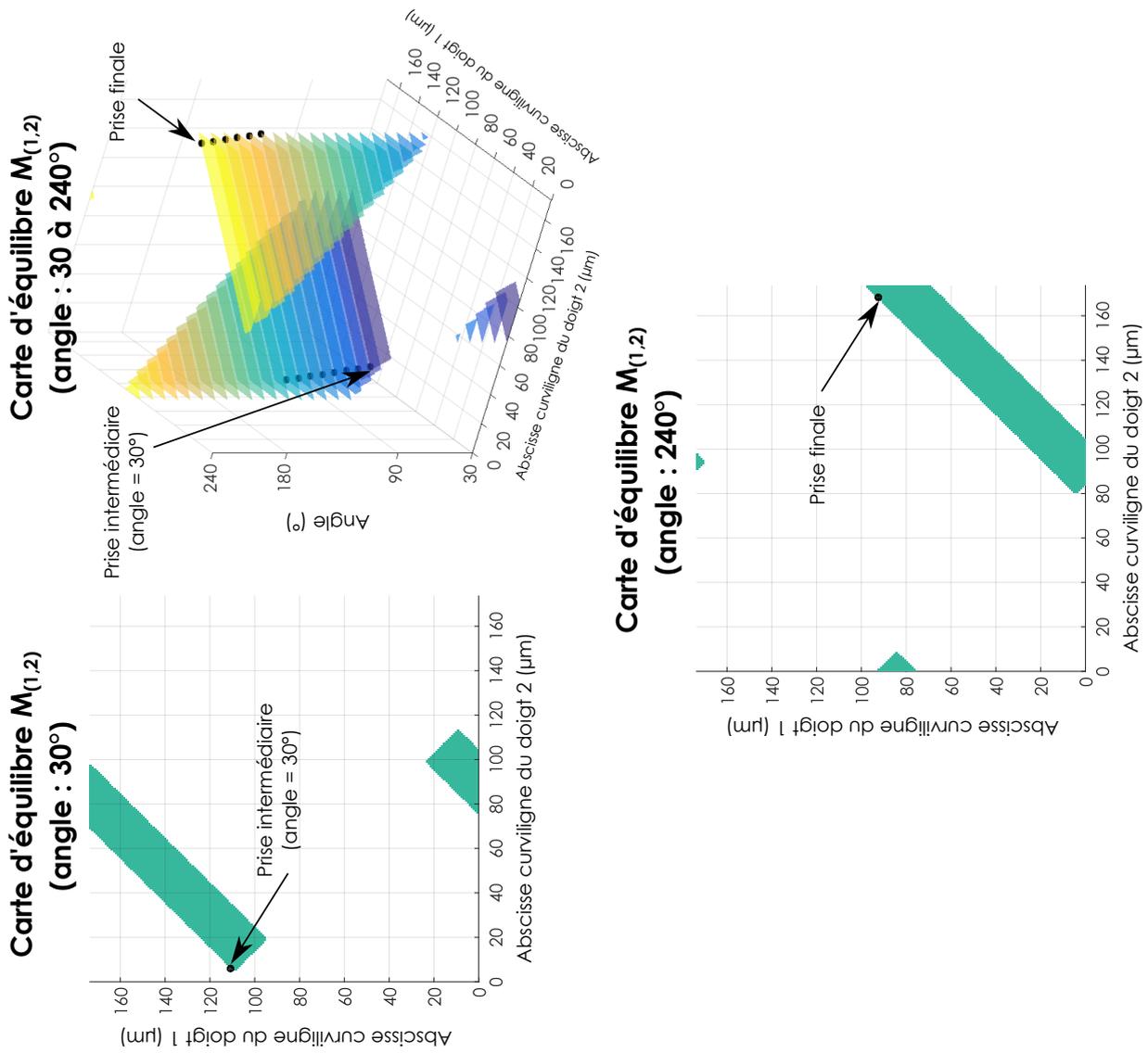


FIGURE D.13 – Représentation de la seconde rotation de 210° lors de la manipulation du cylindre dans l'espace de planification.

MANIPULATION D'UN OBJET DE FORME QUELCONQUE (200°)

La manipulation simulée dans cet exemple concerne un objet de forme quelconque. Plus précisément cet objet, visible sur la Fig. D.14, dispose des dimensions caractéristiques suivantes : 50 μm en hauteur et 60 μm en longueur. Les paramètres physiques de simulation sont les suivants :

- $f_{po,sup}$: la force d'adhésion entre l'objet et le support est de 0 μN ,
- f_{po} : la force d'adhésion entre les doigts et l'objet est de 5.5 μN .
- w_{ext} : les efforts extérieurs sont de 0 μN .
- μ : la friction entre les doigts et l'objet est de 0.3.
- r_d : le rayon des doigts est de 5 μm .

La Fig. D.14 illustre la manipulation de cet objet pour effectuer une rotation de 200°. Cette manipulation se décompose en deux rotations de 100° et d'une reconfiguration de prise. La reconfiguration permet de passer d'une prise utilisant les doigts 2 et 3 à une prise utilisant les doigts 1 et 3. Il est à noter que la prise finale obtenue après la seconde rotation constitue une configuration cul-de-sac.

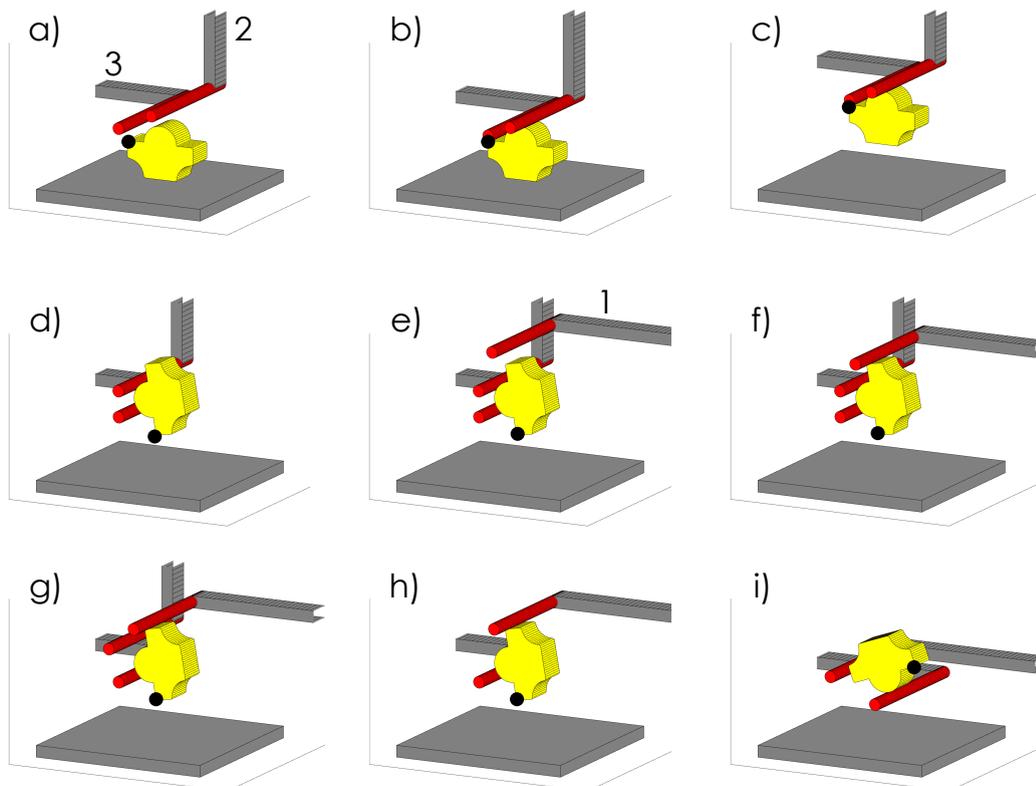


FIGURE D.14 – Séquence d'images illustrant la saisie et la rotation d'un objet de forme quelconque par trois doigts.

La Fig. D.15 permet de voir les déplacements des doigts pendant chaque étape de la manipulation. Sur cette figure, les configurations initiales sont représentées par des traits fins tandis que les configurations finales sont représentées par des traits épais. Le point noir présent sur l'objet représente l'origine de l'abscisse curviligne.

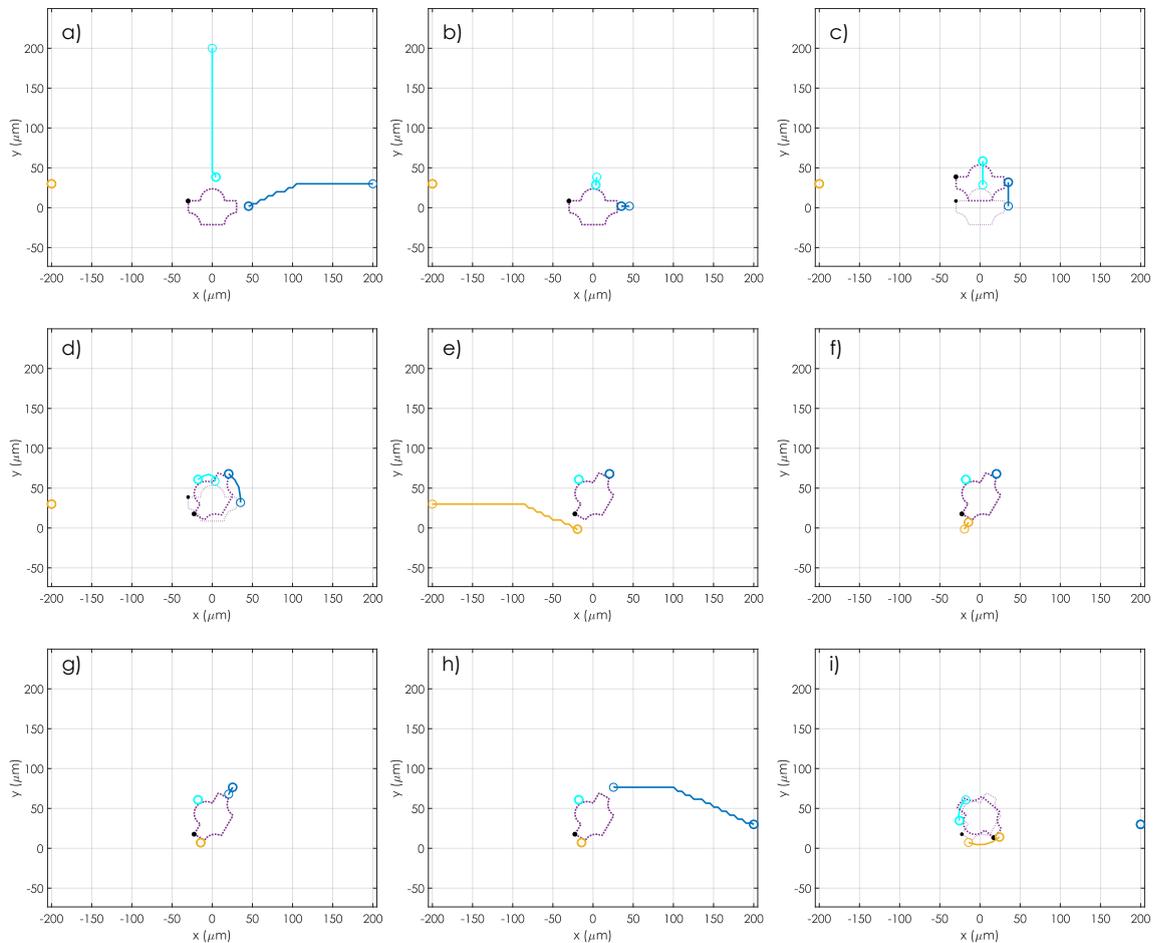
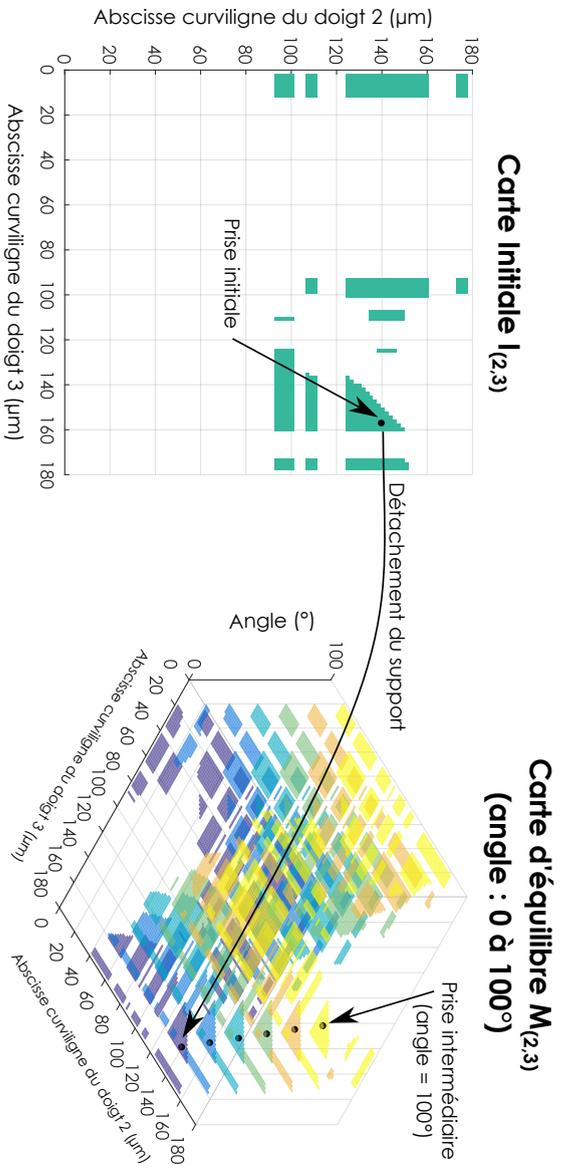


FIGURE D.15 – Séquence d’images représentant les trajectoires des doigts utilisées pour réaliser la manipulation illustrée sur la Fig. D.13.

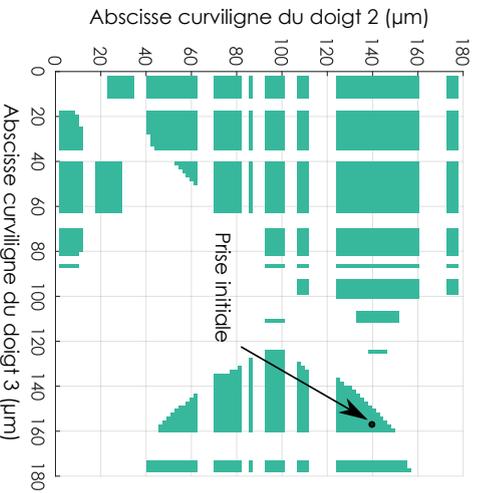
Du point de vue de l’espace des configurations cette manipulation se décompose en trois étapes. La première étape, illustrée sur la Fig. D.16 permet de saisir l’objet et d’effectuer la première rotation de 100° . La prise initiale, optimisée par l’algorithme afin de minimiser les déplacements des doigts, est sélectionnée dans la carte initiale $I_{(2,3)}$. De cette prise, la rotation de 100° s’effectue en parcourant une droite dans la carte $M_{(2,3)}$. Sur cette figure la positions de la prise initiale et de la prise intermédiaire sont visibles dans leur carte respective.

Ensuite, la reconfiguration permettant de passer d’une prise utilisant les doigts 2 et 3 à une prise utilisant les doigts 1 et 3 est réalisée. Cette opération est visible sur la Fig. D.17. Le doigt 1 est tout d’abord ajouté à la position curviligne de coordonnée $101,2\mu\text{m}$. Cette position est située aux limites de la carte d’équilibre $M_{(1,2,3)}$. Enfin le doigt 2 est retiré pour former la prise utilisant seulement les doigts 1 et 3. On remarque également que cette prise est située en limite de la carte d’équilibre $M_{(1,3)}$.

Finalement, la deuxième rotation est réalisée à partir de cette prise dans $M_{(1,3)}$. Cette rotation est illustrée sur la Fig. D.18. Comme précédemment, une droite est parcourue dans la carte $M_{(1,3)}$ pour obtenir le mouvement désiré. La configuration finale obtenue se situe, elle aussi, aux limites de la carte d’équilibre.



Carte d'équilibre $M_{(2,3)}$
(angle : 0°)



Carte d'équilibre $M_{(2,3)}$
(angle : 100°)

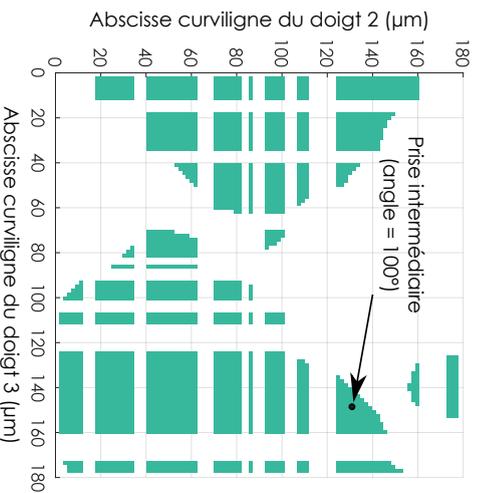


FIGURE D.16 – Représentation de la première rotation de 100° lors de la manipulation d'un objet de forme quelconque dans l'espace de planification.

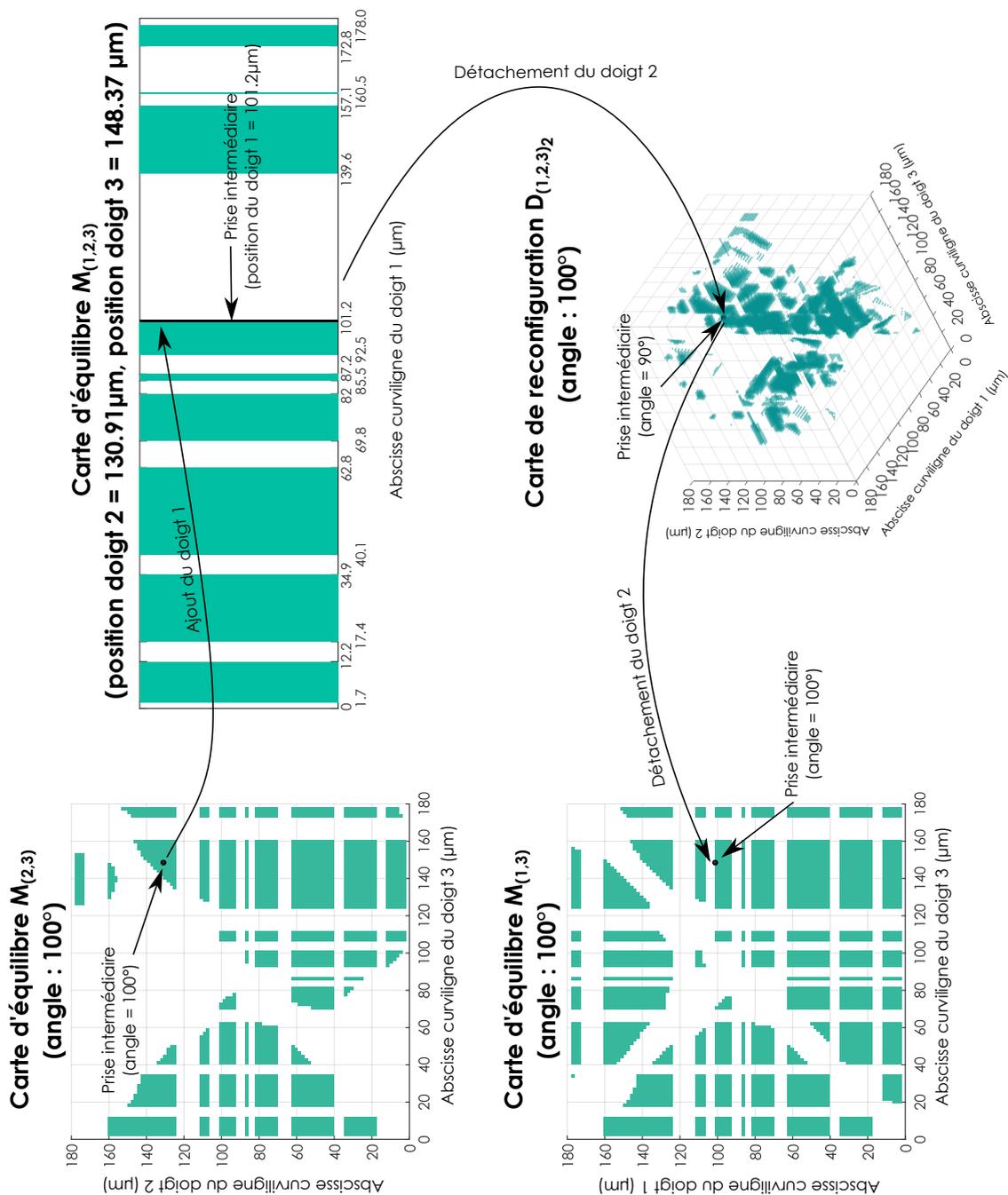


FIGURE D.17 – Représentation de la reconfiguration lors de la manipulation d'un objet de forme quelconque dans l'espace de planification.

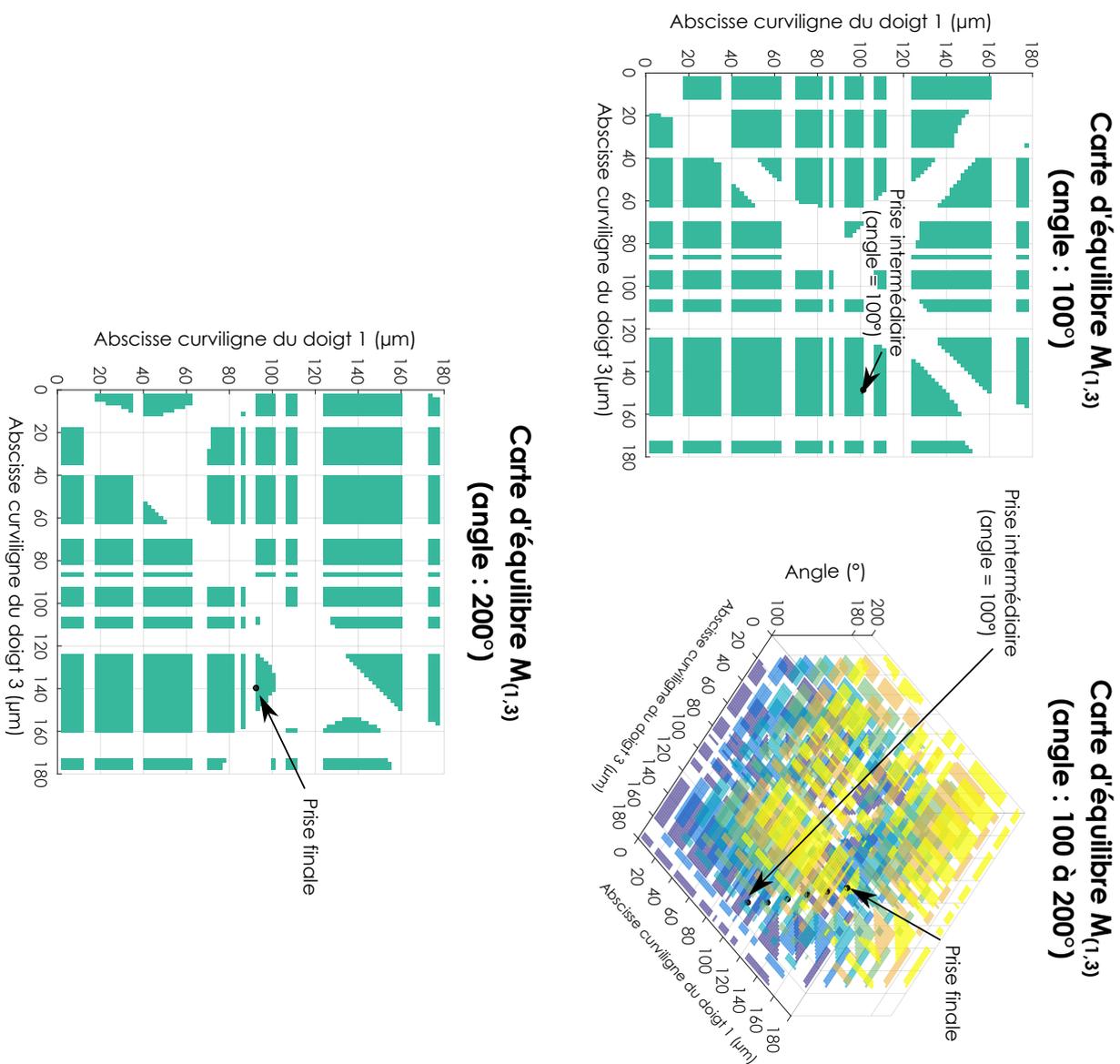


FIGURE D.18 – Représentation de la seconde rotation de 100° lors de la manipulation d'un objet de forme quelconque dans l'espace de planification.

BIBLIOGRAPHIE

- [Adamson et al., 1967] Adamson, A. W., et Gast, A. P. (1967). **Physical chemistry of surfaces**.
- [Agnus et al., 2003] Agnus, J., De Lit, P., Clévy, C., et Chaillet, N. (2003). **Description and performances of a four-degrees-of-freedom piezoelectric gripper**. Dans *International Symposium on Assembly and Task Planning*, pages 66–71. IEEE.
- [Andersen et al., 2008] Andersen, K. N., Carlson, K., Petersen, D. H., Mølhave, K., Eichhorn, V., Fatikow, S., et Bøggild, P. (2008). **Electrothermal microgrippers for pick-and-place operations**. *Microelectronic Engineering*, 85(5) :1128–1130.
- [Ando et al., 1997] Ando, Y., et Ino, J. (1997). **The effect of asperity array geometry on friction and pull-off force**. *Journal of Tribology*, 119 :781–787.
- [Arai et al., 1995] Arai, F., Ando, D., Fukuda, T., Nonoda, Y., et Oota, T. (1995). **Micro manipulation based on micro physics-strategy based on attractive force reduction and stress measurement**. Dans *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, volume 2, pages 236–241. IEEE.
- [Arai et al., 1997] Arai, F., et Fukuda, T. (1997). **A new pick up and release method by heating for micromanipulation**. Dans *International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, pages 383–388. IEEE.
- [Arai et al., 1996] Arai, F., Fukuda, T., Iwata, H., et Itoigawa, K. (1996). **Integrated micro endeffector for dexterous micromanipulation**. Dans *International Symposium Micro Machine and Human Science*, pages 149–156. IEEE.
- [Argall et al., 2009a] Argall, B. D., Chernova, S., Veloso, M., et Browning, B. (2009a). **A survey of robot learning from demonstration**. *Robotics and Autonomous Systems*, 57(5) :469–483.
- [Argall et al., 2009b] Argall, B. D., Chernova, S., Veloso, M., et Browning, B. (2009b). **A survey of robot learning from demonstration**. *Robotics and autonomous systems*, 57(5) :469–483.
- [Ashkin et al., 1986] Ashkin, A., Dziedzic, J., Bjorkholm, J., et Chu, S. (1986). **Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles**. *Optics letters*, 11(5) :288–290.
- [Bae et al., 2012] Bae, J.-H., Park, S.-W., Park, J.-H., Baeg, M.-H., Kim, D., et Oh, S.-R. (2012). **Development of a low cost anthropomorphic robot hand with high capability**. Dans *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 4776–4782. IEEE.
- [Banerjee et al., 2012] Banerjee, A. G., Chowdhury, S., Losert, W., et Gupta, S. K. (2012). **Real-time path planning for coordinated transport of multiple particles using optical tweezers**. *Transactions on Automation Science and Engineering*, 9(4) :669–678.
- [Banerjee et al., 2010] Banerjee, A. G., Pomerance, A., Losert, W., et Gupta, S. K. (2010). **Developing a stochastic dynamic programming framework for optical**

- tweezer-based automated particle transport operations.** *Transactions on Automation Science and Engineering*, 7(2) :218–227.
- [Bark et al., 1998] Bark, C., Binnenbose, T., Vogeles, G., Weisener, T., et Widmann, M. (1998). **Gripping with low viscosity fluids.** Dans *International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, pages 301–305. IEEE.
- [Benhimane et al., 2007] Benhimane, S., et Malis, E. (2007). **Homography-based 2d visual tracking and servoing.** *The International Journal of Robotics Research*, 26(7) :661–676.
- [Berliner, 1979] Berliner, H. (1979). **The b* tree search algorithm : A best-first proof procedure.** *Artificial Intelligence*, 12(1) :23–40.
- [Beyeler et al., 2007] Beyeler, F., Neild, A., Oberti, S., Bell, D. J., Sun, Y., Dual, J., et Nelson, B. J. (2007). **Monolithically fabricated microgripper with integrated force sensor for manipulating microobjects and biological cells aligned in an ultrasonic field.** *Journal of Microelectromechanical Systems*, 16(1) :7–15.
- [Bicchi, 1995] Bicchi, A. (1995). **On the closure properties of robotic grasping.** *The International Journal of Robotics Research*, 14(4) :319–334.
- [Bicchi, 2000] Bicchi, A. (2000). **Hands for dexterous manipulation and robust grasping : A difficult road toward simplicity.** *Transactions on Robotics and Automation*, 16(6) :652–662.
- [Bicchi et al., 2002] Bicchi, A., et Marigo, A. (2002). **Dexterous grippers : Putting non-holonomy to work for fine manipulation.** *The International Journal of Robotics Research*, 21(5-6) :427–442.
- [Bicchi et al., 1995] Bicchi, A., et Sorrentino, R. (1995). **Dexterous manipulation through rolling.** Dans *International Conference on Robotics and Automation*, volume 1, pages 452–457. IEEE.
- [Billot et al., 2015] Billot, M., Xu, X., Agnus, J., Piat, E., et Stempflié, P. (2015). **Multi-axis mems force sensor for measuring friction components involved in dexterous micromanipulation : design and optimisation.** *International Journal of Nanomanufacturing*, 11(3-4) :161–184.
- [Bohg et al., 2014] Bohg, J., Morales, A., Asfour, T., et Kragic, D. (2014). **Data-driven grasp synthesis—a survey.** *Transactions on Robotics*, 30(2) :289–309.
- [Borst et al., 2003] Borst, C., Fischer, M., et Hirzinger, G. (2003). **Grasping the dice by dicing the grasp.** Dans *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, volume 4, pages 3692–3697. IEEE.
- [Bouchebout et al., 2012] Bouchebout, S., Bolopion, A., Abrahamians, J.-O., et Régnier, S. (2012). **An overview of multiple dof magnetic actuated micro-robots.** *Journal of Micro-Nano Mechatronics*, 7(4) :97–113.
- [Boudaoud et al., 2013] Boudaoud, M., Haddab, Y., et Le Gorrec, Y. (2013). **Modeling and optimal force control of a nonlinear electrostatic microgripper.** *Transactions on mechatronics*, 18(3) :1130–1139.
- [Brock, 1988] Brock, D. L. (1988). **Enhancing the dexterity of a robot hand using controlled slip.** Dans *International Conference on Robotics and Automation*, pages 249–251. IEEE.
- [Bütefisch et al., 2002] Bütefisch, S., Seidemann, V., et Büttgenbach, S. (2002). **Novel micro-pneumatic actuator for mems.** *Sensors and Actuators : A. Physical*, 97 :638–645.

- [Cappelleri et al., 2011] Cappelleri, D. J., Fatovic, M., et Shah, U. (2011). **Caging micro-manipulation for automated microassembly**. Dans *International Conference on Robotics and Automation*, pages 3145–3150. IEEE.
- [Cappelleri et al., 2006] Cappelleri, D. J., Fink, J., Munkundakrisnam, B., Kumar, V., et Trinkle, J. C. (2006). **Designing open-loop plans for planar micro-manipulation**. Dans *International Conference on Robotics and Automation*, pages 637–642.
- [Carrozza et al., 2000] Carrozza, M. C., Eisinger, A., Menciassi, A., Campolo, D., Micera, S., et Dario, P. (2000). **Towards a force-controlled microgripper for assembling biomedical microdevices**. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 10(2) :271.
- [Chaigneau et al., 2008] Chaigneau, D., Arsicault, M., Gazeau, J.-P., et Zegloul, S. (2008). **Lms robotic hand grasp and manipulation planning (an isomorphic exoskeleton approach)**. *Robotica*, 26(02) :177–188.
- [Chen et al., 2009] Chen, B. K., Zhang, Y., Sun, Y., et others (2009). **Active release of microobjects using a mems microgripper to overcome adhesion forces**. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 18(3) :652–659.
- [Chen et al., 2012] Chen, T., Pan, M., Wang, Y., Liu, J., Chen, L., et Sun, L. (2012). **Manipulation of microobjects based on dynamic adhesion control**. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 9.
- [Cherif et al., 1998] Cherif, M., et Gupta, K. K. (1998). **3d in-hand manipulation planning**. Dans *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, volume 1, pages 146–151. IEEE.
- [Cherif et al., 2001] Cherif, M., et Gupta, K. K. (2001). **Global planning for dexterous reorientation of rigid objects : Finger tracking with rolling and sliding**. *The International Journal of Robotics Research*, 20(1) :57–84.
- [Chowdhury et al., 2012] Chowdhury, S., Thakur, A., Wang, C., Svec, P., Losert, W., et Gupta, S. K. (2012). **Automated indirect transport of biological cells with optical tweezers using planar gripper formations**. Dans *International Conference on Automation Science and Engineering*, pages 267–272. IEEE.
- [Chu et al., 2012] Chu, H. K., Mills, J. K., et Cleghorn, W. L. (2012). **Dual-arm micro-manipulation and handling of objects through visual images**. Dans *International Conference on Mechatronics and Automation*, pages 813–818. IEEE.
- [Controzzi et al., 2014] Controzzi, M., Cipriani, C., et Carrozza, M. C. (2014). **Design of artificial hands : A review**. Dans *The Human Hand as an Inspiration for Robot Hand Development*, pages 219–246. Springer.
- [Corney et al., 2005] Corney, J., Lambert, P., et Delchambre, A. (2005). **A study of capillary forces as a gripping principle**. *Assembly automation*, 25(4) :275–283.
- [Cot et al., 2013] Cot, A., Dejeu, J., Lakard, S., Rougeot, P., et Gauthier, M. (2013). **Modeling of electrostatic forces induced by chemical surface functionalisation for microrobotics applications**. Dans *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2065–2070. IEEE.
- [Curtis et al., 2002] Curtis, J. E., Koss, B. A., et Grier, D. G. (2002). **Dynamic holographic optical tweezers**. *Optics Communications*, 207(1) :169–175.
- [Dang et al., 2012] Dang, H., et Allen, P. K. (2012). **Semantic grasping : Planning robotic grasps functionally suitable for an object manipulation task**. Dans *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1311–1317. IEEE.

- [Danuser et al., 1997] Danuser, G., Pappas, I., Vögeli, B., Zesch, W., et Dual, J. (1997). **Manipulation of microscopic objects with nanometer precision : Potentials and limitations in nano-robot design**. *International Journal of Robotics Research*.
- [Daoud et al., 2012] Daoud, N., Gazeau, J.-P., Zeghloul, S., et Arsicault, M. (2012). **A real-time strategy for dexterous manipulation : Fingertips motion planning, force sensing and grasp stability**. *Robotics and Autonomous Systems*, 60(3) :377–386.
- [Das et al., 2010] Das, A. N., et Popa, D. O. (2010). **Precision-based robot path planning for microassembly**. Dans *International Conference on Automation Science and Engineering*, pages 527–532. IEEE.
- [Dawood et al., 2012] Dawood, F., Qin, S., Li, L., Lin, E. Y., et Fourkas, J. T. (2012). **Simultaneous microscale optical manipulation, fabrication and immobilisation in aqueous media**. *Chemical Science*, 3(8) :2449–2456.
- [Dechter et al., 1985] Dechter, R., et Pearl, J. (1985). **Generalized best-first search strategies and the optimality of a**. *Journal of the ACM*, 32(3) :505–536.
- [Deimel et al., 2015] Deimel, R., et Brock, O. (2015). **A novel type of compliant and underactuated robotic hand for dexterous grasping**. *The International Journal of Robotics Research*.
- [Dkhil et al., 2015] Dkhil, M., Kharboutly, M., Bolopion, A., Régnier, S., et Gauthier, M. (2015). **Closed loop control of a magnetic particle at the air/liquid interface**. *Transactions on Automation Science and Engineering*, pages 1–13.
- [Dollar et al., 2010] Dollar, A. M., et Howe, R. D. (2010). **The highly adaptive sdm hand : Design and performance evaluation**. *The International Journal of Robotics Research*, 29(5) :585–597.
- [Duc et al., 2007] Duc, T. C., Lau, G., et Sarro, P. (2007). **Polymer constraint effect for electrothermal bimorph microactuators**. *Applied Physics Letters*, 91(10).
- [Ekvall et al., 2007] Ekvall, S., et Kragic, D. (2007). **Learning and evaluation of the approach vector for automatic grasp generation and planning**. Dans *International Conference on Robotics and Automation*, pages 4715–4720. IEEE.
- [El-Khoury et al., 2008] El-Khoury, S., et Sahbani, A. (2008). **Handling objects by their handles**. Dans *International Conference on Intelligent Robots and Systems*.
- [El-Khoury et al., 2009] El-Khoury, S., et Sahbani, A. (2009). **On computing robust n-finger force-closure grasps of 3d objects**. Dans *International Conference on Robotics and Automation*, pages 2480–2486. IEEE.
- [Enikov et al., 2005] Enikov, E. T., Minkov, L. L., et Clark, S. (2005). **Microassembly experiments with transparent electrostatic gripper under optical and vision-based control**. *Transactions on Industrial Electronics*, 52(4) :1005–1012.
- [Fearing, 1986] Fearing, R. (1986). **Simplified grasping and manipulation with dextrous robot hands**. *Journal on Robotics and Automation*, 2(4) :188–195.
- [Fearing, 1995] Fearing, R. S. (1995). **Survey of sticking effects for micro parts handling**. Dans *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, volume 2, pages 212–217. IEEE.
- [Feddema et al., 2001] Feddema, J. T., Xavier, P., et Brown, R. (2001). **Micro-assembly planning with van der waals force**. *Journal of Micromechatronics*, 1(2) :139–153.

- [Frenea et al., 2003] Frenea, M., Faure, S., Le Pioufle, B., Coquet, P., et Fujita, H. (2003). **Positioning living cells on a high-density electrode array by negative dielectrophoresis**. *Materials Science and Engineering*, 23(5) :597–603.
- [Gaiser et al., 2008] Gaiser, I., Schulz, S., Kargov, A., Klosek, H., Bierbaum, A., Pylatiuk, C., Oberle, R., Werner, T., Asfour, T., Bretthauer, G., et others (2008). **A new anthropomorphic robotic hand**. Dans *International Conference on Humanoid Robots*, pages 418–422. IEEE.
- [Geim et al., 2003] Geim, A. K., Dubonos, S., Grigorieva, I., Novoselov, K., Zhukov, A., et Shapoval, S. Y. (2003). **Microfabricated adhesive mimicking gecko foot-hair**. *Nature materials*, 2(7) :461–463.
- [Giannaccini et al., 2014] Giannaccini, M. E., Georgilas, I., Horsfield, I., Peiris, B., Lenz, A., Pipe, A. G., et Dogramadzi, S. (2014). **A variable compliance, soft gripper**. *Autonomous Robots*, 36(1-2) :93–107.
- [Gosse et al., 2002] Gosse, C., et Croquette, V. (2002). **Magnetic tweezers : micro-manipulation and force measurement at the molecular level**. *Biophysical journal*, 82(6) :3314–3329.
- [Gottschalk et al., 1996] Gottschalk, S., Lin, M. C., et Manocha, D. (1996). **Obbtree : A hierarchical structure for rapid interference detection**. Dans *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 171–180. ACM.
- [Grier, 2003] Grier, D. G. (2003). **A revolution in optical manipulation**. *Nature*, 424(6950) :810–816.
- [Guelpa et al., 2015] Guelpa, V., Laurent, G. J., Sandoz, P., et Clévy, C. (2015). **Vision-based microforce measurement with a large range-to-resolution ratio using a twin-scale pattern**. *Transactions on Mechatronics*, 20(6) :3148–3156.
- [Guoliang et al., 2004] Guoliang, C., et Xinhan, H. (2004). **Research on vacuum micro-gripper of intelligent micromanipulation robots**. Dans *International Conference on Robotics and Biomimetics*, pages 279–283. IEEE.
- [Haddab et al., 2000] Haddab, Y., Chaillet, N., et Bourjault, A. (2000). **A microgripper using smart piezoelectric actuators**. Dans *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, volume 1, pages 659–664. IEEE.
- [Haliyo et al., 2003] Haliyo, D., et Régnier, S. (2003). **Advanced applications using [mu]mad, the adhesion based dynamic micro-manipulator**. Dans *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, volume 2, pages 880–885. IEEE.
- [Hamaker, 1937] Hamaker, H. (1937). **The london—van der waals attraction between spherical particles**. *physica*, 4(10) :1058–1072.
- [Han et al., 1997] Han, L., Guan, Y.-S., Li, Z., Shi, Q., et Trinkle, J. C. (1997). **Dextrous manipulation with rolling contacts**. Dans *International Conference on Robotics and Automation*, volume 2, pages 992–997. IEEE.
- [Han et al., 2000] Han, L., Li, Z., Trinkle, J. C., Qin, Z., et Jiang, S. (2000). **The planning and control of robot dextrous manipulation**. Dans *International Conference on Robotics and Automation*, volume 1, pages 263–269. IEEE.
- [Han et al., 1998] Han, L., et Trinkle, J. C. (1998). **Dextrous manipulation by rolling and finger gaiting**. Dans *International Conference on Robotics and Automation*, volume 1, pages 730–735. IEEE.

- [Hériban et al., 2008] Hériban, D., et Gauthier, M. (2008). **Robotic micro-assembly of microparts using a piezogripper**. Dans *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 4042–4047. IEEE.
- [Hesselbach et al., 2001] Hesselbach, J., Buettgenbach, S., Wrege, J., Bueteftisch, S., et Graf, C. (2001). **Centering electrostatic microgripper and magazines for microassembly tasks**. Dans *Intelligent Systems and Advanced Manufacturing*, pages 270–277. International Society for Optics and Photonics.
- [Huber et al., 2005] Huber, G., Mantz, H., Spolenak, R., Mecke, K., Jacobs, K., Gorb, S. N., et Arzt, E. (2005). **Evidence for capillarity contributions to gecko adhesion from single spatula nanomechanical measurements**. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(45) :16293–16296.
- [Hwang et al., 1992] Hwang, Y. K., et Ahuja, N. (1992). **A potential field approach to path planning**. *Transactions on Robotics and Automation*, 8(1) :23–32.
- [Inoue et al., 2012] Inoue, K., Matsuzaki, Y., et Lee, S. (2012). **Micromanipulation using micro hand with two rotational fingers**. *Journal of Micro-Nano Mechatronics*, 7(1-3) :33–44.
- [Israelachvili, 2011] Israelachvili, J. N. (2011). **Intermolecular and surface forces : revised third edition**. Academic press.
- [Ivan et al., 2013] Ivan, I. A., Hwang, G., Agnus, J., Chaillet, N., et Régnier, S. (2013). **Nist and ieee challenge for magpie : The fastest mobile microrobots in the world**. *Robotics & Automation Magazine*, 20(2) :63–70.
- [Jacobsen et al., 1986] Jacobsen, S., Iversen, E., Knutti, D., Johnson, R., et Biggers, K. (1986). **Design of the utah/mit dextrous hand**. Dans *International Conference on Robotics and Automation. Proceedings*, volume 3, pages 1520–1532. IEEE.
- [Ju et al., 2011] Ju, T., Liu, S., Yang, J., et Sun, D. (2011). **Apply rrt-based path planning to robotic manipulation of biological cells with optical tweezer**. Dans *International Conference on Mechatronics and Automation*, pages 221–226. IEEE.
- [Kambhampati et al., 1985] Kambhampati, S., et Davis, L. S. (1985). **Multiresolution path planning for mobile robots**. Rapport technique, DTIC Document.
- [Kemp et al., 2013] Kemp, B., et Whitney, J. (2013). **Electrostatic adhesion of multiple non-uniformly charged dielectric particles**. *Journal of Applied Physics*, 113(4).
- [Kharboutly et al., 2009] Kharboutly, M., Gauthier, M., et Chaillet, N. (2009). **Modeling the trajectory of a microparticle in a dielectrophoresis device**. *Journal of Applied Physics*, 106(11).
- [Kim et al., 2001] Kim, B.-H., Oh, S.-R., Yi, B.-J., et Suh, I. H. (2001). **Optimal grasping based on non-dimensionalized performance indices**. Dans *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, volume 2, pages 949–956. IEEE.
- [Kochan, 1997] Kochan, A. (1997). **European project develops “ice” gripper for micro-sized components**. *Assembly Automation*, 17(2) :114–115.
- [Kochan, 2005] Kochan, A. (2005). **Shadow delivers first hand**. *Industrial Robot : An International Journal*, 32(1) :15–16.
- [Koganezawa et al., 2016] Koganezawa, K., et Ito, A. (2016). **Artificial hand with stiffness adjuster**. Dans *Intelligent Autonomous Systems*, pages 1079–1093. Springer.

- [Komati, 2014] Komati, B. (2014). **Automated Microassembly Using an Active Micro-gripper with Sensorized End-Effectors and Hybrid Force/Position Control**. PhD thesis, Université de Franche-Comté.
- [Komati et al., 2014] Komati, B., Clévy, C., et Lutz, P. (2014). **Force tracking impedance control with unknown environment at the microscale**. Dans *International Conference on Robotics and Automation*, pages 5203–5208. IEEE.
- [Kondo et al., 2005] Kondo, T., Juodkazis, S., et Misawa, H. (2005). **Reduction of capillary force for high-aspect ratio nanofabrication**. *Applied Physics*, 81(8) :1583–1586.
- [Kroemer et al., 2010] Kroemer, O., Detry, R., Piater, J., et Peters, J. (2010). **Combining active learning and reactive control for robot grasping**. *Robotics and Autonomous Systems*, 58(9) :1105–1116.
- [Kruskal, 1956] Kruskal, J. B. (1956). **On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem**. *Proceedings of the American Mathematical society*, 7(1) :48–50.
- [Lai et al., 2008] Lai, X., Peng, L., Hu, P., Lan, S., et Ni, J. (2008). **Material behavior modelling in micro/meso-scale forming process with considering size/scale effects**. *Computational Materials Science*, 43(4) :1003–1009.
- [Lambert et al., 2003] Lambert, P., Letier, P., et Delchambre, A. (2003). **Capillary and surface tension forces in the manipulation of small parts**. Dans *International Symposium on Assembly and Task Planning*, pages 54–59. IEEE.
- [Lang et al., 2005] Lang, D., Kurniawan, I., Tichem, M., et Karpuschewski, B. (2005). **First investigations on force mechanisms in liquid solidification micro-gripping**. Dans *International Symposium on Assembly and Task Planning*, pages 92–97. IEEE.
- [Latombe, 2012] Latombe, J.-C. (2012). **Robot motion planning**, volume 124. Springer Science & Business Media.
- [Leveroni, 1997] Leveroni, S. R. (1997). **Grasp gaits for planar object manipulation**. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- [Li et al., 2013] Li, G., Tamura, Y., Yamashita, A., et Asama, H. (2013). **Effective improved artificial potential field-based regression search method for autonomous mobile robot path planning**. *International Journal of Mechatronics and Automation*, 3(3) :141–170.
- [Li et al., 2003] Li, J.-W., Liu, H., et Cai, H.-G. (2003). **On computing three-finger force-closure grasps of 2-d and 3-d objects**. *Transactions on Robotics and Automation*, 19(1) :155–161.
- [Li et al., 2005] Li, Y., et Pollard, N. S. (2005). **A shape matching algorithm for synthesizing humanlike enveloping grasps**. Dans *International Conference on Humanoid Robots*, pages 442–449. IEEE.
- [Li et al., 1989] Li, Z., Canny, J. F., et Sastry, S. S. (1989). **On motion planning for dexterous manipulation. i. the problem formulation**. Dans *International Conference on Robotics and Automation*, pages 775–780. IEEE.
- [Lifshitz, 1956] Lifshitz, E. (1956). **The theory of molecular attractive forces between solids**.
- [Lippiello et al., 2013] Lippiello, V., Ruggiero, F., Siciliano, B., et Villani, L. (2013). **Visual grasp planning for unknown objects using a multifingered robotic hand**. *Transactions on Mechatronics*, 18(3) :1050–1059.

- [Liu et al., 2011] Liu, X., Fernandes, R., Gertsenstein, M., Perumalsamy, A., Lai, I., Chi, M., Moley, K. H., Greenblatt, E., Jurisica, I., Casper, R. F., et others (2011). **Automated microinjection of recombinant bcl-x into mouse zygotes enhances embryo development.** *PloS one*, 6(7).
- [Liu et al., 2009] Liu, X., Kim, K., Zhang, Y., et Sun, Y. (2009). **Nanonewton force sensing and control in microrobotic cell manipulation.** *The International Journal of Robotics Research*.
- [Liu, 1999] Liu, Y.-H. (1999). **Qualitative test and force optimization of 3-d frictional form-closure grasps using linear programming.** *Transactions on Robotics and Automation*, 15(1) :163–173.
- [London, 1937] London, F. (1937). **The general theory of molecular forces.** *Trans. Faraday Soc.*, 33 :8b–26.
- [López-Walle et al., 2008] López-Walle, B., Gauthier, M., et Chaillet, N. (2008). **Principle of a submerged freeze gripper for microassembly.** *Transactions on Robotics*, 24(4) :897–902.
- [Loskill et al., 2012] Loskill, P., Hähl, H., Faidt, T., Grandthyll, S., Müller, F., et Jacobs, K. (2012). **Is adhesion superficial? silicon wafers as a model system to study van der waals interactions.** *Advances in colloid and interface science*, 179 :107–113.
- [Lovchik et al., 1999] Lovchik, C., et Diftler, M. A. (1999). **The robonaut hand : A dexterous robot hand for space.** Dans *International Conference on Robotics and Automation*, volume 2, pages 907–912. IEEE.
- [Ma et al., 2011] Ma, R. R., et Dollar, A. M. (2011). **On dexterity and dexterous manipulation.** Dans *International Conference on Advanced Robotics*, pages 1–7. IEEE.
- [Makaliwe et al., 2001] Makaliwe, J., et Requicha, A. (2001). **Automatic planning of nanoparticle assembly tasks.** Dans *International Symposium on Assembly and Task Planning*, pages 288–293. IEEE.
- [Malagnino et al., 2002] Malagnino, N., Pesce, G., Sasso, A., et Arimondo, E. (2002). **Measurements of trapping efficiency and stiffness in optical tweezers.** *Optics Communications*, 214(1) :15–24.
- [Malima et al., 2007] Malima, A. K., et Şabanoviç, A. (2007). **Motion planning and assembly for microassembly workstation.**
- [Marchand et al., 2005] Marchand, É., Spindler, F., et Chaumette, F. (2005). **Visp for visual servoing : a generic software platform with a wide class of robot control skills.** *Robotics & Automation Magazine*, 12(4) :40–52.
- [Markus, 2012] Markus, G. (2012). **Approaching human performance : The functionality driven Awiwi robot hand.** PhD thesis, ETH Zurich.
- [Martel et al., 2009] Martel, S., André, W., Mohammadi, M., Lu, Z., et Felfoul, O. (2009). **Towards swarms of communication-enabled and intelligent sensotaxis-based bacterial microrobots capable of collective tasks in an aqueous medium.** Dans *International Conference on Robotics and Automation*, pages 2617–2622. IEEE.
- [Mayyas et al., 2007] Mayyas, M., Zhang, P., Lee, W. H., Shiakolas, P., et Popa, D. (2007). **Design tradeoffs for electrothermal microgrippers.** Dans *International Conference on Robotics and Automation*, pages 907–912. IEEE.
- [Menciassi et al., 2003] Menciassi, A., Eisinger, A., Carrozza, M. C., et Dario, P. (2003). **Force sensing microinstrument for measuring tissue properties and pulse in microsurgery.** *Transactions on Mechatronics*, 8(1) :10–17.

- [Mita et al., 2003] Mita, M., Kawara, H., Toshiyoshi, H., Ataka, M., et Fujita, H. (2003). **An electrostatic 2-dimensional micro-gripper for nano structure**. Dans *Transducers*, volume 3, pages 272–275.
- [Mitra et al., 2012] Mitra, D., Ghoshal, S., Rahaman, H., Chakrabarty, K., et Bhattacharya, B. B. (2012). **Automated path planning for washing in digital microfluidic biochips**. Dans *International Conference on Automation Science and Engineering*, pages 115–120. IEEE.
- [Miyazaki et al., 2000] Miyazaki, H. T., Tomizawa, Y., Saito, S., Sato, T., et Shinya, N. (2000). **Adhesion of micrometer-sized polymer particles under a scanning electron microscope**. *Journal of Applied Physics*, 88(6) :3330–3340.
- [Mnyusiwalla et al., 2016] Mnyusiwalla, H., Vulliez, P., Gazeau, J.-P., et Zeghloul, S. (2016). **A new dexterous hand based on bio-inspired finger design for inside-hand manipulation**. *Transactions on Systems, Man, and Cybernetics : Systems*, 46(6) :809–817.
- [Moll et al., 2002] Moll, M., Goldberg, K., Erdmann, M. A., et Fearing, R. (2002). **Aligning parts for micro assemblies**. *Assembly automation*, 22(1) :46–54.
- [Nikolic-Jaric et al., 2013] Nikolic-Jaric, M., Cabel, T., Salimi, E., Bhide, A., Braasch, K., Butler, M., Bridges, G. E., et Thomson, D. J. (2013). **Differential electronic detector to monitor apoptosis using dielectrophoresis-induced translation of flowing cells (dielectrophoresis cytometry)**. *Biomicrofluidics*, 7(2).
- [Obata et al., 2003] Obata, K. J., Saito, S., et Takahashi, K. (2003). **A scheme of micro-manipulation using a liquid bridge**. Dans *MRS Proceedings*, volume 782, pages A3–6. Cambridge Univ Press.
- [Odhner et al., 2011] Odhner, L. U., et Dollar, A. M. (2011). **Dexterous manipulation with underactuated elastic hands**. Dans *International Conference on Robotics and Automation*, pages 5254–5260. IEEE.
- [Odhner et al., 2014] Odhner, L. U., Jentoft, L. P., Claffee, M. R., Corson, N., Tenzer, Y., Ma, R. R., Buehler, M., Kohout, R., Howe, R. D., et Dollar, A. M. (2014). **A compliant, underactuated hand for robust manipulation**. *The International Journal of Robotics Research*, 33(5) :736–752.
- [Okamura et al., 2000] Okamura, A. M., Smaby, N., et Cutkosky, M. R. (2000). **An overview of dexterous manipulation**. Dans *International Conference on Robotics and Automation*, volume 1, pages 255–262. IEEE.
- [Ouyang et al., 2007] Ouyang, P., Zhang, W., Gupta, M. M., et Zhao, W. (2007). **Overview of the development of a visual based automated bio-micromanipulation system**. *Mechatronics*, 17(10) :578–588.
- [Park et al., 1992] Park, Y. C., et Starr, G. P. (1992). **Grasp synthesis of polygonal objects using a three-fingered robot hand**. *The International journal of robotics research*, 11(3) :163–184.
- [Pawashe et al., 2006] Pawashe, C., et Sitti, M. (2006). **Two-dimensional vision-based autonomous microparticle manipulation using a nanoprobe**. *Journal of Micromechatronics*, 3(3) :285–306.
- [Petrovic et al., 2002] Petrovic, D., Popovic, G., Chatzitheodoridis, E., Del Medico, O., Almansa, A., Sumecz, F., Brenner, W., et Detter, H. (2002). **Gripping tools for handling and assembly of microcomponents**. Dans *International Conference on Microelectronics*, volume 1, pages 247–250. IEEE.

- [Ponce et al., 1995] Ponce, J., et Faverjon, B. (1995). **On computing three-finger force-closure grasps of polygonal objects**. *Transactions on Robotics and Automation*, 11(6) :868–881.
- [Prim, 1957] Prim, R. C. (1957). **Shortest connection networks and some generalizations**. *Bell system technical journal*, 36(6) :1389–1401.
- [Rabenoroso et al., 2009] Rabenoroso, K., Clévy, C., Lutz, P., Das, A. N., Murthy, R., et Popa, D. (2009). **Precise motion control of a piezoelectric microgripper for microspectrometer assembly**. Dans *ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, pages 769–776. American Society of Mechanical Engineers.
- [Rakotondrabe et al., 2011] Rakotondrabe, M., et Ivan, I. A. (2011). **Development and force/position control of a new hybrid thermo-piezoelectric microgripper dedicated to micromanipulation tasks**. *Transactions on Automation Science and Engineering*, 8(4) :824–834.
- [Reddy et al., 2010] Reddy, A. N., Maheshwari, N., Sahu, D. K., et Ananthasuresh, G. (2010). **Miniature compliant grippers with vision-based force sensing**. *Transactions on Robotics*, 26(5) :867–877.
- [Régnier et al., 2008] Régnier, S., et Chaillet, N. (2008). **La Microrobotique. Applications à la Micromanipulation**. Lavoisier.
- [Reinhart et al., 2000] Reinhart, G., et Hoepfner, J. (2000). **Non-contact handling using high-intensity ultrasonics**. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 49(1) :5–8.
- [Roa et al., 2015] Roa, M. A., et Suárez, R. (2015). **Grasp quality measures : review and performance**. *Autonomous robots*, 38(1) :65–88.
- [Rollot et al., 2001] Rollot, Y., Regnier, S., et Guinot, J.-C. (2001). **Dynamical model for the micro-manipulation by adhesion : experimental validations for determined conditions**. *Journal of micromechatronics*, 1(4) :273–297.
- [Romero et al., 2009] Romero, J., Kjellstrom, H., et Kragic, D. (2009). **Modeling and evaluation of human-to-robot mapping of grasps**. Dans *International Conference on Advanced Robotics*, pages 1–6. IEEE.
- [Ru et al., 2007] Ru, C., Wan, X., Ye, X., et Guo, S. (2007). **A new ice gripper based on thermoelectric effect for manipulating micro objects**. Dans *International Conference on Nanotechnology*, pages 438–441. IEEE.
- [Rus, 1992] Rus, D. (1992). **Dexterous rotations of polyhedra**. Dans *International Conference on Robotics and Automation*, pages 2758–2763. IEEE.
- [Sahbani et al., 2012] Sahbani, A., El-Khoury, S., et Bidaud, P. (2012). **An overview of 3d object grasp synthesis algorithms**. *Robotics and Autonomous Systems*, 60(3) :326–336.
- [Saito et al., 2002] Saito, S., Miyazaki, H. T., Sato, T., et Takahashi, K. (2002). **Kinematics of mechanical and adhesional micromanipulation under a scanning electron microscope**. *Journal of applied physics*, 92(9) :5140–5149.
- [Sariola et al., 2011] Sariola, V., Liimatainen, V., Tolonen, T., Udd, R., et Zhou, Q. (2011). **Silicon capillary gripper with self-alignment capability**. Dans *International Conference on Robotics and Automation*, pages 4098–4103. IEEE.
- [Sariola et al., 2009] Sariola, V., Zhou, Q., et Koivo, H. N. (2009). **Three dimensional hybrid microassembly combining robotic microhandling and self-assembly**. Dans *International Conference on Robotics and Automation*, pages 2605–2610. IEEE.

- [Saut et al., 2007] Saut, J.-P., Sahbani, A., El-Khoury, S., et Perdereau, V. (2007). **Dexterous manipulation planning using probabilistic roadmaps in continuous grasp subspaces**. Dans *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2907–2912. IEEE.
- [Saut et al., 2006] Saut, J.-P., Sahbani, A., et Perdereau, V. (2006). **A global approach for dexterous manipulation planning using paths in n-fingers grasp subspace**. Dans *International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, pages 1–6. IEEE.
- [Saxena et al., 2008] Saxena, A., Driemeyer, J., et Ng, A. Y. (2008). **Robotic grasping of novel objects using vision**. *The International Journal of Robotics Research*, 27(2) :157–173.
- [Schädle et al., 2013] Schädle, S., et Ertel, W. (2013). **Dexterous manipulation using hierarchical reinforcement learning**. Dans *International Conference on Robotics and Automation*, pages 1–5.
- [Schein, 2007] Schein, L. (2007). **Recent progress and continuing puzzles in electrostatics**. *Science*, 316(5831) :1572–1573.
- [Schlick et al., 2001] Schlick, J., et Zuehlke, D. (2001). **Design and application of a gripper for microparts using flexure hinges and pneumatic actuation**. Dans *Intelligent Systems and Advanced Manufacturing*, pages 1–11. International Society for Optics and Photonics.
- [Shameli et al., 2008] Shameli, E., Khamesee, M. B., et Huissoon, J. P. (2008). **Real-time control of a magnetic levitation device based on instantaneous modeling of magnetic field**. *Mechatronics*, 18(10) :536–544.
- [Shen et al., 2004] Shen, Y., Xi, N., Wejinya, U. C., et Li, W. J. (2004). **High sensitivity 2-d force sensor for assembly of surface mems devices**. Dans *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, volume 4, pages 3363–3368. IEEE.
- [Shi et al., 2015] Shi, J., Woodruff, J. Z., et Lynch, K. M. (2015). **Dynamic in-hand sliding manipulation**. Dans *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 870–877. IEEE.
- [Shimada et al.,] Shimada, E., Thompson, J., Yan, J., Wood, R., et Fearing, R. **Prototyping millirobots using dextrous microassembly and folding**.
- [Sniedovich, 2006] Sniedovich, M. (2006). **Dijkstra's algorithm revisited : the dynamic programming connexion**. *Control and cybernetics*, 35(3).
- [Stentz, 1994] Stentz, A. (1994). **Optimal and efficient path planning for partially-known environments**. Dans *International Conference on Robotics and Automation*, pages 3310–317. IEEE.
- [Stulp et al., 2011] Stulp, F., Theodorou, E., Kalakrishnan, M., Pastor, P., Righetti, L., et Schaal, S. (2011). **Learning motion primitive goals for robust manipulation**. Dans *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 325–331. IEEE.
- [Sun et al., 2002] Sun, Y., Piyabongkarn, D., Sezen, A., Nelson, B. J., Rajamani, R., Schoch, R., et Potasek, D. P. (2002). **A novel dual-axis electrostatic microactuation system for micromanipulation**. Dans *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, volume 2, pages 1796–1801. IEEE.
- [Tamadazte et al., 2010] Tamadazte, B., Marchand, E., Dembélé, S., et Le Fort-Piat, N. (2010). **Cad model-based tracking and 3d visual-based control for mems microassembly**. *The International Journal of Robotics Research*.

- [Tamadazte et al., 2011] Tamadazte, B., Piat, N. L.-F., et Dembélé, S. (2011). **Robotic micromanipulation and microassembly using monoview and multiscale visual servoing**. *Transactions on Mechatronics*, 16(2) :277–287.
- [Tan et al., 2014] Tan, N., Clévy, C., Laurent, G. J., Sandoz, P., et Chaillet, N. (2014). **Characterization and compensation of xy micropositioning robots using vision and pseudo-periodic encoded patterns**. Dans *International Conference on Robotics and Automation*, pages 2819–2824. IEEE.
- [Tavakoli et al., 2014] Tavakoli, M., et de Almeida, A. T. (2014). **Adaptive under-actuated anthropomorphic hand : Isr-softhand**. Dans *International Conference on Intelligent Robots and Systems*.
- [Thompson et al., 2001] Thompson, J., et Fearing, R. S. (2001). **Automating microassembly with ortho-tweezers and force sensing**. Dans *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, volume 3, pages 1327–1334. IEEE.
- [Thrun et al., 2005] Thrun, S., Burgard, W., et Fox, D. (2005). **Probabilistic robotics**. MIT press.
- [Tournassoud et al., 1987] Tournassoud, P., Lozano-Perez, T., et Mazer, E. (1987). **Re-grasping**. Dans *Proceedings. 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1924–1928.
- [Trimmer, 1989] Trimmer, W. S. (1989). **Microrobots and micromechanical systems**. *Sensors and actuators*, 19(3) :267–287.
- [Trinkle et al., 1991] Trinkle, J. C., et Hunter, J. J. (1991). **A framework for planning dexterous manipulation**. Dans *International Conference on Robotics and Automation*, pages 1245–1251. IEEE.
- [Ueha et al., 2000] Ueha, S., Hashimoto, Y., et Koike, Y. (2000). **Non-contact transportation using near-field acoustic levitation**. *Ultrasonics*, 38(1) :26–32.
- [Vikramaditya et al., 2001] Vikramaditya, B., et Nelson, B. J. (2001). **Modeling microassembly tasks with interactive forces**. Dans *International Symposium on Assembly and Task Planning*, pages 482–487. IEEE.
- [Vögeli et al., 2000] Vögeli, B., et von Känel, H. (2000). **Afm-study of sticking effects for microparts handling**. *Wear*, 238(1) :20–24.
- [Wang et al., 2007] Wang, W., Liu, X., Gelinas, D., Ciruna, B., et Sun, Y. (2007). **A fully automated robotic system for microinjection of zebrafish embryos**. *PloS one*, 2(9).
- [Wason et al., 2007] Wason, J., Gressick, W., Wen, J. T., Gorman, J., et Dagalakis, N. (2007). **Multi-probe micro-assembly**. Dans *International Conference on Automation Science and Engineering*, pages 63–68. IEEE.
- [Wason et al., 2010] Wason, J. D., Wen, J. T., Choi, Y.-M., Gorman, J. J., et Dagalakis, N. G. (2010). **Vision guided multi-probe assembly of 3d microstructures**. Dans *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 5603–5609. IEEE.
- [Wright et al., 1989] Wright, P., Demmel, J., et Nagurka, M. (1989). **The dexterity of manufacturing hands**. *Robotics Research, DSC*, 14 :157–163.
- [Xie et al., 2009] Xie, H., et Régnier, S. (2009). **Three-dimensional automated micro-manipulation using a nanotip gripper with multi-feedback**. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19(7).

- [Xie et al., 2011a] Xie, H., et Régnier, S. (2011a). **Development of a flexible robotic system for multiscale applications of micro/nanoscale manipulation and assembly.** *Transactions on Mechatronics*, 16(2) :266–276.
- [Xie et al., 2011b] Xie, Y., Sun, D., Tse, H. Y. G., Liu, C., et Cheng, S. H. (2011b). **Force sensing and manipulation strategy in robot-assisted microinjection on zebrafish embryos.** *Transactions on Mechatronics*, 16(6) :1002–1010.
- [Xiong et al., 2003] Xiong, X., Hanein, Y., Fang, J., Wang, Y., Wang, W., Schwartz, D. T., et Bohringer, K. (2003). **Controlled multibatch self-assembly of microdevices.** *Journal of Microelectromechanical Systems*, 12(2) :117–127.
- [Xu et al., 2015] Xu, T., Hwang, G., Andreff, N., et Régnier, S. (2015). **Planar path following of 3-d steering scaled-up helical microswimmers.** *IEEE Transactions on Robotics*, 31(1) :117–127.
- [Yashima et al., 2003] Yashima, M., Shiina, Y., et Yamaguchi, H. (2003). **Randomized manipulation planning for a multi-fingered hand by switching contact modes.** Dans *International Conference on Robotics and Automation*, volume 2, pages 2689–2694. IEEE.
- [Yesin et al., 2005] Yesin, K. B., Exner, P., Vollmers, K., et Nelson, B. J. (2005). **Design and control of in-vivo magnetic microrobots.** Dans *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, pages 819–826. Springer.
- [Yu et al., 2011] Yu, J., Chary, S., Das, S., Tamelier, J., Pesika, N. S., Turner, K. L., et Israelachvili, J. N. (2011). **Gecko-inspired dry adhesive for robotic applications.** *Advanced Functional Materials*, 21(16) :3010–3018.
- [Zesch et al., 1997] Zesch, W., Brunner, M., et Weber, A. (1997). **Vacuum tool for handling microobjects with a nanorobot.** Dans *International Conference on Robotics and Automation*, volume 2, pages 1761–1766. IEEE.
- [Zesch et al., 1998] Zesch, W., et Fearing, R. S. (1998). **Alignment of microparts using force-controlled pushing.** Dans *Photonics East*, pages 148–156. International Society for Optics and Photonics.
- [Zhang et al., 1996] Zhang, H., Tanie, K., et Maekawa, H. (1996). **Dextrous manipulation planning by grasp transformation.** Dans *International Conference on Robotics and Automation*, volume 4, pages 3055–3060. IEEE.
- [Zhang et al., 2015] Zhang, J., Lu, K., Chen, W., Jiang, J., et Chen, W. (2015). **Monolithically integrated two-axis microgripper for polarization maintaining in optical fiber assembly.** *Review of Scientific Instruments*, 86(2) :025105.
- [Zhong et al., 2013] Zhong, M.-C., Wei, X.-B., Zhou, J.-H., Wang, Z.-Q., et Li, Y.-M. (2013). **Trapping red blood cells in living animals using optical tweezers.** *Nature communications*, 4.
- [Zhou et al., 2002] Zhou, Q., Aurelian, A., Chang, B., del Corral, C., et Koivo, H. N. (2002). **Microassembly system with controlled environment.** *Journal of Micromechatronics*, 2(3) :227–248.
- [Zhou et al., 2005] Zhou, Q., Korhonen, P., Chang, B., et Sariola, V. (2005). **6 dof dextrous microgripper for inspection of microparts.** Dans *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pages 534–539. IEEE.

- [Zhou et al., 2006] Zhou, Q., Korhonen, P., Laitinen, J., et Sjövall, S. (2006). **Automatic dextrous microhandling based on a 6-dof microgripper**. *Journal of Micromechanics*, 3(3) :359–387.
- [Zhou et al., 2016] Zhou, Q., Sariola, V., Latifi, K., et Liimatainen, V. (2016). **Controlling the motion of multiple objects on a chladni plate**. *Nature Communications*, 7.
- [Zhou et al., 2000] Zhou, Y., et Nelson, B. J. (2000). **The effect of material properties and gripping force on micrograsping**. Dans *International Conference on Robotics and Automation*, volume 2, pages 1115–1120. IEEE.
- [Zhu et al., 2011] Zhu, Y., Bazaei, A., Moheimani, S. R., et Yuce, M. R. (2011). **Design, modeling, and control of a micromachined nanopositioner with integrated electrothermal actuation and sensing**. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 20(3) :711–719.

Résumé :

Les microsystèmes développés actuellement nécessitent de plus en plus de fonctionnalités dans des volumes de plus en plus réduits, augmentant ainsi leurs complexités. Cependant, l'assemblage de micro-composants demeure une étape mal contrôlée et limitée à des opérations de prise-dépose pour des composants de formes simples. Ces limitations sont en grande partie dues au comportement physique observable à l'échelle micrométrique. En effet, passé sous la barre du millimètre, les effets de surface (capillarité, van der Waals, etc.) gagnent en importance. De ce fait, le paradigme de la manipulation change radicalement puisque des phénomènes d'adhésion entre le préhenseur et l'objet deviennent visibles. Il est ainsi nécessaire de mettre en œuvre des stratégies de manipulation innovantes permettant de réaliser des opérations de micromanipulation dextre. Les travaux développés au cours de cette thèse, à savoir l'automatisation de tâches de micromanipulation dextre, répondent clairement à ces attentes. Un planificateur de trajectoires prenant en compte les effets d'adhésion, spécifiques à l'échelle micrométrique, a ainsi été développé. L'approche développée permet de générer automatiquement des trajectoires optimales pour les doigts d'une micro-main. Les trajectoires de manipulation obtenues permettent de mettre en lumière que les effets d'adhésion sont particulièrement utiles pour saisir des objets complexes et simplifient également le processus de manipulation. La méthode développée permet de manipuler et d'orienter n'importe quelle forme d'objet dans un plan. Les trajectoires de manipulation obtenues ont été validées expérimentalement ouvrant ainsi la voie à la réalisation de micro-assemblages tridimensionnels.

Mots-clés : Micromanipulation, Planification de mouvements, Manipulation dextre, Micro-assemblage

Abstract:

Nowadays, microsystems require more and more functionality in increasingly smaller volumes. However, assembly of microcomponents remains a poorly controlled step and limited to pick and place operations for simple shaped components. These limitations are largely due to the physical behavior existing at the micrometric scale. In fact, below the millimeter, the surface forces (capillarity, van der Waals, etc.) become more important. As a result, the paradigm of manipulation changes radically since adhesion between the gripper and the object become visible. Thus, it is necessary to implement original manipulation strategies enabling dexterous micromanipulation operations. The work developed during this thesis, namely the automation of dexterous micromanipulation tasks, clearly fulfills these expectations. A trajectory planner taking into account the adhesion forces, specific to the micrometric scale, has been developed. The developed approach allows to automatically generate optimal trajectories for the fingers of a micro-hand. The obtained trajectories demonstrate that the adhesion forces are particularly useful for grasping complex objects and also simplify the manipulation process. The developed method allows to manipulate and rotate any shape of object in a plan. Also, the trajectories have been validated experimentally and thus open the way to the realization of three-dimensional micro-assemblies.

Keywords: Micromanipulation, Trajectory planning, Dexterous manipulation, Micro-assembly

The logo for SPIM (École doctorale SPIM) features the letters 'S', 'P', 'I', and 'M' in a large, white, sans-serif font. The 'S' is stylized with a thick, white, curved underline that extends to the left and then curves back under the 'P'. The letters are set against a dark background.

■ École doctorale SPIM 1 rue Claude Goudimel F - 25030 Besançon cedex

■ tél. +33 (0)3 81 66 66 02 ■ ed-spim@univ-fcomte.fr ■ www.ed-spim.univ-fcomte.fr

The logo for the University of Franche-Comté (UFC) features the letters 'U' and 'FC' in a large, bold, black, sans-serif font. The 'U' is stylized with a thick, black, curved underline that extends to the left and then curves back under the 'FC'. Below the letters, the text 'UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ' is written in a smaller, black, sans-serif font. A small green vertical bar is positioned to the left of the 'U'.