

UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE

THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Pierre et Marie Curie

Spécialité : ROBOTIQUE

Présentée par

Cécile PACORET

Des pinces optiques pour une sensation tactile de la micromanipulation

Thèse dirigée par Stéphane RÉGNIER

soutenue le 04 juillet 2011

Jury :

- | | | |
|--------------------|---|--|
| Jean-Pierre GALAUP | - | Directeur de recherche CNRS ORSAY
Rapporteur |
| Nicolas ANDREFF | - | Professeur à l'Université de Franche-Comté, Besançon
Rapporteur |
| Vincent HAYWARD | - | Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie, Paris |
| Suat TOPÇU | - | Professeur à l'Université de Versailles St Quentin |
| Stéphane RÉGNIER | - | Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie, Paris
Directeur de thèse |
| Mehdi BOUKALLEL | - | Chef de projet au CEA-LIST, Fontenay-aux-Roses
Co-encadrant |

Invité :

- | | | |
|------------------------|---|--|
| Professeur Metin SITTI | - | Professeur à Carnegie Mellon University, USA |
|------------------------|---|--|

Des pinces optiques pour un ressenti tactile de la micromanipulation

Résumé : Les microtechnologies sont de plus en plus présentes dans notre quotidien. Leur production est aujourd’hui restreinte à des procédés de masse par photolithographie. Leur fabrication est mal contrôlée et les défauts sont fréquents. Or l’étude individuelle de chaque microcomposant est particulièrement difficile et coûteuse. La microrobotique propose des solutions automatiques ou téléopérées afin de résoudre ce type de verrous technologiques.

Pour des raisons économiques et de flexibilité, de nombreux utilisateurs se tournent vers un contrôle impliquant un opérateur. Plusieurs travaux ont proposé un retour des interactions lors de la tâche au moyen d’une interface utilisateur évoluée, dite haptique, afin d’augmenter l’immersion dans le micromonde et donc la dextérité de l’opérateur. Dans le cas de la micromanipulation, les facteurs d’échelle et les fortes dynamiques provoquent de nombreuses instabilités dans le couplage bilatéral recherché. Il a donc été nécessaire d’utiliser des contrôleurs évolués au détriment des sensations.

Pour obtenir des sensations réelles et utiles, nous proposons de revisiter la problématique sous un autre angle. Plutôt que d’utiliser un micromanipulateur existant, nous avons conçu un système dédié au retour d’effort. Nous posons les prémices d’un nouveau concept de micromanipulation haptique flexible, fiable et utile grâce à des choix et des optimisations de méthodes et de technologies :

- une méthode dédiée de préhension sans contact : les pinces optiques,
- une maximisation de l’espace de travail de ses actionneurs et capteurs,
- l’amélioration des performances en terme de dynamique et de bande passante,
- le développement de nouveau capteur de force robuste à l’environnement, basé sur la vision.

Ce travail multidisciplinaire s’appuie sur la réalisation de trois installations expérimentales et sur des collaborations entre des équipes de micromanipulation, d’haptique et de vision.

Mots clés : Micromanipulation, pinces optiques, téléopération, haptique, vision événementielle

Tactile perceptions of the optical tweezers based micromanipulation

Abstract : Today, microtechnologies are common practice in the industry. They are generally mass-produced by photolithography with several inherent difficulties. As a result, it is difficult to diagnosis defects in single parts as individual manipulation is complex and not cost-effective. In order to overcome these shortcomings, microrobotics proposes different techniques, either fully automated or teleoperated.

Given the complexity of the manipulation task and the required flexibility, it is necessary to involve a human operator in the process. The use of force feedback is a recommended approach to enhance the operator's dexterity. In the case of microscale manipulation, big scaling ratios and specific dynamics are critical for a bilateral coupling schemes. In order to guarantee the stability of such a coupling, advances controllers are used with the secondary effect to reduce the quality of the force information, hence the sensation, fed back to the user.

The approach proposed here aims to design a micromanipulation system specifically tailored to overcome these shortcomings, improving the human perception of the manipulation task while still guaranteeing the stability, instead of adapting an existing system to a force feedback scheme. in this prospect, several technical paths and optimizations are investigated :

- a dedicated contact-less manipulation technique based on optical tweezers,
- maximization of actuation and sensor workspaces,
- enhancement of the bandwidth and dynamic performances,
- development of a robust novel sensor based on event-based vision

In the frame of this multidisciplinary study, three experimental setups are constructed in collaboration with specialists in micromanipulation, computer vision and haptic/tactile perceptions.

Keywords : Micromanipulation, optical tweezers, teleoperation, haptic, event based vision

Table des matières

Liste des Notations	v
Introduction générale	1
1 La télé-micromanipulation	3
1.1 Le contexte actuel de la micromanipulation	5
1.1.1 L'opérateur de micromanipulation	5
1.1.2 Le retour d'effort	8
1.1.3 Le couplage entre macro- et micromonde	9
1.2 Les télé-micromanipulateurs haptiques existants	11
1.2.1 Résumé des techniques de micromanipulation	11
1.2.2 Micropinces et microscopes à force atomique	13
1.2.3 Pincés magnétiques et optiques	16
1.3 Nouvelle approche : une conception dédiée au retour d'effort	20
1.3.1 Le besoin	20
1.3.2 Le cahier des charges	22
1.3.3 Choix du micromanipulateur	26
2 Les pincés optiques et le retour d'effort	31
2.1 État de l'art des pincés optiques	32
2.1.1 Principe	32
2.1.2 Installation optique	36
2.1.3 Étalonnage	39
2.1.4 Applications	40
2.2 La conception dédiée	43
2.2.1 Les actionneurs	43
2.2.2 Les capteurs d'effort	49
2.2.3 Le choix des composants adéquats	55
2.3 Le premier couplage	56
2.3.1 L'installation de la pince optique à Glasgow	59
2.3.2 Couplage "direct" ou "position-position"	60
2.3.3 La preuve du concept	61
3 Modélisation du micromanipulateur haptique	67
3.1 La boucle haptique	67
3.1.1 Le micromanipulateur	68
3.1.2 L'interface haptique	71
3.1.3 Le couplage	72
3.1.4 L'environnement	75
3.1.5 La boucle fermée	76
3.2 Les performances	78

3.2.1	La stabilité	80
3.2.2	La limite de confort	85
3.2.3	La transparence	86
3.3	Influence des paramètres	91
3.3.1	L'actionneur et de l'échantillonnage	92
3.3.2	Le piège	94
3.3.3	L'interface haptique	96
3.3.4	Limitations	98
3.3.5	Conclusion	98
4	Le micromanipulateur dédié	101
4.1	Suivi rapide et robuste du micro-outil piégé	101
4.1.1	L'enjeu de la vision en microrobotique	102
4.1.2	Vers un nouveau capteur, la caméra asynchrone	107
4.1.3	Algorithme de traitement dédié	110
4.2	Manipulateur dédié au retour d'effort	111
4.2.1	Description du système	112
4.2.2	Mesure du mouvement Brownien	115
4.2.3	Résultats de téléopération en temps réel	118
4.3	Installation dédiée et perspectives	120
	Conclusion générale	123
	A Définitions	125
	B Traitement d'images - Généralités	127
	C Justification expérimentale de la modélisation	129
C.1	Miroir actionné 2DDL de Glasgow	129
C.2	Galvanomètres du CEA	131
	D Calcul de stabilité du système	133
D.1	Mode libre	133
D.1.1	Régime continu	133
D.1.2	Régime échantillonné	137
D.2	Mode contraint	140
D.2.1	Régime continu	140
D.2.2	Régime échantillonné	142
	Bibliographie	145
	Liste de publications	159

Liste des Notations

Propriétés physiques du laser

ν	Fréquence du rayon électromagnétique
c	Vitesse de la lumière dans le vide
C_R	Coefficients de Fresnel de réflexion
C_T	Coefficients de Fresnel de transmission
f_p	Fréquence de coupure
K	Raideur du piège optique
n_i	Indice de réfraction du milieu i
P	Puissance du laser
q	Quantité de mouvement
w_0	Taille du point focal d'un laser pour 63% de sa puissance

Propriétés physiques de l'environnement et des particules

η	Viscosité dynamique du milieu
$B_v(h) = f(h) \cdot 6\pi \cdot \eta \cdot R$	Coefficient visqueux du milieu
$f(h)$	Coefficient correctif de la loi de Faxen 2.1.3
g	Accélération de la gravité
m	Masse de la microsphère piégée
R	Rayon de la microsphère piégée
T	Température (K)

Constantes

h	Constante de Plank
k_B	Constante de Boltzmann

Paramètres dynamiques du système de télé-opération

$\tau_h = \frac{M_h}{B_h}$	Constante de temps de l'interface haptique
τ_m	Constante de temps de l'actionneur
B_h	Coefficient d'amortissement équivalent de l'interface haptique
M_h	Masse équivalente de l'interface haptique
T_{ech}	Période d'échantillonnage

Opérateurs

ω	Impulsion
$\underline{\underline{A}}$	Matrice A
\underline{u}	Vecteur u
s	Opérateur de Laplace
z	Opérateur de modélisation échantillonnée

Forces

F'_{micro}	Image de la force mesurée dans le micromonde
F_{env}	Forces dues à l'environnement
F_{laser}	Force optique produite par le faisceau laser
F_{main}	Force exercée par la main de l'opérateur
$F_{perturb}$	Autres perturbations
F_{poids}	Force de la pesanteur
F_{visc}	Résistance visqueuse du milieu

Positions

P_{bille}	Position de la microsphère piégée
$P_{bille} - P_{laser}$	Position relative de la bille par rapport au laser
P_{cons}	Position de consigne des actionneurs
P_{laser}	Position du point focal du laser
P_{main}	Position de la main de l'opérateur

Fonctions de transfert et impédances

$\Delta\phi^t$	Écart de phase à la transparence
ΔA^t	Écart d'amplitude à la transparence (en dB)
ϕ_Z	Phase de l'impédance du modèle
ϕ_Z^t	Phase de l'impédance du système transparent
A_Z	Amplitude de l'impédance du modèle (en dB)
$A_z = Z_e = \left \frac{F_{main}}{P_{main}} \right $	Amplitude de l'impédance ou raideur apparente du système (en dB)
A_Z^t	Amplitude de l'impédance du système transparent (en dB)
$C(s)$	Fonction de transfert de la caméra rapide
$E(s) = \frac{F_{perturb}(s)}{P_{bille}(s)}$	Fonction de transfert de l'environnement microscopique
$FTBF(s) = \frac{P_{main}(s)}{F_{main}(s)}$	Fonction de transfert de la boucle fermée

$H(s) = \frac{P_{user}(s)}{(F_{user}(s)+F'_{micro}(s))}$ Fonction de transfert de l'action du milieu sur la microsphère piégée

$M(s) = \frac{P_{laser}(s)}{P_{cons}(s)}$ Fonction de transfert de l'actionneur

$O(s) = \frac{F_{main}(s)}{P_{main}(s)}$ Fonction de transfert de l'opérateur

$T(s)$ Fonction de transfert du traitement d'image

$V(s) = \frac{P_{bille}(s)}{F_{visc}(s)}$ Fonction de transfert de la dissipation visqueuse

Z_{env} Impédance de l'environnement

Z_{op} Impédance de l'opérateur

Gains et indices de performance du couplage

Ad Gain en position du couplage

Af Gain en force du couplage

$Af_{confort}$ Gain en force à la limite de confort

Af_{max} Critère de stabilité, limite maximale du gain en position

Af_{opt} Gain en force optimisant la transparence

Af_{stab} Gain en force à la limite de stabilité

$C_{confort}$ Complément à l'indice de limite de confort

C_{stab} Complément à l'indice de limite de stabilité

C_{transp} Complément de l'indice de transparence optimale

$I_{confort}$ Indice de limite de confort

I_{stab} Indice de limite de stabilité

I_{transp} Indice de transparence optimale

Paramètres du système de vision

Δ Seuil de la caméra événementiel

Φ Taux d'événements produits par la caméra asynchrone

C_{xy} Indice de corrélation

E_v Information sous forme d'événement

$I_{i,j}$ Intensité de l'illumination

M_H Matrice de calcul de la transformée de Hough

Abréviations

AER Caméra asynchrone événementielle

AFM Microscope à forces atomiques

<i>AOD</i>	Défecteur acousto-optique
<i>CMOS</i>	Complementary Metal Oxide Semi-conductor
<i>DVS</i>	Dynamic Vision System
<i>eps</i>	Événements par seconde
<i>FIFO</i>	First In First Out
<i>FPGA</i>	Field Programmable Gate Array
<i>HS</i>	Hors sujet
<i>ips</i>	Images par seconde
<i>ON</i>	Ouverture numérique
<i>PFM</i>	Microscope à forces photoniques
<i>ROI</i>	Région d'intérêt
<i>SLM</i>	Modulateur spatial de lumière

Introduction générale

Pour exploiter les ressources des microtechnologies, il est nécessaire de manipuler des objets uniques de taille microscopique. Les applications visées couvrent par exemple la conception hétérogène des MEMS ou la biologie cellulaire. La discipline scientifique concernée, la micromanipulation, s'applique à rechercher des solutions de saisie et de dépose préservant l'intégrité des échantillons lors des différentes tâches. Ces dernières sont aussi variées que l'étude des propriétés physiques du composant ou l'assemblage de micro-objets.

Ces opérations nécessitent des résolutions en effort et en position inaccessibles à la main humaine avec la réduction des échelles. Des robots manipulateurs sont ainsi employés pour la préhension d'objets dont la taille est inférieure à $500\mu\text{m}$. L'automatisation de ces systèmes est complexe à mettre en œuvre. A cette échelle, de nombreuses difficultés apparaissent comme la physique mise en jeu, les moyens de perception en force ou en vision, l'intégration dans des environnements fortement contraints... L'état d'avancement de l'automatisation ne répond pas aujourd'hui aux besoins et aux capacités matérielles des entreprises et laboratoires.

La téléopération par retour d'effort est une voie de recherche différente, issue des travaux de robotique dans le domaine des maîtres-esclaves. Cette technique consiste à relier via une liaison bilatérale un système physique effectuant une tâche, par exemple de manipulation, dans un environnement différent, à un système mécanique commandé appelé interface haptique. Elle exploite ainsi les capacités d'adaptation et d'anticipation d'opérateurs expérimentés à partir d'un retour tactile des interactions.

Dans le cas de la micromanipulation, les réductions d'échelle complexifient le problème. A l'échelle microscopique, les rapports signaux sur bruit sont faibles et l'amplification des signaux devient délicate. La commande associée du système devient un réel défi pour le domaine de l'automatique. Des techniques avancées sont développées pour réussir à maîtriser les instabilités du système. Il en résulte une altération des informations et du ressenti, affectant l'interaction de l'utilisateur avec la tâche.

Les travaux présentés dans cette thèse s'inscrivent, pour ces différentes raisons, dans une nouvelle démarche. Au lieu de réaliser un couplage complexe entre deux systèmes existants et indépendants, une solution simple basée une conception dédiée du micromanipulateur permet de préserver le ressenti des interactions. Pour ce dessein, la problématique doit être reformulée depuis son origine.

Différentes étapes majeures sont franchies dans ce travail pour une amélioration du ressenti de la micromanipulation. La première consiste à approfondir le choix des micromanipulateurs vis à vis de leur adaptation aux techniques de retour d'effort. Face à un cahier des charges exigeant, le **chapitre 1** propose une comparaison des principes et des méthodes d'interaction contrôlée avec le micromonde.

Après le choix d'une technique de micromanipulation avec un fort potentiel pour le ressenti tactile, les pinces optiques, le **chapitre 2** s'attache à détailler son principe et son architecture matérielle. Plusieurs optimisations sont mises en évidence pour

rendre compatible cette technique à notre application. Un premier prototype fonctionnel confirme le concept : des ressentis fins et stables sont possibles avec un couplage simple.

Pour mener plus avant l'optimisation, une modélisation du micromanipulateur à téléopération bilatérale est nécessaire. L'étude de l'influence des paramètres du système sur les performances, telles que la stabilité et la transparence, est explicitée dans le **chapitre 3**. Ces propriétés essentielles sont redéfinies sous la forme d'indices qualitatifs. Ces derniers sont exploités pour comparer les différents prototypes et apportent de nouvelles pistes d'investigation.

L'une d'entre elles, l'amélioration de la rapidité et de la robustesse de la mesure des efforts réels, est incontournable. Le **chapitre 4** est donc consacré à cette problématique. Dans le cas des pinces optiques et de nombreux autres micromanipulateurs, la mesure des efforts est réalisée de manière indirecte à partir de techniques d'imagerie. Pour rendre ces méthodes conciliables avec une restitution fiable et sécurisée des efforts à l'opérateur, de longs traitements d'informations ralentissent le rafraîchissement des sensations. Pour résoudre cet important verrou de recherche, une nouvelle technologie de capteur, opérant de façon directe une compression des données, est intégrée pour la première fois sur un système de micromanipulation. La qualité de sa mesure est aujourd'hui sans égal en termes de flexibilité et de fiabilité. Finalement, sa mise en pratique démontre une avancée sans précédent pour la réalisation de tâches complexes dans le micromonde avec ressenti tactile.

Dans ce manuscrit, une démarche de conception complète est présentée. L'étude du besoin est corrélée à la réalisation de trois plates-formes fonctionnelles avec retour haptique : au laboratoire d'optique de l'Université de Glasgow, pour la preuve du concept ; au CEA-LIST à Fontenay-Aux-Roses, pour l'intégration d'actionneurs rapides et le développement de stratégies multiépées et à l'Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique de l'Université Pierre et Marie Curie (CNRS), pour l'amélioration sensible de la mesure de force. Le haut degré de multidisciplinarité de ce projet s'appuie sur trois collaborations fortes avec le laboratoire d'optique de Glasgow pour appréhender la conception des pinces optiques, l'équipe d'haptique de l'ISIR pour le développement d'interfaces haptiques de haute performance et l'équipe de vision de l'ISIR pour le développement d'une nouvelle technique de suivi de microparticules.

L'ensemble de ce manuscrit s'appuie sur cette démarche et ces collaborations importantes. Des résultats prometteurs et nouveaux sont démontrés dans chacun des chapitres pour poser les bases d'un nouveau système de télé-micromanipulation ressenti basé sur des pinces optiques. Les perspectives ouvertes par ce travail sont vastes et sont proposées dans le chapitre final de ce document.

La télé-micromanipulation

Sommaire

2.1	État de l'art des pinces optiques	32
2.1.1	Principe	32
2.1.2	Installation optique	36
2.1.3	Étalonnage	39
2.1.4	Applications	40
2.2	La conception dédiée	43
2.2.1	Les actionneurs	43
2.2.2	Les capteurs d'effort	49
2.2.3	Le choix des composants adéquats	55
2.3	Le premier couplage	56
2.3.1	L'installation de la pince optique à Glasgow	59
2.3.2	Couplage "direct" ou "position-position"	60
2.3.3	La preuve du concept	61

Après la conquête de l'infiniment grand, c'est maintenant l'infiniment petit qui attire l'intérêt scientifique. Ses applications sont nombreuses : de la compréhension du vivant à la conception de nouveaux matériaux ou de nouvelles sources d'énergie en passant par la miniaturisation de la puissance de calcul. Ces thèmes tiennent aujourd'hui une part importante de la recherche et de l'industrie. Pour travailler dans ce milieu microscopique intangible par les capacités humaines, les acteurs de ces domaines sont obligés de recourir à des techniques multidisciplinaires, par exemple, chimiques ou robotiques. Ces méthodes sont élaborées pour s'adapter aux phénomènes qui régissent la physique à ces échelles.

Les interactions physiques sont dépendantes des distances, des tailles et des propriétés des objets. Or, dans les dimensions microscopiques ($L < 0,001\text{m}$), il existe un domaine où le volume (L^3) perd son influence par rapport aux surfaces (L^2). Ainsi, les forces volumiques (pesanteur, inertie) deviennent négligeables devant les forces surfaciques (adhésion). Dans l'intervalle dimensionnel de quatre ordres de grandeurs des objets, de 100 nanomètres à 1 millimètre, l'influence des interactions change complètement de nature. Cette propriété ressemble aux différences induites entre l'échelle du mètre et de l'année lumière, soit entre la gravitation et les forces électriques et magnétiques.

La manipulation d'objets dans ce domaine, appelé micromonde, demande beaucoup d'inventivité et de créativité. Si les objets de taille supérieure à $500\ \mu\text{m}$ rencontrent quelques rares phénomènes d'adhésion, une solution simple apparaît avec les jets d'air comprimé. Des stratégies plus évoluées ont dû être développées pour les objets jusqu'à



FIGURE 1.1 – Différents opérateurs et opérations de micromanipulation

une dimension de $50\ \mu\text{m}$. En dessous de cette limite, la physique prend des formes complexes ou non établies et les expériences sont donc très peu répétables.

Les outils ou systèmes de micromanipulation sont en constante évolution et réalisent de nouvelles prouesses en s'éloignant de plus en plus des formes conventionnelles de préhension. La complexité et la non-répétabilité des tâches demandent beaucoup d'implications de l'opérateur. Ces dernières se trouvent aujourd'hui limitées par le peu d'ergonomie des interfaces homme-machine-micromonde.

Le propos de ce chapitre est d'analyser la complexité de l'adaptation de l'opérateur aux outils de plus en plus sophistiqués de micromanipulation. Cette étude examine le contexte de la micromanipulation du point de vue de l'opérateur. Classiquement, dans les systèmes robotisés, les informations sont affichées sur une interface graphique évoluée et l'interaction se déroule de manière unilatérale avec la souris ou un joystick. Pour recréer une manipulation dextre, les techniques de télé-opération à retour d'effort ont montré leurs avantages dans de nombreux milieux hostiles, éloignés ou virtuels. Par contre, dans la micromanipulation, les facteurs d'échelle rendent délicat l'assemblage d'un micromanipulateur avec une interface haptique. En effet, les liens bilatéraux créés par la télé-opération à retour d'effort sont soit instables, soit insatisfaisants en termes de sensation. L'état de l'art montre ensuite que cette difficulté est liée principalement à l'incompatibilité des organes couplés. Pour remédier à cette complexité, la conception du micromanipulateur et celle du retour d'effort doivent être dédiées¹.

1. Le vocabulaire utilisé dans ce manuscrit et en particulier dans ce chapitre est issu de plusieurs disciplines. Il est donc important d'en redonner la définition pour éviter les confusions. L'annexe A précise le sens des termes employés.

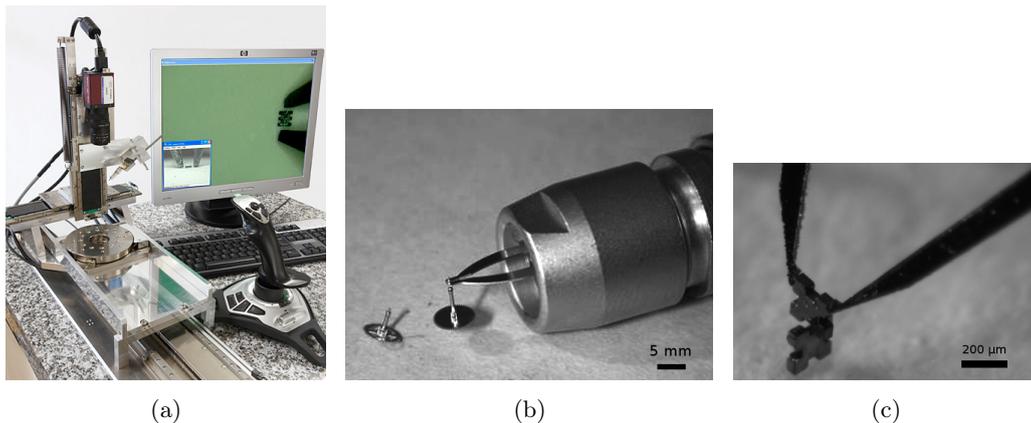


FIGURE 1.2 – Système de télé-opération commercial pour micropinçe du fabricant Percipio. (a) Interface utilisateur avec un joystick pour le contrôle en position, (b) micropinçe vue globale, (c) pièce d'un puzzle micrométrique entre les doigts de la micropinçe.

1.1 Le contexte actuel de la micromanipulation

Dans l'industrie, la micromanipulation est principalement confinée aux petites séries, à la mécanique de précision et aux diagnostics des défauts de fabrication de microcomposants. Ces opérations demandent beaucoup de temps de la part d'opérateurs très expérimentés. Le taux de réussite étant très bas, ces travaux sont considérés répétitifs et pénibles. Le fort coût de la main d'oeuvre, ajouté à celui des installations, est l'une des raisons de la faible propagation de la micromanipulation dans l'industrie, comparée à celle des microcomposants. Le remplacement est préféré à une opération de maintenance et le besoin est standardisé pour la production de masse, par exemple, par photolithographie.

Aujourd'hui, ces techniques de pointe sont surtout présentes dans les laboratoires. Leurs applications étant très en amont de l'industrie, la recherche nécessite la manipulation en petits nombres de nanotubes, de nano- et microcomposants de nouvelles générations ou pour la biologie, de cellules ou de protéines. L'étude détaillée de leurs propriétés physiques nécessite des préhenseurs flexibles et intelligents. Le besoin en opérateurs expérimentés est donc également très élevé dans les domaines de la microscopie et des microtechnologies.

1.1.1 L'opérateur de micromanipulation

L'industrie s'intéresse, aujourd'hui, principalement aux objets de dimensions supérieures à 100 μm. Les opérations de manipulation peuvent encore être réalisées manuellement à cette échelle. Mais les coûts de productions sont exorbitants. Cette contrainte est principalement imputable au fort besoin de main d'oeuvre qualifiée (voir Fig. 1.1). De plus, le temps de traitement de chaque tâche est très long en raison de la complexité et du fort taux d'échec. La robotisation des tâches réduit amplement les temps de manoeuvre. Par exemple, une tâche d'assemblage de rouages d'horlogerie de grande complexité représente une heure et demie de travail pour un opérateur avec une pince

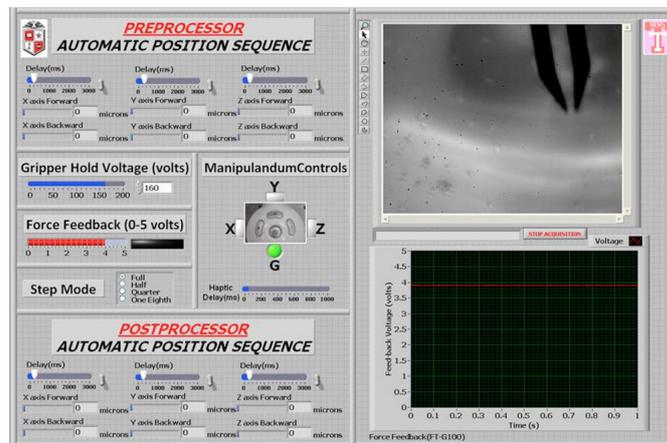


FIGURE 1.3 – Interfaces graphiques récentes conçues avec Labview pour une micropince [Vijayasai 2010]

brucelle. L'automatisation a porté la réalisation de cette tâche à 5 minutes. Mais l'investissement dans de nouvelles installations automatisées est aujourd'hui considéré disproportionné par rapport à leur perte de flexibilité. La télé-opération de microrobots est plus abordable en termes de coût et entraîne également des gains de temps importants. Elle nécessite moins d'adaptation des installations, des échantillons et de la main d'œuvre.

La télé-micromanipulation est déjà très présente dans les laboratoires de recherche. Les installations se sont robotisées pour s'adapter à des objets toujours plus petits et des résolutions toujours plus fines. Le travail dans ce contexte se réalise sous microscope avec des plates-formes motorisées et l'opérateur pilote le système derrière un écran, une souris ou un joystick (voir Fig 1.2). Pour cette recherche, l'opérateur garde tout son sens car les échantillons traités sont variés et complexes tels que des nanotubes, des MEMS, des cellules ou des protéines. Pour des raisons financières et de flexibilité, les laboratoires sont amenés à développer leurs propres installations et interfaces. De nouveaux problèmes se posent alors pour exploiter la richesse des informations fournies par ces systèmes.

La complexité des outils demande des compétences pluridisciplinaires. L'opérateur de micromanipulation doit aujourd'hui parfaitement connaître son outil pour réaliser une tâche. Si les pinces brucelles présentent une utilisation intuitive, leur remplacement par des microrobots n'est pas direct. Il faut connaître les technologies mises en jeux par les nouveaux capteurs et actionneurs, leur contrôle et leurs nouvelles fonctionnalités.

Si les opérateurs industriels travaillent encore avec des objets dont les phénomènes physiques associés suivent les lois classiques de la physique, ils seront confrontés dans le futur, avec la réduction d'échelle, à des phénomènes physiques particuliers. En effet, les micro- et nano-objets sont soumis à des phénomènes peu intuitifs : effets de surface, forces à distance ... Cette physique particulière modifie les méthodes et les systèmes de micromanipulation utilisés. Des micropinces existent toujours mais leurs propriétés surfaciques ou électrostatique ont été modifiées pour s'adapter aux problèmes d'adhé-

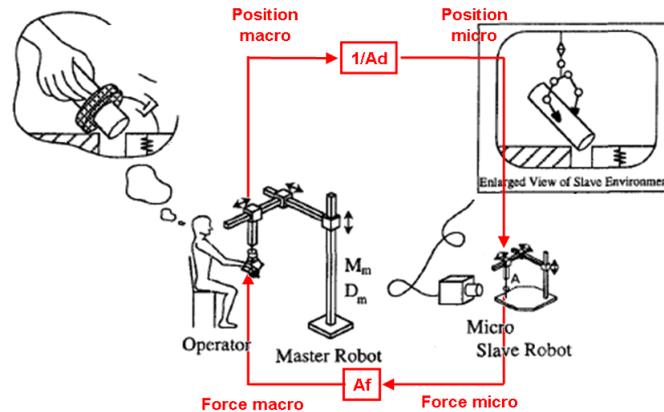


FIGURE 1.4 – Illustration des premiers travaux de télé-micromanipulation à retour d'effort dans les années 90 [Kaneko 1998]. Les gains homothétiques en position, Ad , et en force, Af , ont été ajoutés pour réaliser un couplage bilatéral direct.

sion². D'autres outils exploitent directement des champs de potentiel pour mettre en lévitation et déplacer des micro-objets³. Ces interactions demandent des connaissances avancées en physique pour être correctement exploitées.

Le micromanipulateur possède, outre des préhenseurs évolués, des capteurs spécifiques qui complexifient le système. Le réglage et l'étalonnage sont effectués à des résolutions infinitésimales, impliquant un travail de patience et de précision. Les décalages ou changements d'échantillons demandent donc des réévaluations fréquentes.

La position, les forces, la température, le pH ou les autres paramètres importants mesurés par les capteurs sont en général visualisés sur une interface graphique informatique dont l'aspect rappelle les anciens systèmes de jauges mécaniques ou de potentiomètres à glissière. Des graphiques ou des représentations 3D peuvent compléter les interfaces évoluées (voir Fig 1.3). L'opérateur pilote la manipulation en se référant à ces indicateurs sur l'écran. Il sollicite alors beaucoup la vision. De plus, la complexité des interfaces graphiques ne favorise pas la réactivité et l'anticipation de l'utilisateur.

La précision et la rapidité de la tâche sont étroitement liées à l'ergonomie de l'interface. Celle-ci se montre aujourd'hui insuffisante. Le travail des opérateurs et la créativité scientifique sont bridés par de nouvelles contraintes de compétences, de prise en main et de manœuvrabilité des systèmes de micromanipulation télé-opérés. L'amélioration des techniques de micromanipulation est aujourd'hui conditionnée par un besoin des utilisateurs en interfaces intelligentes.

Comme toute tâche de dextérité, la micromanipulation repose sur une maîtrise des informations de positions, d'orientations et d'efforts. Seule l'exploitation complète de ces données fournit une expérience rapide et complexe de saisie et d'assemblage. En effet, l'élaboration de tâches quotidiennes dans le macromonde montre que l'humain tire son efficacité de la collaboration de ses sens. La vision mesure la position et élabore des trajectoires. Par contre, l'orientation et les interactions sont principalement appréhendées par le toucher. Ce dernier est le cœur de la réussite d'assemblages d'une

2. [Lambert 2006]

3. [Gauthier 2008]

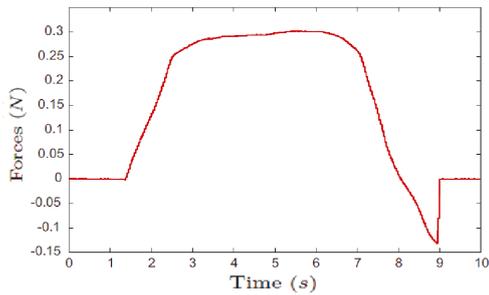
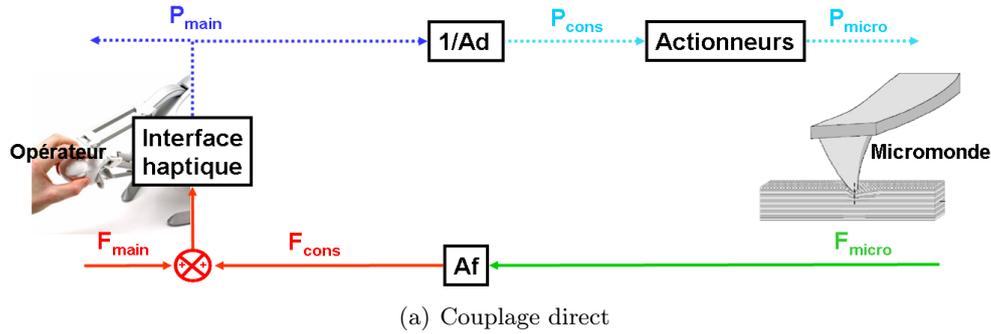
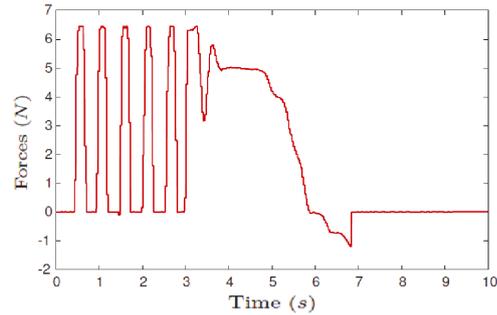
(b) $Af = 0,12 \cdot 10^6$ (c) $Af = 6 \cdot 10^6$

FIGURE 1.5 – (a) Schéma du couplage direct avec une pointe AFM (Illustration extraite de [Reimann 2005]). (b) Réponse pour un couplage direct stable avec une pointe AFM, où les forces renvoyées sont insuffisantes. (c) Réponse pour un couplage direct avec oscillations rémanentes pour un gain de force plus élevé. Les forces ressenties par l'opérateur sont représentées en fonction du temps ($Ad = 0,05 \cdot 10^6$, $K = 2,4 \text{ N.m}^{-1}$, [Bolopion 2008]).

grande complexité en peu de temps. Cette répartition sensorielle est absente dans les techniques de micromanipulation robotisées. L'utilisation d'interfaces à retour d'effort, dites haptiques, permet de recouvrer cette collaboration.

Les degrés de liberté contrôlés par ces joysticks évolués améliorent le confort de manipulation. Par contre, le retour d'effort n'a pas encore significativement montré son apport. En fait, il s'avère que le rendu haptique des interactions microscopiques n'est pas évident à réaliser. De nombreux problèmes liés au contrôle de ces systèmes empêchent encore un rendu fin, réaliste et utile de sensations.

1.1.2 Le retour d'effort

Les interfaces haptiques sont des systèmes mécaniques robotisés et représentent une optimisation des leviers de commandes conventionnels. Différents axes sont motorisés pour renvoyer des efforts à l'utilisateur. Dans le cas de la micromanipulation, ces efforts sont une homothétie des interactions mesurées par les micro-outils (voir Fig. 1.4). Parallèlement, ces interfaces enregistrent la position et/ou l'orientation de la main de l'utilisateur afin de déplacer le préhenseur télé-opéré. Un lien mutuel unit l'opérateur à l'organe de manipulation. Cette relation est appelée couplage bilatéral. Des gains homothétiques en position, Ad , et en force, Af , réalisent l'homothétie d'échelle dans ce

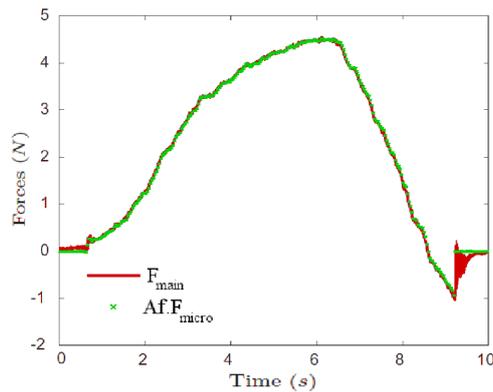
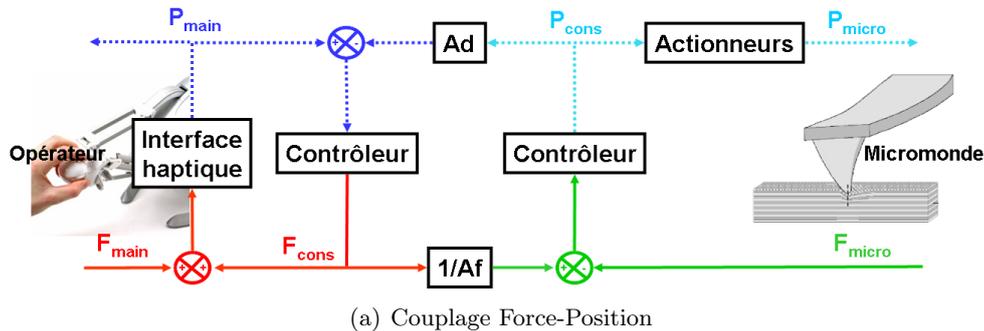
(b) $Af = 6 \cdot 10^6$

FIGURE 1.6 – Schéma du couplage passif de type force-position pour une pointe AFM. (a) Le couplage force-position introduit des contrôleurs qui ajustent la consigne en position des actionneurs à la consigne de ressenti en force et rendent ainsi le système passif. (b) Réponse pour un couplage force-position avec une pointe AFM ($Ad = 0,05 \cdot 10^6$, $K = 2,4 \text{ N.m}^{-1}$), [Bolopion 2008]).

couplage. De par sa nature simple, ce couplage est appelé "direct" (voir Fig. 1.5(a)).

1.1.3 Le couplage entre macro- et micromonde

Il n'est cependant pas naturel de coupler deux systèmes de conceptions différentes. Non seulement leurs degrés de liberté peuvent être différents, mais la dynamique des structures mécaniques est aussi très dissemblable. Les outils et les objets de micromanipulation ont des forces volumiques négligeables et sont peu soumis aux phénomènes d'inertie par exemple. Le démarrage et l'arrêt d'un mouvement sont donc instantanés. En contraste, la dynamique inertielle de l'interface et du bras humain ne suit pas. Des oscillations apparaissent⁴, induites par un transfert alternatif d'énergie d'un système à l'autre (voir Fig. 1.5(c)). Elles sont néfastes au bon déroulement de l'opération. De plus, si elles deviennent importantes, voire divergentes et incontrôlables, elles risquent d'endommager l'échantillon ou de blesser l'opérateur. L'effet inverse de l'assistance souhaitée est obtenu.

4. [Yokokohji 1994, Onal 2007, Bolopion 2008]

Ces phénomènes peuvent être évités en sous-estimant la dynamique d'un organe par rapport à l'autre (voir Fig. 1.5(b)). Mais dans ce cas, les sensations renvoyées à l'utilisateur sont insuffisantes. En effet, la simplicité de la structure bilatérale empêche de trouver un bon compromis entre sensation et **stabilité**⁵. Pour rendre compte des variations brusques et des amplitudes variées des interactions du micromonde, d'autres formes de couplage sont alors utilisées.

Le problème du couplage direct s'explique par le fait que les gains amplificateurs ne sont pas passifs au sens de l'automatique⁶. La **passivité** est la caractéristique des systèmes qui stockent, dissipent ou restituent de l'énergie, mais n'en créent pas. L'amplification est, par définition, l'augmentation de l'énergie d'un système. Dans le cas de la micromanipulation, les gains homothétiques prennent des valeurs considérables : la transformation d'un picoNewton en Newton nécessite, par exemple, un gain de 10^{12} .

D'autres types de couplages ont été proposés pour respecter les critères de passivité (voir Fig. 1.6(a) et 1.6(b)). Ces couplages, qualifiés de passifs, prennent la forme de seuils⁷, d'amplificateurs variables⁸, d'amortisseurs⁹, de variables d'ondes¹⁰, de contrôleurs robustes¹¹, prédictifs¹² ou adaptatifs¹³. Ces outils issus de l'automatique peuvent être très complexes à mettre en oeuvre. Les valeurs des différents gains introduits par les contrôleurs sont également très dépendantes de la tâche, de l'environnement et de l'outil. Leur réglage est difficilement automatisable.

Les approches proposées pour évaluer les couplages et déterminer les gains sont théoriques. L'application du critère de Llewellyn est la plus connue¹⁴ et garantit la stabilité. Un autre critère évalue le compromis stabilité-sensation : la **transparence**¹⁵.

Ce dernier définit la capacité du système à rendre fidèlement les informations. Le couplage le plus transparent restitue de façon directe les informations de position et de force avec des gains homothétiques constants. Autrement dit, en comparant la réponse des couplages implémentés à celle du couplage direct, il est possible d'évaluer les performances en transparence. Concrètement, elles s'évaluent sur les fonctions de transfert et leurs réponses fréquentielles. Les différents filtres des couplages passifs dégradent le comportement fréquentiel du système et atténuent en général les informations des hautes fréquences.

Un couplage complexe est également une contrainte supplémentaire en termes de compétences. L'objectif d'un système télé-opéré est la réduction du temps d'opération, mais également de préparation et de formation à l'outil. Avant que la technologie ne soit transférée dans les laboratoires de biologie, de physique ou dans l'industrie, le réglage des gains doit pouvoir se réaliser automatiquement ou rester très simple. Cette deuxième

5. [Micaelli 2002]

6. [Micaelli 2002]

7. [Bolopion 2008]

8. [Vander Poorten 2008]

9. [Onal 2007, Bolopion 2008]

10. [Boukhnifer 2006]

11. [Boukhnifer 2004, Vander Poorten 2008]

12. [Khan 2009b]

13. [Ando 2001]

14. [Llewellyn 1952]

15. [Lawrence 1993]

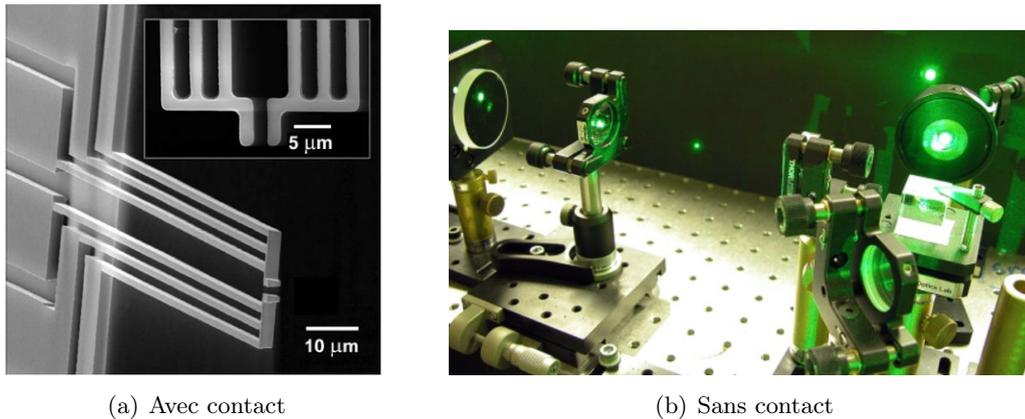


FIGURE 1.7 – Exemples de micromanipulateur (a) Micropince thermique avec capteurs piézorésistifs intégrés [Andersen 2009]. (b) Lévitiation optique d'objet de 100 μm dans l'air, [Shvedov 2010]

proposition est la plus raisonnable en termes de faisabilité et de coût. Les couplages simples sont également une garantie de meilleure transparence et donc de meilleures sensations. A partir de ces remarques, une étude approfondie des télé-micromanipulateurs haptiques existants est proposée dans la suite de ce chapitre. L'objectif est d'évaluer de nouvelles pistes d'évolution pour ces technologies, basées sur des couplages simples.

1.2 Les télé-micromanipulateurs haptiques existants

Actuellement, il existe plusieurs prototypes de micromanipulateurs équipés d'interfaces haptiques. Leurs caractéristiques varient avec les installations et les compétences présentes dans le laboratoire. Ces activités couvrent un large spectre et il est possible de trouver des interfaces ou des micromanipulateurs du commerce couplés à des développements locaux.

Toutes les techniques et les applications ne sont pas capables d'être couplées avec une interface à retour d'effort. L'état de l'art des télé-micromanipulateurs compare la pertinence des différentes méthodes.

1.2.1 Résumé des techniques de micromanipulation

En micromanipulation, il est possible de distinguer deux familles de méthodes (voir Fig. 1.7). La première consiste à reproduire les outils macroscopiques en les miniaturisant. Elle semble se prêter mieux, en apparence, au retour d'effort. Les outils sont intuitifs et présentent des liaisons mécaniques directes avec les actionneurs. Cette famille, dite "**avec contact**", rassemble les micropinces et les micro-pointes. Si les micropinces sont d'un usage évident, elles présentent, contrairement à leurs homologues macroscopiques, des phénomènes d'adhésion. La dépose est souvent compliquée par une forte adhérence entre les surfaces mises en contact. L'étude de ces phénomènes implique la recherche de nouvelles stratégies de modification active des propriétés électrostatiques, capillaires,

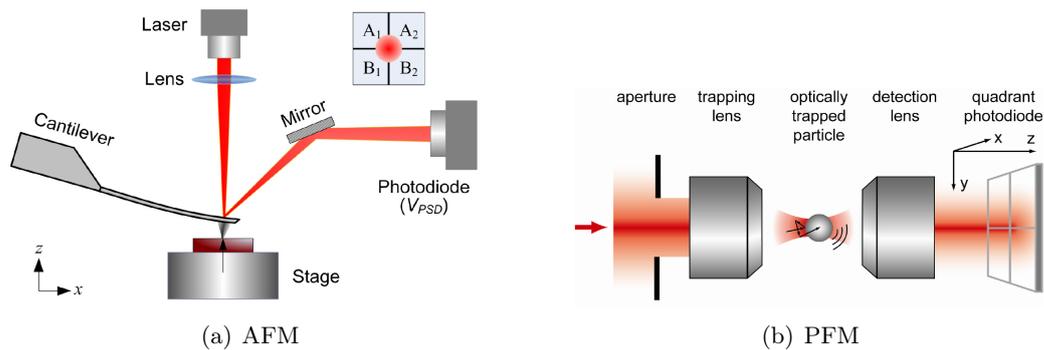


FIGURE 1.8 – Principe des microscopes à forces atomiques (AFM) [Xie 2008] et à forces photoniques (PFM) [Kress 2004]

surfaciques des micro-outils¹⁶.

Dans la même famille, une autre technique utilisant des pointes de dimensions atomiques s'est imposée pour les objets submicroniques. Cette technique est en général utilisée pour l'imagerie dans les microscopes à forces atomiques (AFM, voir Fig. 1.8(a)), mais les pointes peuvent également être exploitées pour la micromanipulation. Les micro-poutres, qui servent de support aux pointes, sont très flexibles et sont déformées à l'approche de la surface. La mesure de ces déformations et un calcul classique de mécanique des solides donnent une évaluation de certains efforts de flexion et de torsion exercés sur l'outil. La déformation de la poutre est mesurée à partir d'une caméra ou d'un laser déporté. Les efforts d'interaction sont ainsi déduits avec un modèle de comportement de la structure. La mesure de la déflexion peut aussi être directe ou embarquée. Plus couramment utilisée pour les micropinces, elle utilise des capteurs intégrés de type résistifs, capacitifs ou piézoélectriques. Cette mesure des efforts a été exploitée dans de nombreux télé-manipulateurs haptiques.

La deuxième famille concentre les techniques "**sans contact**". Ces dernières utilisent des champs de potentiel pour déplacer les objets. La microfluidique¹⁷ très présente dans les micro-usines utilise des fluides soumis à des champs de pression ou de température. L'électrophorèse¹⁸ actionne des dipôles dans un champ électrique. Les pinces acoustiques¹⁹, magnétiques²⁰, électromagnétiques²¹ et optiques²² créent des champs de forces avec des noeuds. Ces derniers sont des positions d'équilibre pour les objets à manipuler. La mesure des efforts est alors réalisée de manière indirecte et se base sur une connaissance approfondie des champs physiques en jeu. Il est alors possible d'obtenir des mesures tridimensionnelles d'efforts avec un micro-outil de faible encombrement et peu intrusif (voir Fig. 1.8(b)). Par contre, il est plus rare de retrouver des interfaces à retour d'effort pour ces techniques. Cette constatation peut

16. [Régnier 2008]

17. [Squires 2005]

18. [Wang 1997]

19. [Reinhart 2000]

20. [Gosse 2002]

21. [de Vries 2005]

22. [Ashkin 1986]

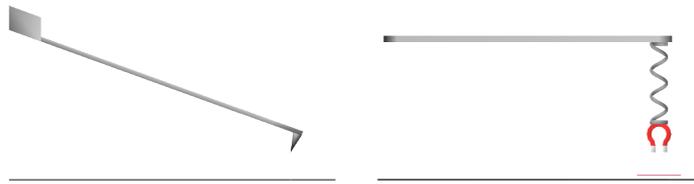


FIGURE 1.9 – Analogie entre une pointe AFM et un ressort prolongé d'un aimant, illustrant les phénomènes d'attraction et de collage au niveau microscopique de la pointe [Millet 2008]

facilement se comprendre du fait que le lien mécanique est peu intuitif. De plus, Par contre, .

Dans les paragraphes suivants, quelques exemples illustratifs de télé-micromanipulateurs existants sont présentés. A défaut d'une liste exhaustive, seuls les travaux présentant un intérêt vis à vis de l'application de télé-opération et des sensations ont été retenus.

1.2.2 Micropinces et microscopes à force atomique

Les **micropinces** sont des outils fréquents dans les systèmes industriels de micromanipulation. La mesure des efforts est réalisée par des capteurs intégrés et elle est limitée à la force de serrage. Plusieurs auteurs ont cherché à exploiter la mesure de la force de serrage par un retour haptique²³. Ce ressenti est particulièrement intéressant lorsque l'élasticité de l'objet à saisir n'est pas connue. Cette technique est avantageuse pour faciliter l'étude des propriétés mécaniques de l'échantillon ou pour préserver son intégrité. En effet, un serrage automatisé avec une consigne en force peut déformer de manière irréversible un micro-objet ou une cellule. Dans l'assemblage de pièces rigides, le serrage est, en revanche, facilement automatisé. Dans ce cas, l'interaction "utile" est celle de l'objet manipulé avec son site d'assemblage. Ces forces ne sont actuellement pas mesurables.

Dans le cas des **pointes AFM**, le système le plus abouti en termes d'applications est celui de l'Université de Caroline du Nord²⁴. Le **nanoManipulator** comporte un AFM utilisé pour l'imagerie et la manipulation. Une image 3D est obtenue grâce un parcours rapide de l'échantillon avec la pointe AFM. Puis, les auteurs manipulent des objets nanométriques sans pouvoir rafraichir l'image en temps réel. Le retour haptique localise l'objet en cours de déplacement et donne une estimation de la surface en la touchant. Les auteurs étudient ainsi les propriétés élastiques des fibrines, des virus, de l'ADN et des nanotubes. Aucun détail n'est donné sur le couplage et l'intensité des sensations. Les forces latérales ne sont pas renvoyées à l'utilisateur, bien qu'elles soient mesurées pour l'identification des propriétés mécaniques. Les mesures effectuées étant de grande précision, il faut éviter les perturbations induites par le couplage bilatéral.

Par exemple, des travaux montrent que les sauts brutaux dûs aux phénomènes d'"attraction" et de "collage" de l'AFM (voir Fig. 1.9 et 1.10(a) et (b)) peuvent provo-

23. [Khan 2010], [Vijayasai 2010]

24. [Guthold 2000]

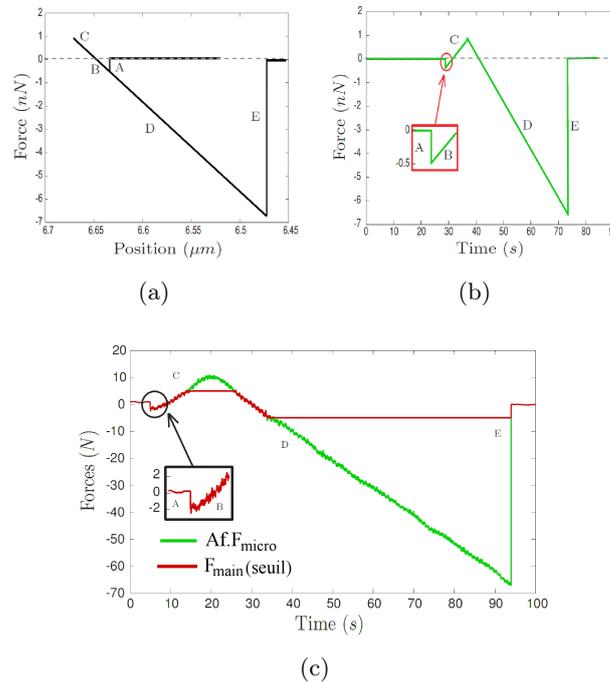


FIGURE 1.10 – Courbes théoriques caractéristiques d'une tâche d'approche-retrait : Force en fonction de la position (a) et force en fonction du temps (b). Les étapes A et E montrent respectivement les sauts brusques lors des phénomènes d'attraction et de collage. Ces phénomènes peuvent être ressentis par retour d'effort (c) à condition d'appliquer des seuils et de réduire le gain en position, afin d'éviter les phénomènes d'instabilité (voir Fig. 1.5(c)) : $A_d = 50 \cdot 10^6$, $A_f = 6700 \cdot 10^6$. L'opérateur doit alors parcourir 50m pour effectuer un déplacement de 1 μm avec l'outil ($K = 0,05 \text{ N.m}^{-1}$). Extrait de [Bolo pion 2008]

quer des phénomènes d'instabilité dans le système télé-opéré²⁵. En réalisant un seuil sur l'amplitude des forces et en augmentant l'homothétie en position, ces sauts dynamiques peuvent être perçus sans entraîner d'oscillations dans le couplage (voir Fig. 1.10(c)). Par contre, l'opérateur a une course plus importante à parcourir pour effectuer chaque tâche, rendant le processus lent et fastidieux. La solution proposée pour l'AFM afin de réduire les oscillations rémanentes est d'introduire des amortisseurs dans le couplage. La manipulation est stable, mais l'information renvoyée est détériorée et les nombreux gains des contrôleurs sont difficiles à régler (voir Fig. 1.6(a)).

Pour éviter l'introduction de filtres arbitraires, il a été envisagé de circonvier aux problèmes d'attraction et de collage en utilisant une autre forme de support pour la micro-pointe : des **micro-diapasons** de raideurs très élevées (45 kN.m^{-1}) qui ne sont pas soumis à ces sauts dynamiques. De plus, ces supports sont des capteurs de force intégrés. En mettant le diapason en résonance et en mesurant sa variation d'amplitude ou de fréquence, il est possible de mesurer les efforts dans l'axe de la pointe. Cette proposition résout le problème de manière physique et transparente²⁶. Mais la mesure

25. [Bolo pion 2008]

26. [Venant 2010]

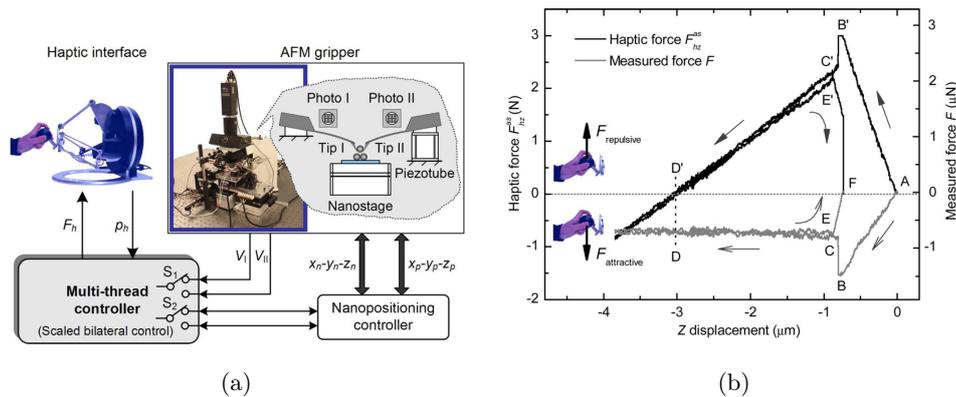


FIGURE 1.11 – Modification stratégique du retour d’effort pour assister l’opérateur dans une tâche de saisie-dépose avec 2 points AFM [Bolopion 2010]. L’opposé de la force mesurée est renvoyé et un ressort virtuel aide l’opérateur à trouver la hauteur optimale de déplacement latéral (D-D’).

de la variation de fréquence est une technique couteuse. Les résultats affichés montrent des mesures de force bruitées qu’il est nécessaire de filtrer. De plus, la raideur des micro-diapasons rend les tâches de manipulation très délicates, car ce support se déforme peu et ne s’adapte pas aux formes des échantillons.

Dans ces travaux, la mesure des forces reste uni-axiale. Cette contrainte est très limitante pour tous les auteurs. Des travaux récents proposent de travailler avec des informations données par la flexion²⁷ ou avec le mode dynamique de la poutre AFM²⁸. Dans ces deux cas, la connaissance des paramètres expérimentaux n’est pas assez fiable pour remonter aux forces latérales réelles. Un retour d’effort doit être conçu à partir de ces mesures afin d’assister l’opérateur. En général, le ressenti est conçu de manière à donner à l’opérateur l’impression d’un ressort centré sur une position d’équilibre, soit la position favorable pour la manipulation. Ce type de retour haptique est une métaphore des interactions puisqu’il est tout de même basé sur une mesure en temps réel. La troisième proposition de Bolopion et al.²⁹ est d’utiliser **deux pointes AFM** pour saisir un micro-objet. Ils exploitent la mesure de flexion pour avoir un ressenti réel de la saisie et de la dépose lors d’une tâche d’assemblage (voir Fig 1.11(a)). L’information restituée par les deux AFM est plus riche que celle des micropinces puisque la mesure de la force de serrage est accessible, mais également l’interaction axiale de l’objet saisi avec le substrat.

Même si une mesure réelle des forces est possible dans ce cas, il a semblé plus pertinent pour améliorer la dextérité de modifier le ressenti (voir Fig. 1.11(b)). Premièrement, la force de serrage est fixée lors de la saisie puis maintenue par la synchronisation des deux pointes. Cette force provoque une flexion constante sur chaque pointe qu’il est possible de soustraire afin de soulager l’opérateur. Deuxièmement, lorsque l’objet est détaché du substrat, une force d’attraction s’oppose au mouvement de l’opérateur. Si l’opposée

27. [Bolopion 2009]

28. [Bolopion 2010]

29. [Bolopion 2009]

de l'interaction est renvoyée, elle devient favorable à la tâche de saisie. Ces métaphores d'interactions sont utilisées comme approches stratégiques vis à vis de tâches précises. Elles peuvent être conçues après une exploration réelle des interactions afin de rendre la manipulation plus confortable.

Obtenir des informations tridimensionnelles sur les interactions avec une pointe AFM est complexe. Des systèmes de réalité augmentée sont aujourd'hui élaborés pour compenser cette limitation³⁰. Basés sur des modèles simplistes des phénomènes du micromonde, ils ne peuvent pas être utilisés pour l'exploration ressentie. L'effort de développement de simulations mécaniques en temps réel n'a pas encore été récompensé par des résultats tangibles de micromanipulation. Les techniques sans contact peuvent apporter une réponse à l'accès à ces mesures tridimensionnelles.

1.2.3 Pinces magnétiques et optiques

Van West est le premier auteur à formaliser le concept de retour d'effort pour les techniques sans contact³¹. La lévitation évite les phénomènes d'adhésion et de friction qui peuvent détériorer les objets. Ces techniques sont plus sensibles aux perturbations et nécessitent des opérateurs expérimentés. L'assistance par retour d'effort est un moyen de rendre ces outils plus abordables. Un couplage bilatéral à une dimension a été réalisé sans grande difficulté pour des manipulateurs **magnétiques** macroscopiques de 3 mm et 12,5 mm (voir Fig. 1.12). Une évaluation utilisateur valide l'apport de l'haptique, mais aucune comparaison n'a été effectuée avec les techniques de pinces classiques qui peuvent être utilisées à ces échelles.

Ce travail est la seule tentative connue de retour d'effort avec des pinces électromagnétiques en vue de micromanipulation. Les prototypes utilisant les forces optiques sont plus nombreux. Le professeur Arai est le premier à réaliser un système de **pinces optiques** à retour d'efforts³². La mesure des efforts est réalisée à partir de l'image de l'objet piégé sur une photodiode à quadrant. Un retour bidimensionnel satisfaisant a été établi pour une microsphère de 10 μm piégée dans l'eau, loin de tout obstacle. Pour déplacer des levures en utilisant une manipulation indirecte, des microbilles sont piégées et servent de micro-outils à retour d'effort. Les résultats ne décrivent pas le retour haptique et son apport, car la photodiode s'avère limitée en espace de travail et à l'approche d'obstacles ou d'objets à manipuler indirectement.

Une autre équipe japonaise a également proposé de palper une cellule à l'aide d'une pince optique télé-opérée³³. L'application est intéressante mais aucun résultat n'est présenté. D'autres travaux ont été menés pour donner une sensation d'interaction avec des nanofils³⁴. Le retour d'effort est élaboré à partir d'une mesure de la position de l'objet par rapport à un piège linéaire. Il consiste à contraindre le mouvement de l'opérateur en fonction de l'erreur de position afin de ne pas perdre l'objet. La manipulation de nano-tubes est très complexe et ambitieuse, et le prototype présenté se heurte malheureusement à de nombreuses difficultés de piégeages. L'optimisation de

30. [Li 2004, Vogl 2006]

31. [van West 2007]

32. [Arai 2000]

33. [Sugiura 2008]

34. [Lee 2007]



FIGURE 1.12 – Concept de pince haptique sans contact [van West 2007]

l'installation doit être menée pour obtenir de meilleurs résultats. Dans ces deux cas, la mesure de force est réalisée par l'intermédiaire d'une caméra. Ces capteurs sont lents comparés aux photodiodes, mais permettent d'élargir l'espace de travail et de gérer les perturbations optiques induites par un milieu biologique par exemple.

Des travaux importants ont été proposés sur les guidages virtuels. Ainsi pour palier une mesure d'effort en temps réel, l'équipe de Basdogan propose un pré-traitement d'image de la scène afin de repérer les obstacles³⁵. L'opérateur est ensuite assisté par un retour haptique afin de les éviter. Ce genre de guidage virtuel est également appliqué à des tâches d'assemblage. Les évaluations utilisateurs montrent de très bons résultats sur le gain de précision. Néanmoins, les efforts investis dans la réalisation d'un guidage efficace et reproductible sont les mêmes que pour l'automatisation complète de la tâche. La télé-opération perd sa justification.

Les techniques sans contact sont prometteuses, mais elles sont encore largement sous exploitées pour le retour haptique. Elles sont également moins répandues que l'AFM, mais commencent à être connues pour leur flexibilité. La mesure des efforts tridimensionnels est accessible et certains travaux avancent un contrôle de la rotation et du couple axial³⁶. Le couplage avec ces techniques suscite peu de détails dans les publications (voir tableau 1.1). Aucune indication ne définit clairement les avantages ou les inconvénients de ces techniques vis-à-vis de la stabilité, par exemple. Pourtant, les faibles raideurs offertes par ces outils et leurs dimensions réduites les rendent moins sujet aux fortes dynamiques et aux forces d'adhésion. Ces propriétés intrinsèques représentent un sérieux avantage pour le couplage haptique bilatéral.

35. [Bukusoglu 2008]

36. [Gutiérrez-Medina 2010]

	Citation	Dim. (μm)	Capteur de force	Interface haptique	Sensations	Couplage (Ad, Af)	Remarques
Micropince	[Khan 2010]	500	Courant induit des moteurs	Haptic Gripper (Delf TU)	Réelles, 1D	Position-Force	Saisie et dépose d'une microsphère
	[Vijayasai 2010]	45	Capacitif intégré	Falcon (Novint)	Réelles, 1D	Pas décrit	Manipulation de billes de polystyrène. Peu de détails sur les sensations.
AFM	[Guthold 2000]	< 1	Levier optique	Phantom (Sensable)	Réelles, 1D	Pas décrit	Lithographie d'objets nanométriques et manipulation de nanotubes. Pas de description des sensations
	[Bolopion 2008]	HS	Levier optique	Virtuose (Haption)	Réelles, 1D	Direct	Sensation du pull-in et pull-off caractéristique de l'AFM
	[Venant 2010]	10	Diapason dynamique	Ergo	Réelles, 1D	Direct	Évaluation de l'élasticité d'une membrane de PDMS de 10 μm d'épaisseur.
	[Bolopion 2009]	50	Levier optique	Virtuose (Haption)	Métaphore, 2D	Passif	Sensation du roulement d'une bille sous la poutre AFM
	[Bolopion 2010]	4-6	Levier optique (dynamique)	Virtuose (Haption)	Métaphore, 1D + Virtuel, 1D	Passif	Mise en contact de la pointe avec une microsphère
AFM x2	[Bolopion 2010]	4-6	Levier optique	Omega (Force dimension)	Réelles, 1D ou Métaphore, 1D	Passif	Sensation lors d'une tache de prise et de dépose complexe de microsphères

Citation	Dim. (μm)	Capteur	Interface haptique	Sensations	Couplage	Remarques
Pince électro-magnétique [van West 2007]	> 3000	Capteur optique linéaire	Omni (Sensible), maison	Réelles, 1D	Détailé, pas évalué	Saisie et dépose de bille de fer macroscopique. Amélioration de l'efficacité à la dépose
Pince optique [Arai 2000]	10	Photodiode à quadrant	Phantom (Sensible)	Réelles, 2D	Peu détaillé	Mouvement libre de bille de polystyrène
[Sugiura 2008]	3	Caméra	Phantom (Sensible)	Réelles, 2D	Peu détaillé	Interactions avec des cellules avec des billes de polystyrène. Pas de description des sensations
[Lee 2007]	0, 300	Caméra	Delta 6D (Force dimension)	Métaphore, 2+1D	Pas décrit	Manipulation de nanofils de 10 μm de long et 300nm de diamètre. De nombreux problèmes liés à la conception
[Bukusoglu 2008]	3	Caméra	Omni (Sensible)	Guide virtuel, 2D	Aucun	Assemblage de microsphères fonctionnalisées. Amélioration de la précision d'assemblage

TABLE 1.1 – Etude des systèmes de télé-micromanipulations avec des retours d'efforts. Le terme "métaphore" signifie que l'information mesurée est restituée de manière déformée pour assister l'opérateur. La mention "virtuelle" indique que l'information restituée n'est pas mesurée mais obtenue à partir d'une simulation.

1.3 Nouvelle approche : une conception dédiée au retour d'effort

Les précédents travaux (voir tableau 1.1) présentent tous le même point commun. L'origine du besoin vient de l'acquisition ou de la réalisation d'un système de micromanipulation difficile à utiliser. Les chercheurs confrontés à leurs outils ont tenté des collaborations avec des équipes de télé-opération afin de gagner en confort et en dextérité de manipulation. Des interfaces dédiées ont été conçues dans ce sens, mais le système lui-même de micromanipulation n'a pas été remis en question. Nous proposons dans ce mémoire une nouvelle approche : puisque l'assistance par retour haptique semble une solution incontournable pour gagner en dextérité dans le micromonde, il faut reconcevoir les installations de micromanipulation dans ce but. Dans la suite de ce chapitre, des éléments de réflexion sont proposés pour la réalisation d'un micromanipulateur à retour d'effort permettant des sensations réalistes et exploitables. Pour atteindre cet objectif, il faut reconsidérer les besoins réels des opérateurs et les contraintes imposées par l'environnement, afin d'éviter les écueils des précédents prototypes.

1.3.1 Le besoin

Les besoins peuvent être classés selon quatre types : ceux du concepteur-fabricant, du distributeur, de l'utilisateur universitaire et de l'utilisateur industriel. Le concepteur a besoin d'une interface intuitive pour augmenter l'intelligence de son système et la complexité des fonctionnalités. Le distributeur vise un large panel de clients : du novice à l'utilisateur expérimenté. Si le laboratoire n'est pas familier avec les principes utilisés pour la micromanipulation, il achètera un système clef en main pour gagner en temps de conception et de prise en main. L'industrie a des besoins de rapidité sur des tâches répétitives ou des besoins précis sur des diagnostics complexes. Elle souhaite également réduire le temps de formation et de prise en main des nouveaux outils pour ses opérateurs.

En 2006, le rapport de prospective sur les micro et nano systèmes réalisé par le comité d'experts Micro et Nano Systèmes du CNRS-STIC³⁷ a confirmé le fait que "les utilisateurs finaux ne se soucient pas de la technologie : seule compte pour eux la fonctionnalité offerte, et le coût de celle-ci". Les outils comme les produits de la micromanipulation demandent de bien connaître les besoins des utilisateurs finaux. Un dialogue avec chaque partenaire autour de chaque application est particulièrement crucial dans ce domaine pour rentabiliser les investissements importants engagés.

Une étude du besoin est établie en vue de la conception d'un micromanipulateur à retour haptique. Elle est réalisée à partir de plusieurs entretiens avec des laboratoires

37. [Bosseboeuf 2006]

de biologie^{38 39 40 41}, de physique^{42 43 44}, une entreprise spécialiste de la conception de systèmes industriels de micromanipulation et de micro-assemblage⁴⁵ et un fournisseur de pièces détachées pour les installations de microscopie⁴⁶.

La première conclusion de ces entretiens est en premier lieu un fort besoin d'augmenter l'immersion. Il existe un réel problème de dextérité des opérateurs à cause du peu d'informations sensorielles retournées du micromonde. Principalement, ils manipulent uniquement avec la vision 2D sous microscope. Un besoin très marqué est exprimé en faveur d'une vision 3D, réelle ou en réalité augmentée.

Pour les techniques de retour d'effort, les interlocuteurs sont en général mal informés. Ces techniques sont absentes de leur quotidien et ils n'ont jamais envisagé leurs interfaces professionnelles sous cet angle. Quelques systèmes sont équipés de joysticks. Les utilisateurs voient clairement le bénéfice apporté par cette manette, comparée à la souris informatique classique. Néanmoins, ils regrettent le manque de ressemblance de l'interface avec l'outil de micromanipulation. En particulier, les opérateurs habitués à la manipulation par pince s'adaptent mal à un joystick pour contrôler une micropince. De plus, les joysticks sont actionnés en rotation autour de leur support tandis que les microrobots réalisent des tâches en translation. La commande opère donc une conversion de l'angle en vitesse des actionneurs. Cette contrainte handicape la précision et entraîne de nombreux dépassements et des besoins de corrections qui, finalement, ralentissent la tâche.

Après avoir été informés sur les techniques haptiques, les interlocuteurs ont fait l'effort de projeter leur application avec une nouvelle interface. En général, les avis des chercheurs sont mitigés pour l'utilisation directe de ces techniques sur leurs projets actuels. Par contre, ils ont tous noté un potentiel pour réaliser de nouvelles expériences plus ambitieuses. Le retour haptique pourrait apporter à la créativité scientifique. Les limites actuelles des expériences et de la vision sous microscope pourraient être repoussées et de nouveaux types de manipulation deviendraient accessibles. Ces opérations seraient, par exemple, manipuler des objets invisibles sous microscopes optiques (ADN, nanotubes) ou sonder des objets tridimensionnels (cellules, cristaux).

Les industriels attendent des prototypes d'installations à retour d'efforts fonctionnels et des démonstrations sans équivoques par leurs fournisseurs. Un ressenti abouti est le seul argument convaincant à leur proposer.

Le retour haptique a besoin de se développer et de se faire connaître dans les milieux de la micromanipulation. Pour cela, il faudrait que les travaux dans ce domaine proposent des résultats sur des tâches réelles et quotidiennes. La technologie est disponible, mais la réunion de compétences multidisciplinaires fait souvent défaut pour une conception de prototypes utilisables. La pluridisciplinarité de ce domaine implique souvent une

38. Laboratoire de Nanobiophysique, ESPCI, Paris

39. Institut Jacques Monod, Paris

40. Laboratoire de Biorhéologie et d'Hydrodynamique Physico-chimique, Paris

41. Laboratoire de Neurophysiologie et des nouvelles microscopies, Paris

42. Laboratoire Aimé Cotton, Orsay

43. Optique Group, Université de Glasgow

44. Nanophysics and Soft Matter Group, Université de Bristol

45. Percipio Robotics

46. Thorlabs

collaboration entre plusieurs laboratoires. Les enjeux sont pour chacun différents et la cohérence est difficile à maintenir. Il en résulte l'inadéquation entre le besoin et la conception des télé-micromanipulateurs.

1.3.2 Le cahier des charges

La synthèse de l'état de l'art et l'étude du besoin ont pour objectif d'analyser les besoins d'une installation dédiée au retour d'effort dans son contexte. Le cahier des charges suivant traite des caractéristiques recommandées pour le micromanipulateur, les interfaces haptiques et le couplage.

Performances

Un micromanipulateur possède en général de très bonnes performances en résolution spatiale. Les distances appréhendées sont de l'ordre du nanomètre tant pour les actionneurs que les capteurs. Le ratio résolution ($\approx 1\text{nm}$) - espace de travail ($\approx 100\mu\text{m}$) est de $1 : 10^5$. La main de l'opérateur ne dispose pas d'un tel ratio : les interfaces autorisent moins d'un demi-mètre d'espace de travail pour une sensibilité de quelques millimètres. La résolution spatiale du micromanipulateur doit être compatible avec celle de l'interface haptique.

Par contre, un plus grand soin doit être porté sur l'espace de travail. Un environnement contraint rend l'opérateur moins performant. L'outil et l'interface doivent donner des capacités d'interaction sur un grand domaine, au moins celui donné par la vision de la scène. Or, les micromanipulateurs ont en général un domaine de mesure de force limité par les caractéristiques de l'outil ou le phénomène utilisé. Cette forte contrainte limite le nombre de candidats dans les techniques de micromanipulation.

Il est également important que l'outil soit rapide et puissant vis-à-vis de la tâche à effectuer afin que celle-ci puisse être réalisée facilement et rapidement. L'opérateur interagit de façon haptique et développe des efforts. Si les gains homothétiques ou les performances de l'outil ne sont pas bien réglés, il risque de se fatiguer rapidement.

La résolution temporelle est liée à l'échantillonnage des systèmes à commande numérique. L'interface et le micromanipulateur produisent des signaux en escalier. L'opérateur humain perçoit des discontinuités de l'ordre de la milliseconde. Il faut donc appliquer des fréquences d'échantillonnage supérieures au kilohertz, fréquences pas toujours disponibles sur les micromanipulateurs. De même, pour exploiter au mieux les capacités tactiles humaines, les systèmes intégrés à la boucle haptique doivent dans l'idéal posséder une bande passante des informations supérieure au seuil temporel de perception. Aucune interface haptique et peu de micromanipulateurs sont aujourd'hui capables de telles performances.

Sensations tactiles

Cette dernière propriété est intrinsèquement liée à la qualité des sensations haptiques évaluée par la transparence. Un système transparent donne une sensation réaliste des interactions mises en jeu afin que l'opérateur puisse apprendre et anticiper dans le micromonde. La transparence est souvent détériorée par les organes lents, sujets aux

retards ou à faible bande passante. L'échantillonnage, les frottements et l'inertie sont souvent la source de ces mauvaises performances.

La définition de la transparence donnée par Lawrence⁴⁷ est considéré comme une référence dans le domaine de la téléportation. Elle est ainsi défini par la plage fréquentielle potentiellement transmise à l'opérateur par le système télé-opéré. Outre, la qualité du spectre fréquentiel, il est également important de veiller à transmettre des amplitudes contrastées, afin de permettre au sens humain de discriminer les changements. La tâche et les gains doivent être envisagés de manière à produire un profil de forces facilement identifiable. Certains micromanipulateurs, tels que les pointes AFM, sont soumis à des efforts d'ordres très différents (de la centaine de pN au mN). Cette plage ne peut pas être rendue par une interface limitée à un ordre de grandeur (de 1 à ~ 10 N). Il faut donc concevoir le couplage afin de rendre perceptible l'information utile.

Pour renforcer la sensation d'immersion de l'utilisateur, l'interface doit rappeler intuitivement l'outil de micromanipulation. Dans l'idéal, elle pourrait comporter les mêmes degrés de liberté et d'interaction que l'effecteur. Un micromanipulateur interagissant dans le plan doit être couplé à une interface plane. La poignée doit également se rapprocher de la forme de l'outil. Un outil long peut être imité par un stylet, une microsphère par une poignée sphérique.

Sécurité

L'utilisateur manipule cette interface soit en la serrant dans sa main soit en la maintenant avec le doigt. Il ne faut donc pas oublier qu'il est directement en contact avec un robot actif produisant des forces importantes. Le système peut blesser l'opérateur s'il n'est pas correctement contrôlé. La présence d'organes non passifs tels que les gains homothétiques du couplage renforce ce risque.

Si un couplage complexe introduisant des filtres doit être écarté pour une meilleure transparence et prise en main de l'outil, les autres composants doivent se comporter de manière à ne pas entraîner d'instabilités. Plusieurs pistes ont été présentées dans l'état de l'art. La technique de micromanipulation peut être choisie de manière à éviter les phénomènes dynamiques brusques. Des raideurs faibles de l'outil et un environnement visqueux peuvent agir en faveur de la stabilité sans perturber la transparence.

Stratégie de manipulation

En micromanipulation, les stratégies de préhension sont variées et font appel à des phénomènes tels que l'adhésion, la dépression, la capillarité, les champs magnétiques, électromagnétiques, électrostatiques... Par contre, au niveau macroscopique, la diversité des stratégies de manipulation se caractérise plutôt par les nombreux degrés de liberté de la main humaine, du robot manipulateur, le nombre de doigts du préhenseur et la collaboration entre plusieurs outils. L'opérateur est donc plus familier avec des préhenseurs multi-contact que des effets de lévitation ou de surface. Une réflexion doit être menée sur ce point pour déterminer si un opérateur de micromanipulation est plus habile avec un préhenseur sans contact, mono-contact ou multi-contact. Le

47. [Lawrence 1993]

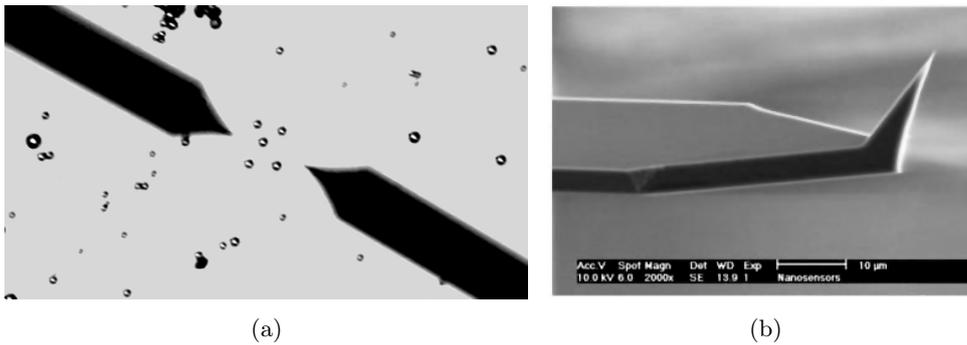


FIGURE 1.13 – (a) Encombrement visuel d’une scène de manipulation avec 2 doigts AFM (d’après [Bolopion 2010]). (b) Vue latérale de la pointe AdvancedTEC FM chez Nanosensors

micromanipulateur et l’interface doivent idéalement être modulables pour la mise en place de différents types de stratégies.

De même, le lâcher de l’objet est également une source de préoccupation. Les stratégies par dépose dynamique⁴⁸ ne sont pas compatibles avec un rendu haptique. Les stratégies de roulement⁴⁹ demandent des sources d’informations importantes pour un rendu réel des interactions⁵⁰. De préférence, le système de micromanipulation doit éviter des stratégies de lâcher où le rendu haptique n’est pas possible.

Un autre point limitant pour la manipulation est l’immersion visuelle. Les micro-outils peuvent prendre une place importante dans l’image et gêner l’opérateur dans la prédiction de trajectoire (voir figure 1.13(a)). Pour de bonnes conditions de micromanipulation avec ou sans retour haptique, il est nécessaire que l’opérateur connaisse la position des objets. Car ces derniers peuvent entrer en contact ou être occultée par l’outil. Par exemple, l’AFM utilisé dans la figure 1.13(b) a été optimisée afin que la pointe soit orientée vers l’avant (AdvancedTEC FM chez Nanosensors) plutôt que sous la poutre. Une zone de contact visible améliore la visualisation de l’interaction avec l’échantillon. En comparaison, les techniques sans contact sont plus adaptées et facilitent grandement la vue de la scène.

Economique

L’apport du système pour l’opérateur doit être une amélioration de la prise en main. Ce dernier doit pouvoir réaliser rapidement une tâche sans connaissance préalable du système, voire de la micromanipulation. Le temps gagné sur la formation et l’adaptation à la tâche rentabilise l’investissement. Le système doit être simple, intuitif et en même temps flexible pour intégrer un large domaine d’application. La technique de micromanipulation utilisée doit être répandue et facile à comprendre.

Les coûts supplémentaires induits par le retour d’effort doivent être faibles. Les interfaces haptiques utilisées doivent être bon marché. Une réévaluation de leur

48. [Haliyo 2004]

49. [Dionnet 2004]

50. [Bolopion 2009]

degré de liberté et de leur espace de travail en fonction des besoins spécifiques de la micromanipulation peut également abaisser les prix.

Le tableau 1.2 résume les différents points clefs pour un système de télé-micromanipulation idéal.

Performances	Degrés de liberté	3 translations
	Puissance du micro-outil	Très supérieure aux interactions du milieu
	Résolution spatiale	Peu restrictive, car adaptée au ratio résolution/espace de travail de l'interface
	Résolution temporelle	Elevée ($> 1 \text{ kHz}$)
	Espace de travail	Grand, de l'ordre de la scène
Sensation	Transparence	De l'ordre de la bande passante du micro-outil Peu de frottements et d'inertie dans les composants
	Efforts	Au minimum tridimensionnel en translation Amplitudes contrastées
	Immersion	Mimétisme entre l'interface et l'outil
Sécurité	Stabilité	Amortissement naturel du milieu Limitation des phénomènes d'adhésion et des fortes dynamiques
Stratégie	Préhension	Possibilité de parallélisme pour la collaboration entre plusieurs mains, doigts ou utilisateurs
	Lâcher	Possibilité de mesures de forces durant cette phase
	Encombrement	Micro-outils peu volumineux par rapport à la scène
Économique	Prise en main	Rapide Aucune connaissance technique nécessaire
	Coût	Accessible pour des organismes de formation
	Diffusion	Micromanipulateur répandu et flexible

TABLE 1.2 – Résumé des caractéristiques essentielles pour la conception d'un système de micromanipulation à retour d'effort.

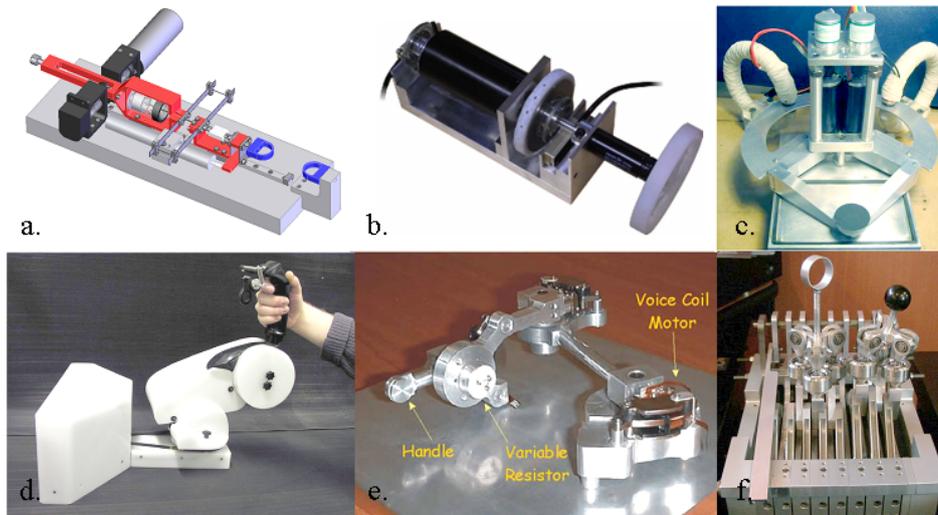


FIGURE 1.14 – Développement d'interfaces haptiques pour la micromanipulation : a. [Khan 2009a, Khan 2010], b. [Millet 2009], c. [Gosline 2007], d. [Shirinov 2003] e. [Letier 2003], f. [Venant 2010]

1.3.3 Choix du micromanipulateur

Pour répondre à ce cahier des charges exigeant, il n'est pas optimal d'utiliser des organes existants, car pour remédier à leur inadéquation des couplages complexes et peu transparents doivent être mis en place. La préoccupation première dans cette démarche est la compatibilité du micromanipulateur et de l'interface avant de réaliser un couplage. Ainsi l'interface doit être conçue ou choisie en fonction de l'application de micromanipulation retenue et le micromanipulateur en fonction du ressenti du retour d'effort.

Le domaine de l'haptique est familier avec ce type de contrainte. Les interfaces homme-machine issues de la compréhension du sens du toucher sont conçues au plus proche de l'application pour laquelle elles sont destinées. Il n'est pas étonnant que plusieurs travaux aient déjà été consacrés à la conception d'interfaces haptiques pour la micromanipulation (voir Fig. 1.14). Dans ce manuscrit les interfaces actuelles sont supposées assez avancées et l'attention s'est focalisée sur les micromanipulateurs.

Contrairement aux joysticks et interfaces, les micromanipulateurs sont conçus dans le seul but de travailler sur des objets microscopiques. L'intégration de l'utilisateur dans la commande n'est pas la priorité lors de la conception. Les contraintes de résolutions et la qualité des capteurs sont mises en avant plutôt que le confort de manipulation. Le concepteur compte sur les facultés d'adaptation de l'utilisateur et consacre peu d'efforts à l'intégration d'interfaces évoluées. Le micromanipulateur est aujourd'hui le principal verrou technologique pour une interaction bilatérale efficace avec le micromonde.

Dans notre nouvelle démarche de conception, le micromanipulateur n'est plus une contrainte fixée par le matériel disponible dans un laboratoire. Son choix n'est donc guidé que par l'objectif de retour tactile. La technique la plus adaptée pour restituer de bonnes sensations du micromonde doit être déterminée.

Dans la section 1.2, les différentes techniques existantes ont été passées en revue. En accord avec le cahier des charges, notre choix s'oriente vers une des techniques classiques et

flexibles : les pointes AFM, les micropinces, les pinces magnétiques ou optiques. L'électrophorèse et la microfluidique doivent être écartées comme toutes les techniques réalisant uniquement des mouvements de groupes, car le contrôle indépendant de chaque objet n'est pas possible. Un retour d'effort ciblé n'est donc pas applicable à ces techniques.

Les micro-outils avec contact résultent de la miniaturisation d'outils conventionnels. Pour des raisons d'encombrement, les **micropinces** ne possèdent qu'un seul capteur d'effort. Elles fournissent donc uniquement des informations sur les forces de serrage. L'automatisation du serrage est en cours de développement. Il donne de bons résultats dans une utilisation en laboratoire, et ne présente pas de grande difficulté. Cependant, un retour haptique sur ce degré de liberté n'a pas de grand champ d'application. Les autres interactions n'étant pas actuellement disponibles pour ce type d'outil, un retour d'effort réel n'est pas accessible. Même si un travail de conception d'interface de contrôle intuitive est envisageable, le retour haptique n'est possible que couplé à de la réalité augmentée ou virtuelle.

Les **pointes AFM** fournissent des informations sur les efforts de flexion et de torsion exercés sur la poutre. Des modèles estiment les forces tridimensionnelles, mais impliquent la connaissance de nombreux paramètres géométriques de la poutre et de l'échantillon. Par commodité, des métaphores sont conçues à partir des mesures pour simplifier la reconstruction des interactions.

Les **pinces optiques et magnétiques** sont basées sur des champs de potentiels. Ceux-ci présentent une zone de comportement linéaire des forces par rapport à la position (voir Fig. 1.15). En restreignant la mesure à ce domaine, des efforts tridimensionnels sont facilement accessibles avec un capteur de position et une calibration de raideur. Le contrôle en rotation et en couple sont aujourd'hui en cours de développement⁵¹. Ces outils sans contact se montrent également très flexibles. Ils peuvent manipuler directement en lévitation des particules aux propriétés imposées, mais également indirectement des particules quelconques en utilisant des micro-outils piégés. Par exemple, ces micro-outils sont faciles à remplacer après leur détérioration ou une adhésion irréversible. Il suffit de relâcher le piège et de choisir une nouvelle particule en suspension dans l'échantillon. La taille des micro-outils occasionne une vision de la scène moins encombrée qu'avec les techniques "avec contact".

Les dimensions de l'outil présentent un autre avantage pour un retour haptique de grande qualité. Des outils présentant de faibles surfaces sont moins sujets aux problèmes d'adhésion. Les dynamiques issues de forces d'adhésion raisonnables sont plus faciles à rendre à l'échelle macroscopique. L'expérience des pointes AFM a montré qu'il est difficile de créer un retour haptique des phénomènes brusques de collage et de détachement⁵². De plus, les stratégies de dépose sont inutiles dans la manipulation sans contact direct. Les faibles forces d'adhésion simplifient grandement la manipulation indirecte avec des micro-outils piégés. Cette propriété garantit la qualité du contact avec les objets à manipuler et provoque une mesure d'effort symétrique et continue durant la phase d'approche-retrait (voir Fig. 1.15).

51. [Gutiérrez-Medina 2010]

52. [Bolopion 2008]

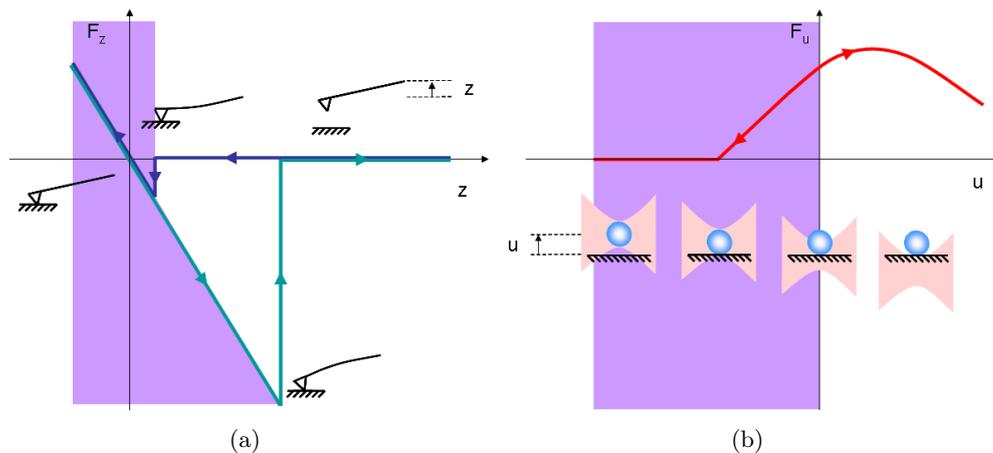


FIGURE 1.15 – Courbe théorique d'approche-retrait d'une surface pour une pointe AFM (a) et un micro-outil dans une pince optique(b). La zone en violet indique le domaine continu de mesure. Pour la pince optique, la mesure est tridimensionnelle et la coordonnée u représente l'axe x , y ou z .

Le rendu des efforts microscopiques peut également profiter des faibles raideurs des pinces optiques et magnétiques comparées aux pointes AFM (voir tableau 1.3). Elles sont favorables à l'augmentation du gain homothétique de force et peuvent rendre des ordres de grandeur en effort plus petits. Dans la même idée, il est possible de rendre l'environnement favorable au rendu haptique. En effet, de nombreux phénomènes d'adhésion sont réduits dans les milieux aqueux : par exemple, la conductivité de l'eau limite les forces électrostatiques. Sa viscosité amortit également fortement la dynamique des objets mis en mouvement. Elle agit comme un amortisseur naturel et aide à dissiper les surplus d'énergie induits par les amplificateurs du couplage haptique. D'autres milieux présentent des viscosités plus importantes. Mais il faut se rappeler que la résistance visqueuse est restituée à l'opérateur. Pour ne pas le fatiguer, il est envisageable de soustraire les effets de la résistance visqueuse, car son influence est facilement modélisable.

Les trois techniques comparées ont des domaines d'application et de forces différents. Il existe néanmoins un domaine commun : l'étude de la biologie moléculaire (voir Fig. 1.16). Les trois techniques sont utilisées pour l'étude de l'ADN⁵³. L'utilisation d'une technique avec contact dans ce cas, se montre très intrusive et possiblement contaminante pour le milieu biologique. Les pinces magnétiques et optiques sont en plein essor dans ce domaine. Il est possible de départager ces deux dernières par des considérations de conception.

Les **pinces électromagnétiques** nécessitent des électro-aimants difficiles à réaliser et un système de commande en position pour créer des pièges stables. Ces systèmes comprennent donc une boucle de rétroaction avec un contrôleur à régler. Encapsuler cette première régulation dans une boucle haptique revient à réaliser un système automatique complexe avec de nombreux paramètres à déterminer.

53. [Neuman 2008]

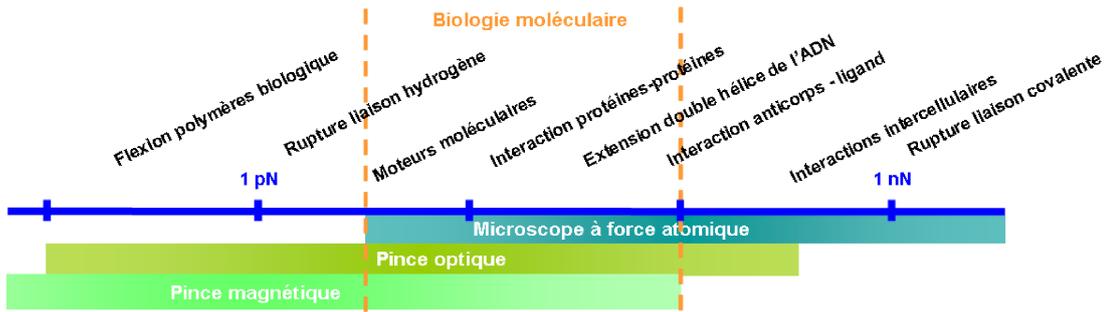


FIGURE 1.16 – Comparaison des domaines d'applications des trois principales techniques de micromanipulation.

Propriétés	Pince électromagnétique	Pince optique	AFM
Contrôle	Individuel	Individuel	Individuel
Type outil	Magnétique	Diélectrique	Micro-pointe
Taille outil (μm)	0,5 – 5	< 20	100 – 250
Forces (pN)	0,01 – 100	0,1 – 400	$10 - 10^4$
Raideur ($N.m^{-1}$)	10^{-7}	$10^{-7} - 10^{-3}$	$10^{-2} - 10^2$
Milieu	Air et eau	Eau	Air et eau
Parallélisme	1 piège	1 à 200 pièges	1 ou 2 pointes

TABLE 1.3 – Comparaison des techniques de microscopie à force atomique aux pinces magnétiques et optiques. Cette comparaison se base notamment sur l'article de Neuman comparant ces systèmes pour l'étude des molécules [Neuman 2008]

Les **pinces optiques** ont l'avantage de créer des pièges stables par la seule focalisation d'un laser par un objectif de microscope. Aucun actionneur, ni capteur n'est nécessaire pour assurer le maintien en position. Le déplacement du piège est réalisé par une légère déflexion du laser qui peut être réalisée par un miroir et un petit moteur. Cette technique se montre plus simple de conception et plus flexible en terme d'actionnement.

Un autre argument doit également être attribué en faveur des pinces optiques : une collaboration élevée de micro-outils est possible. Des techniques d'actionnement holographiques peuvent produire jusqu'à 200 pièges contrôlables individuellement en trois dimensions. D'un premier abord, il peut ne pas sembler essentiel que les micro-outils puissent être mis en parallèle. Mais la dextérité humaine est habituée à réaliser des tâches avec plusieurs doigts, deux mains ou en collaboration avec une autre personne. Le haut degré de parallélisme permis par les pinces optiques est un avantage important pour des stratégies complexes de préhension.

Les pinces optiques semblent présenter le meilleur compromis actuel pour réaliser une installation dédiée au retour d'effort. La suite de ce manuscrit propose différentes pistes d'amélioration de ces systèmes afin d'obtenir des sensations accrues et exploitables dans le micromonde.

Les pinces optiques et le retour d'effort

Sommaire

3.1	La boucle haptique	67
3.1.1	Le micromanipulateur	68
3.1.2	L'interface haptique	71
3.1.3	Le couplage	72
3.1.4	L'environnement	75
3.1.5	La boucle fermée	76
3.2	Les performances	78
3.2.1	La stabilité	80
3.2.2	La limite de confort	85
3.2.3	La transparence	86
3.3	Influence des paramètres	91
3.3.1	L'actionneur et de l'échantillonnage	92
3.3.2	Le piège	94
3.3.3	L'interface haptique	96
3.3.4	Limitations	98
3.3.5	Conclusion	98

Le chapitre précédent présente les propriétés intrinsèques des pinces optiques pour la micromanipulation automatique ou télé-opérée : une raideur faible, la possibilité de les utiliser dans un environnement aqueux, la flexibilité au regard des applications et finalement la capacité de parallélisation. Ces outils semblent pouvoir ouvrir de nouvelles applications en microrobotique¹.

Ce chapitre va décrire en détail les différentes composantes de ces systèmes. En particulier, un état de l'art étudie l'ensemble des configurations possibles à partir des éléments de base et se focalise sur les comparaisons en termes de performances temporelles. Une conception dédiée est ensuite proposée pour exploiter pleinement les capacités de ces systèmes. Enfin, une première démonstration est entreprise dans un laboratoire spécialiste du domaine pour évaluer la chaîne de télé-opération associée à une pince optique.

1. [Rodrigo 2009]

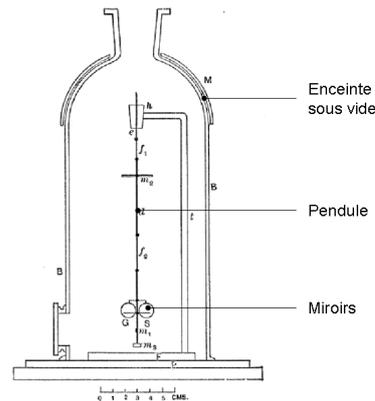


FIGURE 2.1 – Le radiomètre de Nichols consiste en un pendule réfléchissant dans une enceinte fermée. Un éclairage puissant induit une deflexion sur le pendule lorsque la pression gazeuse est basse. Si la pression gazeuse est élevée, la pression thermique (particules du gaz) est plus forte que la pression lumineuse (photon particulaire).

2.1 État de l'art des pinces optiques

Les pinces optiques se basent sur les phénomènes de pressions lumineuses ou forces optiques. En 1871, le professeur Maxwell a découvert à partir de sa théorie des champs électromagnétiques, le potentiel de la lumière à exercer une pression de radiation. Les seuls phénomènes observables mettant en jeu cette force sont l'influence du soleil sur la direction des queues des comètes. En effet, les particules constituant une traînée à l'arrière d'une comète ne suivent pas sa trajectoire, mais sont déviées par l'étoile la plus proche, comme poussées par une pression radiative.

La mise en évidence expérimentale de ces forces a été réalisée en 1900 par Lebedev sur des particules macroscopiques et en 1901 par Nichols et Hull sur des gaz² (voir figure 2.1). Il faut ensuite attendre les années 1960 pour obtenir des sources lumineuses suffisamment puissantes pour exploiter ce phénomène. Les lasers (light amplification by stimulated emission of radiation) sont des faisceaux de lumière cohérents spatialement et temporellement. Ils ont rapidement permis d'accélérer, de piéger des microparticules et de refroidir des atomes.

2.1.1 Principe

Dans son histoire du piégeage optique³, Ashkin raconte sa démarche pour découvrir les pinces optiques. Sa démonstration est simple et peut être ainsi résumée : si h est la constante de Planck et ν la fréquence du rayonnement ($\nu = c/\lambda$), alors l'énergie d'un photon est égale à $h\nu$ et la quantité de photons contenus dans un faisceau de puissance P est $P/h\nu$. De même, la quantité de mouvement d'un photon étant $q = h\nu/c$, le bilan des quantités de mouvement à la surface d'un miroir plat s'écrit :

$$q_{tot \text{ incident}} - q_{tot \text{ reflechi}} = \frac{P}{h\nu} \cdot \frac{h\nu}{c} - \frac{P}{h\nu} \cdot \frac{-h\nu}{c} = \frac{2P}{c}$$

2. [Lebedev 1901, Nichols 1901]

3. [Ashkin 2000]

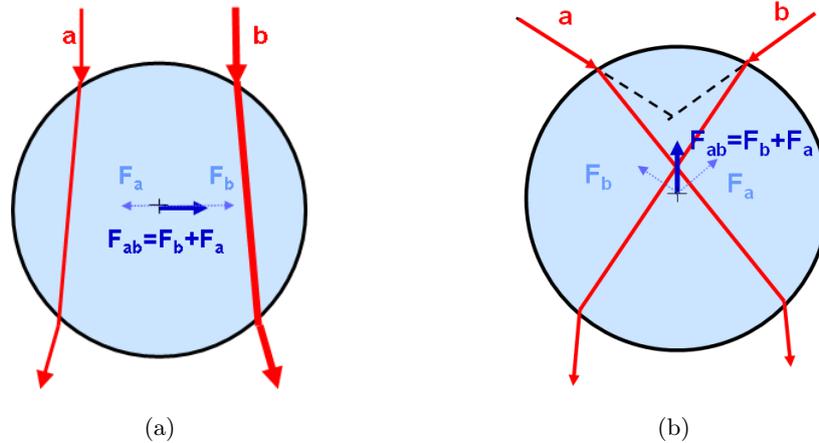


FIGURE 2.2 – (a) Schéma illustrant la force optique due au gradient d'intensité du laser. Le laser est collimaté gaussien et traverse une microsphère. Celle-ci dévie deux faisceaux d'intensités différentes. La variation de la quantité de mouvement des photons produit une force dans le sens du gradient d'intensité. (b) Schéma illustrant la force optique pour un laser convergent. Deux faisceaux a et b convergents et symétriques par rapport à l'axe optique, produisent une force qui déplace l'objet vers le point focal.

La conservation de la quantité de mouvement induit l'existence d'une force à la surface du miroir. Les photons agissent alors comme des particules et entrent en collision avec une surface. Pour une puissance lumineuse de 1W, cette force n'est que d'environ 10nN. Ashkin s'est alors interrogé sur l'influence de cette force sur des particules plus petites. Si un faisceau lumineux peut être concentré, focalisé, sur un très petit miroir, de l'ordre du micron, alors les accélérations deviennent importantes : 10^6g . Cette idée est le cœur d'une première publication sur les effets de la lumière sur des particules microscopiques⁴.

En plus de cet effet d'accélération dû à l'éclairement par un laser gaussien, il a remarqué que les particules sont attirées par l'axe du faisceau et le suivent ensuite parfaitement. A partir de la théorie de l'optique des rayons et du profil d'intensité des faisceaux gaussiens (voir Fig. 2.2a.), il a déduit une force optique liée au gradient de l'intensité lumineuse. Il a utilisé ce phénomène pour piéger une particule entre deux faisceaux gaussiens ou pour mettre en lévitation des sphères de $20\mu m$ dans l'air⁵. L'utilisation de l'air ou du vide nécessite une boucle fermée de contrôle pour amortir les oscillations induites par les fluctuations aléatoires du faisceau et ainsi stabiliser le système de lévitation⁶. Le retour en position peut également se montrer très utile pour la mesure des forces extérieures⁷.

Ces méthodes peuvent également être transposées au niveau atomique. Assimilé alors à un dipole dans un champ électromagnétique, un atome "recevant" un photon l'absorbe et émet un nouveau photon dans une direction aléatoire. Le résultat net de cette

4. [Ashkin 1970]
 5. [Ashkin 1971]
 6. [Ashkin 1977]
 7. [Ashkin 1980]

opération est une force dans la direction du photon incident. Cette composante de la force optique est appelée force de diffusion. La polarisabilité de l'atome induit également une force proportionnelle au gradient d'intensité et déplace l'atome vers l'axe optique ou point focal du faisceau laser. La théorie de ce phénomène est décrite par Gordon et Ashkin en 1980⁸. Un autre effet s'ajoute également au niveau atomique : l'effet de déviation Doppler. Ce dernier fait converger les atomes en mouvement vers l'axe du faisceau. Les mouvements erratiques des atomes étant directement liés à leur température, ces phénomènes de confinement permettent de refroidir les atomes.

Afin de mettre en place son système de piège pour des atomes refroidis⁹, Ashkin a choisi de tester l'installation optique dans un premier temps avec des petits objets de 25nm à 10 μ m de rayon. Le premier piège a été réalisé dans l'eau avec un faisceau gaussien fortement focalisé. Ces objets diélectriques ont des propriétés physiques connues (indice de réfraction). Il est ainsi facilement démontrable que la force du gradient issue du piège est supérieure à la force de diffusion dans l'axe optique et cette propriété crée le phénomène de piège stable¹⁰.

Ashkin décrit ainsi ses premières observations du comportement du piège : *"Individual particles were easily seen in the cone of the focused laser light and displayed beautiful Brownian motion. Whenever a particle wandered close to the beam focus, it was immediately pulled into the trap. It brightened up, and all Brownian motion ceased."*¹¹.

La notion de force due au gradient d'intensité a donc été démontrée expérimentalement avec plusieurs tailles de particules inférieures mais aussi supérieures à la longueur d'onde du laser (514,5nm pour le laser Argon utilisé dans cette première expérience). Ce piège est plus fort et stable que le piège par lévitation et sa force dépend de la puissance du laser. Le piège est apparu peu sensible aux imperfections des objets sphériques, Ashkin a ensuite pu piéger des virus, des bactéries ovales vivantes, des globules rouges et de la chlorophylle. A cette occasion, il a constaté l'effet destructeur de la lumière pour la matière vivante et a trouvé un bon compromis dans la longueur d'onde du laser de type Nd :YAG (proche de l'infra-rouge de longueur d'onde 1064nm). Cette histoire relate l'introduction des pinces optiques dans la biologie. Celles-ci occupent aujourd'hui une place importante dans la biologie uni-cellulaire et uni-moléculaire.

Ashkin détaille le principe de piégeage de gros objets (de taille caractéristique supérieure à la longueur d'onde du laser) avec l'optique géométrique¹² (voir figure 2.3). Des rayons convergents, traversant une particule diélectrique (dont l'indice de réfraction est supérieur à celui du milieu), produisent une force de rappel toujours dirigée vers le point focal. Le bilan des quantités de mouvement des faisceaux entrants, réfléchis et transmis aux interfaces donne l'intensité de la force créée sur l'objet irradié. Par exemple, pour un rayon donné, cet équilibre donne :

8. [Gordon 1980]

9. [Chu 1986]

10. [Ashkin 1986]

11. [Ashkin 2000] : *"les particules [dispersées] dans le cône du laser étaient facilement observables et présentaient une agitation caractéristique du mouvement Brownien [liée à la température du milieu]. Lorsqu'une particule s'approchait du point focal, elle était immédiatement attiré dans le piège. Elle s'éclaircissait et le mouvement Brownien s'arrêtait."*

12. [Ashkin 1992]

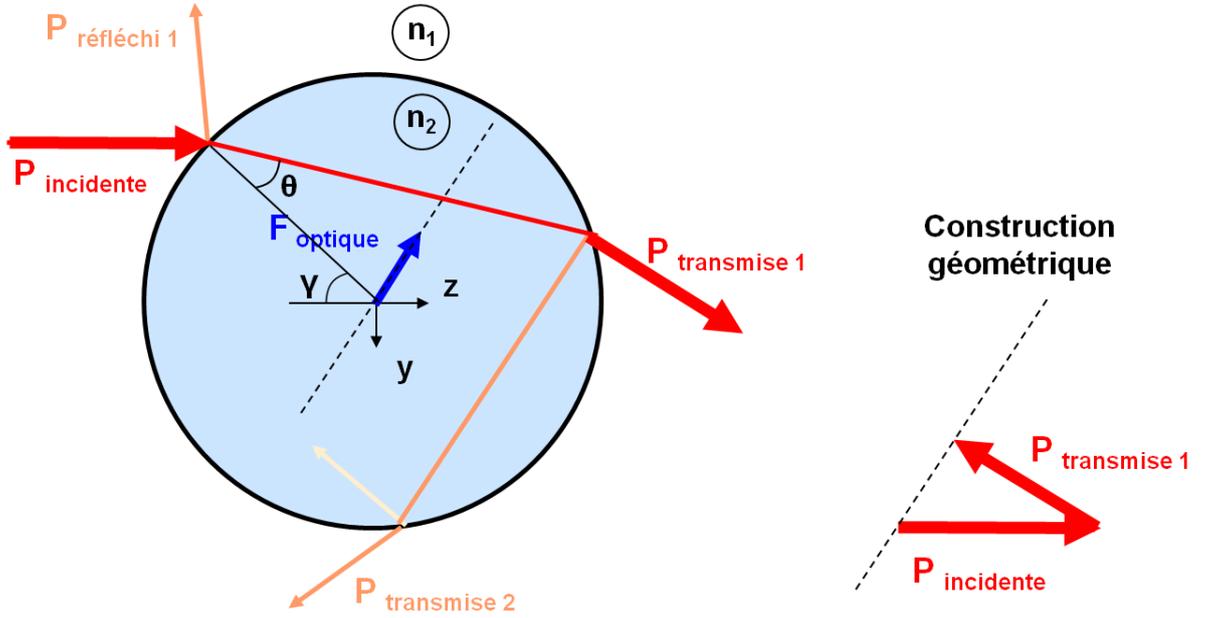


FIGURE 2.3 – Principe du calcul de la force optique produite par un faisceau par la méthode de l'optique géométrique. Une partie du faisceau incident est réfléchi par la surface de l'objet et l'autre pénètre le matériau. Ce nouveau faisceau est également réfléchi et transmis. Ces interactions avec des interfaces dévient le faisceau ce qui au niveau particulaire du photon est assimilable à une variation de quantité de mouvement. Le résultat de ces interactions est une force dont la direction peut être estimée par l'optique géométrique. La construction géométrique à droite explicite le calcul simplifié de la direction de la force optique à partir de la direction du rayon incident et du rayon transmis.

$$\begin{aligned}
 F_{laser} &= q_{incident} - q_{reflechi} - q_{transmis} \\
 F_y &= \frac{n_1 \cdot P}{c} \left[-C_R \cdot \sin(\pi + 2\theta) - \frac{C_T^2 \sin(2\theta - 2\gamma - \varepsilon_1(\theta, \gamma))}{1 + C_R^2 + 2C_T \cos 2\gamma} \right] \\
 F_z &= \frac{n_1 \cdot P}{c} \left[1 - C_R \cdot \cos(\pi + 2\theta) - \frac{C_T^2 \cos(2\theta - 2\gamma - \varepsilon_2(\theta, \gamma))}{1 + C_R^2 + 2C_T \cos 2\gamma} \right]
 \end{aligned}$$

avec n_1 l'indice de réfraction du milieu, P la puissance incidente du faisceau laser, c la vitesse de la lumière dans le vide, C_R et C_T respectivement les coefficients de Fresnel de réflexion et de transmission, θ et γ respectivement les angles d'incidence et de réfraction. La fonction ε_1 et ε_2 représentent des termes d'ordre supérieur négligeables. Les axes considérés sont \vec{z} pour la direction de propagation du rayon et \vec{y} un des axes perpendiculaires. Ainsi l'influence de deux rayons focalisés produit une force de rappel vers le point focal (voir figure 2.2b.). En changeant de base et en intégrant sur le cône focalisé du laser, des simulations numériques de la force optique donnent sa valeur en fonction de la position de départ de la cible. Plusieurs travaux se sont intéressés à ces simulations : Gauthier et Wallace proposent notamment leur résultat pour une sphère

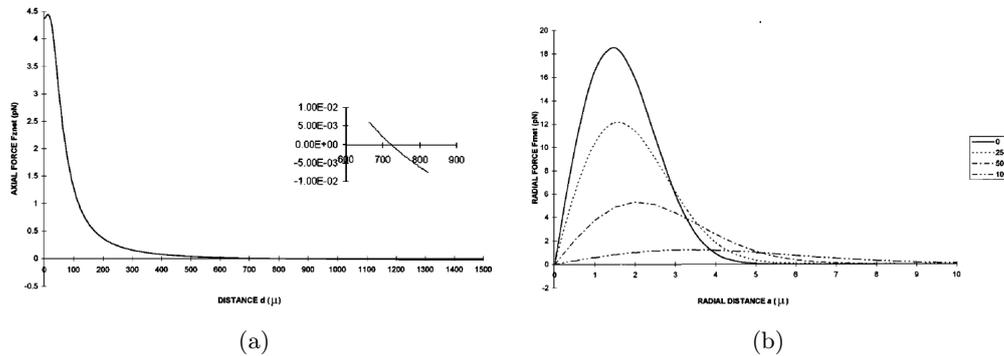


FIGURE 2.4 – (a) Simulation de la force axiale en fonction de la distance au point focal, de diamètre $w_0 = 2\mu\text{m}$, pour une sphère de rayon $2\mu\text{m}$. La force s'annule à $723\mu\text{m}$ (voir le zoom en insertion). Cette force s'équilibre avec la force de gravité. (b) Simulation de la force radiale de rappel en fonction de la position radiale. Les différentes courbes représentent différentes positions axiales (en μm , voir la légende). La microsphère contenue dans le laser subit une force de rappel qui la recentre sur le point focal (Extraits de [Gauthier 1995])

de rayon $2\mu\text{m}$ et une longueur d'onde du laser de 514nm ¹³ (voir figure 2.4).

Parallèlement, des simulations sont également élaborées pour les autres domaines de modélisation. Le cas où les dimensions de la bille sont très inférieures à la longueur d'onde ($D \ll \lambda$) est approximé par le modèle des champs électromagnétiques¹⁴. Pour le domaine intermédiaire ($D \approx \lambda$), la théorie généralisée de Lorentz-Mie est la plus intéressante¹⁵.

Les résultats expérimentaux et théoriques s'accordent sur l'existence d'un domaine linéaire exploitable dans la caractéristique force-position du piège. Mais les modèles comportent trop de paramètres et d'hypothèses pour caractériser les cas réels¹⁶. Le meilleur étalonnage du piège s'obtient expérimentalement (voir figure 2.5). Le premier état de l'art date de 1994, où Svoboda et Block résument les techniques de l'époque pour construire une pince optique, étalonner la raideur du piège et mesurer les forces optiques expérimentalement¹⁷.

2.1.2 Installation optique

Dans cette partie, les informations nécessaires pour réaliser des pinces optiques classiques avec un actionneur et/ou une mesure d'effort sont proposées. Ce micromanipulateur est aussi explicité de manière exhaustive dans les papiers de Svoboda¹⁸ et de Neuman¹⁹. L'université d'Harvard propose également une construction peu onéreuse dédiée à l'enseignement supérieur²⁰.

13. [Gauthier 1995]

14. [Wright 1994, Rohrbach 2005]

15. [Ren 1996]

16. [Schut 1991]

17. [Svoboda 1994]

18. [Svoboda 1994]

19. [Neuman 2004]

20. [Smith 1999]

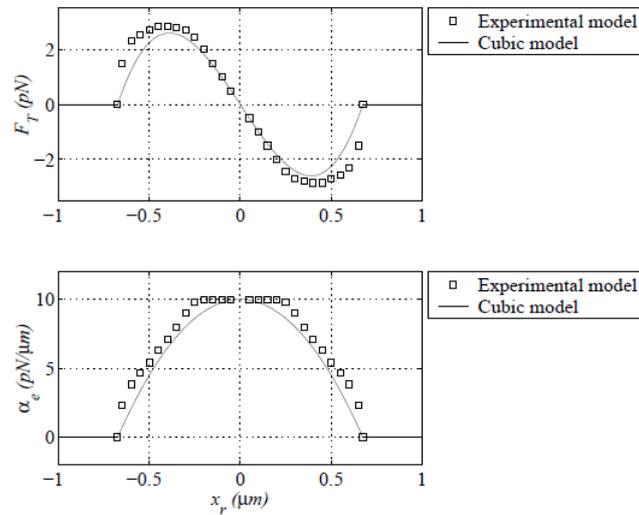


FIGURE 2.5 – Mesure expérimentale de la caractéristique d'une pince optique sur une bille de $1 \mu\text{m}$. Une approximation par un modèle cubique est superposée aux données expérimentales. La figure supérieure montre la force de piégeage en fonction du déplacement radial. La figure inférieure représente la raideur en fonction du déplacement radial. Le modèle cubique interpole de manière satisfaisante la partie courbe de la raideur, mais un modèle linéaire convient mieux pour de faibles déplacements $\pm 2\mu\text{m}$ autour du point focal. (Extraits de [Ranaweera 2004]).

Les deux éléments essentiels pour construire une pince optique sont le laser et l'objectif à grande ouverture numérique.

Le laser est choisi traditionnellement de faisceau gaussien, mais d'autres modes sont également exploités²¹. Sa longueur d'onde dépend des objets piégés et de l'environnement. Il est important, par exemple en biologie, d'utiliser une longueur d'onde qui évite les dommages photoniques²² sur les tissus biologiques. Ces dommages peuvent être liés à l'effet d'une absorption deux-photons et à une réaction d'oxydation de la matière organique. Les protéines peuvent également être détruites par des radiations du spectre visible. Les travaux publiés s'accordent pour utiliser une longueur d'onde entre 800 et 1064nm²³. La puissance du laser doit être suffisante pour produire un piège. Si une puissance de 100mW suffit pour produire un piège pour un système simple, un chemin optique complexe avec de nombreux composants induit de nombreuses pertes d'énergies. L'objectif et l'actionneur en sont les principales causes.

Les objectifs à grande ouverture numérique (ON) sont traditionnellement utilisés pour avoir une bonne résolution spatiale ($0,2\mu\text{m}$ pour $\text{ON}=1,25$). Ils sont soit à "immersion huile", soit à "immersion eau". Cette propriété signifie qu'un film de liquide d'indice de réfraction supérieur ou égal au verre de la lentille doit se trouver entre celle-ci et la boîte de Pétri. Les objectifs à "immersion huile" ont une distance de travail plus

21. [Barton 1997]

22. [Liang 1996, Neuman 1999]

23. [Neuman 2004]

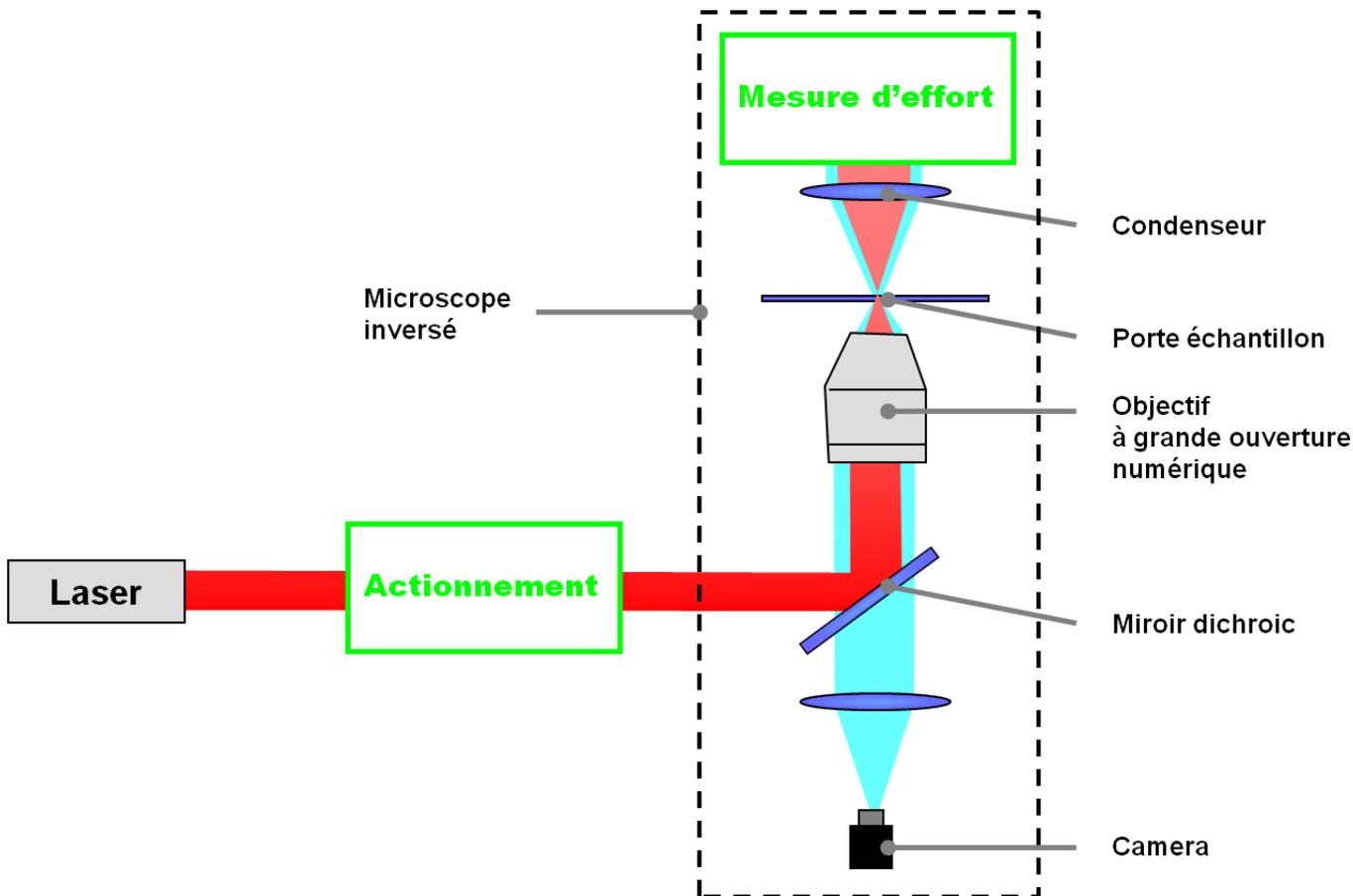


FIGURE 2.6 – Schéma d'une pince optique conventionnelle. Généralement, un laser est focalisé par un objectif à grande ouverture numérique sur le plan de l'échantillon. Le point focal est utilisé pour piéger des micro-objets. La lumière blanche du microscope inversé est focalisée par un condenseur sur l'échantillon, puis récupérée par l'objectif pour être imagée sur une caméra par une lentille convergente. Un système d'actionnement du faisceau laser avant l'entrée dans le microscope ou/et un système de mesures de la position (par la caméra ou à partir de la lumière résiduelle du laser après l'échantillon) peuvent aussi compléter le dispositif.

faible que ceux à eau, à cause des aberrations optiques induites par les différents changements de milieu²⁴. De nouveaux systèmes utilisent des matrices de micro-optiques pour créer plusieurs pièges²⁵ ou des lentilles déformables²⁶.

L'alignement est effectué sous microscope pour visualiser l'échantillon. Le laser traverse l'objectif à grande ON et se retrouve focalisé dans le milieu expérimental souvent aqueux, parfois dans des préparations spécifiques à la biologie²⁷ ou pour de rares expériences dans l'air²⁸. L'installation optique conventionnelle peut être schématisée par la figure 2.6.

24. [Theofanidou 2004]

25. [Rohner 2007]

26. [Mao 2010]

27. [König 1996]

28. [Summers 2008]

Les microscopes les plus usités sont le plus souvent des microscopes inversés, mais des microscopes droits peuvent également convenir. Pour parer au problème délicat de l'alignement des installations complexes, les utilisateurs potentiels des laboratoires de recherche préfèrent parfois construire eux-même un microscope à dimension flexible afin d'intégrer un actionneur et un capteur.

Les actionneurs se sont diversifiés avec les besoins en rapidité ou en parallélisation. Les systèmes les moins onéreux sont des miroirs et des lentilles actionnés manuellement ou motorisés. Les systèmes les plus rapides de déviation de faisceau sont les galvanomètres et les défecteurs acousto-optiques. Ces derniers séparent temporellement le faisceau et peuvent créer plusieurs pièges. Il est également possible de séparer le faisceau laser par des prismes et d'actionner chaque faisceau. Une technique récente consiste à utiliser une surface de cristaux liquides qui modifie localement la phase du faisceau et la sépare spatialement en plusieurs rayons. Cette technique dite "holographique" est encore assez lente. Ces techniques seront détaillées dans la section 2.2.1.

De même, les techniques de mesure des forces optiques sont diverses, mais le principe reste le même. Pour déterminer la force optique appliquée sur l'objet en lévitation, il faut mesurer le déplacement de l'objet piégé et utiliser le modèle linéaire de la raideur du piège (ou un modèle non-linéaire plus réaliste de forme quadratique, par exemple, pour élargir le domaine de travail). Ce modèle relie la force à la position relative de l'objet par rapport au spot laser. Un capteur en position donne alors une image des efforts. Celui-ci peut prendre la forme d'une photodiode à quatre-cadrants (4 gros pixels) ou d'une caméra. Sur ces capteurs sont imagés l'ombre de l'objet ou la figure d'interférence d'un ou deux lasers le traversant. Ces techniques seront détaillées dans la section 2.2.2. Les laboratoires ou les entreprises, avec plus de ressources matérielles et peu de temps à consacrer à la conception d'une pince, préfèrent l'usage de systèmes commerciaux finalisés tels que ceux proposés par Arrix, Elliot Scientific, MMI, Palm Microlaser Technology ou JPK Instruments. La société Thorlabs propose également un kit à assembler et à aligner. Ces systèmes ne demandent pas d'effort de conception, ni de programmation, mais ils peuvent se montrer limités car leur modification est difficile. Certains sont équipés d'actionneurs holographiques (BioRyx200, Arryx) et/ou de mesure d'efforts (Nanotracker, JPK).

2.1.3 Étalonnage

Une fois la pince réalisée et alignée et les aberrations optiques corrigées, il suffit de étalonner sa raideur, K , pour rendre opérationnel la mesure de l'effort. La force s'exprime alors à partir des positions de la bille et du laser :

$$F_{laser} = -K \cdot (P_{bille} - P_{laser}) \quad (2.1)$$

Plusieurs techniques d'étalonnage sont proposées²⁹. La plus intuitive est l'utilisation de la force de résistance visqueuse du milieu. La loi de Faxen³⁰ donne le coefficient visqueux pour une sphère proche d'une surface et corrige le coefficient donné par la loi

29. Pour plus de détails voir [Neuman 2004]

30. [Happel 1981]

de Stokes : $B_v(h) = f(h) \cdot 6\pi \cdot \eta \cdot R$. Si h est la hauteur de la bille dans le liquide et R son rayon, la loi de Faxen donne :

h/R	1.01	1.10	1.50	2	5	50	∞
f(h)	2,97	2,36	1,62	1,39	1,10	1,01	1

Si la platine du microscope ou le piège sont actionnés avec une vitesse périodique, la réponse en position de l'objet est fonction de la raideur. Par exemple, un actionnement sinusoïdal produit une réponse sinusoïdale dont l'amplitude et la phase peuvent être utilisées pour retrouver la raideur³¹ :

$$x(t) = \frac{A \cdot f}{\sqrt{f_p^2 + f^2}} \cdot e^{-i(2\pi ft - \varphi)}$$

$$\varphi = -\arctan \frac{f_p}{f}$$

où A et f sont respectivement l'amplitude et la fréquence du signal d'excitation. f_p est la fréquence de coupure du piège amorti, soit $f_p = K/2\pi B_v$, avec B_v le coefficient visqueux défini précédemment.

Il est également possible d'utiliser le potentiel harmonique du mouvement Brownien et le théorème d'équipartition. Ainsi, l'énergie totale d'un système à l'équilibre thermodynamique est répartie en moyenne de manière égale selon toutes les directions. L'énergie peut alors être reliée à la température par la formule suivante :

$$\frac{1}{2} k_B \cdot T = \frac{1}{2} K \cdot \langle x^2 \rangle$$

où k_B est la constante de Boltzmann, T est la température absolue (en K) et x est la position relative de l'objet par rapport à la position d'équilibre du piège. La mesure de la variance $\langle x^2 \rangle$ détermine la raideur du piège, sans prendre en compte la viscosité du milieu. Cette méthode nécessite une bande passante du système de mesure plus élevée que la fréquence de coupure. Le terme au carré rend la mesure sensible aux bruits et aux décalages. Il en résulte une raideur souvent sous-estimée.

Si la première méthode est plus précise, la seconde est plus rapide car elle nécessite moins de données. La raideur varie beaucoup selon les conditions expérimentales : défauts des microsphères, température, hauteur de piégeage et fluctuation de la puissance du laser. Il est donc primordial de étalonner chaque expérience réalisée.

2.1.4 Applications

Grâce à ces nombreux avantages, les pinces optiques sont aujourd'hui largement répandues. Elles remplacent des outils de micromanipulation "avec contact" ou créent leurs propres champs d'applications. De l'étude des molécules seules à celle des cristaux, des microscopes à forces optiques aux moteurs photo-actionnés, en passant par le refroidissement d'atomes et la lévitation de gouttelettes dans l'air, leurs utilisations sont

31. [Capitania 2002]

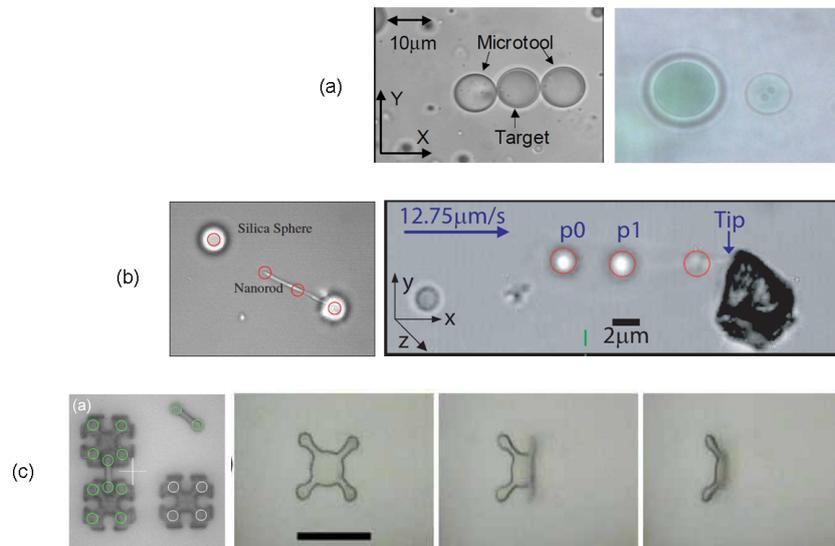


FIGURE 2.7 – Nouveaux micro-outils actionnés par forces optiques. (a) Micro-outils à base de gel qui apparaissent et disparaissent avec l'activation du laser (à droite, [Arai 2006]). Le gel peut être fonctionnalisé pour mesurer le pH, par exemple (à gauche, [Maruyama 2007]). (b) Micropointes formées avec des microtubes de carbones collés à des microsphères actionnées par force optique [Gibson 2008, Ikin 2009]. (c) Pièces microfabriquées possédant des parties piègeables optiquement, pour réaliser des assemblages (à gauche, [Rodrigo 2009]) ou des mouvements selon 6 degrés de liberté (à droite, [Rodrigo 2005]).

extrêmement variées. Pour la démonstration actuelle, seuls quelques exemples pouvant bénéficier directement d'une assistance haptique sont présentés.

Les applications peuvent être séparées en deux classes. La première s'intéresse aux objets de type minéral et à leur assemblage. Par exemple, l'assemblage par adhésion de microsphères et de microtubes crée de nouveaux micro-outils complexes. Une micropointe a été réalisée en collant sur un microtube deux microsphères. Ces dernières sont piégées et permettent l'actionnement et la mesure des forces du microstylet selon 6 directions (voir Fig 2.7(b)). Le contrôle de ces nouveaux micro-outils serait facilité par des interfaces haptiques évoluées possédant des degrés de translation et de rotation couplé au ressenti des interactions.

De même, avec la microfabrication par photo-polymérisation des pièces de toutes formes possédant, par exemple, des sites de piégeage intégrés (voir Fig 2.7(c)) sont créés. Leur contrôle en position est facilité par le multi-piégeage, mais l'assemblage de plusieurs pièces entre elles reste un enjeu pour la fabrication de rouages micrométriques ou de systèmes microfluidiques. Le retour d'effort participerait à la réalisation d'assemblages tridimensionnels, puisqu'il aiderait à localiser les sites d'assemblage, à ajuster l'emboîtement et compenserait la vision 2D.

A l'opposé, de nouveaux micro-outils ont été développés par l'équipe de Arai pour diminuer la complexité de la micromanipulation. Des gels mélangés au milieu de manipulation sont condensés par la lumière du laser et constituent des micro-outils biocompatibles et versatiles qui apparaissent et disparaissent à l'injonction de l'utilisateur (voir Fig. 2.7(a)). Ces gels sont fonctionnalisables et se colorent avec les propriétés des

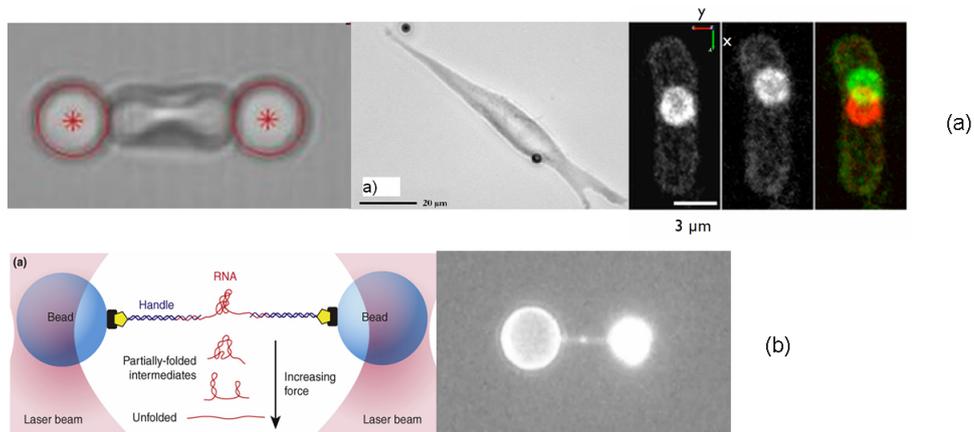


FIGURE 2.8 – Études d'éléments biologiques avec les pinces optiques. (a) Étude de la réponse d'un globule rouge à un stress mécanique (à gauche, [Yoon 2008]). Microrhéomètre pour étudier les propriétés des membranes cellulaires (au centre, [Balland 2005]). Déplacement du noyau d'une levure à partir de microgranules lipidiques piégées (à droite, [Sacconi 2005]). (b) Schéma de principe de l'extension de la double hélice d'acide ribonucléique entre deux microsphères (à gauche, [Woodside 2008]). Vue par microscopie à fluorescence d'une expérience d'extension d'ADN (à droite).

objets à proximité. En couplant plusieurs pièges à une interface haptique sollicitant les doigts de la main, la micromanipulation se déroulerait avec une immersion totale tridimensionnelle et extrêmement flexible. Des doigts microscopiques apparaîtraient et disparaîtraient là où l'utilisateur a besoin de saisir ou de palper les objets à étudier.

La deuxième classe d'objets représente les matériaux fragiles du vivant. Les objets, tels que les cellules et les molécules, sont facilement endommagés lors de tâches de micromanipulation. Les problèmes de vision complexifient également l'étude de ces particules : vision 2D ou invisibilité. Les micro-outils reliés à un retour haptique faciliteraient le contrôle des forces appliquées et la mise en contact avec une membrane cellulaire tridimensionnelle. Ainsi les propriétés mécaniques des cellules, par exemple ici des globules rouges (voir Fig. 2.8(a)), seraient directement ressenties par la main de l'utilisateur. Cette sensation pourrait accélérer le diagnostic.

Dans d'autres applications, des microrhéomètres en rotation viennent explorer les propriétés des membranes cellulaires. Dans ce type de tâches, il est difficile de déterminer si l'outil est en contact avec la surface tridimensionnelle de l'échantillon. Le retour d'effort discriminerait immédiatement le contact et procurerait un gain de temps significatif. L'exploration des propriétés du vivant ne s'arrête pas à l'étude des propriétés extérieures des cellules. Les membranes étant transparentes au laser, il est également possible de piéger certains éléments présents à l'intérieur des cellules. Ces outils in situ sont utilisés pour l'exploration intracellulaire et la compréhension des mécanismes de division des cellules. Restituer le sens du toucher sur ce type de tâche engendrerait une nouvelle représentation du vivant dans des dimensions encore inconnues.

Le cas des molécules est particulièrement délicat. La manipulation se réalise à l'aveugle et il est difficile de savoir si le brin étudié est toujours intègre (voir Fig. 2.8(b)). Le retour haptique aiderait à contrôler la sollicitation et signalerait immédiatement le cas

d'une rupture.

En regard de ces applications, le gain d'efficacité et de temps apporté par le retour d'effort est facilement estimable. Mais la plupart des installations de pinces optiques ne peuvent intégrer de façon efficace un couplage haptique. Dans la suite de ce chapitre, des optimisations sont proposées pour leur permettre de s'adapter aux contraintes du retour tactile.

2.2 La conception dédiée

Comme les systèmes commerciaux ne répondent pas encore aux besoins des laboratoires, le développement local de nouvelles plateformes est souvent choisi. Les efforts pour intégrer l'ensemble du système sont immenses pour le personnel biologiste et physicien non spécialisé dans la conception de systèmes. Ils s'arrêtent donc à l'une ou l'autre option de l'actionnement ou de la mesure de force. De plus, un réel verrou technologique apparaît dans la compatibilité des deux éléments précités : certains actionnements désaxent le laser et la plupart des techniques de mesure supportent peu de désalignements.

Or, non seulement les nouvelles interfaces utilisateurs avec retour haptique ont besoin des deux composants fonctionnant ensemble, mais elles sont également exigeantes en termes de dynamique. Il existe là un défi pour la microrobotique : rendre compatible l'actionnement et la mesure d'effort à très hautes bandes passantes.

Pour répondre à cette difficulté, un état de l'art répertorie les techniques d'actionnement et de mesure d'effort. Leur performance et leur compatibilité technologique sont ensuite comparées. Leur assemblage est finalement optimisé pour pouvoir effectuer la mesure de l'effort sur l'espace admissible d'actionnement.

2.2.1 Les actionneurs

Le premier organe central du système de pince optique télé-opérée est l'actionneur. Il est essentiel pour interagir avec le milieu environnant. Deux choix apparaissent : déplacer le milieu à partir d'une platine motorisée ou le laser à partir du déplacement contrôlé de la lentille ou du miroir (voir Fig. 2.9).

- **Platine actionnée (a)**

Les microscopes usuels ont des platines actionnées manuellement en translation. Mais la motorisation de ces axes avec des moteurs électriques ou piézoélectriques est possible pour une plus grande précision. Le laser reste alors fixe par rapport à l'axe optique, le piège est donc fixe et c'est l'échantillon qui translate selon trois axes. Les masses déplacées sont importantes et une grande vitesse de déplacement avec une grande précision ne peut être obtenue.³²

- **Lentille actionnée (b)**

L'un des premiers actionnements utilisé est le déplacement de l'une des lentilles qui met en forme le laser. Ce choix induit une déflexion du faisceau laser et

32. [Denk 1990]

le désaligne de l'axe. Il est également possible d'obtenir un actionnement axial du piège en translatant l'objectif ou une lentille le long de l'axe optique. La lentille reste un élément assez lourd et difficilement actionnable par rapport aux performances requises.³³

- **Miroir actionné (c)**

Le même procédé peut être appliqué pour les miroirs sur le chemin optique du laser avant l'entrée dans le microscope. Une attention particulière doit être portée lors de l'utilisation d'un télescope pour transformer la réflexion du miroir en déflexion à l'entrée de l'objectif (voir fig.2.10). Le point focal image de la deuxième lentille doit se situer au centre de l'entrée de l'objectif pour éviter les aberrations optiques. Comme précédemment, l'échantillon ne bouge pas et le piège se déplace à partir de l'actionnement du laser. Ces systèmes ne sont toujours pas optimaux en termes de dynamique, par exemple, mais sont faciles à mettre en place pour un faible coût.³⁴

- **Galvanomètres (e)**

Le principe des galvanomètres est ancien et consiste en l'actionnement très rapide de petites masses. Ce très petit et rudimentaire moteur électromagnétique possède des performances de stabilité, de précision et de rapidité avantageuses pour les applications laser. Des systèmes d'actionnements piézo-electriques existent également avec le même ordre de performance. La plage angulaire est cependant plus faible mais reste suffisante pour les applications de pinces optiques³⁵.

33. [Block 1990]

34. [Pacoret 2009]

35. [Sasaki 1991]

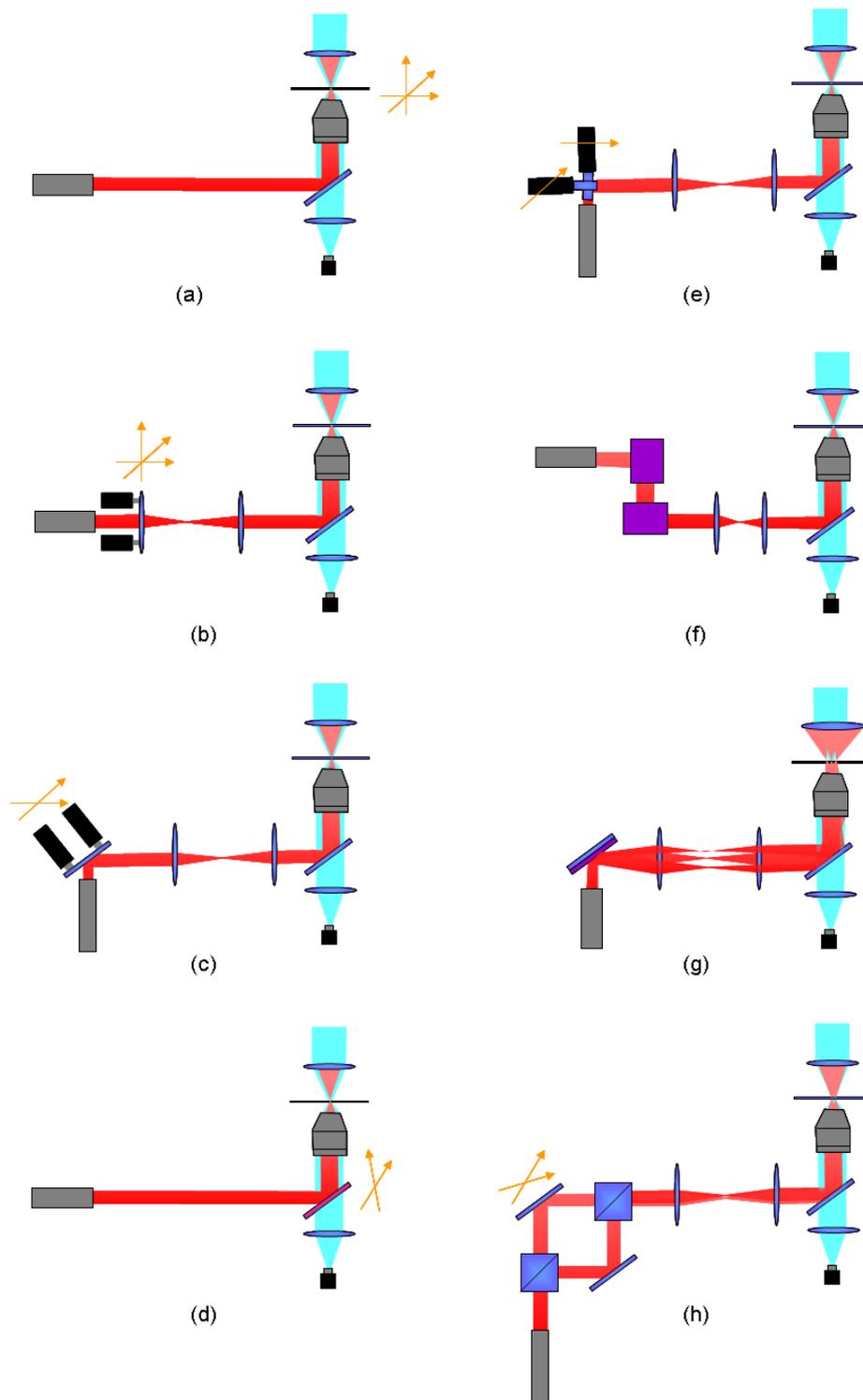


FIGURE 2.9 – Différents types d'actionneurs utilisés pour les pinces optiques. (a) Platine de microscope actionnée, (b) Lentille actionnée, (c) Miroir actionné, (d) Micro miroir scanneur, (e) Galvanomètres, (f) Deflecteurs acousto-optiques, (g) Modulateur spatial de lumière, (h) Séparation de faisceau par des cubes polariseurs pour le multi-piégeage

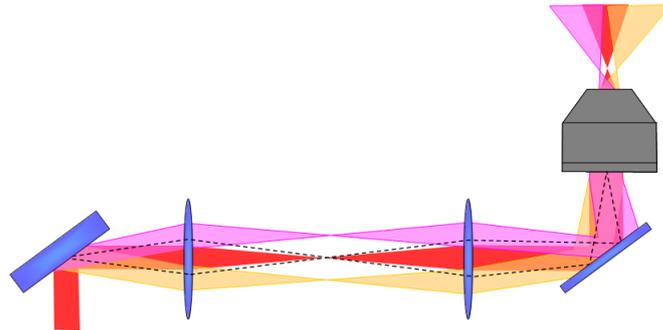


FIGURE 2.10 – La mise en série de miroirs et de lentilles aux points focaux coïncidents engendre un faisceau laser toujours dirigé vers l'entrée de l'objectif quelle que soit la déflexion appliquée en entrée.



FIGURE 2.11 – Micro miroir scanner chez IPMS Fraunhofer

- **Défecteur acousto-optique (AOD) (f)**

Cette technologie utilise une onde acoustique ultra-sonore pour diffracter la lumière. Un oscillateur piezo-électrique crée des ondes sonores dans un prisme de verre et change l'indice de réfraction. Les interférences de la lumière transmise par le cristal produisent plusieurs faisceaux selon les différents ordres de diffractions. Seul l'ordre 0 est exploitable et les pertes de puissances sont importantes (40% par axes). Par contre, les performances en rapidité sont de loin les meilleures.³⁶

- **Défecteurs electro-optique**

Dans ce type de système, les propriétés électriques d'un cristal particulier sont mises en jeu. En effet, un gradient d'indice de réfraction peut être créé à partir d'un champ de potentiel et celui-ci, à son tour, crée une déflexion du laser. Les pertes sont ici très faibles et la rapidité exceptionnelle, mais la plage exploitable est limitée à 20mrad et peu d'applications sont permises³⁷.

- **Modulateur spatial de lumière (SLM) (g)**

Les modulateurs à base de cristaux liquides sont utilisés pour mettre en forme l'intensité ou la phase de la lumière. Des interférences sont créées lors de la modulation en phase à partir de techniques holographiques. Une image de cris-

36. [Visscher 1996]

37. [Valentine 2008]

taux liquides reçoit le laser et le met en forme de manière contrôlée. Le spot peut donc être déplacé avec l'enchaînement de différentes images. Les taux de rafraîchissement sont bas, de 10 à 170Hz. De plus, de fortes pertes sont induites par les interférences d'ordres supérieurs qui ne sont pas utilisées. Cet actionneur crée également des vortex de lumière afin de mettre en rotation des objets diélectriques.³⁸

- **Micro miroir scanner (d)**

Des solutions nouvelles pourront également être disponibles dans les prochaines années avec les microsystèmes. Des micromiroirs de type scanner mis en résonance produisent des trajectoires à grande vitesse, mais la position statique stable n'est pas encore possible (voir figure 2.11). Une nouvelle technique proposée par l'institut Fraunhofer pour les microsystèmes photoniques est très prometteuse. Elle couple la technologie résonnante avec un système de blocage bi-stable.³⁹

- **Multi piégeage (h)**

Une autre option à évaluer est la possibilité de produire plusieurs pièges par séparation spatiale de l'intensité lumineuse (cube, SLM) ou temporelle (scanner).

Si deux cubes polariseurs séparateurs de faisceaux sont ajoutés sur le chemin optique des systèmes précédents, alors le faisceau peut être séparé spatialement en deux. Un des deux faisceaux est alors actionné pour attraper, compresser ou étirer un objet. Le piège non actionné peut être opportunément utilisé comme capteur de force sur l'élément à manipuler. Ce montage optique est complexe, mais il est fréquemment utilisé pour manipuler et étudier un brin d'ADN entre deux microsphères piégées.⁴⁰

Les hologrammes des SLM produisent également des interférences créant plusieurs faisceaux utilisables pour piéger les objets et contrôlables en position. Jusqu'à 400 pièges peuvent être obtenus à partir de cette séparation spatiale. Ces performances ne sont égalées que par les matrices de micromiroirs ou de microlentilles non adressables⁴¹.

La séparation temporelle ne produit pas autant de pièges, mais s'avère plus réactive. Avec un galvanomètre ou un AOD, il est impossible de créer plus de 10 pièges contrôlables⁴². Le faisceau est scanné extrêmement rapidement entre plusieurs points, avec des temps inférieurs à la relaxation brownienne de l'objet piégé. Dans ce cas, la puissance du laser est répartie entre ces points dans le temps.

Tous les systèmes défecteurs nécessitent un étalonnage minutieuse en position. Un résumé quantitatif des performances est présenté dans le tableau 2.1 pour différents modèles rapides et sélectionnés en janvier 2011.

38. [Curtis 2002]

39. <http://www.ipms.fraunhofer.de/en/applications/mems-scanners/>

40. [Mangeol 2006, Visscher 1996]

41. [Rohner 2007]

42. [Visscher 1996]

	Platine motorisée	Platine piezo	Galvanomètres	MEMS	AOD	EOD	SLM
Modèles	M-126.DG1 (x3) + C-843	P-563.3CD XYZ + contrôleur	6200H	Linscan	DTSXY	310A + 302RM	PLUTO
Fournisseur	PI	PI	Cambridge Technology	IPMS Fraunhofer	QUANTA TECH	Conoptics	Holoeye
Axes	3D	3D	2D	2D	2D	2D	3D
Multi-piéage	Non	Non	Temporel	Temporel	Temporel	Temporel	Spatial
Diamètre du faisceau	-	-	7mm	5 mm	6,7 mm	2,5 mm	8 mm
Bande passante	< 5Hz	< 15Hz	< 10 kHz	< 32 kHz	< 30 MHz	< 250k Hz	60 Hz
Résolution spatiale	100 nm	0.5 nm	8 μrds		25 μrds	1,5 $\mu rds/V$	1920 x 1080 pixels
Course maximale	25 mm	300 μm	40°	$\pm 35^\circ$	$\pm 1,5^\circ$	$\pm 1,5 m rds$	
Pertes optiques	0	0	< 3 %	10%	> 35 %	< 10 %	40 %
Prix	9 k€	25 k€	5 k€	(bientôt disponible)	10 k€		

TABLE 2.1 – Comparaison de différents modèles d'actionneurs pour l'application de pince optique à retour d'effort.

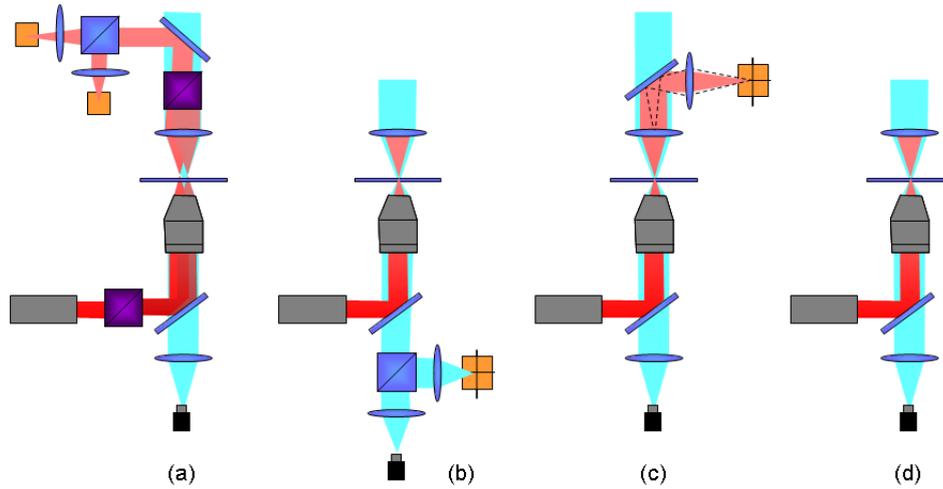


FIGURE 2.12 – Différentes techniques de détection de la position pour la mesure des forces optiques. (a) Interférométrie, (b) Photodiode, (c) Plan focal arrière, (d) Caméra

2.2.2 Les capteurs d'effort

Les pinces optiques sont des capteurs de forces par leur principe même. Dans le paragraphe 2.1.1, le modèle de raideur a été introduit. Le piège est assimilé à un ressort tridimensionnel sur le domaine utile du piégeage. Ce domaine de mesure peut être étendu par un modèle quadratique⁴³. Plus explicitement, cette connaissance du modèle du piège amène à reconstruire la force à partir d'une mesure de la position relative de l'objet par rapport au point focal du laser. La pince optique est donc une sorte de dynamomètre à ressort microscopique. De plus, le micro-outil ou le micro-objet piégé a une masse négligeable, la force optique mesurée est égale à l'opposé des autres forces appliquées sur celui-ci.

$$\begin{aligned}
 F_{laser}(t) + F_{ext}(t) &= m \cdot \ddot{P}_{bille}(t) \\
 F_{laser}(t) + F_{ext}(t) &\approx 0 \\
 F_{ext} &\approx K \cdot (P_{laser} - P_{bille}) \\
 F_{ext} &\propto (P_{laser} - P_{bille})
 \end{aligned}$$

Un capteur de position et un étalonnage sont suffisants pour connaître les forces d'interactions. Les scientifiques ont rapidement compris l'intérêt : des mesures au pN près sont accessibles. C'est le domaine typique des interactions moléculaires et biologiques (voir figure 1.16). Des techniques de mesures rapides et de hautes résolutions ont ainsi été développées et ont abouti au microscope à force optique⁴⁴.

Ce capteur d'effort étant indirect, différentes techniques de détection de la position sont comparées ici (voir Fig. 2.12). Trois enjeux majeurs apparaissent : la résolution spatiale, la rapidité de mesure et l'alignement du capteur avec le chemin optique, soit l'espace de travail.

43. [Ranaweera 2004]

44. [Stout 1997]

- **Interférométrie (a)**

L'interférométrie est un moyen très précis d'obtenir une mesure de la distance. Elle est, par exemple, très utilisée en astronomie (téléscope, radiotélescope) ou en astrophysique (la détection des ondes gravitationnelles).

Nomarski est le premier à utiliser cette technique sous microscope pour améliorer le relief et le contraste de toute sorte d'échantillon ou tissus minces⁴⁵. Ce système est ensuite adapté pour la détection de position. Denk et Webb⁴⁶ ont eu l'idée de faire passer un laser dans le système optique inventé par Nomarski. Le faisceau polarisé linéairement, rendu elliptique par une lame quart d'onde, est séparé en deux par un prisme de Wollaston, avec un angle infinitésimal et des polarisations orthogonales. Ces faisceaux sont ensuite focalisés par l'objectif à grande ouverture numérique. Le décalage des 2 points focaux est imperceptible à l'échelle de la particule, elle est donc piégée normalement. Par contre le chemin optique des 2 faisceaux est différent. Si la particule est décalée de l'axe du laser par une perturbation, les 2 chemins optiques ne sont plus équivalents. En recombinaison les 2 faisceaux à partir d'un condenseur et d'un second prisme, un unique faisceau de polarisation légèrement elliptique est obtenu. La mesure de cette ellipticité donne le déplacement de la particule par rapport au point focal. Elle est encore actuellement l'une des techniques avec les meilleures résolutions. La polarisation étant indépendante de la longueur d'onde utilisée, théoriquement aucune limite de résolution n'apparaît. En pratique, le bruit de mesure est très limitant. Elle est également très sensible aux vibrations mécaniques et seule une mesure unidirectionnelle est possible.

- **Imagerie par photodiode (b)**

La technique précédente est coûteuse, l'alignement est délicat et seul un axe de mesure est possible. Une autre méthode a été développée en utilisant l'image de l'objet par une source lumineuse. La lumière blanche du microscope est conventionnellement utilisée. L'utilisation de photodiode à quatre-quadrant s'est généralisée pour obtenir une mesure sur deux ou trois axes avec un seul capteur⁴⁷. Comme la luminosité est critique pour la résolution, parfois un laser supplémentaire est utilisé indépendamment de l'actionnement du piège. L'utilisation de ces systèmes nécessite un alignement et un étalonnage précise du capteur, afin d'obtenir la position relative d'un piège non désaxé, car tout désaxement compromet la mesure.

- **Plan focal arrière (c)**

Cette technique utilise le laser de la pince directement. Au lieu d'utiliser l'image de l'échantillon par le condenseur, le capteur récupère l'image produite sur le plan du condenseur (plan focal arrière) par une lentille additionnelle. La particule piégée ayant un effet réfractif près du point focal, elle crée une déviation de la lumière. Des interférences entre la partie du laser déviée et la partie inchangée sont visibles au niveau du plan du condenseur⁴⁸.

45. [Allen 1969]

46. [Denk 1990]

47. [Kamimura 1987, Ghislain 1994, Simmons 1996]

48. [Allersma 1998]

Comme cette technique est basée sur des interférences, elle a une bonne résolution et est bien adaptée pour mesurer la position relative. Elle souffre moins des désaxements du laser. En théorie, un déplacement combiné du faisceau et de l'objet ne serait pas détecté, alors qu'un écart de l'objet seul le serait. Cette technique mesure de manière indépendante l'écart de l'objet au point focal. En pratique, l'objet n'est pas une lentille parfaite, il existe une dépendance vis-à-vis de la position du piège et un espace de travail réduit à quelques micromètres.

Cette technique mesure également la position dans les 3 dimensions. En utilisant une photodiode à quadrants, Rohrbach a explicité le modèle et l'étalonnage du capteur dans un article très complet ⁴⁹.

Afin de limiter les bruits de mesures et les bruits mécaniques, une autre technique a été développée : le back-scattering. Il s'intéresse aux mêmes types d'interférences, mais produites par la réflexion sur l'objet piégé. Un laser et un seul objectif sont alors nécessaires pour le piégeage et la mesure d'effort ⁵⁰. Le phénomène d'interférence a lieu uniquement pour des objets dont le diamètre est égal ou inférieur à la longueur d'onde. Cette contrainte limite le domaine d'application de ces techniques.

- **Traitement d'image vidéo (d)**

Avec l'apparition des capteurs digitaux, les images vidéos sont numérisées pour être exploitées. Ainsi, en 1996, Crocker développe des techniques de traitements d'image pour la détection de position de particules en mouvement brownien. Une pince optique repositionne les particules entre chaque mesure ⁵¹. Les caméras du commerce se montrent suffisantes pour des résolutions sub-micrométriques. Un traitement d'image composé de filtres et de calcul de moments locaux fournit les positions tridimensionnelles des particules d'une suspension colloïdale (par exemple un gel). Mais leur fréquence d'acquisition n'est encore que de 30 images par secondes.

Afin de familiariser les spécialistes de microscopie à la vision, le *Biophysical Journal* ⁵² et *Physical Biology* ⁵³ ont porté leur intérêt sur des travaux de comparaison d'algorithmes de suivi de particules sous microscope. Ces articles donnent les fondamentaux pour choisir la méthode de détection avec les compromis de rapidité et de précision. Tous les algorithmes ne sont pas équivalents en termes de ratio signal/bruit. L'annexe B rappelle la définition des algorithmes les plus courants. Leurs performances pour l'application des pinces optiques sont détaillées à la section 4.1.1.

Les pinces électromagnétiques ont été les premières à utiliser ces techniques. Contrairement aux pinces optiques, ces systèmes contrôlent l'objet en boucle fermée à partir de sa position. Cette détection est donc critique et demande beaucoup de flexibilité d'alignement. L'équipe de Vincent Croquette a donc

49. [Rohrbach 2002]

50. [Pralle 1999]

51. [Crocker 1996]

52. [Cheezum 2001]

53. [Carter 2005]

investi dans un traitement rapide d'image vidéo⁵⁴ par corrélation pour les mouvements dans le plan. Les mouvements axiaux sont obtenus à partir d'un anneau de diffraction autour de l'image de l'objet. Le traitement est complexe, et les moyens de l'époque ne permettent pas plus de 25 images par seconde.

Le temps d'acquisition et de traitement sont des enjeux majeurs. Une nouvelle technologie de caméra CMOS (Complementary Metal Oxide Semi-conductor) a aujourd'hui d'excellentes performances en termes de rapidité. Des valeurs de 500 à 2000Hz peuvent être facilement atteintes en ligne avec des fenêtres réduites. L'acquisition est possible jusqu'à 30kHz avec des mémoires embarquées et un post-traitement. Cette rapidité d'acquisition pose cependant un autre problème. Elle réduit la résolution spatiale dépendante du nombre de photons reçus et elle nécessite des capacités informatiques importantes en termes de processeur et de mémoire.

Comparées aux photodiodes, pour une même fréquence de 2kHz⁵⁵, les caméras rapides se montrent de moins bonne résolution spatiale, mais acceptables pour de simples travaux de manipulation. Elles élargissent l'espace de détection et facilitent grandement le tracking multi-particules. Ces résultats ont pu être obtenus à partir d'une source de lumière très puissante et la fréquence est limitée uniquement par la taille de la mémoire physique de la caméra pour une mesure hors ligne de 4 minutes.

La course à la vitesse d'acquisition est engagée. Une caméra rapide a été utilisée dans un système de mesure d'oscillations sous champ électrophorétique⁵⁶. Avec une fenêtre de 100×100 pixels, une fréquence d'acquisition de 5kHz et un traitement par corrélation, la bande passante de mesure obtenue est de 2,5kHz. Dans ce cas, la limite est encore la mémoire nécessaire.

Towrie⁵⁷ a obtenu 15kHz de taux de rafraîchissement avec des données envoyées par un FPGA (Field Programmable Gate Array) traitant les images issues d'une caméra CMOS. Ce système est limité par la luminosité de la source. Otto propose une solution temps réel avec traitement logiciel de corrélation à 10kHz en utilisant un système d'illumination optimisé⁵⁸. A partir de cette source puissante composée d'une fibre optique et d'une lampe à mercure, il obtient un ratio signal sur bruit de 10.

La richesse des données issues des caméras diversifie les possibilités de traitement d'images. Afin de réaliser un traitement rapide sur deux objets, un système de pince optique holographique a été équipé d'une caméra intelligente permettant un traitement d'image embarqué⁵⁹. Avec un algorithme de centre de masse local sur une région d'intérêt donnée, seules les coordonnées des objets sont transmises à 2,5kHz. Bowman profite également des capacités

54. [Gosse 2002]

55. [Keen 2007]

56. [Otto 2008]

57. [Towrie 2009]

58. [Otto 2010]

59. [Ikin 2009, Carberry 2010]

des caméras pour sa méthode de suivi tridimensionnel par stéréoscopie⁶⁰. Utilisant deux sources de lumière décalées, deux images d'un même objet sont enregistrées par la caméra. La distance relative entre les deux images est corrélée à la défocalisation de l'objet et donc sa position axiale. La position dans le plan s'obtient naturellement par le déplacement combiné des deux images.

- **Caméra asynchrone**

De nouvelles caméras, dites événementielles (AER), enregistrent non plus des images, mais des événements asynchrones liés aux variations d'intensité lumineuse⁶¹. Seul le changement est enregistré, stocké en mémoire et traité. Les informations redondantes sont supprimées. Ces caméras ont une bande passante de 3kHz et autorisent des algorithmes très complexes à des vitesses impressionnantes. Cette technique sera détaillée à la section 4.1 et mise en œuvre pour l'application des pinces optiques (voir section 4.2).

60. [Bowman 2010]

61. [Lichtsteiner 2006]

Techniques	Citations	Dim	Prix (K€)	Source de lumière	Acquisition	Traitement	Algorithme
Interferométrie	[Denk 1990]	1D	30	Laser	100 kHz	-	-
Photodiode	[Simmons 1996]	2D	0,2	Tungstène 100W	2 kHz	-	-
Plan focal arrière	[Rohrbach 2002]	3D	0,4	Laser	850 kHz	-	-
Caméra ultra-rapide	[Keen 2007]	2D	30	Halogène 100W	30 kips	Hors ligne	Pas de temps réel
CMOS rapide	[Gibson 2008]	2D	1,5	Halogène 50W	2 kips	0,5 kHz	Centre de masse
CMOS + FPGA	[Otto 2010]	2D	2-3	LED blanc froid 15 W	5 kHz	5 kHz	Hardware
AER	[Lichtsteiner 2005]	2D	2	Soleil	3 kHz	30 kHz	Algorithmes complexes sur des matrices creuses

TABLE 2.2 – Comparaison des solutions rapides de détections. Les fréquences correspondent à des fréquences de rafraîchissement des données ou à la bande passante du capteur pour AER.

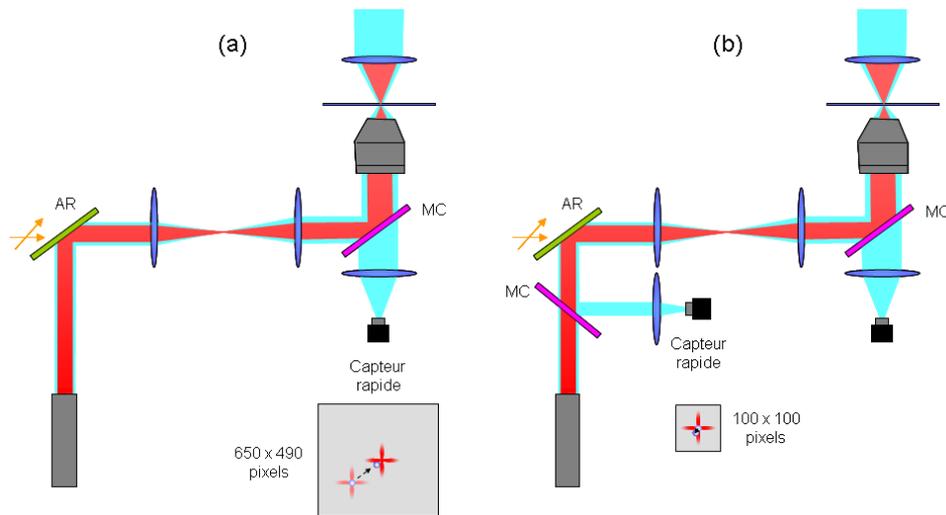


FIGURE 2.13 – Schéma explicitant les différences entre la position amont ou aval du capteur par rapport à l'actionneur. (a) correspond à la position aval, le capteur enregistre la position absolue de la bille. (b) correspond à la position amont, le capteur enregistre la position relative de la particule par rapport au laser. AR signifie actionneur réfléchissant et MC miroir dichroïque ou cube polariseur.

2.2.3 Le choix des composants adéquats

Il existe un véritable verrou technologique dans la compatibilité de l'actionnement avec la mesure d'effort. Le paragraphe précédent a montré, en effet, que la détection de la position relative de l'objet piégé par rapport au laser est sensible aux désalignements du piège par rapport à l'axe optique.

Peu d'installations fonctionnent aujourd'hui avec les deux composants en même temps. L'application doit justifier fortement ce choix. Par exemple, les manipulations à force constante requièrent ce type de montage. Ainsi, le maintien en charge d'un moteur moléculaire est facilitée par un contrôle actif de la position du piège⁶². En jouant sur la position relative, le piège produit une force constante ou contrôlable.

Ces montages sont principalement réalisés avec un défecteur acousto-optique (AOD) et une photodiode dans le plan focal amont⁶³. Des lois de commandes avancées sont proposées par Ranaweera afin de tenir compte du modèle complet dynamique et non linéaire du piège⁶⁴.

Ce type de système possède un espace de travail de $\sim 5\mu\text{m}$ de diamètre. La photodiode sur le plan focal amont ne peut pas tolérer plus de déflexion du laser⁶⁵. Pour le retour haptique, l'espace de travail est un paramètre essentiel pour manipuler de façon confortable. Il est impossible de se limiter à un tel confinement. En général, la caméra du microscope, selon le grossissement de l'objectif, entraîne une vue de l'ordre de la centaine de μm . Cette vue apparaît comme l'espace de travail "idéal" du système

62. [Visscher 1998]

63. [Simmons 1996, Visscher 1998]

64. [Ranaweera 2005]

65. [Visscher 1998]

interactif.

Preece, en 2009, propose une autre combinaison pour le retour en position : un SLM rapide (203Hz) et une caméra CMOS (1kHz)⁶⁶. Son système contrôle 3 billes en même temps avec un traitement d'image de type centre de masse à 460Hz. La fenêtre de la caméra est réduite à 260×210 pixels, soit environ $14\mu\text{m}$ de côté. A la fréquence citée, l'espace de travail est donc de $14\mu\text{m}$. Cet espace n'est toujours pas suffisant pour notre application.

Des techniques de vision plus efficaces pourraient élargir encore cet espace de travail, mais le coût et le temps de développement sont démesurés pour une application simple piège. Dans ce contexte, une solution optique astucieuse peut résoudre facilement le problème. Au lieu de placer la caméra en aval de l'actionneur par rapport au laser, elle peut être placée en amont et bénéficier de la lumière réfléchie dont a été soustrait le mouvement du laser (voir figure 2.13). Cette astuce optique supprime les limites en terme d'espace de travail et les problèmes liés au décalage de l'actionneur⁶⁷, tant que l'actionneur admet une réversibilité en réflexion ou en transmission.

Le tableau 2.3 récapitule les différentes dimensions de l'espace de travail. Les mentions utilisées signifient :

- "axial" : la mesure ne tolère aucun désalignement du laser,
- "réduit" : la mesure tolère un désalignement limité,
- "illimité" : la mesure est possible dans tout l'espace de travail de l'actionneur.

	Flexibilité	Platine	Lentille	Miroir	Galva.	AOD	SLM
Rapidité		-	-	-	+	++	-
Interférométrie	-	Illimité	Axial	Axial	Axial	Axial	Axial
Photodiode	-	Illimité	Axial	Axial	Axial	Axial	Axial
Plan focal arrière	-	Illimité	Réduit	Réduit	Réduit	Réduit	Réduit
Caméra aval	++	Illimité	Réduit	Réduit	Réduit	Réduit	Réduit
Caméra amont	+	Illimité	Illimité	Illimité	Illimité	Impossible	Impossible

TABLE 2.3 – Compatibilité en termes d'espace de travail des différents actionneurs et de méthodes de mesure de la position.

Ce tableau montre clairement l'intérêt de placer la caméra en amont et la compatibilité de celle-ci avec des actionneurs rapides réfléchissants. L'espace de travail est un critère prioritaire par rapport à la bande passante. Le concept de caméra en amont est choisi pour le premier prototype de pince optique avec retour haptique, explicité dans la partie suivante.

2.3 Le premier couplage

A partir de cette analyse, notre objectif s'est concentré rapidement vers la conception expérimentale d'un premier piège haptique. L'idée principale est d'évaluer la complexité du couplage haptique pour la pince optique optimisée.

La première démarche a été la recherche d'un laboratoire avec des installations proches

66. [Preece 2009]

67. [Pacoret 2009]

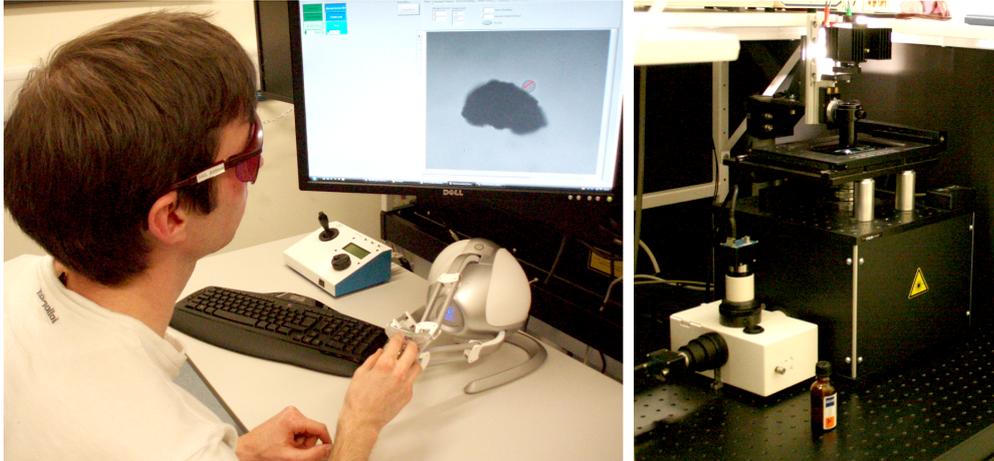


FIGURE 2.14 – Richard Bowman, collaborateur de l’université de Glasgow, utilise le système de pince optique à retour d’effort (à gauche) et le microscope en cours d’utilisation (à droite).

de nos exigences. Le laboratoire de Glasgow est ainsi apparu naturellement. En effet, le Professeur Padgett a montré lors de plusieurs publications ses convictions vis à vis des caméras rapides pour la mesure de force⁶⁸. De même, son ouverture vers de nouvelles interfaces utilisateurs s’est manifestée de différentes façons : commande groupée de plusieurs pièges optiques avec un joystick de jeu⁶⁹ et commande individuelle de plusieurs pièges avec un suivi des doigts de l’utilisateur⁷⁰, avec une table multi-touché⁷¹ ou un Ipad⁷².

A partir de discussions, la possibilité de coupler une interface et de réaliser un couplage bilatéral a séduit cette équipe. Bien que notre cahier des charges soit radicalement différent de leur précédente application, ils ont accepté les nouvelles contraintes avec intérêt. Ils ont découvert que le sens du toucher est très sensible à l’échantillonnage en dessous de 1kHz et que de nombreuses optimisations sont nécessaires en termes de rapidité et de temps réel.

A défaut de galvanomètre, un miroir actionné est ajouté au chemin optique afin que la caméra rapide soit en amont de ce composant. Cet actionneur est suffisant pour établir la preuve de faisabilité. Pour des facilités de transport, un Falcon de chez Novint est utilisé comme interface haptique. Ce joystick à retour de force est le moins cher du marché et il est également peu encombrant.

La réalisation technique de ce premier prototype (voir Fig. 2.14) prouve non seulement la valeur du concept de retour haptique pour les pinces optiques, mais elle a également vérifié l’intérêt et déclenché l’enthousiasme des utilisateurs quotidiens de systèmes de micromanipulation face à cette nouvelle interaction ressentie.

68. [Keen 2007, Gibson 2008]

69. [Leach 2006, Gibson 2007]

70. [Whyte 2006]

71. [Grieve 2009]

72. [Bowman 2011]

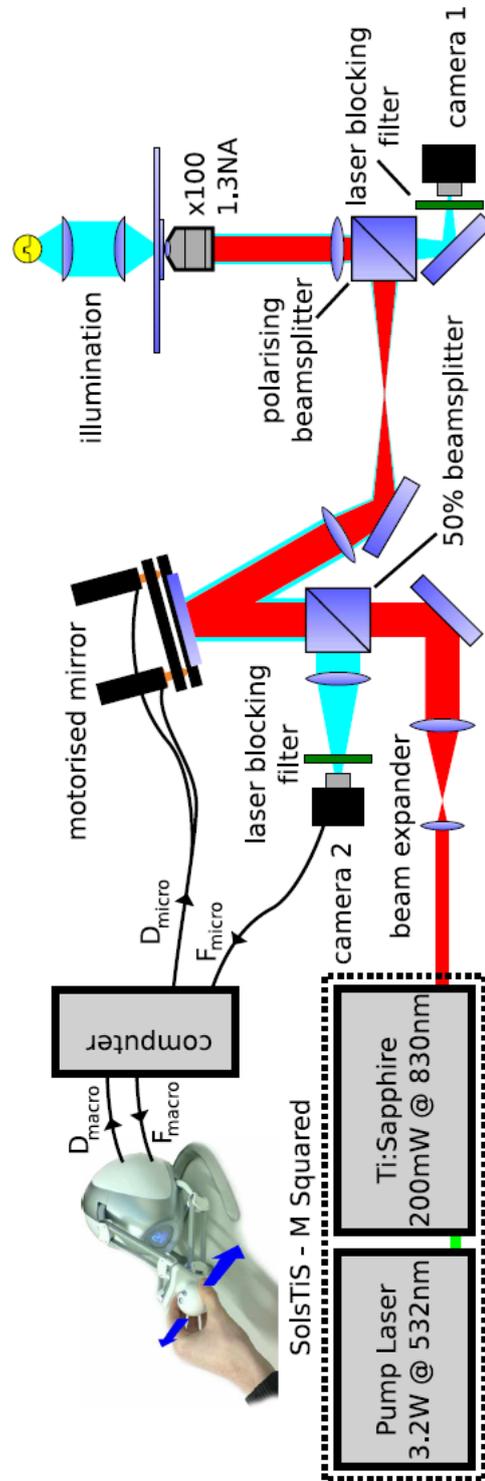


FIGURE 2.15 – Schéma optique de l'installation réalisée à Glasgow. Le miroir est contrôlé selon deux axes. La caméra 1 donne une vue de la scène de $60\mu\text{m}$ de côté. La caméra 2 rapide est placée en amont de l'actionneur et enregistre les mouvements relatifs de la bille (Extrait de [Pacoret 2009]).

2.3.1 L'installation de la pince optique à Glasgow

Le système utilisé est schématisé sur la figure 2.15. Le piège est créé par un laser continu de type Ti :sapphire à 830 nm (M2, SolsTiS) de puissance maximale 1,3W. Ce dernier est actionné par un miroir piloté par des moteurs micrométriques dont les performances sont illustrées en annexes C.1. Le même objectif (Zeiss, Plan-Neofluor, 100×, 1,3 ON) est utilisé pour créer le piège et imager l'échantillon.

Deux caméras sont utilisées pour recevoir la lumière blanche du microscope. La première (Prosilica EC1280, camera 1) est placée en aval de l'actionneur par rapport au laser. Elle visualise la scène, enregistre la position globale des objets et n'est pas affectée par la déflexion du laser. La deuxième (Prosilica GC640M, camera 2) est placée en amont et sa fenêtre est réduite à une petite région d'intérêt (50×50 pixels) afin de réaliser une acquisition et un traitement rapide (500kHz). Dans cette configuration, la caméra n'enregistre que le mouvement relatif de l'objet piégé par le laser, sans qu'il soit nécessaire de connaître la position du laser. Cette technique rend l'espace de travail de la mesure compatible avec celui de l'actionneur et annule l'influence des défauts de stabilité de l'actionneur sur la mesure. L'étalonnage automatique est réalisée de manière rapide par la technique du spectre de puissance du mouvement brownien de la bille piégée⁷³.

L'acquisition des données, le traitement d'image et l'étalonnage ont entièrement été réalisés avec un programme LabView sur un ordinateur de bureau équipé de Windows Vista. Le couplage a également été réalisé dans ce programme avec un temps de boucle d'environ 2ms.

73. [Berg-Sorensen 2004]

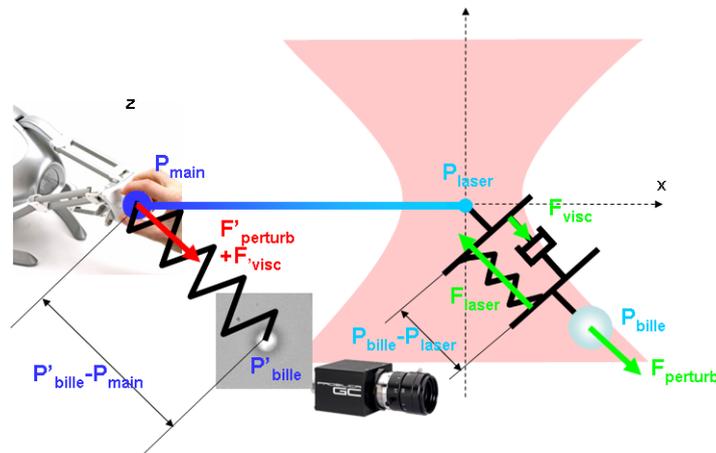


FIGURE 2.16 – Principe du couplage virtuel entre la main et l'image de la bille. Un ressort-amortisseur, à droite, modélise la force optique et la viscosité du milieu. Un deuxième ressort, à gauche, est créé virtuellement par le couplage haptique entre une image homothétique de la bille piégée et la main de l'opérateur.

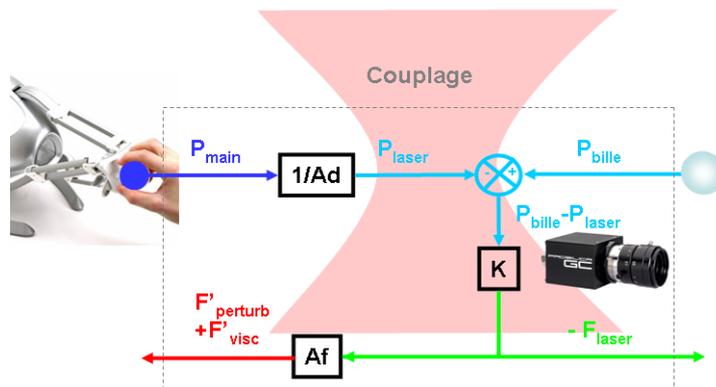


FIGURE 2.17 – Représentation en schéma bloc du couplage position-position (voir fig.2.16)

2.3.2 Couplage "direct" ou "position-position"

Le couplage haptique doit créer une interaction bilatérale : l'opérateur agit sur le piège et ce dernier réagit sur l'opérateur en fonction de l'environnement. Dans notre prototype, les données suivantes sont accessibles du côté de l'opérateur : la position et la force exercée au niveau de la poignée de l'interface ; et du côté du piège : la position du laser et la position relative de la bille par rapport au laser.

La position de la poignée doit être mise à l'échelle pour s'adapter au contrôle du laser. Un gain en position Ad est ainsi introduit pour cette projection spatiale. La caméra mesure l'écart entre la position de la bille piégée réelle et celle du laser. La raideur K restitue la force optique à partir de cette position relative. Celle-ci est l'opposée des autres forces induites par le milieu. Un coefficient en effort Af projette cette force microscopique à l'échelle des sensations de l'opérateur (voir Fig. 2.17).

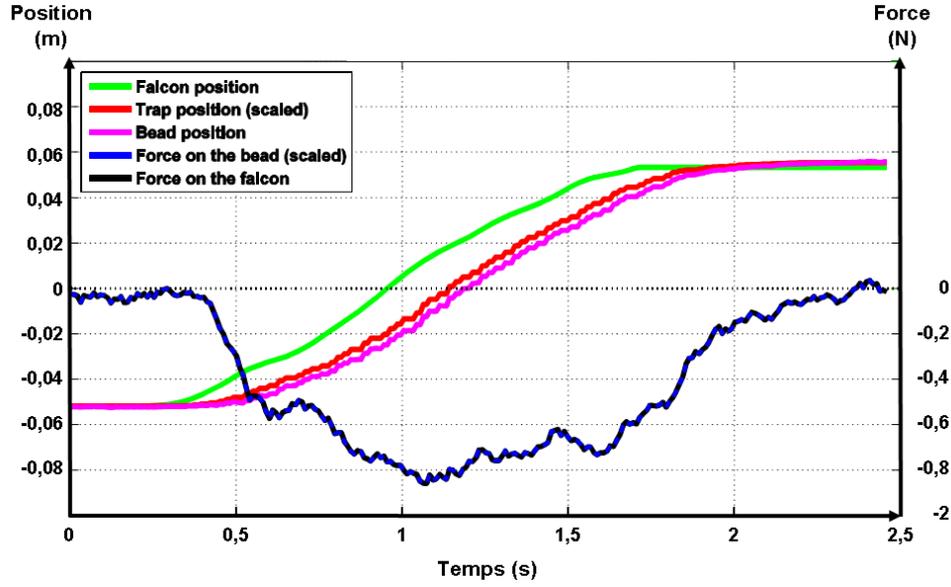


FIGURE 2.18 – Réponse temporelle de la boucle haptique à un mouvement libre. Les forces et les positions sont représentées sur un même schéma à l’homothétie près. Les forces microscopiques mesurées se superposent avec les forces restituées à l’utilisateur. Par contre, la position de la bille est retardée par rapport à la position de la poignée ($Ad = 2034$, $Af = 1,2 \cdot 10^{12}$, $K_x = 5,73 \cdot 10^{-7} \text{Nm}^{-1}$, $K_y = 9,57 \cdot 10^{-7} \text{Nm}^{-1}$).

$$F_{main} = Af \cdot (P_{laser} - P_{bille}) \quad (2.2)$$

$$P_{main} = Ad \cdot P_{laser} \quad (2.3)$$

D’après ces équations, la position du micro-outil en lévitation n’est pas directement reliée à la position de l’interface. Ce couplage ne peut donc pas être considéré comme direct, bien qu’il soit le plus simple réalisable. Pour appréhender ce système, l’approche consiste à considérer que la caméra rapide recrée une microsphère virtuelle (voir Fig. 2.16). Le couplage relie alors la main de l’utilisateur à cette bille virtuelle par une raideur équivalente, tandis que les billes réelle et virtuelle sont reliées par un gain homothétique en position.

$$F_{main} = \frac{Af \cdot K}{Ad} (P_{main} - P'_{bille}) \quad (2.4)$$

$$P'_{bille} = Ad \cdot P_{bille} \quad (2.5)$$

La raideur équivalente du système est donc $Af \cdot K / Ad$. Ce couplage crée donc un autre type de lien mécanique que de la pure homothétie. Il est appelé position-position en raison du couplage intuitif des positions des organes maître et esclave au sens de la télé-opération.

2.3.3 La preuve du concept

Le couplage réalisé pour ce prototype est le plus simple possible pour les pinces optiques. Il s’agit maintenant de vérifier que le choix du micromanipulateur et les premières op-

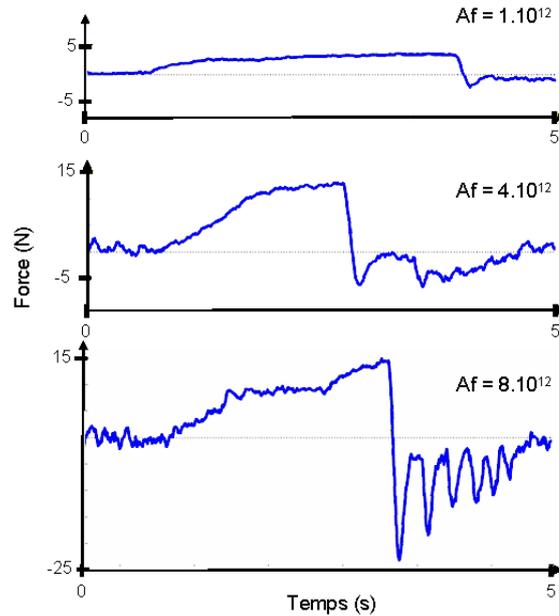


FIGURE 2.19 – Réponses des systèmes avec différents gains de force. La force renvoyée à l'utilisateur est affichée en fonction du temps pour 3 gains en force différents lors de l'exploration d'un mur matériel (cube de silice de $100\mu m$). Plus ce gain est élevé, plus les oscillations liées au couplage apparaissent. Le Falcon ne peut pas produire plus de 9N. En réalité la force renvoyée à l'utilisateur est saturée pour les gains importants. ($Ad = 4068$, $K_x = 2,28 \cdot 10^{-6} Nm^{-1}$, $K_y = 1,45 \cdot 10^{-6} Nm^{-1}$)

timisations rendent ce couplage utilisable.

Pour illustrer le schéma bilatéral, la figure 2.18 présente la réponse des signaux lors d'un déplacement du piège dans un environnement libre d'obstacle. La force renvoyée à l'utilisateur est confondue avec la force mesurée sur le piège. Par contre, la position du laser est retardée par rapport à la commande de la poignée de $\sim 200ms$. Ce retard est dû à la dynamique du miroir actionné. De même, le piège transmet avec un retard de $\sim 50ms$ la position désirée à la microsphère. Cette contrainte est due à la dynamique viscoélastique du piège. Cette première expérience montre que la transmission des positions n'est pas immédiate. Elle dépend ainsi de la dynamique de l'actionneur et du piège. Un autre facteur est également occulté dans ce graphique, le retard de la mesure des forces optiques dû à la caméra. Ce retard est de l'ordre d'une période d'acquisition soit $\sim 2ms$. Cette notion de transmission imparfaite est appelée performance en transparence du système. Ainsi lorsqu'un couplage n'est pas une simple transformation homothétique des forces et des positions, sa transparence est dégradée et les informations transmises sont altérées.

Pour augmenter l'amplitude de la perception, le gain en force peut être réglé. La configuration de Glasgow impose un gain en position Ad de 4068 pour parcourir la moitié de la scène sous microscope avec les dimensions du Falcon. La raideur selon l'axe x est étalonnée à $2,28 \cdot 10^{-6} Nm^{-1}$ et selon l'axe y à $1,45 \cdot 10^{-6} Nm^{-1}$ pour une bille de $5\mu m$ de diamètre. Lorsque le gain en force est fixé à $1 \cdot 10^{12}$, le système ne présente pas d'oscillation et renvoie des forces de l'ordre de 4N pour le contact avec

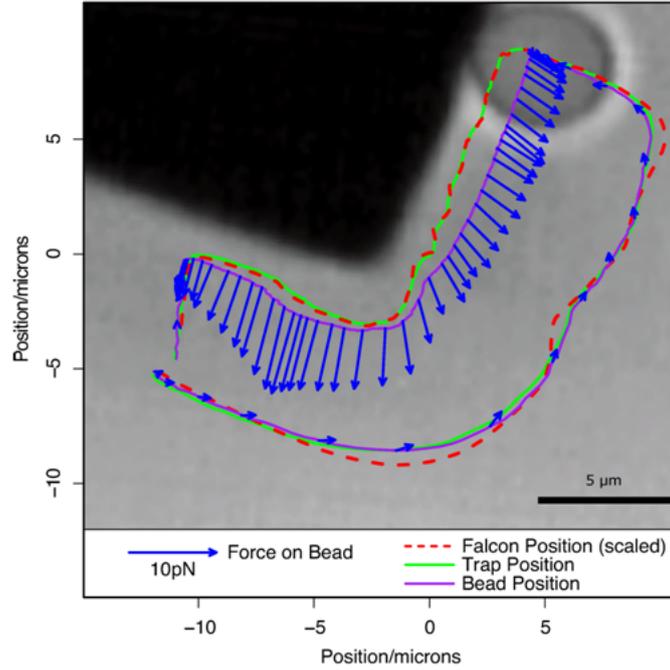


FIGURE 2.20 – Suivi d’un coin d’un cube de silice de $100\mu\text{m}$ de coté. Le décalage entre la position du laser et de la particule augmente avec la force appliquée par l’objet piégé sur le cube. Les différentes forces et positions sont mises à la même échelle avec les gains homothétiques $Ad = 4068$, $Af = 7 \cdot 10^{11}$, $K_x = 2,12 \cdot 10^{-6}\text{Nm}^{-1}$, $K_y = 3,03 \cdot 10^{-6}\text{Nm}^{-1}$.

un obstacle. La sensation de mur est claire et utilisable (voir fig. 2.19). En augmentant ce gain, les forces perçues sont plus importantes pour la même exploration, mais un phénomène d’oscillation apparaît à la rupture du contact. A partir de $Af = 8 \cdot 10^{12}$, le système oscille fortement. Le contrôle du piège échappe à l’opérateur et le système n’est plus utilisable. Cette deuxième expérience donne un aperçu intuitif de l’effet du couplage bilatéral sur la manipulation. Si les paramètres ne sont pas réglés convenablement, le retour haptique, au lieu d’aider l’utilisateur, rend la tâche impossible, voire dangereuse pour les échantillons et l’opérateur. Lorsque les coefficients homothétiques sont réglés pour éviter les oscillations, les sensations du retour haptique rendent l’exploration d’obstacles divers fine. Par exemple, l’exploration haptique d’un coin d’un cube de silicium de $100\mu\text{m}$ de coté est proposé comme premier exemple illustratif (voir fig. 2.20). Un assemblage est également réalisé avec une anfractuosité de chrome (voir fig. 2.21). Le mouvement brownien sur une bille de $5\mu\text{m}$ est rendu comme une force aléatoire de faible amplitude, perceptible à partir de $Af = 1 \cdot 10^{12}$.

Finalement une rapide évaluation est réalisée pour comparer les performances de suivi avec pression constante sur la surface d’un cube de silice (voir Fig. 2.22). Cette expérience montre que le retour améliore qualitativement la dextérité de l’utilisateur. Cette étude, bien que rudimentaire, met en évidence l’apport du retour haptique couplé à la flexibilité des pinces optiques.

Ce premier prototype est fonctionnel et a satisfait les utilisateurs de Glasgow. Il a démontré que le choix raisonné d’un micromanipulateur donne des sensations de forces

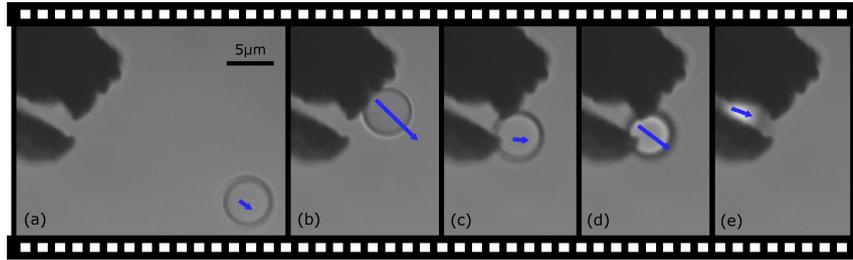


FIGURE 2.21 – Séquence d’images présentant l’assemblage d’une bille dans une anfractuosité dans un déchet de chrome. (a) Une bille est piégée près du déchet de chrome. (b) Elle est amenée en contact avec le chrome. (c) Elle est amenée à l’entrée. (d) La bille est insérée avec une force importante. (e) Elle est dans l’anfractuosité, le tunnel et le fond sont clairement perceptibles.

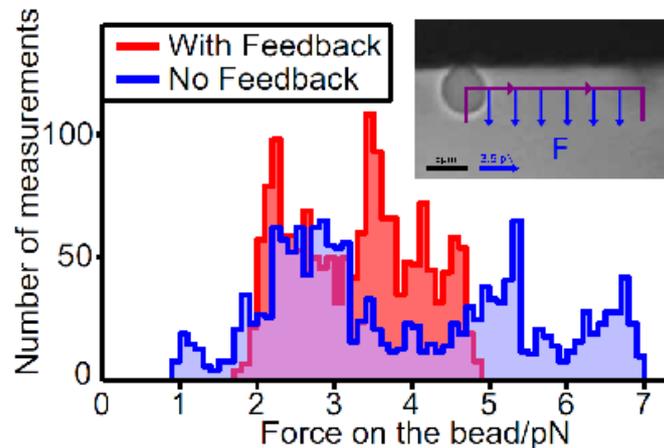


FIGURE 2.22 – Histogramme de la force de pression exercée par la bille sur un bord du cube de silice lors d’un mouvement de suivi. Il est demandé à l’utilisateur de maintenir une force constante sur la paroi durant le mouvement. Les résultats sont affichés pour un suivi sans assistance haptique, ni indicateur visuel (bleu), puis pour un suivi assisté (rouge).

réelles de l’ordre du pN. Cette gamme de force n’a jamais été ressentie auparavant. La simplicité du couplage participe au réalisme des interactions perçues.

Une meilleure transparence et un gain plus important en force sont possibles en améliorant encore les composants du micromanipulateur et de l’interface haptique. Le miroir motorisé peut ainsi être échangé au profit d’un système ultra-rapide de type galvanomètre. De même, l’interface haptique Falcon possède des jeux importants dans ses axes et les frottements occasionnés altèrent les informations transmises. Ces deux points peuvent améliorer la bande passante de l’ensemble et rendre les grandes dynamiques de façon plus perceptuelle.

Pour le programme de contrôle implémenté sous Windows avec Labview, les défauts principaux se portent sur le manque de déterminisme dans l’échantillonnage. Cette variation du temps de boucle peut être perçue par l’utilisateur. Il est difficile de discriminer les défauts liés à l’échantillonnage, aux retards et aux bruits de mesures par rapport au rendu du mouvement brownien.

Le système est également limité par son traitement d'image. L'algorithme choisi pour des raisons de ressources informatiques restreint les applications. Il est composé d'un seuil puis d'un centre de masse sur l'intensité de l'image de la caméra rapide. Ce choix algorithmique donne au programme des capacités de rafraîchissement de la mesure à 500Hz. Cet algorithme est rapide, simple, mais ne discrimine pas l'objet piégé et les obstacles. Cette contrainte explique le choix d'obstacles noirs comme le chrome ou le silicium. Des obstacles plus clairs comme un microcanal ou une cellule sont pris en compte dans le calcul et faussent la mesure. Pour pallier cet inconvénient, des algorithmes de type corrélation doivent être utilisés avec des ressources informatiques plus importantes et une programmation adaptée et parallèle. Ils sont plus robustes aux obstacles ou aux impuretés. Les caméras événementielles sont également des solutions potentielles pour utiliser des algorithmes complexes avec de moindres ressources processeurs.

Les résultats comparés aux faiblesses de ce premier prototype laissent prévoir un énorme potentiel à la technique présentée. La notion de transparence et de stabilité ont été abordées expérimentalement dans ce chapitre autour d'exemples illustratifs. Il faut cependant garantir cette stabilité et maximiser la transparence. Une modélisation proche du prototype expérimental est nécessaire pour optimiser les paramètres de couplage et ainsi proposer un couplage haptique pour les pinces optiques le plus performant possible.

Modélisation du micromanipulateur haptique

Sommaire

4.1	Suivi rapide et robuste du micro-outil piégé	101
4.1.1	L'enjeu de la vision en microrobotique	102
4.1.2	Vers un nouveau capteur, la caméra asynchrone	107
4.1.3	Algorithme de traitement dédié	110
4.2	Manipulateur dédié au retour d'effort	111
4.2.1	Description du système	112
4.2.2	Mesure du mouvement Brownien	115
4.2.3	Résultats de téléopération en temps réel	118
4.3	Installation dédiée et perspectives	120

Dans le chapitre 2, une optimisation de l'espace de travail des pinces optiques a été réalisée. L'opérateur peut ainsi accomplir une tâche sur toute la scène avec un actionneur rapide et une mesure d'effort efficace. Un premier prototype expérimental construit à Glasgow a également mis en évidence les besoins d'un actionneur très rapide et d'un capteur de mesure robuste.

Les autres paramètres du système tels que la raideur du piège, la taille de la micro-sphère piégée et les caractéristiques de l'interface haptique n'ont pas pu être évalués expérimentalement. Mais leur influence sur la stabilité et la transparence du système de télé-micromanipulation n'est pas nécessairement négligeable.

Une approche théorique est proposée afin de déterminer qualitativement leur influence sur les performances du système et d'améliorer les sensations des interactions du micromonde. Dans ce but, le télé-micromanipulateur complet est modélisé et trois indices de performances sont définis : la limite de stabilité, la limite de confort et l'écart à la transparence.

Dans un souci de dialogue interdisciplinaire, des outils classiques d'automatique sont délibérément utilisés pour que l'approche reste simple à appréhender.

3.1 La boucle haptique

La modélisation explicitée dans ce chapitre s'intéresse au système complet de télé-micromanipulation, le micromanipulateur et l'interface haptique couplés. Ce couplage a été précédemment défini comme le lien conceptuel entre la main de l'opérateur et l'outil

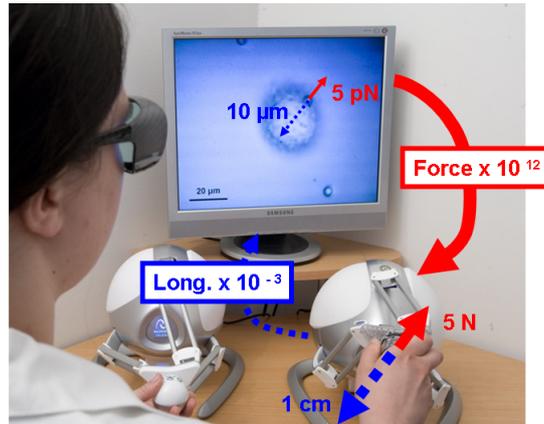


FIGURE 3.1 – Illustration du concept de couplage haptique. Les longueurs sont divisées par 10^3 pour transformer 1 cm en $10 \mu\text{m}$ et les forces sont amplifiées par 10^{12} pour passer de 1pN à 1N.

opérant dans le milieu microscopique. Il recrée la relation bilatérale force-position entre ces deux organes. Les informations circulent alors dans une boucle, appelée haptique (voir Fig. 3.1).

Elle est constituée précisément de quatre parties : le micromanipulateur, l'interface utilisateur à retour d'effort, le couplage et l'environnement. Une boucle fermée au sens de l'automatique est alors constituée. L'opérateur interagit avec l'entrée et la sortie de celle-ci.

3.1.1 Le micromanipulateur

Le micromanipulateur est dans notre cas une pince optique. Plus généralement, l'exemple retenu est un micro-outil piégé qui manipule indirectement un échantillon quelconque. Le micromanipulateur est composé d'un laser réfléchi par un ou plusieurs miroirs motorisés. Le choix de cet actionneur est justifié à la section 2.2.3. Le faisceau est alors dirigé vers un objectif de microscope qui le focalise sur un échantillon. Des microsphères se trouvent en suspension dans une solution aqueuse et l'une d'entre elle est piégée par le laser focalisé. L'effet de ce piège est enregistré par une caméra rapide et un modèle estime les interactions subies par le micro-outil piégé.

La modélisation suivante est mise sous la forme de fonctions de transfert exprimées dans le domaine de Laplace, dont s est l'opérateur canonique.

L'actionneur

Situé à l'entrée du microscope, l'actionneur est composé de miroirs motorisés. Ceux-ci réfléchissent le faisceau laser. Une consigne en position déplace le spot laser dans la scène. Les aberrations optiques, induites par la géométrie des miroirs et par l'objectif, sont corrigées par l'étalonnage.

L'entrée de cette première fonction de transfert est donc la position désirée dans le

micromonde par l'opérateur et la sortie, la position réelle du spot laser.

La modélisation se base sur l'observation expérimentale de la réponse de ce système. Les axes sont considérés identiques et découplés dans cette étude. Un axe motorisé est alors assimilé à un système du premier ordre avec une constante de temps donnée, τ_m (voir la justification en annexe C). Dans le domaine de Laplace, chaque axe est modélisé par la fonction de transfert suivante :

$$M(s) = \frac{P_{laser}(s)}{P_{cons}(s)} = \frac{1}{(\tau_m \cdot s + 1)} \quad (3.1)$$

Le piège optique

A la suite de ces actionneurs, le laser est focalisé par un objectif à grand angle d'ouverture. Un piège optique est créé. Cette lumière intense produit une force importante sur les micro-objets, appelée force optique. Elle se comporte comme une force de rappel vers le point focal. Si une microsphère se retrouve dans le piège, un simple déplacement du laser entraîne celle-ci.

De nombreux travaux se sont intéressés à mesurer et modéliser cette force¹. Le rapport entre la force et la position relative de la bille par rapport au laser est d'allure cubique² et comporte un domaine linéaire. Ce domaine est en général égal à environ un quart du rayon de la microsphère. Ceci correspond à la zone de mesure exploitable. Si l'écart devient trop important et dépasse ce domaine, l'objet risque de sortir du piège.

L'approximation linéaire est aujourd'hui communément utilisée. Elle sert notamment à reconstruire la mesure des forces à partir de la position relative de la bille piégée par rapport au laser. La raideur du piège, \underline{K} , est donc définie par l'expression suivante :

$$\underline{F}_{laser}(t) = -\underline{K} \cdot (\underline{P}_{bille}(t) - \underline{P}_{laser}(t))$$

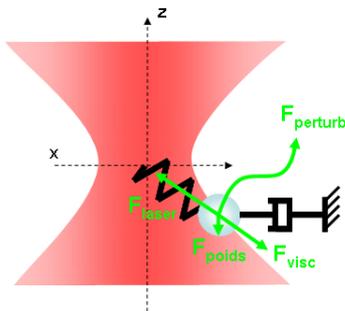


FIGURE 3.2 – Bilan des forces sur une microsphère dans un piège optique

La raideur exacte est représentée par une matrice pour signifier son anisotropie. Par exemple, la raideur axiale (z) est en général beaucoup plus faible que les raideurs orthogonales (x, y). Leurs effets sont également couplés. Pour cette étude, les axes sont considérés identiques et indépendants. Une relation scalaire, soit la projection sur un des axes, remplace les expressions vectorielles :

$$F_{laser}(t) = -K \cdot (P_{bille}(t) - P_{laser}(t)) \quad (3.2)$$

1. [Svoboda 1994, Neuman 2004]
2. [Simmons 1996, Ranaweera 2004]

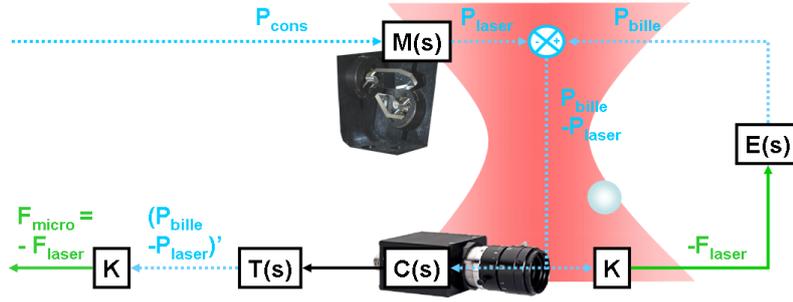


FIGURE 3.3 – Modèle du micromanipulateur de type pince optique. M , C , T , E sont les fonctions de transfert respectivement du miroir motorisé, de la caméra rapide, du traitement d'image et de l'environnement microscopique. K est la raideur du piège. La position relative de la bille par rapport au laser est obtenue à partir d'un comparateur. De même, cette grandeur est enregistrée par la caméra rapide et est également utilisée pour le modèle du piège. La notation apostrophe correspond à l'image d'un signal à un gain homothétique près. Ici, il s'agit de la conversion pixel-micromètre par la caméra.

Outre les forces optiques, d'autres forces agissent sur la microsphère piégée : la pesanteur, la force de résistance visqueuse aux déplacements de l'objet due au milieu liquide et les forces dues à un obstacle ou autres perturbations, par exemple le mouvement Brownien. Ces forces sont considérées comme provenant de l'environnement.

Le principe fondamental de la dynamique (voir figure 3.2) s'exprime pour l'objet piégé par la relation suivante :

$$\underline{F}_{laser}(t) + \underline{F}_{env}(t) = m \cdot \ddot{\underline{P}}_{bille}(t)$$

où $\underline{F}_{env}(t) = \underline{F}_{poids} + \underline{F}_{visc}(t) + \underline{F}_{perturb}$.

Comme la masse des micro-objets (de l'ordre de 10^{-15} kg) est infime, la pesanteur et les effets d'inertie sont négligeables. L'équation précédente s'écrit alors :

$$\underline{F}_{laser}(t) + \underline{F}_{env}(t) \approx 0 \quad (3.3)$$

L'opposé de la force optique est donc une image de l'interaction avec l'environnement. Il suffit de renvoyer cette mesure à l'utilisateur, amplifiée par un gain homothétique.

La mesure d'effort

La caméra rapide joue le rôle de capteur de position et enregistre la position relative entre l'objet piégé et le spot laser. Elle est représentée par une fonction de transfert, $C(s)$, et un point de soustraction entre les positions précitées. Elle produit une image sous forme de pixels à partir d'une image numérique. La partie traitement, $T(s)$, est séparée de la caméra pour montrer qu'elle est réalisée de manière logicielle par l'ordinateur.

Dans un premier temps, le capteur et le traitement sont considérés parfaits et instantanés. Les deux fonctions de transfert associées sont réduites à un gain unité. Un

deuxième modèle prend, ensuite, en compte le temps d'acquisition et de traitement des images. Comme le traitement est très rapide, le retard induit par la mesure complète est estimé à une période d'échantillonnage.

La figure 3.3 résume le modèle établi à partir des fonctions de transferts précédentes. Plusieurs hypothèses ont dû être apportées pour simplifier le problème. Elles sont résumées ici :

- Le piège agit comme un ressort de raideur constante K sur un domaine infini.
- Il existe toujours une seule microsphère de rayon R dans le piège. Dans la pratique, il arrive que plusieurs microsphères soient piégées au niveau du point focal, engendrant des changements dans les propriétés du piège.
- Les effets de bord de la boîte de Pétri ou de température sont négligés. La viscosité est constante et uniforme. La loi de Faxen est négligée (cf. section 2.1.3).
- Les axes peuvent être traités indépendamment. Ils sont considérés parfaitement découplés dans tous les organes. L'axe z n'est pas traité car il présente des non-linéarités dues à la loi de Faxen. De plus, cet axe ne fait aujourd'hui pas l'objet d'actionnement, ni de mesure sur les prototypes expérimentaux réalisés dans le cadre de cette étude.

Ce modèle est facilement transférable aux pinces électromagnétiques dont la raideur est plus faible. Pour les pointes AFM, il faut modifier la fonction de transfert de manière à tenir compte de la masse de la pointe. Mais dans ce cas, la modélisation de l'environnement³ devient très compliquée, car les interactions extérieures et notamment les forces d'adhésion varient très brutalement.

3.1.2 L'interface haptique

Ce micromanipulateur doit être relié à une interface haptique qui interagit avec l'opérateur. Classiquement, cette interface est modélisée par une masse amortie⁴, dont la fonction de transfert est la suivante :

$$\begin{aligned} H(s) &= \frac{P_{main}(s)}{(F_{main}(s) + F'_{micro}(s))} \\ &= \frac{1}{s \cdot (M_h \cdot s + B_h)} \\ &= \frac{1/B_h}{s \cdot (\tau_h \cdot s + 1)} \end{aligned} \quad (3.4)$$

avec M_h la masse équivalente, B_h le coefficient d'amortissement équivalent et $\tau_h = \frac{M_h}{B_h}$ la constante de temps du système haptique. Les frottements de Coulomb sont négligés dans cette étude⁵.

Ces paramètres doivent être identifiés pour chaque type d'interface haptique. Le Falcon

3. Voir la section 1.3.3

4. [Minsky 1990]

5. Pour un modèle plus complet voir [Diolaiti 2006]

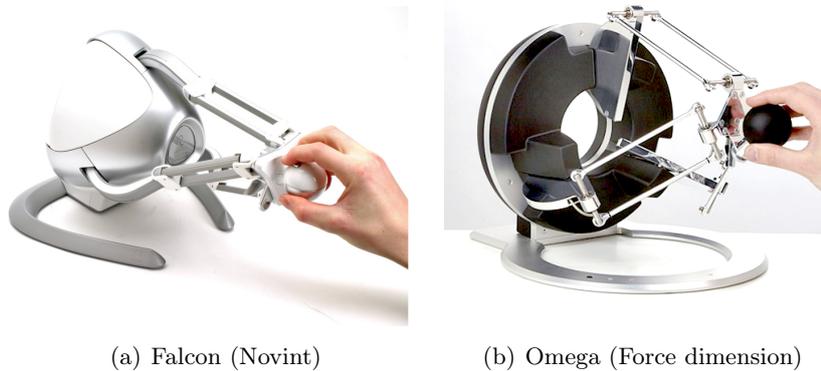


FIGURE 3.4 – Interfaces haptiques parallèles du commerce

de chez Novint (voir Fig. 3.4) comporte de nombreux défauts dans sa conception, entraînant de nombreux jeux et frictions dans ces axes et une forte anisotropie de son espace de travail⁶. L'identification de ses paramètres n'a pas été concluante. Comme elle paraît présenter plus de frottements que son homologue haut de gamme, l'Omega de chez Force Dimension, nous avons choisi de reprendre les paramètres publiés de ce dernier⁷ et d'augmenter de dix fois le coefficient d'amortissement équivalent.

Le modèle masse amortie étant déjà une approximation grossière du comportement d'une interface haptique, il n'est pas nécessaire d'approfondir cette modélisation du Falcon. Par ailleurs, dans la suite du chapitre, les valeurs numériques ne sont considérées qu'en temps que comparaison pour établir, par exemple, l'influence d'une interface haptique visqueuse ou inertielle sur les performances du système.

3.1.3 Le couplage

Dans le cas du retour haptique, l'utilisateur interagit avec la poignée de l'interface. La position de celle-ci est mesurée par les encodeurs dans les axes moteurs. Le couplage adapte par homothétie cette information. Le gain en position, Ad , est choisi en fonction de l'espace de travail de l'interface et de la vision de la scène sous microscope.

La mesure des efforts est réalisée sur la microsphère piégée. Un capteur de position restitue la force à partir du modèle de raideur du piège. Elle est ensuite amplifiée par un gain homothétique en force, Af . L'enjeu est d'obtenir un gain amplificateur le plus élevé possible pour rendre des interactions microscopiques perceptibles par l'opérateur. La stabilité de la boucle (voir Fig 3.5) limite cette valeur du gain en force.

Le couplage proposé comporte donc deux gains réglables en fonction des conditions de la tâche. Dans la section 2.3.2, le lien conceptuel entre la main de l'opérateur et l'outil a été défini comme un ressort virtuel. Ce ressort a pour raideur $K \frac{Af}{Ad}$, ce n'est donc pas un gain réglable supplémentaire du problème. Ce type de couplage est appelé position-position.

6. [Martin 2009]

7. [Diolaïti 2006]

La boucle haptique étudiée est alors formée en utilisant les modélisations précédentes. L'interface haptique est reliée à la pince optique par l'intermédiaire d'un ordinateur qui gère les gains du couplage, le traitement d'image et le modèle de la raideur du piège. Dans la figure 3.5, l'action de l'opérateur se situe à gauche de la boucle et celle de l'environnement à droite.

Un quadripole est ainsi constitué. Il représente clairement la relation bilatérale entre l'utilisateur et l'environnement. Il existe des critères de passivité afin de régler les gains du couplage sous cette forme⁸.

Pour appliquer les critères classiques de stabilité, la méthode consiste à créer une boucle fermée en modélisant l'une des entrées du quadripole. Cette méthode possède l'avantage d'être plus simple algébriquement. Elle est possible dans notre cas et révèle les interactions mécaniques liées à l'environnement du milieu microscopique.

8. [Micaelli 2002]

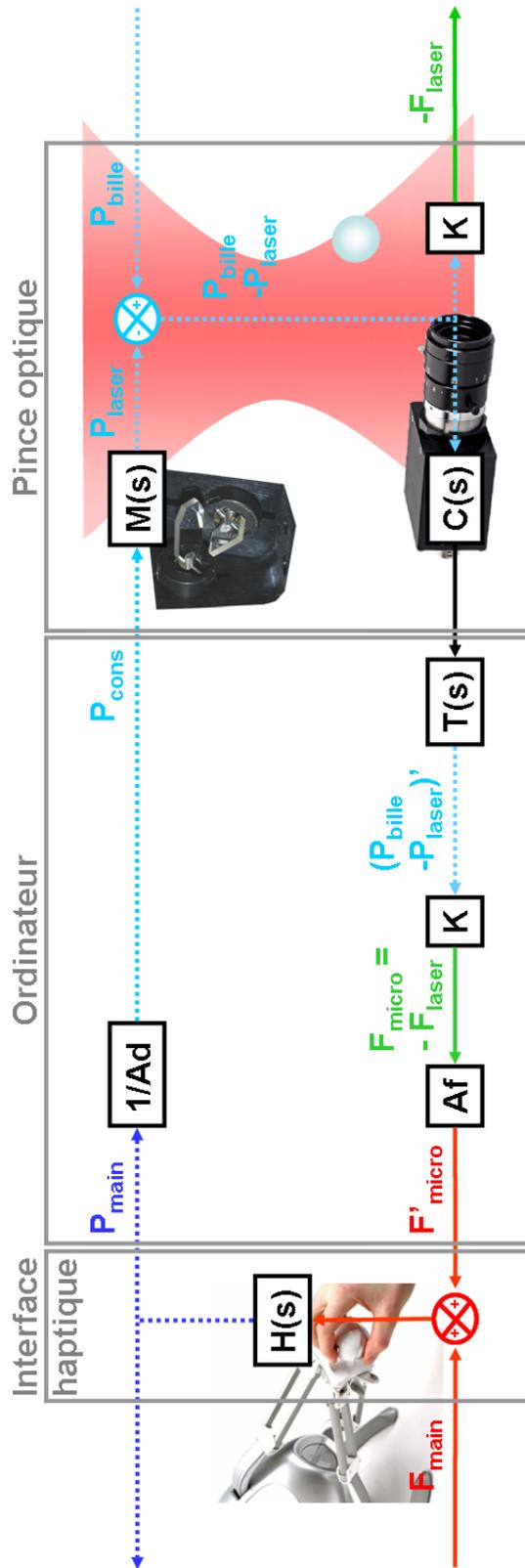


FIGURE 3.5 – Boucle haptique détaillée. En bleu (trait pointillé) foncé et clair sont respectivement représentées les grandeurs de déplacement dans le monde macroscopique (cm) et microscopique (μm), en rouge et en vert (trait plein) respectivement les forces perçues (N) et les forces microscopiques (pN). $M(s)$, $H(s)$, $C(s)$ et $T(s)$ sont respectivement les fonctions de transfert de l'actionneur, de l'interface haptique, de la caméra rapide et du traitement d'image. A_f et A_d sont les gains en force et position du couplage.

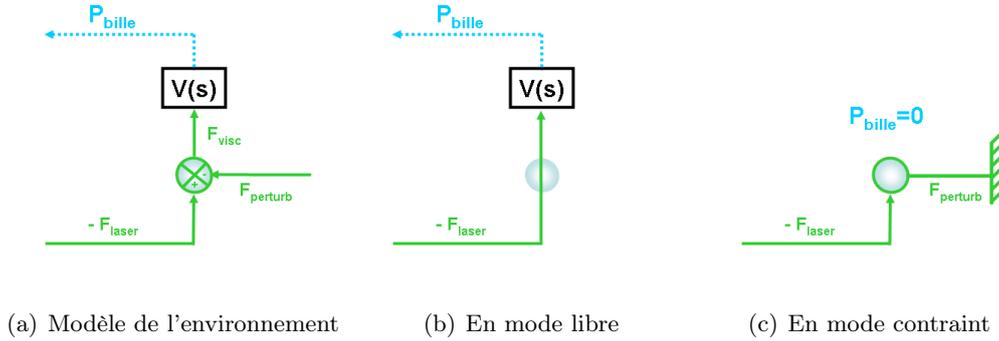


FIGURE 3.6 – Modélisation de l’environnement pour le cas général (a) et pour deux configurations extrêmes. (b) Cas le plus favorable ou mode libre : l’objet piégé est libre de tout obstacle. (c) Cas le plus défavorable ou mode contraint : l’objet est contraint à la position immobile par des forces d’adhésion ou un mur.

3.1.4 L’environnement

La méconnaissance et la complexité des interactions avec l’environnement rendent difficile toute étude analytique du couplage et de ses propriétés de stabilité et de transparence. Une réduction de son effet à quelques cas extrêmes est nécessaire pour constituer un système à une entrée-sortie.

L’environnement des pinces optiques, dans la majorité des expériences, est un milieu aqueux. Ce milieu réduit fortement les forces électrostatiques et les forces de van der Waals. De plus, la faible taille des micro-outils diminue encore les forces d’adhésion dont l’intensité est liée aux surfaces en présence. Les phénomènes de pull-in et pull-off n’apparaissent plus dans ce cas, contrairement aux courbes d’approche retrait des pointes AFM (voir section 1.2.2).

Par contre, la viscosité de ce milieu est importante. Elle se distingue des autres perturbations, car elle est constamment présente. La figure 3.6(a) montre le modèle obtenu à partir du bilan des forces :

$$\underline{F}_{visc}(t) = -\underline{F}_{laser}(t) - \underline{F}_{perturb}(t) \quad (3.5)$$

La force F_{visc} peut être modélisée pour une microsphère dans un fluide Newtonien visqueux d’après Stokes et Faxen⁹ par :

$$\underline{F}_{visc}(t) = -B_v(h) \cdot \dot{\underline{P}}_{bille}(t) \quad (3.6)$$

B_v est appelé coefficient visqueux du piège. Il prend en compte la viscosité dynamique du milieu η . Pour la suite, la hauteur du piège est considérée fixe et donc le coefficient visqueux est supposé constant. L’étude de l’axe z est plus compliquée que celle des axes orthogonaux, car ce terme $B_v(h)$ introduit des non-linéarités dans l’équation différentielle. Etant plus difficile à contrôler, il est également moins exploité. Sa caractérisation dépasse le cadre de cette étude dédiée à l’influence des paramètres.

9. Voir la section 2.1.3 et [Happel 1981]

Dans le domaine de Laplace, la fonction de transfert qui relie la force de résistance visqueuse à la position de la bille est la suivante :

$$\begin{aligned} V(s) &= \frac{P_{bille}(s)}{F_{visc}(s)} \\ &= \frac{-1}{B_v \cdot s} \end{aligned} \quad (3.7)$$

où $B_v = 6\pi\eta R$ avec η la viscosité dynamique du milieu et R le rayon de la microsphère piégée.

Nous proposons de modéliser les autres interactions avec l'environnement par deux cas extrêmes : le plus favorable et le plus défavorable en termes de stabilité. La configuration la plus favorable est un piège libre de tout obstacle. L'objet piégé ne subit que l'action de la résistance visqueuse du milieu (voir la figure 3.6(b)). La pire configuration se rencontre lorsque la bille ne suit plus le piège. Cet aspect se produit lors de la rencontre de l'objet piégé avec un obstacle rigide ou avec un phénomène d'adhérence. Dans ce cas, la bille est immobilisée quels que soient les mouvements du laser (voir la figure 3.6(c)). Les déplacements du laser ne sont, par contre, pas contraints. S'ils s'éloignent du micro-outil, celui-ci sort du domaine de raideur linéaire et les forces optiques finissent par être inefficaces. Un guide virtuel peut être ajouté pour contraindre l'opérateur à rester dans la zone d'influence du laser.

3.1.5 La boucle fermée

De la même manière, l'opérateur pourrait également être modélisé. Il est, en effet, possible de prévoir son comportement lorsque celui-ci est passif¹⁰. Mais il est plus pertinent de considérer son interaction ouverte et active et d'utiliser la modélisation de l'environnement pour réaliser une boucle fermée. L'entrée de celle-ci est donc l'action de l'opérateur, soit la force qu'il exerce sur la poignée pour déplacer le piège, F_{main} . La sortie est la position de la main de l'opérateur, P_{main} . Elle résulte de la dynamique de l'interface reliée à la dynamique du micromanipulateur.

Finalement, les modèles obtenus en boucle fermée sont très simples. Ils sont représentés par les figures 3.7(a) et 3.7(b) pour les deux cas extrêmes définis.

Les fonctions de transfert des boucles fermées sont, dans un premier temps, obtenues pour un système continu et des transmissions parfaites. La résolution dans le domaine de Laplace donne une première estimation du domaine de stabilité. Cette dernière donne des informations pour comprendre rapidement le comportement de la boucle fermée, mais sur-estime les performances car les défauts de transmission ne sont pas pris en compte.

Le détail des calculs est présenté dans l'annexe D. Les fonctions de transfert en boucle fermée (FTBF) obtenues sont les suivantes :

10. [Kuchenbecker 2003]

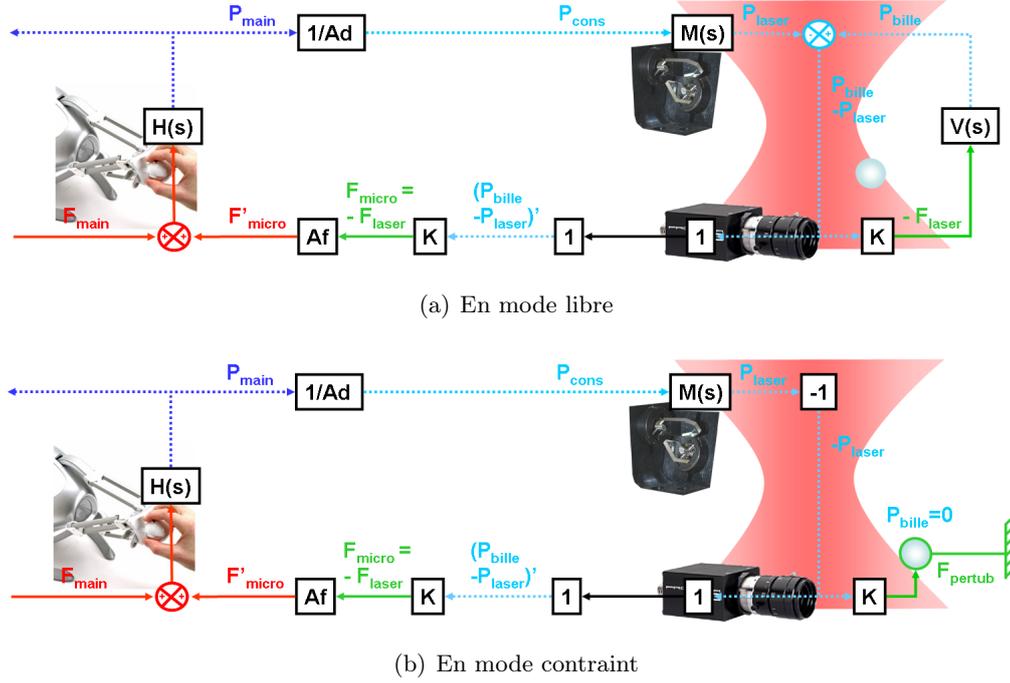


FIGURE 3.7 – Boucle fermée pour les deux configurations extrêmes

- pour le régime continu en mode libre (voir la figure 3.7(a)) :

$$\begin{aligned}
 FTBF_{libre}(s) &= \frac{P_{main}(s)}{F_{main}(s)} \\
 &= \frac{H(s)}{1 + \frac{-Af}{Ad} \cdot K \cdot M(s) \cdot \frac{-1}{1 - K \cdot V(s)} \cdot H(s)}
 \end{aligned}$$

- pour le régime continu en mode contraint (voir la figure 3.7(b)) :

$$FTBF_{contraint}(s) = \frac{H(s)}{1 + \frac{-Af}{Ad} \cdot K \cdot M(s) \cdot H(s)}$$

Dans un second temps, les imperfections de transmission sont prises en compte. Elles sont liées à l'échantillonnage des signaux pour la commande numérique. Dans le système de Glasgow, la période d'échantillonnage est fixée sur le temps de traitement des images de la caméra rapide. Ce composant induit également un retard de rafraîchissement de l'information de l'ordre d'une période. Des techniques de vision plus rapides doivent être envisagées pour améliorer la période d'échantillonnage du système.

En appliquant le changement de variable classique, $z = e^{T_{ech} \cdot s}$, un modèle qui tient compte de la fréquence d'échantillonnage est obtenu. La transformation est détaillée dans l'annexe D et les résultats sont présentés ici, sous forme de fonctions de transfert échantillonnées de la boucle fermée :

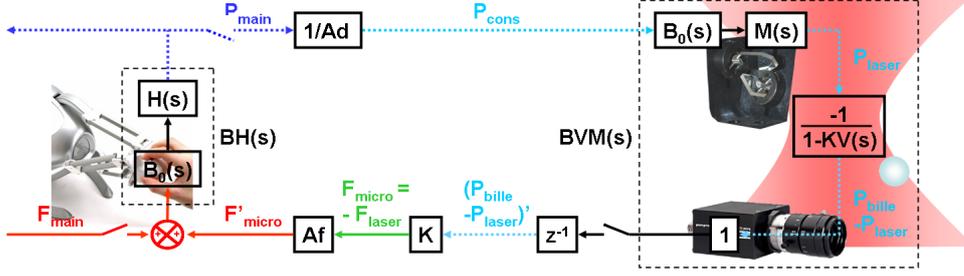


FIGURE 3.8 – Modèle de la boucle haptique échantillonnée pour le mode libre. La caméra est modélisée par un retard pur d’une période d’échantillonnage.

- pour le régime échantillonné en mode libre :

$$FTBFE_{libre}(z) = \frac{BH(z)}{1 - Af/Ad \cdot K \cdot z^{-1} \cdot BH(z) \cdot BVM(z)}$$

Les fonctions $BH(z)$ et $BVM(z)$ sont obtenues en transformant en z par bloc les parties analogiques du système, soit la mécanique du micromanipulateur et celle de l’interface haptique (voir encadrés dans la figure 3.8). Des bloqueurs d’ordre zéro, $B_0(s)$, opèrent la conversion numérique-analogique. Un terme z^{-1} est introduit pour représenter un retard d’une période liée à l’acquisition et au traitement d’image.

- pour le régime échantillonné en mode contraint :

$$FTBFE_{contraint}(z) = \frac{BH(z)}{1 - Af/Ad \cdot K \cdot z^{-1} \cdot BH(z) \cdot BM(z)}$$

$BM(z)$ correspond au modèle du micromanipulateur pour le mode contraint. Dans ce cas, la fonction de transfert $V(s)$ est nulle (voir en annexe D, Fig. D.4).

3.2 Les performances

La fonction de transfert en boucle fermée fournit des informations cruciales au sujet des performances d’un système. Pour la télé-opération, la sécurité de l’opérateur est l’un de ces critères. Le confort et la dextérité de l’opérateur doivent aussi être préservés quelle que soit l’intensité des interactions retournées. Ces propriétés sont quantifiées par le critère de **stabilité**. De même, il est essentiel que les informations transmises soient représentatives des phénomènes mis en jeu et qu’elles aident à la compréhension de l’environnement ou de la tâche. Le couplage et les organes couplés peuvent introduire des filtres et des retards. S’ils sont importants, le retour tactile perd en précision et en réactivité. La **transparence** est un facteur de qualité et de restitution fidèle de ces efforts pour les systèmes bilatéraux.

Les paramètres favorables à la stabilité sont en général préjudiciables à la transparence et réciproquement. Il faut donc trouver un équilibre entre ces deux critères pour réaliser un système efficace. Cette section définit trois indices pour évaluer l’influence des paramètres du système sur les performances : la limite de stabilité, la limite de

Paramètres fixes		
Gain en position	Ad	$4 \cdot 10^3$
Rayon de la bille	R	$3 \cdot 10^{-6} \text{m}$
Viscosité dynamique de l'eau	η	$10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s}$
Coefficient visqueux	$B_v = 6\pi\eta R$	$5,65 \cdot 10^{-8} \text{Pa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
Raideur du piège	K	$5 \cdot 10^{-7} \text{Nm}^{-1}$
Masse de l'interface	M_h	0,220 kg
Frottement visqueux de l'interface	B_h	$0,1 \text{Nsm}^{-1}$
Constante de temps de l'interface	$\tau_h = M_h/B_h$	2,2 s
Constante de relaxation du piège	$\tau_p = B_v/K$	113 ms
Période d'échantillonnage	T_{ech}	1 ms
Paramètres variables		
Constante de temps de l'actionneur	τ_m	210 ms (Glasgow) 0,043 ms (CEA)

TABLE 3.1 – Application numérique pour l'exemple de Glasgow et du CEA

confort et l'écart à la transparence. Une optimisation des composants du système est alors possible à partir de ces indices en gardant un couplage simple (soit deux gains homothétiques réglables).

Pour illustrer la définition de chaque indice, l'optimisation de la dynamique de l'actionneur est présentée. Le miroir actionné de Glasgow est comparé à un système rapide de type galvanomètre (voir section 2.2.1). L'exemplaire disponible au laboratoire du LISA au CEA sert d'exemple dans cette étude et ses caractéristiques se retrouvent en annexe C.

Les expressions analytiques étant complexes à appréhender, des applications numériques sont nécessaires pour mettre en évidence l'influence des paramètres. Le tableau 3.1 résume tous les paramètres correspondants à l'exemple expérimental de Glasgow et la constante de temps du galvanomètre du CEA. La modélisation se base sur un piège formé avec une bille de $3 \mu\text{m}$ de rayon dont la raideur est $5 \cdot 10^{-7} \text{N/m}$. Le modèle de l'interface haptique est dérivé de celui d'un Omega (Force dimension) dont les paramètres ont été identifiés par Diolaiti¹¹ et dont le coefficient visqueux est choisi dix fois plus fort pour simuler les défauts de l'interface Falcon.

La modélisation proposée dans ce chapitre se base sur de nombreuses hypothèses. Nous pouvons donc nous attendre à ne pas retrouver les mêmes ordres de grandeurs entre les résultats expérimentaux et le modèle. Mais l'évolution réelle de l'influence des paramètres est conservée afin de définir les valeurs les plus favorables pour des performances désirées.

11. [Diolaiti 2006]

3.2.1 La stabilité

La modélisation adoptée est utilisée pour mesurer la stabilité pour une boucle fermée classique dont la fonction de transfert est connue pour deux configurations différentes de l'environnement. Dans la suite, le cas du régime continu est d'abord traité afin d'obtenir des critères analytiques simples à analyser. Le régime échantillonné est ensuite examiné pour prendre en compte l'influence de la période d'échantillonnage.

Régime continu

Les propriétés concomitantes suivantes sont applicables dans ce premier cas :

- Un système stable converge vers sa position d'équilibre quand il en est écarté.
- Sa fonction de transfert en boucle fermée présente des pôles dont les parties réelles sont nécessairement négatives.
- Le critère de Routh-Hurwitz est alors applicable sur le dénominateur de celle-ci.

Le critère de Routh-Hurwitz est un critère classique en automatique¹², il est rappelé en annexe D. La condition est établie sur le gain en force. En effet, si le système possède un grand domaine de stabilité, alors le gain en force peut augmenter et l'opérateur perçoit des forces de plus en plus petites venant du micromonde (à gain de position fixe). La valeur maximale du gain en force, Af_{max} , est donc choisie comme indice de la stabilité du système à retour d'effort.

Dans l'annexe D, les calculs sont détaillés et il en résulte les conditions suivantes pour les différents cas en régime continu :

- pour le cas libre :

$$Af < Af_{max}^{libre} = Ad \cdot \frac{M_h}{B_v} \cdot \frac{(\tau_h + \tau_p) \cdot (\tau_m + \tau_p) \cdot (\tau_m + \tau_h)}{\tau_h^2 \cdot \tau_m \cdot \tau_p}$$

- pour le cas contraint :

$$Af < Af_{max}^{constraint} = Ad \cdot \frac{B_h}{K} \cdot \frac{(\tau_h + \tau_m)}{\tau_h \cdot \tau_m}$$

Ces relations montrent l'implication du gain en position dans la stabilité. Plus celui-ci est élevé, plus les mouvements effectués sont petits. Il existe donc moins de risques de diverger puisqu'il est plus difficile de s'éloigner de la position d'équilibre.

Le deuxième terme exprime le ratio entre un des coefficients de l'interface et un du piège. Le dernier terme exprime une comparaison des constantes de temps. Celle-ci exprime l'influence de la dynamique des organes du système.

12. [Dieulesaint 1997]

Pour conclure sur l'influence de ces constantes, il faut se référer à leur ordre de grandeur. A l'aide des valeurs numériques du tableau 3.1, une simplification supplémentaire peut être appliquée en négligeant certains termes par rapport à d'autres (voir tableau 3.2).

	Glasgow	CEA
Constante de temps (ms)	$\tau_p < \tau_m \ll \tau_h$ $113 < 210 \ll 2200$	$\tau_m \ll \tau_p \ll \tau_h$ $0,043 \ll 113 \ll 2200$
Mode libre	$Af_{max} \approx Ad \cdot \frac{M_h}{B_v} \cdot \left(\frac{1}{\tau_m} + \frac{1}{\tau_p} \right)$	$Af_{max} \approx Ad \cdot \frac{M_h}{B_v} \cdot \frac{1}{\tau_m}$
Mode contraint	$Af_{max} \approx Ad \cdot \frac{B_h}{K} \cdot \frac{1}{\tau_m}$	$Af_{max} \approx Ad \cdot \frac{B_h}{K} \cdot \frac{1}{\tau_m}$

TABLE 3.2 – Critère analytique de stabilité pour le régime continu

Pour le mode libre, une interface à forte inertie et une faible résistance visqueuse du milieu sont favorables à la stabilité. Le composant le plus rapide, avec la constante de temps la plus faible, détient une influence particulière. Lorsque les actionneurs se démarquent particulièrement des autres composants, par exemple avec les galvanomètres du CEA, leurs actions améliorent d'autant plus la stabilité que leurs performances sont bonnes. Ainsi un piège optique de dynamique lente, induisant des retards, est compensé par un actionneur très dynamique.

Pour le mode contraint, les influences changent. Dans ce cas, une interface haptique visqueuse et une faible raideur du piège favorisent la stabilité. Cette dernière caractéristique compense le phénomène de mur microscopique infiniment raide du mode contraint. La rapidité de l'actionneur reste essentielle.

En remarque, il faut noter que la saturation des différents organes n'est pas prise en compte dans cette modélisation. Dans la réalité, le gain Af possède également une limite due aux capacités des moteurs de l'interface haptique. La force restituée à l'opérateur, si elle dépasse les bornes admissibles mécaniquement par les actionneurs, comporte un seuil soit de saturation mécanique, soit imposé par l'intégration logicielle.

Régime échantillonné

Des propriétés équivalentes sont applicables à la modélisation échantillonnée (voir annexe D). Plusieurs inéquations ont été obtenues, mais leur lecture analytique est complexe. A partir des applications numériques du tableau 3.1, il est possible d'évaluer les performances pour une période d'échantillonnage de 1 milliseconde et de les comparer au régime continu.

Le domaine de stabilité est donné par les gains maximaux en force pour les prototypes étudiés :

Af_{max}	Mode libre		Mode contraint	
	Continu	échantillonné	Continu	échantillonné
CEA	$3,8 \cdot 10^{14}$	$6,5 \cdot 10^{12}$	$1,8 \cdot 10^{13}$	$3,2 \cdot 10^{11}$
Glasgow	$2,4 \cdot 10^{11}$	$2,3 \cdot 10^{11}$	$4,1 \cdot 10^9$	$4,1 \cdot 10^9$

TABLE 3.3 – Limites de stabilité pour les prototypes étudiés. La période d'échantillonnage pour ce calcul est de 1 milliseconde.

En général, le système avec un actionneur rapide (CEA) donne de meilleures performances en stabilité que l'actionneur lent de Glasgow. Par contre, ce premier est plus fortement influencé par l'échantillonnage. L'optimisation fournie par la bonne dynamique de l'actionneur est dégradée par une période d'échantillonnage médiocre.

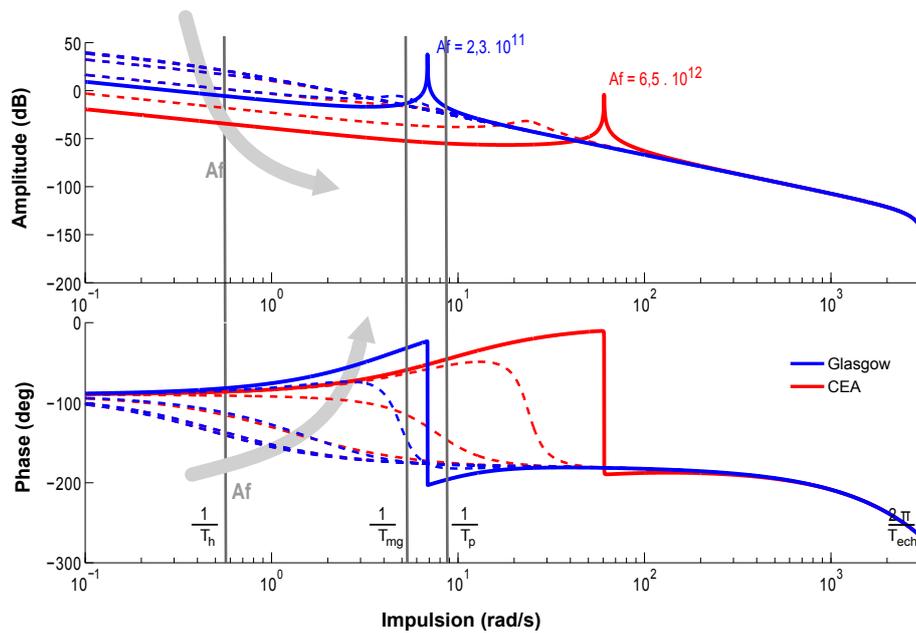
L'optimisation de l'actionneur de l'installation de Glasgow reste cruciale vis à vis de la stabilité comme le montre également le tracé des diagrammes de Bode pour plusieurs gains en force (voir Fig. 3.9(a) pour le mode libre et Fig. 3.9(b) pour le mode contraint en régime échantillonné). Lorsque Af est proche de sa valeur maximale, les diagrammes en gain présentent un pic très effilé et les diagrammes en phase présentent un saut brusque autour de la résonance. Cette propriété se déroule sur des gammes de fréquence inférieures pour le modèle de Glasgow (courbe bleu) par rapport à celui du CEA (rouge). De même, le mode contraint (graphique du bas) limite plus vite la bande passante que le mode libre (haut).

L'influence des constantes de temps des actionneurs est également mise en valeur par ce tracé des réponses fréquentielles. En effet, peu avant la fréquence de coupure de l'actionneur ($f_m^{glasgow} = 2\pi \cdot \omega_m^{glasgow} = 2\pi/\tau_m^{glasgow} = 29,9Hz$)¹³, le système de Glasgow commence à modifier son comportement : la résonance en amplitude et une brutale décroissance de la phase. Par contre, le système avec un actionneur rapide subit l'influence de l'échantillonnage ($1kHz$) avant celle de sa fréquence de coupure ($f_m^{CEA} = 2\pi \cdot \omega_m^{CEA} = 2\pi/\tau_m^{CEA} = 146kHz$).

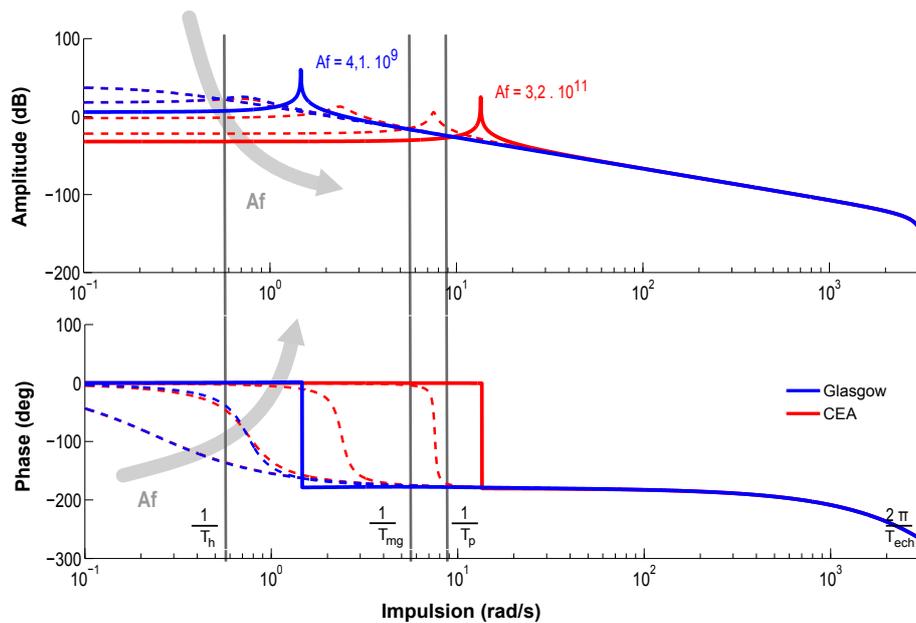
Le régime échantillonné correspond à la réalité des systèmes à commande numérique. Il prend en compte les défauts de transmission induits par l'échantillonnage. Un système avec un échantillonnage très grand ou quasi-continu possède de meilleures performances pour la stabilité. Il est donc important de tenir compte de l'échantillonnage. De même, le mode contraint est toujours plus critique pour la stabilité que le mode libre. Il est donc pertinent de fixer, comme valeur pour l'indice de stabilité, celle du gain en force maximal du régime échantillonné en mode contraint :

$$I_{stab} = Af_{max}^{constraint}(ech) \quad (3.8)$$

13. ω correspond à l'impulsion (rad/s)



(a) Mode libre



(b) Mode contraint

FIGURE 3.9 – Diagramme de Bode de la boucle haptique fermée pour Glasgow (bleu) et pour le CEA (rouge) en régime échantillonné. Les courbes pleines correspondent aux valeurs limites du gain de force pour la stabilité. Les courbes en tirets correspondent aux diagrammes pour Af variant de 10^8 à la limite de stabilité. Ces diagrammes ont été réalisés avec Matlab sur la base des fonctions de transfert calculées en annexe D.

En complément, la valeur du mode libre est conservée afin de considérer son éventuelle

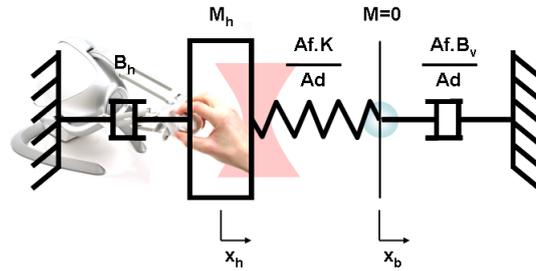


FIGURE 3.10 – Schéma simplifié de type masse-ressort-amortisseur du système de télé-micromanipulation bilatéral. Les actionneurs du laser sont considérés parfaits. La position du laser et celle de l'interface coïncident.

optimisation¹⁴.

$$C_{stab} = A J_{max}^{libre}(ech) \quad (3.9)$$

Finalement, il faut remarquer que les valeurs du gain de force données par le calcul de stabilité en régime échantillonné ne sont pas comparables à celles mesurées expérimentalement. Cette remarque montre une autre simplification importante du modèle, occultée jusqu'à présent : l'influence de la présence de l'utilisateur est négligée. En effet, le bras au sens large de l'opérateur dissipe de l'énergie et il améliore donc sensiblement la stabilité globale du système. Un utilisateur passif peut être assimilé à une masse amortie en parallèle de l'interface haptique¹⁵. Par contre, son action est difficilement modélisable¹⁶ : elle varie avec la physiologie de chaque sujet, avec la forme de la poignée et la manière de la tenir. Notre étude s'intéressant uniquement à l'optimisation des systèmes, cette simplification reste pertinente. Les résultats théoriques énoncés n'ont pas pour but d'être comparés à l'expérience, mais de dégager l'influence des dynamiques intrinsèques du micromanipulateur et de l'interface à retour d'effort.

La limite de stabilité établie indique la limite de convergence des dynamiques. Elle correspond au gain en force à partir duquel le système devient incontrôlable et potentiellement dangereux. Elle ne donne aucune indication sur la manoeuvrabilité du système. Celle-ci peut, en effet, être remise en question à cause de la forte résonance qui apparaît lorsque la limite de stabilité est approchée. Le système produit alors de fortes oscillations avant de revenir à une position d'équilibre. La manipulation n'est pas réalisable dans ces conditions. Expérimentalement, ce phénomène est mis en évidence dans les expériences avec des gains en force élevés (voir section 2.3.3, Fig. 2.19). Un nouvel indice garantissant l'absence d'oscillations rémanentes est proposé.

14. Dans la suite l'indice est toujours accompagné d'un complément dont l'optimisation est envisageable mais pas prioritaire

15. [Kuchenbecker 2003]

16. [Speich 2005]

3.2.2 La limite de confort

En représentant le système de télé-opération de manière simplifiée, il prend la forme d'un assemblage de masses, de ressorts et d'amortisseurs (voir Fig 3.10). Un oscillateur est effectivement mis en évidence. La masse de l'interface stocke l'énergie cinétique et le ressort virtuel du couplage (voir section 2.3.2) conserve l'énergie potentielle du système. Lorsque l'utilisateur excite le système, il active un transfert récursif d'énergie de l'un vers l'autre, transfert qui est lentement amorti par la résistance visqueuse de l'interface et du milieu microscopique.

Ces oscillations sont uniquement dues au couplage bilatéral entre les deux robots et ne présentent aucun intérêt pour l'opérateur. Il faut diminuer ces phénomènes pour le confort de manipulation et la transparence des informations transmises. Une limite de confort est définie dans ce but. Pour éviter les phénomènes d'oscillations, le système doit être suffisamment amorti. La relation entre les amortisseurs, la masse et le ressort virtuel doit être établie afin que le système ne comporte pas de mode résonant. Comme pour la stabilité, il est également possible de jouer sur le gain en force pour éviter la présence de résonance.

La fonction de transfert est de nouveau un précieux outil pour caractériser les systèmes oscillants. En automatique, la présence de modes résonnants s'établit par rapport aux pôles de cette fonction. Si certains d'entre eux présentent une partie imaginaire, alors le système est susceptible d'entrer en oscillation amortie.

La figure 3.11 montre l'évolution des parties imaginaires des pôles pour le régime continu libre et contraint en fonction du gain en force. Elles sont nulles pour les gains faibles et apparaissent à partir d'une limite $Af_{confort}$.

Il est moins évident d'appliquer le même critère à un système échantillonné. Le passage du domaine de Laplace à la représentation en z conserve les parties imaginaires des pôles : $z = e^{T_{ech} \cdot s}$. Si s est un pôle à partie imaginaire, alors z le sera également. En analysant les pôles des fonctions de transfert échantillonnées, une paire de pôles imaginaires purs (intégrateur) est présente quelle que soit la valeur de Af . Une deuxième paire apparaît quand Af augmente. La zone de confort est délimitée, pour le cas échantillonné, par $Af_{confort}$, le premier gain à partir duquel apparaît cette seconde paire : soit $Af < Af_{confort}$.

Le tableau suivant résume les valeurs limites de Af pour les différents cas.

$Af_{confort}$	Mode libre		Mode contraint	
	Continu	Échantillonné	Continu	Échantillonné
CEA	$3,0 \cdot 10^{10}$	$3,0 \cdot 10^{10}$	$9,0 \cdot 10^7$	$9,0 \cdot 10^7$
Glasgow	$1,0 \cdot 10^{10}$	$1,0 \cdot 10^{10}$	$8,6 \cdot 10^7$	$8,6 \cdot 10^7$

TABLE 3.4 – Limites de confort pour les prototypes étudiés

Dans les diagrammes de Bode 3.9(a) et 3.9(b), les pics issus de la résonance disparaissent effectivement dans les limites de la zone de confort.

La limite de confort garantit un amortissement suffisant du système pour éviter les

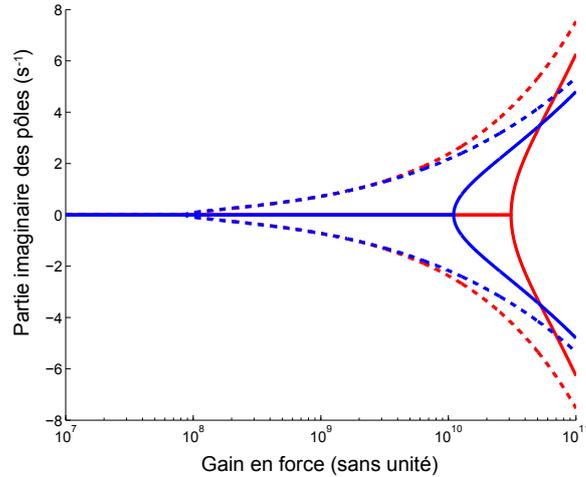


FIGURE 3.11 – Évolution de la partie imaginaire des pôles des fonctions de transfert en boucle fermée pour le régime continu en fonction du gain de force. Les résultats sont affichés en bleu pour Glasgow et en rouge pour le CEA, les traits pleins représentent le mode libre et les tirets le mode contraint.

phénomènes d'oscillations rémanentes. Ce critère est beaucoup plus contraignant que la limite de stabilité. L'avantage de l'actionneur rapide par rapport à celui de Glasgow est moins marqué. Le passage du régime continu au régime échantillonné ne semble pas influencé ce critère. Il ne suit donc pas la même évolution en fonction des paramètres que le critère de stabilité. Son étude n'est pas redondante avec le précédent critère et révèle les paramètres qui favorisent le confort de télé-opération. La limite de confort est définie par la valeur suivante :

$$I_{confort} = Af_{confort}^{contraint}(ech) \quad (3.10)$$

$$C_{confort} = Af_{confort}^{libre}(ech) \quad (3.11)$$

3.2.3 La transparence

La troisième performance étudiée est la transparence du système bilatéral. Elle s'établit à partir des impédances de l'opérateur et de l'environnement¹⁷. L'impédance de l'opérateur correspond à l'inverse de la fonction de transfert du système. Ainsi, un système de télé-micromanipulation est transparent si l'opérateur perçoit, à une homothétie près, le comportement de l'environnement :

$$Z_{op} = \frac{F_{main}}{P_{main}} = \frac{Af}{Ad} \frac{-F_{micro}}{P_{bille}} = \frac{Af}{Ad} \cdot Z_{env}$$

L'amplitude de l'impédance ($|Z_{op}|$) ainsi définie a les dimensions d'une raideur. Il est alors pertinent de l'appeler raideur apparente du système.

17. [Lawrence 1993, Bolopion 2008]

3.2.3.1 Régime continu

La schéma bloc de la figure 3.5 établit l'impédance pour le système étudié en régime continu :

$$\begin{aligned} Z_{op}(s) &= \frac{1}{FTBF(s)} = \frac{Af}{Ad} \cdot K \cdot M(s) \cdot C(s) \cdot T(s) \cdot \frac{Z_{env}(s)}{Z_{micro}(s) + K} + \frac{1}{H(s)} \\ &= \frac{Af}{Ad} \cdot K \cdot \frac{1}{\tau_m \cdot s + 1} \cdot \frac{Z_{env}(s)}{Z_{env}(s) + K} + B_h \cdot s \cdot (\tau_h \cdot s + 1) \end{aligned} \quad (3.12)$$

L'impédance de l'environnement est caractérisée dans notre modèle par deux cas extrêmes. Ils sont traités indépendamment.

► Mode contraint

En configuration contrainte, l'impédance de l'environnement devient :

$$P_{bille} = 0 \Rightarrow Z_{env}^c = \infty \quad (3.13)$$

Il en résulte que l'impédance de l'opérateur est indépendante de l'environnement :

$$Z_{op}^c(s) \approx \frac{Af}{Ad} \cdot K \cdot \frac{1}{\tau_m \cdot s + 1} + B_h \cdot s \cdot (\tau_h \cdot s + 1)$$

Le système contraint n'est alors jamais transparent. Au lieu d'envoyer une force très importante instantanément à l'opérateur, l'élasticité du système complet transmet une interaction plus progressive. L'opérateur ne perçoit pas la réalité, mais sa dextérité peut être améliorée par le contrôle plus fin de la force appliquée.

Le mode contraint ne présente donc pas d'intérêt pour l'évaluation de la transparence.

► Mode libre

En configuration libre, l'impédance de l'environnement donne :

$$Z_{env}^l = \frac{-F_{micro}}{P_{bille}} = B_v \cdot s \quad (3.14)$$

Pour la configuration libre, le comportement fréquentiel de l'impédance doit être considéré. En transformant l'opérateur de Laplace par $s = j\omega$ (opération permettant le tracé des diagrammes de Bode), l'impédance de l'opérateur devient :

$$Z_{op}^l(j\omega) = \frac{Af}{Ad} \cdot K \cdot \frac{1}{\tau_m \cdot j\omega + 1} \cdot \frac{B_v \cdot j\omega}{B_v \cdot j\omega + K} + B_h \cdot j\omega \cdot (\tau_h \cdot j\omega + 1)$$

Pour les basses fréquences, le résultat suivant est obtenu :

$$\begin{aligned} \omega \ll 1 \Rightarrow Z_{op}^l(j\omega) &\approx \frac{Af}{Ad} \cdot B_v \cdot j\omega + B_h \cdot j\omega \\ &\approx \frac{Af}{Ad} \cdot Z_{env}^l + B_h \cdot j\omega \end{aligned}$$

Si $B_h \ll \frac{Af}{Ad} \cdot B_v$, le système libre en basse fréquence peut être considéré transparent. Cette condition est remplie pour une interface haptique comportant peu de frottement,

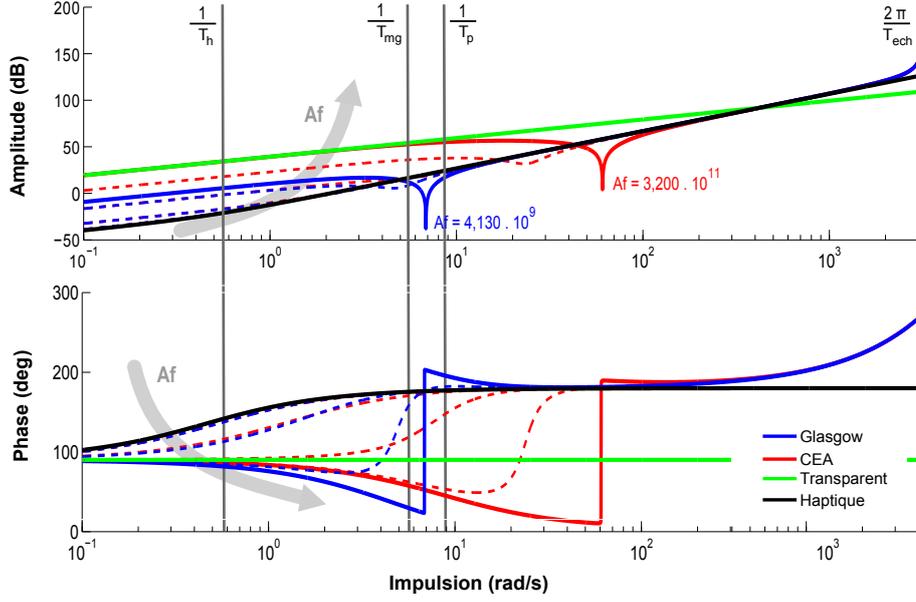


FIGURE 3.12 – Diagramme de Bode de l'impédance de l'opérateur avec l'actionneur de Glasgow (bleu) et celui du CEA (rouge) en régime échantillonné pour le mode libre. Les courbes pleines correspondent aux valeurs limites du gain de force pour la stabilité. Les courbes en tirets correspondent aux diagrammes pour Af variant de 10^8 à la limite de stabilité. Les courbes (verte) et (noire) sont respectivement l'impédance théorique d'un système transparent en mode libre et l'impédance de l'interface haptique. Ces diagrammes ont été réalisés avec Matlab sur la base des fonctions de transfert calculées en annexe D.

un milieu microscopique très visqueux ou un ratio des gains élevé. Cette relation montre qu'un gain Af élevé améliore la transparence pour les basses fréquences. Pour les hautes fréquences, l'opérateur ne perçoit que l'inertie de l'interface :

$$\omega \gg 1 \Rightarrow Z_{op}^l(j\omega) \approx Mh \cdot (j\omega)^2$$

3.2.3.2 Régime échantillonné

Ces propriétés sont également valables pour le régime échantillonné, comme le montrent les diagrammes de Bode des impédances de l'opérateur (voir Fig. 3.12).

Pour évaluer la transparence du système, le diagramme d'un système parfaitement transparent est superposé en vert sur la figure :

$$Z_{op}^t = \frac{Af}{Ad} \cdot Z_{env}^l = \frac{Af}{Ad} \cdot B_v \cdot s \quad (3.15)$$

La dynamique de l'interface haptique est représentée en noir sur la figure :

$$Z^{haptique} = Bh \cdot s(\tau_h \cdot s + 1) \quad (3.16)$$

L'interprétation des diagrammes de la figure 3.12 est alors :

- Pour les basses fréquences, les systèmes, avec un gain Af faible, suivent l'impédance de l'interface haptique (noir) donnée par l'équation 3.16. Par contre, les

systèmes, avec un Af élevé, suivent la courbe de référence du système transparent (vert), donnée par l'équation 3.15.

- Pour les hautes fréquences, toutes les courbes suivent l'impédance de l'interface haptique (noir) aux effets d'échantillonnage près.
- Pour les fréquences intermédiaires, il existe une fréquence à partir de laquelle un basculement s'opère et à partir de laquelle la transparence est perdue.
- Pour les valeurs de gain en force proches de la limite de stabilité, la dégradation s'opère pour des fréquences plus basses à cause de la résonance du système.

3.2.3.3 Indice de transparence

Pour construire un indice de transparence, la comparaison entre les impédances du système modélisé et du système parfaitement transparent doit être approfondie. Le rapport de ces deux impédances se lit sur la représentation graphique des diagrammes de Bode comme la soustraction entre leurs amplitudes (en dB) ou celle entre leurs phases. Les fonctions suivantes peuvent alors être définies :

$$\begin{aligned}\Delta A_Z(\omega) &= \|A_Z(\omega) - A_Z^t(\omega)\| \\ \Delta \phi_Z(\omega) &= \|\phi_Z(\omega) - \phi_Z^t(\omega)\|\end{aligned}$$

où A_Z et ϕ_Z représentent respectivement l'amplitude (en dB) et la phase de l'impédance du modèle et A_Z^t et ϕ_Z^t celles du système transparent. ΔA^t et $\Delta \phi^t$ sont appelées respectivement écart d'amplitude et de phase à la transparence.

En représentant ces fonctions pour plusieurs valeurs de Af dans le domaine fréquentiel, un gain optimum en force apparaît pour la configuration libre échantillonnée de Glasgow et du CEA (voir Fig. 3.13). Des bornes sont choisies pour que l'écart d'amplitude soit le plus longtemps possible en dessous de 10 dB et celui de phase en dessous de $\pi/6$.

Comme l'amplitude de l'impédance représente la raideur globale du système, un écart de 10 dB en amplitude, représente une variation de raideur de $3,2 \text{ Nm}^{-1}$ indépendante de Af . Donc pour ressentir cette variation au seuil de la résolution du bras, c'est à dire $> 0,3\text{N}$ ¹⁸, il faut parcourir environ 10cm. Cette valeur est en moyenne le demi espace de travail d'une interface haptique (par exemple, l'espace de travail total de l'interface Falcon est 12cm). La borne établie sur l'amplitude paraît donc raisonnable. De même, un déphasage de $\pi/6$ représente un décalage de $1/12^{\text{ème}}$ de période du signal par rapport à l'excitation. Par exemple, la divergence sur la figure 3.13 se produit pour le système de Glasgow vers environ une impulsion de 10 rad.s^{-1} . Donc la période correspondante du signal excitateur est égale à 100ms et son douzième (8,3ms) est quasi imperceptible, sans pour autant être négligeable vis à vis de l'échantillonnage (1ms). Les valeurs de ces gain optimaux sont reportées dans le tableau suivant :

18. [Tan 1994]

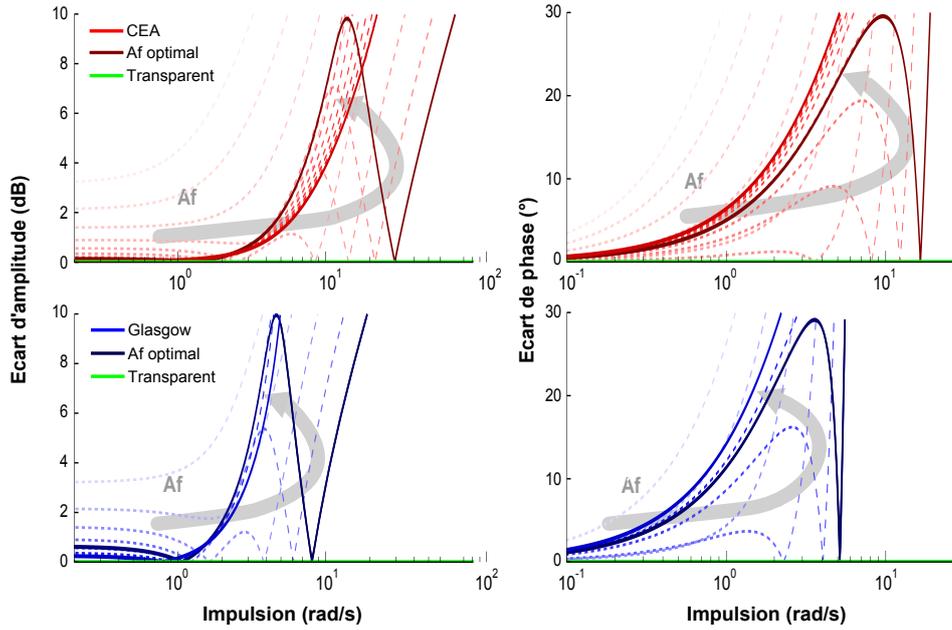


FIGURE 3.13 – Courbes représentant les écarts en amplitude et en phase pour le système de Glasgow et du CEA en fonction de plusieurs valeurs du gain en force. Les flèches montrent l'évolution des courbes en fonction de Af . La courbe de référence pour un système transparent est indiquée en vert. Les courbes pour les gains en force optimaux sont représentées en couleur foncée.

Af_{opt}	Mode libre			
	Régime continu		Régime échantillonné	
	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase
CEA	$3,8 \cdot 10^{11}$	$6,4 \cdot 10^{11}$	$3,6 \cdot 10^{11}$	$6,1 \cdot 10^{11}$
Glasgow	$9,3 \cdot 10^{10}$	$1,4 \cdot 10^{11}$	$9,3 \cdot 10^{10}$	$1,4 \cdot 10^{11}$

TABLE 3.5 – Optimum de transparence pour les prototypes étudiés. Ces données sont obtenues pour un écart en amplitude inférieur à 10dB et un écart en phase inférieur à $\pi/6$.

Les valeurs pour l'amplitude et la phase ne sont pas identiques. Elles n'évoluent pas nécessairement de la même manière. Ces valeurs sont également dépendantes des bornes choisies, mais leur évolution en fonction des paramètres est conservée.

Finalement, l'analyse de ces résultats montrent qu'un échantillonnage lent dégrade la transparence et qu'un actionneur rapide (CEA) l'améliore. Il faut également remarquer, à partir de la figure 3.13 et du tableau 3.5, que plus le gain en force optimal est grand plus le système diverge tardivement dans le domaine fréquentiel. Une valeur élevée de ce gain optimal garantit une meilleure plage fréquentielle de transparence.

Ces gains optimaux représentent de manière algébrique la performance en transparence du système. L'indice de transparence optimale est défini en régime échantillonné pour

le mode libre par l'amplitude. Ce critère est légèrement plus contraignant :

$$I_{transp} = A_{J_{opt,10dB}}^{libre}(ech) \quad (3.17)$$

$$C_{transp} = A_{J_{opt,\pi/6}}^{libre}(ech) \quad (3.18)$$

L'influence de l'actionneur et de l'échantillonnage dans un système bilatéral de téléopération est intuitive et est facilement démontrable par des expériences répétées. Elle a donc pu être utilisée pour démontrer la pertinence du choix des indices de performances. Ces derniers vont servir dans la suite de ce chapitre pour caractériser l'influence plus délicate des autres paramètres.

3.3 Influence des paramètres

La modélisation en régime échantillonné conduit à la création des trois indices simples d'évaluation des performances. Le nombre de paramètres du problème étant restreint, il est possible d'étudier l'influence de chacun sur les indices cités. L'influence de Ad étant évidente, les paramètres restants sont regroupés par paire : soit la constante de temps de l'actionneur et l'échantillonnage du système, soit la raideur du piège et la résistance visqueuse du milieu, soit la masse et l'amortissement équivalents de l'interface haptique. Les performances recherchés sont les suivantes :

- une stabilité élevée : l'indice s'exprime sur le gain en force pour le régime contraint (I_{stab})
- un confort important : l'indice s'énonce à partir du gain en force pour le régime contraint ($I_{confort}$)
- une transparence élevée : l'indice est évalué à partir du gain en force qui minimise l'écart en amplitude de l'impédance (I_{transp}).

A partir de ces indices, des cartes ont été établies à partir de l'incrémentation des paramètres du système. L'évolution des indices et des complémentaires est schématisée, à chaque page, par 6 graphiques dont les deux dimensions suivent l'évolution d'un couple de paramètres indiqués sur les axes globaux. Les indices prioritaires à optimiser sont représentés à gauche. Les complémentaires se situent à droite et servent à illustrer le comportement en mode libre. Les échelles (tout à droite) sont gardées identiques pour chaque couple de paramètre afin de comparer l'importance de leurs influences. Finalement, une flèche en gris indique sur chaque graphique l'optimisation recommandée par rapport à l'installation de Glasgow, puis par rapport une installation utilisant un galvanomètre.

Pour résumer la partie précédente et pour expliciter la présentation des résultats, l'échantillonnage et l'actionneur est le premier couple étudié.

3.3.1 L'actionneur et de l'échantillonnage

La section précédente a établi une comparaison entre deux actionneurs : un actionneur lent utilisé à Glasgow et un plus rapide exploité au CEA. Le spectre de comparaison est élargi à tout un domaine d'actionneurs et d'échantillonnages. En incrémentant la valeur de la constante de temps des actionneurs et de la période d'échantillonnage dans les fonctions de transferts, il est possible de créer plusieurs graphiques représentant les indices et leurs complémentaires en fonction des paramètres variables. Le domaine choisi est en accord avec les capacités des actionneurs du commerce et des convertisseurs analogiques-numériques. Le tableau suivant résume les conditions de ce calcul :

Paramètres fixes		
Gain en position	Ad	$4 \cdot 10^3$
Rayon de la bille	R	$3 \cdot 10^{-6} \text{m}$
Viscosité dynamique de l'eau	η	$10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
Raideur du piège	K	$5 \cdot 10^{-7} \text{Nm}^{-1}$
Masse de l'interface	M_h	0,220 kg
Frottement visqueux de l'interface	B_h	$0,1 \text{Nsm}^{-1}$
Paramètres variables		
Constante de temps de l'actionneur	$\tau_m = 1/f_m$	de 10^{-6} à 1 s
Période d'échantillonnage	T_{ech}	de 10^{-4} à 10^{-2} s

Sur les graphiques de la figure 3.14, l'influence de l'actionneur est clairement confirmée. Quels que soient les indices, un temps de réponse faible favorise les performances. L'optimisation de l'actionneur de Glasgow vers un actionneur de type galvanomètre du CEA est mis en évidence par une flèche. Cette optimisation est validée et est reprise dans la suite des calculs comme paramètre fixe pour l'actionneur.

Le système du CEA est encore perfectible, soit avec un actionneur encore plus rapide soit avec un échantillonnage plus rapide. L'action de ce dernier paramètre est effectivement évidente pour la stabilité et la transparence. Pour le confort, il ne semble pas avoir une influence dans le domaine considéré. Pour avoir un système plus performant, il est donc redémontré que les actionneurs et l'échantillonnage doivent être rapides.

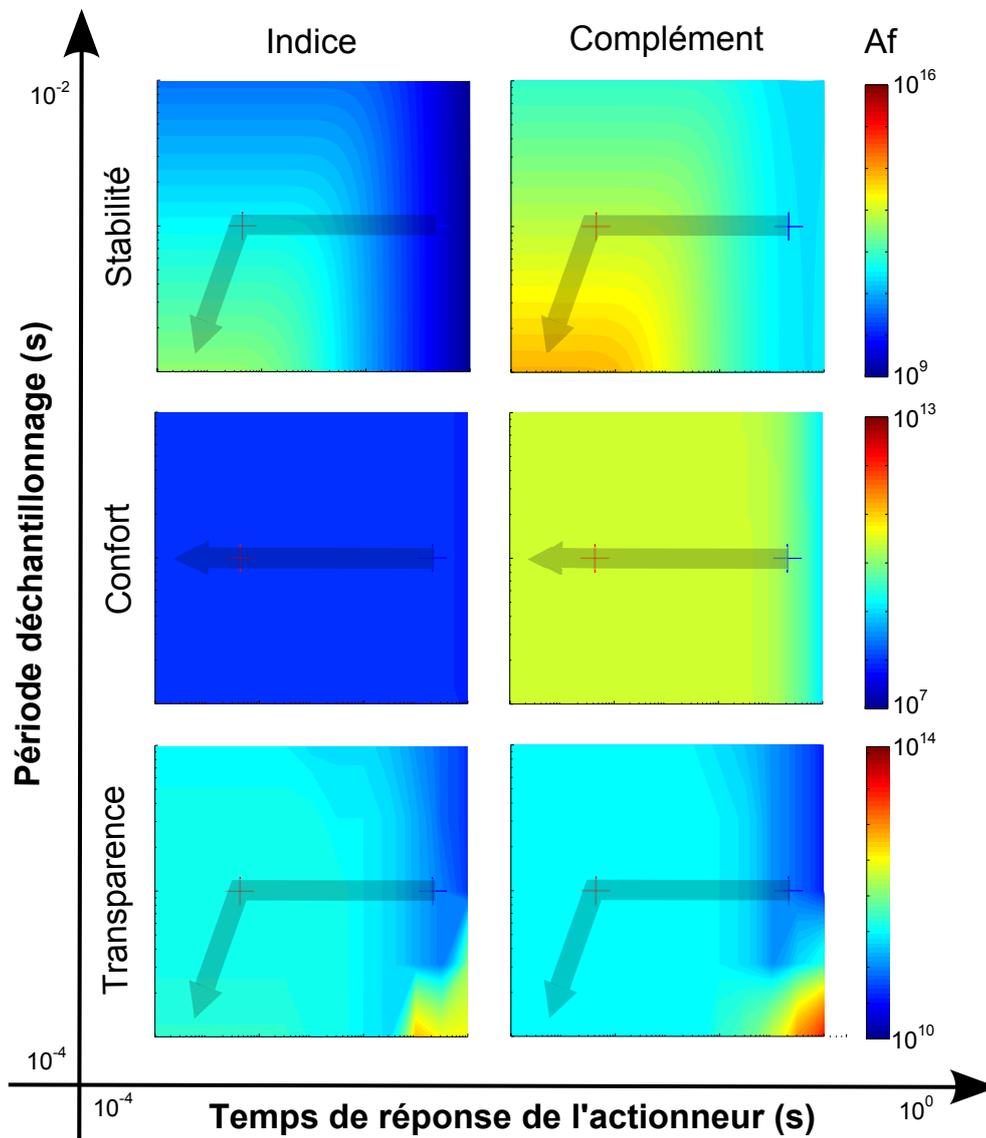


FIGURE 3.14 – Influence des paramètres de l'actionneur et de l'échantillonnage sur la stabilité, le confort et la transparence. Les flèches grises indiquent le sens recommandé d'optimisation à partir de la configuration de Glasgow en passant par l'actionneur du CEA.

3.3.2 Le piège

A partir de cette présentation des résultats avec des influences connues, il est maintenant possible d'exploiter les propriétés moins évidentes du piège. Les paramètres étudiés sont la raideur du piège et la résistance visqueuse du milieu. Ce dernier dépend de la viscosité dynamique du milieu et du rayon de l'objet piégé. Il est plus facile de changer ce dernier que la nature du milieu. Le domaine choisi est en accord avec les particules standards disponibles pour le piégeage et les raideurs atteignables par une pince optique ou magnétique. Le tableau suivant résume les conditions de ce calcul :

Paramètres fixes		
Gain en position	Ad	$4 \cdot 10^3$
Viscosité dynamique de l'eau	η	10^{-3} Pa.s
Masse de l'interface	M_h	0,220 kg
Frottement visqueux de l'interface	B_h	$0,1 Nsm^{-1}$
Constante de temps de l'actionneur	$\tau_m = 1/f_m$	0,043 ms
Période d'échantillonnage	T_{ech}	1 ms
Paramètres variables		
Rayon de la bille	R	de 10^{-7} à 10^{-4} m
Raideur du piège	K	de 10^{-8} à $10^{-5} Nm^{-1}$

Sur les graphiques de la figure 3.15, les couleurs sont plus contrastées. Cette remarque signifie que ces paramètres influencent plus fortement les performances que les autres paramètres précédemment étudiés.

Les indices de stabilité et de confort ne dépendent que de la raideur du piège. Ils sont favorisés par de faibles valeurs de celle-ci. A l'opposé, tous les autres indices sont favorisés par de grandes raideurs et de faibles dimensions des objets piégés. Cette propriété traduit qu'une constante de temps du piège $\tau_p = B_v/K$ de faible valeur favorise la transparence et le mode libre en général. Comme la stabilité et le confort présentent des gains Af plus critiques, ces indices doivent être considérés en priorité. Il est donc recommandé de travailler avec de faibles raideurs de pièges. Cette propriété était pressentie au chapitre 1.

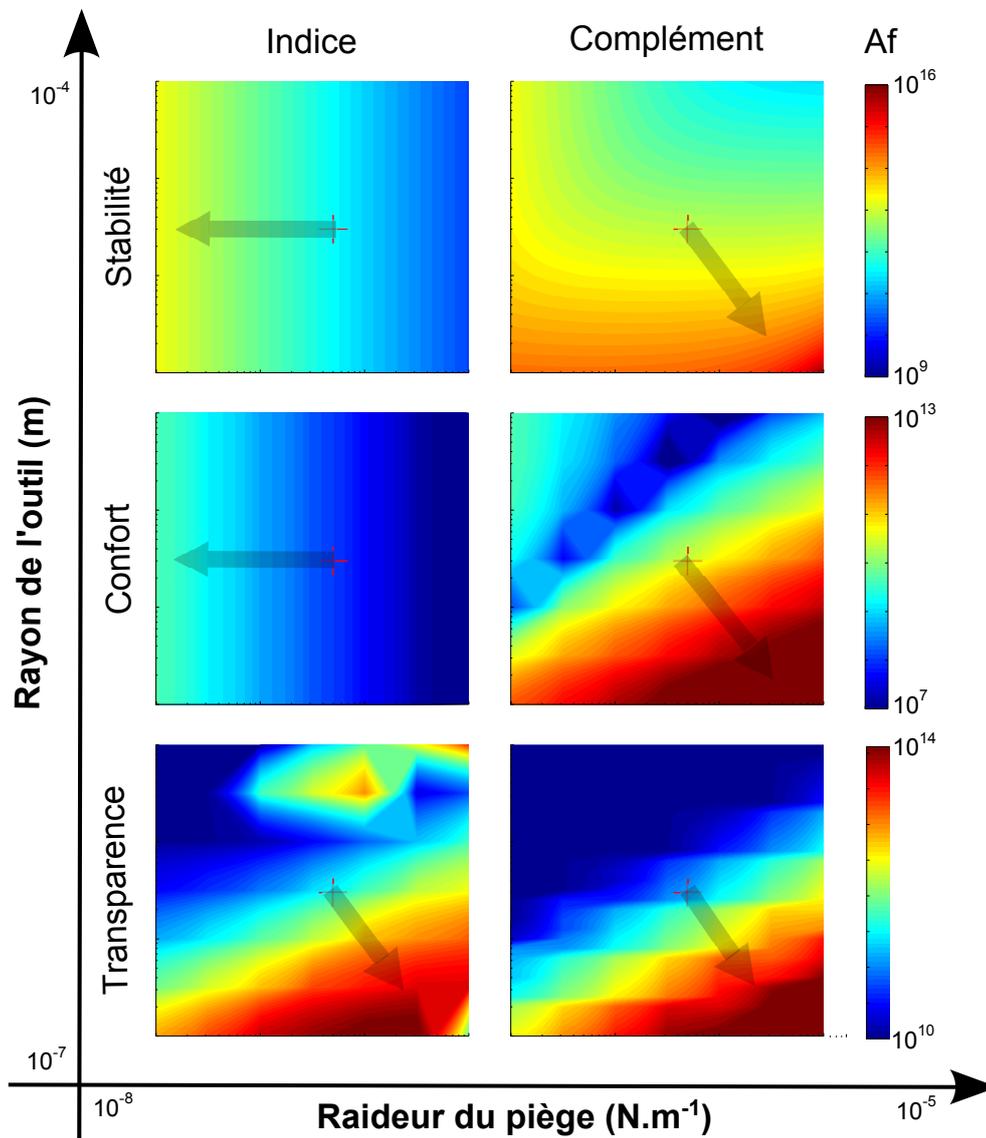


FIGURE 3.15 – Influence des paramètres de raideur du piège et du rayon de la microsphère piégée sur la stabilité, le confort et la transparence. Les flèches grises indiquent le sens recommandé d'optimisation à partir de la configuration du CEA.

3.3.3 L'interface haptique

Les deux derniers paramètres à évaluer sont la masse et l'amortissement équivalents de l'interface haptique. Le Falcon étant un compromis intéressant vis à vis du coût, il ne l'est pas forcément vis à vis des performances. Cette étude doit indiquer quelle interface choisir en fonction de ses paramètres dynamiques. Le domaine choisi correspond à des valeurs extrêmes de masse et d'amortissement. Elles ne sont pas toutes atteintes aujourd'hui par les interfaces haptiques dont la conception est optimisée pour la transparence. Le tableau suivant résume les valeurs numériques des paramètres :

Paramètres fixes		
Gain en position	Ad	$4 \cdot 10^3$
Rayon de la bille	R	$3 \cdot 10^{-6} \text{m}$
Viscosité dynamique de l'eau	η	10^{-3}Pa.s
Raideur du piège	K	$5 \cdot 10^{-7} \text{Nm}^{-1}$
Constante de temps de l'actionneur	$\tau_m = 1/f_m$	0,043 ms
Période d'échantillonnage	T_{ech}	1 ms
Paramètres variables		
Masse de l'interface	M_h	de 10^{-3} à 10 kg
Frottement visqueux de l'interface	B_h	de 10^{-3} à 10Ns m^{-1}

Sur les graphiques de la figure 3.16, les couleurs sont particulièrement contrastées pour les indices de stabilité et de confort. Ceux-ci soulignent l'apport important d'une interface visqueuse à ces performances. Il faut, en effet, favoriser une meilleure ressemblance entre la dynamique de l'interface et de celle de l'environnement microscopique. De plus, cette amélioration profite légèrement à la transparence.

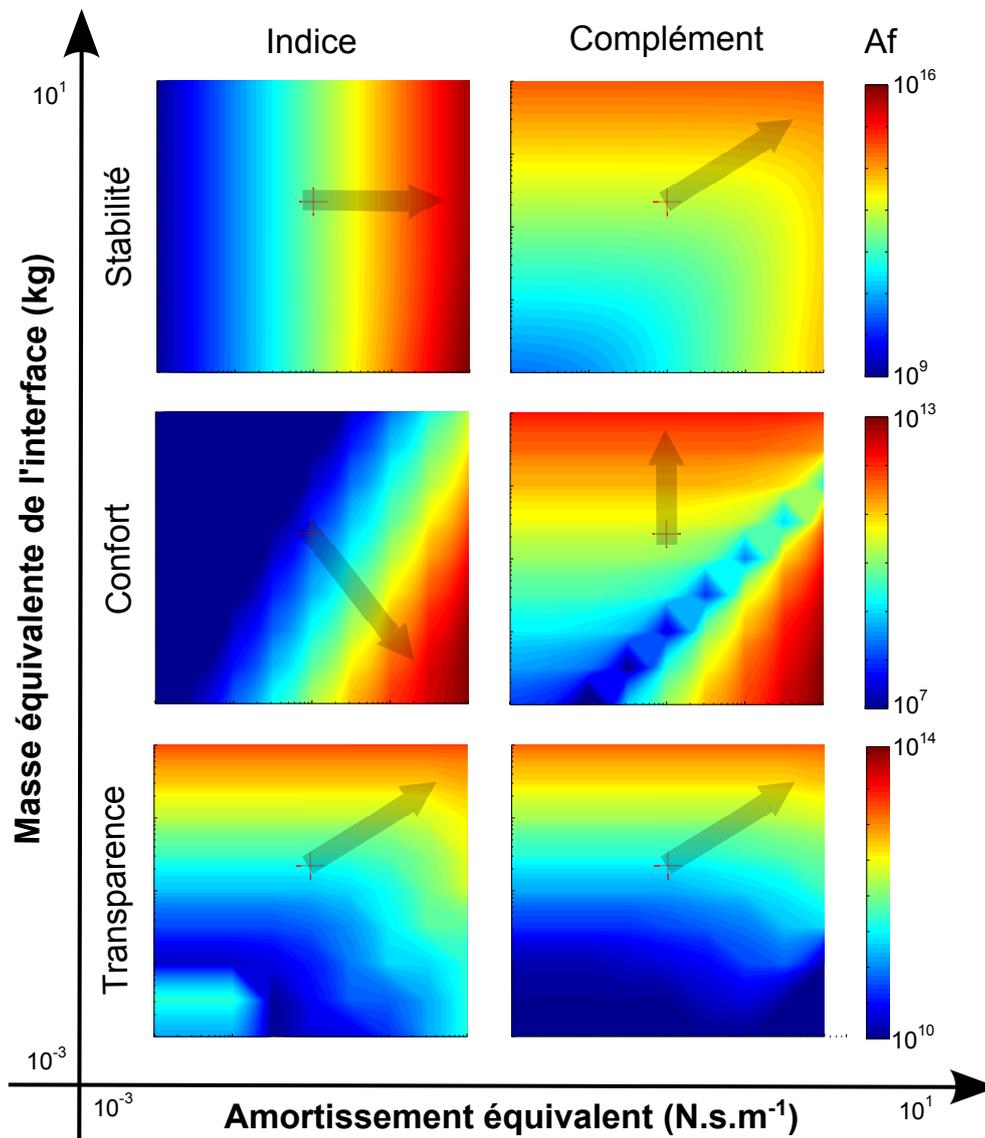


FIGURE 3.16 – Influence des paramètres de masse et d'amortissement apparents de l'interface haptique sur la stabilité, le confort et la transparence. Les flèches grises indiquent le sens d'optimisation recommandé à partir de la configuration du CEA.

3.3.4 Limitations

Les résultats de cette analyse donnent des guides pour mieux comprendre le fonctionnement d'un système bilatéral pour le micromonde. Néanmoins le modèle utilisé est très limité. Le modèle échantillonné s'approche des résultats expérimentaux, mais implique un système temps réel avec un échantillonnage parfait à 1kHz. Cette contrainte n'est pas respectée sur une plateforme Windows, avec une connexion USB de l'interface haptique. D'ailleurs la littérature mentionne que l'échantillonnage du Falcon s'approche plus de 800 Hz¹⁹.

De plus, deux modes extrêmes de fonctionnement sont seulement étudiés, le mode libre et le mode contraint. Les modes intermédiaires où les objets piégés seraient en contact avec des objets élastiques ne sont pas étudiés, seulement extrapolés par les deux cas traités.

Le modèle du piège est également très simpliste. Il considère le domaine linéaire comme infini, alors que celui-ci est limité au quart du diamètre de la microsphère piégée. Ensuite la caractéristique de la raideur prend une forme quadratique et diminue rapidement pour être inexistante à environ un diamètre de microsphère.

La connaissance de la viscosité est aussi assez aléatoire. La valeur standard de l'eau pure est utilisée, et pas celle des conditions expérimentales : l'altération de ce paramètre par les impuretés n'est pas connue. Il existe également un effet de surface du fond de la boîte de Pétri. Celle-ci crée une couche limite où la viscosité apparente est plus importante.

Finalement, les axes sont supposés découplés. Cette hypothèse peut être considérée valable seulement si le piège est scrupuleusement aligné et que les miroirs motorisés sont parfaitement étalonnés. Le système subit des désalignements et des dérives avec le temps. Il faut donc vérifier et corriger fréquemment les étalonnages.

Étudier uniquement l'influence des paramètres semble être la solution la plus prometteuse. Loin de chercher à retrouver quantitativement l'expérience, la tendance générale est testée qualitativement. Ces résultats sont vérifiés pour plusieurs actionneurs, et la comparaison pinces optiques et AFM donne de bonnes suppositions vis à vis de la raideur. D'autres campagnes doivent être réalisées avec des tailles d'objets piégés ou des viscosités différentes. Des interfaces à paramètres variables²⁰ sont également disponibles pour vérifier les autres résultats de cette modélisation.

3.3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, un modèle de télé-micromanipulation à retour d'effort avec des pinces optiques est établi. Trois indices de performance sont proposés pour évaluer l'influence des paramètres et pour rechercher des optimisations des performances de stabilité, de confort et de transparence. Les résultats montrent qu'un soin particulier dans le choix d'actionneurs rapides doit être effectué. Un échantillonnage performant est également une optimisation importante qu'il est possible de réaliser en améliorant, par exemple, la mesure des forces par caméra et traitement d'image. La raideur du piège joue également

19. [Martin 2009]

20. [Gosline 2007]

un rôle décisif sur le système. Plus celle-ci est faible, plus des sensations fines sont atteignables. Il est possible d'optimiser les performances avec d'autres paramètres tels que la taille du micro-outil et l'interface haptique, mais ces influences restent à prouver expérimentalement.

Le micromanipulateur dédié

Plusieurs étapes pour dédier un système de micromanipulation au retour d'effort ont été franchies. La méthode de manipulation la plus adaptée pour cette interaction ressentie a été définie en regard d'un cahier des charges précis. Les pinces optiques sont apparues comme le meilleur candidat actuel et ont été détaillées. Une première limite a pourtant pu être mise en lumière : la compatibilité des actionneurs et de la mesure de force n'est pas suffisante en terme d'espace de travail dans les systèmes existants. Cet espace étant indispensable pour la manœuvrabilité de la télé-opération à retour d'effort, une solution optique a donc été proposée au chapitre 2. Le chapitre 3 propose d'autres pistes d'optimisation, en particulier, l'importance de la rapidité des composants et de l'échantillonnage du système est soulignée.

Avant d'appliquer ces améliorations potentielles, une limite importante des techniques actuelles de mesure d'effort doit être levée. Ces dernières, basées sur l'imagerie, sont liées aux enjeux actuels de la vision : le compromis entre rapidité et robustesse du traitement.

Une nouvelle solution est présentée dans ce chapitre pour résoudre les problèmes d'acquisition et de traitement d'images afin d'avoir des informations fiables et dynamiques des interactions. Elle consiste à utiliser un capteur générant des événements asynchrones plutôt qu'une caméra et ses images. Cette technique ne mesure plus l'amplitude de l'intensité lumineuse, mais sa variation. Le traitement des informations est accompli de manière dynamique. Un deuxième prototype, réalisé à l'ISIR, présente l'implémentation de cette technique. Sa mise en œuvre est illustrée avec la mesure du mouvement brownien et le rendu du contact avec un objet quelconque.

Les taux de rafraîchissement et la flexibilité obtenus avec cette nouvelle technique sont bien supérieurs à ceux du premier prototype réalisé à Glasgow. Un troisième prototype réalisé au CEA, incluant des galvanomètres et une caméra événementielle, représente l'intention finale de la démarche et ouvre des perspectives nouvelles telles que la caractérisation expérimentale de l'influence de l'interface haptique ou le développement de stratégies multi-pièges.

4.1 Suivi rapide et robuste du micro-outil piégé

Cette partie s'attache à proposer une solution originale pour la mesure d'effort dans les systèmes de pinces optiques. Pour comprendre les besoins, le principe de cette mesure est tout d'abord rappelé. L'évaluation des forces appliquées sur une microsphère piégée est réalisée à partir d'une mesure de position et d'un modèle de comportement. En effet, les forces optiques se comportent, dans un domaine limité, comme la force de rappel

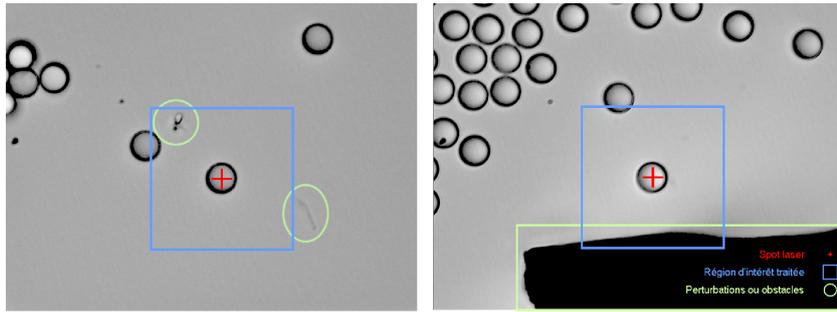


FIGURE 4.1 – Exemple de scènes lors d’une manipulation avec des pinces optiques. Des poussières, des impuretés, des obstacles ou d’autres microsphères peuvent se trouver dans la région d’intérêt définie pour le traitement d’image.

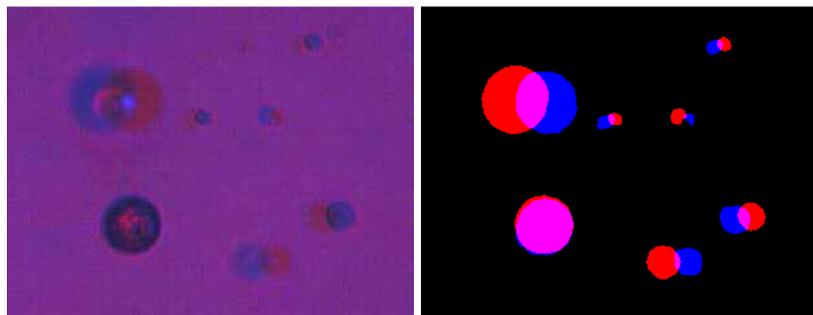


FIGURE 4.2 – A gauche, un exemple d’image de particules de 2 à 10 μm en suspension à différentes positions axiales sous illumination stéréoscopique. A droite, un traitement de type seuil est appliqué pour obtenir l’écart entre les images rouges et bleues permettant ainsi la mesure de la position axiale. Extrait de [Dam 2008]

d’un ressort tridimensionnel linéaire dont la raideur est aisément étalonnée. Il suffit alors de mesurer l’infime écart entre le laser et la microsphère pour évaluer les interactions subies. Cette mesure est effectuée par un capteur en position de type photodiode ou caméra. Les caméras se montrent plus flexibles bien que moins rapides. Néanmoins, avec une zone réduite de pixels (voir Fig. 4.1), elles obtiennent des taux élevés de rafraîchissement¹. Le nombre de pixels actifs, dans ce cas, est bien supérieur à celui d’une photodiode. Une grande quantité d’informations sur la scène est ainsi obtenue. Par exemple, certains travaux exploitent cette richesse des données pour obtenir de manière originale le suivi axial des objets piégés² (voir Fig. 4.2).

4.1.1 L’enjeu de la vision en microrobotique

Cette grande quantité d’informations est également un handicap pour la rapidité de traitement. Chaque image étant constituée d’un ensemble de pixels, leur succession à des fréquences élevées est particulièrement critique à gérer. Les ressources informatiques nécessaires pour l’acquisition et l’enregistrement sont considérables. Dans ce cas, le traitement en ligne n’admet pas de complexité algorithmique.

Le tableau 4.1 compare plusieurs exemples récents de suivis en mode vidéo d’objets

1. Voir section 2.2.2

2. [Dam 2008, Bowman 2010, Cheong 2010]

piégés par des pinces optiques. Pour réussir à réaliser des mesures rapides, ces travaux adoptent plusieurs stratégies :

- des régions d'intérêt centrées sur le piège ne comportant que quelques pixels, par exemple 40×40 ³.
- des algorithmes simples et peu robustes de type "centre de masse" ou "histogramme"^{4 5}.
- un microcontrôleur embarqué pour des traitements hardware⁶.

Cette dernière stratégie donne les meilleures performances en termes de rapidité. Mais la programmation du système hardware est extrêmement complexe et implique une bonne connaissance du langage machine. Le fait, que ces caméras ne fournissent aucune image, impacte également la flexibilité de l'intégration : la vérification des résultats et la conception de conditions d'initialisation des algorithmes sont très difficiles. Dans les travaux cités, les scènes traitées par ces caméras restent simples : le suivi d'un colloïde dans un environnement propre ou celui de deux microsphères attachées à un microtube quasi transparent.

Dans les autres travaux, les données de l'image sont directement récupérées par un ordinateur. Le traitement d'image est alors réalisé à partir de programmes développés localement, utilisant des bibliothèques commerciales ou publiques en C++ ou Labview. Pour atteindre un taux de rafraîchissement des informations de 1kHz, les algorithmes utilisés sont peu évolués et non robustes. Les tâches traitées sont ainsi l'enregistrement du mouvement Brownien d'objets piégés immobiles ou le déplacement dans un environnement vide d'obstacles. Celles-ci ne présentent donc aucune difficulté de traitement et occultent les limites du système.

3. [Gibson 2008]

4. [Preece 2009, Bowman 2010]

5. Pour la définition des algorithmes de traitement d'image, voir l'annexe B

6. [Ikin 2009, Otto 2010]

Citations	Références des caméras	Connectique	ROI	Acquisition	Algorithme	Application
[Gibson 2008]	Prosilica, EC 1280	Firewire	40×40	1 kips	Centre de masse	Analyse de la stabilité et du bruit du système de mesure et du piégeage
[Preece 2009]	Prosilica GC640	Giga Ethernet	260×210	460 ips	Centre de masse local	Contrôle en position de trois microsphères de $5 \mu\text{m}$
[Pacoret 2009]	Prosilica GC640M	Giga Ethernet	40×40	1 kips	Centre de masse	1er prototype de télé-micromanipulateur
[Ikin 2009, Saunter 2007]	microCam-640, Durham Smart Imaging	USB	$< 128 \times 128$	2, 5 kips	Hardware - Centre de masse local	Mesure des interactions sur un micro-outil composé de deux microsphères piégées et d'un microtube.
[Otto 2010]	MC1310 monochrome CMOS camera	Caméra link	100×100	5 kips	Hardware - Corrélation	Détection d'un phénomène d'électrophorèse sur une colloïde
[Bowman 2011, Bowman 2010]	Mikrotron, EoSens 1362-CL	Caméra link	non-détaillée	1 kips	Histogramme	Contrôle en position tridimensionnel de l'objet piégé

TABLE 4.1 – Comparaison de quelques travaux récents utilisant un suivi par caméra d'objets piégés par des pinces optiques. Le terme ROI se rapporte à la taille de la région d'intérêt en pixel.

Pour illustrer le peu de flexibilité de ces systèmes, le premier prototype réalisé à Glasgow peut servir d'exemple car il est également sujet à ces limites. La mise en contact de l'objet avec un cube de silice et des déchets de chrome a été effectuée. Ces éléments ont été choisis pour leur couleur noire uniforme. Cette dernière peut, en effet, être facilement éliminée par un simple seuil dans le profil d'intensité lumineuse des images. Même si les sensations sont satisfaisantes dans ce cas, les tâches réelles ne se limitent qu'à ce type de configurations contrôlées. La mesure peut ainsi échouer à l'approche d'objets quelconques, à la présence d'impuretés ou à cause de potentielles défocalisations de l'outil. Cette limite est un frein à l'expansion de ces systèmes.

La figure 4.3 compare quatre algorithmes classiques de traitement d'images en fonction de leur robustesse et de leur complexité. Elle montre que les algorithmes de type centre de masse et histogramme ne sont pas robustes à toutes les configurations. Les algorithmes de reconnaissance, comme la corrélation ou la transformée de Hough, se montrent plus robustes. Ils demandent de 100 à 1000 fois plus de pas de calcul selon la précision exigée. Pour mettre en oeuvre ces algorithmes robustes, il est nécessaire de trouver de nouvelles techniques de programmation ou de compression des données.

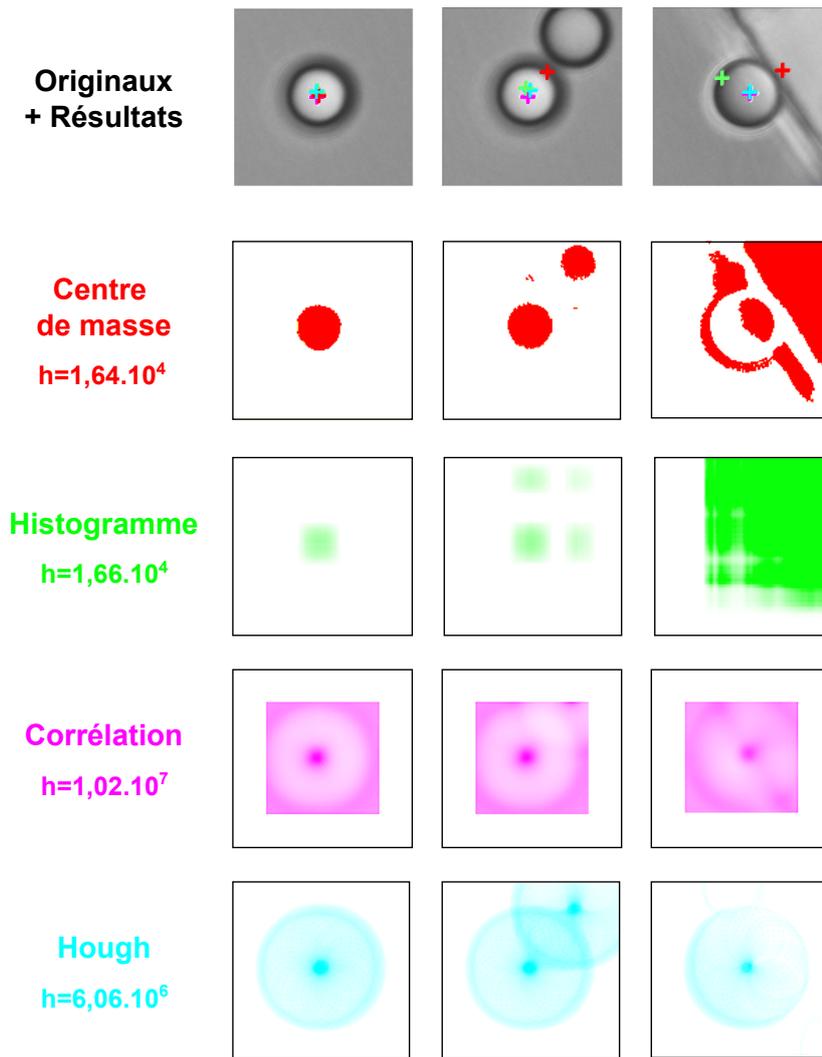


FIGURE 4.3 – Exemples de traitements d'images pour des cas critiques en termes de robustesse. De gauche à droite : une microsphère seule, une microsphère en contact avec une autre microsphère, une microsphère avec un obstacle clair. Pour chaque algorithme, la figure exploitée par le calcul donne une idée du comportement de celui-ci vis à vis de la scène. Le nombre de pas de calcul (h) est indiqué pour des images de 128×128 pixels et une cible de 25 pixels de rayon.

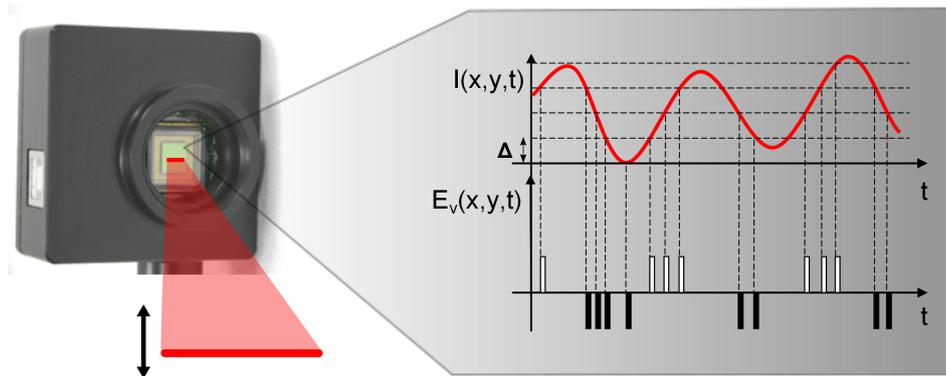


FIGURE 4.4 – Schéma illustrant le principe d'enregistrement d'événements asynchrones en fonction de la variation d'intensité pour un pixel du capteur.

4.1.2 Vers un nouveau capteur, la caméra asynchrone

Les avancées récentes dans le domaine de la vision peuvent alimenter la réflexion autour de la détection rapide de position. Un nouveau type de capteur CMOS, inspiré de phénomènes biomorphiques⁷, possède des pixels indépendants, réagissant à la variation locale de l'intensité. Par analogie avec la rétine, une augmentation ou une diminution de l'intensité lumineuse sont immédiatement signalées par des impulsions polarisées dans les photorécepteurs (voir Fig. 4.4). Cette rétine électronique possède en revanche des seuils variables (Δ) qui la rendent beaucoup plus sensible que son homologue biologique. La représentation événementielle et variationnelle des phénomènes lumineux semble plus efficace que la représentation image car elle évite les redondances d'informations. Cette forme de compression des données améliore non seulement la transmission, mais également le traitement. Ces caméras donnent de très bons résultats dans l'analyse en temps réel de scènes dynamiques : par exemple, l'étude du trafic automobile⁸, la détection de chute accidentelle⁹ ou le contrôle d'un pendule inversé¹⁰.

Le capteur utilisé dans le cadre de ce travail, est un prototype de caméra événementielle (appelé DVS pour "Dynamic Vision System") fourni par l'Institut de Neuroinformatique de l'ETH de Zurich¹¹. Les événements générés jusqu'à 1,5 Meps par ses 128×128 pixels sont transférés par un simple port USB sous forme de paquets. Les événements, $E_v(t, x, y)$, sont identifiés spatialement et temporellement avec une précision de l'ordre de la microseconde. Cette liste de données asynchrones peut être représentée comme une matrice creuse tridimensionnelle du temps et de l'espace 2D. Chaque élément de cette matrice prend, en fonction de l'augmentation ou de la diminution de l'intensité, les valeurs polarisées 1 ou -1 (soit sur la figure 4.5, des points noirs ou blancs). En théorie, pour obtenir un taux de rafraîchissement équivalent aux caméras asynchrones, les caméras basées sur l'exploitation d'images doivent présenter des cadences extrê-

7. [Delbruck 2007]

8. [Litzenberger 2006]

9. [Fu 2008]

10. [Conradt 2009]

11. [Lichtsteiner 2006]

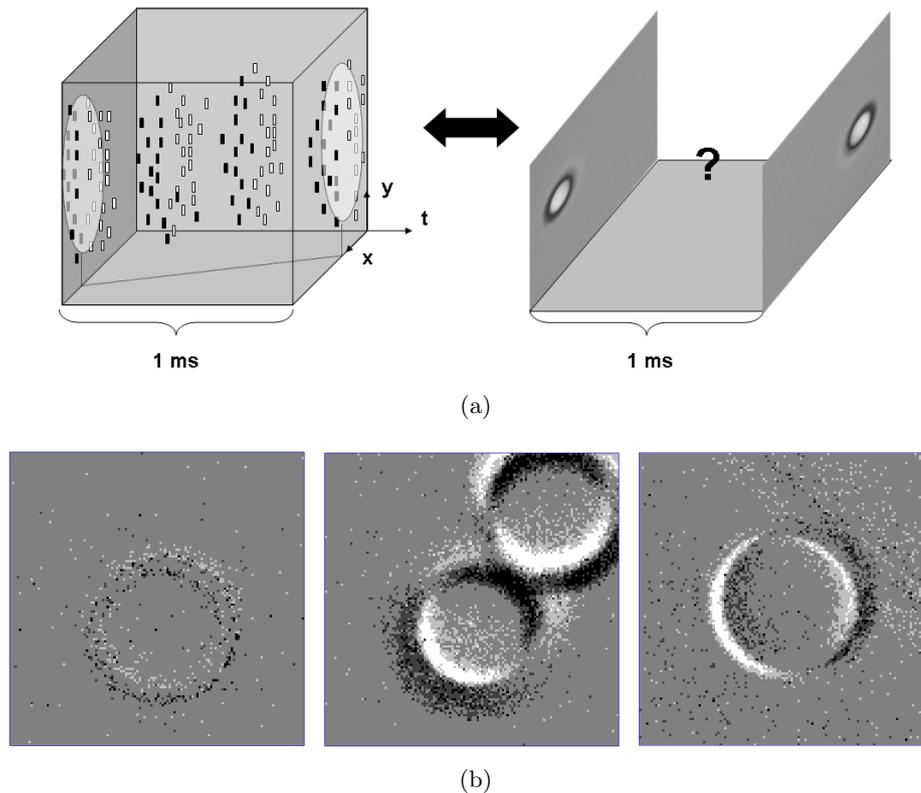


FIGURE 4.5 – (a) Schéma comparant une matrice creuse tridimensionnelle d'événements à une succession d'images. (b) Images créées à partir de l'accumulation d'événements pendant 20ms représentant les trois cas précédents sous forme dynamique. De gauche à droite : le mouvement brownien d'un bille piégée, l'approche d'une autre microsphère et de la paroi d'un microcanal.

mement élevées. Cette observation n'est pas tout à fait authentique, car le système hardware n'est pas parfait. Le prototype actuel dispose de fortes limitations en termes de bande passante. Une expérience simple met en évidence la dynamique réelle de cette caméra événementielle. L'excitation du capteur avec une source alternative de lumière (un laser à commande digitale) montre qu'au-delà d'une certaine fréquence, les photorécepteurs ne donnent plus une image fiable du signal. Le signal en entrée étant carré, le pixel testé doit nécessairement réfléchir au moins une impulsion polarisée positive et une négative. La bande passante est donc estimée par le nombre d'événements que contient une période du signal exciteur.

Sur le graphique de la figure 4.6(b), le taux d'événements (Φ) commence à devenir critique à partir de périodes inférieures à 0,5ms (2kHz). La bande passante d'un pixel est donc bien inférieure à la cadence théorique de rafraîchissement du capteur entier (1 μ s). En effet, au niveau du pixel, des phénomènes d'inhibitions électroniques expliquent ces performances¹². Chaque photodétecteur est aveugle pendant une courte période réfractaire. La figure de principe 4.6(c) montre que le signal reconstitué n'est plus fidèle à la

12. [Lichtsteiner 2006]

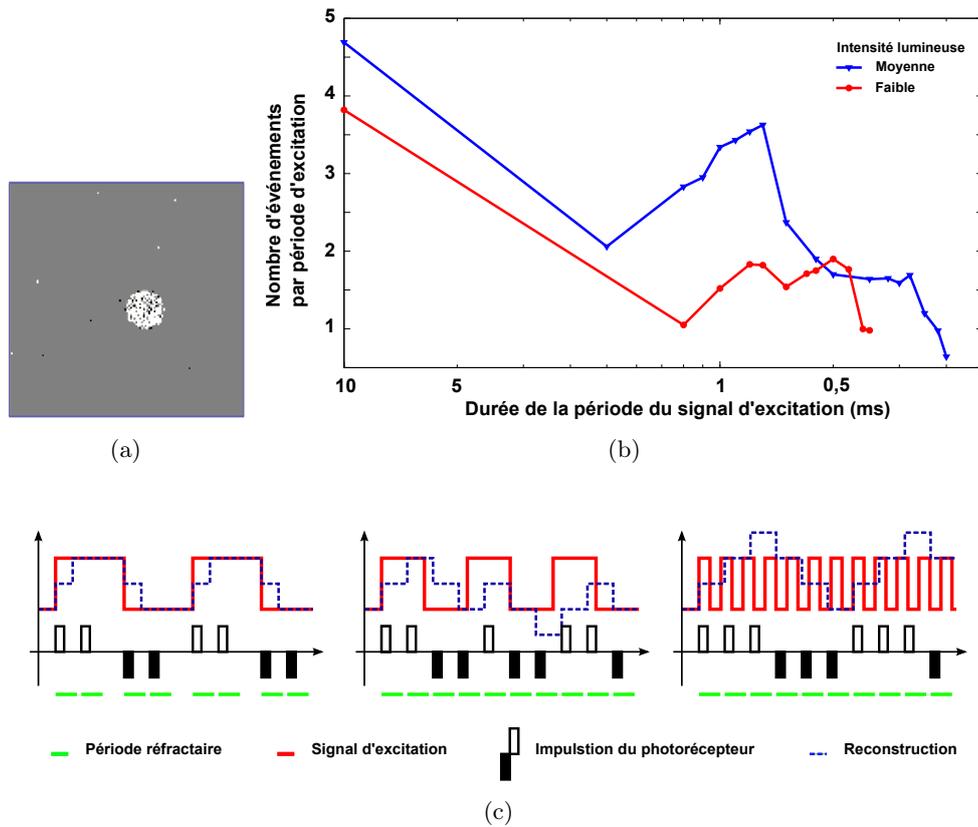


FIGURE 4.6 – Évaluation de la bande passante d’une caméra événementielle. (a) Image de la surface excitée (b) Graphe du nombre moyen d’événements de polarité +1 par période en fonction de la durée de celle-ci, pour un pixel et 10 secondes de mesure. L’excitation est produite par un laser commandé par un signal carré digital, dont deux valeurs d’amplitude ont été testées. (c) Schéma illustrant l’influence de la période réfractaire d’un photorécepteur événementiel. Le photodétecteur est aveugle pendant cette période. Cette propriété influence la bande passante d’un pixel. La valeur de cette période varie avec l’illumination et le réglage des gains de la caméra. Le retard global n’est pas représenté ($\geq 15\mu\text{s}$).

stimulation quand les fréquences sont élevées.

Dans notre application, seul le contour de l’objet conserve un intérêt pour la détection de position. Il est alors possible de négliger la polarité des impulsions. Celle-ci est exploitée pour reconstruire une image contrastée. À partir de ce choix, les problèmes de bande passante sont légèrement réduits et peuvent être de l’ordre de la période réfractaire. Une autre manière de résoudre ce problème est d’envisager l’ensemble des pixels participant au traitement d’images et d’utiliser leur asynchronisme pour augmenter la bande passante de la mesure. Cette propriété n’a pas été testée, mais elle fournit une marge de confiance par rapport à la bande passante du pixel.

D’autres facteurs peuvent expliquer la limitation de la bande passante, notamment des effets de saturation lorsque trop d’événements sont émis en même temps. Pour prendre en compte ce phénomène, l’évaluation de la bande passante est réalisée avec un spot lumineux large (voir Fig. 4.6(a)). Plus de 1000 événements par milliseconde sont pro-

duits par le capteur pour une excitation à 1kHz. Cette dernière est très supérieure aux conditions expérimentales ($< 20\text{kfps}$). Cette marge garantit l'absence de saturation lors des manipulations.

La luminosité de l'illumination agit également sur la résolution temporelle. En réduisant l'intensité de lumière produite par la source lumineuse, la bande passante du pixel se dégrade sensiblement. Il est donc important d'utiliser une illumination puissante pour ce type de système. Une photodiode reproduit les conditions expérimentales lors de l'expérience d'évaluation de la bande passante. La courbe d'intensité bleue sur la figure 4.6(b) correspond à l'intensité moyenne issue du microscope utilisé.

La fréquence du capteur est d'au moins 1kHz. Celui-ci satisfait les besoins en termes de dynamique d'un système téléopéré à retour haptique. Des algorithmes robustes capables de suivre cette cadence doivent être mis en œuvre en exploitant la compression des données.

4.1.3 Algorithme de traitement dédié

Les algorithmes développés pour les caméras traditionnelles ne sont plus exploitables avec notre système de vision. Les informations étant asynchrones et les pixels indépendants, il faut traiter un flot continu de données. Les algorithmes classiques doivent donc être reconsidérés pour s'adapter aux capacités dynamiques de ces capteurs. Les travaux dans ce domaine sont quasi inexistant. Il a donc été nécessaire de développer un nouvel algorithme en s'appuyant sur une collaboration avec l'équipe de vision¹³ de l'ISIR et le coencadrement d'une thèse avec l'équipe microrobotique. A partir de leur expertise, une méthode répondant à notre cahier des charges est sélectionnée.

Les objets piégés sont généralement sphériques. Le premier algorithme proposé s'est naturellement orienté vers une adaptation de la transformée de Hough classique pour la reconnaissance de cercles. Au lieu de traiter à intervalles constants les pixels d'une image, le nouvel algorithme traite chaque occurrence d'événements. Le calcul est alors désynchronisé et ne concerne que les données modifiées. Le contour de l'objet est naturellement mis en évidence par les variations de l'intensité.

Chaque impulsion est transformée en un cercle centré sur les coordonnées de l'événement reçu et de rayon prédéterminé. Ce cercle incrémente un espace de calcul dont le pas est arbitrairement choisi. Le nombre d'événements à accumuler est fixé par une liste de taille prédéterminée. Cette liste fonctionnant selon le mode FIFO (First In First Out), l'événement le plus récent chasse l'événement le plus ancien afin de mettre à jour l'espace de calcul (voir Fig. 4.7(a)).

Certains cercles accumulés dans cet espace se croisent si les événements correspondants appartiennent au contour d'une même microsphère. Il suffit alors de détecter le maximum local dans l'espace de Hough pour obtenir le centre de l'objet recherché.

D'autres mécanismes sont mis en place afin de gérer les configurations critiques :

- l'initialisation et le remplissage de la liste FIFO.
- la détection de plusieurs sphères avec la création de régions d'intérêt mises à jour à chaque pas de calcul.

13. [Chang 2009, Benosman 2011]

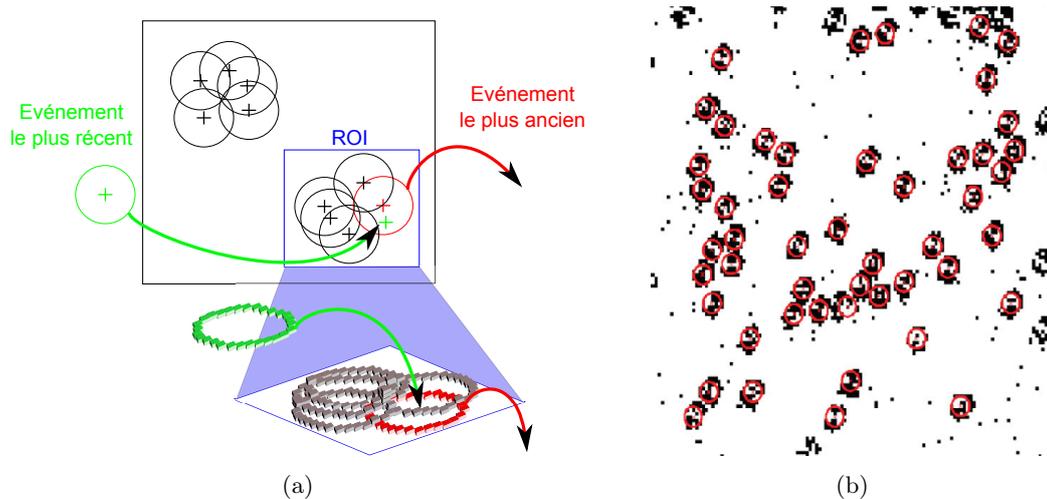


FIGURE 4.7 – (a) Principe de la mise à jour continue de l'espace de calcul de la transformée de Hough événementielle. L'arrivée d'un événement $E_v(t_k, x, y)$ incrémente les éléments de la matrice de calcul situés sur un cercle ayant pour centre les coordonnées de l'événement (x, y) et de rayon égal à celui de l'objet détecté. Dans le même temps, l'ensemble des pixels correspondant au dernier événement de la liste sont décrémentés. Le nouveau maximum local de la région d'intérêt (ROI) considérée est ensuite estimé. (b) Exemple de résultats pour la détection de plusieurs microsphères de $10\ \mu\text{m}$ de diamètre (objectif $20\times$, FIFO = 2000 événements, $\Phi \approx 10\text{keps}$)

- l'apparition ou la disparition d'un objet à partir de seuils garantissant une probabilité de présence suffisante.
- la variation du rayon lors d'une défocalisation ou la présence de sphères avec des rayons différents. Une troisième dimension à la matrice de calcul est alors ajoutée pour répondre à ce besoin.

L'implémentation complète de cet algorithme fournit une technique robuste et extrêmement rapide de traitement d'informations. Dans le cas de plusieurs objets de rayons différents (voir Fig. 4.7(b)), le traitement est d'environ 10 keps sur un PC standard (2,9GHz Dual core). Dans le cas d'une sphère seule centrée sur l'image, l'algorithme est réalisé à une cadence de plus de 30 keps.

Lors d'expériences en temps réel, la gestion des événements est effectuée en continu et l'espace de calcul est mis à jour avec des fréquences élevées. Par contre, la position mesurée est rafraîchie à 1kHz pour tenir compte de la bande passante du capteur actuel. De meilleures performances sont envisagées avec les prochaines générations de caméras événementielles. D'autres algorithmes plus rapides sont ainsi en cours de développement afin d'augmenter les taux de rafraîchissement de la détection.

4.2 Manipulateur dédié au retour d'effort

Afin de tester ce capteur, un deuxième prototype de pinces optiques est réalisé. Cette nouvelle installation est exploitée pour la comparaison entre les techniques basées sur

les images et les techniques événementielles. Ce prototype autorise la détection de phénomènes caractérisés par de faibles amplitudes et par de grandes dynamiques tels que le mouvement Brownien. En s'appuyant sur la robustesse de la détection en ligne avec la caméra événementielle, la réalisation de tâches quelconques télé-opérées avec retours d'efforts peut être démontrée.

L'objectif de ressentis fins explique le soin consacré aux performances de la commande. Lors de la mesure et du ressenti du mouvement Brownien, il est en effet critique de savoir si l'information transmise résulte du bruit de mesure, des instabilités du système ou du phénomène physique mesuré.

4.2.1 Description du système

L'installation optique correspond à une pince classique avec un laser vert (MLL, CNI-Laser, 532nm, 300mW, \varnothing 2mm). Ce dernier est focalisé au niveau de l'échantillon par un objectif à grande ouverture numérique (UPlanFLN, 40 \times , ON = 1,3, Olympus). La puissance laser est atténuée par une densité optique (OD1) et, à l'entrée de l'objectif, elle est estimée à 30mW.

Un microscope inversé est réalisé localement et comporte une source de lumière froide produite par une diode électroluminescente à 5W. Cette source est utilisée pour imager la scène avec deux caméras rapides. La première est une caméra monochrome CMOS gigaEthernet classique, de moyenne gamme (scA640-120gm de chez Basler avec une carte d'acquisition INTEL PRO1000-CT). Elle assure des fréquences d'acquisition de 122 ips pour une résolution complète de 659 \times 494 pixels. Pour une région d'intérêt réduite à 128 \times 128 pixels, l'acquisition s'élève à 300 ips. Pour cette même résolution, la deuxième caméra événementielle (DVS, ETH Zurich) peut produire jusqu'à 1.5 Meps par seconde en accord avec sa connectique USB. Les données ne correspondant qu'à l'information utile, le système n'est limité que par sa bande passante évaluée à 2kHz sous l'illumination du microscope. Ces deux caméras sont utilisées pour la détection de la position de l'objet piégé et pour la mesure des efforts.

Le choix de l'actionneur est dicté par la mise en parallèle de deux sources de mesures. Dans ce but, une platine motorisée est choisie, bien qu'elle présente de faibles performances dynamiques (voir section 2.2.3). Elle est composée de deux moteurs pas à pas (M-126 et un contrôleur C-843, Physik Instrument). Son temps de réponse est estimé supérieur à 100ms. Un nanotranslateur piézoélectrique (E-750.CP, PI) d'axe z règle le focus du microscope et des déplacements axiaux non dynamiques peuvent être produits. Le chemin optique et une photographie de l'installation sont présentés sur la figure 4.8. L'interface haptique utilisée sur cette installation est un prototype de pantographe développé à l'université McGill par le Professeur Vincent Hayward¹⁴. Elle possède deux degrés de liberté et un espace de travail réduit (10 \times 7cm), car son utilisation implique le doigt. Contrairement à la main et au bras, le doigt possède des résolutions tactiles plus fines : sa limite de sensibilité est en moyenne de 0,1N pour les forces¹⁵. Cette interface est équipée d'encodeurs à haute résolution pour la mesure de la position du doigt. La conception est particulièrement soignée au niveau des frottements et de la

14. [Campion 2005]

15. [Paré 2002]

dynamique. Sa bande passante est d'environ 200Hz et est supérieure à la plupart des interfaces haptiques actuelles. Des vibreurs (Haptuator¹⁶, TactileLab) sont placés sur ses armatures, afin d'étudier l'augmentation de la bande passante de l'interface haptique (50 – 500Hz). Les moteurs, les encodeurs et les vibreurs sont reliés à une carte National Instrument de haute performance (PCI-6259, NI).

La commande de cette installation est réalisée par un logiciel développé au laboratoire en C++ sur une plateforme Windows 7 et un PC 2,9GHz Dual core. Le programme comporte 6 threads gérés par les deux coeurs et l'hyperthreading du processeur. Les tâches suivantes sont donc réalisées en quasi-parallèle :

- l'acquisition des événements de la caméra DVS,
- l'acquisition des images de la caméra classique,
- le traitement des données pour la détection de la position,
- la gestion de l'interface haptique avec son modèle géométrique, ainsi que l'enregistrement des données,
- l'actionnement du micromanipulateur,
- la gestion de l'interface graphique.

Finalement, ce système autorise un couplage simple de type position-position avec deux gains homothétiques à régler (voir section 2.3.2). Le gain en position Ad est fixé à 10^3 : l'espace de travail du pantographe donne donc une marge de manœuvre de $100\mu\text{m}$. Le gain en force est ajustable en fonction des besoins du ressenti. Des instabilités sont ressenties en mode libre (piège actionné loin des obstacles) à partir de $Af = 4 \cdot 10^{11}$ pour une microsphère de $6\mu\text{m}$ de diamètre et des raideurs du piège de l'ordre de 10^{-5}N.m^{-1} . Dans la suite de ce chapitre, toutes les expériences sont conduites avec des microsphères de diamètre $6\mu\text{m}$.

16. [Yao 2010]

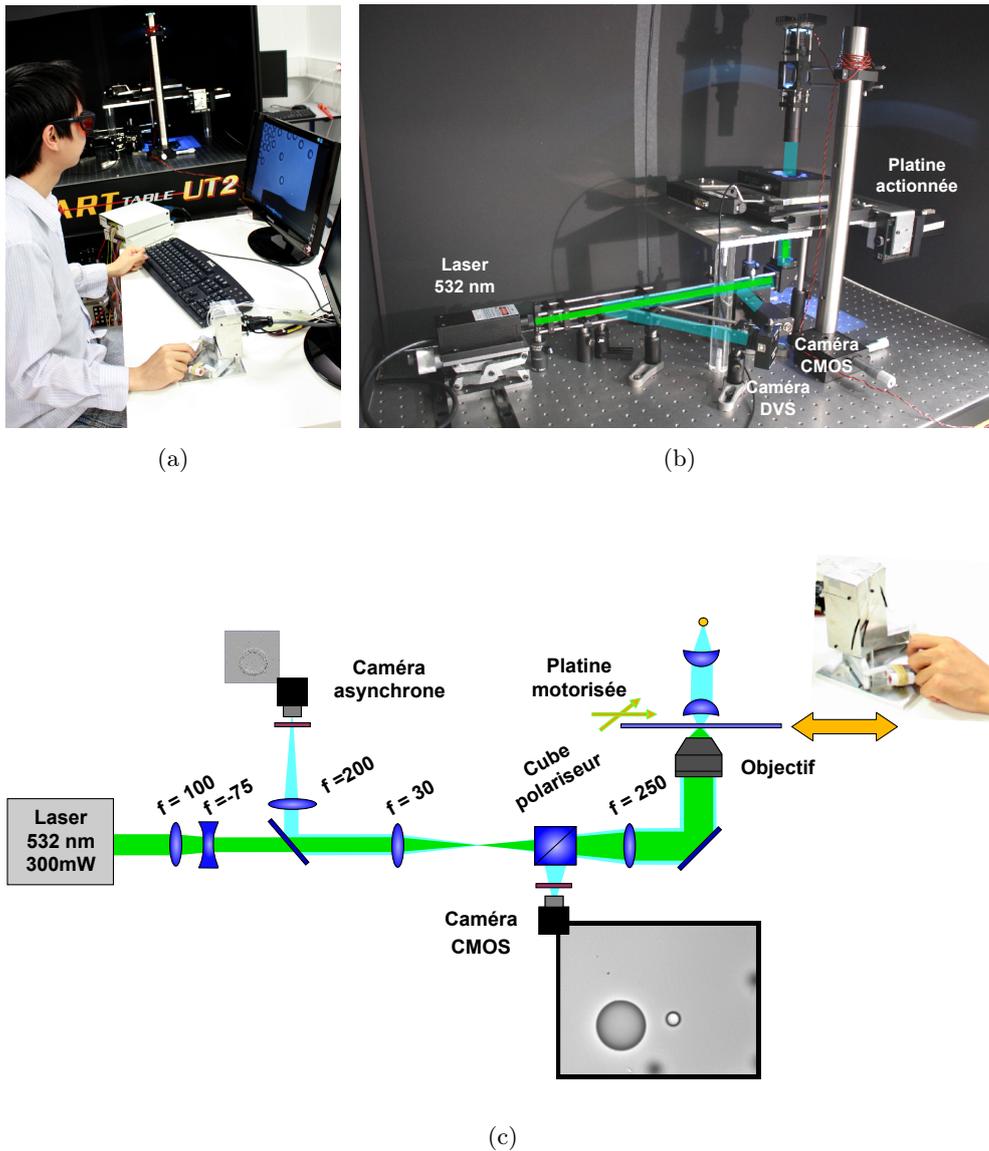


FIGURE 4.8 – Installation de la pince optique pour l’intégration de la caméra événementielle. (a) Vue générale du système avec une interface haptique de type pantographe. (b) Détail du microscope inversé et du chemin optique. (c) Schéma optique de l’installation. L’actionneur de ces pinces optiques est une platine motorisée. Deux caméras sont utilisées pour la détection de position : une caméra CMOS et une caméra asynchrone événementielle.

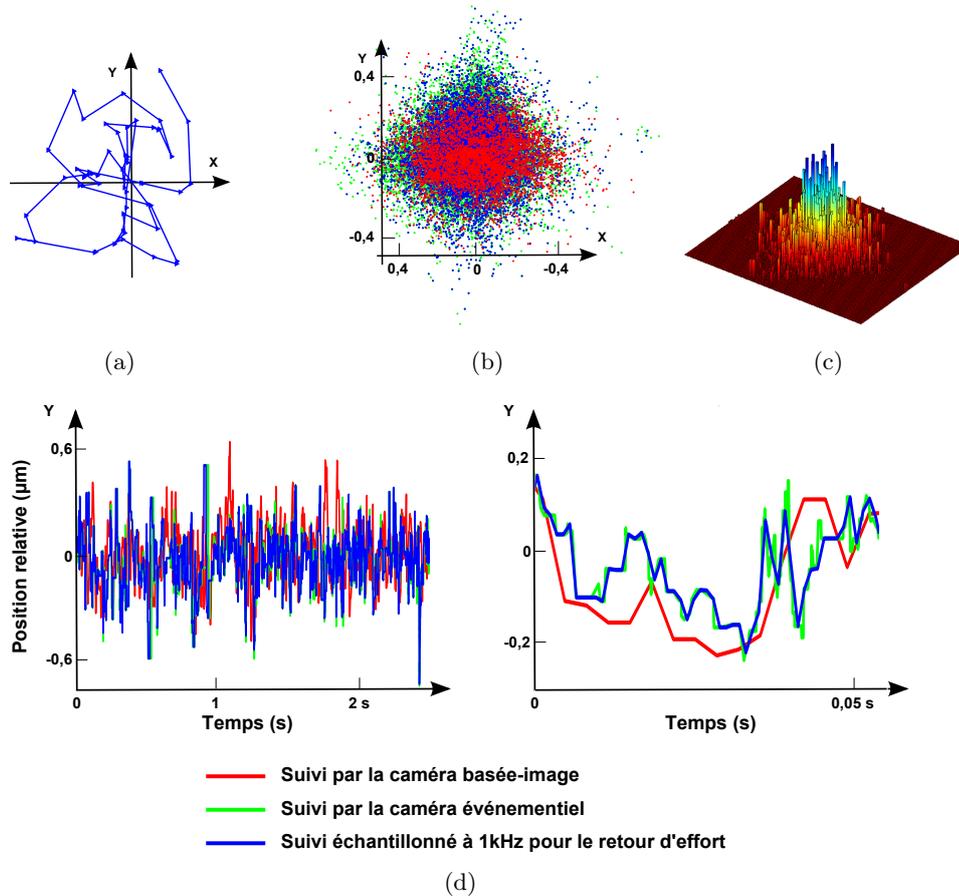


FIGURE 4.9 – Mesure du mouvement brownien. (a) Trajectoire d’une microsphère mesurée pendant 100ms. (b) Répartition pour un suivi de 2,5s. (c) Histogramme montrant la probabilité de présence de la microsphère pendant une expérience de durée 2,5s, pour la mesure événementielle ré-échantillonnée. (d) A gauche, mesure de la position selon l’axe y avec une durée de 2,5s. A droite, zoom du détail des données pour 50ms. ($\Phi = 1\text{keps}$, FIFO=50)

4.2.2 Mesure du mouvement Brownien

Le mouvement Brownien est un phénomène particulièrement difficile à détecter. Sous l’effet de la température, les atomes s’agitent avec des amplitudes assimilables à un bruit gaussien¹⁷. Au niveau microscopique, les particules d’eau du milieu ne sont pas observables, mais leur action sur les microsphères est facilement discernable. Les chocs transmettent de l’énergie à ces dernières et elles se mettent également en mouvement. Lorsqu’une microsphère est piégée dans une pince optique, ce mouvement est continu mais il est de plus faible amplitude et est centré sur la position d’équilibre du piège (voir Fig. 4.9(a)). La plupart des mesures se trouvent entre $\pm 0,4\mu\text{m}$ sur le centre du piège (voir Fig. 4.9(b)). A partir des données expérimentales, une plus grande amplitude est observée au niveau des déplacements sur l’axe x par rapport à l’axe y . Cette remarque laisse présager une raideur du piège plus faible dans cette direction. La figure 4.9(c)

17. [Crocker 1996, Huang 2011]

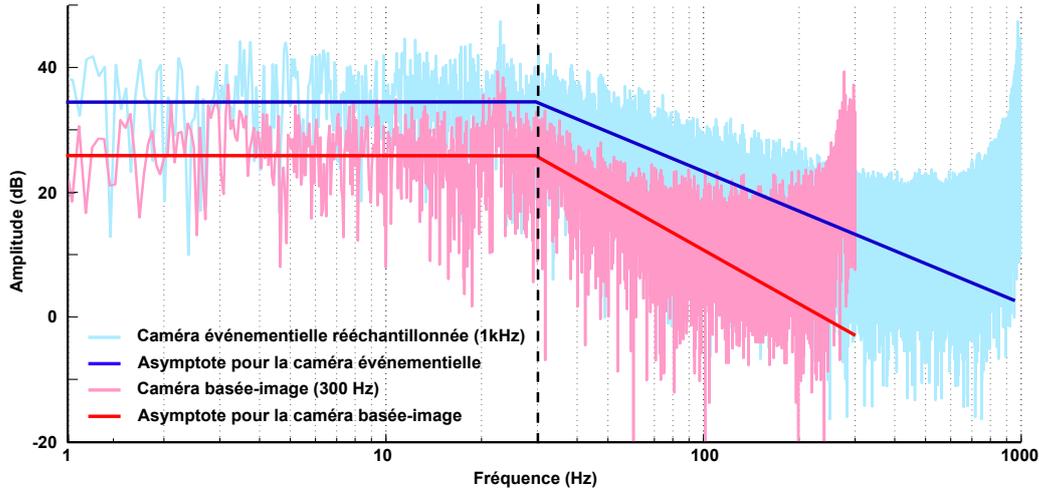


FIGURE 4.10 – Transformée de Fourier de la mesure de position pour l’axe x . Une fréquence de coupure est repérée à environ 30Hz. Des asymptotes sont ajoutées aux données expérimentales. L’échantillon de mesure représente une durée de 16s

montre le profil gaussien de la répartition des mesures.

La détection est réalisée avec les deux caméras, l’une basée sur les images (courbe rouge) et l’autre événementielle, simultanément. Le traitement en ligne des données de la caméra événementielle fournit deux types de mesures. La première est le rafraîchissement asynchrone de la position à partir du flux d’événements (courbe verte). La deuxième est issue d’un ré-échantillonnage exploité pour le retour d’effort (courbe bleue). Sa fréquence est de 1kHz en accord avec les besoins de ressenti tactile et la bande passante physique du capteur DVS. Sur la figure 4.9(d), il est possible de comparer ces deux mesures à celle de la caméra basée sur les images échantillonnée à 300Hz dont le traitement d’image est effectué hors ligne avec une transformée de Hough classique.

A partir de ces mesures, il est possible de étalonner la raideur du piège¹⁸. En effet, le piège et le milieu visqueux agissent comme un ressort-amortisseur sur la position de la microsphère. Il s’agit alors d’un filtre passe-bas sur le signal du mouvement Brownien de type bruit blanc gaussien. Les caractéristiques de ce filtre sont directement liées aux propriétés du milieu et du piège. A partir de la transformée de Fourier du signal, il est possible d’identifier une fréquence de coupure, f_p , dont l’expression théorique est :

$$f_p = \frac{K}{2\pi B_v} \quad (4.1)$$

où K est la raideur du piège et B_v la résistance visqueuse du milieu. Sur la figure 4.10, représentant la transformée de Fourier de la position sur l’axe x , la fréquence de coupure apparaît à une fréquence d’environ 30Hz. La raideur estimée est alors de $K_x = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{N.m}^{-1}$. La même démarche est réalisée pour l’axe y . La coupure se présente cette fois pour une fréquence 50Hz. La raideur sur cet axe est donc estimée à $K_y = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{N.m}^{-1}$.

La mesure basée sur les images est utilisée pour vérifier les données issues du nouveau

18. [Berg-Sorensen 2004]

capteur événementiel. Le phénomène de mouvement brownien est correctement restitué pour ces ordres de grandeur de la raideur du piège. Des raideurs plus faibles peuvent également être mesurées à partir du large spectre de ce capteur DVS. Par contre, pour des raideurs plus élevées, le mouvement Brownien a des amplitudes très faibles, le flux d'événement devient alors très réduit. La liste d'événements de l'algorithme événementiel contient alors des données trop anciennes pour donner un rendu dynamique du phénomène. Le résultat de ce traitement est une moyenne du mouvement Brownien sur une fenêtre temporelle glissante.

Lorsque la taille du FIFO est grande, le mouvement Brownien, ainsi que tout autre phénomène dynamique, se retrouvent filtrés lors de la mesure. Il est donc important de régler sa taille en fonction du flux d'événements et de la précision du ressenti recherché. Un FIFO dynamique est une solution relativement complexe à mettre en place. Il demande une compréhension du comportement des signaux asynchrones. Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives de recherche dans le domaine de la vision événementielle.

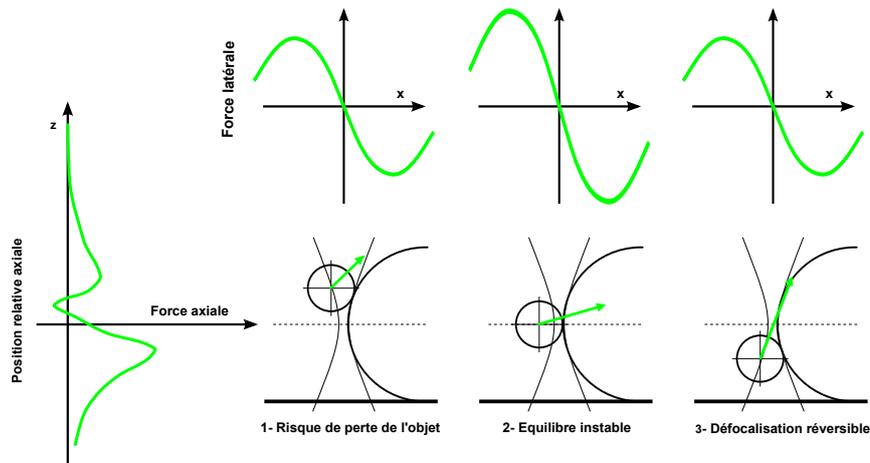


FIGURE 4.11 – Contact avec un objet tridimensionnel sphérique et risque de défocalisation. En haut et à gauche, illustrations de la variation des composantes axiale et latérale de la force optique en fonction de la position relative, d'après [Bakker Schut 1991]. La composante radiale varie également en fonction de la position axiale. Les forces optiques sont ensuite représentées pour plusieurs configurations de contact avec l'obstacle : 1- l'objet piégé est défocalisé vers le haut et risque de sortir du piège ; 2- l'objet est centré avec l'obstacle, cette position est un équilibre instable difficile à maintenir ; 3- l'objet est défocalisé vers le bas, il suffit d'effectuer un retrait pour le réaligner. Dans cette schématisation, les autres forces telles que la pesanteur et le contact ne sont pas représentées.

4.2.3 Résultats de téléopération en temps réel

Pour illustrer la robustesse de cette nouvelle technique de détection, une expérience de suivi du contour d'un objet complexe est proposée. L'obstacle choisi est une microsphère de diamètre $21\mu\text{m}$. Elle présente les mêmes contrastes que l'objet piégé : une microsphère de polystyrène de $6\mu\text{m}$ de diamètre. Le suivi avec un algorithme de type centre de masse est donc impossible dans ce cas.

Cet obstacle présente d'autres difficultés. Le suivi doit être effectué sur le plan focal et la trajectoire à parcourir est un cercle. Cette contrainte implique de modifier de façon continue la direction du mouvement. De plus, la forme tridimensionnelle implique des risques fréquents de défocalisation (voir Fig. 4.11).

Les conditions d'opération sont donc extrêmement difficiles. Le suivi du contour est tenté sans succès en utilisant l'interface pantographe sans retour d'effort. Par contre, dès que le ressenti est possible, le suivi devient facile et rapide sur des petites portions de contour. La réalisation d'un tour complet de l'obstacle demande un peu d'apprentissage : la figure 4.12 montre la compensation effectuée par l'opérateur lors de situations difficiles.

Lorsque l'utilisateur exerce une pression trop importante sur l'obstacle, l'objet piégé se défocalise. Ce phénomène est perceptible visuellement, mais également tactilement : les forces retournées diminuent brutalement. Il faut donc opérer un retrait pour conserver le piège et récupérer la sensation tactile du contour, dans le cas d'une focalisation vers le bas. Dans le cas d'une focalisation vers le haut de l'obstacle, l'objet sort rapidement de la zone stable du piège et finit par être accéléré vers le haut (poussé par la pression

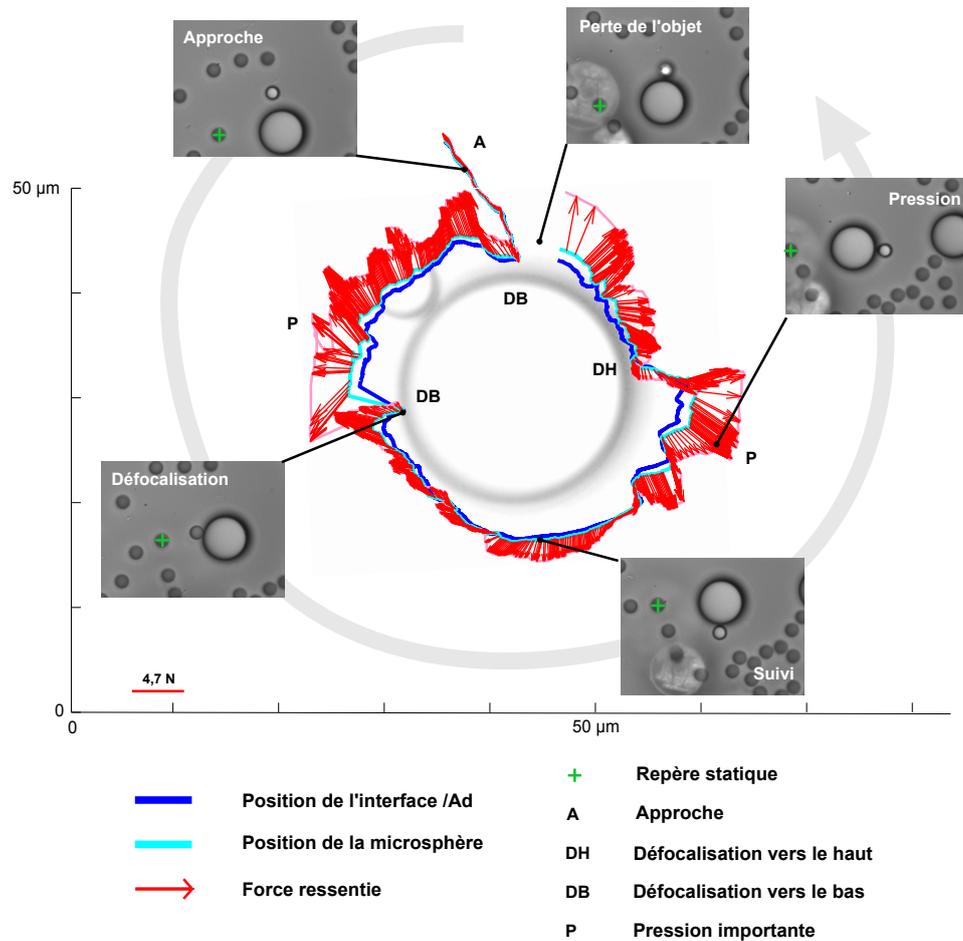


FIGURE 4.12 – Suivi du contour d'une microsphère de $21\mu\text{m}$ de diamètre avec une bille piégée de $6\mu\text{m}$. Les valeurs de raideur du piège sont $K_x = 1,1 \cdot 10^{-5}\text{N.m}^{-1}$, $K_y = 1,8 \cdot 10^{-5}\text{N.m}^{-1}$. Avec le retour haptique, le maintien sur la majorité du contour est obtenu. Cette tâche est impossible à réaliser par téléopération sans retour d'effort. ($Af = 2,7 \cdot 10^{11}$, $Ad = 10^3$, $\Phi = 10\text{keps}$, $FIFO = 1000$)

radiative). Le ressenti tactile reste présent et peut tromper l'utilisateur. Celui-ci peut, par moment, sortir de la zone de piégeage.

La durée totale de cette expérience est de 26 secondes. Celle-ci est très convenable par rapport à la difficulté et la précision de la tâche. Seule une automatisation est capable d'obtenir des performances comparables. Mais elle nécessite une gestion intelligente des deux cas de défocalisation et probablement une mesure des déplacements axiaux. La procédure développée pour cette automatisation n'est ainsi pas adaptable à d'autres types d'obstacles.

L'utilisation de la téléopération à retour d'effort présente de nombreux avantages en termes de flexibilité et de coût. L'expérience présentée montre qu'un opérateur est capable de réaliser une tâche complexe avec une grande rapidité lorsqu'il a un ressenti tactile. Elle est également une démonstration du potentiel d'une installation de micromanipulation dédiée au retour d'effort. En effet, le changement pour un actionneur

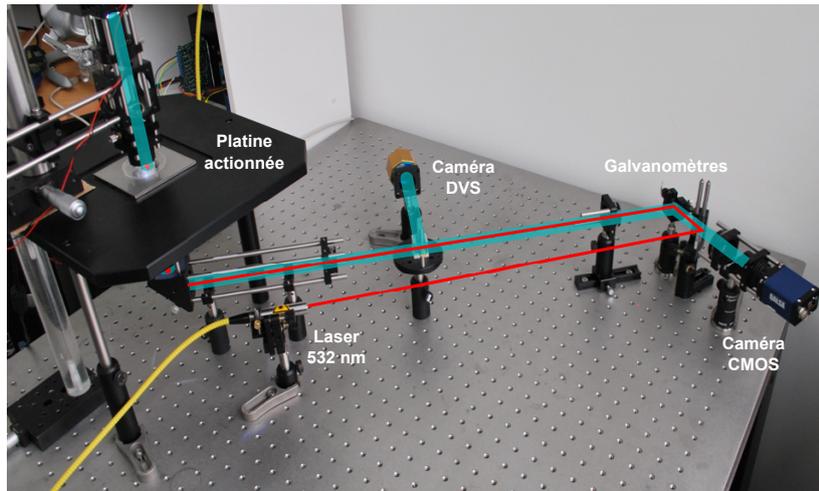


FIGURE 4.13 – Photographie de l’installation réalisée pour l’intégration des actionneurs de type galvanomètre. Une caméra CCD visualise la scène et une caméra rapide est placée en amont des galvanomètres.

rapide laisse présager de meilleures sensations.

4.3 Installation dédiée et perspectives

Un troisième prototype est en cours de développement au CEA. Ce système possède des actionneurs rapides de type galvanomètre (6200H et cartes MicroMax 671, Cambridge Technology). Leur temps de réponse est de 0,043ms pour des petits angles. L’apport d’un actionneur rapide pour la boucle haptique a été présenté au chapitre 3. Ce système combiné avec une caméra événementielle placée en amont de l’actionneur promet des performances exceptionnelles en termes de stabilité. Le gain en force peut donc être augmenté pour atteindre une finesse de sensations de l’ordre du Piconewton.

Avec cet actionneur, plusieurs pièges peuvent être contrôlables par un phénomène de séparation temporelle. Dans ce cas, une synchronisation de la mesure est nécessaire. Le scanner réalise, en effet, des allers-retours très rapides entre les différents objets. La caméra doit donc réaliser une mesure dans la courte fenêtre d’alignement avec un objet. Seul un traitement rapide et robuste peut discriminer les périodes d’alignement à la cadence requise. Les caméras événementielles semblent promettre de bons résultats vis à vis de ces exigences. Leur synchronisation est également facilitée à partir de l’important front d’événements que représente le changement rapide de position entre chaque piège.

De nouvelles technologies d’actionneurs sont également des candidats pertinents pour la réalisation d’installations dédiées. Par exemple, le micromiroir Linescan développé à l’institut des microsystèmes photoniques (IPMS, Dresden) prévoit un actionnement de haute performance à partir de technologies MEMS. De nouveaux modulateurs spatiaux de lumière non-linéaires¹⁹ (Boulder Nonlinear Systems Spatial Light Modulator)

19. [Preece 2009]



FIGURE 4.14 – (a) Photographie des galvanomètres utilisés au CEA. (b) Photographie du pantographe équipé de vibreurs Haptuator.

peuvent créer de nombreux pièges de manière tridimensionnelle avec un taux de rafraîchissement jusqu'à 1kHz d'après le constructeur. Les caméras événementielles et la réalisation de traitements complexes multi-objets prennent alors tout leur sens et apportent de nouvelles alternatives originales pour étendre l'espace de travail.

Un travail important doit également être réalisé du côté des interfaces haptiques. Des interfaces avec des propriétés variables²⁰ peuvent être utilisées pour évaluer l'évolution des performances. L'extension de la bande passante mécanique de ces systèmes robotisés à retour d'effort peut également présenter des intérêts pour des tâches fines comme l'extension d'un brin d'ADN. L'introduction de vibreurs à grandes bandes passantes est également en cours d'investigation. Un meilleur ressenti du mouvement brownien est déjà obtenu et la sensation de contact brutal est nettement améliorée. Ces différentes améliorations possibles donnent des potentialités importantes pour les pinces optiques et le retour haptique.

La démarche de conception dédiée est seulement initialisée et les améliorations apportées sont manifestes. Le champ d'investigation du retour d'effort pour la micromanipulation a été élargi à d'autres horizons que la conception de couplages bilatéraux complexes. L'utilisation d'un couplage simple avec une installation dédiée montre des résultats d'une complexité bien supérieure à l'état de l'art.

Le multi-piégeage tridimensionnel et la manipulation collaborative mènent sur la voie d'une immersion complète de l'opérateur. Avec des micro-outils dans les deux mains ou au bout des doigts, l'opérateur serait capable d'élaborer de nouvelles stratégies nécessaires pour explorer cet environnement dont les lois ne sont pas encore bien établies : le micromonde.

20. [Gosline 2006]

Conclusion générale

A partir d'une étude détaillée des besoins actuels de la micromanipulation et de ses utilisateurs, il est possible d'avancer vers de nouvelles stratégies de préhensions d'objets micrométriques. Cette thèse démontre que le ressenti tactile est essentiel à la rapidité et la complexité de tâches dans un espace dimensionnel où les phénomènes physiques sont défavorables. Alors que l'état de l'art se concentre principalement sur le couplage bilatéral entre le micromanipulateur et les interfaces à retour d'effort, la démarche adoptée dans ce travail propose une orientation différente. Afin de limiter les réglages et les compétences nécessaires pour l'utilisation du retour tactile, la recherche dans ce domaine doit aussi se concentrer sur la conception intrinsèque du micromanipulateur et de ses composants.

Le choix d'un phénomène physique, de ses techniques de contrôle et de méthodes de mesures entraîne une alternative aux recherches sur l'instabilité du couplage haptique. Ainsi les pinces optiques et leurs propriétés de lévitation s'avèrent être d'excellents candidats pour obtenir des sensations fines des interactions. Les travaux présentés dans ce manuscrit confirment leurs apports aussi bien théoriquement qu'expérimentalement. Non seulement, un couplage simple est réalisé à trois reprises sur des prototypes de différentes structurations, mais le spectre des potentialités mis à jour est considérable. Le faible encombrement de ces outils autorise notamment des traitements d'imagerie avancés. La fiabilisation de la mesure des efforts est nettement améliorée. La flexibilité apportée par les travaux de vision présentés n'est qu'une prémisses aux capacités réelles envisagées de ces techniques. Le suivi tridimensionnel d'objets plus complexes, tels que des micro-outils adaptés au piégeage et à la tâche, augmenterait les degrés de libertés du contrôle télé-opéré en position et en force.

Pour la micromanipulation télé-opérée de façon ressentie, le multi-piégeage est un atout majeur. Il rend possible de hauts degrés de robotisation du micromanipulateur. Celui-ci, couplé à un retour haptique, autorise des stratégies collaboratives de préhension. L'immersion de l'utilisateur serait alors totale puisqu'il aurait l'illusion d'utiliser son principal outil, ses mains et leurs 10 doigts, dans des situations usuellement hors de sa portée.

Ce ressenti tactile pour la micromanipulation, fort de ces nouvelles performances et des modularités associées, pourraient être pleinement exploités pour l'exploration des objets physiques du micromonde, les cellules, les virus, les protéines, les microcristaux et autres colloïdes... La compréhension de leurs propriétés physiques et la standardisation des méthodes d'analyse pourraient aboutir à la recherche de nouvelles sensations afin d'augmenter l'efficacité des tâches télé-opérées. L'utilisation des vibreurs sur le pantographe découple, par exemple, le ressenti dynamique des efforts statiques. Ainsi le mouvement Brownien pourrait être fortement amplifié pour favoriser la palpation à distance. La diminution de son amplitude signalerait la présence d'un obstacle, même invisible à la microscopie photonique.

D'autres guidages virtuels aideraient, par exemple, à éviter les pertes de piégeage. Une conception des sensations proche des besoins de la tâche et exploitant les informations

des mesures augmenterait significativement la rapidité et la complexité des opérations. Le retour haptique s'inscrirait alors dans une perspective de micromanipulation massive qui répondrait aux futures aspirations de l'industrie des microtechnologies ou des technologies biomédicales.

Finalement c'est probablement la créativité scientifique qui bénéficiera le plus de ces avancées. Le ressenti tactile aux échelles micrométriques donne une autre représentation des phénomènes et introduit une inventivité supérieure dans l'expérimentation. L'enthousiasme et les implications que ce projet a fait naître auprès des acteurs de la recherche, a fortement contribué à son essor scientifique.

Définitions

(A revoir)

Micromanipulation

La micromanipulation peut se définir comme la saisie et la dépose (ou relâche) d'objets de gammes dimensionnelles microscopiques. La composition et la forme de ces derniers sont très différentes. Le préfixe "micro" se rapporte parfois à la taille des objets manipulés, parfois à celle des outils considérés. En général, la micromanipulation s'intéresse aux objets de dimensions comprises entre 100 nanomètres et 1 millimètre. Les forces en jeu peuvent aller du millinewton au femtonewton et sont principalement des forces surfaciques d'adhésion¹.

Micromanipulateur

Le micromanipulateur est un raccourci qui caractérise le système de micromanipulation complet : ses actionneurs, ses capteurs et son effecteur final.

Préhenseur/effecteur

Le terme préhenseur ou effecteur est utilisé indifféremment pour l'outil interagissant avec l'environnement de manipulation. Il caractérise donc parfois un micropiège ou une micropointe, mais aussi une technique de lévitation ou indirectement deux microsphères piégées actionnées tel une pince.

Pince optique

Traduction littérale du terme inventé par Ashkin (Optical tweezer), ce terme est usuellement utilisé pour désigner un système de micromanipulation complet utilisant une technique de piégeage optique. L'organe préhenseur, d'après la définition précédente, de la pince optique est un piège optique dans le cas de manipulation directe et ou plusieurs micro-outils piégés dans le cas indirect.

Télé-opération

La télé-opération est la technique qui consiste à commander des systèmes à distance.

1. [Régnier 2008]

Haptique

L'haptique est une science du toucher. Elle étudie la perception kinesthésique et cutanée. Elle s'intéresse à comprendre le mécanisme permettant le sens tactile dans le vivant, mais également aux techniques de transmission d'informations tactiles via des systèmes robotisés.

Couplage haptique

Un couplage haptique représente le lien entre une interface à retour d'effort (robot maître) et un effecteur distant ou virtuel. Les données de force et de déplacement sont transmises de manière bilatérale entre les deux organes pour prolonger le sens du toucher avec un système de télé-opération.

Couplage direct

Un couplage direct consiste à relier l'opérateur à l'environnement en réalisant une simple homothétie des grandeurs transmises.

Couplage passif

Un couplage passif stocke, dissipe ou restitue de l'énergie du système, mais n'en crée pas. Typiquement, des gains amplificateurs seuls ne permettent pas un couplage passif.

Stabilité

La stabilité est la propriété des systèmes qui convergent toujours vers leur position d'équilibre. (à compléter)

Transparence

La transparence caractérise la fidélité de la transmission d'informations. Un système transparent restitue une image non déformée de la réalité à une homothétie près. (à compléter)

Traitement d'images - Généralités

Sommaire

C.1 Miroir actionné 2DDL de Glasgow	129
C.2 Galvanomètres du CEA	131

Centre de masse

Le centre de masse est la technique de traitement d'images la plus simple pour déterminer le centre d'un objet. Il est souvent recommandé d'effectuer un seuil sur le profil d'intensité de l'image afin de mieux contraster les surfaces. L'algorithme est décrit par la définition mathématique suivante : soit un pixel d'intensité $I_{i,j}$ et repéré par rapport à sa position dans l'image, ses coordonnées sont x_i et y_j . Le centre de masse opère l'opération suivante sur l'ensemble des pixels de l'image ou de la zone d'intérêt choisie :

$$\hat{x} = \frac{\sum^j \sum^i (x_i \cdot I_{i,j})}{\sum^i x_i} \quad \hat{y} = \frac{\sum^i \sum^j (y_j \cdot I_{i,j})}{\sum^i y_j}$$

où \hat{x} et \hat{y} sont les estimations des coordonnées du centre de masse de la zone traitée. Plus précisément, cet algorithme opère une moyenne géométrique des régions de forte intensité. Si celles-ci sont disjointes, le traitement pondère leur centre commun selon leur intensité et leur surface.

Histogramme

L'algorithme de l'histogramme est utilisé pour discriminer plusieurs objets disjoints. En effet, son principe est également simple et peut s'énoncer de la façon suivante. Soient x_i , y_j et $I_{i,j}$ respectivement les coordonnées du pixel ij et son intensité, un histogramme à deux dimensions opère les opérations suivantes sur l'ensemble des pixels :

$$\hat{x}_i = \sum^j I_{i,j} \quad \hat{y}_j = \sum^i I_{i,j}$$

où \hat{x}_i et \hat{y}_j sont des fonctions représentant le graphique des intensités en fonction de la coordonnée en x et celui en fonction de la coordonnée en y . Plusieurs solutions peuvent être employées ensuite pour rechercher les extremas de ces graphiques : soit une simple recherche est réalisée sur les données brutes, soit une approximation polynomiale des graphiques est utilisée pour obtenir de meilleures résolutions.

Corrélation

La corrélation est un algorithme plus complexe qui est exploité pour la reconnaissance de forme. En effet, il se base sur la comparaison d'une image enregistrée préalablement de l'objet et la scène. De cette comparaison, résulte un indice de corrélation défini de la façon suivante. Soient x_i, y_j et $I_{i,j}$ respectivement les coordonnées et l'intensité du pixel ij de la scène, soient x_k, y_l et $K_{k,l}$ respectivement les coordonnées et l'intensité du pixel kl de l'image enregistrée, alors l'indice de corrélation C_{xy} s'exprime ;

$$C_{xy}(x_i, y_j) = \sum_k \sum_l I_{i+k, j+l} \cdot K_{k,l}$$

Une version normalisée de cet indice existe également. Ensuite, les extremas de cette fonction à deux dimensions sont retrouvés par centre de masse, si la scène est peu complexe, ou par interpolation. Le maximum global de la fonction correspond en général à la position la plus probable de l'objet dans la scène.

Transformée de Hough

La transformée de Hough est utilisée pour la reconnaissance de formes géométriques régulières comme des sphères ou des lignes. Après l'optimisation du contraste de la scène, chaque pixel appartenant à un contour est transformé en un cercle, par exemple, dans le cas de la détection d'objets sphériques. Ce cercle est discrétisé afin de mettre à jour les valeurs des composantes correspondantes dans une matrice de calcul, $M_H(x, y)$. Ainsi un pixel de coordonnées (i,j) et d'intensité $I_{i,j}$ induit la transformation suivante :

$$\begin{aligned} \forall(i, j), \forall \theta \in [-\pi, \pi] \\ x_{i,j}(\theta) &= i + R \cdot \cos(\theta) \\ y_{i,j}(\theta) &= j + R \cdot \sin(\theta) \\ M_H(x_{i,j}(\theta), y_{i,j}(\theta)) &= M_H(x_{i,j}(\theta), y_{i,j}(\theta)) + I_{i,j} \end{aligned}$$

Il est également possible de réaliser ce calcul pour des objets de rayon inconnu en ajoutant une dimension dépendante de R à la matrice de calcul.

Justification expérimentale de la modélisation

Sommaire

D.1 Mode libre	133
D.1.1 Régime continu	133
D.1.2 Régime échantillonné	137
D.2 Mode contraint	140
D.2.1 Régime continu	140
D.2.2 Régime échantillonné	142

C.1 Miroir actionné 2DDL de Glasgow

Le miroir actionné selon deux axes de Glasgow a été réalisé à partir d'un porte miroir à 2 degrés de rotation. Les moteurs utilisés ne sont pas référencés. Un programme labview se charge de leur régulation en position.

La réponse à un échelon est présentée sur la figure C.1. La courbe verte représente un échelon au niveau de la poignée de l'interface haptique. Cet échelon entraîne l'actionnement du piège, la courbe bleue montre la réponse du miroir et le déplacement du spot laser, les dimensions ont été mises à l'échelle des déplacements de la poignée.

Un modèle a été choisi pour approcher la courbe expérimentale. Bien que ce système soit d'un ordre supérieur à 2, il est plus pratique de l'approximer par un premier ordre afin de n'avoir qu'un paramètre à prendre en compte : la constante de temps. De plus, le but de cette modélisation est de comparer ce système à des actionneurs plus rapides se comportant comme des 1er ordre. La courbe noire représente donc la réponse du modèle du miroir. Un premier ordre de constante de temps 0,21 s a été choisi pour avoir le même temps de réponse que le système réel, soit 630 ms.

La réponse à une rampe est présentée sur la figure C.2. La courbe verte représente une rampe au niveau de la poignée de l'interface haptique. Le temps de décalage est de 150 ms. La courbe noire représente la réponse du modèle du miroir pour le cas de la rampe. Il y a ici une bonne adéquation entre le système réel et le modèle.

Les données ont été enregistrées à partir de l'intégration Labview du système complet. La consigne est générée par Labview comme si elle était émise par la poignée de l'interface Falcon. La position du piège est obtenue par conversion homothétique de la mesure des encodeurs sur les axes motorisés du miroir.

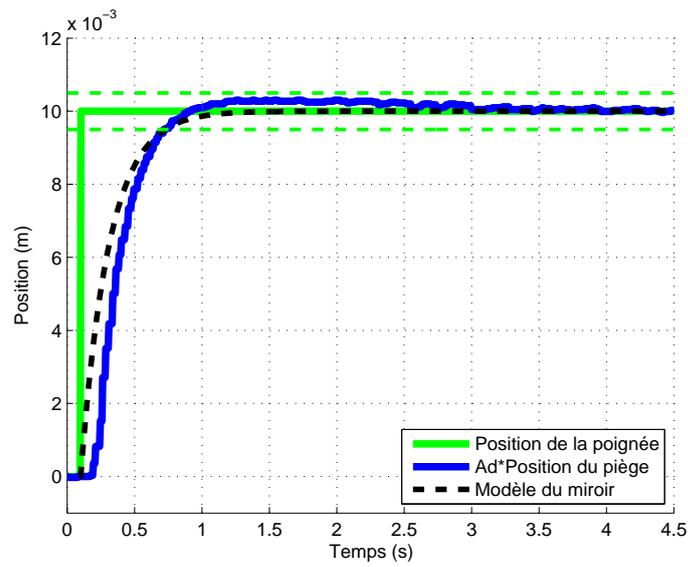


FIGURE C.1 – Réponse à un échelon d'un axe motorisé du miroir de Glasgow.

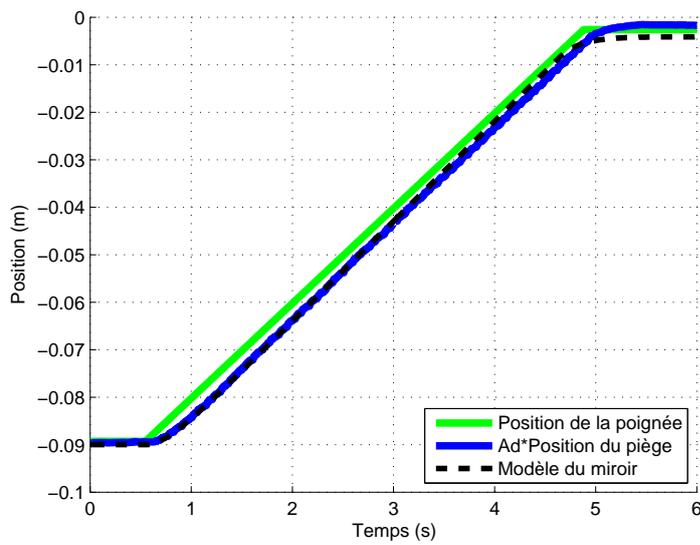


FIGURE C.2 – Réponse à une rampe d'un axe motorisé du miroir de Glasgow.

C.2 Galvanomètres du CEA

Les galvanomètres disponibles au CEA proviennent de chez Cambridge Technology (Modèle 6200H) Deux contrôleurs (MicroMax 671, Cambridge Technology) s'occupent de réguler chaque axe.

La réponse à un échelon d'un des axes est présentée sur la figure C.3. La courbe verte représente un échelon au niveau de la poignée de l'interface haptique. Cet échelon entraîne l'actionnement du piège, la courbe rouge montre la réponse du miroir et le déplacement du spot laser, les dimensions ont été mises à l'échelle des déplacements de la poignée.

La courbe noire représente la réponse du modèle du miroir. Un premier ordre de constante de temps 0,043 ms a été choisi en fonction des données constructeur qui donne un temps de réponse à 130 ms pour de petits angles.

La consigne est générée par un code C++ qui commande les sorties analogiques d'une carte de commande NI. Les données ont été enregistrées à partir d'un oscilloscope branché directement sur les sorties de la carte NI pour la mesure de la consigne et sur les sorties en position des galvanomètres pour la mesure de la réponse. La grande résolution temporelle de l'oscilloscope met en évidence la mauvaise stabilité en position des actionneurs et le bruit de mesure des encodeurs.

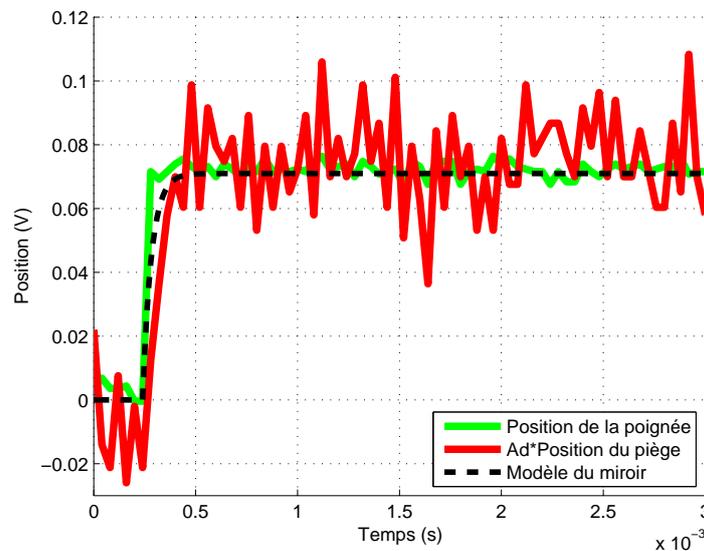


FIGURE C.3 – Réponse à un échelon d'un axe des galvanomètres du CEA.

Calcul de stabilité du système

Dans cette annexe est présenté le détail des calculs sur la stabilité du système en boucle fermée modélisée à la section 3.1. Dans ce modèle, l'environnement a été modélisé par deux configurations extrêmes du piège : le mode libre et le mode contraint.

D.1 Mode libre

Le mode libre correspond au cas où l'objet piégé ne subit que la force optique et la force visqueuse. Il est donc loin de tout obstacle. Les effets du mouvement Brownien sont négligés.

D.1.1 Régime continu

Dans cette section, le calcul de la stabilité est traité pour le régime continu. Dans ce cas, il faut faire l'hypothèse que les transmissions sont parfaites et ne nécessitent aucun échantillonnage.

Les fonctions de transferts établies par la modélisation de la section 3.1 sont respectivement de l'interface haptique, du miroir et de la résistance visqueuse :

$$H(s) = \frac{1/B_h}{s \cdot (\tau_h \cdot s + 1)}$$

$$M(s) = \frac{1}{(\tau_m \cdot s + 1)}$$

$$V(s) = \frac{-1}{B_v \cdot s}$$

Les termes de la troisième ligne et les lignes suivantes se calculent à l'aide des formules :

$$b_j = a_{n-2j} - \frac{a_{n-2j-1}}{a_n - 1} a_n$$

$$c_j = a_{n-2j-1} - \frac{b_{j+1}}{b_1} a_{n-1}$$

$$\dots$$

Le tableau formé est alors :

$$\left| \begin{array}{cccccc} a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \dots & 0 & \\ a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & \dots & 0 & \\ b_1 & b_2 & b_3 & \dots & 0 & \\ c_1 & c_2 & c_3 & \dots & 0 & \\ \dots & & & & 0 & \\ \dots & & & & 0 & \\ \dots & & 0 & & & \\ \dots & & & & & 0 \end{array} \right|$$

La **condition suffisante** du critère de Routh s'énonce ainsi :

Si tous les coefficients a_i existent et ont le même signe et si les $n+1$ termes de la première colonne du tableau ont le même signe, alors :

\implies les parties réelles des racines du dénominateur sont négatives
 \implies donc le système, représenté par la fonction de transfert possédant ce dénominateur, est stable.

Si ce critère est appliqué au cas présent, nous avons un polynôme d'ordre 3 au dénominateur de notre fonction de transfert et le tableau défini précédemment donne :

$$\left| \begin{array}{ccc} a_3 & a_1 & 0 \\ a_2 & a_0 & 0 \\ a_1 - \frac{a_3 a_0}{a_2} & 0 & 0 \\ a_0 & 0 & 0 \end{array} \right|$$

Les conditions sont donc dans notre cas :

$$\begin{aligned} \text{Si } a_3 > 0 &\implies a_2 > 0 \\ &a_1 > 0 \\ &a_0 > 0 \\ &a_1 - \frac{a_3 a_0}{a_2} > 0 \end{aligned}$$

Ces inégalités donnent une condition nécessaire et suffisante sur Af :

$$Af < Af_{max} = \frac{Ad \cdot B_h}{K} \frac{(\tau_h + \tau_p) \cdot (\tau_m + \tau_p) \cdot (\tau_m + \tau_h)}{\tau_h \cdot \tau_m \cdot \tau_p^2} \quad (\text{D.5})$$

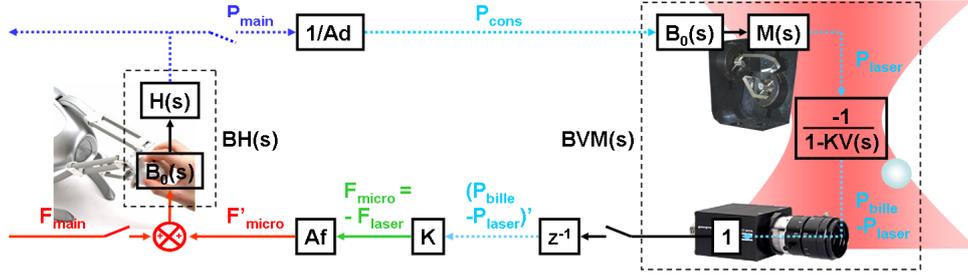


FIGURE D.2 – Modèle de la boucle haptique échantillonnée.

D.1.2 Régime échantillonné

Pour une modélisation plus réaliste, il faut prendre en compte l'échantillonnage et les retards liés au traitement d'image. La période d'échantillonnage est fixée à $T_{ech} = 1ms$. Sur la figure D.2, la conversion analogique/numérique est représentée par des bloqueurs d'ordre zéro, $B_0(s)$. Les fonctions de tranfert en régime continu sont transformées en Z en tenant compte des bloqueurs.

Ce qui donne pour l'interface haptique :

$$\begin{aligned}
 BH(z) &= Z[B_0(s) \cdot H(s)] \\
 &= \frac{z-1}{z} \cdot Z\left[\frac{1/B_h}{s^2 \cdot (\tau_h \cdot s + 1)}\right] \\
 &= \frac{1}{B_h} \cdot \frac{T_{ech} \cdot (z - e^{-T_{ech}/\tau_h}) - \tau_h \cdot (1 - e^{-T_{ech}/\tau_h}) \cdot (z-1)}{(z-1)(z - e^{-T_{ech}/\tau_h})}
 \end{aligned}$$

Pour des soucis de clarté, la notation suivante est adoptée, où i prend les valeurs m , p ou h :

$$E_i = e^{-T_{ech}/\tau_i}.$$

La partie pince optique devient :

$$\begin{aligned}
 BVM(z) &= Z\left[B_0(s) \cdot M(s) \cdot \frac{-1}{1 - K \cdot V(s)}\right] \\
 &= \frac{z-1}{z} \cdot Z\left[\frac{-\tau_p}{(\tau_m \cdot s + 1) \cdot (\tau_p \cdot s + 1)}\right] \\
 &= \frac{-\tau_p}{(\tau_m - \tau_p)} \frac{(z-1)(e^{-T_{ech}/\tau_m} - e^{-T_{ech}/\tau_p})}{(z - e^{-T_{ech}/\tau_m})(z - e^{-T_{ech}/\tau_p})} \\
 &= \frac{-\tau_p}{(\tau_m - \tau_p)} \frac{(z-1)(E_m - E_p)}{(z - E_m)(z - E_p)}
 \end{aligned}$$

La boucle fermée échantillonnée donne donc :

$$\begin{aligned}
 FTBFE_{libre}(z) &= \frac{BH(z)}{1 - Af/Ad \cdot K \cdot z^{-1} \cdot BH(z) \cdot BVM(z)} \\
 &= \frac{N(z)}{D(z)}
 \end{aligned} \tag{D.6}$$

avec

$$\begin{aligned} N(z) &= Ad(\tau_m - \tau_p)z(z - E_p)(z - E_m)(T_{ech} \cdot (z - E_h) - \tau_h \cdot (1 - E_h) \cdot (z - 1)) \\ D(z) &= (z - 1) \cdot (b_4 \cdot z^4 + b_3 \cdot z^3 + b_2 \cdot z^2 + b_1 \cdot z + b_0) \end{aligned}$$

Les coefficients b_i du dénominateur donnent :

$$\begin{aligned} b_0 &= Af \cdot K \cdot \tau_p(E_m - E_p)(-T_{ech} \cdot E_h + \tau_h \cdot (1 - E_h)) \\ b_1 &= -Ad \cdot B_h \cdot (\tau_m - \tau_p) \cdot E_h \cdot E_p \cdot E_m + Af \cdot K \cdot \tau_p(E_m - E_p)(T_{ech} - \tau_h \cdot (1 - E_h)) \\ b_2 &= Ad \cdot B_h \cdot (\tau_m - \tau_p)(E_h \cdot E_p + E_h \cdot E_m + E_p \cdot E_m) \\ b_3 &= -Ad \cdot B_h \cdot (\tau_m - \tau_p)(E_h + E_p + E_m) \\ b_4 &= Ad \cdot B_h \cdot (\tau_m - \tau_p) \end{aligned}$$

Un système échantillonné est stable si les racines, z_i , du dénominateur ont un module inférieur ou égal à 1 : $|z_i| \leq 1$. Pour retrouver le critère de Routh-Hurwitz, le changement de variable suivant est appliqué² :

$$z = \frac{w + 1}{w - 1}$$

Ce qui donne pour le dénominateur :

$$D(w) = \left(\frac{1}{(w - 1)^4}\right) \cdot (c_4 \cdot w^4 + c_3 \cdot w^3 + c_2 \cdot w^2 + c_1 \cdot w + c_0) \quad (D.7)$$

Ce nouveau dénominateur D.7 doit avoir des racines à partie réelle négative. Ceci permet d'appliquer le critère de Routh sur les coefficients c_i :

$$\begin{aligned} c_4 &= -Ad \cdot B_h \cdot (\tau_m - \tau_p) \cdot (1 - E_h) \cdot (1 - E_p) \cdot (1 - E_m) \\ &\quad - Af \cdot K \cdot \tau_p \cdot (E_m - E_p) \cdot T_{ech} \cdot (1 - E_h) \\ c_3 &= -Ad \cdot B_h \cdot (\tau_m - \tau_p) \cdot (2 * (-E_h - E_p - E_m + 2 + E_h * E_p * E_m)) \\ &\quad - 2Af \cdot K \cdot \tau_p \cdot (E_m - E_p) \cdot (2 \cdot T_{ech} \cdot E_h - \tau_h \cdot (1 - E_h) - T) \\ c_2 &= -2Ad \cdot B_h \cdot (\tau_m - \tau_p) \cdot (3 - E_h \cdot E_p - E_h \cdot E_m - E_p \cdot E_m) \\ &\quad - 6Af \cdot K \cdot \tau_p \cdot (E_m - E_p) \cdot (-T_{ech} \cdot E_h + \tau_h \cdot (1 - E_h)) \\ c_1 &= -2Ad \cdot B_h \cdot (\tau_m - \tau_p) \cdot (2 + E_h + E_p + E_m - E_h \cdot E_p \cdot E_m) \\ &\quad - 2Af \cdot K \cdot \tau_p \cdot (E_m - E_p) \cdot (T_{ech} \cdot (2 \cdot E_h + 1) - 3 \cdot \tau_h \cdot (1 - E_h)) \\ c_0 &= -Ad \cdot B_h \cdot (\tau_m - \tau_p) \cdot (1 + E_h) \cdot (1 + E_p) \cdot (1 + E_m) \\ &\quad - Af \cdot K \cdot \tau_p \cdot (E_m - E_p) \cdot (-T_{ech} \cdot E_h + \tau_h \cdot (1 - E_h) - T + \tau_h \cdot (1 - E_h)) \end{aligned}$$

2. [Ogata 1987]

Le polynôme étant d'ordre 4, le tableau défini précédemment donne :

$$\begin{vmatrix} c_4 & c_2 & c_0 \\ c_3 & c_1 & 0 \\ c_2 - \frac{c_4 c_1}{c_3} & c_0 & 0 \\ c_1 - \frac{c_3 c_0}{c_4 c_1} & 0 & 0 \\ c_2 - \frac{c_4 c_1}{c_3} & & \\ c_0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Les conditions sont donc dans ce cas :

$$\begin{aligned} \text{Si } c_4 > 0 &\implies \forall i \ c_i > 0 \\ &c_2 - \frac{c_4 c_1}{c_3} > 0 \\ &c_1 - \frac{c_3 c_0}{c_4 c_1} > 0 \\ &c_2 - \frac{c_4 c_1}{c_3} > 0 \end{aligned}$$

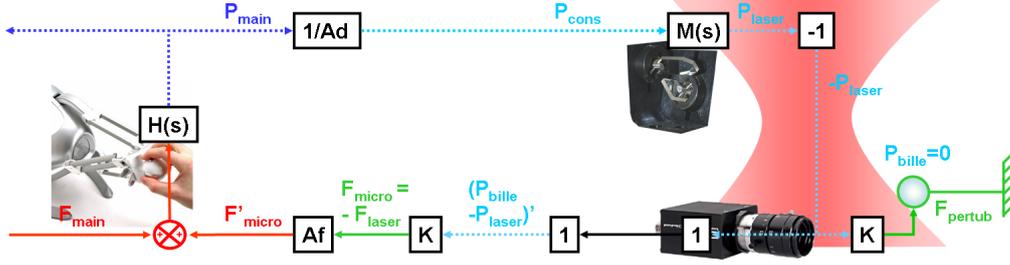


FIGURE D.3 – Cas le plus défavorable ou mode contraint : l'objet est contraint la position immobile par les force d'adhésion ou un mur.

D.2 Mode contraint

Le système est en mode contraint lorsque les mouvements de la bille piégée sont totalement bloqués par un obstacle ou une adhésion. La bille reste immobile malgré les mouvements imposés par le laser. Ainsi la force mesurée est la résistance de l'obstacle ou la force d'adhésion dans la limite du domaine linéaire de la raideur du piège. C'est le cas le plus contraignant, car les forces en jeu sont élevées, la viscosité du milieu ne joue plus son rôle d'amortisseur.

D.2.1 Régime continu

De même que pour le mode libre, la fonction de transfert en mode contraint donne :

$$\begin{aligned}
 FTBF_{\text{contraint}}(s) &= \frac{H(s)}{1 + \frac{-Af}{Ad} \cdot K \cdot M(s) \cdot H(s)} \\
 &= \frac{\frac{1/B_h}{s \cdot (\tau_h \cdot s + 1)}}{1 + \frac{Af}{Ad} \cdot K \cdot \frac{1}{(s \cdot \tau_m + 1)} \cdot \frac{1/B_h}{s \cdot (\tau_h \cdot s + 1)}} \\
 &= \frac{Ad(\tau_m \cdot s + 1)}{Ad \cdot B_h \cdot s \cdot (\tau_m \cdot s + 1)(\tau_h \cdot s + 1) + Af \cdot K} \\
 &= \frac{Ad(\tau_m \cdot s + 1)}{(a'_3 \cdot s^3 + a'_2 \cdot s^2 + a'_1 \cdot s + a'_0)} \tag{D.8}
 \end{aligned}$$

où

$$a'_0 = Af \cdot K \tag{D.9}$$

$$a'_1 = Ad \cdot B_h \tag{D.10}$$

$$a'_2 = Ad \cdot B_h \cdot (\tau_h + \tau_m) \tag{D.11}$$

$$a'_3 = Ad \cdot B_h \cdot \tau_h \cdot \tau_m \tag{D.12}$$

Le critère de Routh-Hurwitz définit le tableau suivant à partir du polynôme d'ordre 3 du dénominateur :

$$\begin{vmatrix} a'_3 & a'_1 & 0 \\ a'_2 & a'_0 & 0 \\ a'_1 - \frac{a'_3 a'_0}{a'_2} & 0 & 0 \\ a'_0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Les conditions sont ici :

$$\begin{aligned} a'_3 > 0 &\implies a'_2 > 0 \\ & a'_1 > 0 \\ & a'_0 > 0 \\ & a'_1 - \frac{a'_3 a'_0}{a'_2} > 0 \end{aligned}$$

Ces inégalités donnent une condition nécessaire et suffisante sur Af :

$$Af < Af_{max} = \frac{Ad \cdot B_h}{K} \frac{\tau_h + \tau_m}{\tau_h \cdot \tau_m} \quad (\text{D.13})$$

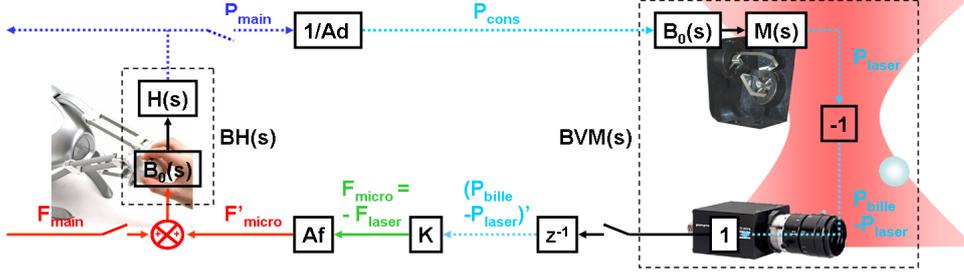


FIGURE D.4 – Modèle de la boucle haptique échantillonnée en mode contraint

D.2.2 Régime échantillonné

En mode contraint, $BH(z)$ n'est pas modifié. Par contre, $BMV(z)$ devient $BM(z)$:

$$\begin{aligned}
 BM(z) &= Z[B_0(s) \cdot M(s) \cdot (-1)] \\
 &= \frac{z-1}{z} \cdot Z\left[\frac{-1}{s \cdot (\tau_m \cdot s + 1)}\right] \\
 &= \frac{E_m - 1}{z \cdot (z - E_m)}
 \end{aligned} \tag{D.14}$$

La boucle fermée échantillonnée donne donc :

$$\begin{aligned}
 FTBFE_{contraint}(z) &= \frac{B_h(z)}{1 - Af/Ad \cdot K \cdot z^{-1} \cdot B_h(z) \cdot BM(z)} \\
 &= \frac{\frac{1}{B_h} \cdot \frac{T_{ech} \cdot (z - E_h) - \tau_h \cdot (1 - E_h) \cdot (z-1)}{(z-1)(z-E_h)}}{1 - Af/Ad \cdot K \cdot z^{-1} \cdot \frac{1}{B_h} \cdot \frac{T_{ech} \cdot (z - E_h) - \tau_h \cdot (1 - E_h) \cdot (z-1)}{(z-1)(z-E_h)} \cdot \frac{E_m - 1}{z \cdot (z - E_m)}} \\
 &= \frac{Num'(z)}{Den'(z)}
 \end{aligned} \tag{D.15}$$

$$\begin{aligned}
 Num'(z) &= (T_{ech} \cdot (z - E_h) - \tau_h \cdot (1 - E_h) \cdot (z - 1)) \cdot Ad \cdot z \cdot (E_m - z) \\
 Den'(z) &= b'_4 \cdot z^4 + b'_3 \cdot z^3 + b'_2 \cdot z^2 + b'_1 \cdot z + b'_0
 \end{aligned}$$

Les coefficients b'_i du dénominateur donnent :

$$\begin{aligned}
 b'_0 &= -Af \cdot K \cdot (E_m - 1) \cdot (-T_{ech} \cdot E_h + \tau_h \cdot (1 - E_h)) \\
 b'_1 &= Af \cdot K \cdot (E_m - 1) \cdot (T_{ech} - \tau_h \cdot (1 - E_h)) + Ad \cdot B_h \cdot E_h \cdot E_m \\
 b'_2 &= -Ad \cdot B_h (E_h + E_m + E_h \cdot E_m) \\
 b'_3 &= Ad \cdot B_h \cdot (1 + E_h + E_m) \\
 b'_4 &= -Ad \cdot B_h
 \end{aligned}$$

La même transformation de z à w est appliquée, le polynôme suivant est alors obtenu :

$$Den'(w) = \left(\frac{1}{(w-1)^4}\right) \cdot (c'_4 \cdot w^4 + c'_3 \cdot w^3 + c'_2 \cdot w^2 + c'_1 \cdot w + c'_0) \tag{D.16}$$

Les coefficients c'_i de ce dénominateur sont :

$$c'_0 = Af \cdot K \cdot (E_m - 1) \cdot (-T_{ech} - T_{ech} \cdot E_h + 2\tau_h \cdot (1 - E_h)) - 2Ad \cdot B_h \cdot (E_h + E_m + E_h \cdot E_m)$$

$$c'_1 = Af \cdot K \cdot (E_m - 1) \cdot (3T_{ech} + 5T_{ech} \cdot E_h - 8\tau_h \cdot (1 - E_h)) + 2Ad \cdot B_h \cdot (1 - 2E_h - 2E_m)$$

$$c'_2 = Af \cdot K \cdot (E_m - 1) \cdot (3T_{ech} + 5T_{ech} \cdot E_h - 8\tau_h \cdot (1 - E_h)) + 2Ad \cdot B_h \cdot (1 - 2E_h - 2E_m)$$

$$c'_3 = Af \cdot K \cdot (E_m - 1) \cdot (-2T_{ech} + 10T_{ech} \cdot E_h - 8\tau_h \cdot (1 - E_h)) + 4Ad \cdot B_h \cdot (3 + E_h + E_m)$$

$$c'_4 = Af \cdot K \cdot (E_m - 1) \cdot (T_{ech} - T_{ech} \cdot E_h)$$

Le polynôme étant d'ordre 4, le tableau défini précédemment donne :

$$\begin{vmatrix} c'_4 & c'_2 & c'_0 \\ c'_3 & c'_1 & 0 \\ c'_2 - \frac{c'_4 c'_1}{c'_3} & c'_0 & 0 \\ c'_1 - \frac{c'_3 c'_0}{c'_4 c'_1} & 0 & 0 \\ c'_2 - \frac{c'_4 c'_1}{c'_3} & & \\ c'_0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Les conditions sont donc dans ce cas :

$$\begin{aligned} \text{Si } c'_4 > 0 \quad \implies \quad & \forall i \ c'_i > 0 \\ & c'_2 - \frac{c'_4 c'_1}{c'_3} > 0 \\ & c'_1 - \frac{c'_3 c'_0}{c'_4 c'_1} > 0 \\ & c'_2 - \frac{c'_4 c'_1}{c'_3} > 0 \end{aligned}$$

Les inégalités obtenues ne fournissent pas de critère analytique lisible comme pour le régime continu. Les performances sont évaluées à partir d'applications numériques basées sur l'expérience (voir section 3.2.1)) ou à partir de l'incrémentation des différents paramètres (voir section 3.3).

Bibliographie

- [Allen 1969] R. D. Allen, G. B. David et G. Nomarski. *The zeiss-Nomarski differential interference equipment for transmitted-light microscopy*. Z Wiss Mikrosk, vol. 69, no. 4, pages 193–221, Nov 1969. (Cité en page 50.)
- [Allersma 1998] M. W. Allersma, F. Gittes, M. J. deCastro, R. J. Stewart et C. F. Schmidt. *Two-dimensional tracking of ncd motility by back focal plane interferometry*. Biophys J, vol. 74, no. 2 Pt 1, pages 1074–1085, Feb 1998. (Cité en page 50.)
- [Andersen 2009] K. N. Andersen, D. H. Petersen, K. Carlson, K. Molhave, O. Sardan, A. Horsewell, V. Eichhorn, S. Fatikow et P. Boggild. *Multimodal Electrothermal Silicon Microgrippers for Nanotube Manipulation*. IEEE Transactions on Nanotechnology, vol. 8, no. 1, pages 76–85, 2009. (Cité en page 11.)
- [Ando 2001] N. Ando, P. Korondi et H. Hashimoto. *Development of micromanipulator and haptic interface for networked micromanipulation*. vol. 6, no. 4, pages 417–427, 2001. (Cité en page 10.)
- [Arai 2000] F. Arai, M. Ogawa et T. Fukuda. *Indirect manipulation and bilateral control of the microbe by the laser manipulated microtools*. In Intelligent Robots and Systems, 2000. (IROS 2000). Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on, volume 1, pages 665–670, 2000. (Cité en pages 16 et 19.)
- [Arai 2006] F. Arai, T. Endo, R. Yamuchi et T. Fukuda. *3D 6DOF manipulation of micro-object using laser trapped microtool*. In Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation ICRA 2006, pages 1390–1395, 2006. (Cité en page 41.)
- [Ashkin 1970] A. Ashkin. *Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure*. Physical Review Letters, vol. 24, no. 4, page 156, Janvier 1970. (Cité en page 33.)
- [Ashkin 1971] A. Ashkin. *Optical Levitation by Radiation Pressure*. Applied Physics Letters, vol. 19, no. 8, page 283, 1971. (Cité en page 33.)
- [Ashkin 1977] A. Ashkin et J. M. Dziedzic. *Observation of Resonances in the Radiation Pressure on Dielectric Spheres*. Physical Review Letters, vol. 38, no. 23, page 1351, 1977. (Cité en page 33.)
- [Ashkin 1980] A. Ashkin. *Applications of Laser Radiation Pressure*. Science, vol. 210, no. 4474, pages 1081–1088, Décembre 1980. (Cité en page 33.)
- [Ashkin 1986] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm et Steven Chu. *Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles*. Optics Letters, vol. 11, no. 5, pages 288–290, Mai 1986. (Cité en pages 12 et 34.)
- [Ashkin 1992] A. Ashkin. *Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime*. Biophysical Journal, vol. 61, no. 2, pages 569–582, F vrier 1992. PMID : 19431818 PMCID : 1260270. (Cité en page 34.)
- [Ashkin 2000] A. Ashkin. *History of optical trapping and manipulation of small-neutral particle, atoms, and molecules*. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum

- Electronics, vol. 6, no. 6, pages 841–856, Décembre 2000. (Cité en pages 32 et 34.)
- [Bakker Schut 1991] Tom C. Bakker Schut, Gerlo Hesselink, Bart G. Grooth de et Jan Greve. *Experimental and theoretical investigations on the validity of the geometrical optics model for calculating the stability of optical traps*. Cytometry Part A, vol. 12, no. 6, pages 479–485, 1991. (Cité en page 118.)
- [Balland 2005] Martial Balland, Alain Richert et François Gallet. *The dissipative contribution of myosin II in the cytoskeleton dynamics of myoblasts*. European Biophysics Journal, vol. 34, pages 255–261, 2005. 10.1007/s00249-004-0447-7. (Cité en page 42.)
- [Barton 1997] J. P. Barton. *Electromagnetic-field calculations for a sphere illuminated by a higher-order Gaussian beam. I. Internal and near-field effects*. Appl Opt, vol. 36, no. 6, pages 1303–1311, Feb 1997. (Cité en page 37.)
- [Benosman 2011] R. Benosman, S. Ieng, C. Posch et P. Rogister. *Asynchronous Event-based Hebbian Epipolar Geometry*. IEEE Transactions on Neural Networks, 2011. (Cité en page 110.)
- [Berg-Sorensen 2004] Kirstine Berg-Sorensen et Henrik Flyvbjerg. *Power spectrum analysis for optical tweezers*. Review of Scientific Instruments, vol. 75, no. 3, pages 594–612, 2004. (Cité en pages 59 et 116.)
- [Block 1990] S.M. Block. Optical tweezers : a new tool for biophysics, volume 9 of *Modern Cell Biology*, chapitre 15, pages 375–401. Wiley-Liss, New York, 1990. (Cité en page 44.)
- [Bolopion 2008] Aude Bolopion, Barthélemy Cagneau, Sinan D. Haliyo et Stéphane Régnier. *Analysis of stability and transparency for nanoscale force feedback in bilateral coupling*. Journal of Micro - Nano Mechatronics, vol. 4, no. 4, pages 145–158, 2008. (Cité en pages 8, 9, 10, 14, 18, 27 et 86.)
- [Bolopion 2009] A. Bolopion, B. Cagneau et S. Regnier. *2D micro teleoperation with force feedback*. In Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems IROS 2009, pages 3265–3270, 2009. (Cité en pages 15, 18 et 24.)
- [Bolopion 2010] A. Bolopion, H. Xie, D. S. Haliyo et S. Regnier. *Haptic Teleoperation for 3-D Microassembly of Spherical Objects*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, no. 99, pages 1–12, 2010. Early Access. (Cité en pages 15, 18 et 24.)
- [Bosseboeuf 2006] Alain Bosseboeuf, Lionnel Buchaillot, Nicolas Chaillet, Dominique Collard, Pascal Fouillat, Katia Grenier, Xavier Grison, Anne-Marie Gue, Jean-Louis Leclercq, Bruno Le Pioufle, Pascal Nouet, Francis Pressecq, Gilbert Reyne et Jean-Louis Viovy. *Rapport de prospective sur les micro et nano systèmes*. Rapport technique, 2006. (Cité en page 20.)
- [Boukhnifer 2004] M. Boukhnifer, A. Ferreira et J.-G. Fontaine. *Scaled teleoperation controller design for micromanipulation over Internet*. In Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on, volume 5, pages 4577 – 4583 Vol.5, april-1 may 2004. (Cité en page 10.)

- [Boukhniifer 2006] Moussa Boukhniifer et Antoine Ferreira. *Wave-based passive control for transparent micro-teleoperation system*. Robotics and Autonomous Systems, vol. 54, no. 7, pages 601 – 615, 2006. (Cité en page 10.)
- [Bowman 2010] Richard Bowman, Graham Gibson et Miles Padgett. *Particle tracking stereomicroscopy in optical tweezers : control of trap shape*. Opt Express, vol. 18, no. 11, pages 11785–11790, May 2010. (Cité en pages 53, 102, 103 et 104.)
- [Bowman 2011] R. W. Bowman, G. Gibson, D. Carberry, L. Picco, Mervyn Miles et M. J. Padgett. *iTweezers : optical micromanipulation controlled by an Apple iPad*. Journal of Optics, vol. 13, no. 4, page 044002, April 2011. (Cité en pages 57 et 104.)
- [Bukusoglu 2008] Ibrahim Bukusoglu, Cagatay Basdogan, Alper Kiraz et Adnan Kurt. *Haptic manipulation of microspheres using optical tweezers under the guidance of artificial force fields*. Presence : Teleoper. Virtual Environ., vol. 17, no. 4, pages 344–364, 2008. (Cité en pages 17 et 19.)
- [Campion 2005] G. Champion, Qi Wang et V. Hayward. *The Pantograph Mk-II : a haptic instrument*. In Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS 2005), pages 193–198, 2005. (Cité en page 112.)
- [Capitanio 2002] M. Capitanio, G. Romano, R. Ballerini, M. Giuntini, F. S. Pavone, D. Dunlap et L. Finzi. *Calibration of optical tweezers with differential interference contrast signals*. Review of Scientific Instruments, vol. 73, no. 4, pages 1687–1696, 2002. (Cité en page 40.)
- [Carberry 2010] D. M. Carberry, S. H. Simpson, J. A. Grieve, Y. Wang, H. Schäfer, M. Steinhart, R. Bowman, G. M. Gibson, M. J. Padgett, S. Hanna et M. J. Miles. *Calibration of optically trapped nanotools*. Nanotechnology, vol. 21, no. 17, page 175501, Apr 2010. (Cité en page 52.)
- [Carter 2005] Brian C Carter, George T Shubeita et Steven P Gross. *Tracking single particles : a user-friendly quantitative evaluation*. Phys Biol, vol. 2, no. 1, pages 60–72, Mar 2005. (Cité en page 51.)
- [Chang 2009] R. Chang, S.H. Ieng et R. Benosman. *Auto-Organized Visual Perception Using Distributed Camera Network*. vol. 57, no. 11, pages 1075–1082, November 2009. (Cité en page 110.)
- [Cheezum 2001] M. K. Cheezum, W. F. Walker et W. H. Guilford. *Quantitative comparison of algorithms for tracking single fluorescent particles*. Biophys J, vol. 81, no. 4, pages 2378–2388, Oct 2001. (Cité en page 51.)
- [Cheong 2010] Fook Chiong Cheong, Bhaskar Jyoti Krishnatreya et David G. Grier. *Strategies for three-dimensional particle tracking with holographic video microscopy*. Opt. Express, vol. 18, no. 13, pages 13563–13573, Jun 2010. (Cité en page 102.)
- [Chu 1986] Steven Chu, J. E. Bjorkholm, A. Ashkin et A. Cable. *Experimental Observation of Optically Trapped Atoms*. Physical Review Letters, vol. 57, no. 3, page 314, 1986. (Cité en page 34.)

- [Conradt 2009] J. Conradt, R. Berner, M. Cook et T. Delbruck. *An embedded AER dynamic vision sensor for low-latency pole balancing*. In Proc. IEEE 12th Int Computer Vision Workshops (ICCV Workshops) Conf, pages 780–785, 2009. (Cité en page 107.)
- [Crocker 1996] John C. Crocker et David G. Grier. *Methods of Digital Video Microscopy for Colloidal Studies*. Journal of Colloid and Interface Science, vol. 179, no. 1, pages 298 – 310, 1996. (Cité en pages 51 et 115.)
- [Curtis 2002] Jennifer E. Curtis, Brian A. Koss et David G. Grier. *Dynamic holographic optical tweezers*. Optics Communications, vol. 207, no. 1-6, pages 169 – 175, 2002. (Cité en page 47.)
- [Dam 2008] Jeppe S. Dam, Ivan R. Perch-Nielsen, Darwin Palima et Jesper Glückstad. *Three-dimensional imaging in three-dimensional optical multi-beam micromanipulation*. Opt. Express, vol. 16, no. 10, pages 7244–7250, May 2008. (Cité en page 102.)
- [de Vries 2005] Anthony H.B. de Vries, Bea E. Krenn, Roel van Driel et Johannes S. Kanger. *Micro Magnetic Tweezers for Nanomanipulation Inside Live Cells*. Biophysical Journal, vol. 88, no. 3, pages 2137 – 2144, 2005. (Cité en page 12.)
- [Delbruck 2007] T. Delbruck et P. Lichtsteiner. *Fast sensory motor control based on event-based hybrid neuromorphic-procedural system*. In Proc. IEEE Int. Symp. Circuits and Systems ISCAS 2007, pages 845–848, 2007. (Cité en page 107.)
- [Denk 1990] Winfried Denk et Watt W. Webb. *Optical measurement of picometer displacements of transparent microscopic objects*. Appl. Opt., vol. 29, no. 16, pages 2382–2391, Jun 1990. (Cité en pages 43, 50 et 54.)
- [Dieulesaint 1997] Eugène Dieulesaint et Daniel Royer. Automatique appliquée, tome 1 : Systèmes linéaires de commande   signaux analogiques. Masson, 1997. (Cité en pages 80 et 134.)
- [Diolaiti 2006] N. Diolaiti, G. Niemeyer, F. Barbagli et J. K. Salisbury. *Stability of Haptic Rendering : Discretization, Quantization, Time Delay, and Coulomb Effects*. vol. 22, no. 2, pages 256–268, 2006. (Cité en pages 71, 72 et 79.)
- [Dionnet 2004] F. Dionnet, S. Haliyo et S. Régnier. *Autonomous Manipulation using a new strategy of accurate release by rolling*. In Actes de ICRA'04 : IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 5019–5024, La Nouvelle Orléans, Etats-Unis, Mai 2004. (Cité en page 24.)
- [Fu 2008] Zhengming Fu, T. Delbruck, P. Lichtsteiner et E. Culurciello. *An Address-Event Fall Detector for Assisted Living Applications*. vol. 2, no. 2, pages 88–96, 2008. (Cité en page 107.)
- [Gauthier 1995] R. C. Gauthier et S. Wallace. *Optical levitation of spheres : analytical development and numerical computations of the force equations*. Journal of the Optical Society of America B, vol. 12, no. 9, pages 1680–1686, 1995. (Cité en page 36.)
- [Gauthier 2008] M. Gauthier, P. Lambert et S. Regnier. Micropr hension et stratégies de micromanipulation, chapitre 3, pages 211 – 277. Systèmes automatis s. Regnier, S. and Chaillet, N., 2008. (Cité en page 7.)

- [Ghislain 1994] Lucien P. Ghislain, Neil A. Switz et Watt W. Webb. *Measurement of small forces using an optical trap*. Review of Scientific Instruments, vol. 65, no. 9, pages 2762–2768, 1994. (Cité en page 50.)
- [Gibson 2007] Graham Gibson, Louise Barron, Fiona Beck, Graeme Whyte et Miles Padgett. *Optically controlled grippers for manipulating micron-sized particles*. New Journal of Physics, vol. 9, no. 1, page 14, 2007. (Cité en page 57.)
- [Gibson 2008] Graham M. Gibson, Jonathan Leach, Stephen Keen, Amanda J. Wright et Miles J. Padgett. *Measuring the accuracy of particle position and force in optical tweezers using high-speed video microscopy*. Optics Express, vol. 16, no. 19, pages 14561–14570, 2008. (Cité en pages 41, 54, 57, 103 et 104.)
- [Gordon 1980] J. P. Gordon et A. Ashkin. *Motion of atoms in a radiation trap*. Physical Review A, vol. 21, no. 5, page 1606, Mai 1980. (Cité en page 34.)
- [Gosline 2006] Andrew H. Gosline, Gianni Campion et Vincent Hayward. *On the use of eddy current brakes as tunable, fast turn-on viscous dampers for haptic rendering*. In In Proceedings of Eurohaptics, pages 229–234. press, 2006. (Cité en page 121.)
- [Gosline 2007] Andrew H. C. Gosline et Vincent Hayward. *Time-Domain Passivity Control of Haptic Interfaces with Tunable Damping Hardware*. In Proceedings of the Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pages 164–179, Washington, DC, USA, 2007. IEEE Computer Society. (Cité en pages 26 et 98.)
- [Gosse 2002] Charlie Gosse et Vincent Croquette. *Magnetic tweezers : micromanipulation and force measurement at the molecular level*. Biophys J, vol. 82, no. 6, pages 3314–3329, Jun 2002. (Cité en pages 12 et 52.)
- [Grieve 2009] J. A. Grieve, A. Ulcinas, S. Subramanian, G. M. Gibson, M. J. Padgett, D. M. Carberry et M. J. Miles. *Hands-on with optical tweezers : a multitouch interface for holographic optical trapping*. Optics Express, vol. 17, no. 5, pages 3595–3602, Mars 2009. (Cité en page 57.)
- [Guthold 2000] M. Guthold, M. R. Falvo, W. G. Matthews, S. Paulson, S. Washburn, D. A. Erie, R. Superfine, Jr. Brooks F. P. et II. Taylor R. M. *Controlled manipulation of molecular samples with the nanoManipulator*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 5, no. 2, pages 189–198, 2000. (Cité en pages 13 et 18.)
- [Gutiérrez-Medina 2010] Braulio Gutiérrez-Medina, Johan O.L. Andreasson, William J. Greenleaf, Arthur LaPorta et Steven M. Block. *An Optical Apparatus for Rotation and Trapping*. In Nils G. Walter, éditeur, Single Molecule Tools, Part B : Super-Resolution, Particle Tracking, Multiparameter, and Force Based Methods, volume 475 of *Methods in Enzymology*, pages 377 – 404. Academic Press, 2010. (Cité en pages 17 et 27.)
- [Haliyo 2004] S. Haliyo, S. Régnier et J.C. Guinot. *Micro-manipulation using adhesion forces and dynamical effects*. In Actes de IFToMM’03 : the 11th World Congress in Mechanism and Machine Science, pages 1405–1410, Tianjin, Chine, Avril 2004. (Cité en page 24.)

- [Happel 1981] Brenner H. Happel J. *Low reynolds number hydrodynamics*. Springer, 1981. (Cité en pages 39 et 75.)
- [Huang 2011] Rongxin Huang, Isaac Chavez, Katja M. Taute, Branimir Lukic, Sylvia Jeney, Mark G. Raizen et Ernst-Ludwig Florin. *Direct observation of the full transition from ballistic to diffusive Brownian motion in a liquid*. *Nat Phys*, vol. advance online publication, Mars 2011. (Cité en page 115.)
- [Ikin 2009] L Ikin, D M Carberry, G M Gibson, M J Padgett et M J Miles. *Assembly and force measurement with SPM-like probes in holographic optical tweezers*. *New Journal of Physics*, vol. 11, no. 2, page 023012, 2009. (Cité en pages 41, 52, 103 et 104.)
- [Kamimura 1987] Shinji Kamimura. *Direct measurement of nanometric displacement under an optical microscope*. *Appl. Opt.*, vol. 26, no. 16, pages 3425–3427, Aug 1987. (Cité en page 50.)
- [Kaneko 1998] K. Kaneko, H. Tokashiki, K. Tanie et K. Komoriya. *Macro-micro bilateral teleoperation based on operational force feedforward-operational force feedforward bilateral teleoperation and its dexterity*. In *Proc. Conf. IEEE/RSJ Int Intelligent Robots and Systems*, volume 3, pages 1761–1769, 1998. (Cité en page 7.)
- [Keen 2007] S. Keen, J. Leach, G. Gibson et M.J. Padgett. *Comparison of a high-speed camera and a quadrant detector for measuring displacements in optical tweezers*. *Journal of Optics A : Pure and Applied Optics*, vol. 9, pages S264–S266, Ao t 2007. (Cité en pages 52, 54 et 57.)
- [Khan 2009a] S. Khan et A. Sabanovic. *Hybrid vision/force feedback control for pushing micro-objects*. In *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems IROS 2009*, pages 577–582, 2009. (Cité en page 26.)
- [Khan 2009b] S. Khan, A. Sabanovic et A. O. Nergiz. *Scaled Bilateral Teleoperation Using Discrete-Time Sliding-Mode Controller*. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 9, pages 3609–3618, 2009. (Cité en page 10.)
- [Khan 2010] Shahzad Khan, Ton De Boer, Pablo Estevez, Hans H. Langen et Rob H. Munnig Schmidt. *Development of haptic microgripper for microassembly operation*. In *Proceedings of the 2010 international conference on Haptics - generating and perceiving tangible sensations : Part II, EuroHaptics’10*, pages 309–314, Berlin, Heidelberg, 2010. Springer-Verlag. (Cité en pages 13, 18 et 26.)
- [König 1996] K. König, Y. Tadir, P. Patrizio, M. W. Berns et B. J. Tromberg. *Effects of ultraviolet exposure and near infrared laser tweezers on human spermatozoa*. *Hum Reprod*, vol. 11, no. 10, pages 2162–2164, Oct 1996. (Cité en page 38.)
- [Kress 2004] Holger Kress, Ernst H. K. Stelzer et Alexander Rohrbach. *Tilt angle dependent three-dimensional-position detection of a trapped cylindrical particle in a focused laser beam*. *Applied Physics Letters*, vol. 84, no. 21, pages 4271–4273, 2004. (Cité en page 12.)
- [Kuchenbecker 2003] Katherine J. Kuchenbecker, June Gyu Park et G nter Niemeyer. *Characterizing the Human Wrist for Improved Haptic Interaction*. *ASME Confe-*

- rence Proceedings, vol. 2003, no. 37130, pages 591–598, 2003. (Cité en pages 76 et 84.)
- [Lambert 2006] Pierre Lambert et Stephane Regnier. *Surface and contact forces models within the framework of microassembly*. Journal of Micromechatronics, vol. 3, pages 123–157(35), June 2006. (Cité en page 7.)
- [Lawrence 1993] D.A. Lawrence. *Stability and transparency in bilateral teleoperation*. In Robotics and Automation, IEEE Transactions on, volume 9, pages 624–637, Oct 1993. (Cité en pages 10, 23 et 86.)
- [Leach 2006] Jonathan Leach, Kurt Wulff, Gavin Sinclair, Pamela Jordan, Johannes Courtial, Laura Thomson, Graham Gibson, Kayode Karunwi, Jon Cooper, Zsolt John Laczik et Miles Padgett. *Interactive approach to optical tweezers control*. Appl Opt, vol. 45, no. 5, pages 897–903, Feb 2006. (Cité en page 57.)
- [Lebedev 1901] Pyotr Nikolayevich Lebedev. *Untersuchungen  ber die Druckkr fte des Lichtes [The Experimental Study of the Pressure of Light]*. Annalen der Physik, vol. 6, no. 11, pages 433–458, 1901. (Cité en page 32.)
- [Lee 2007] Song-Woo Lee, Takhee Lee et Yong-Gu Lee. *Stable manipulating of nanowires by line optical tweezers with haptic feedback*. In Kishan Dholakia et Gabriel C. Spalding,  diteurs, Optical Trapping and Optical Micromanipulation IV, volume 6644, pages 66441X–12, San Diego, CA, USA, 2007. SPIE. (Cité en pages 16 et 19.)
- [Letier 2003] P. Letier, T. Saive et I. Burda. *Interface Haptique pour Nanomanipulateur AFM*. In 6th National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, May 2003. (Cité en page 26.)
- [Li 2004] Guangyong Li, Ning Xi, Mengmeng Yu et Wai-Keung Fung. *Development of augmented reality system for AFM-based nanomanipulation*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 9, no. 2, pages 358–365, 2004. (Cité en page 16.)
- [Liang 1996] H. Liang, K. T. Vu, P. Krishnan, T. C. Trang, D. Shin, S. Kimel et M. W. Berns. *Wavelength dependence of cell cloning efficiency after optical trapping*. Biophys J, vol. 70, no. 3, pages 1529–1533, Mar 1996. (Cité en page 37.)
- [Lichtsteiner 2005] P. Lichtsteiner et T. Delbruck. *A 64x64 aer logarithmic temporal derivative silicon retina*. In Proc. PhD Research in Microelectronics and Electronics, volume 2, pages 202–205, 2005. (Cité en page 54.)
- [Lichtsteiner 2006] P. Lichtsteiner, C. Posch et T. Delbruck. *A 128 X 128 120db 30mw asynchronous vision sensor that responds to relative intensity change*. In Proc. Digest of Technical Papers. IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. ISSCC 2006, pages 2060–2069, 2006. (Cité en pages 53, 107 et 108.)
- [Litzenberger 2006] M. Litzenberger, A. N. Belbachir, N. Donath, G. Gritsch, H. Garn, B. Kohn, C. Posch et S. Schraml. *Estimation of Vehicle Speed Based on Asynchronous Data from a Silicon Retina Optical Sensor*. In Proc. IEEE Intelligent Transportation Systems Conf. ITSC '06, pages 653–658, 2006. (Cité en page 107.)

- [Llewellyn 1952] F. B. Llewellyn. *Some Fundamental Properties of Transmission Systems*. Proceedings of the IRE, vol. 40, no. 3, pages 271–283, 1952. (Cité en page 10.)
- [Mangeol 2006] P. Mangeol, D. Côte, T. Bizebard, O. Legrand et U. Bockelmann. *Probing DNA and RNA single molecules with a double optical tweezer*. The European Physical Journal E : Soft Matter and Biological Physics, vol. 19, pages 311–317, 2006. 10.1140/epje/i2005-10060-4. (Cité en page 47.)
- [Mao 2010] Xiaole Mao, Zackary I. Stratton, Ahmad Ahsan Nawaz, Sz-Chin Steven Lin et Tony Jun Huang. *Optofluidic tunable microlens by manipulating the liquid meniscus using a flared microfluidic structure*. Biomicrofluidics, vol. 4, no. 4, page 043007, 2010. (Cité en page 38.)
- [Martin 2009] Steven Martin et Nick Hillier. *Characterisation of the Novint Falcon Haptic Device for Application as a Robot Manipulator*. In Australasian Conference on Robotics and Automation. Australian Robot Association Inc., December 2009. (Cité en pages 72 et 98.)
- [Maruyama 2007] H. Maruyama, F. Arai et T. Fukuda. *Gel-tool Sensor Positioned by Optical Tweezers for Local pH Measurement in a Microchip*. In Proc. IEEE Int Robotics and Automation Conf, pages 806–811, 2007. (Cité en page 41.)
- [Micaelli 2002] A. Micaelli. Asservissements et lois de couplage en téléopération, pages 169–198. Herm s Science Publications, November 2002. (Cité en pages 10 et 73.)
- [Millet 2008] Guillaume Millet, Anatole L cuyer, Jean-Marie Burkhardt, D. Sinan Haliyo et Stéphane Régnier. *Improving Perception and Understanding of Nanoscale Phenomena Using Haptics and Visual Analogy*. In Proceedings of the 6th international conference on Haptics : Perception, Devices and Scenarios, EuroHaptics '08, pages 847–856, Berlin, Heidelberg, 2008. Springer-Verlag. (Cité en page 13.)
- [Millet 2009] Guillaume Millet, Sinan Haliyo, Stephane Regnier et Vincent Hayward. *The ultimate haptic device : First step*. In Proceedings of the World Haptics 2009 - Third Joint EuroHaptics conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pages 273–278, Washington, DC, USA, 2009. IEEE Computer Society. (Cité en page 26.)
- [Minsky 1990] Margaret Minsky, Ouh-young Ming, Oliver Steele, Frederick P. Brooks Jr. et Max Behensky. *Feeling and seeing : issues in force display*. SIGGRAPH Comput. Graph., vol. 24, pages 235–241, February 1990. (Cité en page 71.)
- [Neuman 1999] K. C. Neuman, E. H. Chadd, G. F. Liou, K. Bergman et S. M. Block. *Characterization of photodamage to Escherichia coli in optical traps*. Biophys J, vol. 77, no. 5, pages 2856–2863, Nov 1999. (Cité en page 37.)
- [Neuman 2004] Keir C Neuman et Steven M Block. *Optical trapping*. The Review of Scientific Instruments, vol. 75, no. 9, pages 2787–2809, 2004. (Cité en pages 36, 37, 39 et 69.)

- [Neuman 2008] Keir C Neuman et Attila Nagy. *Single-molecule force spectroscopy : optical tweezers, magnetic tweezers and atomic force microscopy*. Nature Methods, vol. 5, no. 6, pages 491–505, Juin 2008. PMID : 18511917. (Cité en pages 28 et 29.)
- [Nichols 1901] E. F. Nichols et G. F. Hull. *A Preliminary Communication on the Pressure of Heat and Light Radiation*. Phys. Rev., vol. 13, pages 307–320, 1901. (Cité en page 32.)
- [Ogata 1987] Katsuhiko Ogata. *Discrete-time control systems*. Prentice-Hall, 1987. (Cité en page 138.)
- [Onal 2007] C. D. Onal, C. Pawashe et M. Sitti. *A scaled bilateral control system for experimental 1-D teleoperated nanomanipulation applications*. In Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems IROS 2007, pages 483–488, 2007. (Cité en pages 9 et 10.)
- [Otto 2008] Oliver Otto, Christof Gutsche, Friedrich Kremer et Ulrich F. Keyser. *Optical tweezers with 2.5kHz bandwidth video detection for single-colloid electrophoresis*. Review of Scientific Instruments, vol. 79, page 023710, 2008. (Cité en page 52.)
- [Otto 2010] Oliver Otto, Fabian Czerwinski, Joanne L Gornall, Gunter Stober, Lene B Oddershede, Ralf Seidel et Ulrich F Keyser. *Real-time particle tracking at 10,000 fps using optical fiber illumination*. Opt Express, vol. 18, no. 22, pages 22722–22733, Oct 2010. (Cité en pages 52, 54, 103 et 104.)
- [Pacoret 2009] Cécile Pacoret, Richard Bowman, Graham Gibson, Sinan Haliyo, David Carberry, Arvid Bergander, Stéphane Régnier et Miles Padgett. *Touching the microworld with force-feedback optical tweezers*. Optics Express, vol. 17, no. 12, pages 10259–10264, 2009. (Cité en pages 44, 56, 58 et 104.)
- [Par  2002] Michel Par , Heather Carnahan et Allan Smith. *Magnitude estimation of tangential force applied to the fingerpad*. Experimental Brain Research, vol. 142, pages 342–348, 2002. 10.1007/s00221-001-0939-y. (Cité en page 112.)
- [Pralle 1999] A. Pralle, M. Prummer, E. L. Florin, E. H. Stelzer et J. K. H rber. *Three-dimensional high-resolution particle tracking for optical tweezers by forward scattered light*. Microsc Res Tech, vol. 44, no. 5, pages 378–386, Mar 1999. (Cité en page 51.)
- [Preece 2009] Daryl Preece, Richard Bowman, Anna Linnenberger, Graham Gibson, Steven Serati et Miles Padgett. *Increasing trap stiffness with position clamping in holographic optical tweezers*. Opt Express, vol. 17, no. 25, pages 22718–22725, Dec 2009. (Cité en pages 56, 103, 104 et 120.)
- [Ranaweera 2004] Aruna Ranaweera. *Investigations with Optical Tweezers : Construction, Identification, and Control*. PhD thesis, UNIVERSITY OF CALIFORNIA Santa Barbara, Septembre 2004. (Cité en pages 37, 49 et 69.)
- [Ranaweera 2005] A. Ranaweera et B. Bamieh. *Modelling, identification, and control of a spherical particle trapped in an optical tweezer*. International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 15, no. 16, pages 747–768, 2005. (Cité en page 55.)

- [Régnier 2008] S. Régnier et N. Chaillet. La microrobotique - applications à la micro-manipulation. Systèmes automatisés. 2008. (Cité en pages 12 et 125.)
- [Reimann 2005] Peter Reimann et Mykhaylo Evstigneev. *Description of atomic friction as forced Brownian motion*. New Journal of Physics, vol. 7, no. 1, page 25, 2005. (Cité en page 8.)
- [Reinhart 2000] G. Reinhart et J. Hoepfner. *Non-Contact Handling Using High-Intensity Ultrasonics*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 49, no. 1, pages 5 – 8, 2000. (Cité en page 12.)
- [Ren 1996] K. F. Ren, G. Gr ?han et G. Gouesbet. *Prediction of reverse radiation pressure by generalized Lorenz-Mie theory*. Applied Optics, vol. 35, no. 15, pages 2702–2710, Mai 1996. (Cité en page 36.)
- [Rodrigo 2005] Peter John Rodrigo, Lauge Gammelgaard, Peter Bøggild, Ivan Perch-Nielsen et Jesper Glückstad. *Actuation of microfabricated tools using multiple GPC-based counterpropagating-beam traps*. Optic Express, vol. 13, no. 18, pages 6899–6904, Sep 2005. (Cité en page 41.)
- [Rodrigo 2009] Peter John Rodrigo, Lóránd Kelemen, Darwin Palima, Carlo Amadeo Alonzo, Pál Ormos et Jesper Glückstad. *Optical microassembly platform for constructing reconfigurable microenvironments for biomedical studies*. Opt Express, vol. 17, no. 8, pages 6578–6583, Apr 2009. (Cité en pages 31 et 41.)
- [Rohner 2007] Johann Rohner. *Light structuring for massively parallel optical trapping*. PhD thesis, Lausanne, 2007. (Cité en pages 38 et 47.)
- [Rohrbach 2002] Alexander Rohrbach et Ernst H. K. Stelzer. *Three-dimensional position detection of optically trapped dielectric particles*. Journal of Applied Physics, vol. 91, no. 8, pages 5474–5488, 2002. (Cité en pages 51 et 54.)
- [Rohrbach 2005] Alexander Rohrbach. *Stiffness of Optical Traps : Quantitative Agreement between Experiment and Electromagnetic Theory*. Physical Review Letters, vol. 95, no. 16, page 168102, Octobre 2005. (Cité en page 36.)
- [Sacconi 2005] Leonardo Sacconi, Iva M. Tolic-Nørrelykke, Chiara Stringari, Renzo Antolini et Francesco S. Pavone. *Optical micromanipulations inside yeast cells*. Appl. Opt., vol. 44, no. 11, pages 2001–2007, Apr 2005. (Cité en page 42.)
- [Sasaki 1991] K. Sasaki, M. Koshioka, H. Misawa, N. Kitamura et H. Masuhara. *Pattern formation and flow control of fine particles by laser-scanning micromanipulation*. Opt Lett, vol. 16, no. 19, pages 1463–1465, Oct 1991. (Cité en page 44.)
- [Saunter 2007] C. D. Saunter et G. D. Love. *Low-cost high-speed control for adaptive optics*. volume 6711, page 671107. SPIE, 2007. (Cité en page 104.)
- [Schut 1991] Tom C. Bakker Schut, Gerlo Hesseling, Bart G. de Grooth et Jan Greve. *Experimental and Theoretical Investigations on the Validity of the Geometrical Optics Model for Calculating the Stability of Optical Traps*. Cytometry, vol. 12479, no. 485, 1991. (Cité en page 36.)
- [Shirinov 2003] A. Shirinov et S. Fatikow. *Haptic interface for a Microrobot Cell*. In Eurohaptics, pages 68–79, 2003. (Cité en page 26.)

- [Shvedov 2010] Vladlen G. Shvedov, Andrei V. Rode, Yana V. Izdebskaya, Anton S. Desyatnikov, Wieslaw Krolikowski et Yuri S. Kivshar. *Giant Optical Manipulation*. Phys. Rev. Lett., vol. 105, no. 11, page 118103, Sep 2010. (Cité en page 11.)
- [Simmons 1996] R Simmons, J Finer, S Chu et J Spudich. *Quantitative measurements of force and displacement using an optical trap*. Biophysical Journal, vol. 70, no. 4, pages 1813–1822, 1996. (Cité en pages 50, 54, 55 et 69.)
- [Smith 1999] Stephen P. Smith, Sameer R. Bhalotra, Anne L. Brody, Benjamin L. Brown, Edward K. Boyda et Mara Prentiss. *Inexpensive optical tweezers for undergraduate laboratories*. American Journal of Physics, vol. 67, no. 1, pages 26–35, 1999. (Cité en page 36.)
- [Speich 2005] John E. Speich, Liang Shao et Michael Goldfarb. *Modeling the human hand as it interacts with a telemanipulation system*. Mechatronics, vol. 15, no. 9, pages 1127 – 1142, 2005. (Cité en page 84.)
- [Squires 2005] Todd M. Squires et Stephen R. Quake. *Microfluidics : Fluid physics at the nanoliter scale*. Rev. Mod. Phys., vol. 77, no. 3, page 977, Oct 2005. (Cité en page 12.)
- [Stout 1997] Andrea L. Stout et Watt W. Webb. *Chapter 6 Optical Force Microscopy*. volume 55 of *Methods in Cell Biology*, pages 99 – 116. Academic Press, 1997. (Cité en page 49.)
- [Sugiura 2008] Tadao Sugiura, Megumi Nakao, Tetsuo Sato et Kotaro Minato. *Nanomanipulation and nanotechnology for future diagnostics*. Studies in Health Technology and Informatics, vol. 134, pages 135–142, 2008. PMID : 18376041. (Cité en pages 16 et 19.)
- [Summers 2008] M. D. Summers, D. R. Burnham et D. McGloin. *Trapping solid aerosols with optical tweezers : a comparison between gas and liquid phase optical traps*. Opt Express, vol. 16, no. 11, pages 7739–7747, May 2008. (Cité en page 38.)
- [Svoboda 1994] K Svoboda et S M Block. *Biological applications of optical forces*. Annual Review of Biophysics and Biomolecular Structure, vol. 23, pages 247–285, 1994. PMID : 7919782. (Cité en pages 36 et 69.)
- [Tan 1994] Hong Tan, J. Radcliffe, Book No. Ga, Hong Z. Tan, Brian Eberman, Mandayam A. Srinivasan et Belinda Cheng. *Human Factors For The Design Of Force-Reflecting Haptic Interfaces*. 1994. (Cité en page 89.)
- [Theofanidou 2004] Eirini Theofanidou, Laurence Wilson, William J. Hossack et Jochen Arlt. *Spherical aberration correction for optical tweezers*. Optics Communications, vol. 236, no. 1-3, pages 145 – 150, 2004. (Cité en page 38.)
- [Towrie 2009] M. Towrie, S. W. Botchway, A. Clark, E. Freeman, R. Halsall, A. W. Parker, M. Prydderch, R. Turchetta, A. D. Ward et M. R. Pollard. *Dynamic position and force measurement for multiple optically trapped particles using a high-speed active pixel sensor*. Review of Scientific Instruments, vol. 80, no. 10, page 103704, 2009. (Cité en page 52.)

- [Valentine 2008] Megan T Valentine, Nicholas R Guydosh, Braulio Gutiérrez-Medina, Adrian N Fehr, Johan O Andreasson et Steven M Block. *Precision steering of an optical trap by electro-optic deflection*. *Opt Lett*, vol. 33, no. 6, pages 599–601, Mar 2008. (Cité en page 46.)
- [van West 2007] Ewoud van West, Akio Yamamoto et Toshiro Higuchi. *The concept of "Haptic Tweezer", a non-contact object handling system using levitation techniques and haptics*. *Mechatronics*, vol. 17, no. 7, pages 345–356, Septembre 2007. (Cité en pages 16, 17 et 19.)
- [Vander Poorten 2008] E. Vander Poorten, T. Kanno et Y. Yokokohji. *Robust variable-scale bilateral control for micro teleoperation*. In *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*, pages 655–662, may 2008. (Cité en page 10.)
- [Venant 2010] Nicolas Venant, Antoine Niguès, Florence Marchi, Michal Hrouzek, Fabio Comin, Joël Chevrier et Jean-Loup Florens. *Multi-sensorial interface for 3D teleoperations at micro and nanoscale*. In *Proceedings of the 2010 international conference on Haptics : generating and perceiving tangible sensations, Part I, EuroHaptics'10*, pages 35–42, Berlin, Heidelberg, 2010. Springer-Verlag. (Cité en pages 14, 18 et 26.)
- [Vijayasai 2010] Ashwin P Vijayasai, Ganapathy Sivakumar, Matthew Mulsow, Shelby Lacouture, Alex Holness et Tim E Dallas. *Haptic controlled three-axis MEMS gripper system*. *Rev Sci Instrum*, vol. 81, no. 10, page 105114, Oct 2010. (Cité en pages 6, 13 et 18.)
- [Visscher 1996] K. Visscher, S. P. Gross et S. M. Block. *Construction of multiple-beam optical traps with nanometer-resolution position sensing*. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 2, no. 4, pages 1066–1076, 1996. (Cité en pages 46 et 47.)
- [Visscher 1998] K. Visscher et S. M. Block. *Versatile optical traps with feedback control*. *Methods Enzymol*, vol. 298, pages 460–489, 1998. (Cité en page 55.)
- [Vogl 2006] W. Vogl, Bernice Kai-Lam Ma et M. Sitti. *Augmented reality user interface for an atomic force microscope-based nanorobotic system*. vol. 5, no. 4, pages 397–406, 2006. (Cité en page 16.)
- [Wang 1997] Xiao-Bo Wang, Ying Huang, P. R. C. Gascoyne et F. F. Becker. *Dielectrophoretic manipulation of particles*. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, no. 3, pages 660–669, 1997. (Cité en page 12.)
- [Whyte 2006] Graeme Whyte, Graham Gibson, Jonathan Leach, Miles Padgett, Daniel Robert et Mervyn Miles. *An optical trapped microhand for manipulating micron-sized objects*. *Optics Express*, vol. 14, no. 25, pages 12497–12502, Décembre 2006. (Cité en page 57.)
- [Woodside 2008] Michael T Woodside, Cuauhtémoc García-García et Steven M Block. *Folding and unfolding single RNA molecules under tension*. *Curr Opin Chem Biol*, vol. 12, no. 6, pages 640–646, Dec 2008. (Cité en page 42.)

- [Wright 1994] W. H. Wright, G. J. Sonek et M. W. Berns. *Parametric study of the forces on microspheres held by optical tweezers*. Applied Optics, vol. 33, no. 9, pages 1735–1748, Mars 1994. (Cité en page 36.)
- [Xie 2008] Hui Xie, J. Vitard, S. Haliyo et S. Regnier. *Calibration and nonlinearity compensation for force application in AFM based nanomanipulation*. In Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems IROS 2008, pages 4024–4029, 2008. (Cité en page 12.)
- [Yao 2010] Hsin-Yun Yao et Vincent Hayward. *Design and analysis of a recoil-type vibrotactile transducer*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 128, no. 2, pages 619–627, 2010. (Cité en page 113.)
- [Yokokohji 1994] Y. Yokokohji, N. Hosotani et T. Yoshikawa. *Analysis of maneuverability and stability of micro-teleoperation systems*. In Proc. Conf. IEEE Int Robotics and Automation, pages 237–243, 1994. (Cité en page 9.)
- [Yoon 2008] Young-Zoon Yoon, Jurij Kotar, Gilwon Yoon et Pietro Cicuti. *The nonlinear mechanical response of the red blood cell*. Physical Biology, vol. 5, no. 3, page 036007, 2008. (Cité en page 42.)

Liste de publications

Revue internationale avec comité de lecture :

1. **C. Pacoret**, R. Bowman, G. Gibson, S. Haliyo, D. Carberry , A. Bergander, S. Régnier et M. Padgett
Touching the microworld with force-feedback optical tweezer.
Optic Express, vol 17, no 12, page 10260, 2009

Communications avec actes (conférences internationales) :

2. Z. Ni, **C. Pacoret**, R. Benosman, S. Ieng, et S. Régnier
Asynchronous Event Based High Speed Vision for Micro-particles Tracking
A paraître dans Journal of Microscopy
3. **C. Pacoret**, A. Bergander, S. Régnier
Haptic feedback of piconewton interactions with optical tweezers.
Proceeding EuroHaptics'10
Proceedings of the 2010 international conference on Haptics - generating and perceiving tangible sensations : Part II
4. R. Bowman, **C. Pacoret**, S. Haliyo, S. Régnier, G. Gibson et M. Padgett
High-Speed Camera Particle Tracking and Force Measurement, with Real-Time Haptic Feedback.
Optical Trapping Application (OTA)
Vancouver, Canada, April 30, 2009
5. **C. Pacoret**, R. Bowman, G. Gibson, S. Haliyo, A. Bergander, D. Carberry, S. Régnier et M. Padgett
Sensing interactions in the microworld with optical tweezers.
Proceedings of SPIE Volume 7400, Optical Trapping and Optical Micromanipulation VI
San Diego, California, United States, 2-6 August, 2009
6. E. Vela, **C. Pacoret**, S. Bouchigny, S. Régnier, K. Rink, A. Bergander
Non-contact Mesoscale Manipulation Using Laser Induced Convection.
2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems
Acropolis Convention Center, Nice, France, September 22-26, 2008.

