



Interactions Multi-Échelles

Sinan Haliyo

► To cite this version:

Sinan Haliyo. Interactions Multi-Échelles. Robotique [cs.RO]. Sorbonne Université, 2019. tel-03073919

HAL Id: tel-03073919

<https://hal.sorbonne-universite.fr/tel-03073919>

Submitted on 16 Dec 2020

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

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

Habilitation à Diriger des Recherches



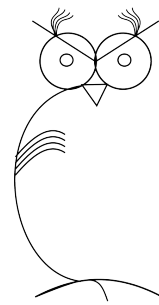
Interactions Multi-Échelles

Présenté par

Doğan Sinan HALIYO

le Six Décembre Deux Mille Dix-Neuf, devant le jury composé de :

Nicolas Chaillet	Prof, U. Franche-Comté	Rapporteur
Christian Duriez	DR, INRIA Lille	Rapporteur
Florence Marchi	MCF HDR, U. Grenoble	Rapporteuse
Jean-Camille Chassaing	Prof, Sorbonne U.	Examineur
Moustapha Hafez	DR, CEA-LIST	Examineur
Vincent Hayward	Prof, Sorbonne U.	Examineur
Anatole Lécuyer	DR, INRIA Rennes	Examineur
Stéphane Régnier	Prof, Sorbonne U.	Examineur



À mon père, Izak Haliyo

REMERCIEMENTS

Ce manuscrit marque nos 20 ans de collaboration avec Stéphane Régnier, qui a été un encadrant, chef, mentor, collègue, ami, camarade, confident, et encore. Merci infiniment pour ton soutien et ta confiance inébranlables depuis tout ce temps.

Je suis aussi très reconnaissant envers Vincent Hayward, dont la force intellectuelle rayonne sur tous ceux qui le côtoient. Ces travaux lui doivent beaucoup.

Des remerciements spéciaux aussi à Jean-Claude Guinot, qui m'a fait monter sur les planches, et à Philippe Bidaud qui a longtemps été le régisseur de la scène, de LRP à l'ISIR.

Les travaux décrits dans ce manuscrit sont les fruits d'un travail d'équipe de longue haleine, faits d'échanges scientifiques mais surtout de camaraderie. Tout d'abord merci aux anciens, en espérant que je n'en oublie pas : Yves, Fabien, Julien, Max, Hui, Gentiane, Mehdi, Aude, Guillaume, Bruno, Soukeyna, Laura, Puco, Ahlem, Tianming, Munan, Tian-tian, Zhenjiang, Gilgueng, Abdenbi, Cécile, Alberto, Ali, Olivier, Antoine, Olga, Shuai et Justine ; et bien sûr ceux qui sont encore là pour quelque temps : Edison, Sophia, Georges, Johan, Jonathan, Ahmad, Quentin, Benoit, Flavien, Florent, Basil, Thomas, Élodie et Hoang. Vous êtes tous super, sincèrement. Le peloton de tête de ma troupe est formé des collègues brillants : Barthélémy, Jean, Mokrane, Gilles et Yvonne. Merci pour vos contributions, votre passion et aussi pour votre amitié.

Mes parents, Emel et Izak Haliyo m'ont témoigné le plus grand soutien à chaque instant, même quand je leur ai annoncé à mes 17 ans que je partais à 3000km de la maison pour longtemps. Leurs traces sont dans tout ce que j'entreprends et leur fierté est ma plus grande récompense.

Mes plus tendres remerciements à Sòn, la co-auteure de notre meilleure publication, Ky-Lân. Merci pour ton affection, ta patience et plein d'autres choses.

Table des matières

Table des matières	iii
Table des figures	v
Introduction Générale	1
I Toucher le micromonde	5
1 Télémnipulation aux petites échelles	6
2 Chaîne de téléopération à l'échelle microscopique	8
2.1 Schémas de couplage bilatéraux	9
2.2 Transparence	10
2.3 Stabilité	11
3 Synthèse des contributions	12
3.1 Manipulation sous MEB en Réalité Augmentée	13
3.2 Manipulation haptique à double AFM	14
3.3 Synthèse	15
Références	17
II Microscopie Haptique	21
1 Conception complète d'une chaîne de téléopération	22
1.1 Interface haptique	23
1.2 Capteur de force actif à un ddl	25
1.3 Couplage bilatéral	28
2 Performance de la chaîne à couplage direct	28
2.1 Caractérisation de la stabilité	28
2.2 Caractérisation de la transparence	29
3 Validation du microscope haptique	30
3.1 Plateforme expérimentale	30
3.2 Interaction avec une goutte d'eau	32
3.3 Expériences avec des insectes	34
3.4 Injection des œufs de poisson	34

Table des matières

4	Synthèse & Perspectives	35
4.1	Interface haptique à trois ddl	36
4.2	Capteurs de force actifs	37
	Références	38
III	Étude de l'humain dans la boucle de téléopération	41
1	Retour haptique et téléopération	42
1.1	Guides haptiques pour la micro-téléopération	42
1.2	Évaluation des assistances	43
1.3	La compréhension des phénomènes nanophysiques	45
2	Les Interfaces Humaine/Machine	46
2.1	Adaptation kinesthésique	47
2.2	Colocalisation Visio-Haptique	49
3	Dématérialisation de l'interface utilisateur	53
3.1	Détection d'intention	54
4	Synthèse	56
	Références	58
IV	Illustrations des travaux en cours	61
1	IOTA : Manipulation biologiques par robots optiques	62
2	COLAMIR : Interface intuitive pour le microassemblage	67
3	Synthèse & Perspectives	70
	Références	72
	Conclusion Générale & Perspectives	75
	Annexes	79
	Encadrements de Thèse	81
	Liste de Publications	85
	Journaux internationaux avec comité de lecture (33)	85
	Journaux nationaux avec comité de lecture (3)	87
	Conférences internationales avec actes et relecture (52)	87
	Conférences nationales avec actes et relecture (5)	92
	Chapitres d'ouvrages (2)	92
	Direction d'ouvrages (5)	92
	Conférences Invités Internationales (6)	93
	Brevets (7)	93
	Thèse	94
	Curriculum Vitæ Synthétique	95

Table des figures

I.1	Exemple de téléopération directe.	6
I.2	Exemple de téléopération virtuelle.	7
I.3	Exemple de téléopération augmentée.	7
I.4	Éléments composant une chaîne de micro-téléopération	8
I.5	Schémas de couplage pour la téléopération	9
I.6	Télémanipulateur idéalisé	10
I.7	Caractérisation sous MEB des composants MEMS	13
I.8	Système de téléopération à deux poutres AFM	14
I.9	Construction d'une micropyramide par téléopération	15
II.1	Première conception de l'interface TIMoN	23
II.2	Schéma de commande à deux moteurs et la transmission des efforts	24
II.3	Détails de fonctionnement du capteur actif	26
II.4	La chaîne de microscopie haptique complète	27
II.5	Diagramme de Bode des impédances du schéma de couplage.	30
II.6	Plateforme expérimentale pour la microscopie haptique.	31
II.7	Exploration haptique d'une goutte d'eau.	32
II.8	Expériences de microscopie haptique	33
II.9	Injection d'oeufs de poisson zèbre	34
II.10	l'interface à trois ddl par actionnement à induction	36
II.11	Les capteurs actifs à l'échelle meso- et micro- métrique	37
III.1	Assistance haptique	43
III.2	Évaluation des assistances dans un environnement virtuel	44
III.3	Représentations virtuelles de la sonde AFM	46
III.4	Expérience psychomotrice d'adaptation	48
III.5	Fonctions psychométriques généralisées	49
III.6	Vue d'ensemble de l'interface à câbles et du système d'affichage	50
III.7	Configurations testées	51
III.8	Résultats des questionnaires	52
III.9	Interface naturelle par détection de décisions	54

Table des figures

III.10	Modèle de détection d'intention	55
III.11	Évaluation de la détection d'intention	56
IV.1	Plateforme de manipulation optique	63
IV.2	Exemple de téléopération 3D utilisant 3 groupes de pièges	64
IV.3	Optobot avec un effecteur pour le transport des cellules.	66
IV.4	Pince brucelles augmentée	68
IV.5	Vue d'ensemble de la configuration de la téléopération	69
IV.6	Interface naturelle pour la téléopération du robot de microassemblage	70

INTRODUCTION GÉNÉRALE

CE MANUSCRIT retrace l'avancement de mes activités de recherche depuis mon recrutement en 2004 comme maître de conférences au *Laboratoire de Robotique de Paris*, jusqu'à maintenant où je dirige l'équipe "INTERACTIONS MULTIÉCHELLES", fondée en 2018 à l'*Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique*.

Ma carrière a commencé autour de la problématique de la manipulation des petits objets. En 1999, une petite équipe composée de Stéphane Régnier et de Yves Rollet s'était formée au LRP sous l'impulsion de Jean-Claude Guinot, mon directeur de thèse, avec pour motivation de faire de la robotique aux échelles "d'en-dessous". Il s'agissait en effet d'un positionnement singulier dans le paysage international de la recherche en robotique, parmi les autres équipes s'intéressant à des thématiques de commande et contrôle.

Le développement de nos activités fut au départ compliqué à cerner, entre d'un côté la physique et ses approches théoriques, et de l'autre côté les technologies de microfabrication MEMS en plein essor avec des promesses de machines formidables. Au fil de mes recherches, ce positionnement s'est clarifié pour forger une identité bien définie et occuper une place originale dans le paysage international.

L'équipe INTERACTIONS MULTIÉCHELLES d'aujourd'hui représente un effectif de 25 personnes dont 6 chercheurs permanents dans les trois sections de CNU au cœur de la robotique – 60,61 et 27 – avec des contributions académiques allant de la robotique et des interactions humain/machine, en passant par la biologie, la physique, psychophysique... jusqu'aux arts & design, et des collaborations dans la mouvance "Industrie 4.0" ou des applications médicales.

Le trajet qui m'a mené à la formation de cette équipe suit l'évolution de mon positionnement. Le fil conducteur de mes contributions présentées ici est l'interactivité, essentiellement dans le micromonde. Cet environnement est caractérisé par les dimensions des objets étudiés, en dessous du millimètre, mais aussi par la précision et l'amplitude recherchées des forces et des déplacements en jeu, qui

imposent l'utilisation des préfixes "micro" et "nano".

Le travail aux petites échelles apparaît dans l'assemblage en masse des produits microélectroniques, des CPUs aux téléphones portables. Il apparaît aussi dans les tâches en petites séries : en horlogerie, orfèvrerie ou la nouvelle génération des appareils très spécialisés à base de capteurs MOEMS, ainsi que dans la caractérisation et la manipulation des échantillons principalement pour la recherche, en physique ou biologie.

L'assemblage et production en masse représente aujourd'hui un marché de plusieurs milliards de dollars, avec des machines spécifiquement dédiées à un produit précis. Leur coût prohibitif est néanmoins en accord avec le volume du marché, et leur conception et réalisation sont plutôt du domaine de la productique que de la robotique.

À l'inverse, le microassemblage "artisanal" et l'instrumentation scientifique travaillent dans des conditions peu répétables avec un appui fort sur les compétences et savoir-faire d'un opérateur. L'intérêt d'une automatisation complète est faible face au besoin de flexibilité des outils. Des grandes lacunes existent à la fois dans l'offre technologique pour agir et récolter des données des micro-échelles, et à la fois dans les interfaces humain/machine dédiées, qui amènent l'utilisation de ces outils à la portée d'un utilisateur final.

Cette constatation m'a motivé pour orienter mes travaux vers les applications interactives où la robotique a pour vocation d'inspirer de nouvelles solutions efficaces. Le besoin d'un côté est technologique, en proposant des dispositifs capables d'interagir avec des micro-objets avec une précision mécanique adéquate, et de l'autre côté est l'interactivité, en fournissant à l'opérateur des moyens de commande et de perception adaptés.

Mes contributions touchent ces deux besoins de la microrobotique. Toutefois, j'ai de plus en plus privilégié l'interactivité dans mes activités car il s'agit là d'une contrainte majeure qui doit être prise en compte dès la conception technologique de l'outil effecteur. S'intéresser à l'interactivité nécessite forcément de s'intéresser à l'humain. Par conséquent, cette étude a connu une expansion forte dans mes centres d'intérêt pour dépasser aujourd'hui le cadre de la microrobotique. Mes activités récentes se préoccupent aussi bien de la perception, de l'haptique et des interfaces homme/machine que de la robotique. La place centrale de l'humain dans ces domaines est aussi la clef de voûte de l'équipe INTERACTIONS MULTIÉCHELLES.

Pour composer ce manuscrit, j'ai donc décidé de privilégier les travaux qui explicitent ce cadrage, de la téléopération vers l'étude de l'humain à travers une série de contributions. Les détails techniques sont allégés au profit de la clarté et plusieurs encadrements ou collaborations sont omis pour fluidifier la lecture.

Mes travaux de thèse se focalisaient sur la micromanipulation par adhésion, avec un pan expérimental conséquent. Le système produit dans ce cadre était d'une certaine complexité et une réflexion sur son utilisabilité par un opérateur naïf s'est imposée rapidement .

La première approche adoptée pour répondre à ce questionnement est la *téléopération*. Le chapitre I décrit cette approche dont nous avons exploré l'usage transéchelle dans plusieurs thèses. Une stratégie de la synthèse de schéma de commande a été identifiée.

Une extension de cette approche a trouvé son expression dans la *microscopie haptique*, décrite au chapitre II. Il s'agit de s'intéresser à la conception de l'intégralité d'une chaîne de téléopération, dans la quête d'une transparence haptique ultime avec pour objectif de ramener les interactions spécifiques des échelles microscopiques à la portée de main de l'utilisateur. Plusieurs applications ont démontré la validité de cette approche, notamment l'injection biologique et le ressenti des forces surfaciques .

La place centrale de *l'humain* dans cette démarche s'est affirmée par un intérêt grandissant envers le système sensorimoteur. Son étude a permis de proposer et de valider des nouveaux dispositifs ou des modes d'interaction et a aussi contribué à une meilleure compréhension de certains mécanismes sensoriels. Cette démarche fait l'objet du chapitre 3.

Le dernier chapitre esquisse le contour de mes travaux en cours, en les illustrant à travers deux projets labellisés par l'ANR : **IOTA** que je coordonne, porte sur les pinces optiques interactives, et **COLAMIR** explore le devenir de l'atelier de microassemblage.

Une liste des travaux de thèse sur lesquels je suis intervenu est donné en annexe de ce document, avec une liste complète de mes publications et un curriculum vitae-synthétique.

CHAPITRE I

TOUCHER LE MICROMONDE

LA TÉLÉOPÉRATION est une technique robotique pour interagir avec des environnements hostiles, géographiquement distants, virtuels ou inaccessibles à l'humain. Il s'agit de transposer les actions de l'utilisateur dans l'environnement distant, puis, dans un souci d'améliorer les performances de ce dernier, de lui stimuler ses sens avec des informations qui proviennent de cet environnement.

Dans sa forme la plus simple, on peut imaginer un système de transmission purement mécanique par câbles, poulies et engrenages. Des nombreuses réalisations existent depuis l'antiquité. Le dispositif en interaction avec l'opérateur est appelé "maître", tandis que "esclave" désigne le dispositif distant commandé. L'utilisation de la transmission électrique des signaux entre le maître et l'esclave apparaît dès les années 50, dans les travaux dans le domaine du nucléaire qui ont donné naissance à la notion de couplage bilatéral [1]. L'absence de calculateur limitait ces systèmes à reproduire une architecture identique des deux côtés. La démocratisation des ordinateurs, et le développement des méthodes pour lier les espaces articulaires et opérationnels a finalement libéré cette contrainte [2]. Dès lors, plusieurs études se sont intéressées au couplage bilatéral, à la fois d'un point de vue architecture mécanique des instruments, et du point de vue de la transmission électrique des signaux [3, 4].

Cette approche s'applique avantageusement aux cas de la micromanipulation, en considérant le changement d'échelle entre l'environnement de l'opérateur et celui des objets étudiés. Néanmoins, plusieurs particularités apparaissent, d'une part à cause des grandes valeurs des facteurs d'échelle, et d'autre part à cause des différences de comportement mécanique et dans l'équilibre des forces.

Mes travaux ont abordé ces problématiques par différentes approches. La première s'appuie sur la synthèse des schémas de commande de couplage bilatéral.

1 Télémnipulation aux petites échelles

À partir des années 90, plusieurs travaux de téléopération couplent les échelles microscopiques aux échelles macroscopiques pour donner à un opérateur humain une interaction avec le micromonde, réelle ou virtuelle [5-9]. Un retour d'effort est utilisé pour accroître l'interactivité de ces systèmes. Ce retour est rendu nécessaire par le retour visuel réduit à cette échelle. De plus, comme la taille des objets, les forces et les accélérations mises en jeu dans le macromonde sont totalement différentes de celles des échelles microscopiques, des gains homothétiques en position et en force sont ajoutés pour réaliser un couplage bilatéral entre les systèmes maître et esclave.

Selon l'objet considéré à l'échelle microscopique, réel ou virtuel, trois cas de téléopération sont définis : la téléopération directe, virtuelle ou augmentée.

La téléopération directe : Dans les systèmes de téléopération directe l'opérateur agit à l'aide du robot maître sur un robot esclave qui manipule un objet réel. Le robot esclave et l'objet évoluent dans un environnement réel où les efforts mis en jeux sont compris entre quelques centaines de nanoNewtons et quelques centaines de micro-Newtons. Comme ces efforts sont imperceptibles à l'échelle humaine, un schéma de commande bilatérale est implémenté pour les transmettre à l'opérateur avec une amplification importante. Une des premières applications de ce mode de téléopération est la saisie statique et la dépose par roulement de microsphères [10, 11]¹ illustrée dans la figure I.1.

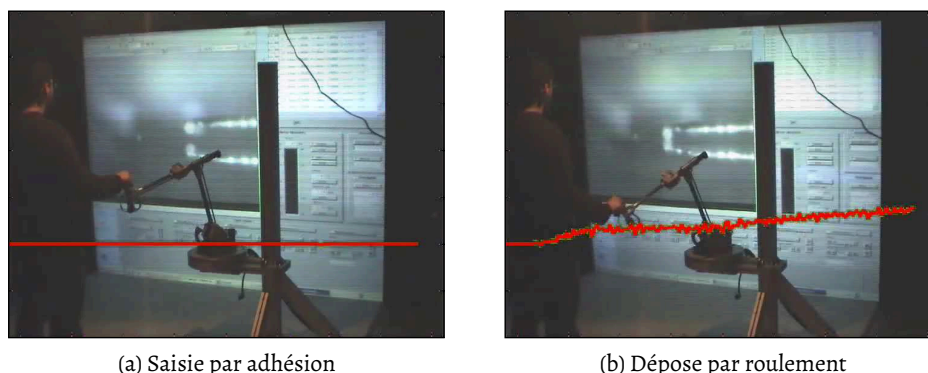


FIGURE I.1 – Exemple de système de téléopération directe utilisé pour la manipulation d'un grain de pollen [11]. Une poutre AFM est utilisée comme préhenseur par adhésion. L'opérateur dépose l'objet saisi en le faisant rouler contre le substrat, grâce au retour haptique (courbe rouge) provenant de l'outil.

1. Les citations soulignées indiquent les publications dont je suis (co)auteur.

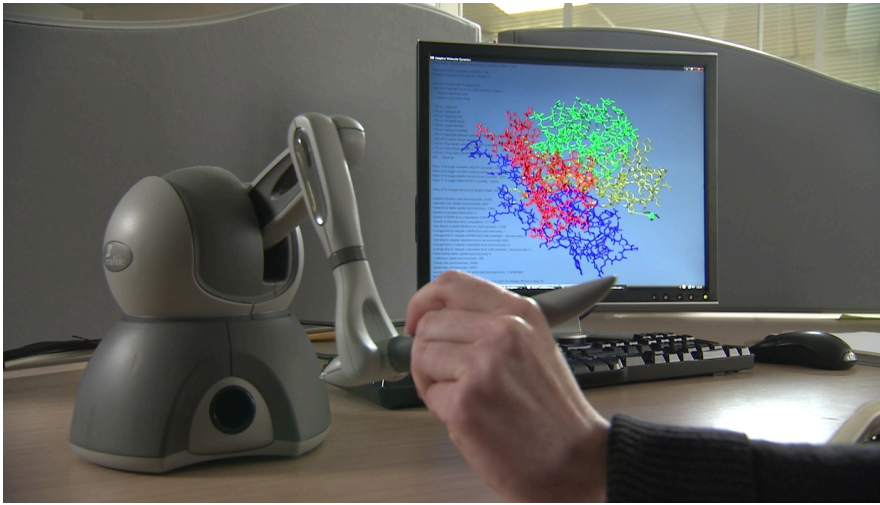
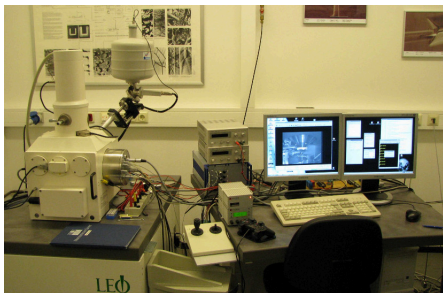


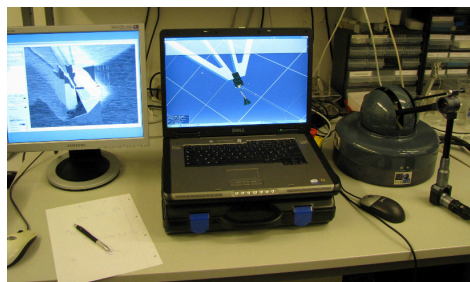
FIGURE I.2 – Exemple de téléopération virtuelle : une interface haptique Phantom est couplée avec le logiciel de simulation moléculaire SAMSON [12]. L'opérateur peut appliquer et ressentir des forces sur les atomes d'une molécule, qui se réorganise pour trouver une conformation stable.

La téléopération virtuelle : L'objet manipulé par l'opérateur et la scène dans laquelle il évolue sont virtuels. L'interaction entre le robot esclave et l'objet s'effectue dans un simulateur (voir figure I.2). Une application classique est la manipulation de molécules, en utilisant par exemple le simulateur SAMSON [12, 13].

La téléopération augmentée : Elle combine les deux solutions de téléopération précédentes. L'opérateur entre en interaction avec un objet dans un environnement vir-



(a) Le MEB et son dispositif de contrôle.



(b) Scène de réalité virtuelle et interface haptique

FIGURE I.3 – Exemple de système de téléopération augmentée [14]. La scène en réalité virtuelle reproduit en temps réel la manipulation des nanotubes de carbone dans un microscope électronique à balayage (MEB)

tuel, qui représente la scène réelle (voir figure I.3). L'intérêt de ce type de téléopération est de donner à l'opérateur accès à des indications qui ne sont pas disponibles directement par la mesure. Ainsi, l'opérateur est assisté lors des tâches où le retour visuel est de mauvaise qualité, voir indisponible. Une illustration classique de ce type de téléopération est la reconstruction d'efforts à partir d'images provenant d'un microscope électronique à balayage (MEB ou SEM, *Scanning Electron Microscope*) dont la fréquence d'acquisition est trop faible pour qu'elles soient exploitées pour le calcul du retour d'effort [14].

2 Chaîne de téléopération à l'échelle microscopique

Le terme "chaîne de téléopération à l'échelle microscopique" désigne un ensemble de deux systèmes -maître et esclave- reliés par un couplage haptique. Ce système donne à l'opérateur la capacité d'interagir avec un environnement microscopique normalement inaccessible à l'humain. En effet, à cette échelle, l'interaction directe avec un objet est impossible de par sa taille, la complexité des champs de forces et la grande sensibilité du système aux conditions environnementales. La figure I.4 illustre les différents éléments composant une chaîne de téléopération directe. L'opérateur manipule un système maître, une **interface haptique** pour contrôler un système esclave, l'**outil**, tout en ressentant les efforts d'interaction qui lui sont appliqués par l'environnement. L'interface haptique et l'outil sont couplés par un schéma bilatéral, qui retranscrit les positions, les vitesses et les efforts macroscopiques en grandeurs microscopiques et réciproquement.

Pour prendre en compte la différence d'échelle, il faut ajouter des coefficients homothétiques, α_f et α_d respectivement coefficients homothétiques en force et déplacement, tels que :

$$\forall t : \begin{cases} f_e(t) &= \alpha_f f_m(t) \\ d_e(t) &= \alpha_d d_m(t) \end{cases}$$

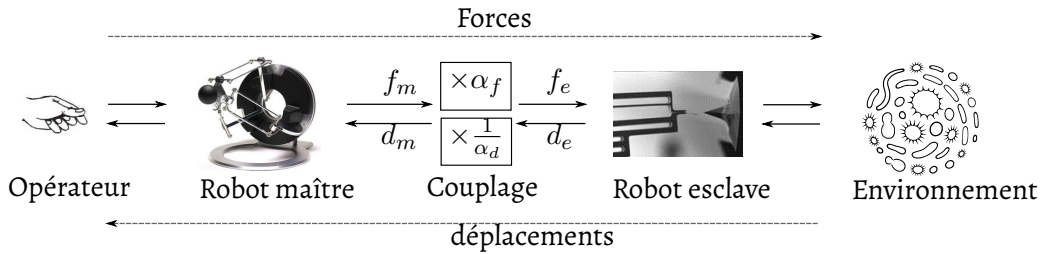


FIGURE I.4 – Éléments composant une chaîne de micro-téléopération et les informations échangées.

Ces schémas de couplage spécifiques à la micromanipulation ont fait l'objet des nombreux travaux dans notre équipe. Notamment, ils font apparaître les notions de transparence et de stabilité d'une chaîne de téléopération.

2.1 Schémas de couplage bilatéraux

Les deux schémas utilisés pour réaliser le couplage haptique, nommés respectivement, couplage à retour d'effort direct (*DFE*, *Direct Force Feedback*, pour des raisons de simplification, dans la suite, ce couplage est appelé couplage direct) et couplage Force-Position (*FP*, dans la suite, ce couplage est appelé couplage indirect)[12, 15] sont représentés sur la figures I.5a et I.5b. Dans les deux cas, l'opérateur applique un déplacement d_m sur l'interface haptique, et ressent en retour un effort f_m . Ceci provient du fait que les interfaces haptiques sont très souvent commandés en mode impédance : elles émettent la position de la poignée et s'attendent à une consigne en force à appliquer à la main de l'opérateur. De même, les dispositifs esclaves sont conçus pour recevoir une consigne en position ou vitesse. La position d_m (ou la vitesse v_m) de la poignée de l'interface haptique est utilisée comme entrée du couplage. La position d_e (ou la vitesse v_e) calculée à travers le schéma de commande est envoyée comme consigne à l'outil microscopique. La force d'interaction environnement outil f_e est une entrée du couplage. Les forces et les mouvements diffèrent de plusieurs ordres de grandeur entre les deux extrémités. Certaines conséquences en découlent :

- la définition de la transparence du couplage haptique prend en considération les coefficients homothétiques α_f et α_d ,
- les critères de stabilité restent inchangés par rapport aux échelles macroscopiques.

Dans le cas du schéma indirect, deux correcteurs $C_1(s)$ et $C_2(s)$ supplémentaires sont utilisés pour modifier la raideur et l'amortissement affichés par

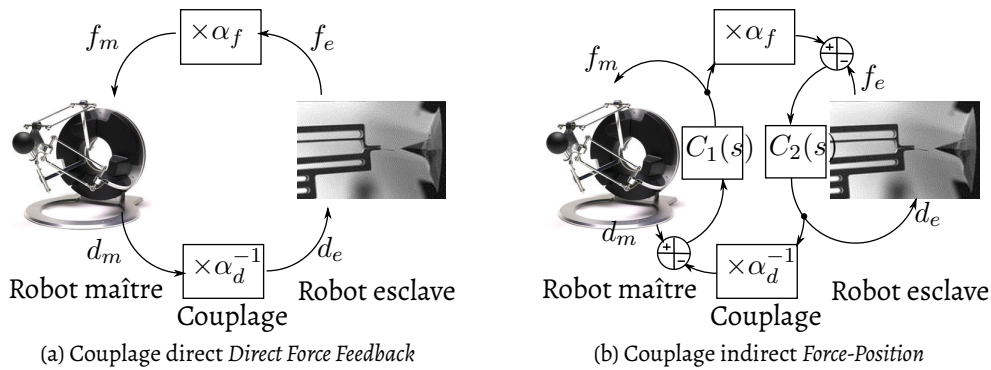


FIGURE I.5 – Schémas de couplage pour la téléopération

l'interface haptique. Pour l'étude des performances de ces schémas, une modélisation par un ensemble de sous-systèmes à deux ports interconnectés est proposée [16]. Cette approche est fondée sur les échanges d'énergie entre les différents éléments illustrés dans les figures I.5a et I.5b. La modélisation se traduit par des matrices d'immittance $\mathbf{P}$ de dimension (2×2) et qui renferment les fonctions de transfert entre les efforts et les vitesses (ou positions) des entrées et sorties [17]. Les différentes matrices possibles sont obtenues en considérant les forces à l'entrée et les déplacements en sortie (*admittance*), les déplacements à l'entrée et les forces en sortie (*impédance*), ou encore *hybride*, établissant une relation croisée entre les forces et les déplacements. Ce formalisme permet une étude analytique de la transparence et de la stabilité.

2.2 Transparence

La transparence traduit le fait que le ressenti de l'opérateur, lors de la manipulation de l'interface haptique, doit être le plus proche possible de celui qu'il aurait s'il manipulait directement l'objet distant. Par conséquent, le système de téléopération idéal pour travailler à distance serait un bâton sans masse et infiniment rigide (voir figure I.6). Comme le bâton n'a pas de masse, la force appliquée par l'environnement est égale à la force appliquée par la main $f_e = f_m$. L'opérateur interagit avec l'objet manipulé à distance comme si le bâton n'existait pas. Autrement, il ne ressent aucune résistance.

Dans le cas d'une chaîne de micro-téléopération, cette notion est définie comme la capacité du couplage haptique à retransmettre fidèlement à l'opérateur les phénomènes propres aux échelles microscopiques [12]. Elle est mesurée en terme d'impédance mécanique et est définie dans [4, 19] comme une comparaison entre l'impédance coté opérateur $Z_m = \frac{f_m}{d_m}$ et celle environnement $Z_e = \frac{f_e}{d_e}$ en prenant en compte les coefficients homothétiques en force α_f et en déplacement α_d . Ainsi, la transparence idéale est atteinte lorsque :

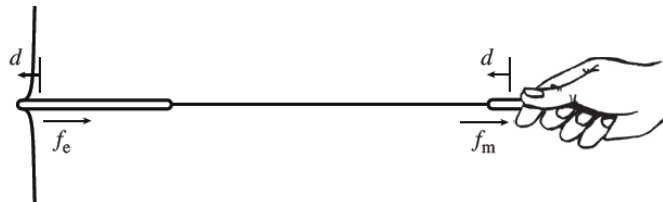


FIGURE I.6 – Télémanipulateur idéalisé (sans masse et infiniment rigide [18]).

$$\alpha_d Z_m = \alpha_f Z_e$$

Cette notion reste une problématique très importante de la téléopération, en particulier à l'échelle microscopique. La retransmission des faibles variations d'effort ou des champs de forces complexes nécessite une grande transparence du schéma de couplage.

2.3 Stabilité

Le second critère majeur de mesure des performances du couplage est la stabilité. C'est une condition nécessaire pour qu'un système de téléopération soit utilisable, car un système instable risque de causer des dommages sur les outils et les objets manipulés. Deux approches existent pour étudier la stabilité d'un système de téléopération : les critères de stabilité et la passivité.

Les critères de stabilité : La stabilité considérée est généralement celle au sens "entrée bornée -> sortie bornée" (EBSB). Un système est dit stable au sens EBSB si pour toute entrée bornée la sortie du système tend vers une limite finie lorsque $t \rightarrow \infty$. Il existe plusieurs critères pour vérifier la stabilité d'un système. Les plus utilisés sont le critère de Nyquist et du revers, appliquées sur la fonction de transfert du système en boucle ouverte. D'autres critères algébriques, comme celui de Routh-Hurwitz ou de Jury peuvent être exploités. Plus de précisions sont données dans [20] pour le cas continu et dans [21] pour le cas discret. Cette approche donne des conditions nécessaires et suffisantes de stabilité mais elle nécessite la connaissance du modèle des interactions entre l'outil et l'environnement.

La passivité : La passivité est l'autre approche utilisée pour garantir la stabilité des couplages haptiques. Par définition, un système est dit passif si et seulement si, il ne génère pas d'énergie. À tout instant t , l'énergie courant du système doit être inférieure à la somme de l'énergie entrant et de l'énergie initiale du système. Il doit donc en perdre ou dissiper. Ceci est vérifié si l'énergie fournie par l'utilisateur n'excède pas celle fournie par le système. La passivité s'applique sans aucune connaissance de l'environnement mais en faisant l'hypothèse que celui-ci est passif. Néanmoins, la conservativité de cette approche fournit des conditions suffisantes de stabilité, mais pas forcément nécessaires. Il existe des solutions pour rendre moins strictes ces conditions de stabilité. Dans ce cas, l'étude se fait en terme de stabilité inconditionnelle dont une condition nécessaire et suffisante est donnée par le critère de Llewellyn [22]. Cette approche est plus stricte que la stabilité puisque aucune hypothèse n'est faite ni sur l'environnement ni sur l'opérateur mis à part le fait qu'ils doivent

être passifs [23]. Il s'agit certes d'une hypothèse forte mais la passivité est considérablement plus facile à analyser.

3 Synthèse des contributions

Les approches d'automatisation complète de la robotique manufacturière visent à éviter toute intervention au cours d'une tâche. À l'inverse, impliquer pleinement l'humain dans le boucle de micromanipulation fut une forte ligne directrice de mes travaux. Un système de micromanipulation robotique avait été mis au point pendant ma thèse, et a longtemps servi de banc expérimental et de validation pour nos études d'interactivité autour des schémas de couplages bilatéraux.

Les premiers travaux menés ont permis de monter qu'il était possible de téléopérer de manière efficace un micropréhenseur à l'aide d'une interface haptique au cours d'une opération complète avec des phases de positionnement, de saisie, de transfert et de dépose. En effet, il s'agit de laisser l'opérateur commander les mouvements du robot dans l'espace et de lui fournir une information haptique pertinente. Les transitions entre les phases, notamment au moment de saisie et de dépose, impactent fortement la réponse et la dynamique de l'esclave, et sont donc une grande source d'instabilité.

Les schémas de commande mentionnés ci-dessus ont été synthétisés en prenant en compte ces contraintes et les particularités de l'application aux petites échelles [15]. Les premières démonstrations ont été conduites avec les grains de pollens de 20 μm de diamètre, dans le cadre de tâches de préhension par adhésion et de dépose par roulement, qui permet aussi de ressentir les forces de pull-off propres aux échelles microscopiques. Cette expérience est illustrée sur la figure I.1

Par la suite, nous avons exploré les limites et avantages des différents schémas de commande, notamment autour de l'antagonisme des notions de transparence et de stabilité. Nos étude a montré que le couplage direct est plus adapté que le couplage indirect pour avoir une très bonne transparence haptique. À l'inverse, le couplage indirect assure une bonne stabilité contrairement au couplage direct qui offre une bonne transparence. Nous en avons déduit, dans un premier temps, une méthodologie qui permet de paramétrer un couplage indirect en garantissant la stabilité et minimisant la perte de transparence [24, 25]. Cette méthodologie a été avantageusement mise en œuvre dans plusieurs cas : la manipulation des objets dans un MEB, par un système à double effecteurs à base d'AFM (*Atomic Force Microscopy*) [26], ou encore la téléopération d'un micromanipulateur similaire située à l'Université d'Oldenburg, en Allemagne par un opérateur à Paris [27]. Ces travaux couvrent les trois cas télé-micromanipulation : directe, virtuelle [28] ou augmentée [29]. Nous allons aborder deux études emblématiques à titre d'exemples.

3.1 Manipulation sous MEB en Réalité Augmentée

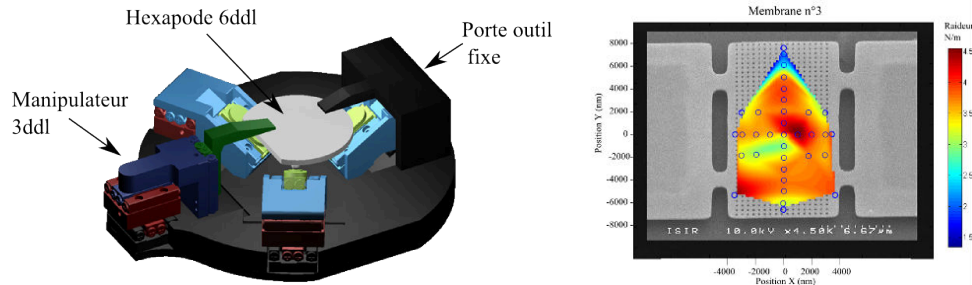


FIGURE I.7 – Caractérisation sous MEB des composants MEMS. Image de gauche, l'interface de commande du système robotique MEB en RV. À droite, cartographie expérimentale de raideur d'un résonateur, obtenue par le robot [30].

Les objets bidimensionnels - feuillets de graphène et de graphite - possèdent un grand potentiel pour les futurs micro ou nanosystèmes. Par exemple, les grandes dynamiques vibratoires laissent présager des capacités uniques de résonance. Un problème majeur apparaît avec la physique du micromonde : leur géométrie bidimensionnelle favorise l'adhésion et la moindre tâche interactive devient d'une complexité extrême. Ainsi, l'étude de leurs propriétés et de leurs caractéristiques physiques nécessite à la fois de maîtriser les phases de manipulations et de transferts ainsi que de posséder les outils nécessaires à leurs observations et à leurs caractérisations.

L'utilisation de la microscopie électronique est indispensable pour l'étude de ces échantillons. Une plateforme robotique interactive est conçue pour cette microscopie. Celle-ci dispose d'un micromanipulateur à 3 axes (3 translations cartésiennes), d'un hexapode (3 translations cartésiennes et 3 rotations) et d'un porte-outil fixe. Elle possède une cinématique complexe avec 9 degrés de liberté auxquels s'ajoutent 5 degrés de liberté supplémentaires pour l'observation (3 translations, 1 rotation et 1 inclinaison). Pour sa téléopération, un environnement virtuel couplé avec des systèmes robotisés permet d'obtenir une image reconstruite en direct de la scène réelle, représentée sur la figure I.7. Des méthodes d'assistance sont implémentées pour la génération des trajectoires et la programmation des tâches répétitives.

Ce système est validé dans le cas de la caractérisation des résonateurs MEMS : il s'agit de membranes en phosphure d'indium (InP) suspendues entre deux piliers. Des cartographies précises en raideur locale sont obtenues par une sonde en diapa-son munie d'une pointe en tungstène et peuvent être exploitées avec des outils de simulation par éléments finis. Ces résultats mettent en évidence les hautes fréquences de résonances de ces membranes de l'ordre du MHz [31].

Ce système accélère considérablement la caractérisation robotique sous SEM. En effet, les échantillons sont des substrats portant un nombre important de résona-

teurs. L'opérateur peut aisément déplacer la sonde entre plusieurs cibles et démarrer un scan automatisé. Les risques d'impact et d'endommagement sont minimisés.

3.2 Manipulation haptique à double AFM

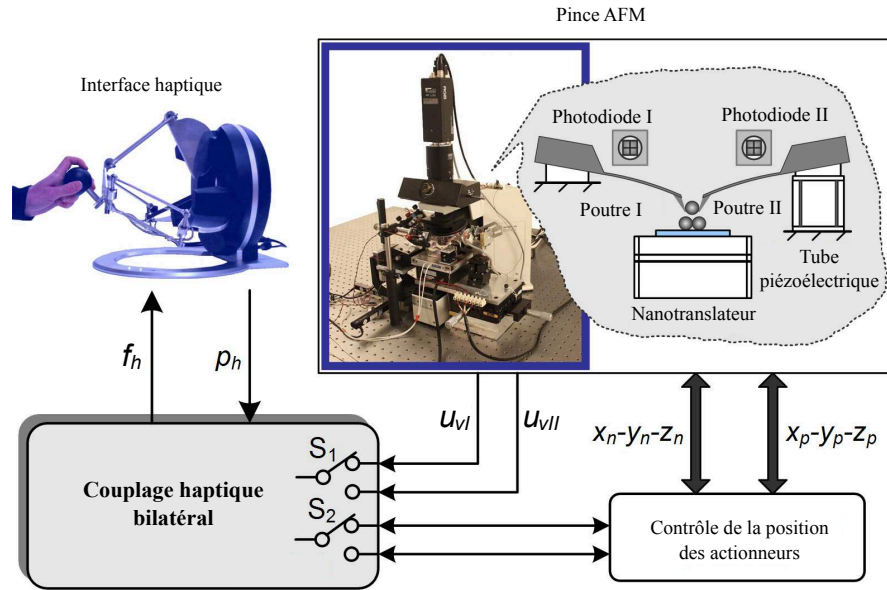


FIGURE I.8 – Système de téléopération à deux poutres AFM : (*gauche*) l'interface à retour d'effort est utilisée pour contrôler la manipulation tridimensionnelle tout en bénéficiant d'un retour haptique en temps réel ; (*droite*) la pince est composée de deux poutres AFM dont les pointes sont inclinées vers l'avant. [32]

Pour réaliser des manipulations complexes contrôlées grâce à la mesure des efforts d'interaction, une solution intéressante est l'utilisation de deux poutres AFM indépendantes qui collaborent pour saisir et déposer les objets. Nous avons dans un premier temps conçu et réalisé un tel manipulateur, puis exploré les possibilités d'interaction utilisateur d'un tel arrangement [33]. Nous avons réalisé une démonstration dans laquelle une tâche de micromanipulation 3D est entièrement téléopérée. Elle consiste en la construction d'une structure pyramidale à deux étages en conditions ambiantes à partir de quatre microsphères de $2.5 \mu\text{m}$ de rayon.

Comme l'approche retenue est entièrement fondée sur l'interactivité de la manipulation, la phase d'imagerie par AFM généralement réalisée avant toute manipulation est évitée. Elle est remplacée par une exploration initiale par "tâtonnement" contrôlée par l'utilisateur. Durant cette phase, un guide virtuel est calculé en ligne, et utilisé pour aider l'opérateur à aligner les poutres AFM avec l'objet à saisir. Pour compléter ce système, deux schémas de téléopération sont implémentés pour la tâche de

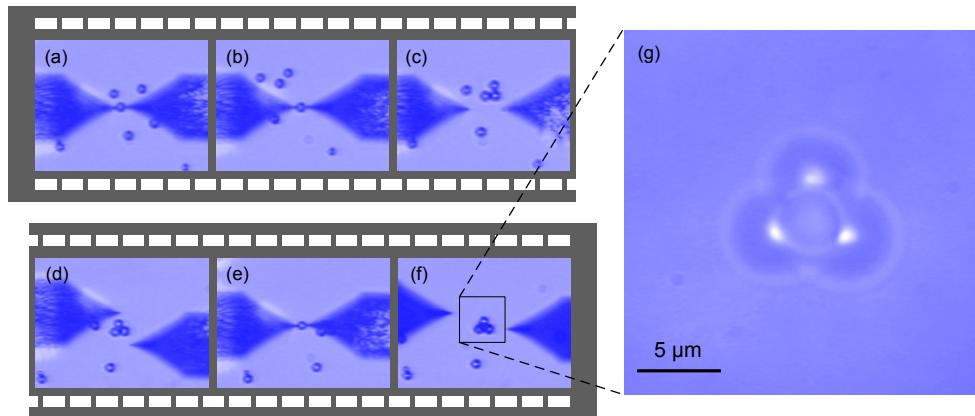


FIGURE I.9 – Construction d'une micropyramide par téléopération. (a)–(d) quatre photos de l'assemblage du premier étage de la micropyramide. (e) et (f) représentent l'assemblage du second étage (quatrième microsphère). Les images (a)–(f) sont prises avec un zoom $20\times$. (g) est le résultat de la micro-manipulation zoomé $100\times$. [26, 34].

saisie-dépose. Le premier transmet à l'utilisateur les efforts mesurés, après une mise à l'échelle adéquate. Le second retour haptique calcule un guide virtuel, fondé sur les efforts mesurés, pour aider l'utilisateur à soulever l'objet jusqu'à une position donnée pour éviter tout contact involontaire avec le substrat ou les objets environnants. Il garantit également que la dépose est volontaire. Pour ces deux retours haptiques, les poutres sont immobiles et le substrat est manipulé à l'aide du bras maître comme représenté sur la figure I.8.

Une micropyramide en deux étages est ainsi construite par une succession de tâches de saisie-dépose. La figure I.9 montre les différentes étapes de cette micro-manipulation. Le résultat final est illustré par la figure I.9(f), et est agrandi ($\times 100$) dans la figure I.9(g) [26, 34].

3.3 Synthèse

Ce premier chapitre a esquissé nos travaux initiaux sur la démarche de développement des systèmes microrobotiques interactifs. Dans le domaine de la micromanipulation alors naissant, ces travaux constituèrent une prise de position sur le plan national et international de notre équipe par la place centrale donnée à l'opérateur.

En effet, en nous projetant dans les futures applications de la microrobotique, nous avons identifié l'instrumentation scientifique comme une piste privilégiée. Le besoin de flexibilité et d'intuitivité des interfaces est alors apparu comme primordial. Il est par conséquent essentiel d'impliquer l'humain de façon optimale dans la boucle pour profiter de ses capacités motrices et décisionnelles. L'approche

que nous avons établie est la micro-téléopération, qui est devenue un composant déterminant de l'identité de notre équipe.

Plusieurs démonstrateurs expérimentaux interactifs ont été construits : manipulateur par adhésion avec une poutre AFM [10, 11, 35-37], qui a donné par la suite à un système dextre à double effecteurs [24, 32-34], par des diapasons au lieu des poutres AFM [38], un manipulateur compatible MEB [29, 39]... Tous ces travaux, qui s'étalent sur une dizaine d'années, ont donné lieu à des interfaces utilisateur, pour la plupart inspirées directement des approches classiques en télémanipulation. Parallèlement, de nouvelles idées ont germées pour proposer des solutions plus en rupture avec l'état de l'art, ce qui fait l'objet du chapitre suivant.

Références

- [1] R. GOERTZ et R. THOMPSON. « Electronically controlled manipulator ». *Nucleonics* (1954), p. 46-47 (citée page 5).
- [2] J. VERTUT et P. COIFFET. *Robot technology*. Vol. 3B. *Teleoperation and robotics : applications and technology*. Jan. 1985 (citée page 5).
- [3] P. A. GARREC, O. RIWAN David et Y. MEASSON. « Téléopération- principe et technologie ». *Technique de l'ingénieur* (2002) (citée page 5).
- [4] P. F. HOKAYEM et M. W. SPONG. « Bilateral teleoperation : An historical survey ». *Automatica* 42.12 (2006), p. 2035-2057 (citée pages 5, 10).
- [5] Y. HATAMURA et H. MORISHITA. « Direct coupling system between nanometer world and human world ». In *IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems* (1990), p. 203-208 (citée page 6).
- [6] R. HOLLIS, S. SALCUDEAN et D. ABRAHAM. « Toward a tele-nanorobotic manipulation system with atomic scale force feedback and motion resolution ». In *IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems* (1990), p. 115-119 (citée page 6).
- [7] M. SITTI et H. HASHIMOTO. « Macro to nano tele-manipulation through nanoelectromechanical systems. » In *IEEE Industrial electronics society* (1998), p. 98-103 (citée page 6).
- [8] M. SITTI et H. HASHIMOTO. « Teleoperated touch feedback from the surface at the nanoscale ; modeling and experiments ». *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 8 (2003), p. 287-298 (citée page 6).
- [9] A. SHIRINOV, J. KAMENIK et S. FATIKOW. « Haptic interface for a nanohandling robot ». *Assembly Automation* 24.1 (2004), p. 78-87 (citée page 6).
- [10] F. DIONNET, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Autonomous Manipulation using a new strategy of accurate release by rolling ». *Actes de ICRA'04 : IEEE International Conference on Robotics and Automation*. La Nouvelle Orléans, Etats-Unis, mai 2004, p. 5019-5024 (citée pages 6, 16).
- [11] G. VENTURE, S. HALIYO, A. MICAELLI et S. RÉGNIER. « Force-feedback coupling for micro-handling applications ». *International Journal of Micromechatronics, special issue on Micro-handling* 3.3-4 (2006), p. 307-327 (citée pages 6, 16).
- [12] A. BOLOPION. « Couplage haptiques pour la téléopération à l'échelle nanoscopique ». Thèse de doct. Université Pierre et Marie Curie, 2010 (citée pages 7, 9, 10).
- [13] S. GRUDININ et S. REDON. « Practical modeling of molecular systems with symmetries ». *Journal of Computational Chemistry* 31.9 (juil. 2010), p. 1799-1814. DOI : 10.1002/jcc.21434 (citée page 7).
- [14] J. VITARD. « Manipulation submicroscopique interactive sous différents environnement de microscopie ». Thèse de doct. Université Pierre et Marie Curie, 2008 (citée pages 7, 8).
- [15] G. VENTURE, D. S. HALIYO, A. MICAELLI et S. RÉGNIER. « Force-feedback micromanipulation with inconditionnally stable coupling ». *International Journal of Micromechatronics, special issue on Micro-handling* 3.3 (2006), p. 307-327 (citée pages 9, 12).

- [16] B. HANNAFORD. « A design framework for teleoperations with kinesthetic feedback ». *IEEE Transaction on Robotics and Automation* 5.4 (1989), p. 424-434 (citée page 10).
- [17] R. J. ADAMS et B. HANNAFORD. « Stable haptic interaction with virtual environments ». *IEEE Transaction on Robotics and Automation* 15.3 (1999), p. 465-474 (citée page 10).
- [18] V. HAYWARD et K. MACLEAN. « Do it yourself haptics, part-i ». *IEEE Robotics and Automation Magazine* 14.4 (2007), p. 88-104 (citée page 10).
- [19] D. LAWRENCE. « Stability and transparency in bilateral teleoperation ». *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 9.5 (1993), p. 624-637 (citée page 10).
- [20] E. OSTERTAG. *Systèmes et asservissement continus. Modélisation, analyse, synthèse des lois de commande*. Ellipses, 2004 (citée page 11).
- [21] K. OGATA. *Discrete-time control systems*. Prentice Hall, 1995 (citée page 11).
- [22] F. LLEWELLYN. « Some fundamental properties of transmission systems ». *IRE* 40.3 (1952), p. 271-283 (citée page 11).
- [23] A. MICAELLI. *Téléopération et télérobotique, chapitre 6, asservissement et lois de couplage en téléopération*. Hermès science, 2002 (citée page 12).
- [24] A. BOLOPION, B. CAGNEAU, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Analysis of stability and transparency for nanoscale force feedback in bilateral coupling ». *Journal of Micro - Nano Mechatronics* 4 (2009), p. 145-158 (citée pages 12, 16).
- [25] A. BOLOPION, B. CAGNEAU, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Tuning the gains of haptic couplings to improve force feedback stability in nanorobotics ». *ICRA'09 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2009, p. 4320-4325 (citée page 12).
- [26] A. BOLOPION, H. XIE, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Haptic Teleoperation for 3D Microassembly of Spherical Objects ». *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics* 17.1 (2012), p. 116-127 (citée pages 12, 15).
- [27] A. BOLOPION, C. STOLLE, R. TUNNELL, S. HALIYO, S. RÉGNIER et S. FATIKOW. « Remote Microscale Teleoperation through Virtual Reality and Haptic Feedback ». *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2011)*. 2011, p. 894-900 (citée page 12).
- [28] B. DAUNAY, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « 6D haptic feedback for molecular docking ». *Actes de EUROMECH Colloquium 476, Real-time Simulation and Virtual Reality Applications of Multibody Systems*. Ferrol, Espagne, mar. 2006 (citée page 12).
- [29] B. SAUVET, N. OUARTI, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Virtual Reality Backend for Operator Controlled Nanomanipulation ». *3M-NANO International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale*. Best Paper Nominee. 2012, p. 121-127 (citée pages 12, 16).
- [30] B. SAUVET. « Design of a microrobotic platform for the manipulation and characterization of thin films ». Thèse de doct. Ph. D. dissertation, Univ. Pierre et Marie Curie, Paris, France, 2013 (citée page 13).

- [31] B. SAUVET, N. OUARTI, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Virtual Reality Backend for Operator Controlled Nanomanipulation ». *3M-NANO International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale*. 2012, p. 121-127 (citée page 13).
- [32] H. XIE, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « A versatile atomic force microscope for 3D nanomanipulation and nanoassembly ». *Nanotechnology* 20 (2009), 215301 (9pp) (citée pages 14, 16).
- [33] H. XIE, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Parallel imaging/manipulation force microscopy ». *Applied Physics Letters* 94 (2009), p. 153106 (citée pages 14, 16).
- [34] A. BOLOPION, H. XIE, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « 3D Haptic Handling of Microspheres ». *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010)*. 2010, p. 6131-6136 (citée pages 15, 16).
- [35] S. HALIYO, S. RÉGNIER et J. GUINOT. « [mü]MAD, the adhesion based dynamic micro-manipulation ». *European Journal of Mechanics A, Solids* 22.6 (2003), p. 903-916 (citée page 16).
- [36] G. VENTURE, S. HALIYO, A. MICAELLI et S. RÉGNIER. « Force-feedback micromanipulation with inconditionnally stable coupling ». *Actes de IROS'05 : IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Edmonton, Canada, août 2005, p. 784-789 (citée page 16).
- [37] S. HALIYO, F. DIONNET et S. RÉGNIER. « Controlled rolling of micro objects for autonomous micro manipulation ». *International Journal of Micromechatronics* 3.2 (2006), p. 75-101 (citée page 16).
- [38] J. ACOSTA, J. POLESEL-MARIS, F. THOYER, H. XIE, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Gentle and fast atomic force microscopy with piezoelectric scanning probe for Nanorobotics Applications ». *Nanotechnology* 24.6 (2013), p. 065502 (citée page 16).
- [39] N. OUARTI, B. SAUVET, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « RobPosit, a robust pose estimator for operator controlled nanomanipulation ». *Journal of Micro-Bio Robotics* 8.2 (2013), p. 73-82 (citée page 16).

CHAPITRE II

MICROSCOPIE HAPTIQUE

LE CHAPITRE précédent a instauré notre approche d'aborder la micromanipulation comme un problème de téléopération. Naturellement, ces travaux précurseurs se sont inspirés de la téléopération "classique" et étaient articulés autour des schémas de commande pour le couplage bilatéral. Les notions de transparence et de stabilité sont centrales dans un tel cadre.

Nous avons initialement observé que la transparence devrait être sacrifiée dans une certaine mesure pour garantir la stabilité. Ceci résulte essentiellement des différences des facteurs d'échelles en déplacement et en effort, mais aussi des caractéristiques des éléments maître et esclave de la chaîne de téléopération. Toutes ces contraintes impliquent l'utilisation d'un schéma indirect. Par conséquent, les phénomènes ressentis par l'opérateur ne reflètent pas fidèlement ceux occurring à l'échelle microscopique.

Toutefois, la conception d'une chaîne de téléopération peut aussi être abordée sous un autre angle. Au lieu d'assembler des systèmes déjà existants et de rechercher un couplage stable, une autre approche consiste à concevoir des systèmes stables pour un couplage direct, qui maximiserait la transparence.

La motivation de cette démarche s'inspire de la révolution intellectuelle déclenchée par la microscopie photonique au XVII^e siècle [1]. La possibilité d'une observation fidèle des objets aux petites échelles est à l'origine de plusieurs domaines scientifiques d'aujourd'hui. La *microscopie haptique* a pour objectif de fournir des capacités d'observation similaires, mais pour les interactions mécaniques. Il s'agit d'amplifier linéairement les phénomènes pour les transmettre à la main de l'opérateur. Cette volonté de transparence totale nécessite de bannir toutes distorsions provenant de l'instrument pour laisser l'humain d'expérimenter le micromonde le plus fidèlement possible.

Pour l'exploration mécanique des microéchelles, le microscope à force atomique (AFM) [2] fut une avancée comparable au microscope photonique, utilisant la mécanique au lieu de l'optique. L'AFM, cependant, n'est pas à l'origine un instrument interactif. Les observations sont mises à la disposition des utilisateurs sous forme de grilles de points de données. Néanmoins, c'est l'outil principal capable de capter les interactions mécaniques. Par conséquent il a été détourné de son usage premier d'observation pour la manipulation dans des nombreuses applications, certaines mentionnées dans le chapitre précédent. Cependant, en traitant l'AFM comme un manipulateur esclave, les phases d'interactions où la pointe de la sonde est attirée vers l'échantillon sont par nature instables et donc inaccessibles à l'expérience humaine directe. De plus, dans le signal de sortie du capteur il est difficile de différencier la réponse élastique de la sonde de celle des échantillons : en effet l'information recueillie ne représente pas véritablement le phénomène physique, mais la réponse mécanique de la poutre à ce phénomène.

Une observation similaire provient du dispositif maître. Les interfaces haptiques usuelles, par leur inertie, les jeux et frottements mécaniques ainsi que leur électronique ne sont pas aptes à reproduire la richesse de la dynamique du micromonde. Les efforts qu'ils génèrent à la main de l'utilisateur sont une expression de la consigne en force filtrée par la structure électromécanique. En considérant aussi la raideur et amortissement virtuels introduits par l'utilisation d'un schéma de couplage indirect, la perte de transparence est inévitable.

1 Conception complète d'une chaîne de téléopération

Cette constatation nous a motivé pour élargir notre étude au-delà du couplage tel qu'il est représenté dans la figure I.4 dans le chapitre précédent. Il s'agit de s'intéresser aux dispositifs maître et esclave, et de considérer des nouvelles solutions en remplacement des composants habituels pour procéder à une reformation complète de la chaîne de téléopération. Dans cet objectif, nous avons développé un capteur actif qui peut suivre fidèlement l'intégralité des courbes d'interaction microscopiques. Pour le côté "maître", nous avons réalisé une nouvelle interface de retour de force qui se rapproche d'un générateur de force pure afin de réaliser un instrument de rapport de transmission mécanique.

En couplant ces deux éléments par un schéma direct, nous avons montré que le système complet était inconditionnellement stable pour tout gain d'échelle, tout en maintenant une transparence quasi-idéale dans la gamme de fréquences pertinente à l'interaction humaine. Pendant les expériences, l'utilisateur avait l'impression d'interagir directement avec une réplique agrandie de l'échantillon. Le travail mécanique capté par la main était de six à sept ordres de grandeur plus grand que celui qui se produit dans le monde microscopique.

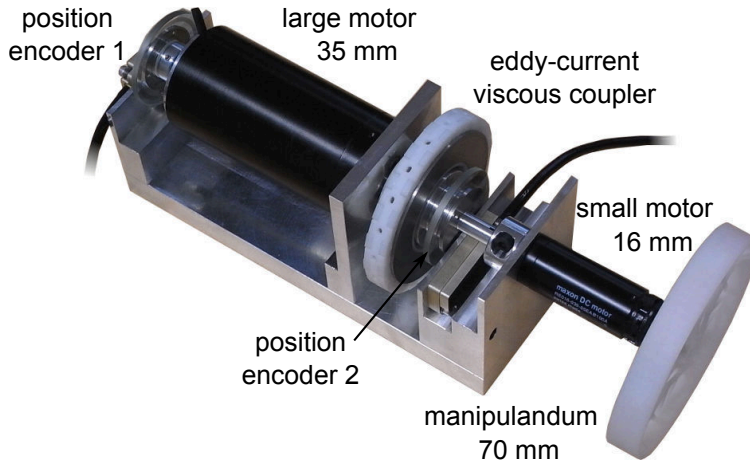


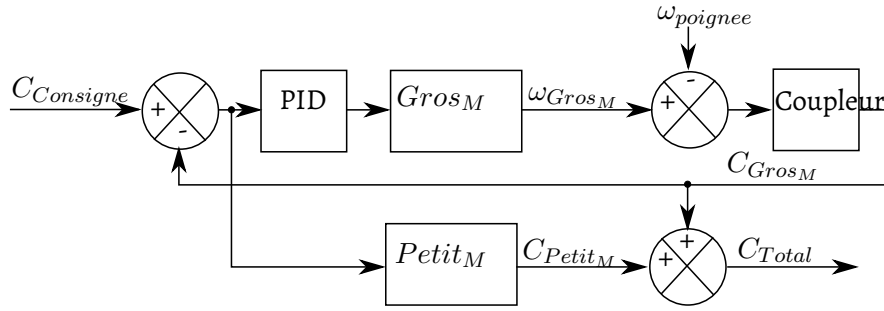
FIGURE II.1 – Première conception de l'interface TIMoN [3]

1.1 Interface haptique

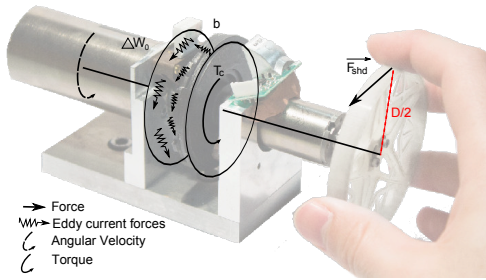
L'interface que nous avons proposée est une interface transparente, stabilisée par sa commande passive. Sa conception à un degré de liberté uniquement en rotation l'approche le plus possible d'un générateur de force pure. Elle est composée de deux moteurs intercalés par un coupleur à courants de Foucault. Cette interface, représentée sur la figure II.1, est baptisée *TIMoN*² [3, 4]. La poignée est fixée sur l'axe du rotor d'un moteur léger, dit "petit" avec un temps de réponse court mais un couple maximum bas. Un "gros" moteur contribue son couple sur cette axe à travers le coupleur visqueux, de façon que le couple ressenti par l'opérateur et la somme de celui produit directement par le petit moteur, et celui provenant du gros, proportionnel à la différence des vitesses. L'écriture de l'équilibre mécanique démontre de façon triviale que l'inertie ressentie par la main provient uniquement de la poignée et du rotor du petit moteur, l'inertie du gros étant masquée par le coupleur. Cet assemblage, assorti d'un schéma de commande adapté, permet en effet de cumuler les avantages de temps de réponse court et de couple fort, se rapprochant ainsi de l'idéal à masse nulle et raideur infinie.

L'inertie totale ressentie est très faible. Seules les inerties intrinsèques au petit moteur, à la poignée et au disque en aluminium à l'intérieur du coupleur sont ressenties. Le gain sur le compromis habituel entre inertie ressentie et couple maximum

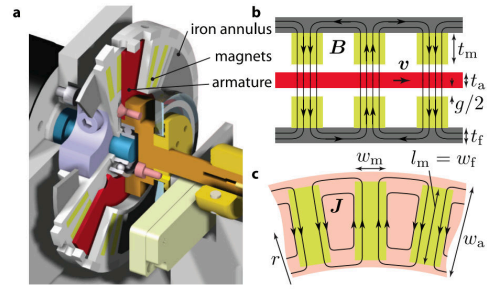
2. Transparent Interface for Manipulation of Nanoscales



(a) Schéma de fonctionnement de l'interface



(b) Principe de fonctionnement de l'interface à 1DDL



(c) Coupleur [5]

FIGURE II.2 – Schéma de commande à deux moteurs et la transmission des efforts : Le petit moteur est directement relié à la poignée tenue par l'utilisateur. Ce moteur est commandé de façon à fournir la différence entre le couple de consigne $C_{Consigne}$ et le couple de gros moteur C_{GrosM} . L'intégrateur au sein du contrôleur du gros moteur donne une erreur nulle en régime établi.

est considérable. Cette combinaison de deux moteurs et d'un couplage visqueux octroie une grande plage dynamique ainsi qu'une très faible inertie. Une raideur maximale de 1 N mm^{-1} pour une inertie ressentie de 6 g est atteinte. Le couple maximal atteignable est de 200 mN m et la friction de 0.004 N. En revanche les performances du prototype dépendent de la précision des encodeurs et de la commande employée pour le contrôle des moteurs. Le fonctionnement de l'interface est explicité sur le schéma II.2a.

Le couple de gros moteur est transmis par les courant de Foucault : une différence de vitesse $\Delta\omega$ entre le gros moteur et la poignée tenue par l'utilisateur produit un déplacement relatif entre les aimants et le disque en aluminium (c). Ce déplacement induit des courants de Foucault dans le coupleur. Ces courants de Foucault produisent des forces résistives qui forment le couple C_{GrosM} en sortie du coupleur. Un coefficient $b = 0.96 \text{ mN m s rad}^{-1}$ relie la différence de vitesse des deux moteurs et le couple produit. Le petit moteur fonctionne ainsi seulement pendant les régimes transitoires. Ce fonctionnement intermittent autorise une utilisation du petit mo-

teur au delà de son couple nominal sans surchauffe des bobinages.

Le couple C_{Gros_M} s'additionne à celui du petit moteur C_{Petit_M} et forme le couple total C_{Total} de l'interface. Le couple total de l'interface bénéficie de la rapidité de réaction du petit moteur et de la capacité du gros moteur à fournir des efforts importants de façon continue.

Nous avons mené une évaluation de perception utilisateur de cette interface, notamment pour valider le gain en transparence [5]. L'interface permet d'améliorer de deux ordres de grandeur la transparence par rapport aux conceptions existantes mesurées en termes d'ampleur des forces parasites dues au frottement et à l'inertie. La charge inertielle vue par un doigt n'est que de l'ordre d'un ou deux grammes. Cependant, la conception ne limite pas les amplitudes de couple qui peuvent être produites, et peut fonctionner dans sa configuration actuelle sur une bande passante qui dépasse un kilohertz. Pour la tâche que nous avons choisie, la transparence améliorée a permis aux utilisateurs de détecter des détails dix fois plus petits que dans le cas d'une conception conventionnelle.

1.2 Capteur de force à un degré de liberté

La technique de mesure des forces la plus courante repose sur la mesure de la déformation d'une structure flexible dont la rigidité est connue. De tels capteurs sont appelés capteurs *passives*. Le principe alternatif des capteurs *actifs* est basé sur l'équilibre des forces entre une force inconnue et une grandeur connue, comme dans la balance de Roberval [6]. Les spécifications des capteurs passifs dépendent étroitement de la rigidité et de la masse de leur sonde et, par conséquent, leur plage de fonctionnement est limitée à la fois en amplitude et en largeur de bande. Par conséquent, ils sont inadaptés lorsque les forces ont une forte variance, ou lorsque les échantillons sont mous, ou qu'ils présentent des non-linéarités.

Tous ces cas sont assez fréquents dans les applications à micro- et méso-échelle. À ces échelles, les détecteurs passifs utilisent un large éventail de stratégies pour extraire la déformation, par exemple piézorésistive [7, 8] et capacitive [9, 10]. D'autres stratégies plus exotiques comme le courant traversant un transistor MOSFET [11] ou l'utilisation d'un piège optique [12] existent. Ces approches donnent généralement des capteurs de petites dimensions et une électronique simple, mais sont souvent limitées par un compromis entre la résolution du capteur et la plage de mesure [13]. Par exemple, en règle générale, lors de la caractérisation de la rigidité d'un échantillon, la rigidité du capteur doit être au moins dix fois supérieure.

Le capteur actif proposé, illustré sur la figure II.3, est conçu pour produire une mesure indépendante de ses caractéristiques intrinsèques. Il utilise le principe de compensation de la force extérieure qu'on désire mesurer, appliquée sur la sonde. Une

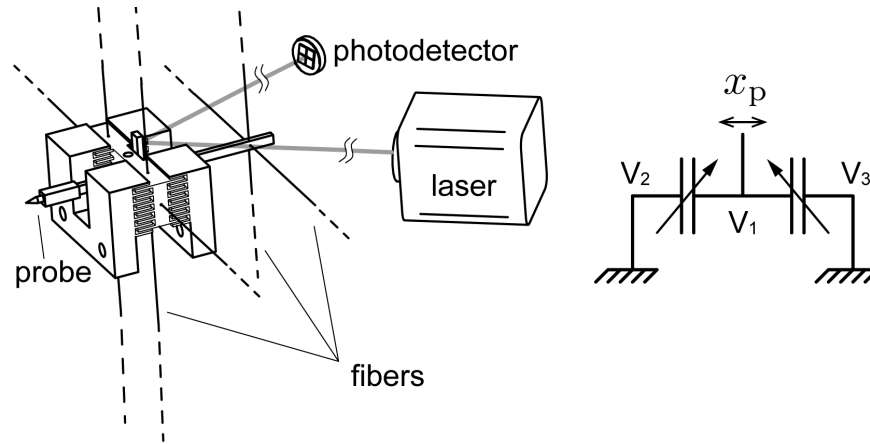


FIGURE II.3 – Détails de fonctionnement du capteur actif. La sonde (*probe*) est accrochée par 5 fils, contraignant son mouvement à la direction de mesure. Elle est placée dans l'armature d'un actionneur électrostatique dont la tension est commandée. Cette commande tente d'annuler le déplacement de la sonde, mesuré par un laser et photodiode.

photodiode mesure la position de cette partie mobile du capteur, asservie en position fixe. En cas de déplacement l'actionnement électrostatique ramène le système à sa position initiale. Le système est considéré à l'équilibre et la force développée par l'actionnement correspond à la force appliquée sur le capteur. La partie mobile est guidée en translation par cinq fibres optiques. Cette solution impose un guidage suivant la direction de mesure, sans hystérésis.

Nous avons réalisé ce capteur à l'échelle microscopique : L'actionnement employé pour la compensation est un peigne électrostatique utilisant des différences de potentiels allant jusqu'à 400 V en courant continu. La figure II.3 représente le fonctionnement de l'actionnement, la partie mobile du capteur est reliée à un potentiel fixe $V_1 = 200 \text{ V}$. Les deux armatures fixes sont reliées à des potentiels variables tels que $V = -V_2 = V_3$ variant de -200 V to 200 V . La force développée par l'actionnement électrostatique est $f_a = 2CV_1V$, avec C la capacité linéique de l'actionneur.

Caractéristique	Valeur
Fréquence de résonance	10 Hz
Résolution	0.4 μN
Masse	1.2 g
Plage de fonctionnement	$-400 \mu\text{N}$ to $400 \mu\text{N}$
Raideur	4 N m^{-1}

TABLE II.1 – Caractéristiques du capteur à peigne millimétrique[14]

Ce capteur présente des performances intéressantes, synthétisées dans le tableau II.1, pour la mesure de forces à l'échelle du micro-monde. Elle est intrinsèquement passive et constituera le côté "esclave" de notre chaîne de microscopie haptique.

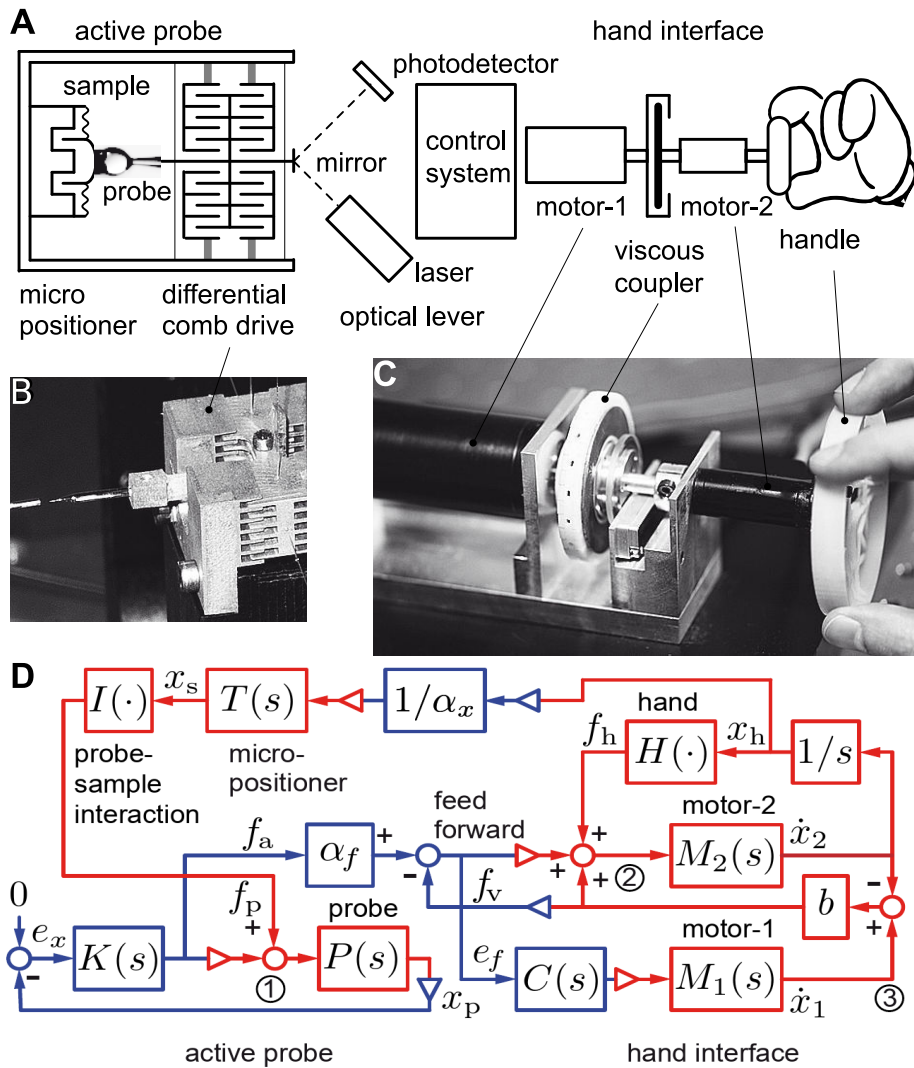


FIGURE II.4 – Représentation de la chaîne de microscopie haptique complète avec schéma de contrôle. Le capteur (*active probe*) et l'interface (*hand interface*) sont couplés par un schéma direct. Les indications en bleu représentent des grandeurs numériques échantillonnées et en rouge des grandeurs réelles continues. [15]

1.3 Couplage bilatéral

La chaîne complète est construite avec l'interface TiMON et le capteur actif, couplé par un schéma direct, similaire à celui de la figure I.5a. Les gains homothétiques sont α_f pour les forces et α_x pour les déplacements. Le rotation de la poignée commande en position un porte-échantillon. La force d'interaction mesuré par le capteur est la consigne en couple rendue à l'opérateur. Le schéma de commande de la chaîne de téléopération complète est représenté sur la figure II.4. Le schéma de couplage direct apporte une transmission des efforts la plus transparente. La stabilité est assurée par la passivité des systèmes maître et esclave. Les conditions de stabilité de la chaîne de téléopération sont vérifiées dans la suite.

2 Performance de la chaîne à couplage direct

La conception de la chaîne de téléopération repose sur des éléments conçus indépendamment et couplés ensemble. La stabilité et la transparence sont étudiés ci-après.

2.1 Caractérisation de la stabilité

La stabilité de la chaîne de téléopération peut être démontrée en vérifiant la passivité des éléments la composant. L'hypothèse retenue est que l'utilisateur et le milieu étudié sont des systèmes passifs. Cette hypothèse est communément admise dans l'étude de la stabilité de systèmes de téléopération [16].

L'interface employée est un système à un degré de liberté utilisant deux moteurs couplés par un frein à courant de Foucault. Le coupleur dissipe de l'énergie et peut être assimilé à un système passif. Les seuls éléments actifs sont les moteurs lorsqu'ils sont couplés aux amplificateurs. Le petit moteur est contrôlé de façon à compenser les frottements et l'inertie. Un soin est apporté au réglage des gains pour ne pas surcompenser. L'interface est alors assimilée à un système passif. Lorsque l'amplification du gros moteur est reliée au schéma de couplage, le moteur devient un système passif. Pour la description en quadripôles par une matrice d'immittance hybride C_m (force, vitesse), l'interface est modélisée comme une masse M_m dotée d'un frottement visqueux B_m (avec s variable de Laplace) :

$$C_m = \begin{bmatrix} 1 & M_m s - B_m \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & z_m \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Le capteur utilisé est un système capacitif à mesure par compensation d'effort. La compensation d'effort met en jeu un schéma de commande et des amplifications qui nécessitent une étude plus poussée que pour l'interface haptique. Il est nécessaire d'étudier la fonction de transfert du système. Cette fonction de transfert z_s pos-

sède une partie réelle positive sur toute la plage [4, 17]. Le système est passif d'après les critères de passivité de Llewellyn, comme présenté plus haut. Le capteur est modélisé par la matrice :

$$C_s = \begin{bmatrix} 1 & z_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Isolé, le schéma de couplage est un simple couplage direct. L'ajout des gains d'amplifications du capteur et des moteurs change la topologie du système. Les gains non symétriques ne satisfont pas les hypothèses de passivité dans le cas d'utilisation d'amplificateurs. En revanche il est possible de modéliser le couplage comme un système inconditionnellement stable en mode couplé. Le couplage est modélisé par une homothétie :

$$C_c = \begin{bmatrix} \alpha_f & 0 \\ 0 & \alpha_x \end{bmatrix}$$

où α_f et α_x représentent respectivement les homothéties en effort et en vitesse. La matrice de la chaîne de téléopération étudiée s'écrit alors :

$$C_T = C_m C_c C_s = \begin{bmatrix} 1 & z_m \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_f & 0 \\ 0 & \alpha_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & z_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_f & \alpha_x z_m + \alpha_f z_s \\ 0 & \alpha_x \end{bmatrix}$$

Si les homothéties du couplage sont définies telles que $Re(\alpha_f) \geq 0$ et $Re(\alpha_x) \geq 0$, alors :

$$\begin{aligned} Re(\alpha_f)Re(\alpha_x) - |(\alpha_x z_m + \alpha_f z_s) \times 0| &= Re((\alpha_x z_m + \alpha_f z_s) \times 0) \\ &= 2Re(\alpha_f)Re(\alpha_x) \geq 0 \end{aligned}$$

Le système vérifie alors les hypothèses de passivité d'un système linéaire «inconditionnellement stable en mode couplé». D'après le critère de Llewellyn la chaîne de téléopération est stable.

2.2 Caractérisation de la transparence

La transparence idéale est décrite comme une relation linéaire entre les impédances côté opérateur Z_{op} et l'environnement de l'échantillon Z_e tel que :

$$Z_{op} = \frac{\alpha_f}{\alpha_x} Z_e$$

Lors du contact de la sonde avec l'échantillon, l'impédance côté opérateur est calculée entre la force (ou le couple) appliquée par l'opérateur sur la poignée du petit moteur et la vitesse du gros moteur (contrairement au cas précédent). En effet, le retour d'effort est assuré en régime établi par le gros moteur. Cette impédance est

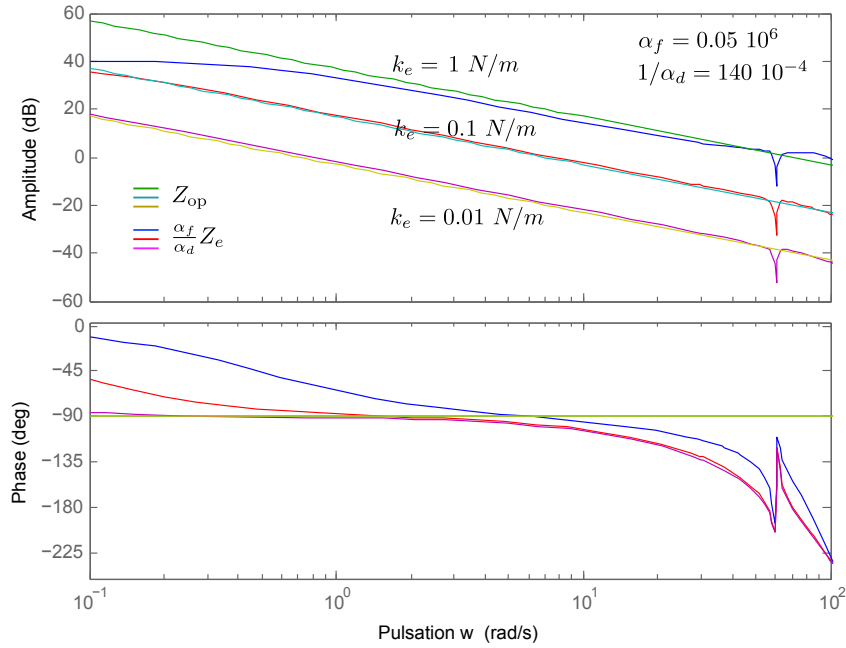


FIGURE II.5 – Diagramme de Bode des impédances du schéma de couplage, mode contact : les valeurs utilisées sont $k_e = \{0.1, 0.01, 0.001\}$ N/m, $\alpha_f = 0.05 \cdot 10^6$ et $1/\alpha_d = 140 \cdot 10^{-4}$.

calculée numériquement à partir du schéma donné par la figure II.4. La figure II.5 représente, sur le même tracé, le diagramme de Bode de Z_{op} pour différentes valeurs de k_e et le diagramme de Bode de $\frac{\alpha_f}{\alpha_d} Z_e$. A partir de l'hypothèse assimilant l'échantillon à une raideur k_e , l'impédance Z_e est égale à $\frac{K_e}{s}$. Sur la bande passante de la chaîne, limitée par celle de la sonde, les deux courbes sont très proches. Ainsi l'impédance de l'environnement est transmise à l'opérateur sur toute la bande passante de la chaîne, pour des raideurs k_e inférieures à 1 N/m. Ce résultat approche la transparence idéale de la chaîne sur la bande passante en mode contact.

3 Validation du microscope haptique

3.1 Plateforme expérimentale

La plateforme expérimentale est schématiquement constituée du capteur de microforces et de l'interface haptique à un seul degré de liberté. Le capteur est fixe tandis que le porte-échantillon est mobile. Il est déplacé par un dispositif commercial constitué de trois blocs assurant trois translations XYZ dans l'espace de travail (Sutter MP-285 de résolution de $0.04 \mu\text{m}$). Il confère au système un espace de travail de 25

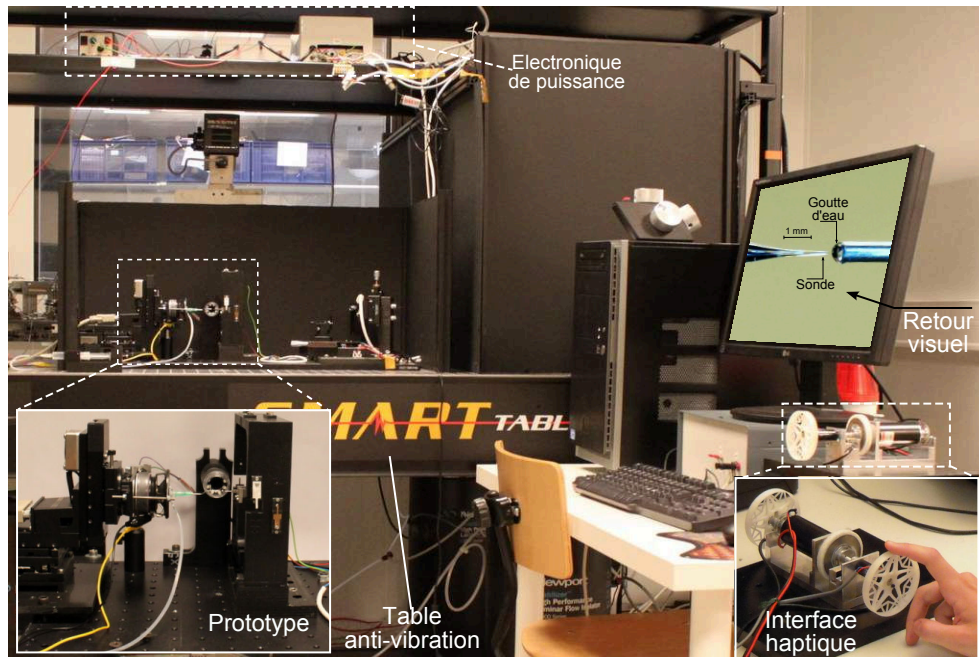


FIGURE II.6 – Plateforme expérimentale pour la microscopie haptique. Le capteur et le porte-échantillon sont placés sur une table anti-vibration. L'interface haptique et une caméra fournissent respectivement les retours haptique et visuel à l'opérateur.

mm $\times$ 25 mm $\times$ 25 mm. Il assure une précision nécessaire et suffisante pour positionner l'échantillon par rapport à la sonde. Le déplacement de l'échantillon au cours d'un cycle d'approche-retrait est assuré par un actionneur de type haut-parleur solidaire au Sutter sur lequel une aiguille est collée. En effet, un haut-parleur est constitué d'un élément flexible monté contre un générateur de force électromagnétique. On peut donc commander la position par le courant induit. Contrairement à la plupart des actionneurs, la référence de déplacement est analogique. Cette propriété simplifie le couplage de la position de la poignée de l'interface et la position du haut-parleur. L'ensemble est placé dans un environnement contrôlé garantissant les conditions expérimentales les plus favorables pour mener à bien les expériences.

Le système est agencé autour d'un PC tournant sous RTAI/Linux. Ce système d'exploitation en temps réel est particulièrement adapté à l'implémentation du contrôle numérique pour ses performances et aussi pour sa simplicité d'utilisation. La figure II.6 présente une vue globale de la plateforme.

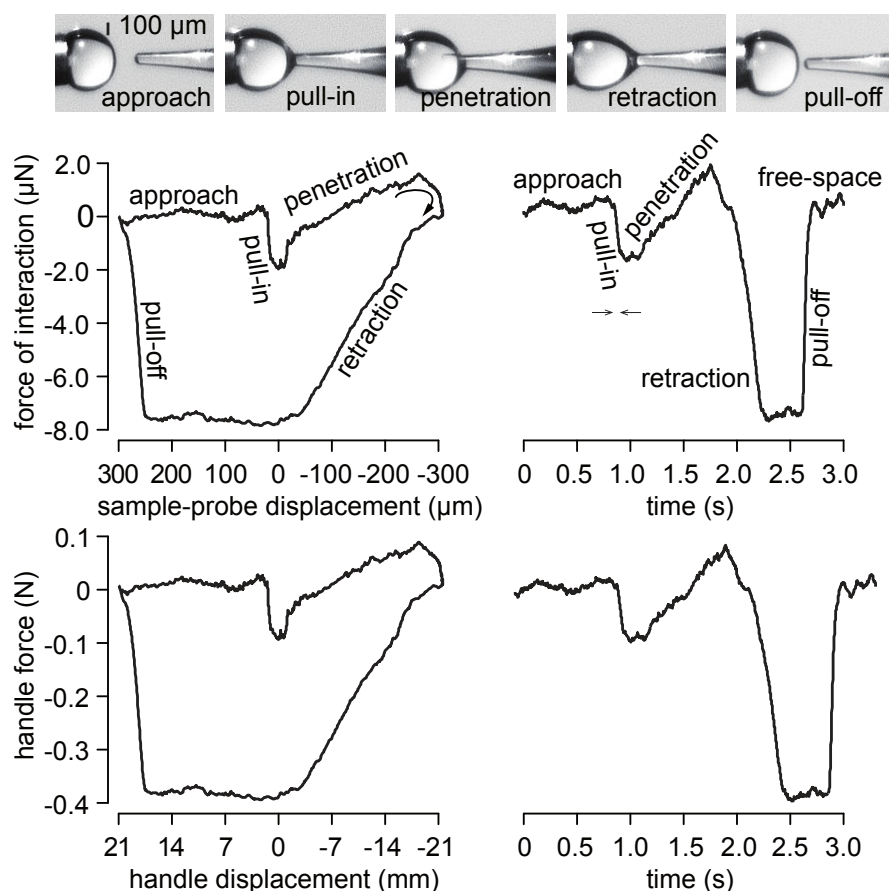


FIGURE II.7 – Exploration haptique d'une goutte d'eau. Lors de la phase d'approche, la goutte applique un effort qui attire la sonde, puis l'effort commence à diminuer. Lors de la phase de retrait, la goutte applique un effort croissant sur la sonde jusqu'à la limite de l'équilibre stable. A cet instant l'opérateur ressent l'effort de pull-off nécessaire pour vaincre la force capillaire et décoller la sonde de la goutte.

3.2 Interaction avec une goutte d'eau

Pour vérifier expérimentalement les performances de la chaîne de micro-téléopération, une tâche d'interaction avec le micromonde est effectuée. Elle consiste en une téléopération mono-dimensionnelle d'approche-retrait sur une goutte d'eau lors de laquelle les efforts d'interaction sont renvoyés à l'opérateur via l'interface haptique. Cette expérience donne à l'opérateur l'occasion de ressentir les phénomènes caractéristiques à l'échelle microscopique, notamment les efforts de pull-in et pull-off [18].

Le coefficient α_x est choisi en fonction des courses respectives du haut-parleur et de l'interface haptique. Pour un bon compromis entre confort et précision au cours

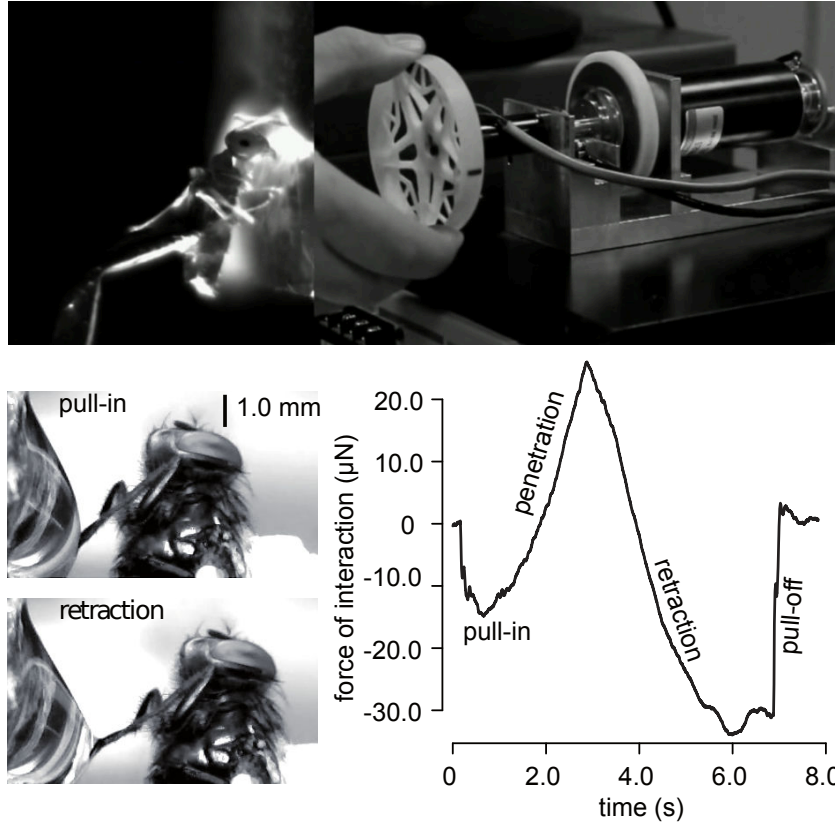


FIGURE II.8 – Expériences de microscopie haptique avec une fourmi (en haut) et une mouche (en bas). Les courbes d'interaction correspondent au cas de la mouche

de la manipulation, la valeur de $1/\alpha_x = 140 \cdot 10^{-4}$ est retenue (un quart de tour de la poignée de l'interface correspond à un déplacement de 0.75 mm). Par ailleurs, le coefficient α_f est choisi aussi en fonction de la plage de mesure du capteur et de l'effort maximum et minimum perceptibles via l'interface. La valeur utilisée est $\alpha_f = 0.05 \cdot 10^6$.

Le résultat obtenu est représenté sur la figure II.7, montrant les efforts ressentis par l'opérateur en fonction de la position sonde/goutte d'eau. Le système reste stable et les forces renvoyées à l'utilisateur sont égales à celles mesurées par le capteur. Elle sont amplifiées par α_f (d'après la structure du schéma de couplage, $F_h = \alpha_f F_n$). L'opérateur ressent donc les différents phénomènes physiques qui interviennent sur un cycle d'approche-retrait.

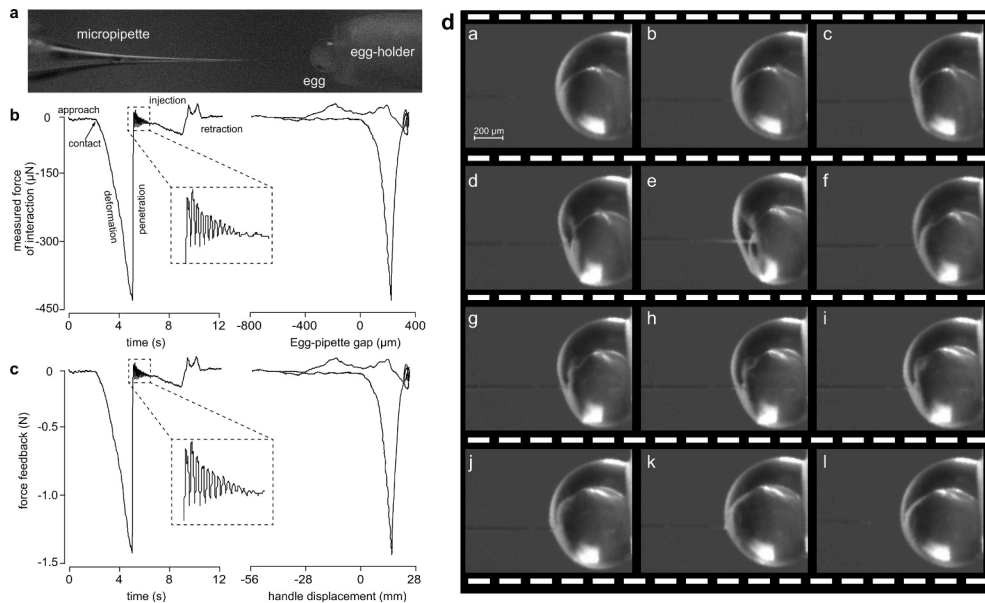


FIGURE II.9 – Injection d'œufs de poisson zèbre. (a) La micropipette et le porte-œuf. (b) Force d'interaction mesurée par le capteur au cours du cycle d'injection en fonction du temps et de l'écart entre la pipette et l'œuf. (c) La rétroaction de la force haptique ressentie par l'opérateur. d) La séquence d'injection : d.(a) approche, d.(b) contact, d.(c,d,e) déformation, f pénétration (perforation), d.(g,h,i,j) injection, d.(k,l), retrait.

3.3 Expériences avec des insectes

Le système décrit là-haut a été testé dans des cas plus complexes, avec une fourmi puis une mouche, vivantes [15].

Dans ces deux expériences, l'insecte est collé au porte-échantillon. Une goutte d'eau est ajoutée à l'extrémité de la sonde. Ainsi, l'opérateur contrôle la distance avec l'interface haptique et ressent l'interaction de la patte de l'insecte avec la goutte d'eau.

Figure II.8 illustre ces expériences. Les courbes d'interaction obtenues sont bien représentatives de l'échelle de l'interaction.

3.4 Injection des œufs de poisson

Un cas plus représentatif des applications en bioingénierie est l'injection des produits dans des cellules ou des œufs. La figure II.9 illustre ce travail expérimental sur des œufs de truite et de poisson zèbre, respectivement de diamètre 2 mm et 0.5 mm. Les échantillons sont attachés à la sonde par un système d'aspiration. Une micropipette en verre étirée contenant le matériel à injecter est attachée sur le porte-

échantillon mobile. Les facteurs d'échelle ont été réglés sur $\times 3400$ pour la force et $\times 0.014$ pour le déplacement, amplifiant le travail échangé entre la sonde et l'échantillon par 250×10^3 .

L'erreur entre l'estimation de la force transmise et l'amplification de la force mesurée reste inférieure à 1%. Ce résultat démontre le haut degré de transparence du système avec une interface haptique à deux étages, où la force transmise reproduit exactement la force mesurée. De plus, le système reste stable tout au long du cycle d'interaction. La force ressentie par l'utilisateur n'est pas influencée par la mécanique du capteur et de l'interface.

4 Synthèse & Perspectives

Cette étude montre l'intérêt de la conception d'interface haptique et d'outil dédiés à la manipulation aux échelles microscopiques. En effet, l'approche d'actionnement à deux étages de l'interface offre un degré de liberté supplémentaire par rapport aux interfaces conventionnelles. Ce degré se traduit par la combinaison à la fois de deux moteurs de caractéristiques différentes avec deux rôles distincts. Un petit moteur avec une faible inertie, un faible coefficient de viscosité et de faible frottement, compense le couple de sortie en régime transitoire. Un gros moteur fournit le couple en régime établi. Ainsi, la transparence de la chaîne qui dépend des caractéristiques du petit moteur en mode non contact et de celles du grand moteur en mode contact est assurée sur toute la bande passante du système, comme le montrent les résultats précédents. Par ailleurs, la conception d'un capteur actif à actionnement électrostatique offre une mesure d'effort, en temps réel, sur toute la bande passante sans apport d'énergie. Cette propriété essentielle contribue également à la transparence globale de la chaîne. Dans l'ensemble, les performances de la chaîne de micro-téléopération sont très semblables au cours des différentes expériences de téléopération mono-dimensionnelle. Les résultats obtenus reproduisent une courbe typique d'un cycle d'approche-retrait. Enfin, plusieurs utilisateurs inexpérimentés ont testé la chaîne au cours de démonstrations publiques. Ceux-ci ont tous réussi à utiliser le système pour interagir avec la goutte d'eau en décrivant des cycles d'approche-retrait. Durant ces démonstrations, tous les utilisateurs ont pu ressentir les différents efforts d'interaction d'une manière naturelle.

Les résultats mettent ainsi en évidence les performances de la chaîne de micro-téléopération notamment la stabilité et la transparence. Ils montrent également l'avantage de cette chaîne par rapport aux systèmes de micro-téléopération existants, en particulier la combinaison d'un AFM avec une interface classique détaillée dans le chapitre précédent. Outre les limitations imposées par l'interface classique et l'AFM, un compromis est nécessaire pour adapter le couplage bilatéral : soit le couplage est direct et transparent, soit le couplage est indirect et stable

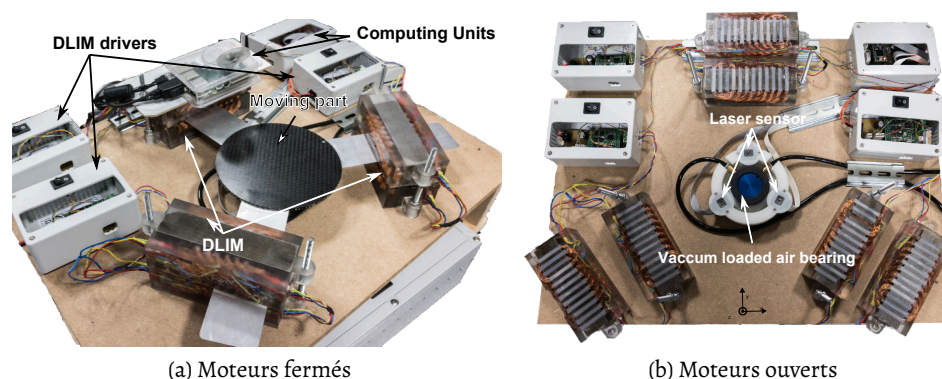


FIGURE II.10 – Présentation de l'interface à trois ddl par actionnement à induction. (DLIM : *double-sided linear induction motor*)

mais la composition d'une transparence parfaite et d'une stabilité inconditionnelle est impossible. Par exemple, pour retransmettre l'effort de pull-in d'une manière transparente, les expériences sont souvent lentes en raison de l'utilisation de gains très élevés au détriment de la stabilité.

En toute généralité, il apparaît que l'approche exposée dans ce travail constitue le premier pas vers des systèmes de micro-téléopération stables et transparents par une conception sur-mesure des éléments maître et esclave. Plusieurs travaux en cours visent à contribuer à cette approche.

4.1 Interface haptique à trois ddl

La conception de l'interface haptique à un degré de liberté présenté ici est difficilement à étendre à plusieurs degrés de liberté. En effet, l'ajout des transmission mécanique augmente l'inertie apparente du système et l'éloigne de l'idéal à l'inertie nulle et raideur infinie. Une nouvelle interface planaire à trois degrés de liberté est proposée. Sa conception repose sur l'utilisation combinée d'un palier à air et de moteurs à induction linéaires doubles. L'utilisateur manipule une plaque en aluminium en lévitation. Cette interface présente une inertie ressentie faible, peu de frottements, et peut produire des forces importantes. Néanmoins, son bon fonctionnement nécessite une commande à bande passante élevée des actionneurs à induction, un développement au-delà de l'état de l'art. Nos études en cours visent à combler cette lacune pour atteindre une réponse de l'ordre de 100 Hz [19].

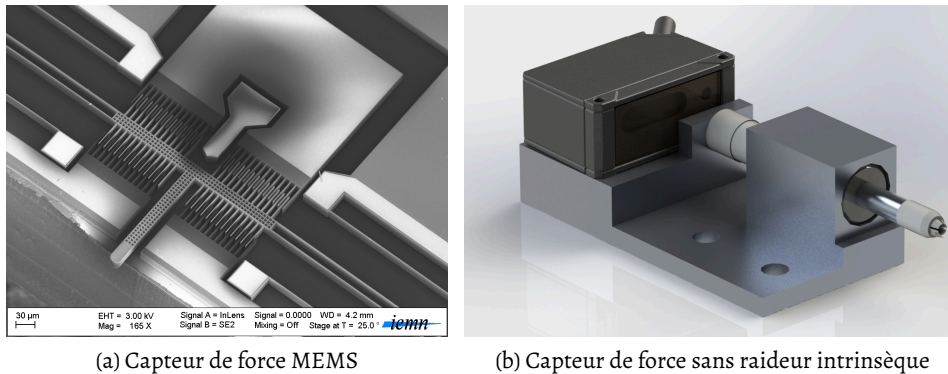


FIGURE II.11 – Les capteurs actifs à l'échelle meso- et micro- métrique[20, 21]

4.2 Capteurs de force actifs

Un autre objectif est l'augmentation de la bande passante du capteur de force conçu pour la mesure d'interactions aux petites échelles, toujours en exploitant une mesure par compensation des forces. Deux approches sont à l'étude pour augmenter la bande passante. Les performances étant pénalisées par une masse trop importantes de la sonde, une première approche propose une réduction de la masse par une diminution des dimensions. Les technologies MEMS sont employées pour réaliser un système sensiblement plus petit et des performances améliorées sont attendues [20]. En parallèle, une autre approche propose une modification de la conception mécanique, toujours dans le but d'augmenter la bande passante par l'élimination des raideurs mécaniques intrinsèques. Nous avons réalisé une preuve de concept, avec une sonde cylindrique sur un palier d'air et sans contact avec le bâti, qui démontre des améliorations intéressantes. Une bande passante de 0 à 250 Hz est validée par des mesures, pour un intervalle de forces théoriques de 0.44 mN to 900 mN. Une perspective intéressante de ce capteur, dont le principe est breveté [21], est la possibilité d'étendre ses performances à plusieurs degrés de liberté par une conception mécanique simple.

Références

- [1] A. v. LEEUWENHOEK et S. HOOLE. *The select works of Antony van Leeuwenhoek : containing his microscopical discoveries in many of the works of nature / translated from the Dutch and Latin editions published by the author, by Samuel Hoole*. London : G. Sidney, 1800, p. 356 (citée page 21).
- [2] G. BINNIG, C. F. QUATE et C. GERBER. « Atomic force microscope ». *Phys Rev Lett* 56 (1986), p. 930-933 (citée page 22).
- [3] G. MILLET, S. HALIYO, S. RÉGNIER et V. HAYWARD. « The ultimate haptic device : First step ». *EuroHaptics conference, 2009 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics 2009. Third Joint*. IEEE, 2009, p. 273-278 (citée page 23).
- [4] A. MOHAND OUSAID, S. HALIYO, S. RÉGNIER et V. HAYWARD. « A Stable and Transparent Microscale Force Feedback Teleoperation System ». *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 20.5 (2015), p. 2593-2603 (citée pages 23, 29).
- [5] A. MOHAND OUSAID, G. MILLET, S. RÉGNIER, S. HALIYO et V. HAYWARD. « Haptic Interface Transparency Achieved Through Viscous Coupling ». *The International Journal of Robotics Research* 31.3 (déc. 2012), p. 319-329. DOI : 10 . 1177 / 0278364911430421 (citée pages 24, 25).
- [6] B. KISCH. *Scales and weights; a historical outline*. New Haven : Yale Univ. Press, 1966. ISBN : 0300006306 (citée page 25).
- [7] S. KOHYAMA, H. TAKAHASHI, S. YOSHIDA, H. ONOE, K. H. SHOJI, T. TSUKAGOSHI, T. TAKAHATA et I. SHIMOYAMA. « MEMS force and displacement sensor for measuring spring constant of hydrogel microparticles ». *International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*. 2017, p. 1040-1043 (citée page 25).
- [8] T. MEI, W. J. LI, Y. GE, Y. CHEN, L. NI et M. H. CHAN. « An integrated MEMS three-dimensional tactile sensor with large force range ». *Sensors and Actuators A : Physical* 80.2 (2000), p. 155-162 (citée page 25).
- [9] M. BOUDAUD, Y. HADDAB et Y. L. GORREC. « Modeling and Optimal Force Control of a Nonlinear Electrostatic Microgripper ». *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 18.3 (juin 2013), p. 1130-1139. ISSN : 1083-4435 (citée page 25).
- [10] M. BOUDAUD, M. G. D. FARIA, Y. L. GORREC, Y. HADDAB et P. LUTZ. « An output feedback LPV control strategy of a nonlinear electrostatic microgripper through a singular implicit modeling ». *Control Engineering Practice* 28 (2014), p. 97-111. ISSN : 0967-0661 (citée page 25).
- [11] W. GAO, L. ZHAO, Z. JIANG, Y. XIA, X. GUO, Z. ZHAO, Y. ZHAO et D. SUN. « A novel MEMS force sensor based on Laterally Movable Gate Array Field Effect Transistor(LMGAFET) ». *International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS)*. 2017, p. 723-727 (citée page 25).

- [12] M. YIN, E. GERENA, C. PACORET, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « High-bandwidth 3D force feedback optical tweezers for interactive bio-manipulation ». *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE. 2017, p. 1889-1894 (citée page 25).
- [13] M. BULUT COSKUN, S. MOORE, S. R. MOHEIMANI, A. NEILD et T. ALAN. « Zero displacement microelectromechanical force sensor using feedback control ». *Applied Physics Letters* 104.15 (2014), p. 153502 (citée page 25).
- [14] A. MOHAND OUSAID, S. HALIYO, S. RÉGNIER et V. HAYWARD. « Micro-force sensor by active control of a comb-drive ». *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2013 IEEE/ASME International Conference on*. IEEE, 2013, p. 612-617 (citée page 26).
- [15] A. MOHAND OUSAID, G. MILLET, S. HALIYO, S. RÉGNIER et V. HAYWARD. « Feeling What An Insect Feels ». *PloS ONE* 9.10 (2014), e108895 (citée pages 27, 34).
- [16] P. COIFFET et A. KHEDDAR. *Téléopération et télérobotique*. Hermès Science publications, 2002 (citée page 28).
- [17] A. MOHAND OUSAID. « Conception d'une chaîne de micro téléopération stable et transparente ». Thèse de doct. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, mar. 2013 (citée page 29).
- [18] A. MOHAND OUSAID, A. BOLOPION, S. HALIYO, S. RÉGNIER et V. HAYWARD. « Stability and Transparency Analysis of a Teleoperation Chain For Microscale Interaction ». *IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA'14*. 2014, p. 5946-5951 (citée page 32).
- [19] A. ORTEGA CABEZON, A. WEILL-DUFLOS, S. HALIYO, S. RÉGNIER et V. HAYWARD. « Linear Induction Actuators for a Haptic Interface : a quasi-perfect transparent mechanism ». *2017 IEEE World Haptics Conference (WHC)*. Juin 2017, p. 529-534. DOI : 10.1109/WHC.2017.7989965 (citée page 36).
- [20] J. CAILLIEZ, M. BOUDAUD, A. MOHAND-OUSAI, A. WEILL-DUFLOS, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Modeling and experimental characterization of an active MEMS based force sensor ». *Journal of Micro-Bio Robotics* 15.1 (juin 2019), p. 53-64. DOI : 10.1007/s12213-019-00115-1 (citée page 37).
- [21] A. WEILL-DUFLOS, S. HALIYO, S. RÉGNIER, O. PETIT et V. HAYWARD. « Capteur de force sans raideur mécanique ». FR-1850231. Jan. 2018 (citée page 37).

CHAPITRE III

ÉTUDE DE L'HUMAIN DANS LA BOUCLE DE TÉLÉOPÉRATION

NOTRE intérêt pour étudier l'humain est né de la volonté de rendre l'interaction humain/machine plus intuitive. Pour bien cerner cette interaction, nous nous sommes naturellement penché sur la façon dont elle est perçue. Nous avons conduit plusieurs études psychophysiques pour évaluer les nouvelles formes d'interaction et d'interfaces proposées dans le cadre des travaux illustrés dans ce chapitre.

Les premiers travaux sur la chaîne de téléopération haptique ont été poursuivis dans l'objectif d'améliorer les performances de l'opérateur par la conception d'assistances et de guides haptiques pour la manipulation par AFM. L'objectif ici était d'aider l'opérateur, en cachant d'une certaine façon la complexité de la physique du micromonde. Ces stratégies d'assistance ont été évaluées en termes de performance et comparées à un couplage transparent. Nous nous sommes aussi intéressés à l'apport de l'haptique dans un cadre pédagogique, pour l'apprentissage des spécificités des petites échelles notamment de l'adhésion.

Cette approche autour de la perception est apparue comme un outil précieux dans tous les travaux s'intéressant à l'interaction. Dans le cadre du développement de l'interface TiMon dédiée à la microscopie haptique présentée dans le chapitre précédent, nous avons procédé à des expériences pour quantifier le gain en transparence et la finesse des ressentis. Nous avons étendu ces travaux pour explorer le lien entre les stimuli et leur interprétation par l'humain. Nous en avons déduit une stratégie pour réduire la puissance du composant continu des stimuli haptiques sans altérer leur perception.

L'étude de l'humain apparaît aussi sur des travaux ultérieurs visant à conce-

voir des nouvelles interfaces. Un dispositif combinant l'affichage visuel et retour haptique en colocalisant les stimuli a été développé et a fait l'objet d'études de perception.

Dernièrement, une approche alternative visant à dématérialiser complètement l'interface maître a été proposée : il s'agissait de détecter les intentions l'utilisateur pour générer en ligne des commandes haut-niveau envoyées au manipulateur esclave, en se passant des dispositifs d'acquisition comme clavier/souris, ou interface haptique.

1 Retour haptique et téléopération

L'échelle microscopique présente encore un grand nombre d'hypothèses et d'inconnues pour la modélisation et la compréhension des phénomènes physiques. Nos travaux cherchent à améliorer la perception de cette échelle pour mieux identifier les phénomènes à l'origine des forces mesurées et ainsi faciliter les opérations de téléopération à retour d'effort. Nos premières réalisations se sont intéressées en particulier à l'utilisation d'un microscope à force atomique et aux stratégies de manipulation en présence des forces d'adhésion, en proposant plusieurs assistances haptiques adaptées. Celles-ci sont évaluées du point de vue de l'utilisateur.

1.1 Guides haptiques pour la micro-téléopération

Dans les tâches de manipulation par AFM on distingue deux types d'opérations. Certaines, comme l'indentation, sont réalisées directement sur le substrat afin d'en modifier sa géométrie. Les autres sont des manipulations d'objets, consistant à les déplacer (saisie, dépose) ou à les modifier (découpe, flexion, torsion). Quand, par exemple, la visualisation de l'échantillon n'est pas satisfaisante, voire impossible ou trompeuse, il devient nécessaire de fournir à l'opérateur une information supplémentaire d'ordre sensoriel comme une aide à la manipulation. Cette information peut l'aider également à mieux percevoir les perturbations afin de s'adapter à l'environnement [1].

Le cycle d'approche-retrait (AR) d'une pointe AFM fait apparaître un comportement hystérétique et asymétrique. Il est présent à chaque contact et est la manifestation la plus saillante de la physique du micromonde. En nous focalisant sur ce phénomène, nous avons proposé divers guides haptiques. Il s'agit de modifier les facteurs d'homothétie en ligne pour altérer le rendu haptique envoyé à l'opérateur, en les multipliant par un coefficient noté c_v .

Ce coefficient peut être une constante différente de celle appliquée aux forces de répulsion ou une fonction non-linéaire de la force mesurée F_m ; il peut être positif

pour diminuer l'attraction due à l'adhésion ou bien négatif afin de repousser l'opérateur lors du retrait [2].

1.2 Évaluation des assistances

Deux des assistances proposées sont superposées pour l'évaluation. Il s'agit du retour inversé, où l'attraction de la pointe vers le substrat est rendu comme une répulsion à l'opérateur. Ceci résulte à un effet attractif quand la poutre est en appui contre le substrat qui causera donc une instabilité : plus la poutre se fléchit contre le substrat, plus l'opérateur sera attiré, augmentant la flèche. Pour compenser cet effet, un décalage est introduit dans le signal de déformation provenant de la poutre. Cette sommation crée une position d'équilibre stable qui correspond à une certaine valeur de force de réaction de la poutre sur le substrat.

La Figure III.1 représente l'évolution du coefficient en effort correspondant, ainsi que la force rendue par ce couplage pour l'exemple d'un cycle AR.

Quand la position de la sonde est au-dessus de la position de repos virtuelle, la force rendue F possède un sens opposé à celui de la force mesurée F_m : $F(F_m) = c_v F_m$ avec c_v négatif. Cette inversion a pour conséquence de transformer le comportement élastique de la poutre à un ressort à raideur négatif : Celle-ci est donc attirée vers le substrat, en augmentant sa flèche. Pour compenser cette attraction artificielle, un ressort virtuel de raideur k_v est introduit tel que une force réelle F_v est un point d'équilibre entre le raideur inversé et celui virtuel. Par conséquent, la position verticale de la pointe correspond à un minimum de potentiel du point de vue utilisateur. Il peut rester à cette position verticale sans fournir d'effort, et générer des

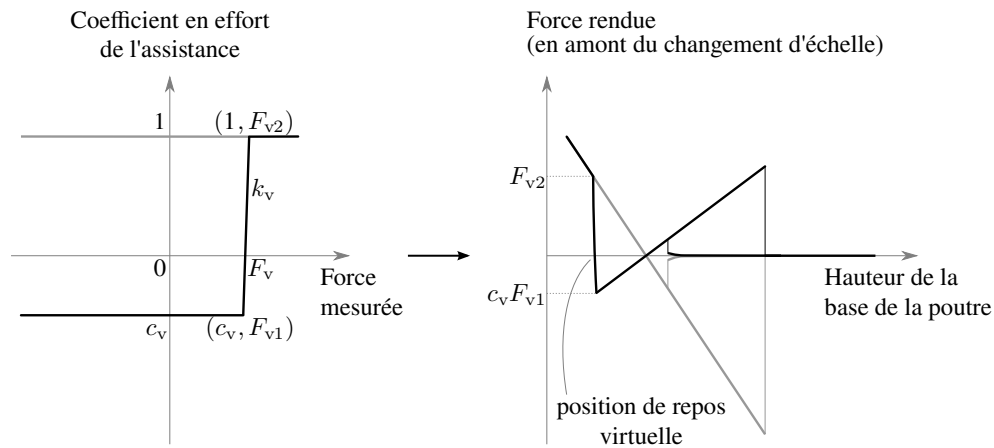


FIGURE III.1 – Assistance haptique combinant le rendu inversé des forces d'attraction et l'ajout d'une position de repos virtuelle. L'exemple pris pour la force mesurée est un cycle AR d'AFM, représenté en gris sur la figure de gauche.

déplacement dans le plan horizontal alors qu'en réalité une force F_v est appliquée sur le substrat.

Cette assistance peut avoir différents intérêts selon la tâche exécutée. Elle est particulièrement utile pour par exemple l'indentation et la gravure, ou encore pour la dépose par roulement qui a été déjà mentionnée : la position de repos virtuelle peut valider complètement ou partiellement la condition en effort requise par la pré-charge. Le rendu inverse peut améliorer le confort de manipulation en diminuant la fatigue due au retour haptique. Pour une dépose par roulement, une force est appliquée automatiquement sur l'objet à la position de repos de l'interface haptique, ce qui garanti le roulement au lieu du glissement.

Afin d'évaluer l'intérêt de cette assistance, deux expériences ont été menées, portant chacune sur une stratégie de micromanipulation simulées : Saisie et dépose par adhésion ou par roulement. Le simulateur a été construit avec l'intégration des modèles physiques des forces du micromonde (van der Waals, capillaire et électrostatique) et de la mécanique de déformation de la poutre dans un moteur physique, fournissant un affichage de réalité virtuelle [2, 3].

Les expériences comparent trois conditions : sans retour haptique ; avec retour haptique avec ou sans l'assistance, respectivement C_1 , C et C_3 . Les trois critères de performances sont le temps d'exécution, la forme de l'assemblage pyramidal et la précision de son positionnement. De plus, un questionnaire a relevé les impressions

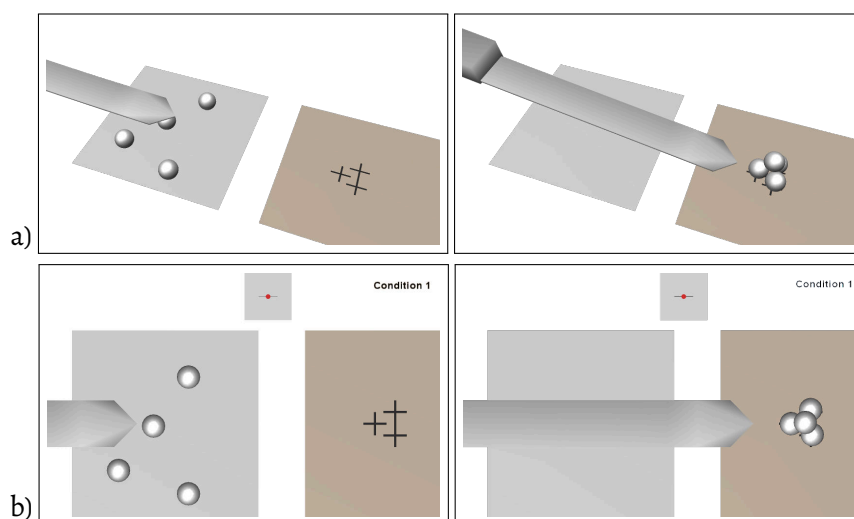


FIGURE III.2 – Évaluation des assistances dans un environnement virtuel : vue (a) en perspective et (b) de dessus pour la tâche de saisie et dépose par adhésion. Les illustrations à gauche montrent la scène avec les quatre billes réparties sur le substrat de saisie et celles à droite montrent les quatre billes déposées sur le substrat de dépôt en pyramide [2, 3].

subjectives des sujets. Sept sujets ont participé à l'étude et chaque condition est testée 9 fois, pour un total de 27 essais.

Ces expériences n'ont pas décelé de différences significatives en termes de performance objective entre les trois conditions quand on prend l'ensemble des 27 essais de chaque sujet. Il est intéressant de voir que les sujets ont pourtant perçu des différences significatives alors que l'analyse objective n'en montre pas. Les sujets ont peut-être retenu leurs meilleures performances pour répondre aux questions. Ainsi, si on relève les 3 meilleurs temps obtenus par chaque sujet lors des 27 essais, on en trouve 2 avec C1, 8 avec C2 et 11 avec C3. Ces résultats concordent avec l'impression de rapidité perçue par les sujets.

Les résultats suggèrent aussi qu'il existe un effet d'apprentissage sur le temps d'exécution de la tâche. Cet effet est d'autant plus important dans les cas avec haptique et assistance.

1.3 La compréhension des phénomènes nanophysiques

Un domaine de recherche de plus en plus important explore l'efficacité des simulations de Réalité Virtuelle dans l'amélioration de la compréhension par les étudiants de sujets scientifiques complexes. Les travaux récents utilisent la RV dans des contextes d'apprentissage des nanosciences, tels que la morphologie virale en biologie [4], le phénomène d'approche-retrait en microscopie de force atomique [5] ou le décrochage protéine-ligand en biologie moléculaire. [6].

En nous fondant sur notre expérience du micromonde, une méthode pédagogique a été proposée pour comprendre les phénomènes physiques mis en jeu par un microscope à force atomique. Notre étude s'intéresse au processus de toucher du nanomonde (la courbe d'AR), car il implique l'ensemble des phénomènes les plus présents. Le but de notre évaluation est de déterminer l'apport de l'utilisation d'une interface haptique et d'une analogie graphique sur la compréhension de ces phénomènes par des étudiants. L'analyse porte à la fois sur le temps requis et la qualité de la compréhension, en utilisant diverses techniques d'analyse : dessins, informations verbales, questions à choix multiples.

À partir d'une simulation du cycle approche-retrait d'une poutre AFM, nous avons comparé l'influence du retour haptique mais aussi d'une représentation graphique assimilant la poutre à un aimant porté par un ressort comme illustré sur la figure III.3. Les 44 sujets étaient des étudiants sans connaissance des phénomènes physiques du micromonde et donc de l'adhésion. Leur restitution de l'explication du phénomène, et avec la variance de plusieurs paramètres comme la raideur de la poutre et les forces en jeu (van der Waals, capillaire, électrostatique)

Nous avons effectué une analyse approfondie s'intéressant jusqu'aux modalités cognitives d'intégration [3]. Les résultats ont montré que les deux facteurs étudiés

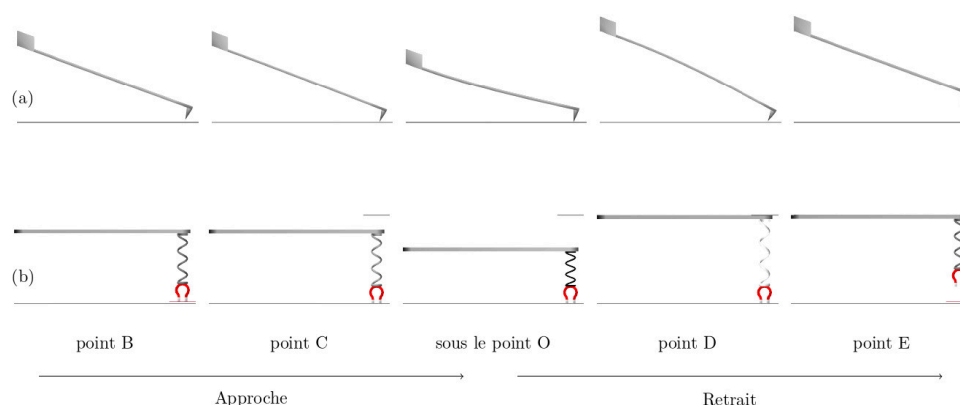


FIGURE III.3 – Représentations virtuelles de la sonde AFM, au cours des phases d'approche, de contact et de retrait dans le module pédagogique : (a) Poutre réaliste, (b) Analogie aimant-ressort.

ont été appréciés par les sujets et ont eu une influence sur leur perception et leur compréhension du phénomène approche-retrait.

L'ajout du retour haptique a augmenté l'attention des sujets sur les forces impliquées dans le cycle d'AR et a amélioré la perception de l'influence de la raideur de la poutre, en apportant plus d'informations mais ceci au détriment du temps de traitement et de décision. L'analogie aimant-ressort a aidé les sujets dans les premières phases de compréhension à lier le phénomène AR à sa courbe force-distance. Elle semble donc être une analogie adaptée à l'enseignement sur l'AFM, ou plus généralement sur l'hystérésis, dans un cours d'introduction.

2 Les Interfaces Humaine/Machine

La perception de l'humain est un facteur primordial dans les interfaces humain/machine, et particulièrement dans cas des interfaces haptiques. Dans le cadre de la validation de l'interface à un ddl mentionnée dans le chapitre précédent, nous avons démontré une première étude de perception ses performances en transparence étaient accrues [7].

Motivés par cette démarche nous nous sommes intéressés aux deux cas de l'impact de la perception sur l'interaction. Le premier concerne la façon dans les stimuli kinesthésiques sont interprétés par l'humain, et le second l'influence de la colocalisation des retours visuel et haptique.

2.1 Adaptation kinesthésique

Dans le but d'optimiser les performances des interfaces haptiques, nous avons étudié le fonctionnement du système sensoriel des ressentis d'efforts. Cette étude définit les limites de performances humaines à la perception de variations de forces. Il est postulé que l'homme est plus sensible à des variations qu'à une valeur constante continue et ce composant continu est affecté par l'adaptation sensorielle.

L'adaptation est un phénomène présent dans beaucoup de systèmes sensoriels. Ce phénomène caractérise la capacité d'un sens à changer de propriétés en fonction de son environnement. Une manifestation classique de l'adaptation se présente sous la forme d'une désensibilisation ou une re-sensibilisation en fonction du niveau d'intensité de stimuli forts ou faibles. Notre vision s'adapte par exemple en une dizaine de minutes à une intensité lumineuse faible ou forte. L'adaptation sensorielle dans le système vestibulaire présente une importance particulière dans le domaine de la réalité virtuelle en général, et pour la conception de simulateurs de pilotage en particulier [8]. Lors de la simulation d'une accélération dans une direction, la plateforme se déplace rapidement puis revient lentement à sa position initiale.

L'adaptation reste cependant très peu étudiée concernant le domaine haptique. Des études s'intéressent à l'adaptation dans le cas de l'exploration de textures [9] ou l'adaptation à des vibrations [10]. Cependant il semble que l'étude de l'adaptation à des forces reste inexplorée.

L'hypothèse de cette étude est l'existence d'une adaptation sensorielle dans la perception kinesthétique des forces, caractérisée par la capacité à ressentir les variations de force plutôt que la composante continue. Cette hypothèse pourrait être une des raisons justifiant que la masse d'un objet soit identifiée plus précisément en le déplaçant et en le secouant que lorsqu'il est simplement posé dans la main [11, 12]. La vérification de cette hypothèse peut se faire en montrant qu'il est possible de simuler une force constante avec une force diminuant au cours du temps.

Nous avons conçu une expérience psychomotrice où l'opérateur subit un stimulus constant. Cette force est par la suite diminuée suivant une loi exponentielle. En considérant une amplitude de départ A , l'équation de la force F pendant la diminution est :

$$F(t) = A \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right), \quad \text{avec } \tau \text{ défini comme la constante de temps.}$$

Une expérience pilote avec 16 sujets, puis une expérience plus complète avec 48 sujets sont effectuées. Le protocole consiste à tester de différentes valeurs de τ pour définir une valeur en dessous du seuil de détection de l'humain. Un algorithme stochastique, *Accelerated Stochastic Approximation (ASA)* [13, 14] est utilisé pour la détermination de τ .

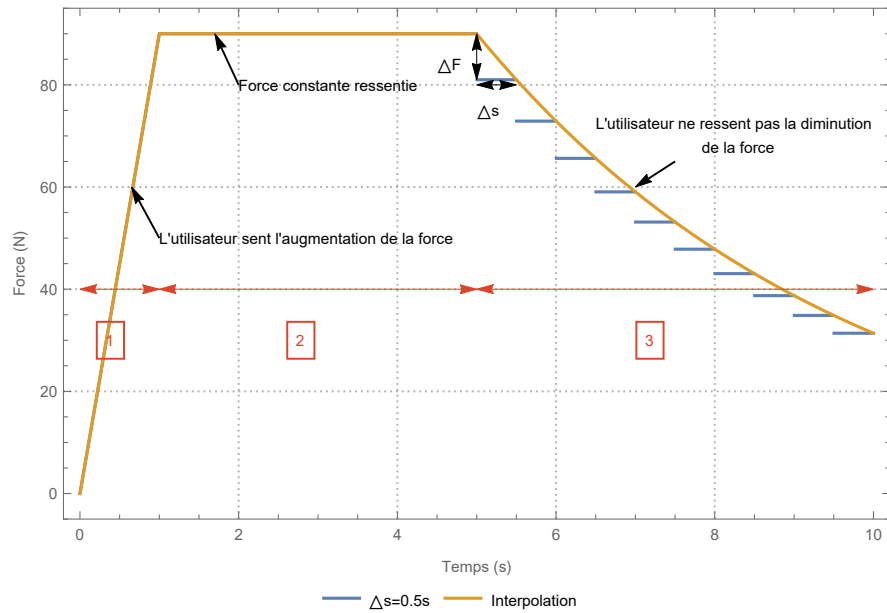


FIGURE III.4 – Expérience psychomotrice d'adaptation : profil de stimulus utilisé dans l'expérience. La force est décruée de ΔF pour un pas de Δs , avec $\tau = \frac{-\Delta s}{\ln(1-\Delta F)}$

Un premier résultat est la présence d'un paramètre de sensibilité psychomoteur, qui semble être une caractéristique de l'individu. Une modélisation d'une série de fonctions psychométriques est proposée en figure III.5. Elle représente pour chaque valeur de τ de la probabilité qu'une personne détecte la variation de force, en fonction de la sensibilité du sujet.

La moyenne représentée par une courbe noire est la moyenne en chaque valeur de τ des probabilités de toutes les courbes psychométriques. Cette courbe représente donc pour chaque valeur de τ la probabilité que le stimulus soit détecté. Ainsi par exemple pour une valeur de $\tau = 20$ s, la probabilité que le stimulus soit détecté est uniquement de 0.2. En revanche une personne d'une sensibilité correspondant au 80^e centile aura une probabilité de 0.5 de sentir la variation.

Ces résultats ont permis de proposer un filtre de premier ordre de pulsation $\omega_c = \frac{1}{\tau} \approx 0.071 \text{ rad s}^{-1}$ et donc de fréquence de coupure $f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} \approx 0.011 \text{ Hz}$, qui ne change pas le ressenti d'une majorité de personnes.

Une commande exploitant ces résultats offre une sensation d'efforts importants en continu, comme par exemple un mur rigide, sans pour autant générer réellement des forces équivalentes. Une propriété corollaire de l'utilisation de cette commande est la réduction de l'énergie consommée ou encore éviter la surchauffe des actionneurs.

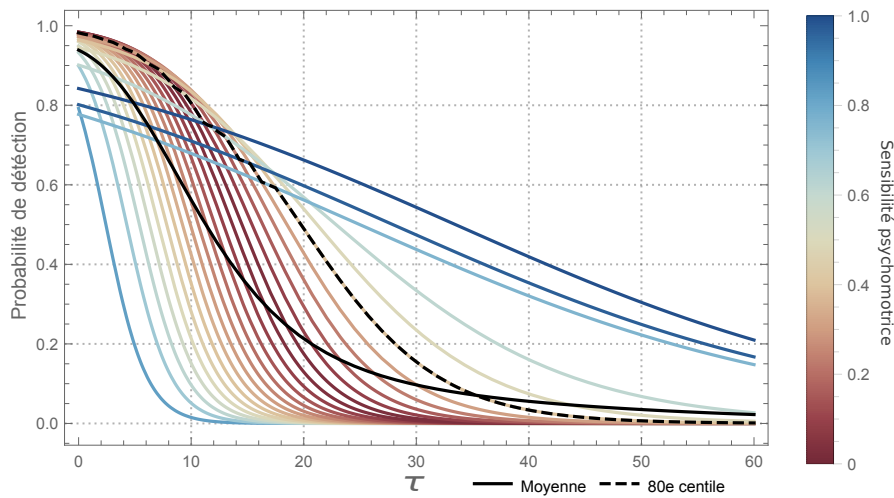


FIGURE III.5 – Fonctions psychométriques généralisées de détection de variation en fonction de la sensibilité psychomotrice

Ces résultats ont récemment fait l'objet d'un brevet et des pistes de transfert technologique sont en cours d'étude [15].

2.2 Colocalisation Visio-Haptique

Au cours de nos travaux nous avons souvent utilisé simultanément les retours visuel et haptique, provenant chacun d'un dispositif différent. Ce cas est aussi très fréquent dans les interfaces humain/machine pour la réalité virtuelle ou autres applications en téléopération : l'environnement distant ou virtuel est affiché sur un ou plusieurs écrans face à l'opérateur qui contrôle un avatar dans la scène au moyen d'un dispositif haptique placé au niveau de sa main. Ainsi l'utilisateur visualise un objet virtuel à une certaine localisation mais ressent des efforts à une autre. La configuration est donc appelée délocalisée. Elle est simple à implémenter mais pose potentiellement un problème de transmission de l'information car deux entités différentes apportent des informations sur un objet supposé être unique.

Son implémentation est un parti pris car un retour visuel et haptique dit "colocalisé" est techniquement possible. Dans ce cas, l'avatar virtuel serait aussi haptiquement tangible. La transmission d'information est alors plus réaliste, mais matériellement plus contraignante à mettre en place.

Dans un premier temps, nous avons conçu et réalisé une interface qui colocalise les retours haptique et visuel. Par la suite, ce dispositif a servi à étudier les performances des utilisateurs au cours d'opérations élémentaires en configurations colocalisée et délocalisée.

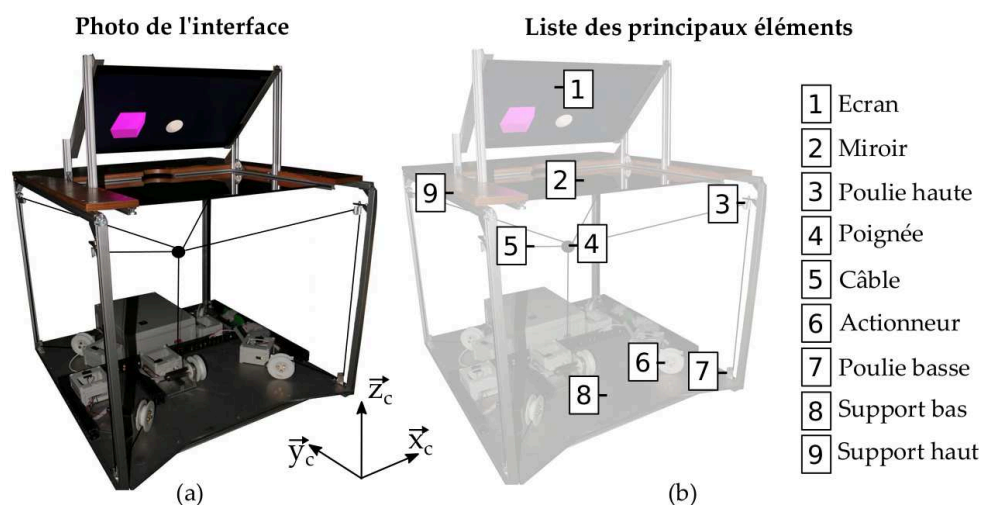


FIGURE III.6 – L'interface *FishTank* composée d'un dispositif haptique à 5 câbles et d'un système d'affichage écran/miroir (a). Les différents éléments qui la constituent sont détaillés (b).

Interface colocalisée à câbles

Superposer un affichage pour la vision et un système mécanique pour l'haptique nécessite une conception spécifique. Pour l'affichage, afin d'éviter d'être gêné par l'écran, celui-ci est placé à 45 degrés, au-dessus d'un semi-miroir horizontal. Tout le volume en dessous du miroir, où l'image réfléchie de l'écran apparaît à l'utilisateur, reste accessible à sa main. Une interface haptique composée de 5 câbles est insérée dans ce volume, afin de pouvoir superposer sa poignée et l'avatar manipulé dans l'affichage. Cette conception est issue d'une étude d'optimisation mécanique et s'accompagne de toute l'électronique et des schémas de commande nécessaires à son fonctionnement, en impédance et en admittance [16].

L'interface, baptisée *FishTank*, possède un large espace de travail, une haute transparence haptique grâce aux faibles inerties de la transmission mécanique [17], son coût est faible et elle peut être couplée avec tout environnement virtuel.

Pour augmenter davantage la transparence, nous avons proposé une stratégie de raideur nulle de câble [18]. Il s'agit de relâcher la tension des câbles en laissant l'opérateur manipuler la poignée en toute liberté, et de les tendre juste au moment du rendu haptique. Cette stratégie a aussi fait l'objet d'une étude psychomotrice. Elle a montré que la commande par variation de raideur améliore bien l'interaction en phase libre comparée à la commande classique en impédance, avec des déplacements deux fois plus rapides. De plus les vibrations et contraintes sont moins ressenties par les participants d'après un questionnaire subjectif. Néanmoins,

la bonne implémentation de cette commande nécessite de prévoir en avance le moment où un effort doit être restitué, afin d'éviter toute latence de rendu haptique. Cette prédiction reste difficile à garantir avec une bonne robustesse hormis dans les cas les plus simples.

Étude de la colocalisation

En utilisant cette interface nous avons conduit une étude comparative d'une configuration colocalisée et de deux délocalisées, pour évaluer si les contraintes technologiques de la colocalisation en valent la peine du point de vue de l'interaction. Cette dualité des configurations délocalisées fait la part de l'influence de la localisation et de la posture de l'opérateur : ce paramètre n'avait pas précédemment été pris correctement en compte dans la littérature.

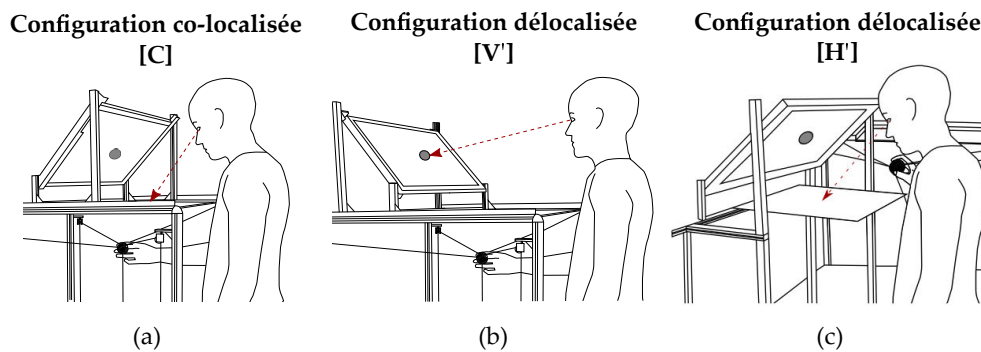


FIGURE III.7 – Les tâches seront réalisées par les participants dans trois configurations. Une configuration colocalisée [C] prise comme référence (a). Une configuration délocalisée [V] où le participant conserve la même posture mais observe l'environnement virtuel à une autre localisation (b). Et une configuration délocalisée [H] où le participant observe la scène virtuelle à la même localisation mais manipule sur le côté (c).

Les critères de performance sont le temps d'exécution, la précision du geste et la stabilité au contact. Un questionnaire subjectif est aussi utilisé. Les deux tâches évaluées sont la manipulation par poussée d'un objet inertiel, et l'exploration de la forme d'un volume tangible mais invisible. 36 sujets ont pris part à l'expérience. Les résultats sont analysés statistiquement par ANOVA [19], mais aussi par une approche bayésienne [20].

Un temps d'exécution plus court en configuration colocalisée que délocalisées est ressorti de l'expérience. Ce résultat a déjà été observé dans une tâche de pointage

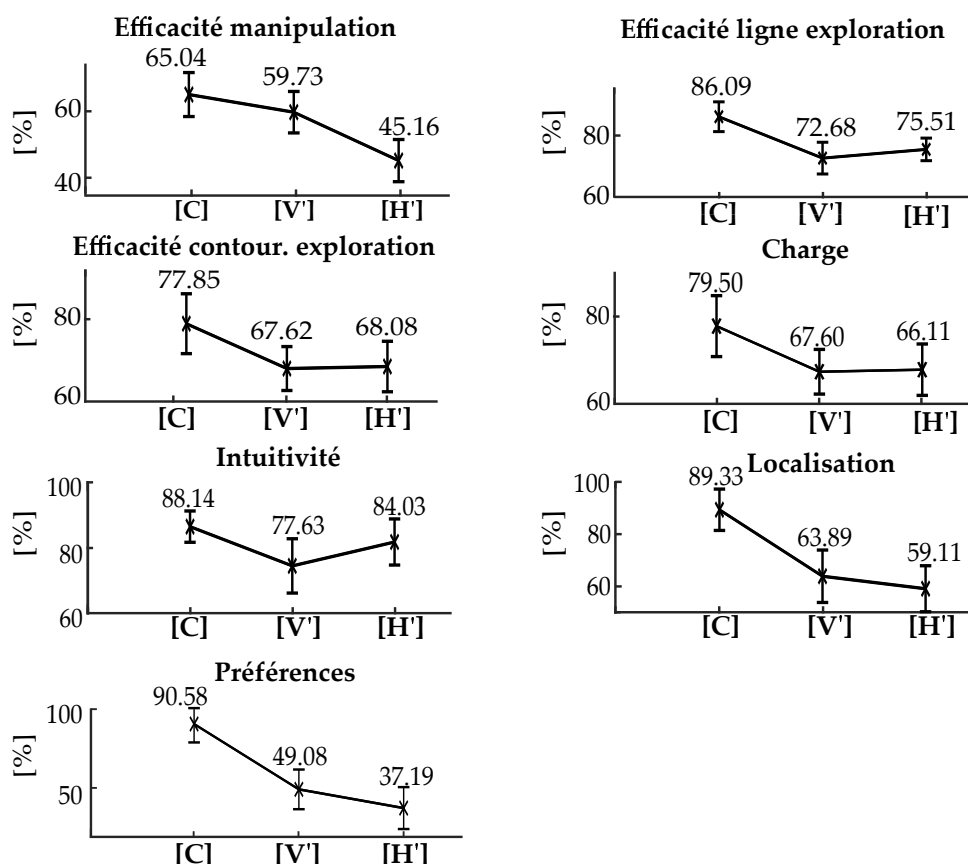


FIGURE III.8 – Les résultats du questionnaire après traitement des données sont présentés pour chaque configuration, [C], [V'] et [H']. Les barres d'erreur représentent l'intervalle de confiance à 95%.

[21] et de laparoscopie [22]. Il est ici confirmé dans le cadre de la manipulation d'un objet dynamique et d'une exploration.

Un autre résultat concerne la plus grande précision en configuration colocalisée. Il avait été constaté indirectement dans l'expérience de laparoscopie [22], dans des tâches de pointage sans retour haptique [23, 24] au cours d'un suivi de spirale [25] ou encore dans l'étude sur la raideur des câbles menée précédemment. Néanmoins, des résultats contradictoires avaient été trouvés au cours d'une tâche de pointage de cube [25].

Une troisième conclusion de l'expérience est une plus grande stabilité en configuration colocalisée que délocalisées, qui est reflétée par une variance en effort plus faible et moins d'essais ratés dans la tâche de manipulation. À notre connaissance, la difficulté à accomplir une opération avec un objet dynamique n'avait été relevée que dans une tâche de jonglerie [21]. Elle est établie ici dans le cadre d'une tâche plus

élémentaire.

Finalement, le même problème de stabilité a été détecté entre les deux configurations délocalisées. La seule étude relative dans la littérature est une tâche d'exploration d'élasticité [26] dans laquelle deux configurations délocalisées assez similaires à celles testées ici avaient été confrontées.

En plus de ces résultats objectifs, le questionnaire utilisateur fourni quelques déductions intéressantes, illustrées sur la figure III.8. Une préférence nette pour la configuration colocalisée apparaît. De plus, les utilisateurs estiment avoir eu des performances meilleures, même pour des cas où une différence significative n'est pas observée. La configuration colocalisée génère donc moins de charge cognitive et est interprétée comme plus facile par les utilisateurs.

3 Dématérialisation de l'interface utilisateur

S'intéresser à l'humain et à son rôle dans une boucle de télémanipulation a initié une réflexion sur sa façon d'appréhender l'interface. En effet, toutes les interfaces impliquent l'utilisation d'un dispositif matériel. Dans la plupart des cas il s'agit de systèmes simplistes, autour des appareils habituels comme le clavier et la souris. Utiliser ces interfaces pour effectuer des tâches complexes est ardu, et un apprentissage de comment accéder à des fonctions avancées est nécessaire.

Tout au long de mes travaux j'ai poursuivi l'objectif de rendre ces interfaces plus intuitives et naturelles : d'abord en les augmentant avec l'haptique, puis en explorant les pistes comme la colocalisation.

Une approche alternative de cette démarche serait de se débarrasser des interfaces matérielles. Du point de vue de l'utilisateur, l'interaction sera calqué sur un cas mimant une situation réelle. Par exemple, pour faire saisir un objet au robot, il saisira réellement sa représentation dans un environnement virtuel. Ses actions seront interprétées pour générer à la volée les commandes à envoyer au système esclave, proposant ainsi une modalité de communication intuitive et peu contraignante.

Il s'agit ici d'une problématique d'acquisition de commandes, en complément de nos travaux précédemment décrits qui se focalisait plutôt sur la restitution d'informations par l'haptique. L'étude s'est donc attachée à proposer de nouvelles méthodes et outils non symboliques dédiés à la détection des décisions de l'opérateur. Celles-ci seront couplées avec une bibliothèque de commandes élémentaires automatisées, faciles à implémenter sur le robot esclave. Par exemple, une tâche élémentaire de saisie peut être déclenchée une fois l'intention de saisir un objet à

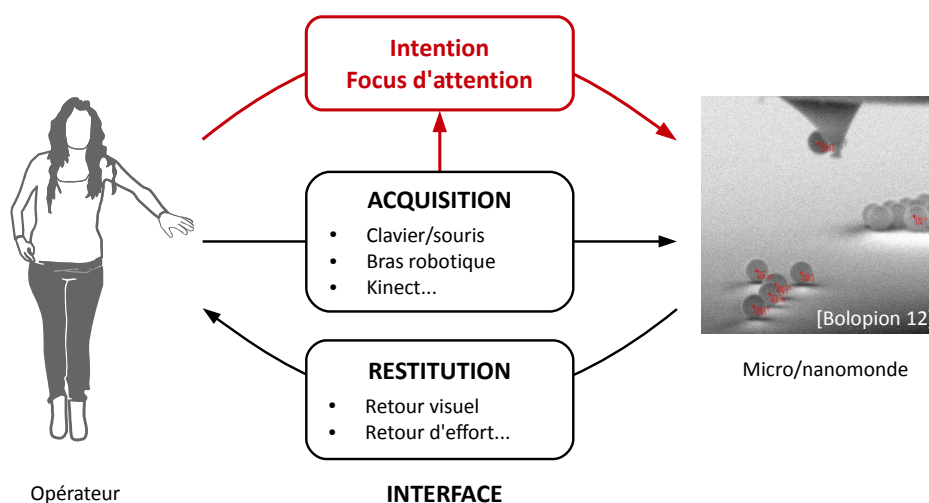


FIGURE III.9 – Interface naturelle par détection de décisions. Le matériel d'acquisition est remplacé par l'interprétation de l'intention de l'opérateur.

une position connue est identifiée : l'opérateur n'a pas besoin de contrôler lui-même la trajectoire, ni l'effort de serrage ; ces actions ont été automatisées maintes fois dans la littérature roboticienne.

La synthèse d'une interface naturelle et intuitive pour interagir avec le micro-monde par l'intermédiaire de la réalité virtuelle est donc entreprise. Ici, une interface est considérée comme naturelle si elle ne nécessite pas de fournir d'instruction à l'opérateur pour être fonctionnelle. Il s'agit donc d'interpréter le comportement naturel humain lors de tâches de manipulation.

Pour créer cette interface, la méthode choisie consiste à déterminer la cible et la tâche visées par l'utilisateur en s'inspirant de modèles cognitifs computationnels de son focus d'attention et de son intention. Ces modèles reposent sur des signaux de bas-niveau extractibles par les capteurs, notamment la vision [27, 28].

3.1 Détection d'intention

L'intention est une notion de haut niveau, qui ne peut pas être extraite directement à partir des capteurs. Elle est donc modélisée à partir de signaux comportementaux extractibles de bas niveau. Un modèle cognitif computationnel de reconnaissance de l'intention pendant une interaction humain/humain a orienté notre approche [29]. Il s'agit de s'inspirer du fonctionnement du cerveau humain, capable d'affecter du sens aux actions non symboliques d'autrui. De plus, l'être humain reconnaît le but d'une action de manière prédictive, avant que celle-ci ne soit terminée. Cet aspect prédictif est une propriété intéressante pour créer une

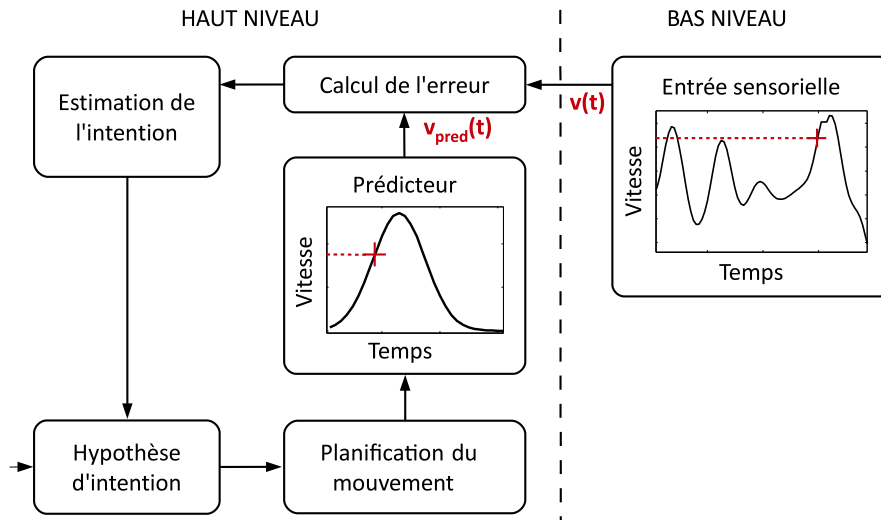


FIGURE III.10 – Modèle de détection d'intention. Une hypothèse d'intention est vérifiée en comparant le profil de vitesse observée à un profil prédit par la loi de Fitts.

interface qui anticipe les actions de l'utilisateur. Une telle interface serait capable d'éliminer une source importante de latence.

Le modèle cognitif de reconnaissance d'intention postule qu'un observateur émet une hypothèse d'intention en observant son interlocuteur, qu'il valide – ou pas – en comparant le mouvement de ce dernier à son propre planification moteur [29]. Dans les tâches de manipulation, le signal bas-niveau le plus pertinent pour cette observation semble être la vitesse de la main, qui obéit à la loi de Fitts pendant un geste ciblé [30]. Un estimateur est construit pour exploiter ce modèle, illustré sur la figure III.10.

Ce modèle est implémenté dans une expérience pour détecter la saisie et la dépose des objets dans un environnement virtuel mimant une scène de micromanipulation (figure III.11). Une évaluation utilisateur est conduite et 540 tâches de saisie et dépose sont collectées.

Les performances obtenues sont significativement améliorées en termes de succès et de durée de la tâche. Par ailleurs l'analyse statistique a montré que les profils de vitesse du prédicteur sont indépendants de l'opérateur donc peuvent être utilisé de façon générique. De plus, le questionnaire utilisateur montre une préférence significative des utilisateurs par rapport à l'approche classique par reconnaissance de gestes [31, 32].

Notre approche basée sur le comportement apparaît comme une solution inté-

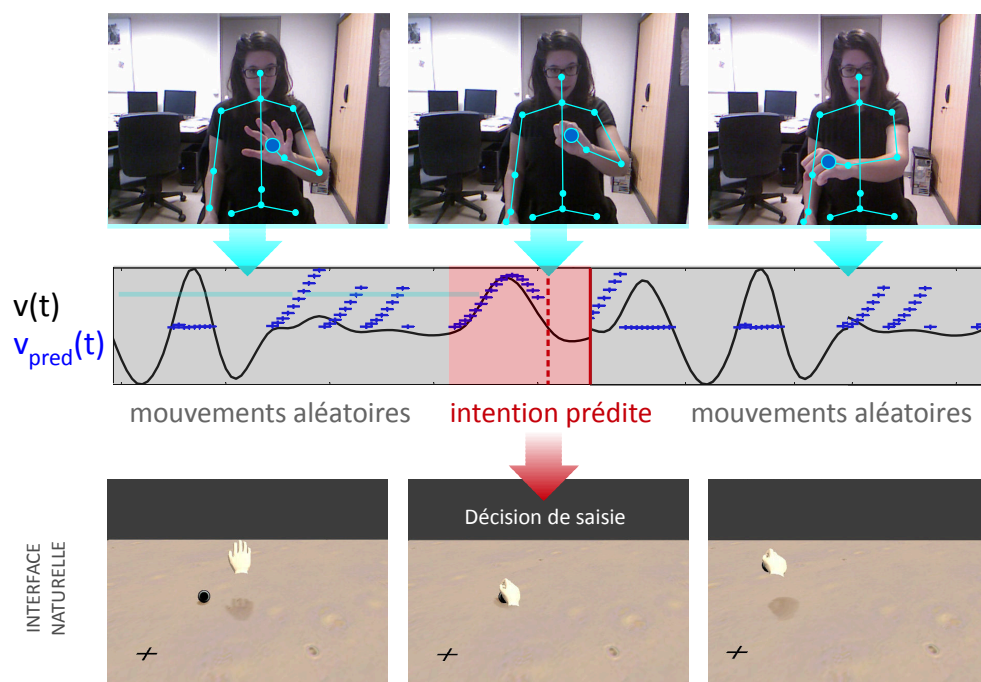


FIGURE III.11 – Évaluation de la détection d'intention. La vitesse de la main d'utilisateur est captée par un Kinect. L'estimateur compare son profil à sa prédiction pour valider l'hypothèse de l'intention de saisie.

ressante pour une interaction plus naturelle pour l'opérateur. Il est important de noter que la méthode est indépendante de la pose de la main et des doigts, puisqu'il suffit d'évaluer la vitesse de la main. Ainsi, cette approche est généralisable à de nombreux autres types d'interfaces, par exemple à une souris ou un bras haptique.

4 Synthèse

L'étude de l'humain est devenue un pan essentiel de mes travaux au fil des années. Ce chapitre a donné quelques exemples où cette étude a joué un rôle important. La méthodologie adoptée consiste en évaluations utilisateur par des expériences psychomotrices, et leurs analyses par des techniques objectives statistiques, et subjectives par des questionnaires. Ces outils d'étude de l'interaction humaine font dorénavant partie intégrante de tous mes travaux touchant à l'interactivité.

Cette démarche est utilisée pour valider les solutions proposées pour plusieurs applications, notamment les performances des interfaces haptiques [7, 18], des guides virtuelles d'assistance [2] et des modules pédagogiques [3]. De plus, nous avons aussi fait appel à ces outils plus en amont dans la phase de conception pour

justement aboutir à des solutions plus adaptées [31, 32].

Finalement, divers systèmes expérimentaux ont été mis en contribution pour explorer les mécanismes sensorimoteurs de l'Humain, par exemple pour démontrer l'existence de l'adaptation dans le sens haptique [15], ou encore l'influence de la colocalisation des stimuli viso-haptique et leur intégration cognitive [16].

Références

- [1] S. HALIYO et S. RÉGNIER. « An overview on robotic micromanipulation ». *Robotics : State of the Art and Future Trends*. Sous la dir. de G. LEGNANI et I. FASSI. ISBN : 978-1-62100-403-5. Nova Science Publishers, 2011, p. 319-351 (citée page 42).
- [2] G. MILLET, S. HALIYO, S. RÉGNIER, A. LÉCUYER et J. BURKHARDT. « A study on the perception of nanoscales through Virtual Reality ». *Communication aux 2nd journées de l'AFRV*. 2007, p. 6 (citée pages 43, 44, 56).
- [3] G. MILLET, A. LÉCUYER, J. BURKHARDT, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Improving Perception and Understanding of Nanoscale Phenomena Using Haptics and Visual Analogy ». *Haptics : Perception, Devices and Scenarios*. Sous la dir. de M. FERRE. T. 5024. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, juin 2008, p. 847-856. DOI : 10.1007/978-3-540-69057-3_107 (citée pages 44, 45, 56).
- [4] M. G. JONES, J. MINOGUE, T. R. TRETTER, A. NEGISHI et R. TAYLOR. « Haptic augmentation of science instruction : Does touch matter? » *Science Education* 90 (jan. 2006), p. 111-123. DOI : 10.1002/sce.20086 (citée page 45).
- [5] F. MARCHI, S. MARLIERE, D. URMA, J.-L. FLORENS, J. CHEVRIER, C. CADOZ et A. LUCIANI. « Interactive learning of nanophysics phenomena ». *m-ICTE2005*. Cáceres, Spain, juin 2005, p. 510-515 (citée page 45).
- [6] P. B. PERSSON, M. D. COOPER, L. A. E. TIBELL, S. AINSWORTH, A. YNNERMAN et B.-H. JONSSON. « Designing and Evaluating a Haptic System for Biomolecular Education ». *IEEE Virtual Reality Conference*. Charlotte, NC, USA, mar. 2007, p. 171-178 (citée page 45).
- [7] A. MOHAND OUSAID, G. MILLET, S. RÉGNIER, S. HALIYO et V. HAYWARD. « Haptic Interface Transparency Achieved Through Viscous Coupling ». *The International Journal of Robotics Research* 31.3 (déc. 2012), p. 319-329. DOI : 10.1177/0278364911430421 (citée pages 46, 56).
- [8] M. A. NAHON et L. D. REID. « Simulator motion-drive algorithms-A designer's perspective ». *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 13.2 (1990), p. 356-362. DOI : 10.2514/3.20557 (citée page 47).
- [9] M. HOLLINS, F. LORENZ et D. HARPER. « Somatosensory Coding of Roughness : The Effect of Texture Adaptation in Direct and Indirect Touch ». en. *The Journal of Neuroscience* 26.20 (mai 2006), p. 5582-5588. ISSN : 0270-6474, 1529-2401. DOI : 10.1523/JNEUROSCI.0028-06.2006 (citée page 47).
- [10] S. J. BENSMAÏA, Y. Y. LEUNG, S. S. HSIAO et K. O. JOHNSON. « Vibratory Adaptation of Cutaneous Mechanoreceptive Afferents ». *Journal of neurophysiology* 94.5 (nov. 2005), p. 3023-3036. ISSN : 0022-3077. DOI : 10.1152/jn.00002.2005 (citée page 47).
- [11] E. H. WEBER. « The sense of touch (HE Ross, Ed. and Trans.) » *London : Academic*. (Original work published 1834) (1978) (citée page 47).
- [12] H. E. ROSS, E. SCHWARTZ et P. EMMERSON. « Mass discrimination in weightlessness improves with arm movements of higher acceleration ». *Naturwissenschaften* 73.7 (1986), p. 453-454 (citée page 47).

- [13] H. KESTEN. « Accelerated stochastic approximation ». *The Annals of Mathematical Statistics* (1958), p. 41-59 (citée page 47).
- [14] A. J. ANDERSON et C. A. JOHNSON. « Comparison of the ASA, MOBS, and ZEST threshold methods ». eng. *Vision Research* 46.15 (juil. 2006), p. 2403-2411. ISSN : 0042-6989. DOI : 10.1016/j.visres.2006.01.018 (citée page 47).
- [15] A. WEILL-DUFLOS, S. HALIYO, S. RÉGNIER et V. HAYWARD. « Interface Haptique à Adaptation de Perception ». FR-1860422. 2018 (citée pages 49, 57).
- [16] J. SAINT-AUBERT, S. RÉGNIER et S. HALIYO. « Cable Driven Haptic Interface for Co-localized Desktop VR ». 2018 *IEEE Haptics Symposium*. San Francisco, USA, mar. 2018, p. 1-6 (citée pages 50, 57).
- [17] R. KURTZ et V. HAYWARD. « Dexterity measures with unilateral actuation constraints : the n+ 1 case ». *Advanced robotics* 9.5 (1994), p. 561-577 (citée page 50).
- [18] J. SAINT-AUBERT, S. RÉGNIER et S. HALIYO. « Slack strategy for cable driven haptic interfaces ». 2017 *IEEE World Haptics (WHC)*. 2017, p. 581-586. DOI : 10.1109/WHC.2017.7989966 (citée pages 50, 56).
- [19] M. BRAUER et G. MCCLELLAND. « L'utilisation des contrastes dans l'analyse des données : Comment tester les hypothèses spécifiques dans la recherche en psychologie? » *L'année Psychologique* 105.2 (2005), p. 273-305 (citée page 51).
- [20] E.-J. WAGENMAKERS, M. MARSMAN, T. JAMIL, A. LY, J. VERHAGEN, J. LOVE, R. SELKER, Q. F. GRONAU, M. ŠMÍRA, S. EPSKAMP et al. « Bayesian inference for psychology. Part I : Theoretical advantages and practical ramifications ». *Psychonomic bulletin & review* 25.1 (2018), p. 35-57 (citée page 51).
- [21] D. SWAPP, V. PAWAR et C. LOSCOS. « Interaction with co-located haptic feedback in virtual reality ». *Virtual Reality* 10.1 (2006), p. 24-30 (citée page 52).
- [22] D. D. LEV, R. ROZENGURT, T. GELFELD, A. TARCHENSHVILI et M. REINER. « The effects of 3D collocated presentation of visuo-haptic information on performance in a complex realistic visuo-motor task ». *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*. Springer. 2010, p. 432-437 (citée page 52).
- [23] M. J. FU, A. D. HERSHBERGER, K. SANO et M. C. ÇAVUŞOĞLU. « Effect of visuo-haptic co-location on 3D Fitts' task performance ». *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE. 2011, p. 3460-3467 (citée page 52).
- [24] R. J. TEATHER, R. S. ALLISON et W. STUERZLINGER. « Evaluating visual/motor co-location in fish-tank virtual reality ». *Science and Technology for Humanity (TIC-STH), 2009 IEEE Toronto International Conference*. IEEE. 2009, p. 624-629 (citée page 52).
- [25] P. OLSSON, F. NYSJÖ, S. SEIPEL et I. CARLBOM. « Physically co-located haptic interaction with 3D displays ». *Haptics Symposium (HAPTICS), 2012 IEEE*. IEEE. 2012, p. 267-272 (citée page 52).
- [26] A. WIDMER et Y. HU. « Effects of the alignment between a haptic device and visual display on the perception of object softness ». *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans* 40.6 (2010), p. 1146-1155 (citée page 53).

- [27] A. CHOUMANE, G. CASIEZ et L. GRISONI. « Buttonless clicking : Intuitive select and pick-release through gesture analysis ». *IEEE Virtual Reality Conference (VR)*. 2010, p. 67-70 (citée page 54).
- [28] N. STEFANOV, A. PEER et M. BUSS. « Online intention recognition in computer-assisted teleoperation systems ». *Haptics : Generating and Perceiving Tangible Sensations*. Springer, 2010, p. 233-239 (citée page 54).
- [29] E. OZTOP, D. WOLPERT et M. KAWATO. « Mental state inference using visual control parameters ». *Cognitive Brain Research* 22.2 (2005), p. 129-151 (citée pages 54, 55).
- [30] I. S. MACKENZIE. « Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction ». *Human-computer interaction* 7.1 (1992), p. 91-139 (citée page 55).
- [31] L. COHEN, M. CHETOUANI, S. RÉGNIER et S. HALIYO. « A natural interface based on intention prediction for semi-autonomous micromanipulation ». *Journal on Multimodal User Interfaces* 12.1 (mar. 2018), p. 17-30. DOI : 10 . 1007 / s12193-018-0259-1 (citée pages 55, 57).
- [32] L. COHEN, S. HALIYO, M. CHETOUANI et S. RÉGNIER. « Intention prediction approach to interact naturally with the microworld ». *2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. 2014, p. 396-401 (citée pages 55, 57).

CHAPITRE IV

ILLUSTRATIONS DES TRAVAUX EN COURS

Les chapitres précédents ont décrit l'évolution de la focalisation de mes activités, de la téléopération jusqu'à l'étude de l'humain. Il s'agit aujourd'hui d'une démarche complète incluant tous les aspects d'un système robotique interactif, dès la conception jusqu'aux applications dans le terrain.

De plus, notre expertise démontrée sur les applications précédentes dont quelques-unes ont été illustrées dans ce document est un argument fort pour aller au contact des utilisateurs finaux potentiels. Par ailleurs, ces derniers sont aujourd'hui bien conscients de la valeur ajoutée d'une interface humain/machine bien adaptée. Les nouvelles collaborations sont donc récemment initiées dans des cadres bien définis et qui mettent en œuvre nos compétences acquises autour de la problématique de l'interaction humain/machine.

Parmi les projets collaboratifs actuellement traités sous ma responsabilité, deux illustrent bien la démarche et la méthodologie distillées par notre expérience. Le premier est le projet ANR **IOTA** (2016 – 2020) dont je coordonne. Il s'agit de réaliser un instrument scientifique interactif pour la biologie expérimentale. Ce dispositif exploite le principe des pinces optiques. Il donne les moyens d'un accès tangible à des échantillons biologiques en suspension, comme des cellules, et récolte en temps réel les interactions mécaniques en 3D sur plusieurs points simultanément. Il introduit aussi l'usage des microrobots indépendants, directement injectés dans l'environnement comme effecteurs.

Notre partenaire dans ce projet est l'ISM de l'Université Aix-Marseille, en charge de produire une tablette à retour tactile par régulation de friction surfacique.

Le deuxième projet décrit plus bas concerne le cas de microassemblage des composants technologiques. Il est traité dans le projet ANR **COLAMIR** (2016 – 2020), mais aussi dans le cadre d'un contrat industriel avec la société Percipio Robotics. Dans ce

cas, le système esclave, un robot de microassemblage, est imposé. Le problème posé concerne son usage et sa pénétration dans l'atelier où ce robot est en rupture de la façon de travailler des techniciens, et donc mal accepté. En concevant une interface utilisateur intuitive et naturelle, l'objectif est de faciliter l'adoption du robot. Cette adoption doit être perçue comme une évolution plutôt qu'une révolution. Nous avons réalisé une interface portative copiant la forme et la fonction de l'outil fondamental de la manipulation de précision, la pince brucelles. Elle peut être utilisée en comanipulation ou la téléopération.

Le projet **COLAMIR** est coordonné par *Femto-ST* de Besançon, qui se focalise sur les outils de préhension. Les deux partenaires sont des PME, *Auréa Tech* et *Percipio Robotics*, tous les deux porteurs des besoins en assemblage des microcomposants.

Ces deux projets sont décrits dans la suite pour illustrer notre approche de traiter la chaîne de micro-téléopération dans sa globalité. Le projet **IOTA** met l'accent sur le côté 'esclave' de la chaîne, tandis que **COLAMIR** sur le côté 'maître' et l'opérateur.

1 IOTA : Manipulation biologiques par robots optiques

Depuis leur apparition il y a 30 ans, les pinces optiques ont joué un rôle déterminant dans la faculté d'interaction avec les nano et microéchelles. Les applications vont des expériences en physique, avec la possibilité de manipuler des atomes individuels, jusqu'à la biologie avec la capacité unique d'étudier les propriétés mécaniques des échantillons biologiques [1, 2].

Les pinces optiques évitent bon nombre des limites des techniques concurrentes, comme les pipettes ou l'AFM, car elles offrent une polyvalence beaucoup plus grande. Le piégeage optique produit des forces optiques ($< 400\text{pN}$) qui sont efficaces pour la manipulation de particules entre une centaine de micromètres [3] et l'échelle atomique [4]. Un laser hautement focalisé produit un champ électromagnétique tridimensionnel localisé qui piège de façon stable les micro-outils diélectriques sphériques. Cette sonde est ensuite actionnée par la déviation ou la défocalisation du laser. Les forces optiques sont modélisées et la rigidité tridimensionnelle des pièges peut être estimée expérimentalement avec une précision de l'ordre du picoNewton [5-7]. L'observation du mouvement des particules permet de mesurer la force exercée. Une fois piégée, la microsphère peut servir de sonde pour examiner les caractéristiques physiques d'un objet cible, telles que la rigidité des cellules, permettant ainsi une grande variété d'applications potentielles, notamment en biologie ou en sciences médicales.

Le principe des pinces optiques se prête parfaitement à la réalisation d'un instrument robotique pour manipuler des échantillons biologiques dans un environ-

1. IOTA : Manipulation biologiques par robots optiques

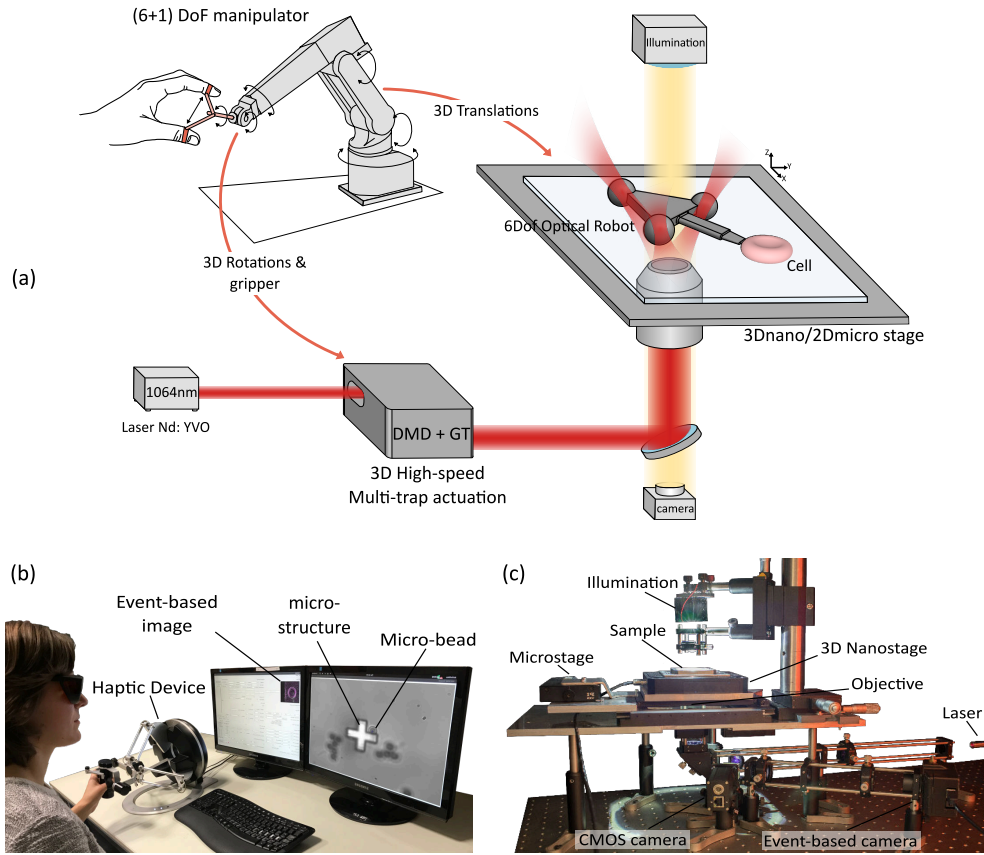


FIGURE IV.1 – Plateforme de manipulation optique. (a) Représentation schématique du système. (b) L'interface utilisateur. (b) Le banc expérimental avec le chemin optique.[8]

nement liquide. Pour garantir l'interactivité, deux propriétés sont requises : l'actionnement des éléments du chemin optique pour contrôler la position des pièges dans l'espace opérationnelle et la mesure de leurs positions et leurs interactions. Ces deux fonctions doivent être fournies avec une fréquence de commande suffisamment haute pour éviter des latences dans la boucle de téléopération. Le système complet est représenté sur la figure IV.1 et les composants de la chaîne complète de téléopération sont détaillés dans la suite.

Actionnement

L'espace de travail est optimisé en combinant un chemin optique, un nanopositionneur 3D et un micropositionneur 2D planaire. Une source laser de 1064 nm (puissance de travail : 300 mW) est dirigée dans un objectif à immersion d'huile (Olympus UPlanFLN 40x, NA 1.3) créant un piège optique dans le plan focal. Sur ce che-

IV . Illustrations des travaux en cours

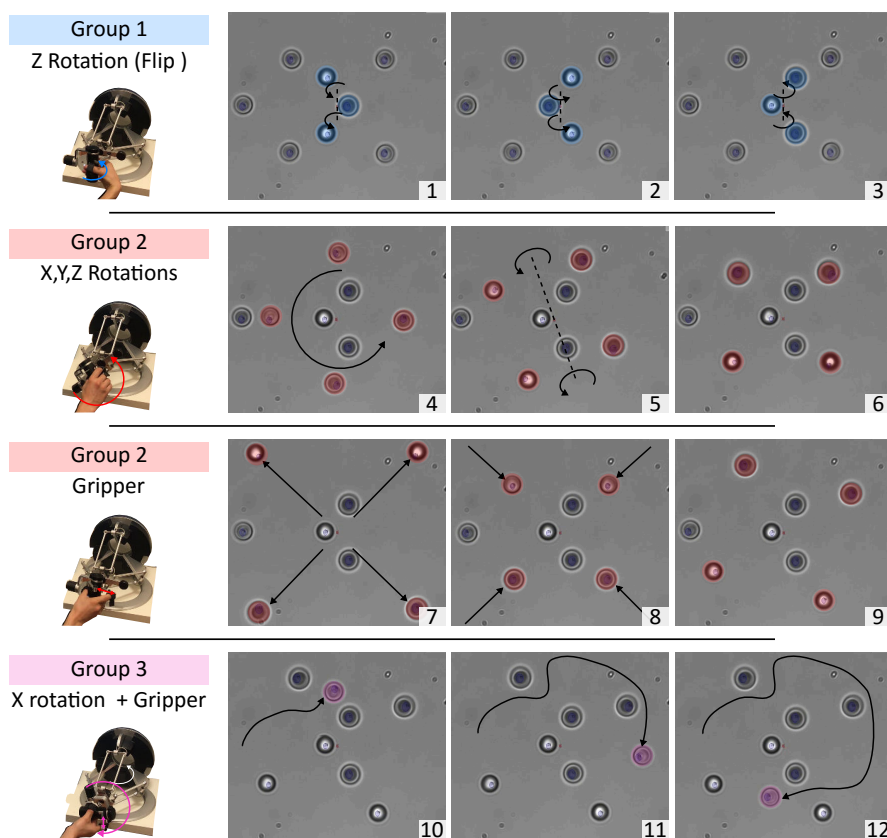


FIGURE IV.2 – Exemple de téléopération 3D utilisant 3 groupes de pièges. La première opération (1, 2 et 3) est une rotation hors-plan autour de l'axe z de trois microbilles. La deuxième (4, 5 et 6) montre le contrôle 3D de quatre microbilles. La troisième (7, 8 et 9) présente le mode radial de la pince. La dernière (10, 11 et 12) présente le déplacement d'une microbille. Ces billes font $3\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre [9].

min optique, un galvanomètre (GVSo02, Thorlabs) et un miroir déformable à base de MOEMS (PTT111 DM, Iris AO) avec des temps de réponse de l'ordre de 300 Hz dévient le rayon laser pour créer séquentiellement des pièges multiples dans un volume de $70 \times 50 \times 9\text{ }\mu\text{m}^3$. La commutation du laser entre les pièges est effectuée à 200 Hz. La combinaison de cet actionnement avec les positionneurs qui bougent le porte-échantillon permet de déplacer les pièges dans tout l'espace d'une boîte de Pétri [9].

Mesure des forces 3D

L'éclairage (LED, 3W) est divisé par un séparateur de faisceau vers deux caméras : une caméra CMOS conventionnelle (Basler $659 \times 494\text{ px}$) et un capteur d'image asynchrone événementiel (ATIS). Le premier fournit une visualisation classique de

l'environnement tandis que le second sert à déduire l'information de force à partir des déplacements.

Le mouvement de la bille piégée est mesuré à l'aide d'une caméra événementielle (ATIS de Prophesee, 240×304 px). Dans ce capteur, chaque pixel réagit de manière asynchrone et indépendante aux variations d'intensité lumineuse au-dessus d'un seuil, tout comme les pics de la rétine humaine. Ainsi, le système ne capture que les informations dynamiques et la quantité de données à traiter est considérablement réduite, ce qui permet de traiter à des vitesses allant jusqu'à 10 kHz [10]. Un algorithme de suivi est spécialement conçu pour ce capteur pour extraire le mouvement des objets piégés et déduire ainsi la force à laquelle ils sont soumis [11].

Pour une microbille de $3\ \mu\text{m}$, l'amplitude de détection de force est de 36.9, 37.8 et 4.5 pN pour x , y et z respectivement avec une résolution théorique planaire de 0.3 pN et une résolution axiale de 0.25 pN. À noter, l'amplitude du bruit causé par le mouvement Brownien est environ dix fois plus élevée que ces valeurs de résolution.

Couplage bilatéral

Un dispositif maître, Omega.7, avec six degrés de liberté augmenté au niveau de la poignée d'une pince actionnée tenue entre le pouce et l'index, est utilisé. Un couplage bilatéral direct est implémenté, avec la position du maître commandant la position d'un groupe de pièges. Les forces détectées sont envoyées au dispositif haptique avec des facteurs d'échelle linéaires [12]. Ces facteurs sont 1.5×10^{-4} en position et 0.3×10^{12} en force. La figure IV.2 explicite les transformations entre les espaces opérationnel du maître et des groupes de pièges.

Robots optiques

Agir simultanément sur plusieurs pièges offre la possibilité d'utiliser des objets plus complexes que des billes comme outil effecteur. Des microstructures, obtenues par polymérisation deux-photons (Nanoscribe GmbH), sont proposées. Ces "optobots" intègrent des billes piègables dans leur structure, comme des poignées. En contrôlant la position relative de ces poignées, au nombre minimum de trois, il est possible de contrôler le mouvement de l'optobot en six degrés de libertés, dans tout l'espace de travail. La figure IV.3 illustre un optobot à 3 poignées et son utilisation pour manipuler une cellule érythrocyte. Nous avons aussi réalisé des variantes avec d'autres outils effecteurs, comme des préhenseurs ou sondes [8].

Synthèse

La caractérisation du système montre une précision de l'ordre de $1\ \mu\text{m}$ dans la manipulation simultanée de jusqu'à 13 objets piégés. L'évaluation de la stabilité

IV . Illustrations des travaux en cours

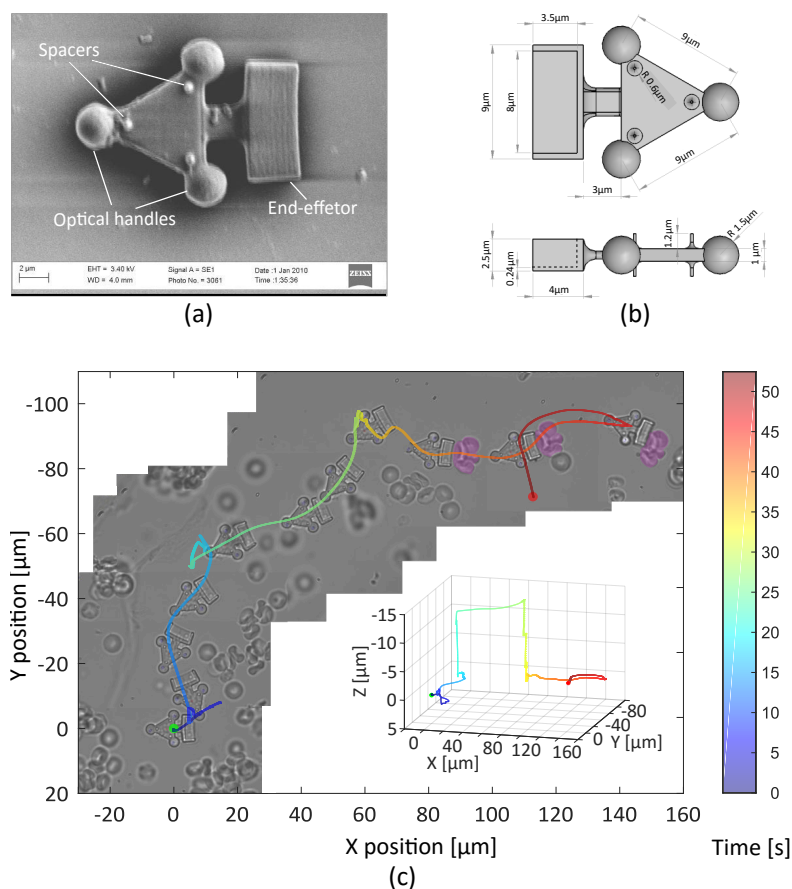


FIGURE IV.3 – Optobot avec un effecteur en forme de pelle pour le transport des cellules. (a) Image du robot au microscope électronique à balayage (MEB). (b) Les dimensions du robot optique. (c) Trajectoire 2D du robot téléopéré avec un encart de la trajectoire 3D. Un groupe de cellules (colorées en violet) est transporté sur 80 μm [13]

et de la transparence démontrent de très bonnes performances téléopérées [9]. Le système offre une interaction simple, ce qui porte la manipulation optique à un haut niveau d'utilisabilité et permet aux utilisateurs naïfs de tirer pleinement parti de son potentiel [13].

Des tâches pertinentes pour la biologie expérimentale ont été démontrées, notamment avec des globules rouges. De plus, nous avons démontré la rotation selon les 3 degrés de liberté des cellules 3D et des manipulations optiques indirectes en 6D avec des micro-outils imprimés. Ces expériences illustrent le type de tâches pour lesquelles la plate-forme présente un grand intérêt. [8]

Les applications biologiques qui peuvent bénéficier de cette plateforme comprennent le tri cellulaire, l'isolement, la rotation, la stimulation, la spectroscopie de

force 3D et des tâches plus complexes telles que la chirurgie unicellulaire comme par exemple la transplantation nucléaire, la micro-injection d'embryons et la biopsie du corps polaire ou micro-assemblage.

2 COLAMIR : Interface intuitive pour le microassemblage

La manipulation fine et l'assemblage des composants à l'échelle millimétrique est une tâche qui est accomplie encore le plus souvent manuellement, notamment en horlogerie. L'automatisation complète, sans intervention de l'opérateur, est actuellement inaccessible ou non désirée à cause de la valeur ajoutée du label '*fait-main*'. Le savoir-faire et la dextérité des artisans et leur expérience sont donc des atouts uniques. Cependant, les exigences d'autodiscipline et une longue formation rendent difficile le recrutement de nouveaux opérateurs. De plus, de nouveaux composants MOEMS apparaissent avec des dimensions inférieures aux capacités humaines. Par conséquent, les solutions robotiques sont nécessaires pour assister l'opérateur en réduisant les dimensions des assemblages.

La téléopération est une solution recherchée dans ce cadre pour garder l'opérateur dans la boucle tout en profitant des avantages de précision et de répétabilité de la robotique.

Cependant, l'idéal de combiner les compétences de l'opérateur à la dextérité d'un système robotique en téléopération ne tient pas toujours. Un technicien qualifié considère inconsciemment ses outils comme une extension de lui-même et cela a un impact important sur son travail [14]. Les interfaces de téléopération classiques impliquent donc un flux de travail fondamentalement différent de celui de la manipulation manuelle et sont mal acceptées, surtout dans le cas d'un technicien expert. Cette question de l'interface humain/machine est également au cœur d'un problème plus général d'insertion de la robotique dans les ateliers de microassemblage ou dans les applications médicales.

Par conséquent, le problème a été étudié dans la littérature sous différents angles. Une approche simple consiste à équiper une interface haptique d'une extension de préhension active, instrumentant le pincement à deux doigts, comme Omega.7 mentionnée précédemment. D'autres solutions comme les dispositifs portables [15, 16] ou les gants [17] sont proposées pour renvoyer la force de préhension à la main humaine. Ces approches s'efforcent d'imiter la main qui saisit directement l'objet à distance, alors que la manipulation de précision utilise des outils. De plus, un outil portatif peut être facilement déposé momentanément, alors qu'il est plus fastidieux de retirer un gant. Les solutions portatives tenues dans la main ont donc un attrait particulier.

Les outils traditionnels du travail de précision, pinces brucelles ou forceps, sont parmi les instruments les plus anciens de l'humanité. De nos jours, ils ont conservé

IV . Illustrations des travaux en cours

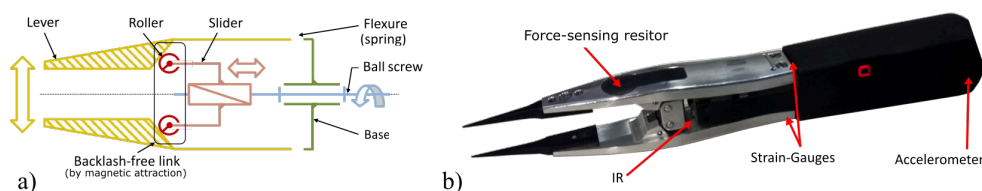


FIGURE IV.4 – Pince brucelles augmentée. (a) Le schéma cinématique de l'actionnement à rattrapage de jeux. (b) Le prototype avec identification des divers capteurs intégrés. [21]

leur fonction et leur forme. Il y a très peu de changements entre les spécimens modernes et ceux trouvés par les archéologues dans les pyramides égyptiennes ou en Mésopotamie [18]. Une évolution robotique de cette conception permettrait de résoudre le problème de l'acceptabilité tout en conservant l'expertise de l'opérateur.

Nous avons proposé un dispositif basé sur une vraie pince brucelles, augmentée d'un actionneur pour la fermeture et ouverture des branches [19, 20]. Cet appareil offre un bon compromis entre la puissance de sortie, la puissance requise et le comportement thermique. Il est conçu pour être utilisé soit en remplacement d'une pince classique avec assistance de la force de préhension, soit comme dispositif maître pour la téléopération d'un robot de micro-assemblage.

L'interface est représentée sur la figure IV.4. Il mesure 14.5cm et pèse 51.2g. Il possède un seul degré de liberté actif qui correspond à la préhension, entraîné par un moteur sans noyau (DCX10L, Maxon Motor) couplé par un mécanisme sans jeu. Ce mouvement est réversible, permettant à l'utilisateur de l'utiliser comme une pince traditionnelle, avec une éventuelle assistance haptique du moteur.

Toutes les cartes électroniques sont intégrées, contrôlées par un microcontrôleur PIC 32 bits. Il comprend une large gamme de capteurs : des jauges de contrainte à l'extrémité des branches des pinces permettent la détection d'ouverture et de contact. Un capteur de force sous le doigt recueille la force appliquée par l'utilisateur. Les capteurs du moteur fournissent sa position et son couple.

Cette interface est conçue pour être utilisée dans deux cas : soit la comanipulation, en remplacement d'une vraie pince en fournissant une assistance haptique en plus, soit en téléopération pour piloter un robot de microassemblage industriel.

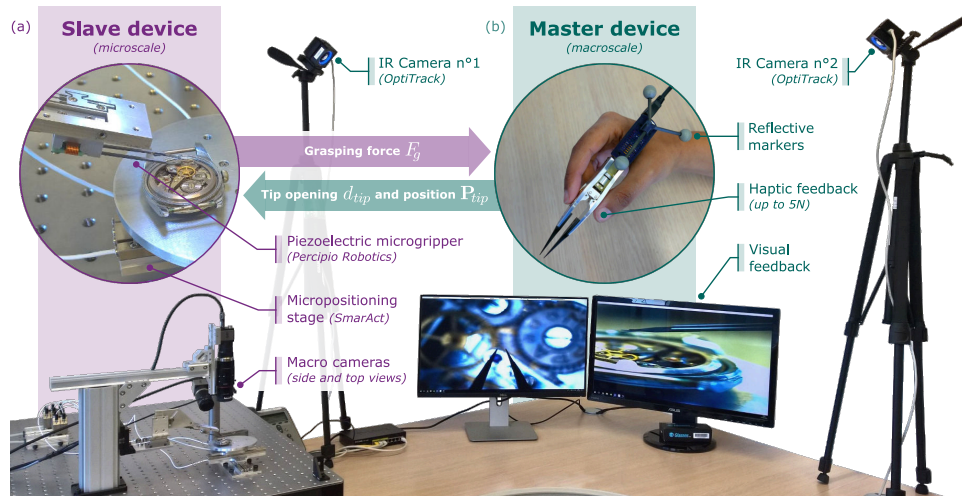


FIGURE IV.5 – Vue d'ensemble de la configuration de la téléopération. (a) Le dispositif esclave est constitué d'une micropinçe piézoélectrique équipée d'embouts en silicium de haute précision permettant de manipuler des objets jusqu'à 1.5 mm. (b) La pinçe haptique est alimentée par USB. Sa position spatiale et son orientation sont enregistrées via un ensemble de caméras infrarouges *OptiTrack* [19].

Comanipulation

L'appareil propose une assistance haptique pour la préhension. La raideur apparente peut être modifiée à travers le moteur intégré. L'opérateur peut facilement l'adapter à sa tâche qui nécessiterait un outil plus ou moins rigide. Une raideur négative peut aussi être utilisée, ce qui permet de saisir un objet automatiquement et d'asservir la force de préhension.

L'accéléromètre intégré détecte automatiquement si la pinçe est en mouvement. Dans ce cas, une assistance proposée continuera de tenir l'objet saisi même si l'opérateur le relâche accidentellement.

Télémanipulation

Le dispositif est aussi utilisé pour téléopérer un robot de microassemblage industriel, *ChronoLab* de Percipio Robotics. Il s'agit d'un robot à 4 degrés de liberté. Son porte échantillon fournit les deux translations et la rotation dans le plan, tandis que sa micropinçe est actionnée selon l'axe vertical. Cette cinématique distribuée sur plusieurs éléments rend l'opération du robot compliquée à conceptualiser pour un technicien. L'utilisation de la pinçe augmentée comme maître est un moyen de fournir une interface humain/machine intuitive.

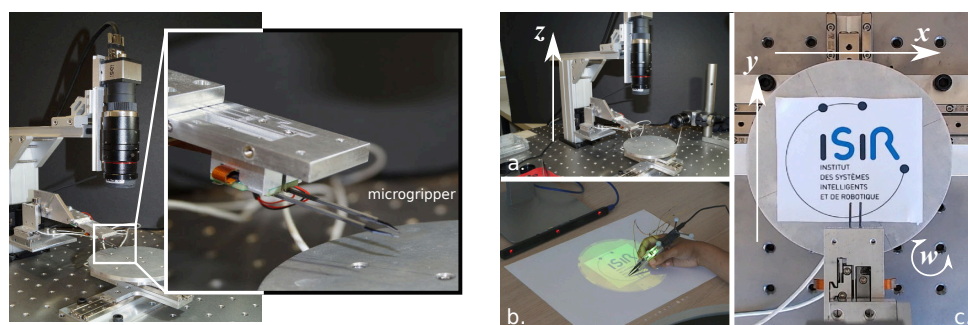


FIGURE IV.6 – Interface naturelle pour la téléopération du robot de microassemblage. À gauche, la micropince du robot, équipée des capteurs piézerésistifs. (a) et (c) Les degrés de liberté du robot. (b) Plan de travail de l'opérateur avec une visualisation immobilisée du porte-échantillon.

La figure IV.5 décrit l'installation complète. Le mouvement de l'interface est suivi par un système optique commercial, *OptiTrack*, et est utilisé pour piloter la position relative de la micropince du robot par rapport au porte-échantillon. Cette micropince est équipée des capteurs piézorésistifs. Cette information est rendue à l'opérateur pour lui faire ressentir la préhension réelle.

Afin de rendre l'interaction plus naturelle, nous avons aussi conçu un mode se rapprochant le plus possible des conditions de travail manuel, illustrée sur la figure IV.6. La vue de dessus du porte-échantillon est projetée sur le plan de travail, devant l'opérateur. Les mouvements du plateau sont compensés par le traitement du flux vidéo : du point de vue de l'opérateur le porte-échantillon est immobile et seule la micropince se déplace selon les degrés de liberté de la plateforme. Celle-ci adopte la position et l'orientation imposées par l'utilisateur à travers la pince haptique par rapport à l'image projetée du plateau.

3 Synthèse & Perspectives

Les deux systèmes présentés sont issus de notre démarche centrée sur l'humain. Les composants sont conçus en considérant l'interactivité en premier lieu. Par exemple, l'actionnement et la mesure d'effort pour les pinces optiques découlent d'une contrainte forte pour garantir un temps de réponse négligeable et une réactivité de 500 Hz. Le schéma de couplage est direct, pour une transparence optimale avec une amplification linéaire de $\times 10^{12}$ des interactions mesurées pour être rendues à l'opérateur. Le remplacement de l'interface maître commerciale utilisée est en cours. Les tests préliminaires sont effectués avec le dispositif colocalisé *Fi-*

shTank présenté dans le chapitre précédent, mais aussi avec un dispositif tactile [22].

La pince haptique augmentée est conçue pour que son usage soit naturelle et intuitive. Elle permet une évolution incrémentale à travers des assistances haptiques pour la comanipulation. Pour la téléopération, elle met en place une interface qui vise à cacher toute la chaîne robotique. Dans ce mode qui s'apparente à la réalité augmentée, l'opérateur travaille directement sur une image agrandie des composants réels, et dispose d'un retour sensoriel haptique.

Ces deux systèmes ont fait l'objet des évaluations utilisateur qui ont permis d'affiner leurs usages, les stratégies de pilotage (en position, vitesse), les paramètres d'assistances (facteur d'échelle, raideur virtuelle) et valider leurs apports. La prochaine étape est leur insertion dans les applications réelles. Pour les pinces optiques, une collaboration avec deux laboratoires de biologie aux Instituts Curie et Pasteur est en cours. Il s'agit de mesurer l'adhésion des globules blancs et des cellules pathologiques pour le diagnostic du cancer du côlon pour l'un [23] et de la caractérisation des organelles à l'intérieur des cellules géantes pour l'autre [24].

Une démarche de création de spin-off est aussi entreprise, en discussion avec la *SATT Lutech*.

Pour la pince haptique, un brevet est obtenu [20] et une commercialisation est en cours. Elle s'accompagne des évaluations par des usagers finaux réels dans l'environnement de leurs ateliers.

Références

- [1] A. ASHKIN, J. M. DZIEDZIC, J. E. BJORKHOLM et S. CHU. « Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles ». *Optics Letters* 11.5 (mai 1986), p. 288-290 (citée page 62).
- [2] K. C. NEUMAN et S. M. BLOCK. « Optical trapping ». *Review of Scientific Instruments* 75.9 (2004), p. 2787-2809 (citée page 62).
- [3] V. SHVEDOV, A. RODE, Y. IZDEBSKAYA, A. DESYATNIKOV, W. KROLIKOWSKI et Y. KIVSHAR. « Giant optical manipulation ». *Physical Review Letters* 105.11 (2010). cited By (since 1996) 22 (citée page 62).
- [4] A. ASHKIN. « History of optical trapping and manipulation of small-neutral particle, atoms, and molecules ». *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 6.6 (déc. 2000), p. 841-856. ISSN : 1077260X. DOI : 10 . 1109/2944 . 902132 (citée page 62).
- [5] A. ROHRBACH et E. H. K. STELZER. « Three-dimensional position detection of optically trapped dielectric particles ». *Journal of Applied Physics* 91.8 (2002), p. 5474-5488. DOI : 10 . 1063/1 . 1459748 (citée page 62).
- [6] A. ASHKIN. « Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime ». *Biophysical Journal* 61.2 (fév. 1992), p. 569-582. ISSN : 0006-3495 (citée page 62).
- [7] K. BERG-SORENSEN et H. FLYVBJERG. « Power spectrum analysis for optical tweezers ». *Review of Scientific Instruments* 75.3 (2004), p. 594-612. DOI : 10 . 1063/1 . 1645 654 (citée page 62).
- [8] E. GERENA, F. LEGENDRE, A. MOLAWADE, Y. VITRY, S. RÉGNIER et S. HALIYO. « Tele-Robotic Platform for Dexterous Optical Single-Cell Manipulation ». *Micromachines* 10 (oct. 2019), p. 677. DOI : 10 . 3390/mi10100677 (citée pages 63, 65, 66).
- [9] E. GERENA, S. RÉGNIER et S. HALIYO. « High-bandwidth 3D Multi-Trap Actuation Technique for 6-DoF Real-Time Control of Optical Robots ». *IEEE Robotics and Automation Letters* 4.2 (avr. 2019), p. 647-654. DOI : 10 . 1109/LRA . 2019 . 2892393 (citée pages 64, 66).
- [10] X. LAGORCE, C. MEYER, S.-H. IENG, D. FILLIAT et R. BENOSMAN. « Asynchronous event-based multikernel algorithm for high-speed visual features tracking ». *IEEE transactions on neural networks and learning systems* 26.8 (2014), p. 1710-1720 (citée page 65).
- [11] M. YIN, E. GERENA, C. PACORET, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « High-bandwidth 3D Force Feedback Optical Tweezers for Interactive Bio-manipulation ». 2017 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vancouver, Canada. 2017, p. 1889-1894. DOI : 10 . 1109/IROS . 2017 . 8206006 (citée page 65).
- [12] A. BOLOPION, B. CAGNEAU, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Analysis of stability and transparency for nanoscale force feedback in bilateral coupling ». *Journal of Micro - Nano Mechatronics* 4 (2009), p. 145-158 (citée page 65).

- [13] E. GERENA, F. LEGENDRE, Y. VITRY, S. RÉGNIER et S. HALIYO. « Robotic Optical-micromanipulation Platform for Teleoperated Single-Cell Manipulation ». *Proceedings of 2019 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*. 2019, p. 60 (citée page 66).
- [14] L. E. MILLER, L. MONTRONI, E. KOUN, R. SALEMME, V. HAYWARD et A. FARNÈ. « Sensing with tools extends somatosensory processing beyond the body ». *Nature* 561.7722 (1^{er} sept. 2018), p. 239-242. ISSN : 1476-4687. DOI : 10.1038/s41586-018-0460-0 (citée page 67).
- [15] R. M. PIERCE, E. A. FEDALEI et K. J. KUCHENBECKER. « A wearable device for controlling a robot gripper with fingertip contact, pressure, vibrotactile, and grip force feedback ». *Haptics Symposium (HAPTICS), 2014 IEEE*. IEEE. 2014, p. 19-25 (citée page 67).
- [16] I. CHOI, H. CULBERTSON, M. R. MILLER, A. OLWAL et S. FOLLMER. « Gravity : A Wearable Haptic Interface for Simulating Weight and Grasping in Virtual Reality ». *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. ACM. 2017, p. 119-130 (citée page 67).
- [17] R. HINCHET, V. VECHEV, H. SHEA et O. HILLIGES. « DextrES : Wearable Haptic Feedback for Grasping in VR via a Thin Form-Factor Electrostatic Brake ». *The 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '18. Berlin, Germany : ACM, 2018, p. 901-912. ISBN : 978-1-4503-5948-1. DOI : 10.1145/3242587.3242657 (citée page 67).
- [18] P. B. ADAMSON. « Surgery in ancient Mesopotamia ». *Medical History* 35.4 (1991), p. 428-435. DOI : 10.1017/S0025727300054181 (citée page 68).
- [19] S. SAKR, T. DAUNIZEAU, D. REVERSAT, S. RÉGNIER et S. HALIYO. « An Ungrounded Master Device for Tele-Microassembly ». *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE. 2018, p. 1-9 (citée pages 68, 69).
- [20] T. DAUNIZEAU, S. HALIYO, S. RÉGNIER, T. LU, D. HERIBAN et M. LUTRINGER. « Mechatronic forceps ». WO2018007733A1. Jan. 2017 (citée pages 68, 71).
- [21] S. SAKR, T. DAUNIZEAU, D. REVERSAT, S. RÉGNIER et S. HALIYO. « A Handheld Master Device for 3D Remote Micro-manipulation ». *2018 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*. IEEE. Nagoya, Japan, 2018, p. 1-6 (citée page 68).
- [22] N. HULOUX, J. MONNOYER, M. BOYRON et M. WIERTLEWSKI. « Overcoming the variability of fingertip friction with surface-haptic force-feedback ». *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*. Springer. 2018, p. 326-337 (citée page 71).
- [23] D. KAMSMA, P. BOCHET, F. OSWALD, N. ALBLAS, S. GOYARD, G. J. WUITE, E. J. PETERMAN et T. ROSE. « Single-Cell Acoustic Force Spectroscopy : Resolving Kinetics and Strength of T Cell Adhesion to Fibronectin ». *Cell reports* 24.11 (2018), p. 3008-3016 (citée page 71).

IV . Illustrations des travaux en cours

- [24] P. ROMANI, I. BRIAN, G. SANTINON, A. POCATERRA, M. AUDANO, S. PEDRETTI, S. MATHIEU, M. FORCATO, S. BICCIATO, J.-B. MANNEVILLE et al. « Extracellular matrix mechanical cues regulate lipid metabolism through Lipin-1 and SREBP ». *Nature cell biology* 21.3 (2019), p. 338 (*citée page 71*).

CONCLUSION GÉNÉRALE & PERSPECTIVES

DANS ce mémoire, j'ai illustré l'évolution de ma recherche sur une période de 15 ans, à travers une sélection de contributions se focalisant sur divers aspects. Le fil conducteur de ces activités est l'interaction de l'humain avec un système distant, et plus particulièrement quand ce système opère dans le micromonde : il s'agit des échantillons dont les dimensions sont inférieures au millimètre, ou encore quand la précision et la résolution recherchées s'expriment en 'micro' ou 'nano'.

La problématique d'accès à ces échelles peut en effet être traitée par plusieurs aspects. Dans un premier temps, il est nécessaire d'assimiler les spécificités des phénomènes physiques qui y sont privilégiés, notamment à cause de l'équilibre inversé des forces volumiques et surfaciques. Ensuite, d'un point de vue de la commande, le couplage transéchelle met en jeu des gains particulièrement élevés, ce qui nécessite une approche spécifique dans la synthèse des schémas de commande et de leurs implémentations.

Ces deux particularités imposent à elles seules des contraintes fortes pour la conception et la mise en œuvre. En effet, mes premières contributions suivant la thèse se sont articulées autour de celles-ci pour produire plusieurs systèmes expérimentaux, pendant les travaux de thèse de Julien Vitard, de Fabien Dionnet, et de Juan Acosta³. L'usage interactif de ces systèmes a incité une réflexion sur la place de l'opérateur.

Dans ce contexte, le retour haptique est apparu comme une solution intéressante pour faciliter la manipulation. Nous avons donc étudié les approches de téléopération bilatérale avec Gentiane Venture et Aude Bolopion, avec une focalisation sur les schémas de commande.

Ces travaux ont montré un besoin de mieux comprendre l'humain dans son interaction. Les études de perception humaine dans la boucle de micro-téléopération ont été entreprises avec la thèse de Guillaume Millet. L'usage des techniques de la réalité virtuelle a été exploré avec Bruno Sauvet. Nos conclusions ont montré la né-

3. Une liste des co-encadrements des travaux de thèse est donnée en annexe

cessité de mieux prendre en compte le facteur humain dès la conception matérielle des éléments maître et esclave de la chaîne de téléopération. Avec Abdenbi Mohand-Ousaid puis Antoine Weill-Duflos nous avons créé et affiné le concept de microscopie haptique.

Parallèlement, les études se sont concentrées sur l'humain. Avec Laura Cohen nous avons proposé une interface humaine/machine qui s'inspire des processus cognitives décisionnelles et qui dématérialise l'interface maître. Avec Justine Saint-Aubert l'intégration des stimuli visuel et haptique a été traitée et une interface colocalisée a été concrétisée.

Mes travaux en cours sont imprégnés de cette démarche incluant fortement l'humain, comme notamment les pinces optiques interactives, avec Edison Gerena qui suit nos travaux précédents avec Cécile Pacoret, ou la pince haptique avec Sophia Sakr. Avec Thomas Daunizeau, qui a aussi joué un rôle important dans ce projet, nous explorons actuellement la perception tactile des textures. L'idée d'une interface haptique intrinsèquement transparente sur plusieurs degrés de liberté est développée avec Georges Daher.

Ce panorama démontre le positionnement de ma recherche de plus en plus axé vers l'humain. A l'occasion de la fondation de la nouvelle équipe INTERACTIONS MULTIÉCHELLES à l'ISIR dont je porte la responsabilité, cette particularité fut spécifiquement mise en avant. L'identité de l'équipe et sa stratégie place l'humain au centre de nos études. Ses compétences complémentaires contribuent à une meilleure compréhension du comportement humain et de l'environnement en s'intéressant aux modalités d'action, de perception et de commande dans l'objectif de concevoir et développer des interfaces plus efficaces, plus transparentes et plus adaptées, pour favoriser la cognition et la prise de décision de l'opérateur.

Dans ce cadre, une des directions actuelles de mes activités concerne les mécanismes d'action et de perception dans le système sensorimoteur. Nous nous intéressons par exemple à comment l'intégration des signaux kinesthésiques et la proprioception sont affectées pendant une immersion en réalité virtuelle, et comment des stimuli haptiques peuvent être exploités pour renforcer cette immersion. Une autre activité concerne l'analyse du sens tactile pour explorer les facteurs dans le lien entre le toucher d'une texture et son interprétation par le cerveau.

Ces études contribuent à l'élaboration d'interfaces innovantes, pour des retours haptiques plus réalistes, ou des environnements virtuels plus convaincants. Par exemple, les modèles de détection d'intention et le focus d'attention seront exploités pour implémenter des interfaces haptiques à contact intermittent. Il s'agit des dispositifs de stimulation mécanique non attachés à l'utilisateur, ni tenus à la main, et qui viendront à son contact en fonction de son interaction dans un environnement

virtuel. Ce concept peut être décliné sur plusieurs échelles : pour l'interface FishTank décrit précédemment, ou encore à l'échelle d'une arène de réalité virtuelle en complément à l'usage d'une casque de RV.

Un autre exemple de contribution en cours entre la perception et la technologie est dans le pilotage d'hélicoptère, en augmentant les manettes d'une assistance haptique conçue en prenant en compte la boucle d'action-réaction des pilotes.

Mon autre préoccupation majeure concerne la montée en TRL⁴ de nos réalisations et leur insertion dans des situations opérationnelles. Les travaux présentés dans le chapitre IV sont une bonne illustration de cette démarche. En effet, la problématique de micromanipulation qui a démarré au début de ma carrière s'est vue gagner en dix ans une maturité suffisante pour atteindre le marché et se transformer à un produit industriel.

Nos travaux actuels centrés sur les interfaces humain/machine sont animés par la même motivation. Dans le contexte sociétal présent où l'importance de la qualité des interfaces est bien admise il existe un réel intérêt de la part des acteurs du marché pour notre expertise. Ainsi, depuis la création de l'équipe, les collaborations visant des TRL hauts foisonnent. Les applications concernent : la planification pré-opératoire en neurochirurgie avec l'Institut du Cerveau et de la Moelle Épineuse, la formation au geste chirurgical avec la société InSimo, la formation et l'expertisation des techniciens dans l'industrie manufacturière avec Segula, la biologie expérimentale avec les Instituts de la Vision, Pasteur et Curie, les microrobots médicaux avec Robeauté, pilotage d'hélicoptère avec Onera, la pince haptique avec Percipio, et enfin la téléopération du décapage des rames de train avec Véolia. Chacun de ces exemples m'impliquant directement ont fait, ou sont sur le point de faire, l'objet d'une labellisation, thèse CIFRE ou contrat de collaboration depuis 2018.

De plus, la création d'un spin-off est actuellement en négociation avec la SATT Lutech autour de notre technologie de pinces optiques interactives.

Ce rapprochement avec le monde industriel ne m'a pas coupé du monde académique. Je suis éditeur associé pour le journal *Mechatronics* d'Elsevier depuis 2016. Je suis aussi membre fondateur avec Prof. Sergej Fatikow et chaire des publications de la série des conférences **MARSS** (*International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales*) qui est devenue l'assemblée phare de la microrobotique depuis sa première édition à Paris en 2016.

Enfin, particulièrement impliqué dans la conférence ICRA 2020 qui se tiendra à Paris au mois de juin prochain, je suis l'interlocuteur privilégié entre les différents acteurs de l'événement au titre de *communication chair* et supervise toutes les étapes de l'organisation.

4. *Technology Readiness Level*, niveau de maturité technologique.

Conclusion Générale & Perspectives

ANNEXES

- Encadrements de Thèse
- Liste des Publications
- Curriculum Vitæ Synthétique

ENCADREMENTS DE THÈSE

Une liste des travaux de thèse que j'ai co-encadrés est donnée ici. Les numéros entre parenthèses renvoient à la liste de mes publications à la fin de ce manuscrit.

Fabien Dionnet (2001 – 2005) *Dir. Stéphane Régnier*

Télé-micro-manipulation par adhésion.

(31, 76, 79, 91)

Julien Vitard (2004 – 2008) *Dir. Stéphane Régnier*

Manipulation Submicronique interactive sous différents environnements de microscopie.

(26, 70, 27, 28, 29, 30, 103)

Guillaume Millet (2005 – 2009) *Dir. Stéphane Régnier*

Perception et interface haptique pour les nanosciences.

(12, 13, 16, 112, 61, 113, 67, 89)

Ahlem Abbaci (2006 – 2010) *Dir. Stéphane Régnier*

Étude et analyse de l'ADN pour l'auto-assemblage microscopique.

(68, 69)

Aude Bolopion (2007 – 2010) *Dir. Stéphane Régnier*

Couplages Haptiques pour la téléopération à l'échelle nanométrique.

(52, 17, 18, 57, 34, 59, 62, 22)

Juan Acosta (2009 – 2012) *Dir. Stéphane Régnier*

Caractérisation La manipulation répétable d'objets nanoscopiques.

(14, 110, 64, 66)

Bruno Sauvet (2009 – 2013) *Dir. Stéphane Régnier*

Conception d'une plateforme microrobotique pour la manipulation et la caractérisation de films fins.

(15, 55)

Abdenbi Mohand-Ousaid (2009 – 2013) *Dir. Vincent Hayward*

Conception d'une chaîne de micro téléopération stable et transparente.

(3, 40, 11, 48, 52, 12, 53, 54, 16)

Laura Cohen (2011 – 2015) *Dir. Stéphane Régnier*

Interactions naturelles pour des tâches de manipulation dans le monde microscopique.

(7, 50)

Antoine Weill-Duflos (2013 – 2015) *Dir. Vincent Hayward*

Chaines de téléopération pour le micromonde et la conception d'interfaces haptiques avec ressenti transparent pour l'utilisateur.

(3, 107, 40, 108, 43, 48)

Olivier Ameline (2014 – 2018) *Dir. Jean Cognet*

Modélisation et simulation interactive des biopolymères, ADN et ARN.

(1, 8, 9)

Justine SAINT-AUBERT (2015 – 2019) *Dir. Stéphane Régnier*

Co-localisation des retours visuels et haptiques en Réalité Virtuelle.

(39, 44)

Thèses en cours :

Edison GERENA (2015 –) *Dir. Stéphane Régnier*
Pince optique pour la manipulation biologique.
(37, 5, 38, 45)

Sophia Sakr (2016 –) *Dir. Stéphane Régnier*
Interfaces humain/machine pour le microassemblage.
(41, 42)

Georges Daher (2018 –) *Dir. Stéphane Régnier*
Interface haptique multi-ddl tactile et kinesthétique.

Thomas Daunizeau (2018 –) *Dir. Vincent Hayward*
Analyse du sens du toucher et des textures.
(41, 42)

Flavien Lebrun (2019 –) *Dir. Gilles Bailly.*
Intégration des modalités visio-haptique.

LISTE DE PUBLICATIONS

Journaux internationaux avec comité de lecture (33)

1. C. PENG, O. AMELINE, F. RIBEIRO, C. PLESSE, S. HALIYO, S. CHEN, L. CHASSAGNE et B. CAGNEAU. « Electromechanical model of a conducting polymer transducer, application to a soft gripper ». *IEEE Access* (nov. 2019), p. 1-9. DOI : 10.1109/ACCESS.2019.2942159.
2. E. GERENA, F. LEGENDRE, A. MOLAWADE, Y. VITRY, S. RÉGNIER et S. HALIYO. « Tele-Robotic Platform for Dexterous Optical Single-Cell Manipulation ». *Micromachines* 10 (oct. 2019), p. 677. DOI : 10.3390/mi10100677.
3. J. CAILLIEZ, M. BOUDAUD, A. MOHAND-OSAID, A. WEILL-DUFLOS, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Modeling and experimental characterization of an active MEMS based force sensor ». *Journal of Micro-Bio Robotics* 15.1 (juin 2019), p. 53-64. DOI : 10.1007/s12213-019-00115-1.
4. Q. FRANCOIS, A. ANDRÉ, B. DUPLAT, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Tracking systems for intracranial medical devices : a review ». *MEDICAL DEVICES & SENSORS* 2.2 (mai 2019), e10033. DOI : 10.1002/mds3.10033.
5. E. GERENA, S. RÉGNIER et S. HALIYO. « High-bandwidth 3D Multi-Trap Actuation Technique for 6-DoF Real-Time Control of Optical Robots ». *IEEE Robotics and Automation Letters* 4.2 (avr. 2019), p. 647-654. DOI : 10.1109/LRA.2019.2892393.
6. Z. Y. BAYRAKTAROGLU, O. F. ARGIN et S. HALIYO. « A Modular Bilateral Haptic Control Framework for Teleoperation of Robots ». *Robotica* 37.2 (fév. 2019), p. 338-357. DOI : 10.1017/S0263574718001042.
7. L. COHEN, M. CHETOUANI, S. RÉGNIER et S. HALIYO. « A natural interface based on intention prediction for semi-autonomous micromanipulation ». *Journal on Multimodal User Interfaces* 12.1 (mar. 2018), p. 17-30. DOI : 10.1007/s12193-018-0259-1.
8. O. AMELINE, S. HALIYO, X. HUANG et J. A. COGNET. « Analytical expression of elastic rods at equilibrium under 3D strong anchoring boundary conditions ». *Journal of Computational Physics* 373 (2018), p. 736-749. DOI : 10.1016/j.jcp.2018.07.021.
9. O. AMELINE, S. HALIYO, X. X. HUANG et J. A. H. COGNET. « Classifications of ideal 3D elastica shapes at equilibrium ». *Journal of Mathematical Physics* 58.6 (2017), p. 062902.

10. M. BOUDAUD, M. GAUDENZI DE FARIA, Y. HADDAB, S. HALIYO, Y. LE GORREC, P. LUTZ et S. RÉGNIER. « Robust microscale grasping through a multimodel design : synthesis and real time implementation ». *Control Engineering Practice* 39 (juin 2015), p. 12-22. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2014.11.003>.
11. A. MOHAND OUSAID, S. HALIYO, S. RÉGNIER et V. HAYWARD. « A Stable and Transparent Microscale Force Feedback Teleoperation System ». *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 20.5 (2015), p. 2593-2603.
12. A. MOHAND OUSAID, G. MILLET, S. HALIYO, S. RÉGNIER et V. HAYWARD. « Feeling What An Insect Feels ». *PloS ONE* 9.10 (2014), e108895.
13. G. MILLET, A. LÉCUYER, J. BURKHARDT, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Haptics and graphic analogies for the understanding of atomic force microscopy ». *International Journal of Human-Computer Studies* 71.5 (mai 2013), p. 608-626. DOI : [10.1016/j.ijhcs.2012.12.005](https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2012.12.005).
14. J. ACOSTA, J. POLESEL-MARIS, F. THOYER, H. XIE, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Gentle and fast atomic force microscopy with piezoelectric scanning probe for Nanorobotics Applications ». *Nanotechnology* 24.6 (2013), p. 065502.
15. N. OUARTI, B. SAUVET, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « RobPosit, a robust pose estimator for operator controlled nanomanipulation ». *Journal of Micro-Bio Robotics* 8.2 (2013), p. 73-82.
16. A. MOHAND OUSAID, G. MILLET, S. RÉGNIER, S. HALIYO et V. HAYWARD. « Haptic Interface Transparency Achieved Through Viscous Coupling ». *The International Journal of Robotics Research* 31.3 (déc. 2012), p. 319-329. DOI : [10.1177/0278364911430421](https://doi.org/10.1177/0278364911430421).
17. A. BOLOPION, H. XIE, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Haptic Teleoperation for 3D Microassembly of Spherical Objects ». *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics* 17.1 (2012), p. 116-127.
18. A. BOLOPION, C. DAHMEN, C. STOLLE, S. HALIYO, S. RÉGNIER et S. FATIKOW. « Vision based Haptic Feedback for Remote Micromanipulation in a SEM Environment ». *International Journal of Optomechatronics* 6.3 (2012), p. 236-252.
19. G. HWANG, R. BRAIVE, A. CAVANNA, A. OUERGI, I. ROBERT-PHILIP, B. A., S. HALIYO, I. SAGNES et S. RÉGNIER. « Electro-osmotic Propulsion of Helical Nanobelt Swimmers ». *The International Journal of Robotics Research* 30.7 (2011), p. 806-819.
20. V. DE SARS, S. HALIYO et J. SZEWCZYK. « A practical approach to the design and control of active endoscopes ». *Mechatronics* 20.2 (mar. 2010). Triennial Best Paper Award, p. 251-264. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2009.12.001>.
21. G. HWANG, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Infrared-photovoltaic properties of graphene revealed by electro-osmotic spray direct patterning of electrodes ». *Micro Nano Lett.* 5.2 (2010), p. 140-145.
22. A. BOLOPION, B. CAGNEAU, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Analysis of stability and transparency for nanoscale force feedback in bilateral coupling ». *Journal of Micro - Nano Mechatronics* 4 (2009), p. 145-158.
23. C. PACORET, B. R., G. G., S. HALIYO, D. CARBERRY, A. BERGANDER, S. RÉGNIER et M. PADGETT. « Touching the microworld with force-feedback optical tweezers ». *OPTICS EXPRESS* 17.12 (2009), p. 10260.

24. H. XIE, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « A versatile atomic force microscope for 3D nano-manipulation and nanoassembly ». *Nanotechnology* 20 (2009), 215301 (9pp).
25. H. XIE, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Parallel imaging/manipulation force microscopy ». *Applied Physics Letters* 94 (2009), p. 153106.
26. H. XIE, J. VITARD, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Enhanced sensitivity of mass detection using the first torsional ». *Measurement Science & Technology* 19.5 (mai 2008), 055207 (7pp).
27. H. XIE, J. VITARD, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « High-sensitivity mass and position detection of the micro-objects adhered to the AFM cantilevers ». *Journal of Micro-Nano Mechatronics* 4.1-2 (2008), p. 17-25.
28. H. XIE, J. VITARD, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Enhanced accuracy of force application for AFM nanomanipulation using nonlinear calibration of the optical lever ». *IEEE Sensors Journal* 8.8 (2008), p. 1478-1485.
29. H. XIE, J. VITARD, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Optical lever calibration in atomic force microscope with a mechanical lever ». *Review of Scientific Instrument* 79 (2008), p. 096101.
30. H. XIE, J. VITARD, S. HALIYO, S. RÉGNIER et M. BOUKALLEL. « Calibration of lateral force measurements in atomic force microscopy ». *Review of Scientific Instrument* 79 (2008), 033708 (6pp).
31. S. HALIYO, F. DIONNET et S. RÉGNIER. « Controlled rolling of micro objects for autonomous micro manipulation ». *International Journal of Micromechatronics* 3.2 (2006), p. 75-101.
32. G. VENTURE, S. HALIYO, A. MICAELLI et S. RÉGNIER. « Force-feedback coupling for micro-handling applications ». *International Journal of Micromechatronics, special issue on Micro-handling* 3.3-4 (2006), p. 307-327.
33. S. HALIYO, S. RÉGNIER et J. GUINOT. « [mü]MAD, the adhesion based dynamic micro-manipulation ». *European Journal of Mechanics A, Solids* 22.6 (2003), p. 903-916.

Journaux nationaux avec comité de lecture (3)

34. A. BOLOPION, B. CAGNEAU, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Analyse d'un schéma de commande pour des couplages haptiques entre le macro et le nano monde ». *Journal Européen des Systèmes Automatisés* 44.6 (2010), p. 689-716.
35. S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Manipulation d'objets microscopiques par adhésion et effet inertiel ». *Journal de Nano et Micro Technologies* 3.1/2 (2003), p. 201-222.
36. S. HALIYO, S. RÉGNIER et J. GUINOT. « Dépose dynamique d'un micro-objet saisi par adhésion ». *Compte-Rendu à l'Académie des Sciences* 331.IIb (2003), p. 563-568.

Conférences internationales avec actes et relecture (52)

37. E. GERENA, F. LEGENDRE, Y. VITRY, S. RÉGNIER et S. HALIYO. « Remote Dexterous Cell Handling Through a Robotic Optical-micromanipulation Platform ». *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Nov. 2019, p. 1036.

38. E. GERENA, F. LEGENDRE, Y. VITRY, S. RÉGNIER et S. HALIYO. « Robotic Optical-micromanipulation Platform for Teleoperated Single-Cell Manipulation ». *Proceedings of 2019 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*. 2019, p. 60.
39. J. SAINT-AUBERT, S. RÉGNIER et S. HALIYO. « Cable Driven Haptic Interface for Co-localized Desktop VR ». *2018 IEEE Haptics Symposium*. San Francisco, USA, mar. 2018, p. 1-6.
40. J. CAILLIEZ, M. BOUDAUD, A. MOHAND-OUSAI, A. WEILL-DUFLOS, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Modeling and Experimental Characterization of an Active MEMS Based Force Sensor ». *2018 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*. Nagoya, Japan, 2018, 91 (6).
41. S. SAKR, T. DAUNIZEAU, D. REVERSAT, S. RÉGNIER et S. HALIYO. « An Ungrounded Master Device for Tele-Microassembly ». *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE. 2018, p. 1-9.
42. S. SAKR, T. DAUNIZEAU, D. REVERSAT, S. RÉGNIER et S. HALIYO. « A Handheld Master Device for 3D Remote Micro-manipulation ». *2018 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*. IEEE. Nagoya, Japan, 2018, p. 1-6.
43. A. ORTEGA CABEZON, A. WEILL-DUFLOS, S. HALIYO, S. RÉGNIER et V. HAYWARD. « Linear Induction Actuators for a Haptic Interface : a quasi-perfect transparent mechanism ». *2017 IEEE World Haptics Conference (WHC)*. Juin 2017, p. 529-534. DOI : 10.1109/WHC.2017.7989965.
44. J. SAINT-AUBERT, S. RÉGNIER et S. HALIYO. « Slack strategy for cable driven haptic interfaces ». *2017 IEEE World Haptics (WHC)*. 2017, p. 581-586. DOI : 10.1109/WHC.2017.7989966.
45. M. YIN, E. GERENA, C. PACORET, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « High-bandwidth 3D Force Feedback Optical Tweezers for Interactive Bio-manipulation ». *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Vancouver, Canada*. 2017, p. 1889-1894. DOI : 10.1109/IROS.2017.8206006.
46. L. CUI, E. MARCHAND, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Three-Dimensional Visual Tracking and Pose Estimation in Scanning Electron Microscopes ». *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2016, p. 5210-5215. DOI : 10.1109/IROS.2016.7759766.
47. L. CUI, E. MARCHAND, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Hybrid Automatic Visual Servoing Scheme using Defocus Information for 6-DoF Micropositioning ». *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA'15, Seattle, WA*, mai 2015.
48. A. WEILL-DUFLOS, A. MOHAND OUSAID, S. HALIYO, S. RÉGNIER et V. HAYWARD. « Optimizing Transparency of Haptic Device Through Velocity Estimation ». *2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. 2015, p. 529-534.
49. M. BOUDAUD, M. DE FARIA, Y. HADDAB, S. HALIYO, Y. LE GORREC, P. LUTZ et S. RÉGNIER. « Robust microscale grasping using a self scheduled dynamic controller ». *IFAC World Congress*. Cape Town, South Africa, 2014, p. 7492-7498.

50. L. COHEN, S. HALIYO, M. CHETOUANI et S. RÉGNIER. « Intention prediction approach to interact naturally with the microworld ». *2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. 2014, p. 396-401.
51. L. CUI, E. MARCHAND, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « 6-DoF automatic micropositioning using photometric information ». *2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. 2014, p. 918-923.
52. A. MOHAND OUSAID, A. BOLOPION, S. HALIYO, S. RÉGNIER et V. HAYWARD. « Stability and Transparency Analysis of a Teleoperation Chain For Microscale Interaction ». *IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA'14*. 2014, p. 5946-5951.
53. A. MOHAND OUSAID, S. HALIYO, S. RÉGNIER et V. HAYWARD. « H-infinity optimal control enabled micro-force sensing ». *3d International Conference on Systems and Control (ICSC13)*. 2013, p. 490-495.
54. A. MOHAND OUSAID, S. HALIYO, S. RÉGNIER et V. HAYWARD. « Micro-Force sensor by active control of a comb-drive ». *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. 2013, p. 612-617.
55. B. SAUVET, N. OUARTI, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Virtual Reality Backend for Operator Controlled Nanomanipulation ». *3M-NANO International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale*. Best Paper Nominee. 2012, p. 121-127.
56. J. PANAITÉ, T. USCIATI, X. CLADY et S. HALIYO. « An experimental study of the Kinect's depth sensor ». *IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments*. ROSE 2011. Montréal, Québec, Canada, sept. 2011, p. 131-137.
57. A. BOLOPION, C. STOLLE, R. TUNNELL, S. HALIYO, S. RÉGNIER et S. FATIKOW. « Remote Microscale Teleoperation through Virtual Reality and Haptic Feedback ». *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2011)*. 2011, p. 894-900.
58. G. HWANG, A. IVAN, J. AGNUS, M. RAKOTONDRABE, E. LEON PEREZ, S. MERIEMA, H. SALMON, S. HALIYO, N. CHAILLET, S. RÉGNIER et A.-M. HAGHIRI-GOSNET. « Remotely powered floating microswimmers as colloidal microparticle manipulators ». *37th International Conference on Micro and Nano Engineering (MNE 2011)*. 2011, to appear.
59. A. BOLOPION, H. XIE, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « 3D Haptic Handling of Microspheres ». *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010)*. 2010, p. 6131-6136.
60. G. HWANG, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Remotely Powered Propulsion of Helical Nanobelts ». *Robotics : Science and Systems 2010*. 2010, 8pp.
61. G. MILLET, S. HALIYO, S. RÉGNIER et V. HAYWARD. « The Ultimate Haptic Device : First Step ». *Third Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*. IEEE. IEEE, mar. 2009, p. 273-278. DOI : 10.1109/WHC.2009.4810858.
62. A. BOLOPION, B. CAGNEAU, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Tuning the gains of haptic couplings to improve force feedback stability in nanorobotics ». *ICRA'09 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2009, p. 4320-4325.

63. 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 Applications (OTA) Conference*. 2009, OMC3.
64. G. HWANG, J. ACOSTA, E. VELA SAAVEDRA, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Graphene as Thin Film Infrared Optoelectronic Sensor ». *IEEE ISOT 2009 International Symposium on Optomechatronic Technologies*. 2009, p. 169-174.
65. 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*. 2009, p. 74001L.
66. H. XIE, J. ACOSTA, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Pick-and-Place Nanomanipulation with Three-Dimensional Manipulation Force Microscopy ». *The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Best Application Paper Award. 2009, p. 1333-1338.
67. G. MILLET, A. LÉCUYER, J. BURKHARDT, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Improving Perception and Understanding of Nanoscale Phenomena Using Haptics and Visual Analogy ». *Haptics : Perception, Devices and Scenarios*. Sous la dir. de M. FERRE. T. 5024. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, juin 2008, p. 847-856. DOI : 10.1007/978-3-540-69057-3_107.
68. A. ABBACI, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « DNA as building block for self-assembly of micro-components ». *IEEE Second International Conference on Quantum, Nano and Micro Technologies*. 2008, p. 28-33.
69. A. ABBACI, B. DAUNAY, S. HALIYO, S. RÉGNIER, R. BOYD et A. CUENAT. « Characterization of DNA Bio-bonds for Meso-Scale Self-assembly ». *30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC'08)*. 2008, p. 3178-3181.
70. H. XIE, J. VITARD, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Calibration and Nonlinearity Compensation for Force Application in AFM based Nanomanipulation ». *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2008, p. 4024-4029.
71. S. HALIYO, M. BOUKALLEL et S. RÉGNIER. « Force feedback in micro-manipulation and single cell applications ». *Actes de IARP'06 : IARP - IEEE/RAS - EURON Joint Workshop on Micro and Nano Robotics*. Paris, France, oct. 2006.
72. B. DAUNAY, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « 6D haptic feedback for molecular docking ». *Actes de EUROMECH Colloquium 476, Real-time Simulation and Virtual Reality Applications of Multibody Systems*. Ferrol, Espagne, mar. 2006.
73. G. VENTURE, S. HALIYO, A. MICAELLI et S. RÉGNIER. « Force-feedback micromanipulation with inconditionnally stable coupling ». *Actes de IROS'05 : IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Edmonton, Canada, août 2005, p. 784-789.
74. S. HALIYO, G. VENTURE, S. RÉGNIER et J. GUINOT. « An overview of the micro-manipulation system muMAD ». *Actes de AIM'05 : IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechnronics*. Monterey, Etats-Unis, juil. 2005, p. 390-395.

75. S. HALIYO, G. VENTURE et S. RÉGNIER. « Tele-manipulation by adhesion of micro objects ». *IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA'05)*. Espoo, Finlande, juin 2005, p. 133-138.
76. F. DIONNET, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Autonomous Manipulation using a new strategy of accurate release by rolling ». *Actes de ICRA'04 : IEEE International Conference on Robotics and Automation*. La Nouvelle Orléans, Etats-Unis, mai 2004, p. 5019-5024.
77. S. HALIYO, S. RÉGNIER et J. GUINOT. « Micro-manipulation using adhesion forces and dynamical effects ». *Actes de IFToMM'03 : the 11th World Congress in Mechanism and Machine Science*. Tianjin, Chine, avr. 2004, p. 1405-1410.
78. S. HALIYO, S. RÉGNIER et P. BIDAUD. « Micro-manipulation using adhesion forces ». *Actes de IARP'03 : International Advanced Robotics Programme - International Workshop on Microrobots, Micromachines and Microsystems*. Moscou, Russie, avr. 2003, p. 45-52.
79. S. HALIYO, F. DIONNET et S. RÉGNIER. « Advanced micro-manipulation applications ». *Actes de IROS'03 : IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots et Systems*. Las Vegas, Etats-Unis, 2003, p. 1870-1875.
80. S. HALIYO, S. RÉGNIER et P. BIDAUD. « Manipulation of Micro-Objects Using Adhesion Forces and Dynamical Effects ». *Actes de ISER'02 : International Symposium on Experimental Robotics*. Naples, Italie, juil. 2002, p. 367-376.
81. S. HALIYO, S. RÉGNIER et J. GUINOT. « Manipulation of micro-objects using dynamical effects in unconstrained environment ». *Actes de Romansy'02 : 14th CISM-IFTToMM Symposium on Theory and PrACTIce of Robots and Manipulators*. Udine, Italie, juil. 2002, p. 151-162.
82. S. HALIYO, S. RÉGNIER et J. GUINOT. « Adhesion Based Micro-manipulation ». *Actes sur CD-ROM de ISMCR'02 : 12th International Symposium on Measurement and Control in Robotics*. Bourges, France, juin 2002.
83. S. HALIYO, Y. ROLLOT et S. RÉGNIER. « Manipulation of micro-objects using adhesion forces and dynamical effects ». *Actes de ICRA'02 : IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Washington DC, Etats-Unis, mai 2002, p. 1949-1954.
84. S. HALIYO, Y. ROLLOT et S. RÉGNIER. « Dynamical experiments on releasing sticking objets manipulated by adhesion ». *Actes de SPIE International Conference on Microrobotics and Microassembly*. Boston - Etats Unis, oct. 2001, p. 234-242.
85. S. HALIYO, Y. ROLLOT, S. RÉGNIER, P. BIDAUD et J. GUINOT. « Development of the adhesion based micromanipulation demonstrator at LRP ». *Actes du 5ème Congrès Franco-Japonais de Mécatronique*. Besançon, France, oct. 2001, p. 417-425.
86. Y. ROLLOT, S. HALIYO, S. RÉGNIER, L. BUCHAILLOT, J. GUINOT et P. BIDAUD. « Experiments on Micromanipulation Using Adhesion Forces in Unconstrained Environment ». *Actes de IROS'00 : IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Kagawa, Japon, nov. 2000, p. 653-658.
87. S. HALIYO, Y. ROLLOT, S. RÉGNIER et J. GUINOT. « Simulation and conception of a micromanipulator taking advantage of micro-scale specificities ». *Actes de RoMan-Sy'00 : 13th CISM-IFTToMM Symposium on Robots and Manipulators*. Zakopane, Pologne, juil. 2000, p. 265-273.

88. O. BRUNEAU, S. HALIYO et F. BEN OUEZDOU. « Leg design optimization for a walking biped robot based on the RSG concept ». *Tenth World Congress on the theory of machines and mechanisms - IFToMM*. Oulou, Finland, juin 1999.

Conférences nationales avec actes et relecture (5)

89. G. MILLET, S. HALIYO, S. RÉGNIER, A. LÉCUYER et J. BURKHARDT. « A study on the perception of nanoscales through Virtual Reality ». *Communication aux 2nd journées de l'AFRV*. 2007, p. 6.
90. S. HALIYO, S. RÉGNIER et J. GUINOT. « Caractérisation d'un micro-objet saisi par adhésion ». *Actes sur CD-ROM du 16ème Congrès Français de Mécanique*. Nice, France, sept. 2003, p. 919-925.
91. F. DIONNET, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Micro-manipulation par adhésion et effet inertiel ». *Actes sur CD ROM des Premières Journées du Réseau Thématique Pluridisciplinaire Micro-robotique*. Rennes, France, 2002.
92. S. HALIYO, Y. ROLLOT et S. RÉGNIER. « Micro-manipulation par adhésion : étude expérimentale ». *Actes de CFM'01 : 15ième Congrès Français de Mécanique*. Nancy, France, sept. 2001, p. 923-929.
93. S. HALIYO, Y. ROLLOT et S. RÉGNIER. « Expérimentations de la micro-manipulation par adhésion ». *Actes des Sixièmes Journées du Pôle Micro-robotique*. Cachan, France, juin 2000.

Chapitres d'ouvrages (2)

94. S. HALIYO et S. RÉGNIER. « An overview on robotic micromanipulation ». *Robotics: State of the Art and Future Trends*. Sous la dir. de G. LEGNANI et I. FASSI. ISBN : 978-1-62100-403-5. Nova Science Publishers, 2011, p. 319-351.
95. S. HALIYO, S. RÉGNIER et P. BIDAUD. « Manipulation of Micro-objects Using Adhesion Forces and Dynamical Effects ». *Experimental Robotics VIII*. Sous la dir. de S. B. / HEIDELBERG. T. 5/2003. 2003, p. 382-391.

Direction d'ouvrages (5)

96. S. HALIYO, A. SILL, Q. ZHOU, P. KALLIO et S. FATIKOW, éd. *Proceedings of 2019 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*. Helsinki, Finland, 2019.
97. S. HALIYO, A. SILL, F. ARAI et S. FATIKOW, éd. *Proceedings of 2018 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*. IEEE, 2018. ISBN : 978-1-5386-4841-4.
98. S. HALIYO, S. MARTEL et S. FATIKOW, éd. *Proceedings of 2017 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*. IEEE, 2017. ISBN : 978-1-5386-0346-8.

99. S. HALIYO, A. SILL, S. RÉGNIER et S. FATIKOW, éd. *Proceedings of 2016 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*. IEEE, juil. 2016. ISBN : 978-1-5090-1510-8.
100. Y. BELLOUARD, S. RÉGNIER et S. HALIYO, éd. *Proceedings of 2012 International Symposium on Optomechatronic Technologies*. IEEE, 2012. ISBN : 978-1-4673-2877-7.

Conférences Invités Internationales (6)

101. S. HALIYO. « Haptic Microscopy : Human Interaction for Microrobotics ». *ICRA'19 workshop on "Progress Toward Automated Micro-Bio-Nano Factories Through Robotic Manipulation"*. invited conference. Montréal, Canada, 2019.
102. S. HALIYO, G. HWANG et S. RÉGNIER. « Artificial Helical Nanobelt Robots for Biomedical Applications ». *Third Unither Nanomedical and Telemedical Technology Conference*. invited conference. Québec, Canada, 2010.
103. H. XIE, J. VITARD, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Enhanced Sensivity of Mass Detection Using the First Torsional Mode of Microcantilevers ». *Actes de ICMA'07 : IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. Session invitée. Harbin, Chine, août 2007.
104. S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Advanced applications using muMAD, the adhesion based dynamic micro-manipulator ». *Actes de AIM'03 : IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Session invitée. Kobe, Japon, juil. 2003, p. 880-885.
105. S. HALIYO, S. RÉGNIER et P. BIDAUD. « Manipulation of Micro-Objects Using Adhesion Forces and Dynamical Effects ». *Actes de ISER'02 : International Symposium on Experimental Robotics*. Naples, Italie, 2002, p. 367-376.
106. P. BIDAUD, S. RÉGNIER, Y. ROLLOT, J. SZEWCZYK, J. GUINOT, V. DESARS, S. HALIYO, G. DUMONT, L. BUCHAILLOT, D. SALLÉ et M. DAHAN. « Micro-robotic systems for MIS and micromanipulation ». *Actes IARP Workshop 2001*. Conférence Invitée. Shanghai, Chine, avr. 2001.

Brevets (7)

107. A. WEILL-DUFLOS, S. HALIYO, S. RÉGNIER, O. PETIT et V. HAYWARD. « Capteur de force sans raideur mécanique ». FR-1850231. Jan. 2018.
108. A. WEILL-DUFLOS, S. HALIYO, S. RÉGNIER et V. HAYWARD. « Interface Haptique à Adaptation de Perception ». FR-1860422. 2018.
109. T. DAUNIZEAU, S. HALIYO, S. RÉGNIER, T. LU, D. HERIBAN et M. LUTRINGER. « Pince mécatronique à effort de préhension découplé. » FR-16 56359. Juil. 2016.
110. G. HWANG, S. HALIYO, J. ACOSTA et S. RÉGNIER. « Method For Generating A Potential Difference With The Aid Of A Thin Graphene Film, And Devices Using The Same ». WO/20130011577. 2011.
111. G. HWANG, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Procédé de Réalisation d'une Electrode Métallique à la Surface d'un Matériau Hydrophobe ». FR/2550675. 2011.

Liste de Publications

112. G. MILLET, V. HAYWARD, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Device For Quicky Generating A Torque On An Extended Dynamic Range With Low Inertia ». WO2010102998. 2010.
113. G. MILLET, V. HAYWARD, S. HALIYO et S. RÉGNIER. « Dispositif pour générer un couple de façon rapide, sur une plage dynamique étendue et avec peu d'inertie ». FR2943189. Mar. 2009.

Thèse

114. S. HALIYO. « Les forces d'adhésion et les effets dynamiques pour la micro-manipulation ». Dir. J.-C. Guinot. These de doctorat. LRP : Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, déc. 2002.

CURRICULUM VITÆ SYNTHÉTIQUE

Doğan Sinan HALIYO, *Ph.D.*
Associate Professor on Mechanical
Engineering & Robotics

ORCID : 0000-0003-4587-381X
<http://people.isir.upmc.fr/haliyo>
sinan.haliyo@sorbonne-universite.fr

ISIR,
Institut des Systèmes Intelligents
et de Robotique ;
Sorbonne Université, Paris, FRANCE

<http://www.isir.upmc.fr>

Academic Experiences

since 2005	Associate Professor ISIR, Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique, Dep. of Mechanical Eng., Sorbonne Université, Paris, France
2004–2005	Research Engineer CEA-LIST, French Alternative Energies and Atomic Energy Commission, Fontenay-aux-Roses, France
2002–2004	Research Associate <i>Laboratoire de Robotique de Paris</i> , Dep. of Mechanical Eng., Université Pierre et Marie Curie, Paris, France
1999–2002	Ph.D candidate & teaching assistant <i>Laboratoire de Robotique de Paris</i> , Université Pierre et Marie Curie, Paris, France

Education

1994–1997	B.A Mechanical Engineering ENS Cachan & Université Pierre et Marie Curie
1997–1999	Master in Robotics <i>Grade A, ranking : 1</i> Université Pierre et Marie Curie, ENSAM
1999–2002	Ph.D on Mechanical Engineering & Robotics <i>Adhesion forces and dynamics for micromanipulation ; adv. Prof. J.-C. Guinot ; LRP</i> , Université Pierre et Marie Curie

Teaching Experience

Teaching since 1999 at the Dep. of Mechanical Eng., Sorbonne U. ; approx. 200h/year.

Master Sc. Robotics and Intelligent Systems

- Scientific Programming for Robotics
- Dynamics and Simulation
- Haptics & Virtual reality
- Robotics Student Projects

Student Advising

- PhD co-supervision : 12 defended, 5 ongoing
- Master internships : 20+ students

Bachelor Sc. Mechanical Engineering

- Robotics 101
- Mechanical Design and Machine Theory
- Technical Drawing & CAD
- Multiphysics Simulation

Faculty Service

- Faculty Council on Teaching and Learning
- Pedagogical Platform on Engineering

Research activities

Currently head of "MultiScale Interactions" group at ISIR : 6 permanent researchers, 14 PhD candidates, 2 engineers *Keywords : User interfaces, Virtual Reality and Haptics, microphysics, micro/nano-robotics, micro/nano manipulation*

Ongoing Grants as coordinator

- **IOTA**, Interactive Optical Tweezers, ANR-France 2016-2019, **coordinator**, with U. Aix-Marseille, ISM.
- **FishTank** and **TeleTweezer** Projects, Labex SMART Sorbonne, 2016-2019

Current Collaborative Projects

- **COLAMIR**, Collaborative microscale assembly, ANR-France 2016-2019, with Femto-ST, Besançon (Cédric Clevy) and Percipio SA.
- **MultiFlag**, bio-inspired swimming microrobots, ANR-France 2016-2019, Stéphane Régnier, with Femto-ST, Besançon and iCUB, Strasbourg.
- **PolyREM**, Robotic AFM for bio samples in SEM, Emergence Sorbonne 2017-2019 (Mokrane Boudaoud), with Institut de Biologie Paris-Seine and Centre de recherche en Myologie

Completed Collaborative Projects

- RuBAN, Interactive simulation of DNA strands, Convergence UPMC 2015-2018, with L.J.P., UPMC.
- NANOROBUST Nanomanipulation under scanning electronic microscope, funding ANR-France (2011-2014), collaboration with FEMTO-ST (Pr. Ph. Lutz, leader), LPN and IRISA.
- WearHAP, WEARable HAPTics, EC FP7-ICT-2011-9-2.1 Cognitive Systems and Robotics
- Nanorobots for health applications, Emergence research Grant, UPMC (2011-2013)
- GOLEM - Bio-inspired assembly of meso-scale components, EC FP6-NMP (2006-2010) with Eindhoven University (Pr. Yves Bellouard, leader), EPFL - Stuttgart Uni. - NPL - CEA/LIST - Delong - Octax and Quintenz
- AFM based nanohandling, funding EGIDE (2008-2010), Collaboration with AMIR (Oldenburg University - Germany - Prof. Fatikow)
- Haptic perception of the micro and nano scales, funding ANR (2006-09), collaboration with CEA/LIST (Dr A. Micaelli) and IRISA Rennes (Dr A. Lecuyer)
- NanoRAC - Nano Robotics for Assembly Characterization, EC FP6-NMP (2005-2008), collaboration with LIST/CEA (Dr P. Gravez, leader) - AMIR - UCAM Cambridge Uni - MIC Copenhagen - Nascatec Germany

Editorial Positions and Referee Activities

- Associate Editor of *Mechatronics*, Elsevier (2016 –)
- General secretary IARP'06, Local chair IEEE ISOT'12; MARSS'16; Publication Chair MARSS'17 to 19; Communication chair ICRA'20
- Member of the scientific committee of CIRA'05 (IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation), ISOT'13, 3MNANO'12 to 3MNANO'15
- Scientific reviews : IEEE Trans. on Mechatronics, IEEE Trans. on Robotics, Plos ONE, Mechatronics, Int. J. Advanced Robotics...

Publications

114 publications, including 2 book chapters, 36 peer reviewed journal articles, 60 conference communications, 7 international patents; H-index : 20 (source : ISI Web of Knowledge, Oct 2019)

Résumé

Ce manuscrit retrace l'avancement de mes activités de recherche depuis mon recrutement en 2004 comme maître de conférences au *Laboratoire de Robotique de Paris, UPMC*, jusqu'à maintenant où je dirige l'équipe "INTERACTIONS MULTIÉCHELLES", fondée en 2018 à *l'Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique, Sorbonne Université, Paris*.

Le fil conducteur de ces activités est l'interaction de l'humain avec un système distant, et plus particulièrement quand ce système opère dans le micromonde : il s'agit des échantillons dont les dimensions sont inférieures au millimètre, ou encore quand la précision et la résolution recherchées s'expriment en 'micro' ou 'nano'. Les applications se situent dans le domaine de l'instrumentation scientifique, de la physique à la biologie, dans la chirurgie, ainsi que dans la conception, la fabrication et l'assemblage des systèmes de précision pour les technologies émergentes.

Dans ce cadre, mes activités se préoccupent aussi bien de la perception, de l'haptique et des interfaces homme/machine que de la robotique. La place centrale de l'humain dans ces domaines est aussi la clef de voûte de l'équipe INTERACTIONS MULTIÉCHELLES.