



HAL
open science

Perception et interface haptique pour les nanosciences

Guillaume Millet

► **To cite this version:**

Guillaume Millet. Perception et interface haptique pour les nanosciences. Automatique / Robotique. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2009. Français. NNT: . tel-00555597

HAL Id: tel-00555597

<https://theses.hal.science/tel-00555597>

Submitted on 13 Jan 2011

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.

**THESE DE DOCTORAT DE
L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE**

Spécialité : Mécanique – Robotique

École doctorale de Sciences mécaniques, acoustique, électronique et robotique de Paris

Présentée par

Guillaume MILLET

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE

Sujet de la thèse :

Perception et interface haptique pour les nanosciences

Soutenue le 30 octobre 2009

devant le jury composé de :

M. J.-L. FLORENS	Ingénieur de Recherche, HDR, à l'ACROE INPG	Rapporteur
M. A. KHEDDAR	Directeur de Recherche CNRS au CNRS-AIST JRL	Rapporteur
M. J.-M. BURKHARDT	Maître de Conférences à l'université Paris Descartes	Examineur
M. V. HAYWARD	Professeur à l'université Pierre et Marie Curie	Examineur
M. A. LÉCUYER	Chargé de Recherche INRIA à l'IRISA Rennes	Examineur
M. S. RÉGNIER	Professeur à l'université Pierre et Marie Curie	Directeur de thèse
Invité		
M. S. HALIYO	Maître de Conférences à l'université Pierre et Marie Curie	Examineur

Résumé

Perception et interface haptique pour les nanosciences

La téléopération est un moyen unique pour interagir aux échelles micro et nanoscopique où la perception sensorielle de l'homme a dépassé ses limites. Des applications comme la conception de micro/nanosystèmes ou l'enseignement des nanotechnologies peuvent trouver leur expression dans ce thème prometteur de recherche. Cette thèse aborde la problématique de la perception et d'une interface haptique pour les nanosciences, sous l'angle des utilisateurs potentiels. Les points clés de ce travail se déclinent en deux parties.

La première décrit une analyse détaillée de la perception utilisateur à l'aide d'un ensemble d'évaluations, dans un premier temps sur des expériences ciblées tâche (où la perception des phénomènes n'est pas primordiale comparée à la résolution de la tâche), puis sur d'autres orientées compréhension des phénomènes dans une démarche pédagogique. Le cœur de ce travail d'analyse s'articule autour de la définition d'une plate-forme de simulation, et la recherche d'assistances haptiques dédiées à des stratégies complexes de manipulation et d'analogies comportementales pour la compréhension de la microscopie à force atomique.

La deuxième partie aborde la conception d'une interface haptique à haute fidélité pour l'échelle nanoscopique. Une nouvelle approche d'actionnement est proposée, où deux moteurs sont couplés visqueusement afin d'obtenir une interface à large plage dynamique et à faible inertie. Les deux prototypes réalisés montrent que ce système peut approcher voire dépasser les besoins dérivés des capacités motrices et perceptuelles de la main humaine.

Mots clés : évaluation utilisateur, assistance haptique, analogie, interface haptique, micromanipulation, nanosciences.

Abstract

Haptic perception and device for nanoscience

Teleoperation is a unique way to interact at micro- and nanoscopic scales where the limits of human sensory perception are exceeded. The applications such as micro/nanosystems design or nanotechnology teaching may develop in this promising research field. This work investigates the issue of haptic perception and device for nanoscience, from the point of view of potential users. The key points of this work are organized in two parts.

The first part describes a detailed analysis of user perception with a set of evaluations, first, on task-based experiments (where the perception of the phenomena is not essential compared to the achievement of the task), then, on experiments based on the understanding of the phenomena in an education context. The core of this analysis is based on the development of a simulation setup and the research of haptic aids dedicated to complex manipulation strategies and of behavioral analogies for the understanding of atomic force microscopy.

The second part addresses the design of a high-fidelity haptic device for rendering nanoscale forces. A novel approach of actuation is proposed, consisting of two viscously coupled motors, in order to provide a large dynamic scale and a very small inertia. The two prototypes developed show that this system can approach or exceed human motor and sensory performance.

Keywords: user test, haptic aid, analogy, haptic device, micromanipulation, nanoscience.



Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique
CNRS UMR 7222
4 Place Jussieu - 75005 Paris

Remerciements

Les travaux présentés dans ce manuscrit n'auraient pu aboutir sans le soutien et les conseils de nombreuses personnes. Je tiens à exprimer ici toute ma gratitude à ceux qui ont contribué de près ou de loin à cette thèse.

Je remercie tout d'abord les membres du Jury qui ont accepté d'évaluer mes travaux de recherche, en particulier les deux rapporteurs Abderrahmane Kheddar et Jean-Loup Florens pour leur travail de relecture et leurs remarques et questions pertinentes.

J'ai eu la chance d'être encadré par des personnes de grandes qualités humaines et scientifiques. Tout au long de ces quatre années, mon directeur de thèse, Stéphane Régnier, a toujours été présent et attentif au bon déroulement de ma thèse. Je tiens à le remercier pour son soutien scientifique, matériel et moral, pour la confiance qu'il m'a accordée, pour sa patience pourtant mise à rude épreuve, pour son enthousiasme et sa gentillesse, ainsi que pour la formidable ambiance de travail qu'il a su maintenir au sein de son équipe. Merci pour ces bons moments partagés lors des diners d'équipe et ses discussions sur les rouages du monde de la recherche universitaire.

J'ai également bénéficié d'un co-encadrement efficace et amical grâce à Sinan Haliyo. Je le remercie chaleureusement pour son aide dans la mise en place des expériences, ses conseils avisés, ses intuitions et idées originales sur les assistances haptiques pour la téléopération avec le nanomonde.

Durant la seconde moitié de ma thèse, j'ai eu le plaisir de travailler avec Vincent Hayward. Je tiens à le remercier pour son aide et le temps qu'il m'a accordé malgré un emploi du temps chargé, pour ses intuitions géniales à l'origine du nouvel actionneur haute performance. J'ai beaucoup apprécié sa grande gentillesse et nos discussions scientifiques passionnantes.

L'étude pédagogique n'aurait pu être aussi approfondie et rigoureuse sans les contributions d'Anatole Lécuyer et de Jean-Marie Burkhardt. Je les remercie pour leurs conseils et leur aide inestimable dans la conception et l'analyse des expériences utilisateurs.

Mes remerciements vont également aux collègues et amis de l'équipe gérée par Stéphane Régnier ; je les remercie pour leur soutien, leur bonne humeur et les bons moments passés ensemble. J'aimerais remercier en particulier Bruno Sauvet pour son aide au développement de l'actionneur, mes collègues de bureau Julien Vitard puis Aude Bolopion pour leur soutien, leur gentillesse et leur aide à la relecture de ce manuscrit, et Hui Xie pour ses discussions passionnantes sur la nanomanipulation.

J'exprime ma gratitude à tous les membres de l'ISIR pour m'avoir fourni un environnement de travail agréable. Je remercie tous les doctorants et post-doctorants du laboratoire qui ont contribué à faire de ces quatre années de travail une expérience humaine riche et inoubliable.

Pour finir, j'adresse de vifs remerciements à mes amis, en particulier à Vincent Gourcuff, et à mes parents et mon frère pour leur soutien moral.

Table des matières

Introduction	1
1 Problématique	3
1.1 Phénomènes nanophysiques et couplages haptiques	4
1.1.1 Les phénomènes physiques	4
1.1.1.1 Les forces prédominantes	4
1.1.1.2 Cycle approche-retrait	5
1.1.2 Couplage haptique	6
1.1.2.1 Transparence	7
1.1.2.2 Stabilité	8
1.1.3 Influence du couplage sur la perception haptique des phénomènes micro et nanophysiques	8
1.2 Les plates-formes de téléopération aux échelles micro et nanoscopique . .	9
1.2.1 Les travaux en manipulation directe	9
1.2.2 Les travaux en manipulation assistée	11
1.3 Apport de l’haptique d’un point de vue pédagogique	16
1.4 La télé-micromanipulation à l’ISIR	22
1.4.1 La plate-forme de manipulation	22
1.4.2 Quelques expériences	24
1.5 Conclusion et plan du mémoire	26
2 Simulateur et assistances haptiques pour la microtéléopération	29
2.1 Simulateur interactif dédié aux échelles micro/nanoscopiques	30
2.1.1 Architecture de la simulation interactive	30
2.1.2 Simulation physique	31
2.1.2.1 Modélisation quasi-statique	32
2.1.2.2 Stratégies de micromanipulation	35
2.1.3 Interface graphique	37
2.1.4 Interface haptique	38
2.1.5 Couplage et assistance haptique	38
2.2 Assistances haptiques	39
2.2.1 Couplage haptique dédié à la perception	39
2.2.2 Rendu haptique des forces d’attraction	40
2.2.3 Position de repos virtuelle pour les opérations à effort constant . .	40
2.2.4 Assistance implémentée	42
2.3 Étude pilote sur une tâche de saisie et dépose par adhésion	44
2.3.1 Plate-forme expérimentale	44
2.3.2 Méthode d’évaluation	46

Table des matières

2.3.3	Résultats	46
2.3.3.1	Performances	46
2.3.3.2	Effet d'apprentissage	47
2.3.3.3	Impressions subjectives	48
2.3.4	Discussion	49
2.4	Étude pilote sur une tâche de dépose par roulement	50
2.4.1	Plate-forme expérimentale	50
2.4.2	Méthode d'évaluation	51
2.4.3	Résultats	51
2.4.4	Discussion	52
2.5	Conclusion	53
3	Retour haptique pour la compréhension des phénomènes nanophysiques	55
3.1	Plate-forme d'évaluation des phénomènes nanophysiques	55
3.1.1	Description du système expérimental	55
3.1.1.1	Simulation physique	55
3.1.1.2	Rendu haptique	56
3.1.1.3	Rendu graphique	56
3.1.2	Système analogue aimant-ressort réel	58
3.2	Expérience	59
3.2.1	Méthode	59
3.2.2	Résultats	65
3.2.2.1	Identification de courbe	65
3.2.2.2	Temps	68
3.2.2.3	Analyse des dessins de courbe force-distance	70
3.2.2.4	Analyse approfondie sur le contenu des modèles mentaux	71
3.2.2.5	Préférences	75
3.3	Discussion générale	76
3.4	Conclusion et perspectives	80
4	Nouvelle interface haptique haute-fidélité	81
4.1	Problématique	81
4.2	Approches existantes	83
4.3	Conception et validation du concept	85
4.3.1	Justification	85
4.3.2	Étude de faisabilité	86
4.3.2.1	Description du prototype	86
4.3.3	Commande	89
4.3.4	Résultats expérimentaux	92
4.3.4.1	Identification	92
4.3.4.2	Performances temporelles	94
4.3.4.3	Discussion	94
4.4	Validation complémentaire avec un second prototype	96
4.4.1	Conception	96
4.4.1.1	Étude théorique	96
4.4.1.2	Analyse numérique multiphysique	98

4.4.2	Analyse de stabilité	102
4.4.2.1	Conditions de stabilité existantes	102
4.4.2.2	Étude des oscillations à la limite de stabilité	103
4.4.3	Résultats expérimentaux	107
4.4.3.1	Identification	107
4.4.3.2	Limite de stabilité	108
4.5	Discussion	109
4.6	Conclusion et perspectives	111
Conclusion		113
Annexes		115
A Liste des symboles		115
B Questionnaires de l'évaluation pédagogique		117
C Spécifications techniques		123
C.1	Capteurs	123
C.2	Amplificateurs	123
C.3	Acquisition et commande	123
C.4	Second prototype	123
Bibliographie		125
Liste des publications		133

Introduction

LA téléopération aux échelles micro et nanoscopique apparaît comme un thème prometteur de recherche. Il s'agit d'un moyen unique pour interagir à une échelle où la perception sensorielle de l'homme a dépassé ses limites. Des applications comme la conception de micro/nanosystèmes ou l'enseignement des nanotechnologies peuvent trouver leur expression dans ce thème fondamental. Cependant, il est important aujourd'hui de répondre à quelques questions fondamentales dont la principale est : quel est l'apport de l'haptique au sens de la perception par rapport à ce monde si complexe et si mal connu en modélisation physique ?

Cette thèse aborde cette problématique autour d'un angle différent. En effet, cette recherche ne s'intéresse pas à démontrer la faisabilité de la téléopération et d'un couplage stable avec un système de microscope à force atomique, champ de recherche largement couvert par la littérature. Elle aborde ce problème sous le regard des utilisateurs potentiels du système. Notre démarche cherche à étudier en détail la perception utilisateur d'un ensemble de tests que nous divisons en deux parties, les expériences ciblées tâche où la perception des phénomènes n'est pas primordiale comparée à la résolution de la tâche et les secondes, orientées compréhension des phénomènes dans une démarche à connotation pédagogique. Nous avons ainsi privilégié des études détaillées sur des expériences pilotes en télémanipulation et sur un démonstrateur pédagogique en nanophysique. Le cœur de ce travail d'analyse de la perception utilisateur s'articule autour de la définition d'une plate-forme de simulation, d'une méthodologie d'étude à base de tests et de questions et d'une analyse statistique des réponses.

Les phénomènes propres à ces échelles engendrent la mise en place de stratégies spécifiques pour, par exemple, des opérations de manipulation. La seconde difficulté est représentée par les phénomènes physiques et leurs propriétés si spécifiques, forces à distance, à grande dynamique, inertie très faible. Ces deux points engendrent une perte de repères de l'utilisateur dans son couplage bilatéral avec le nanomonde. Des points cruciaux pourront être abordés dans ces analyses utilisateurs comme la synthèse et l'analyse de la pertinence d'assistances haptiques pour de la manipulation par adhésion ou par roulement, la recherche d'analogies pour la compréhension de ces phénomènes et enfin l'intérêt de l'haptique dans une démarche pédagogique pour les nanosciences.

Le deuxième centre de gravité de ce travail concerne la conception d'une interface haptique à haute fidélité pour l'échelle nanoscopique. En effet, la mise en place des tests utilisateurs et les premiers résultats ont rapidement mis en lumière le problème de rendu des forces nanophysiques par rapport aux capacités des interfaces conventionnelles. Ainsi, une interface à grande dynamique et à faible inertie est apparue pertinente dans ce travail. Là encore, l'idée sous-jacente est d'améliorer la perception utilisateur des phénomènes mis en jeu à cette échelle. Une nouvelle approche pour la conception d'une

Table des matières

interface est proposée. Elle est basée sur un actionnement à deux étages où un gros et un petit moteur sont couplés à un unique arbre. Le petit moteur s'occupe uniquement de fournir les composantes transitoires ou hautes-fréquences de la consigne de couple, tandis que le gros moteur est couplé à l'arbre de sortie *via* un coupleur visqueux et est asservi pour produire la vitesse relative nécessaire pour fournir le couple désiré. Des expériences montrent que ce système d'une nouvelle génération peut être développé pour approcher ou dépasser les besoins dérivés des capacités motrices et perceptuelles de la main humaine.

Le premier chapitre aborde l'état de l'art de ce domaine en couvrant les spécificités du nanomonde, les travaux pionniers en téléopération à cette échelle, les plates-formes existantes, les études sur l'apport de l'haptique dans un cadre pédagogique et enfin les travaux de recherche de notre équipe sur lesquels sont basés nos simulations et nos évaluations. Le second chapitre aborde la synthèse d'une plate-forme de simulation de tâches et de phénomènes physiques, et d'évaluations utilisateurs. Celui-ci aborde plus particulièrement les assistances haptiques et leur appréciation dans un contexte de tâches. Le troisième chapitre aborde une analyse détaillée d'une expérience de toucher du nanomonde. Cette étude utilisateur permet de qualifier l'importance des analogies et de la perception haptique des phénomènes physiques spécifiques. Enfin, le quatrième chapitre aborde la conception d'une interface haute fidélité. La validation de notre concept est proposée autour de l'étude détaillée de deux prototypes. Les résultats encourageants sont décrits en détail. Enfin une conclusion rappelle les points fondamentaux de ce travail et donne quelques pistes de perspectives.

Chapitre 1

Problématique

MANIPULER des objets à l'échelle nanoscopique est toujours un problème crucial pour le développement des nanosciences. Cette problématique concerne des domaines aussi variés que la biologie, les sciences des matériaux ou encore l'électronique. Il subsiste cependant de nombreuses difficultés technologiques à cette échelle. Le manque de vision en temps réel avec une perception satisfaisante de la raideur, la précision limitée des outils de manipulation, la faiblesse des rapports signal sur bruit, le manque de répétabilité, la sensibilité des systèmes aux conditions environnementales, ou encore, la fragilité des objets rendent les opérations de manipulation directe longues et délicates.

Une première approche consiste à automatiser les tâches à effectuer. Cependant, cette technique demande des modèles fins de l'interaction entre les objets manipulés, les outils de manipulation et l'environnement. Or, les nombreuses hypothèses et incertitudes sur les phénomènes nanophysiques ainsi que les difficultés technologiques pour les mesurer font de cette approche un objectif à long terme, malgré les nombreuses avancées scientifiques récentes.

Cette approche par l'automatisation empêche toute interactivité entre l'utilisateur et le système au cours du déroulement des opérations. Or, les connaissances et les capacités de réaction de l'opérateur sont actuellement précieuses pour l'exécution des tâches de manipulation. Les configurations initiales peuvent être différentes d'une tâche à l'autre, ce qui rend l'automatisation difficile sans opérateur. De plus, le retour visuel n'est pas suffisant pour manipuler car il n'est pas très fidèle à cette échelle (profondeur limitée au plan de focalisation, parallaxe avec les microscopes électroniques). Ainsi, l'utilisation d'aides à la manipulation présente une autre approche prometteuse, conservant l'interactivité de la manipulation directe tout en la facilitant. Le retour haptique constitue le moyen de communication privilégié pour transmettre les informations d'effort à l'utilisateur, puisqu'il correspond au sens utilisé de façon naturelle lors de manipulations directes à l'échelle macroscopique.

Ce premier chapitre propose ainsi un panorama global de l'ensemble des recherches dans ce domaine. Dans un premier temps, les particularités propres au couplage entre un système macroscopique et des phénomènes nanophysiques sont décrites. Ensuite, les plates-formes de télémanipulation sont analysées en termes de stratégie, de couplage et surtout par rapport aux objectifs de cette thèse en termes d'assistance haptique et d'évaluation. Les expériences à caractère pédagogique autour de l'haptique font l'objet d'une troisième partie et montrent que le retour haptique peut être un atout intéressant pour l'apprentissage des nanotechnologies. Enfin, quelques résultats expérimentaux propres à notre équipe sont décrits pour appréhender le contexte de ce travail. La dernière partie de chapitre introduit la problématique choisie autour de deux axes principaux, l'évalua-

tion utilisateur qui guidera les chapitres 2 et 3 et la conception d'une interface haptique dédiée, objet du quatrième chapitre.

1.1 Phénomènes nanophysiques et couplages haptiques

Cette partie présente les spécificités physiques du nanomonde et ses répercussions pour le couplage haptique au sens large.

1.1.1 Les phénomènes physiques

1.1.1.1 Les forces prédominantes

À l'échelle microscopique, trois grandes classes de forces d'adhésion apparaissent et doivent être prises en considération. Leur module est, en effet, non négligeable et joue un rôle primordial dans les interactions entre surfaces. Ces forces sont [Israelachvili 1991] :

- les forces de *Van der Waals*, forces d'interaction entre les molécules de deux corps en présence ;
- les forces *électrostatiques*, forces de Coulomb classiques qui dépendent des charges acquises par les surfaces¹ ;
- les forces *capillaires*, dont l'existence est déterminée par les conditions d'humidité de l'environnement.

Lorsqu'un objet est en contact avec un substrat, ses caractéristiques intrinsèques doivent être connues pour estimer la force nécessaire, appelée force de *pull-off*, pour détacher l'objet du contact. Il existe de nombreux modèles estimés en fonction d'un paramètre λ , appelé *paramètre d'élasticité* [Maugis 1992] :

$$\lambda = 2\sigma_0 \left(\frac{R}{\pi W K^2} \right)^{1/3} \quad \text{avec} \quad \sigma_0 = \frac{W}{h} \quad \text{et} \quad h \approx 1\text{\AA}. \quad (1.1)$$

Les différents choix de modèles sont résumés dans le tableau synthétique 1.1.

Modèles	Hypothèses	Cas applicables
Hertz	Contact élastique sans adhésion	
JKR $\lambda > 5$	Déformation due à l'adhésion	Forte énergie d'adhésion, matériau souple et grand rayon de courbure
DMT $\lambda < 0.1$	Déformation Hertzienne du contact + adhésion	Faible énergie d'adhésion, matériau rigide et faible rayon de courbure
Dugdale $0.1 < \lambda < 5$	La force d'adhésion est attractive en dehors de la zone de contact	Transition entre les modèles JKR et DMT

TAB. 1.1 – Les modèles de contact et les hypothèses associées

1. Il est à noter que les dimensions réduites des objets considérés impliquent de faibles charges surfaciques ; par conséquent, les phénomènes de triboélectrification ne sont pas négligeables.

Ces formules font apparaître l'énergie de surface γ et le travail d'adhésion W qui sont reliés par les équations suivantes [Israelachvili 1991] :

$$W_{ij} \approx 2\sqrt{\gamma_i\gamma_j} \quad (1.2)$$

$$W_{ikj} = W_{ii} + W_{jj} - W_{ik} - W_{jk} = \gamma_{ik} + \gamma_{jk} - \gamma_{ij}. \quad (1.3)$$

1.1.1.2 Cycle approche-retrait

L'outil de microscopie le plus utilisé à l'échelle nanoscopique est le microscope à force atomique (AFM). Celui-ci se compose d'une sonde soumise à une force et à un détecteur qui mesure la réponse de cette sonde. Typiquement, cette sonde est une poutre avec ou sans pointe qui fléchit en présence d'une force attractive ou répulsive. Le capteur mesure cette flexion qui peut être reliée à la force par la loi de Hooke, ou $F = k\zeta$, avec k la constante de raideur de la poutre et ζ la flèche mesurée.

Le cycle d'approche retrait désigne le comportement mécanique de cette sonde lors d'un contact avec une surface échantillon dans une direction normale à cette surface. Une mesure classique de ce comportement est celle de la force appliquée par le substrat sur la pointe en fonction de la distance entre le substrat et la base de la poutre. Par exemple, la figure 1.1 montre le profil d'une courbe force-distance d'une pointe en silicium au contact d'une surface en polystyrène en conditions ambiantes. D'autres exemples de courbes AR expérimentales en conditions ambiantes sont disponibles dans [Gauthier et coll. 2005]. La courbe AR se caractérise par un cycle d'hystérésis dont les deux seuils dépendent de la raideur de la poutre, des conditions du contact (entre autres, les matériaux, la rugosité et l'oxydation des surfaces, et la durée du contact) et de l'environnement (humidité, pression, température).

Loin de la surface (point **A**), les forces à distance sont négligeables, donc la poutre ne fléchit pas. À l'approche du point **B**, les forces attractives augmentent rapidement

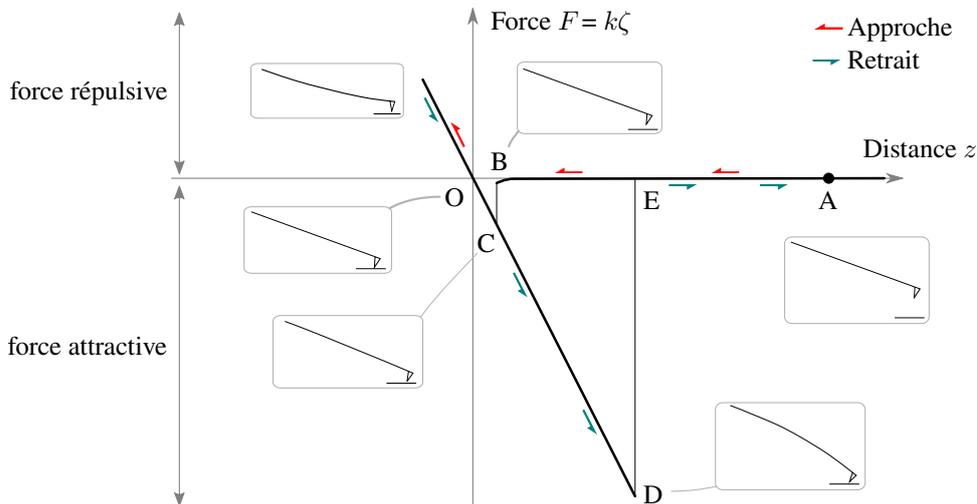


FIG. 1.1 – Courbe force-distance d'un cycle AR montrant l'évolution de la force appliquée par le substrat sur la pointe en fonction de la distance entre le substrat et la base de la poutre.

et fléchissent la poutre. Toutefois, cette flèche est bien plus petite que celle durant la phase de retrait (au moins cent fois moindre en conditions ambiantes). Elle est ainsi rarement visible à l'échelle de la courbe entière. À la hauteur du point **B**, une instabilité apparaît car le gradient des forces attractives dépasse la rigidité de la poutre. La pointe va alors se coller brusquement sur le substrat ; ce saut de contact, ou *snap-in* en anglais, est représenté par le segment BC sur la courbe.

Une fois au contact, la pointe est repoussée par les forces de contact, selon une mécanique du contact. Lors du retrait, la pointe reste collée au substrat et la poutre fléchit lorsque son énergie élastique de flexion dépasse l'énergie d'adhésion. Le point **D** représente l'instant où la force élastique de la poutre est égale aux forces d'adhésion. Une fois cet équilibre instable dépassé, le second saut de la courbe AR a lieu, la pointe se détache et la poutre revient à sa forme initiale (point **E**). Ce seuil de décollement est souvent désigné par le terme anglais *pull-off* dont la formulation analytique a été présentée. Les forces à distance qui influent avant que la pointe ne touche le substrat sont essentiellement, en conditions ambiantes, les forces de Van der Waals et les forces électrostatiques. Les conditions ambiantes impliquent la présence d'une fine couche d'eau adsorbée aux surfaces. Cette particularité ajoute des forces de capillarité importantes et augmente principalement le seuil de décollement.

Plus généralement, un cycle d'hystérésis apparaît lorsqu'un système est suffisamment souple et soumis à des forces attractives décroissantes, c'est-à-dire des forces attractives plus grandes au contact qu'à distance. Prenons l'exemple d'une force créée par un aimant sur un solide ferromagnétique. Cette force augmente quand la distance diminue. Par conséquent, la courbe force-distance de l'interaction d'un système aimant-ressort avec une surface métallique présente également un cycle d'hystérésis.

1.1.2 Couplage haptique

Quelque soit le type de télémanipulation réalisée, un couplage haptique est nécessaire entre l'interface haptique et le robot esclave (cas de la manipulation directe) ou l'objet virtuel (cas de la manipulation assistée et de la réalité virtuelle). La figure 1.2 schématise les informations échangées entre l'utilisateur, le couplage haptique, le robot esclave et l'environnement. La majorité des systèmes de téléopérations à l'échelle nanoscopique échangent les mêmes paramètres ([Onal et Sitti 2009], [Ammi et Ferreira 2007], [Ando et coll. 2000]).

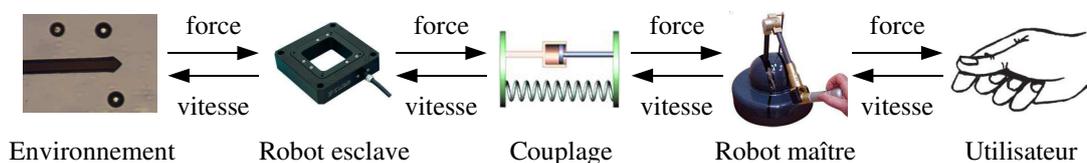


FIG. 1.2 – Échanges d'informations entre les différents sous-systèmes.

Le choix de la structure du couplage influe beaucoup sur le ressenti de l'utilisateur [Arcara et Melchiorri 2004]. De même, les valeurs numériques des gains du couplage affectent fortement les performances du retour haptique. Les performances d'un couplage haptique sont mesurées en termes de *transparence* et de *stabilité* [Micaelli 2002].

1.1.2.1 Transparence

La transparence traduit le fait que le ressenti de l'opérateur manipulant l'interface haptique doit être le plus proche possible de celui qu'il aurait s'il manipulait directement l'objet. Ainsi, le système de téléopération idéal pour travailler à distance serait un bâton sans masse et infiniment rigide (voir figure 1.3).

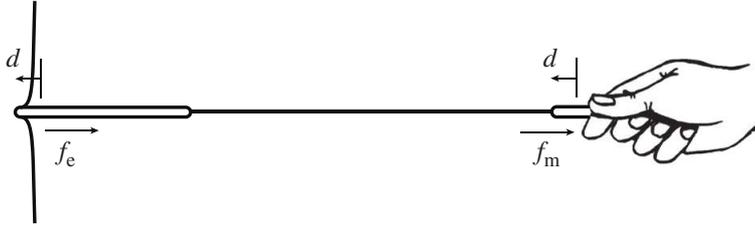


FIG. 1.3 – Le télémanipulateur idéalisé [Hayward et MacLean 2007]. Un outil ayant une géométrie donnée en contact avec un objet est manipulé à distance par l'intermédiaire d'un bâton imaginaire de masse nulle et infiniment rigide. Cette analogie est équivalente à tenir l'outil directement.

Dans cette expérience de pensée, puisque le bâton n'a pas de masse, la force appliquée par l'environnement est égale à chaque instant à la force appliquée par la main, $f_e = f_m$. L'opérateur sent l'objet touché à distance comme si le bâton n'existait pas. S'il n'y a pas d'objet, il ne sent aucune résistance de la part du bâton. Ajouter un retour d'effort en réalité virtuelle, c'est remplacer l'objet réel et le bâton imaginaire par un système de capteurs et d'actionneurs connectés à un ordinateur. Si l'on mesure le déplacement d de l'outil après le premier contact avec l'objet, et si l'on commande à un moteur de fournir une force f_e , alors, en théorie, l'utilisateur tenant la poignée devrait avoir une expérience perceptuelle identique à celle de toucher un objet réel.

Cet idéal est évidemment très difficile à atteindre pour la plupart des surfaces et des outils [Hayward et MacLean 2007]. La réponse $f_e(d)$ est raide : les déplacements sont très petits et les forces très grandes. Considérons par exemple le cas d'une surface en bois que l'on touche avec un outil ayant un bout sphérique de rayon $R = 2$ mm. Le module de Young E du bois vaut environ 10 GPa (dans le sens des fibres). La théorie du contact de Hertz indique, avec l'équation $f_e = \frac{3}{4}\sqrt{RE}d^{3/2}$, que pour une force de contact de 1 N, le déplacement d est seulement de 2 μm , soit une rigidité du contact de $10^6 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$.

La sensation de dureté apparaît toutefois à partir de raideurs de l'ordre de $10^4 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$, ce qui est bien inférieur à la valeur trouvée précédemment mais reste néanmoins une caractéristique difficile à atteindre. Cependant, d'autres indices permettent de juger les objets, par exemple, la capacité à résister à des forces amples, les forces transitoires rapides, la réponse structurelle, ou encore les chocs. Ce sont ces indices, parfois mélangés avec des sons parasites générés involontairement ou au contraire générés par des indices auditifs ou visuels adaptés, qui permettent aux systèmes à retour d'effort de donner la sensation de toucher des surfaces relativement rigides [Hayward et MacLean 2007].

Dans le cas des téléopérations aux échelles micro et nanoscopique, une difficulté supplémentaire pour réaliser le couplage est la différence d'échelle. Il est nécessaire d'introduire des coefficients homothétiques pour transformer les différents paramètres en des ordres de grandeurs similaires. Goldfarb [1998] a étudié ces facteurs d'échelle afin de trouver un

compromis pour préserver à la fois la similarité géométrique, cinématique et dynamique d'un environnement et les propriétés mécaniques intensives de cet environnement. Ces deux objectifs étant contradictoires, il propose une méthodologie basée sur l'analyse dimensionnelle pour déterminer le facteur d'échelle en effort qui minimise la distorsion des propriétés intensives de l'environnement. Son analyse conclut que, pour un facteur en déplacement A_d , le facteur en effort A_f optimal vaut A_d (respectivement A_d^2) pour des environnements dominés par des interactions surfaciques (respectivement volumiques). Cependant, dans la pratique, de telles valeurs de gains sont inutilisables à cause de l'espace de travail limité de l'interface haptique ou du seuil de force minimal perceptible par l'utilisateur [Bolopion et coll. 2009a].

1.1.2.2 Stabilité

Le second critère de performance d'un couplage est la stabilité. C'est même une condition essentielle pour un système de télémanipulation réelle. S'il est instable, le système est inutilisable et peut provoquer des dommages sur les outils de manipulation et sur les objets traités. Deux principales approches existent pour étudier la stabilité d'un système de télémanipulation : les critères de stabilité et la passivité.

La stabilité considérée est généralement celle au sens « entrée bornée - sortie bornée » (EBSB). Un système est dit stable au sens EBSB si toute entrée bornée produit une sortie qui tend vers une limite finie lorsque $t \rightarrow \infty$. Le lecteur trouvera plus de précisions dans [Ostertag 2004] pour les systèmes continus et [Ogata 1995] pour les systèmes discrets. Cette approche nécessite de modéliser les interactions entre la poutre et l'environnement distant. Elle permet généralement de déterminer des conditions nécessaires et suffisantes de stabilité.

L'autre approche est la passivité. Un système est dit passif si à tout moment l'énergie fournie est toujours plus grande ou égale à l'énergie emmagasinée ; dit autrement, l'énergie sortant du système est supérieure à l'énergie entrant, ou encore, le système ne produit pas d'énergie. Un environnement virtuel haptique est dit passif si l'énergie fournie par la main n'excède pas celle qu'il fournit lui-même. Ceci est une qualité désirable car l'interaction d'une main humaine avec un objet passif (réel ou simulé) est en général non-oscillante. Bien que l'homme agisse comme une source d'énergie, notre système biomécanique et notre contrôle moteur sont tels qu'une main est passive dans les hautes fréquences (c'est-à-dire au-dessus de 10 Hz environ).² La passivité s'applique sans aucune connaissance de l'environnement distant mais fait l'hypothèse que celui-ci est passif. Elle est donc plus conservatrice puisqu'elle garantit la stabilité quelque soit l'environnement, en fournissant des conditions suffisantes de stabilité.

1.1.3 Influence du couplage sur la perception haptique des phénomènes micro et nanophysiques

Le couplage le plus courant entre la mesure effectuée par l'outil dans le micro-monde (sonde AFM, piège optique, etc.) et la force renvoyée à l'utilisateur est un couplage à coefficients homothétiques constants. En général, on choisit le coefficient en effort en

2. Une exception intéressante est le roulement de tambour qui peut être décrit comme une interaction de la main avec un objet passif ; pourtant, elle entre en résonance dans un cycle limite rapide.

1.2 Les plates-formes de téléopération aux échelles micro et nanoscopique

fonction des spécifications de l'interface haptique utilisée et des phénomènes que l'on souhaite rendre perceptibles.

Concernant le bras haptique, on cherche à ne pas dépasser sa force maximale en continu. Par exemple, pour un PHANTOM Omni, un coefficient en effort limitant les efforts rendus à 5 N est choisi. Cependant, le frottement dans l'interface haptique limite le rendu des petits efforts. Il faut donc trouver un compromis. Par exemple, le saut de contact peut s'avérer difficile à percevoir sans augmenter fortement le coefficient en effort, ce qui empêche en contre-partie de retirer la sonde sans saturer en effort l'interface haptique à cause des forces d'adhésion.

Quant au coefficient en déplacement, il fait également l'objet d'un compromis entre le confort de manipulation et la précision. D'un côté, il est préférable d'avoir un coefficient assez petit pour minimiser le nombre de recalages du bras haptique, du fait de son espace de travail limité. Et de l'autre, un coefficient trop petit empêche de positionner précisément la poutre et diminue la stabilité du système.

Il existe de nombreuses études du couplage bilatéral à ces échelles, études qui seront décrites au travers des plates-formes dans la partie suivante.

1.2 Les plates-formes de téléopération aux échelles micro et nanoscopique

De nombreux systèmes de télémanipulation pour des applications aux échelles micro ou nanoscopique ont été développés. Cette partie a pour but de présenter les principaux travaux existants en manipulation directe ainsi qu'en manipulation assistée.

1.2.1 Les travaux en manipulation directe

L'utilisation de l'haptique pour des tâches de micro et nanomanipulation a commencé en 1990, au *IBM Thomas J. Watson Research Center* avec les travaux de [Hollis et coll. \[1990\]](#). Ces travaux traitent du développement d'une interface haptique, le *Magic Wrist*. Elle utilise le principe de la lévitation magnétique et possède 6 degrés de liberté. Ce bras maître, couplé à un microscope à effet tunnel (STM), permet de déplacer la pointe de la poutre dans le plan du substrat (X-Y). Le mouvement de l'interface selon l'axe Z (axe perpendiculaire au substrat) est déterminé par la hauteur de la poutre, qui suit le relief de l'échantillon. Ainsi, les utilisateurs de cette interface ont ressenti le relief de films pulvérisés d'or ou de substrats de graphite. Les limitations majeures de ce système sont le bruit et l'hystérésis qui dégradent la fidélité du ressenti.

À la suite de ces travaux, d'autres équipes ont développé leur système de micromanipulation directe. En particulier au Japon, l'équipe dirigée par H. Hashimoto a développé un système comportant un manipulateur à structure parallèle ayant une précision de 50 μm et une interface haptique à structure série (voir figure 1.4 page suivante). Les travaux publiés traitent spécifiquement de la commande des robots maître et esclave. L'interface haptique possède 6 degrés de liberté et est connectée à la partie esclave par liaison Ethernet [[Ando et coll. 2000](#)]. Le couplage est composé d'une commande en position côté esclave (correcteur PID) et d'une commande en force côté maître (correcteur PD). La méthode utilisée pour obtenir les valeurs de ces coefficients n'est pas donnée.

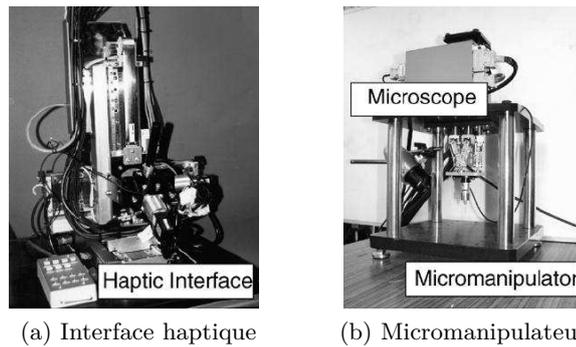


FIG. 1.4 – Système de micromanipulation de l'équipe de H. Hashimoto.

Aux États-Unis, l'équipe du professeur N. Xi a développé un système permettant de réaliser des nanomanipulations à l'aide d'une interface haptique en ressentant les efforts appliqués sur la pointe, ainsi qu'en observant la scène à l'aide d'un retour visuel. Leur contribution principale [Li et coll. 2003, 2004] est d'avoir présenté la relation entre la flèche de la poutre à l'aide d'un laser (donc la mesure à la sortie de la photodiode) et les forces réelles s'appliquant sur la pointe, selon les trois axes. Bien que rigoureuse mathématiquement, cette méthode paraît difficile à mettre en œuvre dans la pratique : les expressions numériques ne sont pas stables dans certaines configurations de manipulation. Ils ont également travaillé sur la transformation permettant de déterminer le déplacement à appliquer à la poutre pour que sa pointe suive au mieux les mouvements exercés par l'utilisateur à l'aide de son interface haptique, selon l'angle d'inclinaison de la poutre en particulier. Grâce à leurs travaux, ils ont notamment réalisé une opération de nano-indentation de trois lettres (*SIA*) sur un substrat de polycarbonate. À l'aide d'un PHANTOM, ils renvoient à l'utilisateur la force verticale (perpendiculaire au substrat) et celle dans le plan du substrat, perpendiculaire au plus grand côté de la poutre. Pour valider ces manipulations, ils présentent des images du substrat, qui sont conformes aux images renvoyées par le module de réalité augmentée. Cependant, les courbes d'efforts ressentis par l'utilisateur sont difficilement lisibles.

Les robots maître et esclave ne sont pas les seuls éléments qui ont été étudiés dans les systèmes de téléopération à l'échelle microscopique. À l'université de Bourges, au Laboratoire Vision et Robotique, A. Ferreira et son équipe ont étudié le couplage entre une interface haptique à 1 degré de liberté et une micropince piézoélectrique de type MOC [Boukhmifer 2005]. Leurs travaux prennent en compte la spécificité du micro monde, les erreurs de modélisation ainsi que la présence d'éventuels retards de communication (cas d'applications distantes). Deux approches sont analysées et comparées : la commande robuste et la commande passive. Deux contrôleurs bilatéraux sont synthétisés ; le premier par la méthode H_∞ et des techniques de factorisations premières, ou *loop-shaping*, pour pouvoir diminuer l'ordre du correcteur, le second à l'aide de variables d'onde. Le premier est robuste aux erreurs de modélisation, mais n'accepte que de très faibles variations des retards, alors que le second possède des caractéristiques opposées. Bien qu'un énorme travail ait été fait tant au niveau théorique que sur les simulations, peu de résultats expérimentaux d'opérations de micromanipulation sont présentés.

1.2.2 Les travaux en manipulation assistée

Certaines équipes ont développé des systèmes plus complets, intégrant non seulement une interface haptique et un robot manipulateur, mais également des retours visuels temps réel, ou des guides virtuels à l'aide de modèles de l'environnement. En particulier, l'équipe de l'université de Caroline du Nord à Chapel Hill a développé un système très complet, permettant de réaliser de nombreuses mesures sur des nanotubes de carbone. Leur système, appelé *nanoManipulator*, comprend une interface haptique PHANTOM couplée à une interface de réalité virtuelle, utilisable avec des microscopes à sonde locale. La figure 1.5 illustre les éléments de ce système.

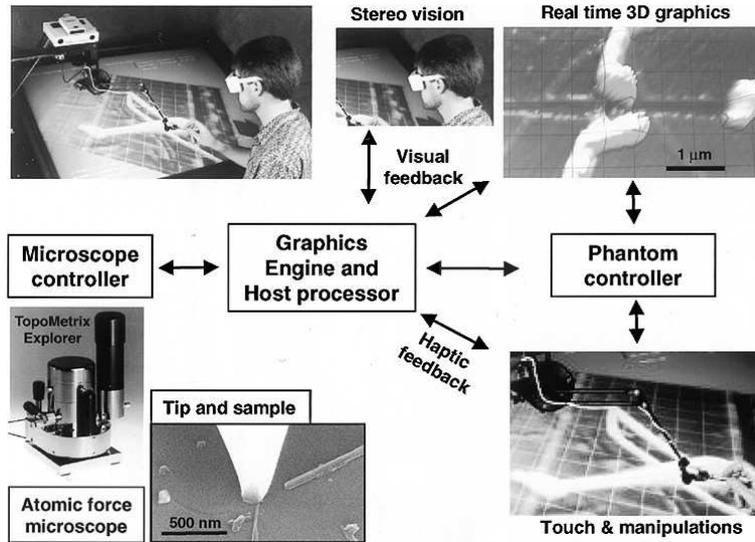


FIG. 1.5 – Plate-forme *nanoManipulator*, développée à l'université de Caroline du Nord, intégrant un AFM, un bras PHANTOM Desktop et une interface de réalité virtuelle.

Leurs travaux commencent par une réflexion sur les aides qu'il faut fournir à un opérateur pour simplifier la manipulation en rendant transparents les problèmes techniques liés aux tâches complexes [Taylor II et coll. 1997]. Ils se sont intéressés à la manipulation et la caractérisation de différents échantillons en utilisant l'ensemble des fonctionnalités de leur système. L'interface haptique permet de ressentir la topographie de la surface grâce à un asservissement en position verticale. Elle reproduit les mouvements de la pointe de l'AFM et contrôle les déplacements dans le plan du substrat. Les forces proprement dites (force d'adhésion par exemple) ne sont pas ressenties.

Par la suite, l'AFM est couplé à un microscope électronique à balayage (SEM) [Guthold et coll. 2000]. La pointe et le substrat peuvent être observés, y compris pendant les manipulations. Quand la pointe n'est pas utilisée pour manipuler, les deux images (provenant de l'AFM et du SEM peuvent être comparées pour obtenir une meilleure précision. De nombreux objets physiques sont étudiés grâce à leur système, notamment :

- des fibres de fibrine (entre 20 et 200 nm de diamètre) dont ils mesurent les forces de rupture en appliquant une force latérale,
- des adénovirus dont ils déterminent l'élasticité en appliquant une force verticale (de 40 à 1000 nN),

- des brins d’ADN (échantillon de 1100 paires-bases) dont ils cherchent la résistance,
- des nanotubes de carbone multifeuillets (30 nm de diamètre) : conditions de roulement et de glissement, résistance électrique.

La partie haptique permet notamment de positionner correctement la pointe AFM avant de manipuler, mais il ne semble pas que l’utilisateur puisse ressentir les forces se produisant en temps réel pendant l’expérience. Ainsi, le concept n’est pas totalement validé.

Parmi les projets plus récents, on note ceux de l’université d’Oldenburg, en Allemagne. Bien que cette équipe s’intéresse plus particulièrement à la conception de micro-pinces, ils utilisent une interface haptique pour les commander.

Dans [Fahlbusch et coll. 2002], ils utilisent une micro-pince munie d’un capteur d’effort, qui détermine la force de serrage (voir figure 1.6). Le principe de ce capteur est similaire à celui utilisé pour les poutres AFM piézo-resistives. Grâce au retour haptique, ils contrôlent en temps réel la force appliquée sur l’objet à saisir. Ils peuvent ainsi manipuler des particules fragiles, en n’appliquant que la force minimale pour les saisir. Ceci limite les risques de dommages et réduit les forces de tension superficielle entre l’objet et la pince. De plus, cela diminue le temps nécessaire pour réaliser les tâches et rend les manipulations réalisables même en l’absence de retour visuel.

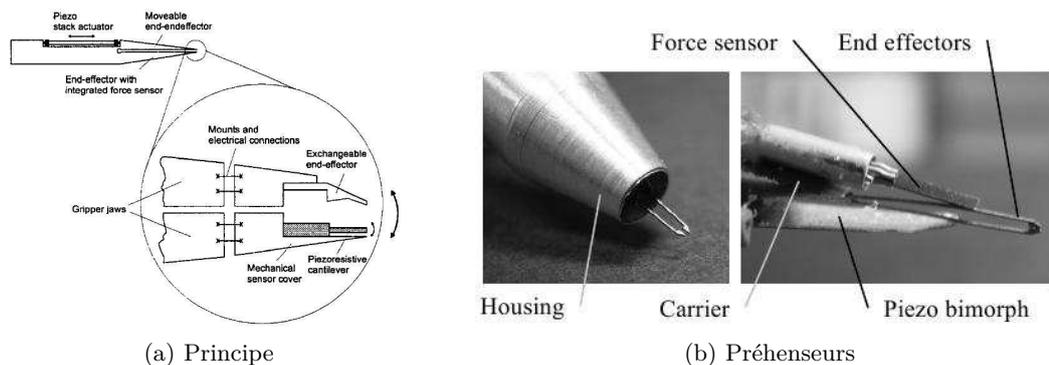


FIG. 1.6 – Préhenseurs à retour d’effort de l’université d’Oldenburg.

L’année suivante, cette équipe a présenté une interface appelée *HIMiC*. Cette interface à retour d’effort est développée spécialement pour la manipulation de nanorobots (voir figure 1.7a page ci-contre). C’est pourquoi elle est, selon ses auteurs, mieux adaptée que les interfaces classiques (joysticks, PHANTOM, etc.) aux spécificités de la nanomanipulation. Elle peut notamment rendre une grande plage d’efforts et des changements de forces très rapides. Elle permet de manipuler le microrobot selon des déplacements importants, avec une haute résolution. Elle présente une commande intuitive, nécessitant seulement une main : les boutons de contrôle sont intégrés au joystick (voir figure 1.7b). Ceci prend toute son importance lors de la manipulation simultanée de plusieurs microrobots à l’aide de deux interfaces haptiques. Les axes peuvent être découplés pour que le déplacement selon un axe puisse être bloqué. Enfin, un module de rendu sonore complète le retour haptique.

Un couplage original entre le préhenseur et l’interface haptique *HIMiC* est présenté dans [Shirinov et coll. 2004]. Le bras maître ne renvoie pas les forces lues par les capteurs

1.2 Les plates-formes de téléopération aux échelles micro et nanoscopique

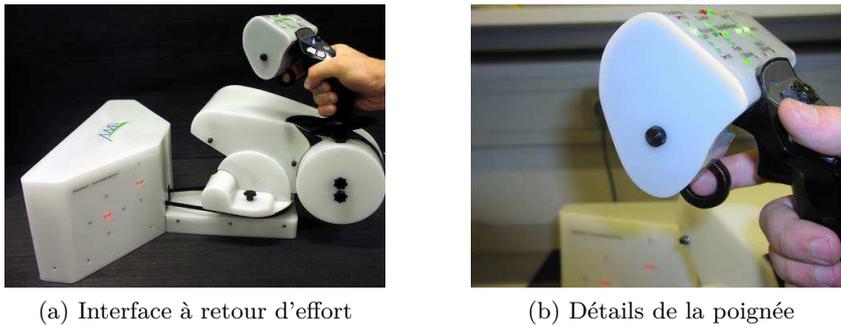


FIG. 1.7 – Interface haptique *HIMiC*, université d'Oldenburg.

du microrobot, mais des modèles de l'environnement. S'ils ne mesurent aucune force, l'interface haptique renverra les efforts correspondant au modèle « environnement libre » et le microrobot suivra le mouvement de la pince. S'ils mesurent un effort dans une direction, l'interface haptique renverra les efforts correspondant au modèle « mur ayant certaines propriétés ». Ces caractéristiques seront notamment la raideur, l'amortissement et le frottement, et pourront être déterminées par la sortie des capteurs du microrobot. Cependant, tous les modèles de l'environnement doivent être implémentés pour avoir un ressenti exhaustif avec l'interface haptique et leurs études ne font pas état de validations expérimentales détaillées du système.

Le Laboratoire Vision et Robotique à Bourges a également développé une plate-forme de micromanipulation multimodale qui utilise des techniques de réalité augmentée, incluant des informations visuelles, sonores et haptiques [Ammi et Ferreira 2007]. Pour le retour visuel, les images provenant du microscope optique sont traitées. Les microbilles et les particules de poussières sont localisées et une image tridimensionnelle est générée. Différentes informations sont alors ajoutées, notamment des textures et des ombres. À cette échelle, chaque particule est susceptible d'attirer un objet si celui-ci est suffisamment proche. Pour aider la manipulation, des guides virtuels, haptiques et visuels (voir figure 1.8a page suivante), sont ajoutés autour des billes et poussières détectées dans l'image (leur taille est arbitraire, elle ne résulte pas de calculs précis). De plus, l'utilisateur peut spécifier un déplacement à effectuer (point de départ et point d'arrivée) et un algorithme basé sur la méthode de recherche A^* détermine la trajectoire optimale compte tenu des obstacles définis auparavant (figures 1.8b et 1.8c).

Le rendu haptique de ces informations est réalisé avec une interface PHANTOM Desktop. Pour éviter que l'utilisateur ne pénètre involontairement dans la zone d'attraction, un champ de force répulsif est ajouté, en simulant une impédance mécanique entre l'obstacle et l'AFM. Pour aider l'utilisateur à suivre la trajectoire optimale, un guide virtuel basé sur un couplage viscoélastique entre la position maître et la trajectoire idéale. Enfin, un champ de force visqueux autour des microsphères manipulées est également mis en place, pour faciliter les opérations d'approche et de contact entre la poutre et la bille, en atténuant les gestes de l'utilisateur.

Pour évaluer l'utilité des différentes aides, huit utilisateurs ont réalisé des opérations de micromanipulation sur des billes de polystyrène de 20 et 50 μm de diamètre. Les

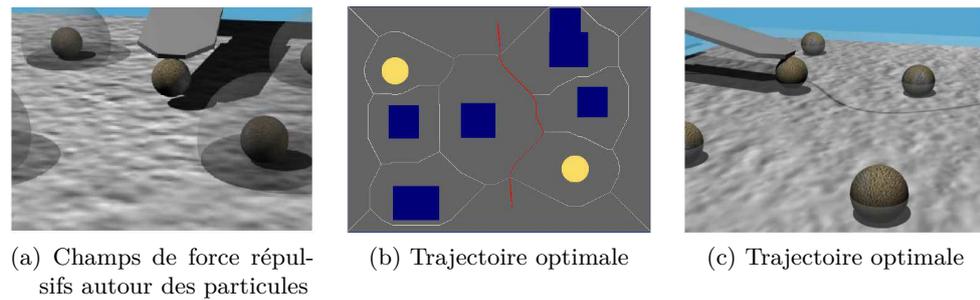


FIG. 1.8 – Module de réalité virtuelle, université de Bourges.

guides haptiques ont permis notamment de diminuer le temps d'exécution et de rendre les trajectoires plus fluides. Un couplage direct entre l'interface haptique et la pointe AFM est également mentionné. Cependant, la manière dont les informations provenant de ce couplage direct et celles venant des métaphores haptiques sont combinées n'est pas précisée. De plus, plusieurs manipulations sont effectuées en utilisant différentes métaphores, mais seules les vitesses et trajectoires du bras maître sont présentées. En particulier, rien n'est précisé sur les efforts ressentis pendant la manipulation ni si la tâche effectuée a bien permis de manipuler les billes réelles.

Les travaux de l'équipe de M. Sitti³ sont les plus complets et les plus aboutis dans ce domaine. L'utilisateur, *via* une interface haptique Omega à 3 degrés de liberté, contrôle la position de la sonde AFM d'une plate-forme de manipulation réelle et ressent la force verticale s'appliquant sur la poutre (mesure par laser). La figure 1.9 montre les différents éléments de leur plate-forme de manipulation [Vogl et coll. 2006].

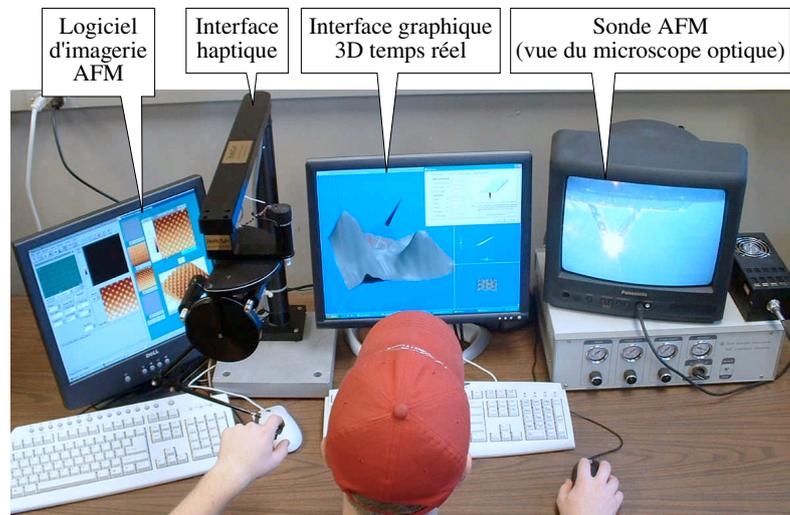


FIG. 1.9 – Plate-forme de nanomanipulation développée à l'université Carnegie Mellon.

3. Metin SITTI dirige le groupe NanoRobotics Lab à l'université Carnegie Mellon, située à Pittsburgh, Pennsylvanie. <http://nanolab.me.cmu.edu>

1.2 Les plates-formes de téléopération aux échelles micro et nanoscopique

Comme l'imagerie par AFM n'est pas en temps réel, une simulation virtuelle estime et affiche les déformations des surfaces. Cette estimation se base sur deux sources d'informations : la topographie de la surface scannée préalablement et le modèle de contact de Maugis-Dugdale. La figure 1.10 montre le rendu graphique de cette simulation [Onal et Sitti 2009]. Ces travaux proposent également une assistance haptique qui a pour but de masquer la raideur de la poutre, notamment lorsque celle-ci indente une surface. Cette transformation, basée sur le modèle de deux ressorts en série, nécessite bien sûr de connaître la raideur de la poutre au point de contact. Elle se prête donc bien à l'utilisation de poutre AFM avec pointe puisque le point de contact poutre-surface est alors fixe. Ainsi, la raideur perçue par l'utilisateur est celle de la surface au contact, et non plus la raideur équivalente de l'ensemble poutre-surface, qui est d'autant plus petite que la poutre est souple.

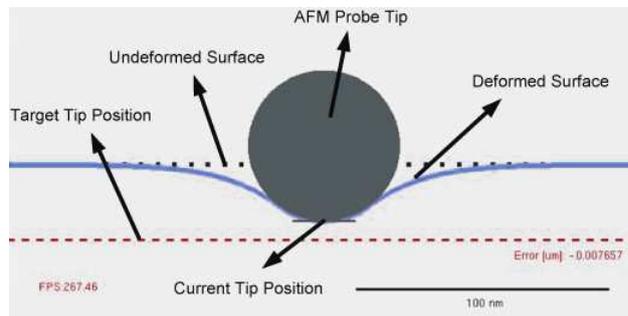


FIG. 1.10 – Rendu graphique durant l'indentation d'un substrat en polymère.

Ces travaux présentent aussi l'étude des performances de leur système (stabilité et transparence). Les limitations du contrôleur de passivité lorsqu'il est appliqué à une manipulation dans le micromonde sont traitées. Leur système est validé par des opérations de mise en contact de la poutre sur différents substrats (très durs et très mous). Les forces attractives et répulsives retournées à l'utilisateur sont clairement identifiables et le couplage est stable. Elles paraissent cependant assez faibles (inférieures à 1 N). Ces travaux très complets incluent à la fois la réalité virtuelle et les manipulations réelles. Cependant, seuls les efforts verticaux s'appliquant sur la poutre sont retournés à l'utilisateur : les opérations réalisées, des indentations, sont unidirectionnelles. Or, pour manipuler des micro- ou nano-objets, des informations sur les forces latérales pourraient faciliter la tâche de l'utilisateur.

Les travaux de télémanipulation ont donné lieu à des réalisations intéressantes. Mais quelques insuffisances apparaissent. Il existe ainsi peu de télémanipulations réelles, bien explicitées sur le retour d'effort. Cette remarque prend tout son sens à l'échelle nanoscopique où les stratégies usuelles, par exemple de simple poussée, ont des rendements très faibles. Ainsi, le passage à des stratégies moins intuitives du point de vue utilisateur rend nécessaire l'élaboration d'assistances haptiques. Il n'existe aucune évaluation utilisateur complète de ces plates-formes, qui apparaissent comme des démonstrateurs uniques.

L'autre versant complémentaire de l'utilisation de l'haptique dans le nanomonde est son intérêt d'un point de vue pédagogique pour la nanophysique. Cette thématique est décrite dans la partie suivante.

1.3 Apport de l'haptique d'un point de vue pédagogique

Une expérience haptique implique un *toucher actif* : l'individu choisit délibérément ses actions dans l'exploration d'un objet, lesquelles retournent l'information sur les propriétés de l'objet. Au contraire, lors d'un *toucher passif*, l'information est imposée à la peau, sans la nécessité que l'individu bouge. La distinction entre toucher actif et passif devient importante dans un contexte pédagogique car impliquer l'apprenant dans le choix conscient d'investiguer les propriétés d'un objet est très motivant et augmente l'attention pour apprendre [Sathian 1998]. Les études existantes sur l'utilisation de l'haptique dans l'éducation soulignent souvent cette influence affective. En revanche, il est plus difficile de déterminer si l'haptique améliore vraiment la compréhension des apprenants.

Un état de l'art assez récent [Minogue et Jones 2006] a exploré en profondeur les études antérieures à 2005 sur l'efficacité de l'ajout de l'haptique pour l'enseignement, celui des concepts comme celui des savoir-faire. Parmi ces études, on note celle de Brooks, Jr. et coll. [1990] sur le retour d'effort pour l'aide au docking protéine-ligand en chimie biomoléculaire, celle de Reiner [1999] sur le retour tactile pour la conceptualisation des champs de force, ainsi que celle de Okamura et coll. [2002] sur le retour d'effort pour l'enseignement de la dynamique des systèmes. L'idée défendue dans ces études est que l'ajout de l'haptique peut améliorer le processus d'apprentissage, en utilisant d'une nouvelle manière les savoirs tactile, kinesthésique, expérientiel et incorporé. Minogue montre que ces études ont tendance à affirmer facilement cette idée mais peinent à la prouver, du fait du peu de preuves empiriques en faveur d'un impact cognitif de l'haptique.

La littérature fournit d'autres études où les auteurs sont enthousiastes sur l'apport pédagogique de l'haptique dans leur système. Mais souvent, aucune évaluation n'est publiée par la suite. C'est le cas des travaux de Harvey et Gingold [2000] sur une représentation haptique de la densité électronique d'un atome, de Sankaranarayanan et coll. [2003] sur l'aide au docking et de Sauer et coll. [2004] sur l'assemblage de molécules en chimie. Toutefois, on note les résultats positifs obtenus par Bara et coll. [2004] sur l'utilisation du détournage des lettres par le toucher pour améliorer les capacités de lecture chez les jeunes enfants.

Parmi les études citées par Minogue, celle de l'équipe d'Okamura⁴, portait sur la réalisation et l'utilisation d'un joystick à retour d'effort simple et peu coûteux, à 1 degré de liberté (voir figure 1.11 page ci-contre) pour l'enseignement de la dynamique des systèmes. Une évaluation réalisée récemment sur une centaine d'étudiants a montré que le passage par cette séance de TP haptique entraînait une amélioration significative des connaissances, de 10 % en moyenne [Grow et coll. 2007]. Ce résultat serait pertinent s'il y avait un groupe contrôle, c'est-à-dire s'il était comparé au gain obtenu avec une séance de TP sur un système non haptique.

Selon Minogue et Jones [2006], la question reste largement ouverte quant à savoir si l'ajout du sens du toucher dans l'enseignement peut exploiter les connaissances expérientielles, incorporées et tactiles que les étudiants ne pourraient solliciter sinon. Par ailleurs, on ne sait pas si la technologie haptique est plus adaptée à l'accroissement des connaissances ou à la découverte de nouveaux savoirs.

Minogue évoque différents obstacles à l'adoption et la diffusion de l'haptique dans

4. Allison M. OKAMURA dirige le groupe Haptics Laboratory à l'université Johns Hopkins, située à Baltimore, Mariland. <http://haptics.lcsr.jhu.edu>

1.3 Apport de l'haptique d'un point de vue pédagogique

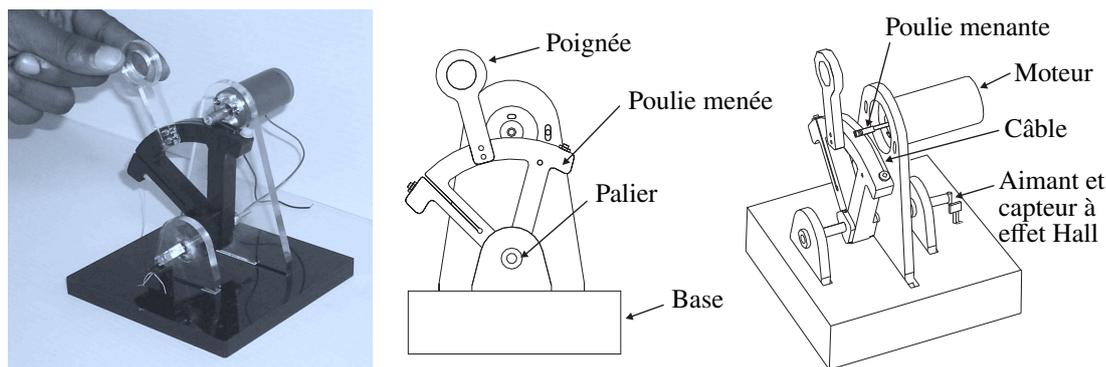


FIG. 1.11 – Interface *haptic paddle*, développée par Richard et coll. [1997] à l'université de Stanford, pour un cout inférieur à 30 \$.

l'éducation. Des barrières perceptuelles : les étudiants, instinctivement, s'appuient plus fortement sur l'information visuelle qu'ils reçoivent et donc ne remarquent pas forcément l'information perceptuelle supplémentaire. Des contraintes technologiques : la diminution en nombre et en taille des surfaces de contact entre l'utilisateur et l'objet virtuel⁵, ainsi que les approximations inhérentes aux modèles numériques de contact, dégradent la qualité de la perception. Enfin, il faut noter des limitations méthodologiques. Les études citées ne parviennent pas à prendre en compte l'ensemble des variables liées aux classes d'élèves.

Dans le contexte plus particulier de l'enseignement des nanotechnologies, quelques études récentes se sont intéressées à l'impact de la réalité virtuelle et du retour haptique, par exemple, sur le docking protéine-ligand en chimie biomoléculaire, sur la morphologie des virus en biologie, ou encore sur le phénomène approche-retrait en microscopie. Elles sont résumées dans le tableau 1.2 page suivante et décrites ci-dessous.

En chimie biomoléculaire, Persson et coll. [2007] ont évalué un simulateur de docking avec réalité virtuelle et retour d'effort (voir figure 1.12 page 19), dans lequel les étudiants pouvaient manipuler un ligand et ressentir ses interactions avec une protéine lors du processus de docking⁶. Le but de leur étude est de déterminer les avantages, s'il y en a, d'un retour d'effort dans un contexte pédagogique en chimie moléculaire. L'étude, réalisée sur 23 étudiants en licence ou master bio-ingénierie, n'a pas isolé d'avantage significatif du retour haptique sur l'apprentissage des étudiants. Toutefois, les descriptions du processus de docking données par ceux ayant utilisé le retour d'effort comportaient davantage de raisonnements liés aux forces d'interaction.

En biologie, l'équipe du professeur Jones⁷ a réalisé plusieurs études sur l'impact du retour haptique sur l'apprentissage de concepts biologiques au collège et au lycée. Dans

5. Dans la plupart des études, l'interface haptique n'offre qu'une sonde ponctuelle pour explorer l'environnement virtuel.

6. Les difficultés liées à l'ajout d'un retour haptique aux simulations moléculaires sont toujours d'actualité [Daunay et coll. 2007], [Boloipon et coll. 2009b]. Pour leur évaluation, Persson et coll. ont utilisé des modèles de molécules et des algorithmes simplifiés.

7. Gail JONES dirige le groupe NanoScale Science Education Research, à l'université d'État de Caroline du Nord. <http://ced.ncsu.edu/nanoscale/index.htm>

TAB. 1.2 – Résumé des études antérieures dans le contexte de l’enseignement des nanotechnologies

Étude	Participants	Interface	Stimuli	Mesures	variable(s) dépendante(s)
Persson et coll. 2007	23 étudiants	PHANTOM (6D)	Simulation de docking moléculaire	tests de connaissance, questionnaire d’opinion, tâches de docking	compréhension des interactions lors d’un docking
Jones et coll. 2003	43 lycéens	PHANTOM (6D)	Téléopération d’une sonde AFM au contact d’un virus	tests de connaissance, questionnaire d’opinion, modelage en argile, interview	compréhension des virus et de l’AFM
Jones et coll. 2006	36 lycéens	souris, joystick 2D, PHANTOM (3D)	Simulation d’une sonde AFM touchant un virus	tests de connaissance, questionnaire d’opinion	compréhension des caractéristiques physiques des virus
Minogue et coll. 2006	80 collégiens	PHANTOM (6D)	Simulation de la structure cellulaire	tests de connaissance, questionnaire d’opinion	compréhension de la structure et du fonctionnement cellulaire
Marchi et coll. 2005	60 étudiants	ERGOS (1D)	Cycle approche-retrait de poutres AFM réelles et virtuelles	tests de connaissance, dessin de courbe, questionnaire d’opinion	compréhension de l’AFM, perception des différentes étapes du cycle AR



FIG. 1.12 – Simulateurs de docking moléculaire avec retour d'effort. (a) Premier prototype, issu du projet GROPE III [Brooks, Jr. et coll. 1990]. (b) Plate-forme pédagogique étudiée dans [Persson et coll. 2007] ; à droite, le rendu graphique montrant la protéine, le ligand et une représentation du couple d'interaction.

une première étude, Jones et coll. [2003] ont cherché à évaluer l'influence de l'utilisation d'une plate-forme de télé-nano-opération sur la compréhension de la morphologie des virus et du processus d'imagerie d'un AFM. L'étude, réalisée sur 43 lycéens, a montré que l'utilisation de retour haptique apportait une plus grande motivation des étudiants à apprendre, mais pas de différence significative sur la compréhension.

Afin d'approfondir l'investigation sur l'influence du retour haptique, une deuxième étude [Jones et coll. 2006] fut réalisée, portant cette fois sur l'influence du nombre de degrés de liberté fournis par l'interface haptique. 36 lycéens ont utilisé le nanoManipulator avec soit un bras PHANTOM Desktop 6D⁸, soit un joystick 2D. L'étude a montré quelques différences sur les descriptions des virus selon l'interface haptique utilisée : la sensibilité du retour haptique était corrélée au nombre de termes haptiques et d'analogies spontanées utilisés par les étudiants.

Dans une troisième étude, Minogue et coll. [2006] ont évalué l'ajout de retour haptique (avec un PHANTOM Desktop) à un environnement virtuel dédié à l'enseignement de la structure cellulaire, au collège. L'étude, réalisée sur 80 collégiens, a montré une nouvelle fois des avantages affectifs de l'haptique : un intérêt plus grand et une meilleure navigation dans un environnement virtuel 3D. En revanche, les résultats n'ont pas donné d'impact cognitif de l'haptique. Les auteurs avancent diverses causes possibles : questionnaire papier non adapté, mémoire de travail saturée par la charge cognitive (due à la complexité des concepts cellulaires), durée assez courte (30 min), prédominance de la perception visuelle sur celle haptique, ou encore l'exploration par une sonde ponctuelle.

En microscopie à champ proche, Marlière et coll. [2004] ont développé un simulateur temps-réel et multimodal (retours visuel, sonore et haptique), axé sur la reproduction fidèle de modèles physiques. Leur simulateur est utilisé pour un TP en classe de master après un cours sur l'AFM. Le phénomène simulé est le cycle d'approche-retrait d'une pointe AFM, en se plaçant à l'échelle atomique, c'est-à-dire en considérant les interactions entre l'extrémité de la pointe et la couche atomique superficielle du substrat. Plusieurs

8. Interface haptique avec une prise de type stylo et une architecture série offrant 6 degrés de liberté en position, fabriquée par Sensable Technologies. <http://www.sensable.com>

types d'interaction peuvent être simulés, comme les forces de Van der Waals⁹, une force électrostatique, ou une force de capillarité.

Une évaluation de l'apport pédagogique de ce simulateur [Marchi et coll. 2005] a été conduite sur 30 binômes d'étudiants répartis en deux groupes, le premier sur un AFM classique, l'autre sur le simulateur. Le groupe 1 analysait les courbes force-distance enregistrées tandis que le groupe 2 devaient décrire le comportement de la pointe en dessinant la courbe force-distance associée. Afin de comparer la compréhension des étudiants de chaque groupe, les auteurs ont analysé de façon qualitative les réponses écrites aux questions « Qu'est-ce que le collage et le décollement dans le phénomène AR ? » et « Quelle est l'origine de l'hystérésis ? ». Les auteurs ont observé des descriptions plus complètes du phénomène AR dans le groupe 2, en particulier sur le rôle de la raideur de la poutre et le lien entre l'hystérésis et le potentiel de Lennard-Jones. Selon les auteurs, cette amélioration vient probablement de la possibilité dans les simulations en réalité virtuelle de modifier différents paramètres du phénomène observé, d'une valeur extrême à son opposé, ce qui facilite l'observation de leur influence. Cette explication concorde avec la conclusion d'une étude de Finkelstein et coll. [2005], qui a montré que les simulations bien conçues étaient des outils efficaces pour améliorer l'apprentissage des étudiants dans certains contextes appropriés. Néanmoins, le protocole expérimental de cette évaluation ne permet pas d'analyser l'apport du retour haptique pour la compréhension.

Sur le plan visuel, en plus de la représentation visuelle AFM traditionnelle montrant la poutre vue de haut, d'autres représentations peuvent aider à la compréhension de la scène. Plusieurs ont été proposées par Marlière [2006] et sont illustrées sur la figure 1.13 page suivante. Marlière a également proposé une représentation graphique des potentiels d'interaction, avec l'analogie d'une bille soumise à la pesanteur et roulant sur un support dont la forme est la somme des potentiels d'interaction. La figure 1.14 page 22 illustre cette représentation à différentes étapes du cycle AR. Cette représentation facilite la compréhension d'un modèle énergétique du comportement de la poutre. Une récente étude [Podolefsky et Finkelstein 2006] a montré que les analogies peuvent servir à améliorer l'apprentissage de la physique chez les étudiants. Cependant, les résultats de la recherche sur l'apport bénéfique des analogies dans l'enseignement scientifique sont ambigus [Orgill et Bodner 2004]. De nombreuses études ont montré des résultats bénéfiques, tandis que d'autres ont noté peu ou pas d'effet sur l'apprentissage. Pour plus de détails, le lecteur trouvera dans [Orgill et Bodner 2004] un état de l'art sur l'utilisation des analogies, en particulier en chimie, ainsi que des recommandations pour déterminer quelles analogies sont utiles pour les étudiants et comment les présenter pour qu'elles leur soient utiles. Toutefois, dans le contexte de la microscopie à force atomique, nous n'avons pas trouvé d'étude existante sur l'utilisation d'analogies graphiques.

En conclusion, les études ayant testé l'apport du retour d'effort pour l'enseignement de savoirs liés aux nanotechnologies signalent toutes un effet positif sur l'intérêt porté par les apprenants à l'outil éducatif. Plusieurs notent un effet sur la compréhension, à travers davantage de raisonnements en termes de force, et ceci d'autant plus que le retour d'effort contient d'informations (degrés de liberté, fidélité). Cependant, aucune

9. L'interaction de Van der Waals dans leur simulateur est dérivée du potentiel de Lennard-Jones, potentiel d'interaction entre deux atomes.

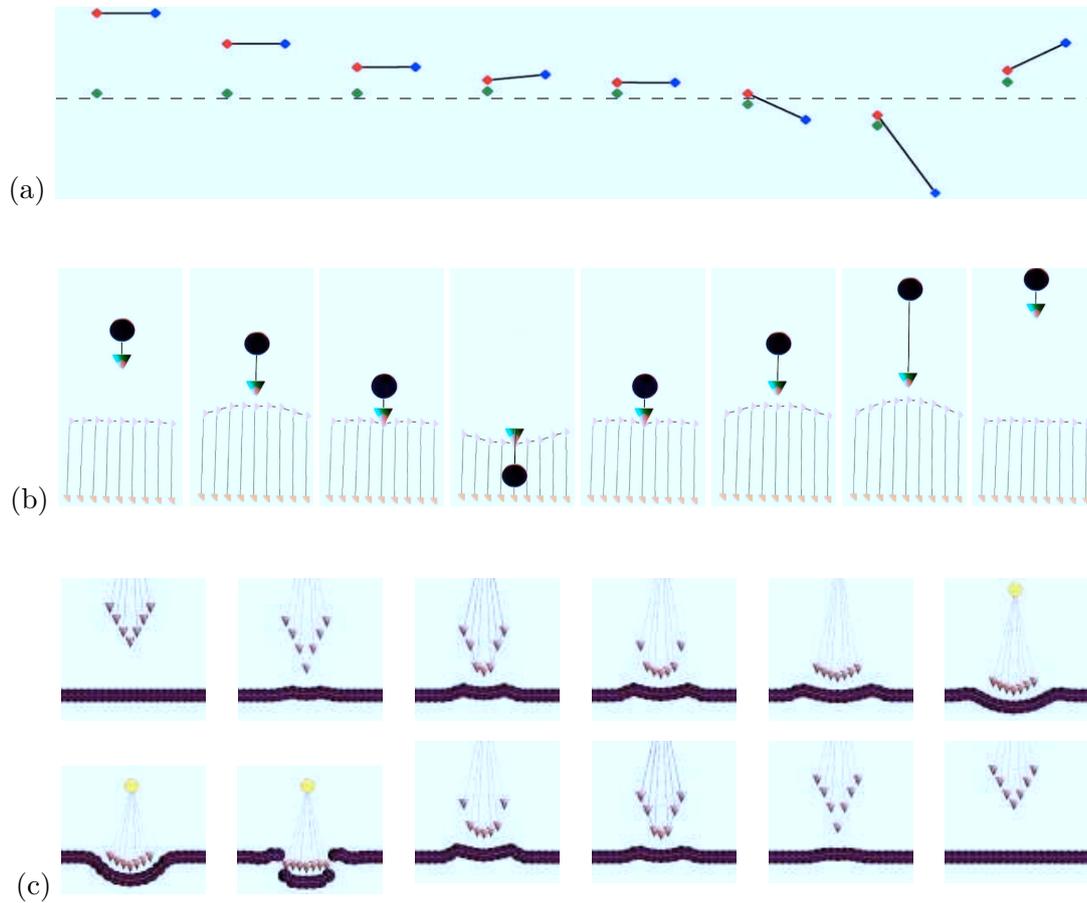


FIG. 1.13 – Représentations graphiques d'une poutre AFM durant un cycle AR, développées par Marlière [2006]. (a) Modèles 1D : élément de surface en vert, poutre en noir, pointe en rouge, point de manipulation en bleu. (b) Modèles 2D : couche d'atomes flexible et pointe à un élément. (c) Modèles 2D : poutre à apex multi-atomes.

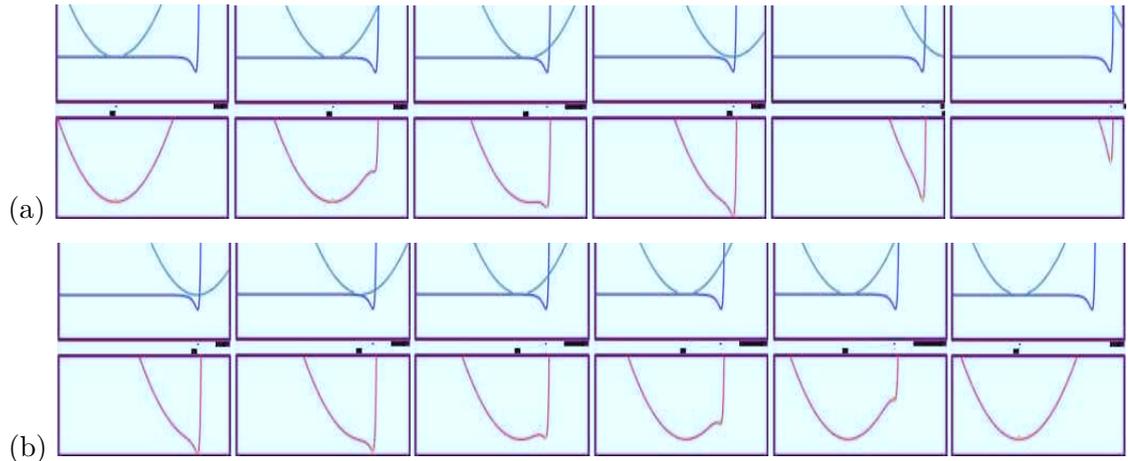


FIG. 1.14 – Représentation graphique de l'évolution des potentiels d'interaction d'une poutre AFM durant (a) l'approche et (b) le retrait [Marlière 2006]. Le potentiel élastique est la parabole verte, le potentiel de Lennard-Jones est la courbe bleue, et la somme des deux est tracée en rouge. L'énergie de la pointe est représentée par une bille jaune roulant sur la courbe rouge. La position d'équilibre de la pointe correspond toujours à un creux de cette courbe.

ne parvient à montrer un apport significatif du retour d'effort sur l'apprentissage. Un des enjeux de notre travail de thèse est de montrer si un retour haptique couplé à des analogies peut aider l'utilisateur à comprendre des phénomènes nanoscopiques.

1.4 La télé-micromanipulation à l'ISIR

L'objet de cette partie est de montrer tout à la fois la plate-forme expérimentale de l'Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (ISIR) mais aussi les résultats expérimentaux obtenus dans le domaine de la micro/nano manipulation. Tout au long de ce travail qui s'intéresse à l'évaluation de tâches et de ressentis à partir d'une plate-forme de simulation haptique, notre démarche s'intègre dans les résultats expérimentaux acquis. Par exemple, les simulations de tâches s'appuient sur des manipulations existantes et sur des données physiques mesurées sur notre plate-forme.

1.4.1 La plate-forme de manipulation

La plate-forme de manipulation à l'ISIR s'articule autour de cinq blocs particuliers : le porte-outil, le porte-échantillon, le dispositif de mesure, la colonne de vision et le poste de contrôle-commande. La figure 1.15 ci-après présente la plate-forme de manipulation placée sur une table anti-vibration, permettant de limiter l'influence de vibrations parasites extérieures sur les mesures. Le dispositif se situe dans une salle grise, sous une hôte à flux laminaire, sous environnement contrôlé.

Le porte-outil comprend deux parties : un bloc déplacement et un porte-préhenseur. Le bloc déplacement se compose d'un module de translation dans les trois directions XYZ



FIG. 1.15 – Vue d'ensemble de la plate-forme de caractérisation et de manipulation.

(moteurs linéaires Newport de course 25 mm et de résolution 50 nm) permettant le placement de l'outil dans l'espace de travail et d'un module de rotation (goniomètre Edmund Optics de rotation $\pm 15^\circ$ et de résolution $0,2^\circ$) permettant d'ajuster l'angle d'approche de l'outil. Le porte-préhenseur permet d'adapter différentes têtes instrumentées utilisables pour les opérations de manipulation et/ou de caractérisation. Les préhenseurs utilisés sont issus de la technologie AFM. Ce sont des poutres dotées ou non d'une pointe (*tip-cantilever* ou *tipless-cantilever*).

Le porte-échantillon est constitué de deux blocs de translation. Un nanotranslateur XY (plate-forme MAD City Lab de course $50\ \mu\text{m}$ et de résolution $0,1\ \text{nm}$) est monté en série avec un nanotranslateur en Z (translateur PI de course $12\ \mu\text{m}$ et de résolution $0,183\ \text{nm}$), conférant ainsi au système un espace de travail de $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m} \times 12\ \mu\text{m}$. Le dispositif assure une précision nécessaire et suffisante pour les objets à manipuler (entre $50\ \text{nm}$ et $10\ \mu\text{m}$). Celui-ci est positionné sur une plate-forme de micropositionnement manuel afin d'effectuer les ajustements ne demandant que peu de précision (microtranslateurs Edmund Optics de course de 25 mm et de résolution $2\ \mu\text{m}$).

La mesure de la flèche de l'outil (et la mesure des efforts d'interaction objet-pointe) est effectuée *via* un laser. Cette technique est issue de la microscopie à force atomique et atteint des résolutions atomiques en mesure de déplacement. Un AFM est généralement constitué d'un levier (ou poutre) associé à un tube piézoélectrique, ce dernier assurant les déplacements selon trois axes et les oscillations nécessaires aux différents modes d'imagerie, et à un système laser-photodiode permettant la conversion de l'intensité lumineuse

en tension électrique pour la mesure d'effort. Sur notre plate-forme, le principe utilisé est le même, seul change le principe d'actionnement : une céramique piézoélectrique commandée en tension remplace le piézotube. Sa déformation est effectuée dans le sens de son épaisseur et assure les oscillations nécessaires aux études vibratoires du système. La différence majeure entre les deux systèmes provient du fait que dans un AFM classique, l'ensemble du dispositif de mesure laser-poutre-photodiode est solidaire, ce qui assure une mesure continue des efforts. Sur notre plate-forme, l'ensemble laser-photodiode est solidaire du bâti du microscope et la poutre est montée sur le porte-outil motorisé pour conférer au système sa dextérité.

1.4.2 Quelques expériences

Quelques résultats sont ici illustrés autour de la manipulation d'objets microscopiques (la taille caractéristique des objets est de l'ordre de 20 à 50 μm). Il s'agissait d'exploiter les commandes référencées vision et effort pour réussir à manipuler des objets avec une résolution fine dans la dépose finale. Sur les photos des figures 1.16 et 1.17 sont illustrés différents types de manipulation : saisie, dépose et roulement.



FIG. 1.16 – Saisie statique d'une microsphère [Haliyo 2002].



FIG. 1.17 – Expérience de roulement [Dionnet 2005].

Ces expériences seront ainsi la base de nos études, illustrées dans le chapitre 2. Des expériences récentes sur cette plate-forme munie de deux pointes AFM sont aussi proposées (voir figure 1.18 page suivante). À partir de cette plate-forme, des travaux de recherche ont été effectués sur le couplage bilatéral entre une interface haptique et le système de manipulation. Ces travaux sont illustrés sur la figure 1.19 page ci-contre.

Le système de télé-micromanipulation présenté a pu être testé au cours de plusieurs démonstrations publiques organisées en salle de réalité virtuelle par de nombreux utilisateurs inexpérimentés. Ceux-ci ont tous réussi en quelques minutes à saisir, faire rouler

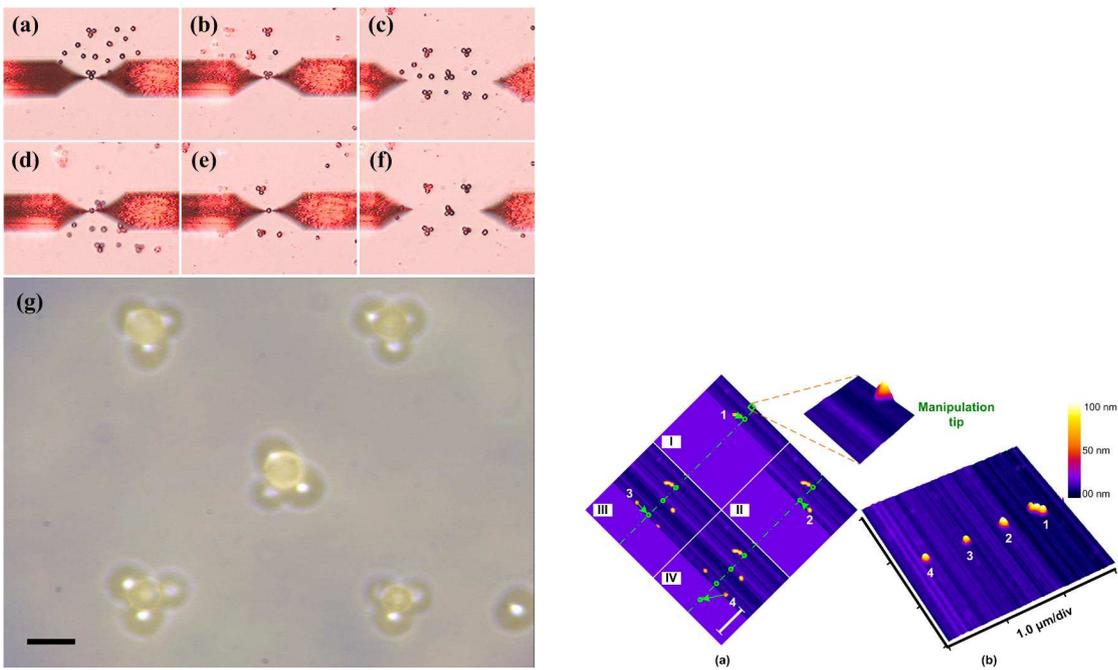


FIG. 1.18 – Manipulation 3D de microbilles par spectroscopie de force [Xie et Régnier 2009] et Nanomanipulation 2D par deux pointes AFM [Xie et coll. 2009].

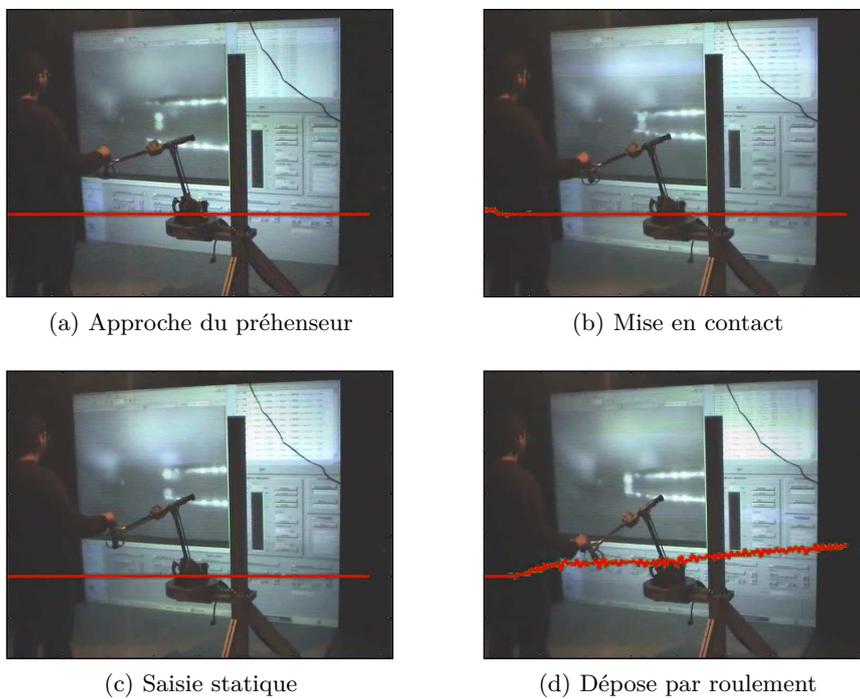


FIG. 1.19 – Télé-manipulation d'un grain de pollen.

et déposer des objets microscopiques comme des grains de pollen d'un diamètre d'environ 20 μm . Néanmoins, la manipulation par contact adhésif ne semblait pas intuitive. Il apparaît donc nécessaire de définir des assistances haptiques et d'évaluer ces dernières pour aider l'utilisateur dans une démarche de nanomanipulation téléopérée.

Une autre application est le démonstrateur du projet européen NanoRAC¹⁰ (voir figure 1.20 page suivante) terminé en 2008. L'objectif de ce projet est de tester la téléopération à l'échelle nanoscopique sous microscope électronique avec un nanopréhenseur sans retour d'effort. Un simulateur calcule les efforts en temps réel à partir d'une scène prédéfinie et l'utilisateur perçoit ces efforts pour manipuler par exemple un nanotube de carbone. On parle alors de réalité augmentée en effort.

Le démonstrateur final s'articule autour de trois blocs principaux : le porte-outils et le porte-échantillons ; le dispositif d'imagerie ; et le superviseur, avec l'interface de réalité virtuelle et l'interface haptique. La réalité virtuelle permet à l'utilisateur d'appréhender cette manipulation d'une façon différente (voir figure 1.21 page ci-contre). Si un angle de vue ne lui convient pas, il peut en changer. Diverses aides lui sont apportées comme, par exemple, une représentation de la proximité du contact par changement de couleur des surfaces, ou par la présence de flèches plus ou moins épaisses pour représenter les normales à ces surfaces. Sur ces figures, l'utilisateur approche et oriente le substrat, à l'aide du bras haptique, de manière à aligner le nanotube virtuel et les mors de la pince.

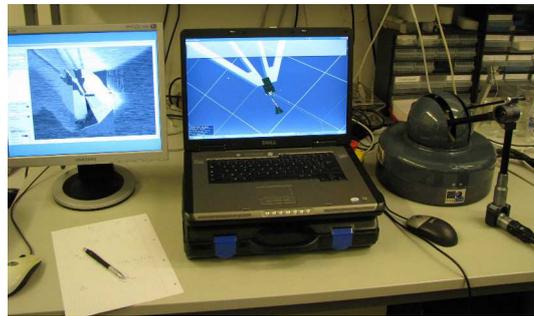
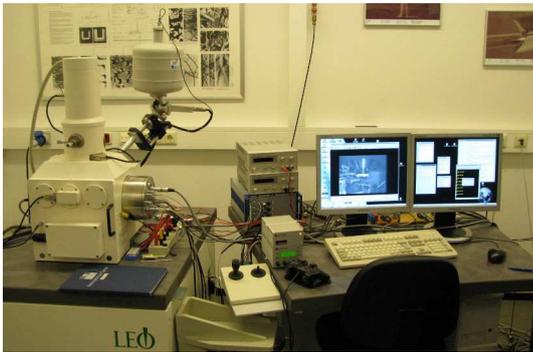
Sur la figure 1.22 page suivante, le résultat d'une télémanipulation d'un nanotube de carbone avec ce système est présenté. Ce dispositif permet de diviser par deux le temps nécessaire pour accomplir la tâche mais aucune évaluation utilisateur n'a été effectuée. Ainsi, il apparaît que, dans la littérature ou dans les études effectuées dans notre laboratoire, il existe un grand nombre de démonstrateurs mais qu'il n'existe pas de test utilisateur complet sur l'apport de l'haptique au niveau d'une tâche.

1.5 Conclusion et plan du mémoire

Ce chapitre s'est attaché à définir les spécificités du couplage haptique aux échelles micro et nanoscopique en présentant un panorama succinct des phénomènes et des propriétés de ces couplages. Une analyse des plates-formes actuelles de téléopération à ces échelles est proposée. Elle met en avant la difficulté d'obtenir des téléopérations réelles. Il existe peu de résultats répétables prouvant le réel apport de l'haptique à ces échelles. Ce manque est directement relié à la difficulté pour l'utilisateur de percevoir soit les phénomènes soit les nouvelles stratégies spécifiques mises en jeu à ces échelles. La troisième partie de ce chapitre s'est intéressée à l'apport de l'haptique dans une démarche pédagogique et aux différentes évaluations utilisateurs. Là encore, à notre connaissance, il existe des études préliminaires mais pas d'études complètes montrant de façon probante l'intérêt de l'haptique pour l'enseignement des nanotechnologies.

L'ensemble des conclusions portées dans ce premier chapitre forment le socle de nos travaux de recherche, la conception d'un simulateur de tâche, la synthèse et l'évaluation d'assistances haptiques en microtéléopération, la recherche d'analogies et d'indices

10. L'ISIR était un des six partenaires de ce projet, en charge du couplage haptique et de la simulation.



(a) Le SEM et son dispositif de contrôle. (b) Simulateur de réalité virtuelle et interface haptique.

FIG. 1.20 – Vue d'ensemble du démonstrateur NanoRAC [Vitard 2008].

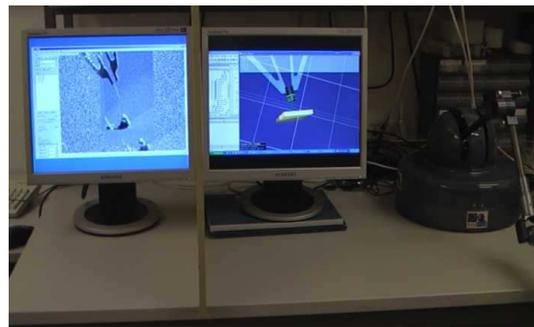
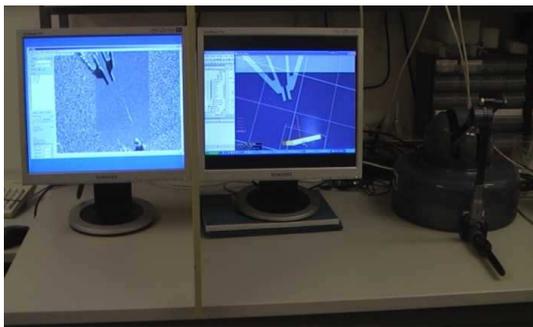


FIG. 1.21 – Changement de vue, aide pour la détection de contact.

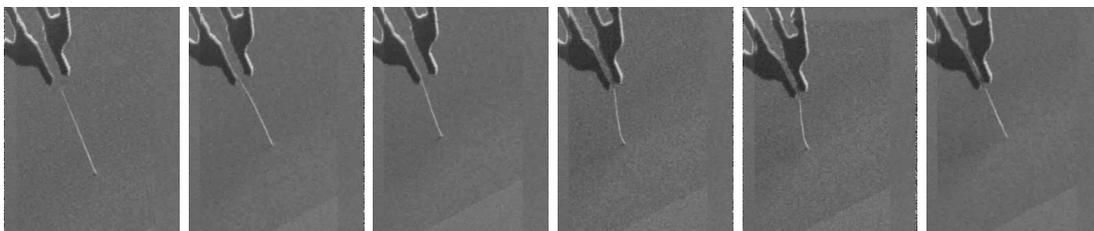


FIG. 1.22 – Phase d'approche, saisie d'un nanotube.

graphiques pour une meilleure perception de la nanophysique, et la conception d'une interface haptique dédiée.

Le second chapitre de ce mémoire aborde ainsi la conception d'assistances haptiques pour la télémanipulation d'objets microscopiques. Cette étude s'appuie sur un simulateur de tâches développé dans le cadre de ma thèse et sur les différentes stratégies expérimentales développées par notre équipe à l'ISIR. Ces études pilotes cherchent aussi à analyser des groupes d'utilisateurs différents, des novices dans le thème de la microrobotique et des utilisateurs plus expérimentés. L'ensemble des évaluations basées tâche sont décrites en détail dans ce chapitre et font apparaître l'importance des assistances haptiques, plus particulièrement à ces échelles où la physique est fondamentalement différente.

Le troisième chapitre s'intéresse au problème dual, l'haptique pour l'enseignement en nanosciences. Cette étude se base sur le simulateur et sur une expérience de toucher du nanomonde, plus particulièrement sur la courbe d'approche-retrait d'un microscope à force atomique. Une analogie de ce phénomène est aussi proposée pour essayer d'obtenir une meilleure perception des phénomènes mis en jeu. Une étude complète est décrite en détail autour d'une évaluation utilisateur avec différentes conditions expérimentales, avec ou sans haptique, avec ou sans analogie. Cette étude globale laisse entrevoir l'idée que l'analogie est un moyen intéressant d'appréhender un phénomène physique alors que l'haptique apparaît comme un moyen de comprendre intrinsèquement les forces mises en jeu.

Le quatrième chapitre s'intéresse à la conception d'une interface haute fidélité. Ainsi, nos études utilisateurs ont montré que le ressenti semble être altéré par les interfaces haptiques commerciales. Ces dernières ne semblent pas adaptées au rendu des phénomènes mis en jeu à cette échelle, rendu qui nécessite une large plage dynamique, c'est-à-dire un faible frottement et un effort maximal élevé. Une nouvelle approche pour la conception d'un actionneur à deux étages est ainsi proposé pour répondre à ce problème. Le premier étage est constitué d'un moteur puissant couplé à l'arbre de sortie *via* un coupleur visqueux et est asservi pour produire la vitesse relative nécessaire pour fournir le couple désiré. Le deuxième étage comprend un petit moteur directement couplé à l'arbre de sortie et s'occupe uniquement de fournir les composantes transitoires ou hautes-fréquences de la consigne de couple. Une analyse de ce système et des tests expérimentaux autour de deux prototypes sont proposés pour montrer la pertinence de notre choix pour notre problématique.

Chapitre 2

Simulateur et assistances haptiques pour la microtéléopération

L'échelle nanoscopique 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 micro- et nanotéléopération. De même, les stratégies de manipulation à ces échelles sont fortement modifiées par rapport à l'échelle macroscopique. Les manipulations par poussée ou par maîtrise active de l'adhésion sont privilégiées. Cette perte d'intuitivité complexifie encore, du point de vue utilisateur, la téléopération.

On s'intéresse en particulier à l'utilisation d'un microscope à force atomique et aux stratégies de manipulation développées et mises en œuvre par l'équipe MAP de l'ISIR, telles qu'elles ont été présentées dans le chapitre précédent. À partir de cet existant, nous proposons plusieurs assistances haptiques adaptées à ces stratégies de manipulation. Cependant, le développement et l'évaluation de ces assistances nécessitent une plate-forme expérimentale facilement accessible. Or, l'AFM est un outil fragile ; les temps de préparation des échantillons sont assez longs (recherche d'un site de manipulation adéquat, avec des objets non agglutinés, sans trop de poussières, etc.) ; l'environnement est peu répétable et les opérations non plus. Il est difficile dans ces conditions de tester rapidement des assistances haptiques.

Nous avons donc choisi une autre approche. Elle consiste à simuler l'environnement micro ou nanoscopique et notamment la physique et reproduire fidèlement les tâches basées sur les stratégies de micromanipulation évoquées précédemment. Ce chapitre décrit dans une première partie le simulateur interactif développé, un simulateur adapté à la physique des échelles micro- et nanoscopique, et en particulier à l'interaction par poutre AFM et aux comportements spécifiques engendrés par les forces d'adhésion. Le dessein recherché par ce simulateur générique est la mise en place d'une plate-forme de réalité virtuelle apte à évaluer l'intérêt de différentes approches pour les études du couplage haptique pour des tâches de manipulation ou des études de ressenti.

Une seconde partie de ce chapitre explore diverses approches pour la perception utilisateur des tâches de micromanipulation. Deux expériences pilotes basées sur les approches développées dans notre équipe sont proposées avec des assistances haptiques développées pour ces stratégies. Ce chapitre cherche à proposer une méthodologie d'analyse de la perception utilisateur et se concentre sur l'évaluation d'expériences pilotes de tâches de télé micro-manipulation.

2.1 Simulateur interactif dédié aux échelles micro/nanoscopiques

Comme le premier chapitre l'a évoqué, une plate-forme de réalité virtuelle comporte une simulation physique et divers moyens de communication avec l'utilisateur. Une première section décrit comment ces éléments s'articulent et communiquent entre eux, puis chacun de ces éléments est détaillé dans les sections suivantes. Au final, le simulateur est capable de reproduire les tâches canoniques utilisées pour la mise en œuvre des stratégies de micromanipulation.

2.1.1 Architecture de la simulation interactive

L'utilisateur interagit avec la simulation par l'intermédiaire d'une interface homme-machine. Celles développées dans nos travaux ont deux modalités, visuelle et haptique. La figure 2.1 montre l'architecture générale de la plate-forme de simulation.

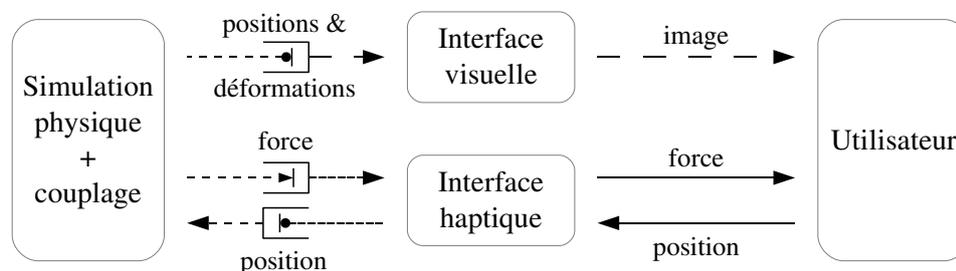


FIG. 2.1 – Architecture générale d'une simulation interactive en réalité virtuelle avec retour haptique. L'interface haptique est ici commandée en impédance (mesure de position; consigne de force). Le type de trait des flèches indique la fréquence des informations communiquées : - - 30 Hz, - - - 1 kHz si possible, - - - - 1 kHz au moins, ——— instantanée.

L'interaction haptique étant bilatérale (en boucle fermée avec l'utilisateur), l'ajout d'un retour haptique apporte certaines contraintes, entre autres, des délais de communication les plus courts possibles. L'interface haptique nécessite un taux de rafraîchissement élevé pour être à la fois stable et transparente, typiquement de l'ordre du kilohertz. Plus précisément, c'est le *retard pur* dans la boucle d'asservissement qu'il est important de minimiser. Si la simulation physique n'est pas assez rapide ou s'il existe des retards de communication importants, des couplages plus complexes doivent être envisagés pour assurer la stabilité de l'interface haptique. Dans tous les cas, ce choix diminue la transparence du rendu haptique.

Le couplage entre la simulation physique et l'interface haptique est en mode impédance : la simulation lit la position de l'interface haptique, puis calcule la force à rendre et l'envoi à l'interface haptique. Contrairement au mode de contrôle dual, le mode admittance, le mode impédance est adapté à la simulation de masse virtuelle faible et aux interfaces haptiques légères et relativement peu coûteuses.

L'interface visuelle est moins contraignante. Elle est toujours stable puisqu'unilatérale (en boucle ouverte). La fréquence du rendu graphique est généralement entre 30 et 60 Hz.

Son implémentation est détaillée page 37.

Enfin, la communication entre les processus doit être adéquate, en particulier celle entre les processus rapides et les événements lents ou non-déterministes. Le symbole \Rightarrow représente une communication avec perte de données d'un processus rapide vers un autre plus lent : si les données n'ont pas été lues par le processus lent au moment où le processus rapide peut en fournir de nouvelles, alors les données en attente sont remplacées par les nouvelles. De façon opposée, le symbole \Leftarrow représente une communication sans perte de données. La transmission des informations entre les interfaces visuelle et haptique se fait par l'intermédiaire de sémaphores en mémoire partagée. Un processus serveur, codé en C++, gère le couplage avec l'interface haptique ainsi que la communication avec la simulation à travers les sémaphores.

Les sections suivantes décrivent l'implémentation de chaque partie de l'architecture : la simulation physique de la sonde AFM et des objets microscopiques dans le cadre des stratégies de micromanipulation, puis les interfaces graphique et haptique, et enfin le couplage entre ces éléments.

2.1.2 Simulation physique

Les objets microscopiques ont une masse très faible. Cette propriété est plus accentuée pour les objets nanoscopiques (la masse, proportionnelle au volume, diminue avec le cube des dimensions). Simuler leur déplacement par intégration numérique requiert un pas de temps de simulation très faible pour assurer la précision de la dynamique et la bonne gestion des collisions. Par exemple, une particule de silicium de $1 \mu\text{m}^3$ pèse $2,3 \cdot 10^{-12}$ g. Si une force de perturbation de $1 \mu\text{N}$ (due par exemple à une charge électrostatique) décolle la particule de son substrat, celle-ci parcourt dans l'air $1 \mu\text{m}$ en moins de $0,1 \mu\text{s}$. Gérer de telles dynamiques nécessite des fréquences de calcul de plusieurs MHz, contrainte difficilement atteignable sur nos outils informatiques.

D'un autre côté, les forces d'adhésion au contact des surfaces tendent à immobiliser les objets par rapport au substrat, et comme la cinétique des phénomènes est courte, cette immobilisation peut être supposée rapide. À notre échelle de temps, la scène est supposée statique la plupart du temps. Une approche possible est donc de calculer uniquement l'état final, sans calculer le détail des mouvements transitoires. Ainsi, nous avons choisi de considérer les objets microscopiques comme quasi-statiques dans nos simulations.

Nous adoptons un choix similaire pour la simulation de la poutre. Dans les travaux de [Marlière et coll. 2004], la simulation est dynamique (intégration des forces appliquées au solide pour calculer sa position à l'instant suivant). Or, la constante de temps mécanique des poutres dédiées au mode contact est typiquement inférieure à 1 ms [Schirmeisen et coll. 2007]. Par conséquent, à l'échelle d'une téléopération humaine, le comportement de la poutre peut être considéré comme quasi-statique. Ainsi, une autre manière de simuler le comportement d'une poutre AFM consiste à calculer sa flèche pour chaque position, et les phases transitoires, tels que le collage et le décollement, sont considérées comme des transitions d'un état, avec ou sans contact, à l'autre.

2.1.2.1 Modélisation quasi-statique

La forme allongée de la poutre entraîne un comportement élastique linéaire dans le domaine des petites déformations, donc la poutre est modélisée par un ressort sans masse (voir figure 2.2). La flèche de la poutre est définie par $\zeta = F/k$, où F est la force appliquée par le substrat sur la pointe et k la raideur de la poutre.

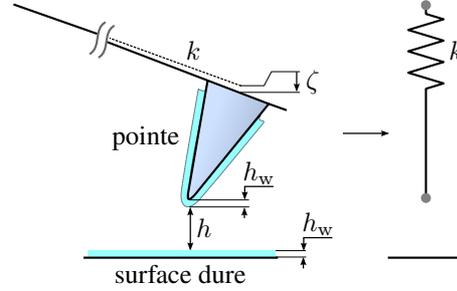


FIG. 2.2 – Modèle mécanique de la sonde AFM.

Divers cas de simulation sont étudiés selon le type de forces à distance simulées. Ces différentes simulations seront mises en œuvre dans l'expérience pédagogique, décrite au chapitre suivant, sur la compréhension des phénomènes à l'échelle nanoscopique. Elles s'appuient toutes sur la courbe d'approche retrait notée AR et décrite dans le premier chapitre.

Forces à distance durant l'approche de la sonde Un premier cas considère que la force électrostatique est nulle. Lors de l'approche, la pointe est soumise aux forces d'attraction (forces de Van der Waals) et à la force de rappel de la poutre. Comme modèle de forces de Van der Waals, nous utilisons l'approximation de Derjaguin entre une sphère (extrémité de la pointe) et un plan. L'équation d'équilibre est alors

$$k\zeta_a + \frac{HR}{6h^2} = 0, \quad (2.1)$$

où ζ_a est la flèche durant l'approche, h la distance entre la pointe et le substrat, H la constante de Hamaker et R le rayon de l'extrémité de la pointe. La distance z entre la base de la poutre et le substrat est définie comme $z = h - \zeta$. L'équation (2.1) est un polynôme cubique dont la solution avec la méthode de Cardan est

$$\zeta_a = \frac{2z}{3} \left(\cos \left(\frac{1}{3} \arccos \left(1 - 2 \frac{z_{si}^3}{z^3} \right) \right) - 1 \right), \quad z > z_{si}, \quad (2.2)$$

$$z_{si} = \frac{3}{2} h_{si} = \frac{3}{2} \left(\frac{HR}{3k} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (2.3)$$

où h_{si} est la hauteur du saut de contact. Pour rappel, le saut de contact correspond à un dépassement de gradient de force : le gradient de la force d'attraction dépasse celui de la force de rappel du ressort (en valeur absolue). En termes d'énergie, le saut de contact correspond à un point d'inflexion (dérivée seconde nulle) de la somme des énergies potentielle élastique et attractive en fonction de h . C'est ainsi que z_{si} est calculée.

2.1 Simulateur interactif dédié aux échelles micro/nanoscopiques

Un second cas de simulation considère une force électrostatique entre la pointe et le substrat. Ce type de force peut être négligé si les surfaces sont conductrices et reliées à la masse, mais sur un substrat isolant, des charges électriques peuvent apparaître par triboélectrification lors des contacts et créer ainsi des forces électrostatiques imprévisibles. Leur plus grande portée entraîne une plus grande flèche avant le collage. Ce phénomène est équivalent à l'application d'une tension électrique entre la pointe et le substrat. La figure 2.3 montre un exemple de cycle AR pour une tension de 25 V.

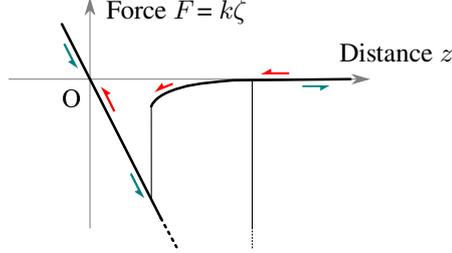


FIG. 2.3 – Courbe force-distance de l'approche-retrait avec une force électrostatique.

Nous considérons le cas où la force électrostatique est très supérieure aux forces de Van der Waals, de telle sorte que ces dernières soient négligeables. Deux modèles de force électrostatique sont utilisés, selon que la cause est une tension électrique ou une charge électrostatique. Pour chaque modèle, nous utilisons l'expression intégrée entre une sphère et un plan [Sausse-Lhernould et coll. 2007].

Dans le cas d'une tension électrique V appliquée durant la phase d'approche, l'équation d'équilibre est

$$k\zeta_a + \pi\epsilon_0 \frac{R^2 V^2}{h(h+R)} = 0, \quad (2.4)$$

où ϵ_0 est la permittivité du vide. Cette équation est un polynôme cubique dont la solution est

$$\zeta_a = -\frac{2z+R}{3} + \frac{2}{3}\sqrt{z^2+zR+R^2} \cos\left(\frac{1}{3} \arccos\left(\frac{1}{2}((z-R)(2z^2+5zR+2R^2) - 27\pi\epsilon_0 R^2 V^2/k)(z^2+zR+R^2)^{-3/2}\right)\right), \quad z > z_{\text{si}}, \quad (2.5)$$

$$z_{\text{si}} = 2h_{\text{si}} - \pi\epsilon_0 \frac{R^2 V^2}{k(R+h_{\text{si}})^2} = h_{\text{si}} \frac{2R+3h_{\text{si}}}{R+2h_{\text{si}}}, \quad (2.6)$$

où h_{si} est la solution réelle positive d'un polynôme de degré 4 et de coefficients $[1, 2R, R^2, -2\pi\epsilon_0 R^2 V^2/k, -\pi\epsilon_0 R^3 V^2/k]$.

Dans le cas d'une charge q , l'équation d'équilibre est

$$k\zeta_a + \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0(h+R)^2} = 0. \quad (2.7)$$

Cette équation est un polynôme cubique similaire à (2.1) et dont la solution est

$$\zeta_a = \frac{2(z+R)}{3} \left(\cos\left(\frac{1}{3} \arccos\left(1 - 2\left(\frac{z_{\text{si}}+R}{z+R}\right)^3\right)\right) - 1 \right), \quad z > z_{\text{si}}, \quad (2.8)$$

$$z_{\text{si}} = -R + \frac{3}{2} \left(\frac{q^2}{2\pi\epsilon_0 k} \right)^{\frac{1}{3}} = \frac{R}{2} + \frac{3}{2} h_{\text{si}}. \quad (2.9)$$

Si l'on considère la somme des forces de Van der Waals et des forces électrostatiques, l'équation d'équilibre n'est plus de degré 3 mais de degré 4 pour le modèle avec une tension et de degré 5 pour celui avec une charge électrostatique. Ces équations n'ont pas de solution analytique évidente. Il faut donc les résoudre numériquement à chaque pas de temps afin d'obtenir une solution approchée.

La hauteur du saut de contact peut toutefois être calculée en amont. Dans le cas d'une force électrostatique due à une tension, la hauteur du saut de contact est donnée par :

$$z_{\text{si}} = \frac{3}{2}h_{\text{si}} + \pi\epsilon_0 \frac{R^3V^2}{2kh_{\text{si}}(R+h_{\text{si}})^2} = h_{\text{si}} \frac{2R+3h_{\text{si}}}{R+2h_{\text{si}}} - \frac{HR^2}{6kh_{\text{si}}^2(R+2h_{\text{si}})}, \quad (2.10)$$

où h_{si} est la solution réelle positive d'un polynôme de degré 5 et de coefficients $[1, 2R, R^2, -2\pi\epsilon_0R^2V^2/k - HR/(3k), -\pi\epsilon_0R^3V^2/k - 2HR^2/(3k), -HR^3/(3k)]$. Dans le cas d'une charge, la hauteur du saut de contact est donnée par

$$z_{\text{si}} = \frac{3}{2}h_{\text{si}} + \frac{R}{(R+h_{\text{si}})^3} \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0k} = \frac{R}{2} + \frac{3}{2}h_{\text{si}} - \frac{HR^2}{6kh_{\text{si}}^3}, \quad (2.11)$$

où h_{si} est la solution réelle positive d'un polynôme de degré 6 et de coefficients $[1, 3R, 3R^2, R^3 - q/(2\pi\epsilon_0k) - HR/(3k) - HR/(3k), -HR^2/k, -HR^3/k, -HR^4/(3k)]$.

Cette approche de modélisation quasi-statique s'étend difficilement à la superposition de plusieurs modèles physiques de force. Pour prendre en compte d'autres types de force, agissant simultanément dans la simulation, la résolution dynamique est une approche plus appropriée. Cette approche nécessite toutefois une modélisation qui puisse être calculée à une fréquence supérieure à 10 kHz, de façon à ce que les transitions entre les états d'équilibre ne soient pas perceptibles haptiquement par l'utilisateur. Le laboratoire ICA de l'Institut National Polytechnique de Grenoble suit cette approche et a développé un langage de modélisation physique adapté à la simulation temps réel, le langage CORDIS-ANIMA [Cadoz et coll. 1993].

Force d'adhésion au retrait Quand la distance z atteint z_{si} , la pointe se colle au substrat, supposé indéformable dans nos simulations. Durant la phase de retrait qui suit, la flèche ζ_r est proportionnelle à z ,

$$\zeta_r = -z - 2h_w, \quad (2.12)$$

où h_w est l'épaisseur de la couche d'eau due aux conditions ambiantes. Quand la force appliquée atteint la force de *pull-off* F_{po} (force de décollement), la simulation retourne à la phase d'approche. La force de *pull-off* est calculée selon la formulation de [Carpick et coll. \[1999\]](#) du modèle de contact de [Maugis-Dugdale \[Maugis 1992\]](#). Avec ce modèle, la force de *pull-off* entre une sphère et un plan dépend des énergies d'adhésion des surfaces, de leur rigidité, et du rayon de la sphère, telle que

$$F_{\text{po}} = \frac{1}{4} \left(7 - \frac{4,04\lambda^{1,4} - 1}{4,04\lambda^{1,4} + -1} \right) \pi WR, \quad (2.13)$$

où λ est le paramètre d'élasticité, introduit dans la section [1.1.1.1](#) page 4.

Dans la pratique, le phénomène d'adhésion dépend également du temps de contact et de la précharge appliquée par l'opérateur entre les surfaces au contact. Nous prenons en compte l'influence de cette précharge en prenant comme force de décollement entre deux surfaces le minimum entre la force de *pull-off* théorique et la précharge appliquée par la sonde entre ces surfaces. Les deux études pilotes présentées dans la deuxième partie de ce chapitre prennent en compte cette influence de la précharge, en particulier la première étude, afin d'évaluer l'apport d'une assistance haptique qui valide automatiquement la condition de précharge pour saisir une bille par adhésion.

2.1.2.2 Stratégies de micromanipulation

Parmi les stratégies de micromanipulation sous AFM présentées au chapitre précédent, deux techniques sont plus souvent utilisées. Il s'agit de la saisie par adhésion, appréciée pour sa simplicité, et de la dépose par roulement, utilisée pour sa précision. L'utilisation de ces techniques requiert certaines conditions sur les matériaux des objets manipulés et sur l'effort appliqué par la poutre durant ces opérations.

Saisie et dépose par adhésion Les stratégies de saisie et dépose par adhésion sont basées sur l'utilisation des forces d'adhésion. La saisie par adhésion, aussi appelée *saisie statique*, d'un objet sur un substrat consiste à amener la poutre au contact de l'objet, appliquer une force suffisante sur l'objet pour qu'il adhère plus à la poutre qu'au substrat, et retirer la poutre avec l'objet. Le fait de devoir appliquer une force suffisante est dû à la prise en compte de la précharge dans le calcul de la force de décollement, comme expliqué précédemment. La figure 2.4 illustre les étapes successives nécessaire à une saisie et dépose par adhésion.

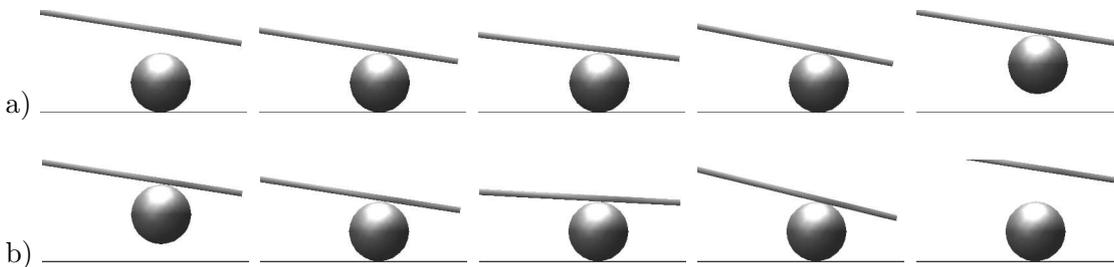


FIG. 2.4 – Vues de côté illustrant (a) une saisie et (b) une dépose par adhésion. Les substrats pour la saisie et la dépose n'ont pas les mêmes propriétés adhésives.

La faisabilité et l'étude statique des conditions nécessaires à la saisie et à la dépose de l'objet sont décrites en détail dans la thèse d'Yves Rollot [2000]. En négligeant le poids de l'objet devant les forces d'adhésion, la condition nécessaire pour saisir l'objet par adhésion est que la force d'adhésion entre la poutre et l'objet, F_{po}^{adh} , soit plus grande que celle entre l'objet et le substrat, F_{so}^{adh} :

$$F_{po}^{adh} > F_{so}^{adh}. \quad (2.14)$$

L'opération de dépose par adhésion, ou *dépose statique*, se déroule de manière similaire mais avec la condition inverse : l'adhésion entre la poutre et l'objet doit être plus faible

que celle entre l'objet et le substrat. La saisie et la dépose par adhésion ne sont pas possibles sur un même substrat puisque les conditions favorisant la saisie sur un substrat (force de *pull-off* poutre/bille supérieure à celle bille/substrat) empêchent la dépose par adhésion sur ce même substrat.

Roulement/glissement des objets sphériques Pour déposer la bille sur le même substrat de départ, il faut diminuer la force d'adhésion entre la poutre et la bille. La principale approche pour cela est de diminuer la surface de contact entre la poutre et la bille, et un moyen d'y parvenir est d'amener la bille au bord de la poutre. Dans le contexte particulier de la manipulation de billes avec une poutre sans pointe, la dépose par roulement apparaît comme une solution originale pour une dépose précise. L'analyse théorique et expérimentale de cette tâche complexe est décrite en détail dans la thèse de Fabien Dionnet [2005]. Cette technique consiste à amener la poutre et la bille collée dessous au contact du substrat, appliquer une force suffisante pour que la bille puisse rouler entre la poutre et le substrat, et déplacer la poutre de façon à faire rouler la bille jusqu'au bord de la poutre où elle se décollera au profit des forces d'adhésion du substrat. La figure 2.5 illustre les étapes successives nécessaires à une dépose par roulement.



FIG. 2.5 – Vues de côté de la scène virtuelle illustrant une dépose par roulement.

Le comportement d'un objet pouvant rouler dépend des forces de frottement, des forces appliquées par la sonde et le substrat et des forces d'adhésion entre l'objet et les surfaces en contact. Les simulations numériques décrites dans la thèse de Dionnet ont montré que les conditions favorisant la saisie par adhésion par rapport à la dépose par adhésion favorisent le glissement à l'interface objet/substrat par rapport au glissement à l'interface poutre/objet, et réciproquement. Ainsi, on observe deux modes de comportement de l'objet sous l'action du déplacement de la poutre : le glissement de l'objet sur le substrat et le roulement de l'objet entre la poutre et le substrat.

Cependant, ces simulations numériques ne prennent pas en compte l'influence de la précharge sur la force d'adhésion et considèrent celle-ci à sa valeur théorique dès que les surfaces se touchent. La prise en compte de la précharge dans le calcul de la force d'adhésion fait apparaître un troisième mode de comportement : le glissement de l'objet sur la poutre lors de la saisie, lorsque la précharge est inférieure à la force d'adhésion entre la bille et substrat.

Une deuxième conclusion des travaux de Dionnet est que la force normale appliquée par la poutre sur l'objet doit dépasser une valeur seuil pour que l'objet ne glisse pas. Pour favoriser le roulement, et donc la dépose, il faut exercer une force normale importante. Cette force doit être maintenue constante afin de garantir la non-transition du mode de roulement au mode de glissement. La détermination de la valeur seuil nécessite une résolution numérique du problème mécanique.

Pour simuler cette dépose, nous supposons un roulement sans glissement. Ainsi, le

mouvement de l'objet peut être assimilé instantanément à une rotation autour du point de contact objet/substrat, la vitesse du point de contact objet/poutre étant égale à la vitesse de la poutre elle-même, v_p . Par conséquent, la vitesse instantanée v_o du centre de l'objet est donnée par

$$v_o = \frac{v_p}{2}. \quad (2.15)$$

L'intégration de cette relation permet d'établir que, pour une translation δx_p de la poutre, le déplacement horizontal δx_o (translation apparente) de l'objet vaut

$$\delta x_o = \frac{\delta x_p}{2}. \quad (2.16)$$

Lorsque l'objet arrive au bord de la poutre, l'adhésion est considérée suffisamment réduite pour que l'objet adhère à nouveau au substrat et soit donc déposé. Cette stratégie de dépose par roulement sera mise en œuvre dans la simulation de la deuxième expérience pilote afin d'évaluer l'apport d'une assistance haptique qui valide automatiquement la condition de roulement lors de la dépose.

2.1.3 Interface graphique

L'interface graphique a été implantée avec le logiciel libre Blender¹. Comme expliqué précédemment, nous avons choisi une simulation quasi-statique de l'environnement virtuel. Par conséquent, le moteur physique de Blender n'est pas utilisé. Les déplacements et déformations des objets sont calculés à chaque instant en utilisant les algorithmes et équations présentés dans la partie précédente.

La déformation de la poutre est rendue par une animation squelettale. La poutre est découpée en N blocs contigus et animée par un squelette formé de N os et $N - 1$ articulations. Selon la théorie des poutres, lorsque la poutre est sollicitée en flexion, la rotation absolue de la courbe moyenne a une forme quadratique de la position. Pour un modèle discret, une rotation quadratique peut s'implémenter facilement par une rotation relative linéaire entre chaque bloc : $\theta_n = \theta((n - \frac{1}{2})\frac{L}{N}) = \theta_{n-1} + 3\frac{\zeta}{L}\frac{1+N-n}{N^2}$ où n est l'indice du bloc et L la longueur de la poutre. De même, la torsion de la poutre peut être simulée par une rotation linéaire de chaque bloc autour de son os : $\alpha_n = n\alpha_N$.

La poutre implémentée pour les évaluations est découpée en 12 blocs et représente une poutre de 20 μm de largeur, 120 μm de longueur et 1 μm d'épaisseur. Sa longueur est plus courte que celle d'une poutre AFM réelle, afin de visualiser facilement sa flexion lorsqu'elle est vue de côté, notamment pour l'étude pédagogique décrite au chapitre suivant.²

Dans les deux études pilotes qui évaluent les assistances haptiques décrites dans la deuxième partie de ce chapitre, le point de vue fourni aux sujets durant l'expérience est une vue de dessus de la scène virtuelle, similaire au retour visuel d'une plate-forme de micromanipulation réelle. Une différence importante, toutefois, avec une vue de microscope réelle, est l'absence de plan de focalisation qui, dans la pratique, empêche d'avoir

1. Suite libre et gratuite d'animation, modélisation et rendu 3D. <http://www.blender.org>

2. Pour cette étude pédagogique, une pointe est ajoutée à la poutre afin de reproduire les phénomènes et les conditions de manipulation à l'échelle nanoscopique.

une image nette à la fois sur la poutre, les objets et le substrat. Cette circonstance peut constituer un biais lors des évaluations, en conduisant à une évaluation optimiste des conditions expérimentales basées sur le retour visuel. La figure 2.6 illustre deux exemples de vue de dessus, extraits des simulations utilisées dans les études pilotes.

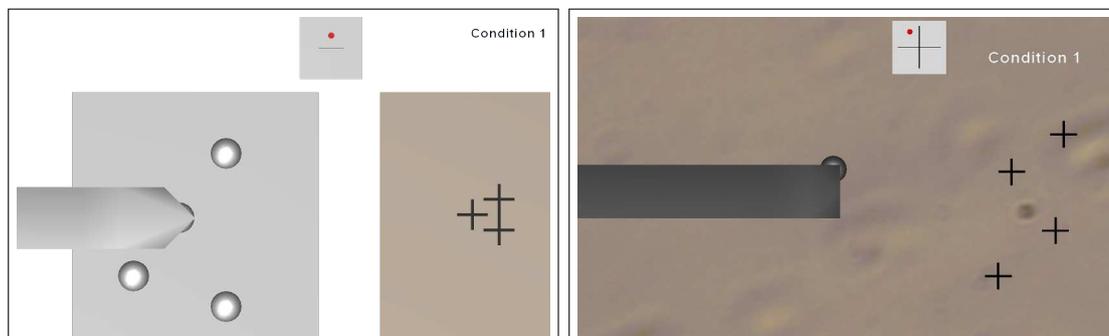


FIG. 2.6 – Exemples de rendus graphiques utilisés dans les études pilotes sur l'évaluation des assistances haptiques. Le point rouge dans le repère situé en haut de l'image indique la valeur de la force appliquée sur la poutre.

Par ailleurs, un indicateur de la force appliquée sur la poutre est affiché dans la partie supérieure de cette vue. Cet indicateur représente la photodiode d'un système de mesure de déformation par laser pour AFM. Le point rouge symbolise l'impact du laser sur la photodiode. Sa position verticale indique la flexion de la poutre et sa position horizontale la torsion de la poutre. Cet indicateur correspond au retour d'information visuel actuellement utilisé sur la plate-forme de nanomanipulation NanoMAD développée à l'ISIR. Sans retour haptique, cet indicateur est la seule source d'information sur la force appliquée sur la poutre.

2.1.4 Interface haptique

Nos évaluations ont utilisé deux interfaces haptiques commerciales. La première interface, utilisée lors de la première expérience pilote et lors de l'expérience pédagogique, est un Virtuose 3D10-20, commercialisé par Haption S.A. Il s'agit d'une interface d'architecture série à 6 DDL en déplacement et 3 DDL en effort (pas de couple), fournissant un effort maximal continu de 5 N dans un volume comprenant un cube de 20 cm de côté.

La deuxième interface, utilisée lors de la deuxième expérience pilote, est un omega.3, commercialisé par Force Dimension. C'est une interface d'architecture parallèle. Pour un encombrement identique à celui du Virtuose, elle est donc plus légère et rigide, mais son espace de travail est plus petit. Elle peut fournir un effort maximal continu de 12 N dans un volume comprenant un cube de 11 cm de côté.

2.1.5 Couplage et assistance haptique

Les coefficients d'échelle en déplacement et en effort dans nos simulations ont été choisis de façon à éviter les recalages de position de l'interface haptique et, dans le cas d'une tâche répétée plusieurs fois de suite, de limiter la fatigue de l'utilisateur. En effet, pour que l'utilisateur ait un maximum de confort et de précision, un retour haptique

exercé sur une période de plus de quinze minutes doit être inférieur à environ 10 % de la force maximale du bras de l'utilisateur en position assise [Gosselin 2005], soit une limite de force à 4 N.

Par ailleurs, ce couplage peut s'adapter aux forces mesurées afin de rendre perceptibles certains phénomènes pour mieux les identifier, ou au contraire afin de les diminuer pour faciliter une tâche. Cette adaptation du rendu haptique fait l'objet de la section suivante sur l'ajout d'assistances haptiques.

2.2 Assistances haptiques

2.2.1 Couplage haptique dédié à la perception

Divers exemples de tâches et de stratégies de manipulation ont été présentés dans le chapitre précédent. 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.

Citons les principales tâches ou manipulations à l'échelle micro/nanoscopique où un besoin d'interactivité apparaît. Il s'agit par exemple de tâches difficilement automatisables ou bien de tâches exploratoires :

- les déposes par roulement avec une poutre sans pointe (échelle microscopique) ;
- déplacement par piégeage optique ou poussée à l'aide d'un objet piégé optiquement, en milieu liquide (échelle microscopique) ;
- poussée par glissement/roulement avec une poutre avec pointe (échelle nanoscopique).

L'un des points clefs de la problématique est la versatilité de la manipulation, c'est-à-dire la capacité à être interactif pour placer un objet dans une position désirée pour par exemple le caractériser physiquement.

Parmi les tâches citées précédemment, certaines sont en milieu ambiant et subissent donc des forces d'adhésion au contact des surfaces. Dans un couplage à coefficients homothétiques constants, l'amplitude de la force d'adhésion rencontrée lors du retrait d'une poutre AFM incite souvent l'opérateur à diminuer le coefficient en effort pour améliorer le confort de manipulation (diminuer l'effort à fournir ainsi que l'amplitude de l'échelon de force à maîtriser lors de la rupture du contact). Cette contrainte est cependant effectuée au détriment du rendu des forces de faibles amplitudes.

Diverses possibilités sont envisageables pour diminuer l'effet de ce compromis. Du côté du couplage haptique, l'idée évidente est de choisir des coefficients en effort non constants. Cette modification du rendu haptique peut être vue comme un couplage supplémentaire, fournissant une assistance haptique. Il est situé en amont de la partie du couplage qui assure le changement d'échelle et la stabilité de la téléopération.

Pour qu'une assistance haptique soit dédiée à une partie de l'opération, il est nécessaire d'avoir certaines données sur l'état du système, par exemple pour un cycle AR, déterminer si le système est en phase de retrait pour modifier le rendu des forces d'adhésion. Dans une tâche exploratoire, la hauteur de la surface la plus proche, c'est-à-dire la position du point O sur la figure 1.1 page 5 est inconnue a priori. Par conséquent, nous baserons les assistances sur la force mesurée plutôt que sur la hauteur de la base de la poutre. Toutefois, dans le cas particulier où la géométrie de l'environnement et le comportement mécanique des surfaces en contact seraient connus à l'avance, des assistances haptiques spécifiques pourraient être basées sur la hauteur de la poutre.

2.2.2 Rendu haptique des forces d'attraction

Pour illustrer et expliquer les assistances proposées, l'exemple du cycle AR d'une poutre AFM est choisi, sans que cette préférence ne restreigne la généralité de l'approche. Le choix de cet exemple semble pertinent car il implique l'ensemble des phénomènes les plus présents en nanomanipulation par AFM.

La figure 2.7 page suivante présente différentes assistances haptiques portant sur le rendu des forces d'attraction (dues à l'adhésion ou aux attractions à distance) lors du cycle AR d'une poutre AFM (forces négatives sur la courbe force-distance). Pour les comparer, le rendu obtenu avec un couplage à coefficients constants est tracé en gris. Ces assistances représentées dans la partie haute de la figure consistent à appliquer un coefficient en effort différent lorsque la force mesurée est attractive. Ce coefficient peut être une constante différente de celle appliquée aux forces de répulsion ou une fonction non-linéaire de la force mesurée ; il peut être positif pour diminuer l'attraction due à l'adhésion ou bien négatif afin de repousser l'opérateur lors du retrait.

Le couplage inverse modifie profondément la perception du cycle AR. Quand la sonde AFM est proche d'une surface, si une force d'attraction agit sur la sonde, cette attraction est rendue à l'opérateur comme une répulsion. Cette inversion peut contribuer à éviter un saut de contact non désiré, si les forces d'attraction précédant le saut de contact sont suffisamment perceptibles par l'opérateur, ce qui n'est généralement pas le cas avec un couplage à coefficients constants. Une fois la sonde au contact d'une surface, l'inversion transforme la position de repos au contact en une position d'équilibre instable : plus la sonde appuie sur la surface ou plus elle se retire, plus l'opérateur est repoussé. Le retrait de la sonde, s'il est désiré, est ainsi facilité, du point de vue de l'effort à fournir par l'opérateur.

La présence d'un saut de contact important avec un couplage inverse peut être gênante lors de l'approche, puisque l'opérateur se retrouve repoussé immédiatement après le saut de contact. Dans ce cas, la modification du rendu des forces d'attraction peut débiter à partir d'un certain seuil de force, de valeur supérieure à la force mesurée lors du saut de contact. Les assistances tracées au bas de la figure 2.7 représentent ce cas, où F_r est le seuil de force.

2.2.3 Position de repos virtuelle pour les opérations à effort constant

Parmi les tâches citées précédemment, certaines nécessitent d'appliquer un effort suffisant sur la poutre pour être réalisées, notamment la dépose par roulement et l'indenta-

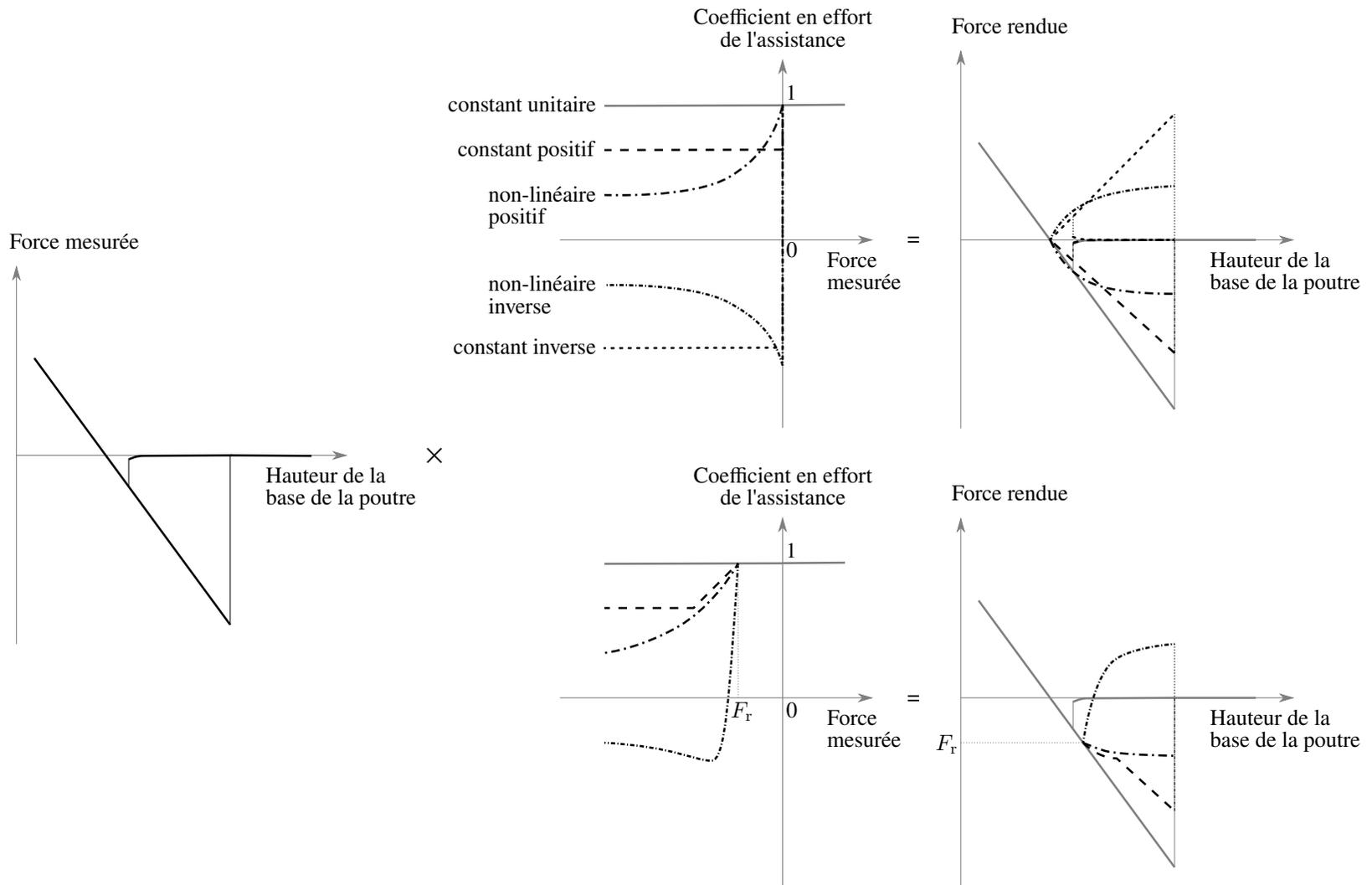


FIG. 2.7 – Assistances haptiques modifiant le rendu des forces d'attraction. L'exemple de mesure illustré à gauche est un cycle approche-retrait d'une poutre AFM. Les assistances tracées dans la partie haute débutent lorsque la force mesurée est négative, tandis que celles en-dessous débutent à partir d'un seuil de force mesurée noté F_r .

tion. La nécessité d'un effort constant appliqué par la sonde peut être assistée par l'ajout, dans le rendu haptique, d'une position de repos virtuelle plus basse que la position de repos réelle de la sonde. La figure 2.8 page ci-contre schématise cette idée.

Pour ajouter cette position de repos virtuelle, le coefficient en effort doit passer par une valeur nulle et la pente, ou le taux de changement autour de cette valeur, doit être décroissant pour que la position soit stable. Cette position de repos virtuelle correspond à une position réelle de la sonde en dessous de la surface au contact et donc à un certain effort F_v appliqué par la sonde sur cette surface.

Lorsque l'interface haptique est dans cette position, si l'opérateur veut augmenter l'effort appliqué par la sonde, il doit fournir l'effort équivalent à celui qu'il exercerait sans l'assistance haptique. Le rendu haptique est ensuite identique au rendu sans assistance (coefficient en effort unitaire). Pour revenir à la position de repos réelle, l'opérateur doit fournir un certain effort $c_v F_v$, où $c_v < 0$ est la valeur du coefficient en effort juste avant la position de repos virtuelle.

La transition entre les positions de repos réelle (force mesurée nulle) et virtuelle (force mesurée non nulle mais force rendue nulle) donne lieu également à diverses possibilités de couplage. En particulier, elle influe sur la stabilité de la position de repos réelle de la sonde au contact. La figure 2.8 montre deux exemples de transition qui rendent la position de repos réelle stable ou instable. Si le coefficient en effort devient négatif dès que la force mesurée est positive, alors la position de repos réelle sera un équilibre instable : plus la sonde appuie sur la surface, plus l'opérateur est attiré. En revanche, si le coefficient reste positif sur une faible plage de force mesurée avant de devenir négatif, alors la position de repos réelle sera un équilibre stable.

2.2.4 Assistance implémentée

Les deux types d'assistance haptique décrits précédemment ont été implémentés afin d'être évalués. Pour le rendu des forces d'attraction, nous avons choisi d'évaluer le couplage inverse car celui-ci modifie le plus ce rendu. La figure 2.9 page 44 représente l'évolution du coefficient en effort combinant ces deux assistances haptiques en fonction de la force mesurée, ainsi que la force rendue par ce couplage pour l'exemple du 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. Par souci de simplicité, le cas particulier où le coefficient c_v est identique quelque soit la force mesurée est choisi. Lorsque la force mesurée lors de l'approche atteint F_{v1} , le rendu haptique devient similaire à celui d'un ressort virtuel. Le coefficient en effort passe linéairement de c_v à 1 sur une plage de forces mesurées $[F_{v1}, F_{v2}]$. La force rendue dans la plage de hauteurs associées à cette plage de forces mesurées est donc $F(F_m) = (c_v + k_v(F_m - F_{v1}))F_m$. Toutefois, la raideur k_v , engendrée par la taille de cette plage de forces, doit s'adapter aux contraintes de la boucle haptique : une raideur trop grande peut rendre l'interface haptique instable dans certaines conditions de forte excitation. La plage $[F_{v1}, F_{v2}]$ est déterminée par le choix de la force F_v appliquée par la sonde à la position de repos virtuelle et de la raideur k_v , telle que $F_{v1} = F_v + \frac{c_v}{k_v}$ et $F_{v2} = F_v + \frac{1}{k_v}$.

Lorsque le coefficient en effort atteint 1, il reste fixé à 1 et la force rendue est alors identique à la force mesurée (au changement d'échelle près).

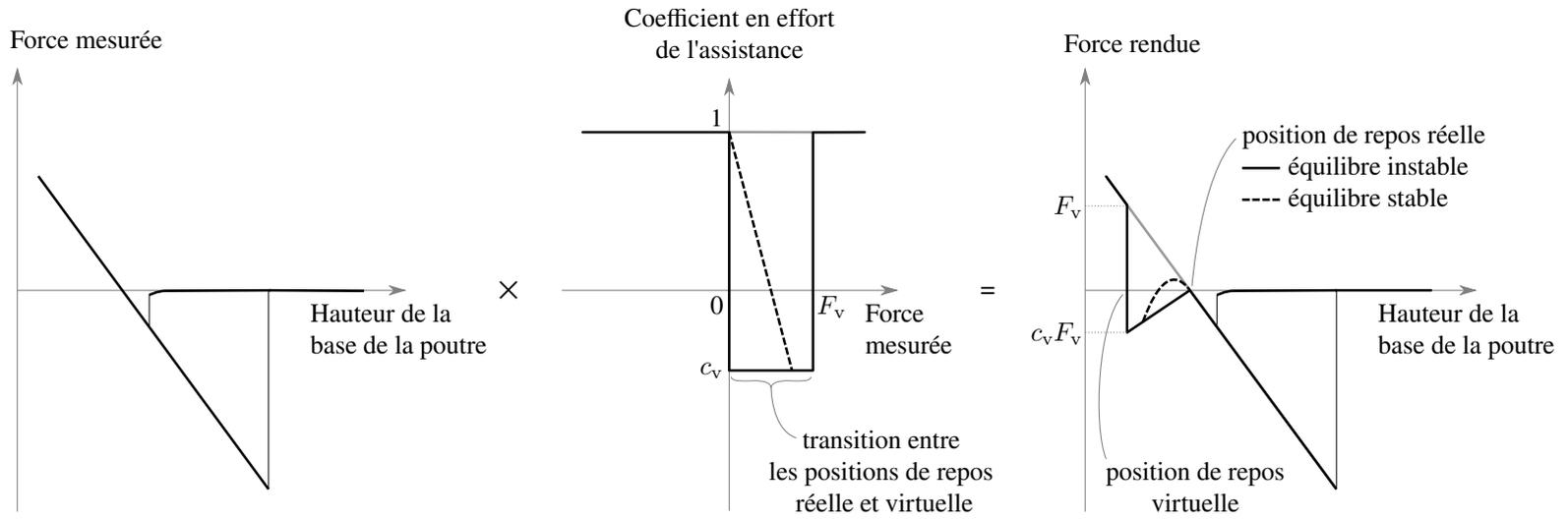


FIG. 2.8 – Assistance haptique ajoutant une position de repos virtuelle afin que, lors du contact de la sonde AFM sur une surface, la position de repos de l'interface haptique corresponde à une position réelle de la sonde telle que celle-ci applique une force F_v sur cette surface. La transition entre les positions de repos réelle et virtuelle influe sur la stabilité de la position de repos réelle.

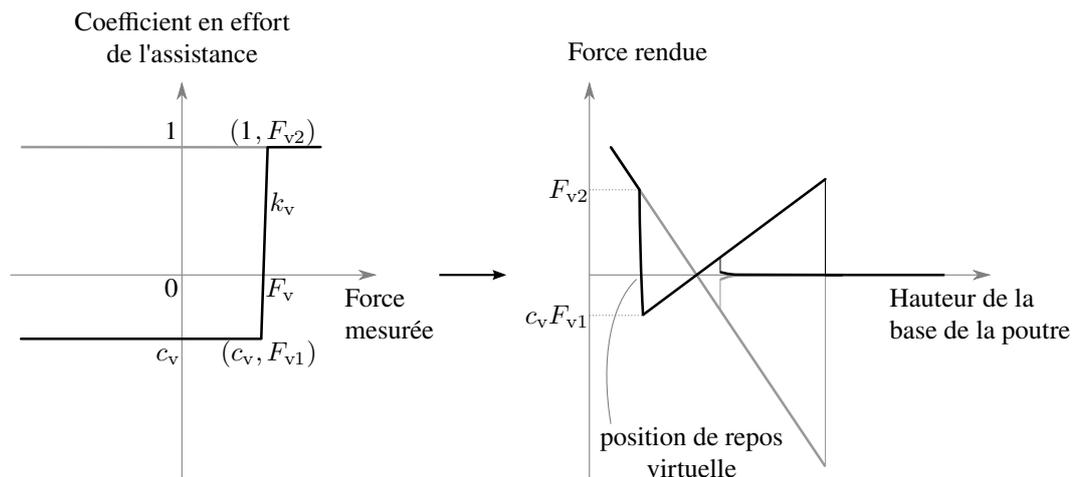


FIG. 2.9 – Assistance haptique combinant le rendu inverse des forces d’attraction et l’ajout d’une position de repos virtuelle. L’exemple pris pour la force mesurée est un cycle AR.

Cette assistance peut avoir différents intérêts selon la tâche exécutée. Pour une saisie ou une dépose par adhésion, la position de repos virtuelle peut valider complètement ou partiellement la condition en effort requise par la précharge ; et le rendu inverse peut améliorer le confort de manipulation en diminuant la fatigue due au retour haptique. Pour une dépose par roulement, la position de repos virtuelle peut valider automatiquement la condition de roulement. Afin d’évaluer l’intérêt de cette assistance, deux expériences pilotes ont été menées, portant chacune sur une des deux stratégies de micromanipulation simulées.

2.3 Étude pilote sur une tâche de saisie et dépose par adhésion

Le but de cette expérience est d’évaluer l’apport de l’assistance haptique décrite précédemment pour une tâche de saisie et dépose par adhésion avec une poutre AFM sans pointe. On souhaite vérifier si notre assistance améliore les performances en temps et en précision, ainsi que le confort de manipulation. La tâche demandée consiste à déplacer quatre objets sphériques d’un substrat à un autre, plus adhésif, de façon à former un assemblage pyramidal.

2.3.1 Plate-forme expérimentale

La figure 2.10 page ci-contre montre la scène virtuelle au début et à la fin de la tâche. Les vues en perspective servent à comprendre la scène virtuelle mais le point de vue fourni aux sujets durant l’expérience est une vue de dessus de la scène virtuelle. L’indicateur de la force appliquée sur la poutre est le seul indice disponible lorsqu’il n’existe pas de retour haptique.

Pour utiliser la saisie et la dépose par adhésion dans une même tâche, le substrat de dépôt doit exercer des forces d’adhésion plus grandes que le substrat de saisie. Plus généralement, les matériaux des surfaces en contact doivent être choisis pour que les

2.3 Étude pilote sur une tâche de saisie et dépose par adhésion

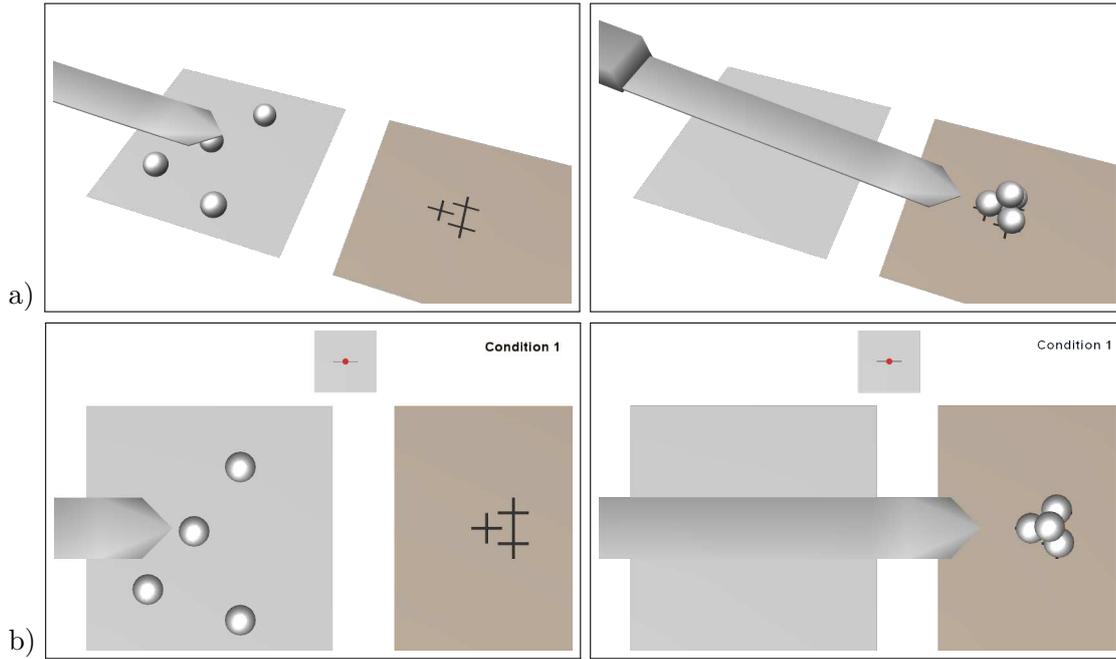


FIG. 2.10 – Environnement virtuel : vue (a) en perspective et (b) de dessus pour la tâche de saisie et dépose par adhésion. Les illustrations à gauche montrent la scène avec les quatre billes réparties sur le substrat de saisie et celles à droite montrent les quatre billes déposées sur le substrat de dépôt.

forces de *pull-off* au contact entre les substrats, les billes et la poutre respectent les inégalités suivantes :

$$F_{po}(\text{substrat}_A/\text{bille}) < F_{po}(\text{bille}/\text{poutre}), \quad (2.17)$$

$$F_{po}(\text{bille}/\text{poutre}) < F_{po}(\text{substrat}_B/\text{bille}), \quad (2.18)$$

$$F_{po}(\text{bille}/\text{poutre}) < F_{po}(3 \text{ billes}/\text{bille}). \quad (2.19)$$

Les valeurs numériques utilisées pour l'expérience sont celles obtenues pour une poutre en silicium de raideur 20 N/m, des billes de $\varnothing 10 \mu\text{m}$ en cuivre, un substrat A en verre et un substrat B en cuivre. Elles sont indiquées dans le tableau 2.1.

TAB. 2.1 – Forces de décollement aux interfaces des objets en contact

Interface	F_{po}
substrat A (verre) – bille (cuivre)	58 μN
poutre (silicium) – bille	163 μN
substrat B (cuivre) – bille	194 μN
3 billes – bille	238 μN

Le roulement des billes entre la poutre et un substrat n'est pas permis pour cette expérience, de sorte que le seul moyen de déposer une bille soit une dépose par adhésion.

Pour s'assurer que la dépose est réalisée par adhésion, les déplacements de la poutre sont bloqués si la bille est saisie au bord de la poutre.

2.3.2 Méthode d'évaluation

La tâche à effectuer est une série de quatre opérations de saisie et dépose par adhésion. Celle-ci consiste à déplacer quatre billes initialement réparties sur un substrat A situé à gauche, vers un substrat B situé à droite, aux positions indiquées par les croix noires pour les trois premières billes, la quatrième étant à déposer au-dessus des trois autres.

Sept étudiants, âgés de 24 à 27 ans, ont participé à cette expérience. Ils n'avaient jamais manipulé auparavant de façon intensive une interface haptique similaire au *Virtuose 3D*.

Nous avons défini trois conditions expérimentales :

- C1. sans retour haptique ;
- C2. avec retour haptique, sans assistance ;
- C3. avec retour haptique et assistance.

La tâche est répétée trois fois de suite dans chaque condition, laquelle change aléatoirement afin de contrôler les effets d'apprentissage. Cette série de neuf essais est répétée deux fois, ce qui donne un total de 27 essais par sujet. À chaque essai, sont collectés le temps mis pour effectuer la tâche et la précision de la dépose des billes.

Au début de l'expérience, chaque sujet visionne une vidéo de la tâche. Le fonctionnement de la simulation est expliqué, en particulier les différentes forces d'adhésion entre les billes, les substrats et la poutre, et l'influence de la précharge sur la force de décollement. Par exemple, on précise au sujet que la dépose de la bille sur le substrat B nécessite d'appliquer une précharge sur la poutre plus importante que celle appliquée lors de la saisie de la bille sur le substrat A. Afin de se familiariser à manipuler l'interface haptique avant de commencer l'évaluation, chaque sujet réalise une fois la tâche dans chaque condition.

Durant l'évaluation, les sujets sont placés de façon à utiliser l'interface haptique confortablement, sans forcer sur leurs articulations. Le *Virtuose* est donc placé à une hauteur adéquate et du côté de la main dominante de chaque sujet. Pour limiter la fatigue des sujets, le retour haptique est limité à 4 N.

À la fin des 27 essais, les sujets sont invités à répondre à un questionnaire évaluant. Pour chaque condition, les impressions subjectives de facilité d'exécution de la tâche, de confort, de rapidité et de précision de positionnement (chacune notée sur une échelle de Likert à sept niveaux) sont relevés. Enfin, une question demande aux sujets quels phénomènes physiques analogues peuvent provoquer les retours haptiques des conditions C2 et C3. L'expérience dure 30 minutes environ par sujet.

2.3.3 Résultats

2.3.3.1 Performances

Nous avons défini trois critères de performance aux essais : le temps d'exécution, la forme de l'assemblage pyramidal et la précision de son positionnement. Le critère

2.3 Étude pilote sur une tâche de saisie et dépose par adhésion

de forme est basé sur le rapport de la moyenne des distances des trois billes de la base pyramidale à son barycentre sur la distance minimum. L'assemblage est considéré comme réussi si les quatre billes se touchent ; dans ce cas, le critère vaut 0 si les trois billes de la base se touchent et augmente jusqu'à 1 si la pyramide est écrasée. Dans le cas contraire, une pénalité de 1 est ajoutée au critère. Le critère de positionnement est basé sur la distance entre la projection du barycentre de la pyramide et le barycentre des indices de dépôts ; il vaut 0 si cette distance est nulle et augmente de 1 pour 10 μm d'écart. Les résultats à ces trois critères sont reportés dans le tableau 2.2.

TAB. 2.2 – Moyennes et écarts-types des performances obtenues pour la tâche de saisie et dépose par adhésion, en fonction des trois conditions expérimentales

Mesure	Sans haptique	Haptique	Hapt. & Assist.	ANOVA
Temps	40,8 (17,3)	39,1 (17,8)	38,3 (16,4)	$F(2,186) = 0,37$, n.s.
Forme	0,12 (0,17)	0,14 (0,24)	0,17 (0,23)	$F(2,186) = 0,67$, n.s.
Position	0,43 (0,27)	0,42 (0,40)	0,39 (0,25)	$F(2,186) = 0,23$, n.s.

En moyenne, les sujets ont mis à peu près le même temps quelle que soit la condition, puisque le gain de temps est de 4 % avec le retour haptique (C2) et de 6 % avec le retour et l'assistance haptique (C3). Cependant, la variabilité du temps entre les essais est bien plus grande que ces différences. L'analyse de la variance (ANOVA) calculée sur le temps ne donne aucun effet significatif pour la condition expérimentale. La tâche est donc réalisée en moyenne avec le même temps quelle que soit la condition.

De même, la précision de la forme pyramidale est très variable entre les essais. En moyenne, la meilleure précision fut obtenue avec la condition sans haptique, mais cette différence n'est pas significative d'après l'ANOVA. Cette tendance en faveur de la condition sans retour haptique peut s'expliquer par l'effet de la précharge lors de la dépose. En effet, pour déposer une bille sur le substrat de dépôt, la poutre doit appliquer sur celle-ci un effort suffisant (supérieur à la force de décollement poutre–bille). Le rendu haptique de cet effort a perturbé le positionnement précis de la bille sur le substrat. Enfin, la précision de positionnement est en moyenne très similaire suivant les conditions. L'ANOVA ne montre aucun effet significatif pour la condition expérimentale.

Ces résultats suggèrent qu'aucune des trois conditions n'a influencé plus qu'une autre les performances en temps d'exécution et en précision dans cette expérience. Les hypothèses de meilleures performances dans les conditions avec haptique et avec assistance (C2 et C3) ne sont pas validées.

2.3.3.2 Effet d'apprentissage

Pour déterminer s'il y a eu un effet d'apprentissage significatif, nous comparons les moyennes des performances obtenues par l'ensemble des sujets aux trois séries successives de neuf essais. Le tableau 2.3 page suivante donne les résultats et les ANOVA associées.

Les sujets ont amélioré leur temps moyen au fur et à mesure des essais puisqu'ils ont mis en moyenne 15 s de moins, soit 32 %, pour effectuer les neufs derniers essais par rapport aux neufs premiers. Cette différence est fortement significative ($p < 0,0001$).

TAB. 2.3 – Moyennes et écarts-types des performances obtenues à la tâche de saisie et dépose par adhésion, en fonction des trois séries de neuf essais

Mesure	Essais 1 à 9	Essais 10 à 18	Essais 19 à 27	ANOVA
Temps	47,5 (20,9)	38,1 (15,4)	32,5 (10,1)	$F(2,186) = 13,7, p < 0,0001$
Forme	0,16 (0,30)	0,14 (0,18)	0,12 (0,15)	$F(2,186) = 0,55, n.s.$
Position	0,39 (0,21)	0,39 (0,31)	0,47 (0,40)	$F(2,186) = 1,37, n.s.$

Les résultats sur le critère de forme montrent une amélioration entre les premiers essais et les derniers. Cependant, l'ANOVA ne montre aucun effet significatif sur ce critère. Enfin, la précision de positionnement est de plus en plus variable au fur et à mesure des essais et semble même se dégrader en moyenne lors des derniers essais. Cette différence n'est toutefois pas significative.

Ces résultats suggèrent qu'il existe un effet d'apprentissage sur le temps d'exécution de la tâche. Cette amélioration de tous les sujets au cours des 27 essais successifs peut aussi s'expliquer par plusieurs causes comme la familiarisation des sujets à l'interface haptique, l'habituatation aux retours haptiques, ou encore une meilleure « mentalisation » de la tâche.

2.3.3.3 Impressions subjectives

Le questionnaire mesure les impressions des sujets pour chacune des trois conditions pour les critères de facilité d'exécution, de confort, ainsi que de rapidité et de précision de positionnement perçues par les sujets. L'échelle de ces moyennes s'étend de 1 à 7 points; un résultat proche de 1 indique une mauvaise impression, tandis qu'un résultat proche de 7 en indique une bonne. Les résultats sont indiqués dans le tableau 2.4 et représentés graphiquement sur la figure 2.11 page suivante.

TAB. 2.4 – Moyennes des impressions subjectives pour la tâche de saisie et dépose par adhésion, en fonction des trois conditions expérimentales

Mesure	Sans haptique	Haptique	Hapt. & Assist.	ANOVA
Facilité	3,6 (1,4)	4,3 (0,7)	4,7 (1,0)	$F(2,18) = 1,71, n.s.$
Confort	4,3 (1,0)	3 (1,8)	3,7 (1,5)	$F(2,18) = 1,17, n.s.$
Rapidité	2,0 (1,8)	4,6 (0,9)	5,3 (1,4)	$F(2,18) = 9,15, p < 0,002$
Précision	2,1 (1,7)	3,7 (2,0)	4,6 (1,5)	$F(2,18) = 2,99, p < 0,076$

La tâche a semblé généralement plus facile avec le retour haptique et l'assistance, mais ce résultat n'est pas significatif. Le résultat sur le confort de manipulation n'est pas significatif non plus, mais les différences observées sur les moyennes montrent que certains sujets ont jugé les conditions avec retour haptique moins confortables, ce qui peut s'expliquer par la fatigue ressentie au bout des 27 essais. En moyenne, la condition avec l'assistance (C3) semble plus confortable que la condition sans (C2), c'est-à-dire qu'elle a tendance à diminuer la fatigue due au retour haptique.

2.3 Étude pilote sur une tâche de saisie et dépose par adhésion

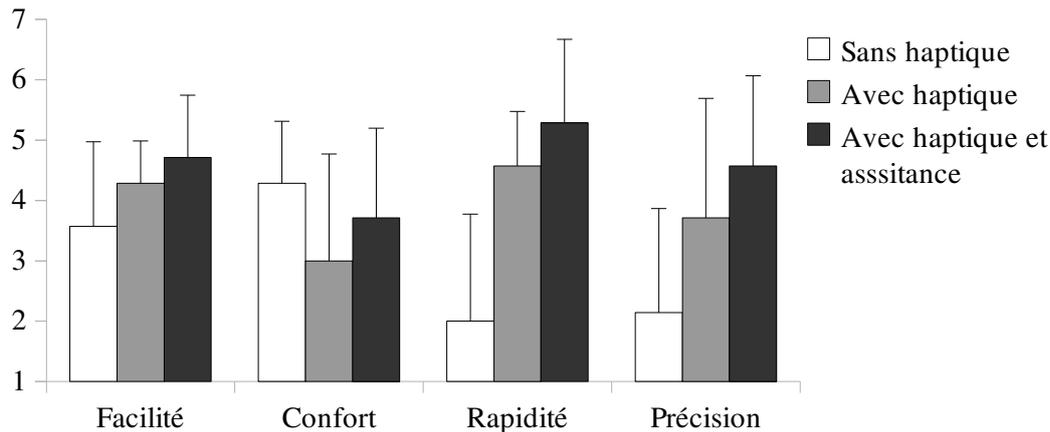


FIG. 2.11 – Moyennes pour les évaluations subjectives sur une échelle de 1 (mauvais) à 7 (bon) en fonction des conditions expérimentales.

Les sujets trouvent qu'ils sont plus rapides avec le retour haptique, et plus encore avec l'assistance haptique. L'ANOVA montre une différence significative entre les trois conditions. Des tests complémentaires entre les conditions montrent une différence significative entre la condition sans haptique et celles avec haptique ($F(1,12) = 12,8, p < 0,004$), mais pas entre les conditions haptiques avec et sans assistance.

De même, les conditions avec haptique sont celles qui ont offert significativement la meilleure impression de précision. Les ANOVA calculées entre deux conditions montrent qu'il existe une différence significative entre la condition sans haptique et celle avec haptique et assistance ($F(1,12) = 6,77, p < 0,03$).

Aux questions portant sur des phénomènes physiques associés aux rendus haptiques des conditions C2 et C3, le rendu de la condition C2 a été associé à la flexion d'une poutre ou à la compression d'un ressort, tandis que celui de la condition C3 a été associé à un ensemble combinant un aimant et une poutre en flexion ou un ressort. Seul un sujet a associé le rendu de C2 à un aimant.

2.3.4 Discussion

Les performances sont très variables entre les essais. Pour le temps d'exécution, cette variabilité peut être due à une familiarisation insuffisante avec l'interface haptique, en particulier pour maîtriser le recalage du bras haptique lorsqu'il est en butée, ou plus probablement aux restrictions/blocages imposés sur les déplacements de la poutre au contact d'une bille dans la simulation (pour contraindre à déposer la bille par adhésion).

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.

L'effet d'apprentissage a eu une certaine influence sur la stratégie gestuelle observée chez les sujets, tout au long de l'expérience. En effet, au bout d'une dizaine d'essais,

certaines sujets avaient tendance à appuyer le plus fortement possible sur la bille pour la coller ou décoller et ceci quelle que soit la condition. Ils ne se servaient donc plus des informations haptiques utiles pour connaître le seuil de niveau d'adhésion sur la bille.

Cette remarque sous-entend que la répétition de la même tâche ne semble pas adaptée à l'évaluation du rendu haptique pour cette tâche de manipulation par adhésion. En effet, une manipulation réelle est soumise à de nombreuses perturbations (en particulier des poussières, un substrat non uniformément plat) qui obligent à utiliser la mesure d'effort pour opérer. Une autre conclusion de cet effet d'apprentissage occultant la mesure d'effort est qu'il manque une restriction sur la force maximale applicable sur la poutre, qui aurait contraint l'utilisateur à se servir de la mesure d'effort et à suivre une stratégie « réaliste » par rapport à la fragilité de la poutre.

Enfin, comme évoqué dans la section 2.1.3 page 37, l'absence de plan de focalisation dans le rendu graphique facilite la manipulation basée sur le retour visuel. Ce biais conduit à une évaluation optimiste de la condition sans retour haptique.

2.4 Étude pilote sur une tâche de dépose par roulement

Le but de cette expérience est d'évaluer l'apport de l'assistance haptique décrite précédemment pour une tâche de dépose par roulement. Dans cette étude, nous nous intéressons plus au confort de manipulation qu'à la précision ou au temps d'exécution car les assistances haptiques proposées et évaluées ici visent à faciliter certaines tâches plutôt qu'à les effectuer plus précisément ou plus rapidement. La tâche demandée consiste à déplacer une bille sur un même substrat en la prenant par adhésion et en la relâchant par roulement.

2.4.1 Plate-forme expérimentale

La figure 2.12 page suivante montre deux illustrations de la scène virtuelle vue de dessus. Le point de vue fourni aux sujets durant l'expérience est, comme pour l'expérience précédente, une vue de dessus de la scène virtuelle. En revanche, la poutre reste fixe et c'est le substrat qui est déplacé. Cette configuration est plus proche de celle d'une plate-forme réelle, où déplacer le substrat est techniquement plus simple que de déplacer l'ensemble poutre et système de mesure par laser. Par ailleurs, lorsque la force appliquée sur la poutre atteint une valeur de 200 μN , un avertissement apparaît, signifiant qu'une poutre réelle aurait été cassée par l'effort appliqué.

Dans cette expérience, le seul moyen de déposer la bille est la dépose par roulement. Les valeurs numériques des seuils de transition entre les modes de glissement et de roulement utilisées pour l'expérience sont celles obtenues pour une poutre en silicium de raideur 20 N/m, des billes de $\varnothing 10 \mu\text{m}$ en cuivre et un substrat en verre. Lors de la saisie, la transition entre les glissements bille/poutre et bille/substrat est égale à la force de *pull-off* entre la bille et le substrat, soit 58 μN . Lors de la dépose, la transition entre le glissement bille/substrat et le roulement de la bille entre la poutre et le substrat est prise approximativement à 120 μN , d'après les simulations numériques décrites dans la thèse de Dionnet.

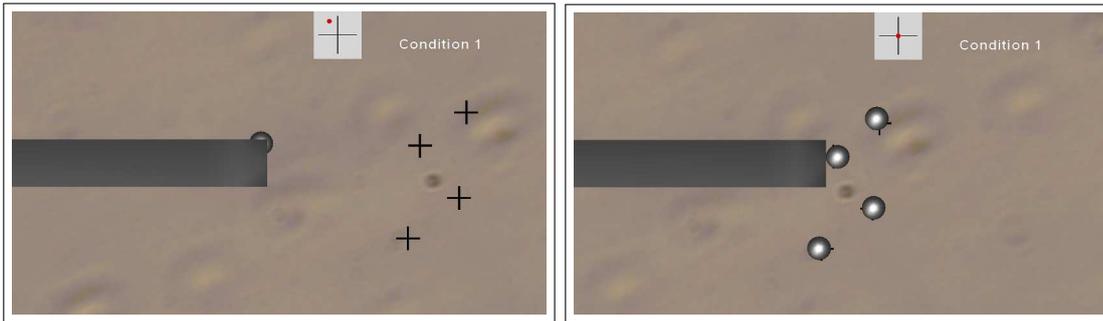


FIG. 2.12 – Vues de dessus de l’environnement virtuel pour la tâche de dépose par roulement. La caméra est fixe par rapport à la poutre et l’utilisateur déplace le substrat sous la poutre.

2.4.2 Méthode d’évaluation

La tâche à effectuer est une série de quatre opérations de saisie par adhésion et de dépose par roulement. La figure 2.12 illustre la scène virtuelle au début et à la fin de la tâche. Les billes apparaissent dans la partie haute de la scène, à gauche, et doivent être déposées aux positions indiquées par les croix noires. L’interface haptique utilisée était l’omega 3.

Cinq jeunes chercheurs ayant déjà manipulé des objets à l’échelle microscopique sous AFM et âgés de 24 à 34 ans ont participé à cette étude. Trois des participants étaient habitués à utiliser une interface haptique similaire à l’omega.3.

Les trois conditions expérimentales sont les mêmes que dans l’étude précédente. L’évaluation porte sur deux mesures objectives et un questionnaire. Les deux paramètres objectifs relevés dans chaque condition durant cette expérience sont l’effort maximal appliqué sur la poutre sans atteindre la limite fixée, et le nombre de fois où la limite fixée est atteinte, c’est-à-dire où une poutre réelle aurait été cassée. Pour cette mesure, la tâche est exécutée une fois dans chaque condition.

Le questionnaire évalue pour chaque condition la facilité de la tâche ainsi que l’assurance durant la dépose par roulement (par rapport à la limite de force applicable sur la poutre), sur une échelle de Likert à cinq niveaux. Enfin, deux questions notent l’utilité de la position de repos virtuelle décalée pour la dépose et au rendu inverse des forces d’adhésion lors du retrait de la poutre.

L’expérience dure 30 minutes environ par sujet.

2.4.3 Résultats

Les différents résultats sont représentés sur la figure 2.13 page suivante. Pour l’effort maximal, la valeur 1 correspond à la limite de force entraînant la cassure de la poutre et la valeur 0,6 à la force nécessaire pour passer en mode roulement et pouvoir déposer la bille.

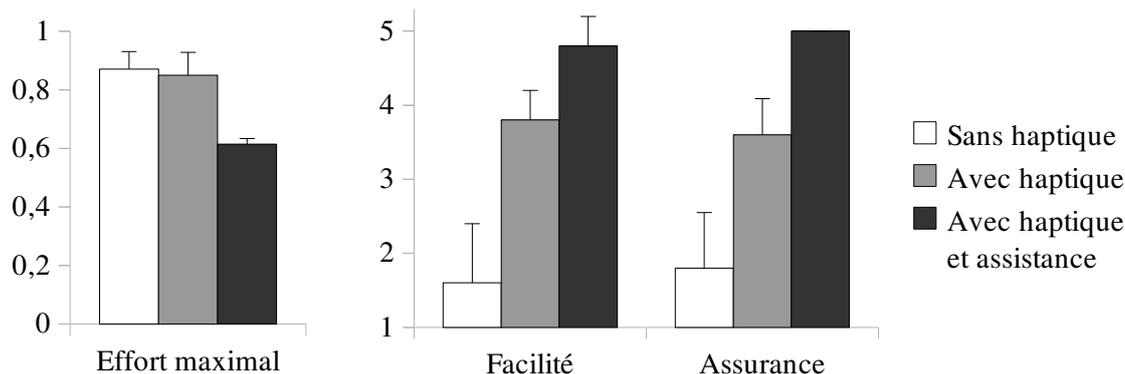


FIG. 2.13 – Moyennes de l’effort maximal appliqué sur la poutre (la valeur 1 correspond à la cassure de poutre) et moyennes des évaluations subjectives de la facilité de la tâche et de la confiance durant la dépose par roulement (5 est positif, 1 est négatif), en fonction des conditions expérimentales.

Effort appliqué La condition avec assistance haptique est en toute logique celle qui minimise l’effort appliqué sur la poutre. Sans retour haptique, l’effort appliqué était souvent assez proche de la limite. Le nombre de cassure virtuelle de la poutre est d’ailleurs en moyenne de 1,2 ($\sigma = 1,0$) dans la condition sans retour haptique alors qu’aucune cassure n’est détectée dans les conditions avec retour haptique.

Impressions subjectives On remarque que les deux évaluations subjectives sont fortement corrélées, avec un coefficient de corrélation supérieur à 0,9 entre les deux. La tâche est apparue la plus facile avec l’assistance et à un moindre degré avec l’haptique. Il en va de même avec la confiance durant la dépose.

La position de repos virtuelle décalée a été jugée très utile ($m = 4,8$, $\sigma = 0,4$). Le rendu inverse des forces d’adhésion lors du retrait de la poutre a été jugé utile en général ($m = 3,6$, $\sigma = 1,5$).

2.4.4 Discussion

La partie rendu inverse (lors du retrait) de l’assistance est moins apparente dans cette expérience, du fait que la force de décollement est bien inférieure à la force nécessaire pour le mode de roulement. Cette assistance ne trouve ainsi pas totalement son expression dans ce contexte. Comme l’ont fait remarquer plusieurs sujets, le rendu inverse peut être utile pour une tâche où l’on souhaite décoller la poutre sans avoir besoin de contrôler l’effort de retrait.

D’après les commentaires des sujets, la position de repos virtuelle est utile lors de la dépose car l’utilisateur n’a pas besoin de chercher la force nécessaire pour faire rouler la bille. Cette condition suppose toutefois, pour une utilisation réelle, que le seuil de force fixé dans l’assistance haptique puisse être réglé auparavant en fonction des matériaux utilisés.

2.5 Conclusion

Ce chapitre aborde un problème crucial pour le développement de la téléopération aux échelles micro et nanoscopique : comment développer des assistances pour aider l'utilisateur à interpréter des stratégies complexes mises en œuvre à cause des phénomènes physiques mis en jeu et comment évaluer ces assistances du point de vue utilisateur ?

Pour répondre à cette problématique, un simulateur a été défini. Il permet de simuler les phénomènes physiques mesurés et les tâches développées sur la plate-forme de l'ISIR. Cet outil est générique à la fois pour ce chapitre mais aussi pour le suivant, l'évaluation de l'haptique dans le cadre d'une expérience pédagogique en nanosciences. À partir de cette plate-forme, des assistances haptiques ont été implémentées et testées d'un point de vue utilisateur. Les premiers résultats sont encourageants et montrent que ces assistances pourraient jouer un rôle majeur dans le développement des systèmes de téléopération à ces échelles.

Chapitre 3

Retour haptique pour la compréhension des phénomènes nanophysiques

Le précédent chapitre s'est intéressé au développement d'une plate-forme de simulation physique dédiée pour des tests utilisateurs en perception haptique. Les premières études se sont intéressées à des expériences pilotes autour de la micromanipulation par adhésion et par roulement, expériences effectuées en mode manuel sur notre plate-forme robotisée. Des assistances haptiques ont été proposées pour aider l'utilisateur à manipuler à partir de ces stratégies non conventionnelles dans le micromonde.

Ce chapitre est dédié à une expérience pédagogique pour comprendre les phénomènes physiques mis en jeu par un microscope à force atomique. Notre étude s'intéresse au processus de toucher dans le nanomonde (le phénomène 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.

La première partie reprend les éléments principaux de la plate-forme expérimentale générique, décrite au chapitre précédent, en la particularisant à notre problème, le phénomène AR. Puis les expériences utilisateurs sont décrites en détail pour chercher à appréhender l'intérêt de ce genre d'expériences. Les résultats sont analysés par des méthodes statistiques globales dans une troisième partie. Une discussion générale et une conclusion complètent ce chapitre.

3.1 Plate-forme d'évaluation des phénomènes nanophysiques

3.1.1 Description du système expérimental

Le système expérimental, décrit dans le précédent chapitre, est appliqué à notre étude sur le phénomène AR. La figure 3.1 page suivante rappelle les différents éléments du système, puis nous indiquons les valeurs numériques utilisées.

3.1.1.1 Simulation physique

L'expérience utilise deux des simulations présentées dans la section 2.1.2 page 31 : celle avec les forces de Van der Waals seules et celle avec les forces électrostatiques seules.

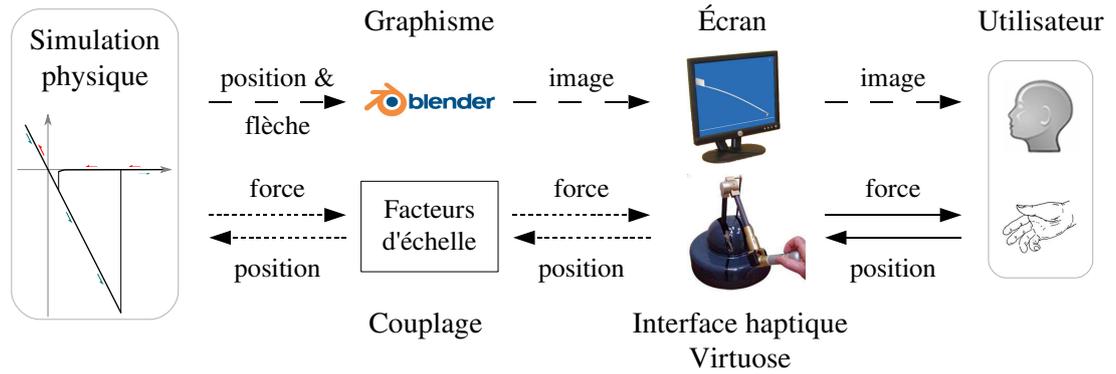


FIG. 3.1 – Vue globale du système expérimental. Le rendu graphique est rafraîchi à 30 Hz tandis que la simulation physique et le rendu haptique sont exécutés à 1 kHz. De même, les fréquences de communication, indiquées par le trait des flèches, sont adaptées : — 30 Hz, ---- 1 kHz, ——— instantanée.

L'algorithme calculant la flexion de la poutre a été codé en C et exécuté à une fréquence de 1 kHz sur un PC Pentium 4 cadencé à 3,2 GHz.

Les valeurs numériques utilisées sont celles d'une pointe en silicium avec un rayon de 10 nm en interaction avec un substrat en polymère. La couche d'eau surfacique h_w est fixée à 8 nm. La poutre choisie a une raideur $k = 0,2$ N/m (poutre souple). Pour le premier cas, le saut de contact est à $z_{si} + 2h_w = 18$ nm, soit $F_{si} = 0,13$ nN, et celui du *pull-off* à $z_{po} + 2h_w = 125$ nm, soit $F_{po} = 25$ nN. La force précédant le saut de contact est environ deux cents fois plus faible que celle au *pull-off*. Même dans l'hypothèse d'une interface haptique plus transparente, cette force serait probablement imperceptible du fait de sa portée très courte.

Dans le second cas, la tension électrique est de 25 V. La force électrostatique qui en résulte augmente la distance du saut de contact à $z_{si} + 2h_w = 50$ nm, soit $F_{si} = 2,3$ nN, ce qui est plus ou moins perceptible suivant l'interface haptique utilisée.

3.1.1.2 Rendu haptique

La simulation communique avec le contrôleur de l'interface haptique à une fréquence de 1 kHz : le contrôleur envoie la position verticale de l'interface haptique à la simulation en tant que position de la base de la poutre, et en retour, il reçoit la force à rendre à l'utilisateur. Cette force dépend de la flèche de la poutre et de sa raideur, comme expliqué dans la section 2.1.2 page 31. Les facteurs d'échelle en force et en déplacement sont constants et fixés de façon à rendre la force de décollement à 7 N et sa hauteur à 8 cm, soit respectivement $2,8 \cdot 10^8$ et $6,4 \cdot 10^5$. L'interface haptique est un Virtuose 3D10-20.

3.1.1.3 Rendu graphique

Deux représentations virtuelles sont évaluées. La figure 3.2 page suivante illustre celles-ci à différentes étapes du cycle AR. La première est une poutre, bien que sa longueur soit plus courte (dix fois) par rapport à une poutre AFM réelle, afin de visualiser la flexion de

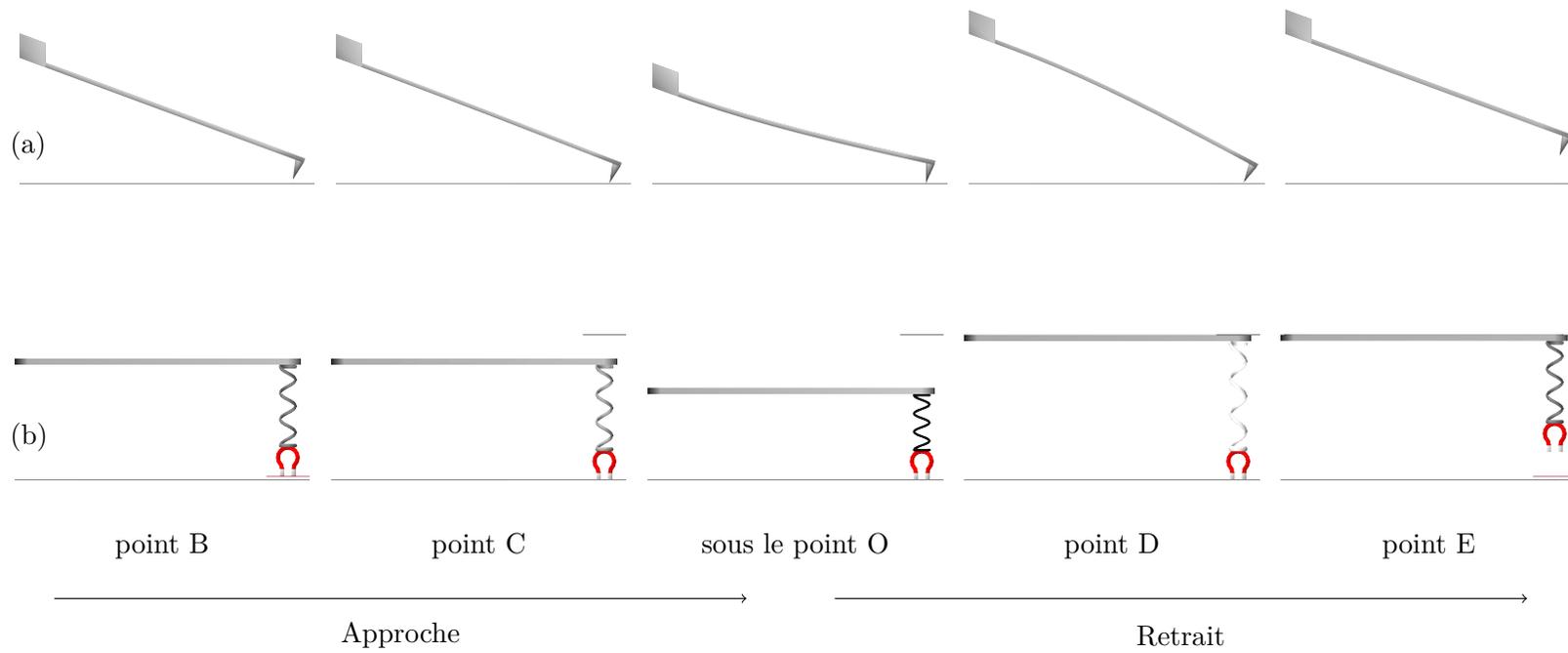


FIG. 3.2 – Représentations virtuelles de la sonde AFM, au cours des phases d'approche, de contact et de retrait : (a) Poutre, (b) Analogie aimant-ressort. Le rendu graphique est réalisé avec le logiciel libre Blender.

la poutre. Son angle de montage est de 20 degrés, comme dans un AFM conventionnel, pour éviter que la base de la poutre ne touche le substrat.

La seconde représentation contient une analogie comportementale et des aides graphiques. Un bon candidat pour l'analogie est un aimant attaché à un ressort bien amorti touchant une surface métallique. En effet, ce système à échelle humaine conjugue élasticité et force attractive décroissante, ce qui donne un comportement hystérétique. Nous faisons l'hypothèse que les comportements d'un ressort et d'un aimant sont des notions plus proches de la vie quotidienne, en tout cas connues des étudiants, et donc plus à même d'inférer un lien entre leur comportement mécanique et la courbe force-distance de l'ensemble. Toutefois, un système aimant-ressort réel aurait peu d'amortissement et donc un comportement dynamique légèrement différent. En particulier après le *pull-off*, il aurait une phase oscillante perceptible.

Cette représentation contient également deux indices visuels indiquant la hauteur des seuils de collage et de décollement, près de la pointe. L'indice de collage apparaît lors de l'approche et est situé entre l'aimant et la substrat, à la hauteur où l'aimant va se coller au substrat. L'indice de décollement, lié à la position de la base de la poutre, apparaît lors du retrait et est placé au-dessus de la barre horizontale, à la hauteur où l'aimant se détache. Enfin, la variation de couleur du ressort a pour but de faciliter la détection de son élongation durant l'approche, notamment avant le collage.

3.1.2 Système analogue aimant-ressort réel

Afin de vérifier l'utilité d'un système réel pour expérimenter l'analogie aimant-ressort, nous avons réalisé un dispositif simple, illustré sur la figure 3.3. Mesurée à l'aide d'une platine de translation micrométrique et d'un capteur d'effort montés comme indiqué sur la figure 3.4 page suivante, la courbe force-distance du dispositif montre une raideur de 0,28 N/m, ce qui est dans l'ordre de grandeur des raideurs simulées. Par ailleurs, cette courbe est assez proche de celles obtenues avec les forces électrostatiques où la déformation avant le collage semble perceptible.



FIG. 3.3 – Dispositif aimant-ressort dont le comportement est hystérétique.

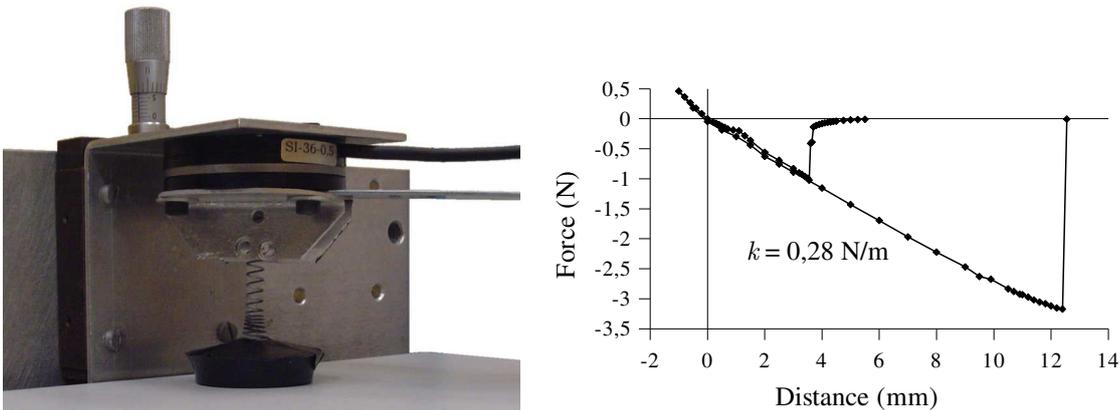


FIG. 3.4 – Banc de mesure du comportement force-distance du dispositif aimant-ressort et courbe mesurée.

3.2 Expérience

Le but de cette étude est d'explorer l'effet de l'utilisation de l'haptique et d'une analogie graphique sur la compréhension du phénomène AR par les étudiants. L'expérience est menée avec quatre conditions expérimentales (avec ou sans haptique et avec ou sans analogie). Les sujets expérimentent le comportement mécanique de la sonde AFM quand elle touche un échantillon pour ces quatre conditions.

3.2.1 Méthode

Quarante-cinq étudiants (41 hommes et 4 femmes), âgés de 20 à 30 ans (moyenne $m = 24,2$, $\sigma = 2,3$), ont participé à cette expérience. Ils n'avaient a priori pas de connaissance sur la mécanique à l'échelle nanoscopique.

La figure 3.5 page suivante schématise la procédure expérimentale, divisée en deux phases. La première est une phase de performance sur un apprentissage par l'expérience où l'on demande au sujet de tester successivement différentes simulations avec l'interface fournie et de répondre à des questions sur le phénomène AR. Un retour sur la validité de sa réponse est ensuite donné. Un plan factoriel 2×2 , soit quatre conditions expérimentales combinant deux conditions haptiques (avec haptique; sans haptique) avec deux conditions graphiques (poutre; analogie), est ainsi défini. Les participants sont assignés aléatoirement à un des quatre groupes.

La seconde phase est dédiée à l'évaluation des quatre conditions possibles, dont celle à laquelle le sujet a été exposé durant la phase de performance.

Comme illustré sur la figure 3.6 page suivante, les participants sont assis à côté du bras haptique, face à l'écran. Dans la phase de performance, les participants testent la simulation AR avec différents paramètres tels que le type de force attractive (conditions environnementales) ou la raideur de la poutre (paramètre du système AFM). Les simulations 1 à 3 utilisent les forces de Van der Waals et les raideurs respectives $k_1 = 0,2 \text{ N/m}$, $k_2 = 2k_1$ et $k_3 = k_1/2$. La simulation 4 utilise les forces électrostatiques et la même

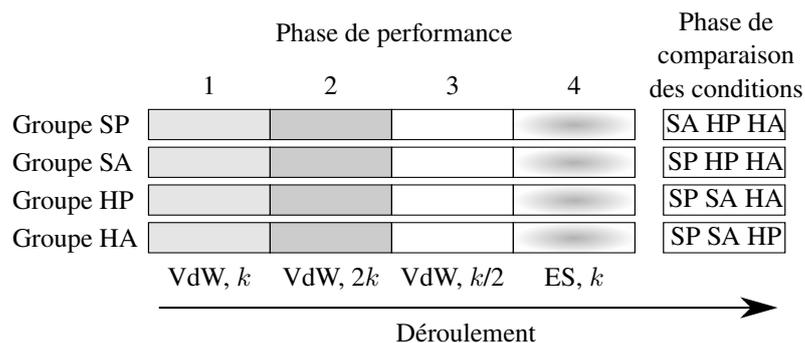


FIG. 3.5 – Schéma de la procédure expérimentale. Les conditions expérimentales des groupes sont désignées par les initiales suivantes : S sans haptique, H avec haptique, P représentation poutre, A représentation analogie. Les simulations 1 à 3 sont avec les forces de Van der Waals (VdW) et différentes valeurs de raideur (k , $2k$, $k/2$), tandis que la 4 est avec les forces électrostatiques (ES).

raideur que la simulation 1, $k_4 = k_1$. Les courbes force-distance correspondantes sont tracées sur la figure 3.7 page ci-contre.

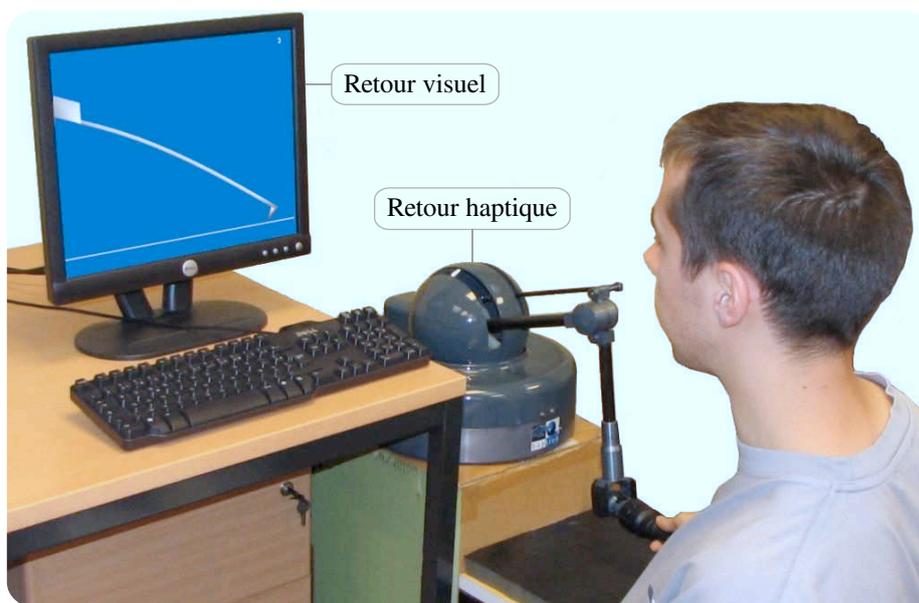


FIG. 3.6 – Vue de la plate-forme expérimentale.

Le temps n'est pas limité. Les sujets ont pour consigne de tester la simulation aussi longtemps que nécessaire pour avoir une représentation claire du comportement de la simulation. À chaque fois qu'ils estiment avoir fini d'étudier la simulation, leur compréhension du phénomène est évaluée.

Pour la simulation 1, cette évaluation se base sur plusieurs données complémentaires (explications écrites, dessin de courbe et choix de courbe) afin d'obtenir une vue détaillée de leur exposition initiale à la simulation AR. Ainsi, les sujets ont pour consigne :

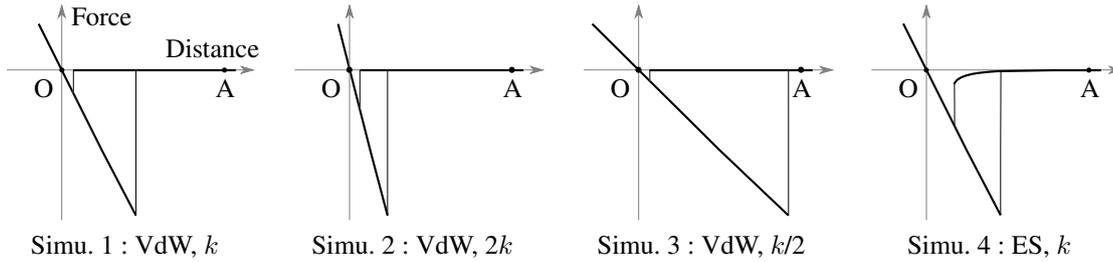


FIG. 3.7 – Courbes force-distance des quatre simulations.

- d’expliquer par écrit ce qu’ils ont compris du phénomène AR ;
- de dessiner sur papier le profil de la courbe force-distance testée ;
- de choisir la bonne courbe force-distance parmi une liste de huit courbes.

Le dessin et le choix de courbe ont pour but de quantifier à quel point le sujet associe le comportement de la poutre (mémorisé visuellement et/ou haptiquement) à la courbe force-distance (hystérésis + pente linéaire). La figure 3.8 page suivante montre la liste des courbes proposées au choix 1. Les courbes incorrectes se démarquent par une caractéristique différente, telle qu’une élasticité non-linéaire, l’absence de seuil instable, ou une répulsion durant l’approche.

La figure 3.9 page 63 tente de représenter graphiquement le cheminement des connaissances au début de l’expérience. Entre la simulation et l’apprenant, on peut définir trois principaux concepts à découvrir :

- la séquentialité (S), ou la différence de comportement entre l’approche et le retrait ;
- la linéarité de l’élasticité (L) ;
- la force attractive décroissante (F).

Le retour haptique et la représentation par analogie ont pour objectif de mieux faire émerger ces concepts, d’où le plan factoriel 2×2 pour étudier l’apport des différentes conditions expérimentales augmentées (.HP, .SA et .HA). Les mesures doivent permettre de vérifier la découverte et l’assimilation des concepts en fonction des conditions.

L’évaluation sur les autres simulations, basées sur la comparaison de deux simulations où un paramètre varie, est plus courte. Les sujets ont pour consigne de :

- décrire les différences perçues par rapport à la simulation 1 ;
- deviner le paramètre modifié ;
- choisir la bonne courbe force-distance parmi une liste de neuf courbes.

Pour faciliter la comparaison, les sujets peuvent tester à nouveau la simulation 1 autant de fois qu’ils le veulent. Après chaque choix de courbe, la bonne réponse est donnée et, spécialement après le premier, une explication sur les forces en jeu dans la simulation est fournie. Les figures 3.10 et 3.11 page 64 représentent graphiquement le protocole utilisé sur les simulations 2 à 4.

Dans la seconde phase, les sujets doivent tester les quatre conditions expérimentales, dans un ordre aléatoire, puis remplir un questionnaire subjectif évaluant chaque condition sur une échelle de Likert à 7 niveaux, de 1 (très mauvais) à 7 (très bon), en termes de *compréhension* du phénomène AR, de *perception* des forces et d’*appréciation* globale.

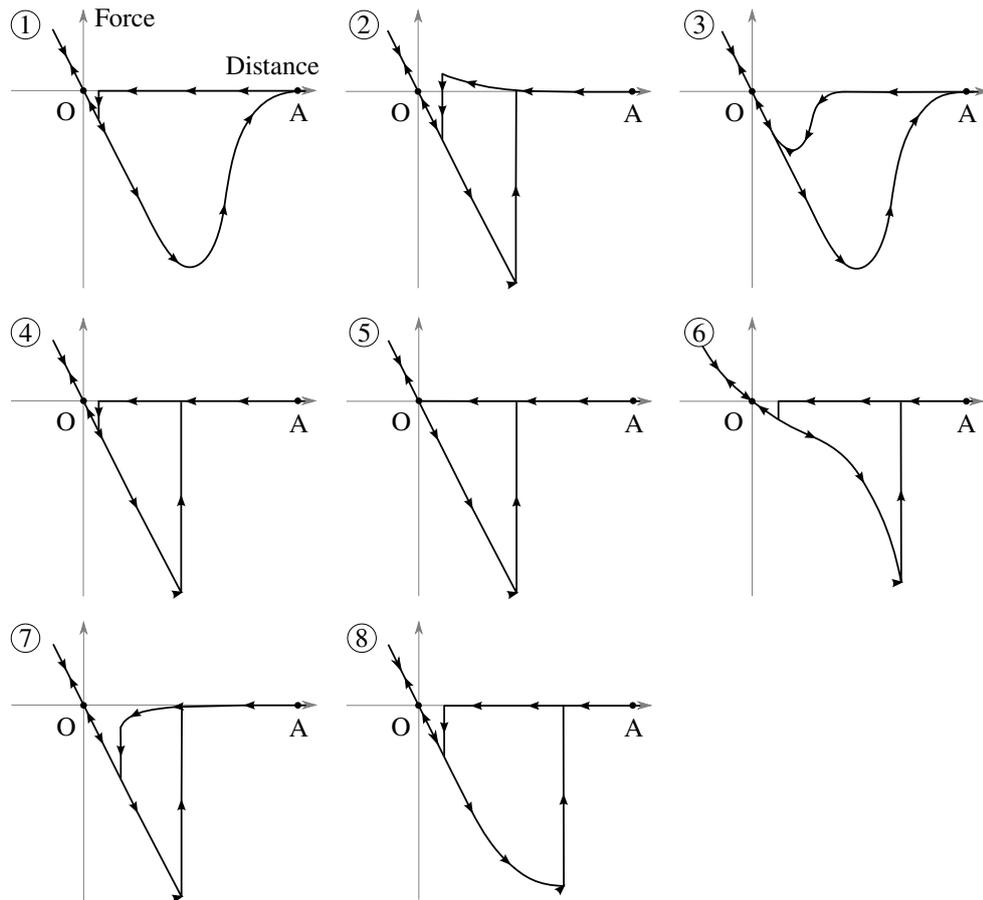
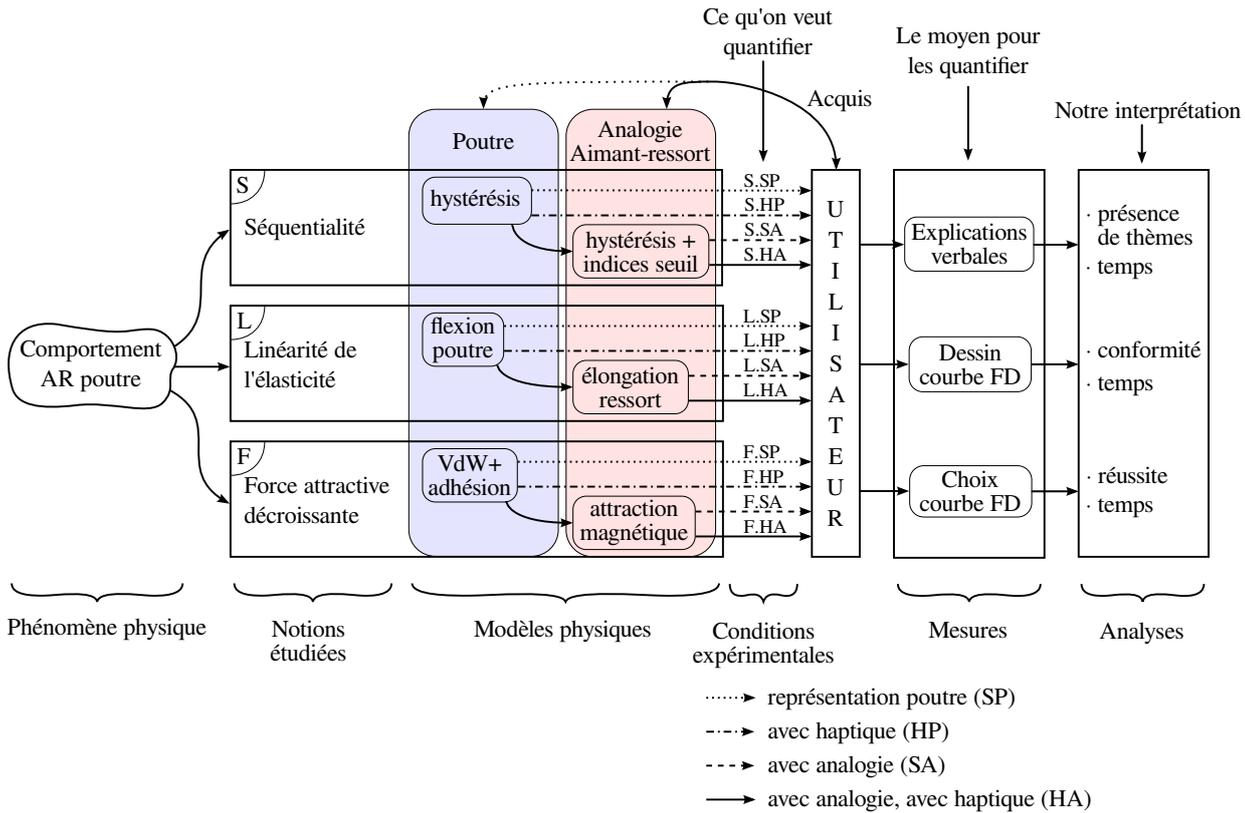
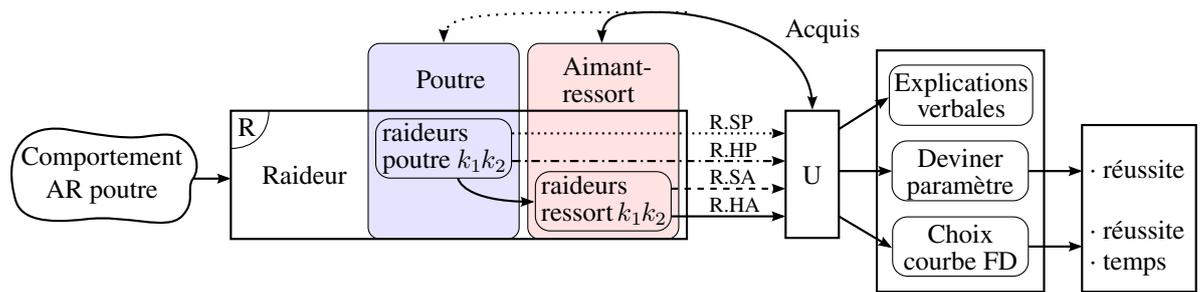


FIG. 3.8 – Courbes force-distance proposées au choix 1. La courbe correcte est la 4.



Param	Transmission de l'information
.Cond	
S.SP	découvre et mémorise visuellement la séquence observée
S.HP	découvre et mémorise visuellement et haptiquement + facilite la différenciation des forces aux seuils
S.SA	connaît (acquis a priori) et vérifie la séquence + facilite la différenciation des distances des seuils
S.HA	connaît (acquis a priori) et vérifie la séquence + facilite la différenciation des distances des seuils et leur force
L.SP	non transmise (sauf acquis sur la théorie des poutres)
L.HP	haptiquement
L.SA	par acquis sur l'élasticité d'un ressort standard (a priori)
L.HA	haptiquement et par acquis (a priori)
F.SP	présence déduite visuellement
F.HP	présence déduite visuellement et ressentie haptiquement
F.SA	connaît (acquis a priori) et vérifie visuellement l'effet de cette force
F.HA	connaît (acquis a priori) et vérifie visuellement et haptiquement l'effet

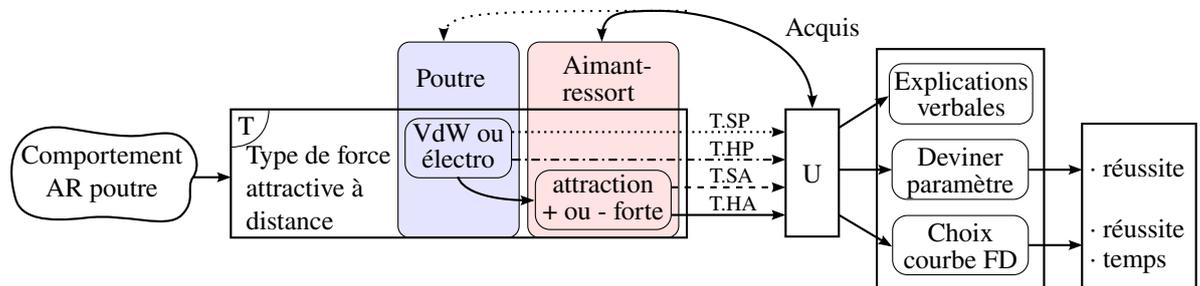
FIG. 3.9 – Flux d'informations durant la simulation 1.



Param	Transmission de l'information
.Cond	
R.SP*	visuellement (amplitude de déformation et position des seuils)
R.HP	visuellement et haptiquement
R.SA*	visuellement
	+ facilite la comparaison visuelle des positions des seuils (indices visuels)
R.HA	visuellement et haptiquement
	+ facilite la comparaison visuelle des positions des seuils (indices visuels)

* Remarque : sans haptique, l'effet du paramètre *raideur* n'est pas différentiable de celui de l'amplitude des forces d'attraction et d'adhésion

FIG. 3.10 – Flux d'informations durant les simulations 2 et 3.



Param	Transmission de l'information
.Cond	
T.SP	visuellement (hauteur du saut de contact)
T.HP	visuellement et haptiquement
T.SA	visuellement
	+ facilite la comparaison visuelle du saut de contact (indices visuels)
T.HA	visuellement et haptiquement
	+ facilite la comparaison visuelle du saut de contact (indices visuels)

FIG. 3.11 – Flux d'informations durant la simulation 4.

Enfin, les sujets doivent classer les conditions en ordre de préférence dans l'optique de les utiliser pour expliquer le phénomène AR.

Le temps total de l'expérience est en moyenne de 55 minutes ($t_{\min} = 35$, $t_{\max} = 95$, $\sigma = 12$) par sujet.

3.2.2 Résultats

3.2.2.1 Identification de courbe

Résultats globaux Les résultats globaux à l'identification de courbe sont donnés à la figure 3.12. La réussite au premier choix de courbe est assez faible (36 %) et celles aux choix 2 et 3 sont meilleures (respectivement 82 % et 91 %). Ainsi, seulement un tiers des sujets ont identifié la bonne courbe la première fois alors que presque tous ont réussi la troisième fois. Le niveau de compréhension, mesuré avec la réussite au choix de courbe, montre une forte corrélation avec les différentes simulations ($V^2 = 0,28$)¹, ce qui peut se voir comme un effet d'apprentissage entre les simulations 1 et 3. Ce test est statistiquement significatif ($\chi^2 = 37,9$, $DoF = 2$, $p < 0,0001$). Cette augmentation de la réussite paraît logique car les sujets ont un retour d'information après chaque choix de courbe.

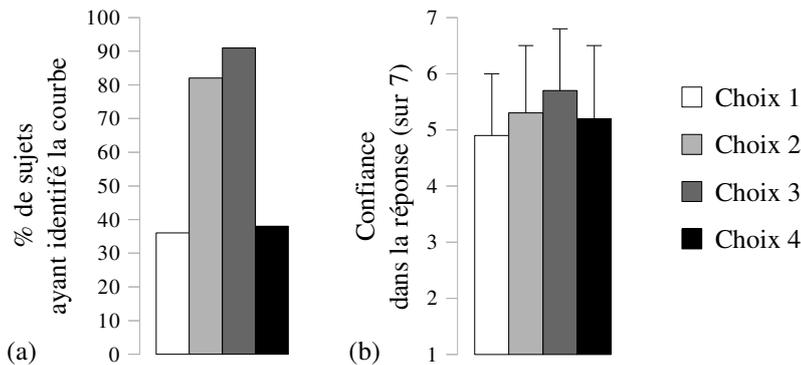


FIG. 3.12 – Résultats globaux sur les identifications de courbe : (a) taux de réussite et (b) confiance des sujets dans leur choix, sur 7 ; les barres d'erreurs indiquent l'écart type de la moyenne pour chaque choix.

La simulation 4, avec les forces électrostatiques durant l'approche, donne une chute significative de la réussite au choix (38 %), à un niveau similaire à celui obtenu au choix 1 alors qu'on peut s'attendre à un résultat supérieur. En fait, les sujets ont hésité principalement entre deux courbes, illustrées sur la figure 3.13c page 67 : la bonne courbe 1, choisie par 17 sujets, et la courbe 7, choisie par 24 sujets. Cette dernière comporte, comme dans la bonne courbe, un saut de contact plus loin que celui de la simulation 1, mais la raideur de la poutre est double, comme dans la simulation 2, et donc le saut de décollement est plus proche de la surface. D'après les commentaires des sujets, ceux-ci

1. Le V de Cramér mesure la force d'une association entre deux variables nominales dans une population. Il est calculé à partir du χ^2 , tel que $V^2 = \chi^2 / (n(k-1))$ où n est la taille de la population et k la plus petite dimension du tableau. Il standardise le χ^2 par rapport à la taille de la population étudiée pour tous les tableaux. Par convention, il est considéré faible quand $V^2 < 0,04$ et fort quand $V^2 > 0,16$.

n'ont pas perçu la déformation de la poutre avant le saut de contact. Certains ont focalisé leur attention sur la partie approche du comportement et ont choisi dans la liste proposée l'autre courbe qui a un saut de contact plus loin (courbe 7), sans faire attention à la hauteur de décollement ou à la raideur. Les autres ont hésité entre une courbe dont la raideur semble plus grande et le décollement plus proche et une courbe avec une attraction qu'ils ne perçoivent pas. Ceux-là ont finalement choisi par élimination une de ces deux courbes.

Effets des assistances graphique et haptique Les résultats aux choix de la courbe en fonction de la représentation graphique et du retour haptique sont fournis dans le tableau 3.1. Pour le premier choix, les résultats montrent une corrélation intermédiaire entre la représentation graphique et la réussite au choix ($V^2 = 0,087$) et une corrélation faible entre le retour haptique et la réussite au choix ($V^2 = 0,006$). Comme la moitié des sujets (50 %) ont réussi dans la condition Analogie alors que moins d'un quart ont réussi, les taux de liaison² montrent de même que les identifications réussies furent attirées par la représentation Analogie ($t = 0,41$) et repoussées par la représentation Poutre ($t = -0,39$). Des tests supplémentaires montrent un effet marginalement significatif pour la représentation graphique (test exact de Fisher, $p = 0,065$) et pas d'effet significatif pour l'haptique (test exact de Fisher, $p = 0,758$).

TAB. 3.1 – Nombre d'identifications correctes et incorrectes en fonction des assistances graphique et haptique fournies aux sujets

Choix	Courbe	Analogie	Poutre	Haptique	Sans haptique
1	Correcte	11	5	7	9
	Incorrecte	11	18	15	14
2 & 3	Correcte	38 (18+20)	40 (19+21)	42 (21+21)	36 (16+20)
	Incorrecte	6 (4+2)	6 (4+2)	2 (1+1)	10 (7+3)
4	Correcte	11	6	11	6
	Incorrecte	11	17	11	17

Pour les simulations 2 et 3 comparant les simulations avec différentes raideurs de poutre, les résultats des deux choix sont traités ensemble. Contrairement au premier choix, on observe une corrélation intermédiaire entre le retour haptique et la réussite au choix ($V = 0,058$) et une très faible corrélation entre la représentation graphique et la réussite au choix ($V = 0$). Les taux de liaison montrent essentiellement que les identifications incorrectes furent repoussées par les conditions avec haptique ($t = -0,65$) et attirées par celles sans haptique ($t = 0,60$). Des tests supplémentaires montrent un effet significatif pour l'haptique (test exact de Fisher, $p = 0,029$) mais pas d'effet significatif pour la représentation graphique (test exact de Fisher, $p = 1$).

2. Le taux de liaison mesure l'association locale entre deux variables nominales [Rouanet et coll. 1987]. Il compare la fréquence observée f_{ab} entre deux modalités a et b avec celle attendue sous l'hypothèse d'indépendance $\widehat{f_{ab}}$, tel que $t_{ab} = f_{ab}/\widehat{f_{ab}} - 1$ où t_{ab} est le taux de liaison entre a et b . Le signe de t_{ab} indique une attraction (cas $t_{ab} > 0$) ou une répulsion (cas $t_{ab} < 0$) entre a et b . Par convention, seuls les taux de liaison de valeur absolue supérieure à 0,25 sont donnés.

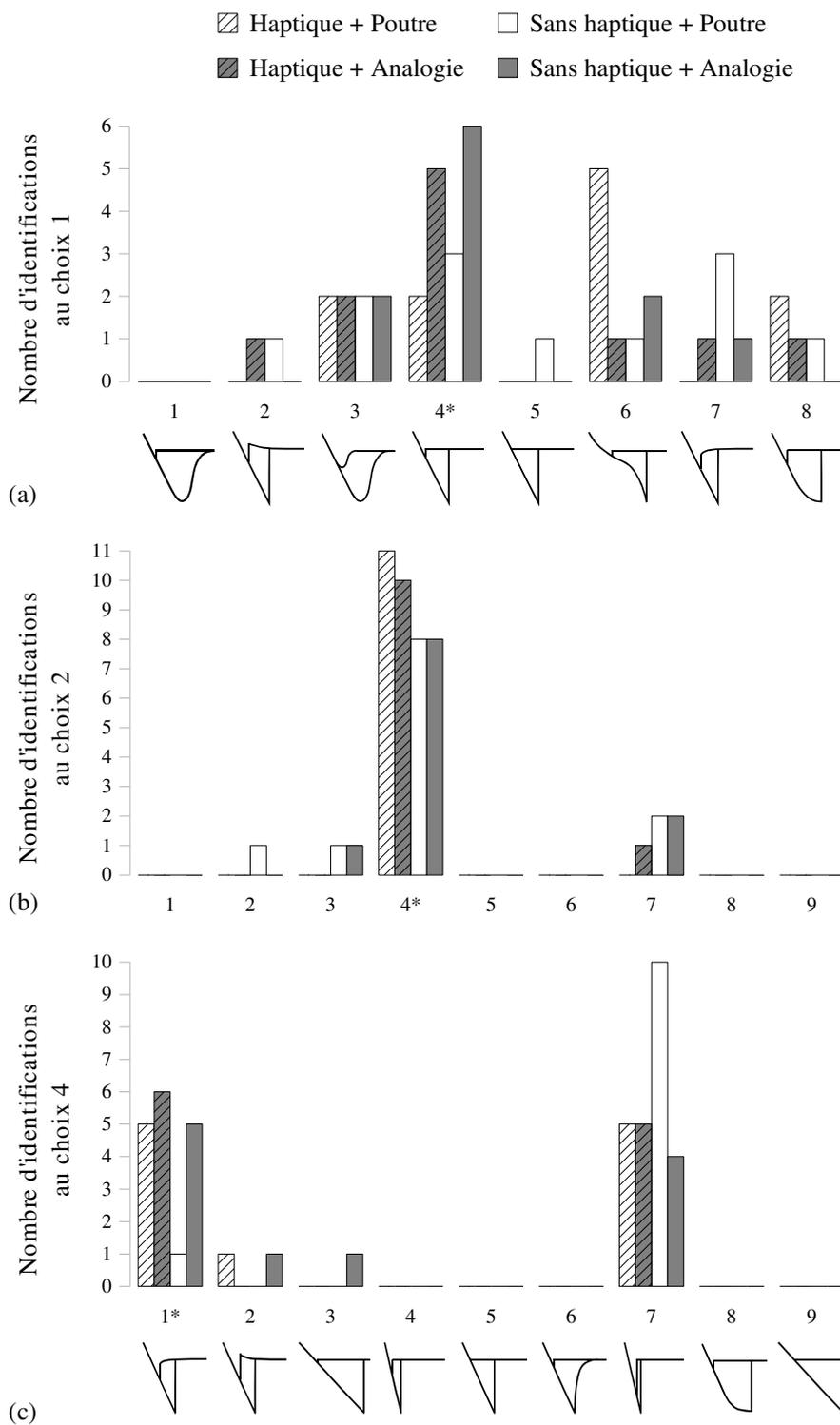


FIG. 3.13 – Nombre d'identifications aux choix 1, 2 et 4 en fonction des quatre conditions expérimentales. L'étoile * indique la bonne réponse.

Pour la simulation 4 avec les forces électrostatiques, on observe une corrélation intermédiaire entre le retour haptique et la réussite au choix ($V^2 = 0,06$) ainsi qu'entre la représentation graphique et la réussite ($V^2 = 0,06$). Les taux de liaison soulignent principalement que les identifications réussies furent attirées par les conditions avec haptique ($t = 0,32$) et repoussées par les conditions sans haptique ($t = -0,31$). On trouve le même motif pour la représentation graphique, avec une association positive entre la représentation Analogie et la réussite au choix ($t = 0,32$) et une association négative entre la représentation Poutre et la réussite ($t = -0,31$). Cependant, des tests supplémentaires ne montrent pas d'effet significatif pour l'haptique (test exact de Fisher, $p = 0,23$) ou pour la représentation graphique (test exact de Fisher, $p = 0,23$).

Par ailleurs, comme le montre la figure 3.12b page 65, les sujets étaient plutôt confiants dans leur réponse ; en moyenne, entre 5 et 6 sur une échelle de Likert à 7 niveaux allant de 1 (peu confiant) à 7 (très confiant). D'autre part, les questions aux simulations 2 à 4, où le sujet doit deviner quel paramètre varie, n'a pas donné de différence significative entre les conditions.

Synthèse Ce premier ensemble de résultats suggère que durant l'exposition initiale au phénomène AR, l'analogie aimant-ressort peut aider à lier le phénomène à sa courbe force-distance tandis que l'information haptique ne montre pas de preuve de contribution à la compréhension. Avec les réponses au choix précédent et l'exploration de cas supplémentaires, le niveau de compréhension augmente de manière significative avec un net effet d'apprentissage.

Durant cette seconde phase explorant l'effet de la raideur de la poutre sur la courbe, les sujets avec retour haptique sont significativement meilleurs que ceux sans haptique. En parallèle, le type de représentation graphique semble ne pas avoir affecté le choix des sujets. Le changement des forces d'attraction à la simulation 4 entraîne une chute du taux d'identification. Les tendances suggèrent que le retour haptique et la représentation Analogie peuvent avoir un effet dans cette identification dans la mesure où les sujets échouent presque tous dans la condition sans haptique avec représentation Poutre. Toutefois, ces derniers résultats méritent d'autres investigations.

3.2.2.2 Temps

Résultats globaux Le temps total passé par les sujets durant l'expérience est notre premier critère d'analyse. Nous avons appliqué une ANOVA à deux facteurs sur le temps passé pour compléter toute la partie expérimentale de l'étude, avec les assistances graphique et haptique comme facteurs inter-sujet combinés. On trouve un effet principal significatif pour l'haptique ($F(1,41) = 4,24$, $p < 0,046$), mais pas d'effet significatif pour la représentation graphique ($F(1,41) = 0,06$, n.s.), ni pour l'interaction entre les deux facteurs ($F(1,41) = 0,02$, n.s.). Comme le montre la figure 3.14a ci-dessous et le tableau 3.2 page ci-contre, les groupes avec retour haptique ont été 15 % plus longs que les groupes sans. En comparaison, les sujets ont pris presque le même temps quelle que soit la représentation graphique.

Le temps total passé par les sujets à chaque identification de courbe est notre second critère d'analyse. Comme affiché sur la figure 3.14b, les sujets ont mis plus de temps lors du premier choix ($m = 169$ s, soit environ 3 minutes) que lors des suivants (respec-

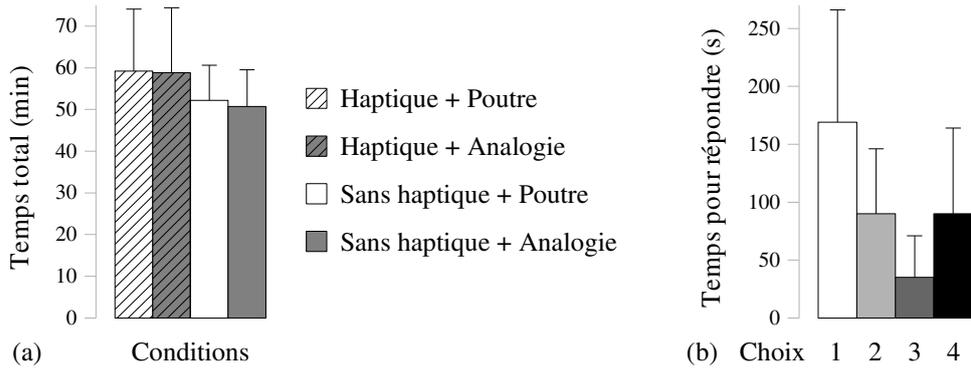


FIG. 3.14 – Résultats globaux sur les temps : (a) Temps total de l'expérience en minutes et (b) Temps passé à choisir la courbe pour chaque simulation.

tivement 90, 35 et 90 s). Les durées sont significativement différentes entre les choix 1 et 2 (test t apparié, $t = 5,82$, $ddl = 44$, $p < .0001$) ainsi qu'entre les choix 2 et 3 (test t apparié, $t = 8,62$, $ddl = 44$, $p < .0001$) puisque les sujets répondent de plus en plus vite. L'introduction des forces électrostatiques à la simulation 4 entraîne une augmentation significative du temps pris par les sujets pour répondre (test t apparié, $t = 4,42$, $ddl = 44$, $p < .0001$).

TAB. 3.2 – Temps passé en moyenne par les sujets, pour dessiner la courbe (en secondes), pour choisir la courbe (en secondes) et pour toute l'expérience (en minutes), en fonction des assistances graphique et haptique

	Analogie	Poutre	Haptique	Sans haptique
Dessin	243 (151)	250 (92)	303 (133)	192 (85)
Choix 1	119 (54)	179 (106)	169 (98)	113 (46)
Choix 2	86 (53)	83 (53)	100 (57)	63 (38)
Choix 3	33 (40)	35 (34)	35 (32)	33 (41)
Choix 4	115 (66)	115 (38)	122 (58)	103 (55)
Total	55 (13)	56 (12)	59 (15)	51 (8)

Effet des assistances graphique et haptique Les analyses suivantes étudient l'effet des assistances graphique et haptique sur le temps passé par les sujets qui ont trouvé la bonne courbe (voir tableau 3.2). Pour le premier choix, les 16 sujets ayant réussi ont mis 50 % de temps en plus avec le retour haptique que sans, alors qu'ils ont mis 34 % de temps en moins avec la représentation Analogie qu'avec la représentation Poutre. L'ANOVA factorielle montre un effet principal significatif pour l'haptique ($F(1,12) = 5,27$, $p < 0,041$) et une tendance assez significative pour la représentation graphique ($F(1,12) = 4,32$, $p < 0,060$), mais pas d'interaction entre les deux facteurs ($F(1,12) = 2,73$, n.s.).

Pour le choix 2, les 37 sujets ayant réussi ont mis 59 % de temps en plus avec le retour haptique que sans, alors que le temps est similaire pour les autres représentations. L'ANOVA montre un effet principal significatif pour l'haptique ($F(1,33) = 4,81$, $p < 0,036$)

et pas d'effet significatif pour la représentation graphique ($F(1,33) = 0,07$, n.s.), ni pour l'interaction entre facteurs ($F(1,33) = 0,01$, n.s.).

Pour le choix 3, réussi par 41 sujets, ceux-ci ont mis à peu près le même temps pour chacune des conditions. La grande variabilité entre les groupes combinée à de petites différences dans les moyennes entraîne l'observation d'aucun effet significatif ni pour l'haptique ($F(1,37) = 0,03$, n.s.), ni pour la représentation graphique ($F(1,37) = 0,03$, n.s.), ni pour l'interaction entre les deux facteurs ($F(1,37) = 0,00$, n.s.).

Pour le choix 4 avec la simulation des forces électrostatiques, les 17 sujets ont mis plus de temps avec le retour haptique que sans, tandis qu'ils ont mis le même temps quelle que soit la représentation graphique. Toutefois, les tests statistiques ne montrent aucun effet significatif ni pour l'haptique ($F(1,37) = 0,02$, n.s.), ni pour la représentation graphique ($F(1,37) = 0,06$, n.s.), ni pour l'interaction entre les deux facteurs ($F(1,13) = 0,63$, n.s.).

Synthèse Ce deuxième ensemble de résultats montre à nouveau, en accord avec les résultats précédents sur l'identification, un net effet d'apprentissage entre l'exposition initiale à la simulation 1 et la simulation 3, puisque les sujets répondent de plus en plus vite. L'introduction des forces électrostatiques durant l'approche à la simulation 4 entraîne cependant un temps plus long pour effectuer son choix. Combinée avec les précédents résultats et les commentaires des sujets, cette remarque montre que l'identification avec la liste de courbes proposée est plus difficile pour cette simulation 4 et nécessite donc plus de temps. Ces résultats montrent également que les assistances graphique et haptique affectent principalement les premières phases de l'exposition. En effet, le retour haptique augmente significativement le temps passé par les sujets pour traiter l'information et choisir lors des deux premiers choix de courbe. De même, nous avons observé une tendance, à confirmer, que la représentation Analogie peut diminuer le temps de traitement et de décision des sujets lors du premier choix, ce qui suggère que l'information utile peut être exploitée plus efficacement avec la représentation Analogie qu'avec la représentation Poutre.

3.2.2.3 Analyse des dessins de courbe force-distance

Durant le premier cas de simulation avec le choix de courbe, les sujets doivent dessiner leur *propre* courbe d'après leur perception du phénomène. Nous avons étudié cette mesure de compréhension initiale en analysant l'exactitude des dessins produits par les sujets. Ces dessins ont été évalués selon les sept critères listés dans le tableau 3.3. Ces critères vérifient la présence des principaux éléments d'une courbe force-distance, telle que décrite à la section 1.1.1.2 page 5.

Les moyennes des notes obtenues sur la qualité des dessins sont reportées dans le tableau 3.4 page suivante en fonction des conditions expérimentales. Globalement, tous sujets et conditions confondus, l'exactitude des dessins fut en moyenne de 3 sur 7 ($\sigma = 2,1$). D'un côté, l'ANOVA calculée sur cet indicateur ne révèle pas d'effet principal significatif ni d'effet d'interaction. Ce résultat est dû en partie à la grande variabilité observée entre les groupes. D'un autre côté, cependant, on remarque que les sujets qui ont trouvé la bonne courbe ont également produit de meilleurs dessins ($m = 3,9$, $\sigma = 0,51$) que ceux qui ne l'ont pas trouvée ($m = 2,5$, $\sigma = 0,38$; $t(43) = -2,35$, $p < 0,012$).

TAB. 3.3 – Critères utilisés pour évaluer l’exactitude des dessins de courbe

Critère	Éléments de la courbe	Signification physique
1	A-O-A	Deux sens de parcours (hystérésis)
2	BC vertical	Saut de contact, <i>snap-in</i>
3	Passe par O	Minimum d’énergie du système
4	OD droit	Élasticité linéaire
5	OD croissante	Adhésion pointe – substrat
6	DE vertical	Saut de décollement, <i>pull-off</i>
7	BC < DE	Snap-in force < pull-off force

TAB. 3.4 – Moyennes et écarts-types de l’exactitude des dessins, sur 7, en fonction des conditions expérimentales

	Analogie	Poutre	Total
Avec haptique	3.9 (2)	3.0 (2)	3.5 (2)
Sans haptique	2.3 (2)	2.8 (2)	2.5 (2)
Total	3.1 (2)	2.9 (2)	3.0 (2)

Par ailleurs, les sujets ont mis 58 % de temps en plus avec le retour haptique (voir tableau 3.2 page 69). À l’inverse, la différence de temps entre les représentations graphiques est minime. L’ANOVA montre en toute logique un effet significatif de l’haptique ($F(1,41) = 11,7$, $p < 0,0014$) et pas d’effet significatif pour la représentation graphique ($F(1,41) = 0,05$, n.s.), ni pour l’interaction entre les facteurs ($F(1,41) = 2,77$, n.s.).

Regroupés ensemble, ces résultats suggèrent que l’apprentissage est un processus actif et incrémental. Il est affecté par plusieurs facteurs, à la fois internes et externes, et il ne peut pas être isolé en une seule étape. Nos résultats montrent que plus la conception de l’AR construite en amont est meilleure, comme on le voit sur l’exactitude du dessin, plus la probabilité d’identifier la bonne courbe ensuite est grande. Par ailleurs, ni l’haptique ni la représentation graphique n’ont eu un effet suffisant pour affecter significativement l’exactitude des dessins produits par les sujets ; bien que la représentation graphique ait eu un effet significatif sur l’identification au choix 1.

Une seconde conséquence est que, dans une étude ciblant des activités de compréhension comme celles-ci, plusieurs indicateurs sont nécessaires pour obtenir une image riche et complète des processus cognitifs impliqués dans la tâche. Les conclusions seraient différentes si les analyses avaient été restreintes à un indicateur unique.

3.2.2.4 Analyse approfondie sur le contenu des modèles mentaux

Pour aller plus loin, nous avons exploré les corrélations entre les multiples données collectées — y compris les descriptions écrites par les sujets lorsqu’ils essaient de comprendre le comportement simulé — dans le but d’esquisser le contenu et les processus liés aux modèles mentaux développés durant notre étude. Dans cette optique, nous avons

conduit une analyse en composantes principales (ACP). Cette analyse fait ressortir la structure géométrique sous-jacente d'un ensemble de données qualitatives et quantitatives partiellement corrélées. Dans notre cas, nous nous intéressons aux corrélations potentielles entre les performances des sujets, leurs descriptions verbales sur le phénomène et les conditions expérimentales. On cherche ainsi à accéder indirectement aux modèles mentaux construits par les sujets durant l'expérience.

Pour réaliser cette analyse, nous avons construit un tableau de 45 lignes (sujets) par 12 colonnes (variables). L'analyse s'est basée au départ sur les données suivantes. Les mesures de performances sont la réussite au choix de courbe des simulations 1 et 4, le temps et l'exactitude des dessins. Les explications écrites par les sujets sont codées selon la présence de mots ou d'expressions de différents thèmes utilisés pour décrire le phénomène AR. Enfin, les conditions expérimentales ajoutent deux variables qualitatives (conditions graphique et haptique).

Certains thèmes des explications n'ont pas été retenus a posteriori pour l'ACP, à cause de leur faible fréquence et/ou leur manque de pouvoir discriminant entre les sujets. L'analyse finale est basée sur les thèmes suivants : représentation poutre, analogie (regroupe l'analogie aimant-ressort ainsi que d'autres), proportionnalité (entre la force et la distance), adhésion (entre la pointe et le substrat), dynamique du *pull-off* et haptique actif (effort exercé par le sujet). Les indicateurs verbaux de ces thèmes sont résumés dans le tableau 3.5.

TAB. 3.5 – Indicateurs verbaux trouvés dans les descriptions écrites par les sujets

Catégorie	Indicateurs verbaux
Poutre	Poutre, pointe, cône
Analogie	Aimant, magnétique, ressort, capillarité
Proportionnalité	Proportionnel, linéaire
Adhésion	Adhésion, collé, fixé, retenu, scotché, attaché, ...
Dynamique	Saut, brutal, brusque, net, choc
Haptique actif	Exerce, applique, tire, forcer
Non retenus pour l'ACP	
Haptique passif	Sent, sensation, ressens, subit
Attraction	Attraction, attiré, force de rappel
Seuil	Seuil, distance, limite, ligne, certain niveau, ...
Déformation	Déforme, flexion, torsion, élongation, ...
<i>Pull-off</i>	Décolle, détache, rompu, décroche, retirer, ...

Les résultats de cette analyse sont indiqués dans le tableau 3.6 page ci-contre. Nous avons retenu quatre facteurs, ce qui correspond à 66 % de la variance expliquée et fournit un aperçu intéressant sur les corrélations entre modèles mentaux, performances et conditions. Toutes les variables sont bien explicitées par ces quatre facteurs (unicité inférieure à 0,6). Pour l'interprétation des axes, on retient les variables ayant les plus grandes contributions (valeur absolue supérieure à 0,4).

TAB. 3.6 – Analyse en composantes principales — contribution des variables aux composantes, unicité, valeurs propres et proportions pour les quatre premiers facteurs

Variable	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	Facteur 4	Unicité
Choix 1	−,19	,63	,44	−,13	,36
Choix 4	,49	−,42	−,17	−,54	,25
Temps au dessin	,74	,21	,23	,23	,31
Note au dessin	,29	,44	,53	,22	,39
Poutre	,34	−,01	−,18	,77	,26
Analogie	−,16	,73	−,13	−,02	,42
Proportionalité	−,05	,05	,77	−,32	,31
Adhésion	−,18	−,70	,09	,17	,43
Dynamique	,08	−,28	,66	−,10	,46
Haptique actif	,78	−,16	−,34	,01	,25
Condition graphique	−,03	−,21	−,15	,81	,28
Condition haptique	,76	−,07	,23	,04	,37
Valeur propre	2,27	2,00	1,84	1,80	
Proportion	,19	,17	,15	,15	

Un des intérêts des analyses factorielles comme l'ACP est qu'elle permet de représenter graphiquement les proximités statistiques entre éléments en distances euclidiennes. La figure 3.15 page suivante montre les projections des variables dans le plan des axes 1 et 2 ainsi que celui des axes 3 et 4.

Interprétation L'axe 1 (22 % de la variance expliquée) contraste d'un côté, les sujets qui ont eu tendance à réussir au choix 4, avec de l'autre côté, ceux qui ne l'ont pas réussi. Le premier groupe est principalement dans les conditions avec haptique, il a mentionné l'information kinesthésique perçue et a mis plus de temps au dessin. Cet axe ne sépare pas les sujets qui ont ou n'ont pas réussi au choix 1. Cette remarque suggère que toutes ces caractéristiques n'ont pas affecté la compréhension initiale. Cet axe peut s'interpréter comme la contribution spécifique du retour haptique, qui tend à focaliser la compréhension sur les forces — ce qui peut aider pour la simulation 4 à comparer la raideur de la poutre avec celle de la simulation 1, information plus difficile à extraire visuellement — et augmente le temps mis pour traiter l'information et la rendre compatible avec l'information visuelle.

L'axe 2 (18 %) contraste d'un côté, les sujets qui ont trouvé la bonne courbe au choix 1, qui ont produit de bons dessins mais qui ont aussi eu tendance à échouer au choix 4, avec de l'autre côté, l'opposé. Il est intéressant de remarquer que ce groupe est caractérisé par l'utilisation d'analogies pour décrire le phénomène AR. Ces analogies proviennent soit de la représentation Analogie, soit d'analogies générées spontanément par les sujets (essentiellement des analogies avec un aimant ou un ressort) pour ceux qui ont la représentation Poutre. Cette analyse suggère que la construction d'un modèle

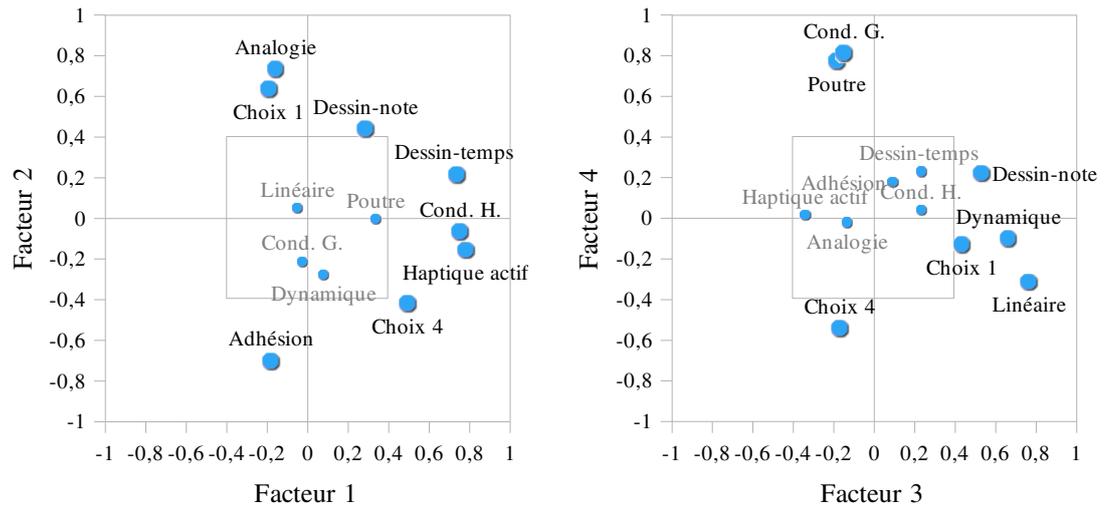


FIG. 3.15 – Représentations graphiques des variables de l’ACP en fonction des facteurs retenus. Chaque point correspondant à une variable représente l’extrémité d’un vecteur dont l’origine est à l’intersection des axes factoriels définissant le plan. La liaison, au sens statistique, entre deux variables est d’autant plus forte que l’angle formé par les deux vecteurs est petit. Un angle de 0° traduit une corrélation positive absolue des variables, de 90° une indépendance, de 180° une corrélation négative absolue.

mental pour expliquer par analogie le phénomène AR favorise la réussite au choix 1 et peut être considérée comme une stratégie possible quelle que soit la représentation graphique. Le fait que cet axe ne soit associé à aucune condition expérimentale va également dans ce sens. En termes de projection [Gentner 1983], les connaissances antérieures qui favorisent cette stratégie peuvent être la force attractive décroissante d’un aimant ou bien la courbe force-distance rectiligne d’un ressort. Par ailleurs, ce groupe de sujets n’a pas évoqué les effets d’adhésion, ce qui peut s’expliquer par l’évidence du comportement adhésif de l’aimant dans l’analogie aimant-ressort. Enfin, nous n’avons pas trouvé d’interprétation satisfaisante expliquant l’échec au choix 4.

L’axe 3 (16 %) contraste d’un côté, les sujets qui ont eu tendance à bien répondre durant la simulation 1 en trouvant la bonne courbe et en produisant des dessins justes, avec de l’autre côté, l’opposé. Ce groupe se caractérise aussi par la mention des aspects de proportionnalité et de dynamique du *pull-off*, ce qui suggère que la remarque de ces aspects favorise la réussite au dessin et au choix 1. Comme pour l’axe 2, cet axe ne montre pas de corrélation avec les conditions expérimentales. Ainsi, cette observation suggère une dimension complémentaire de la construction du modèle mental pour réussir aux premières questions de l’expérience.

L’axe 4 (11 %) contraste les sujets qui n’ont pas trouvé la bonne courbe au choix 4 avec ceux qui l’ont trouvée. Le premier groupe est principalement avec la représentation Poutre et a mentionné les termes de cette représentation (ce qui paraît logique). À l’opposé, l’autre groupe se caractérise de la même façon que la représentation Analogie et a obtenu un échec limité au choix 4.

Synthèse Ces quatre axes fournissent une vue concrète des processus cognitifs et des facteurs liés à des sujets novices (ayant un parcours scientifique) testant des simulations pour comprendre plusieurs aspects du phénomène AR. Ils complètent bien les données de performance analysées précédemment, en suggérant un cadre global pour interpréter nos ensembles de résultats.

En effet, les axes 1 et 4 représentent clairement l'effet des conditions, respectivement, haptique et graphique sur les performances et les caractéristiques des modèles mentaux. La présence du retour haptique a augmenté le temps pris pour dessiner la courbe, sans toutefois améliorer son exactitude, et a aidé les sujets à comparer la raideur de la poutre ou les positions de *pull-off* au choix 4. De même, les indices graphiques de seuil dans la représentation Analogie aident à comparer les positions de *pull-off*.

À l'opposé, les axes 2 et 3 ne sont pas associés aux facteurs expérimentaux graphique et haptique. Ces deux axes peuvent s'interpréter comme deux stratégies complémentaires, menant à mieux traduire le phénomène AR en courbe force-distance, à la fois par le dessin et par l'identification. L'axe 2 montre une première façon avec un raisonnement par analogie, qui peut provenir soit de la représentation Analogie, soit, pour quelques sujets, d'une analogie générée spontanément, présentant dans les deux cas un effet similaire sur la compréhension du phénomène AR. L'axe 3 montre un autre moyen avec la prise de conscience de l'élasticité linéaire de la poutre lorsqu'elle est au contact, ainsi que de la dynamique rapide du comportement AR — deux aspects importants de la courbe.

3.2.2.5 Préférences

Après la phase de performance, les sujets testent les autres conditions expérimentales et leur attribuent une note selon les critères de *compréhension* du phénomène AR, de *perception* des forces et d'*appréciation* globale. La figure 3.16 indiquent les scores des trois évaluations pour chaque condition et chaque critère. On remarque que les trois évaluations sont fortement corrélées, avec un coefficient de corrélation supérieur à 0,8 entre chacune des trois.

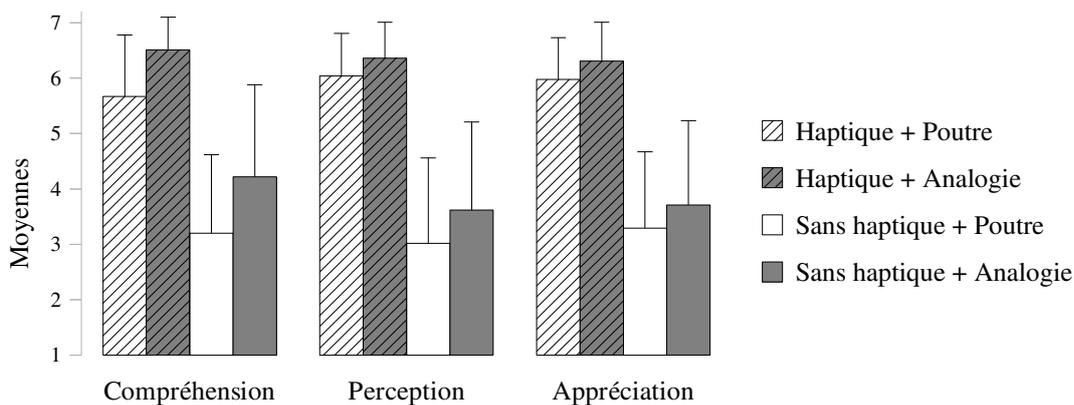


FIG. 3.16 – Moyennes pour les trois évaluations subjectives (échelle de 1 à 7).

Pour traiter ces évaluations, nous avons calculé une ANOVA multidimensionnelle sur les trois évaluations avec la condition évaluée comme facteur intra-sujets et la condition initiale (celle durant la phase de performance) comme facteur inter-sujets. L'analyse

montre que les deux facteurs ainsi que leur interaction sont significatifs : condition évaluée (Lambda de Wilks $\Lambda = 0,27$, $F(9,0; 394,4) = 31$, $p < 0,0001$), condition initiale ($\Lambda = 0,83$, $F(9,0; 394,4) = 3,48$, $p < 0,0004$) et interaction condition évaluée \times condition initiale ($\Lambda = 0,78$, $F(27,0; 473,8) = 1,59$, $p < 0,032$).

Les ANOVA individuelles calculées sur chaque évaluation sont également significatives pour les deux facteurs et leur interaction. Par exemple, nous trouvons que l'appréciation globale a été jugée la meilleure dans la condition Haptique+Analogie ($m = 6,3$), suivie par Haptique+Poutre ($m = 6,0$). La pire note a été attribuée à la condition SansHaptique+Poutre ($m = 3,3$), suivie de SansHaptique+Analogie ($m = 3,7$).

L'effet significatif pour la condition initiale suggère que les sujets ont évalué différemment les conditions selon la condition expérimentale qu'ils ont eu durant la phase de performance. La figure 3.17 page suivante illustre cet effet pour l'évaluation de l'appréciation globale. Les sujets qui ont attribué les meilleures notes étaient initialement dans la condition SansHaptique+Analogie ($m = 5,2$), alors que les sujets du groupe Haptique+Poutre ont donné des notes plus faibles ($m = 4,4$). En particulier pour les conditions sans retour haptique, celles-ci ont été clairement moins bien notées par les sujets initialement dans les conditions avec retour haptique.

Le questionnaire se termine par un classement subjectif des conditions en vue d'une utilisation éventuelle pour expliquer le phénomène AR. Les résultats sont reportés dans la figure 3.18 page ci-contre. Les conditions préférées sont celles avec retour haptique (Test exact de Fisher, $p < 0,0001$). La condition Haptique+Analogie a été la plus appréciée et SansHaptique+Poutre la moins.

Les sujets ont donc trouvé l'analogie aimant-ressort utile puisqu'ils l'utilisent pour expliquer le phénomène AR. Par ailleurs, le choix entre le second et le troisième rang est plus divisé entre l'attrait du critère pédagogique et celui du critère haptique, mais a finalement penché en faveur du critère haptique.

3.3 Discussion générale

D'après leurs préférences, les sujets sont plus influencés par la présence du retour haptique que par la représentation Analogie. Néanmoins, ils ont préféré utiliser le retour haptique et l'analogie plutôt que la représentation Poutre.

Il est intéressant de remarquer que le retour haptique et l'analogie graphique semblent affecter positivement chacun une phase différente de la compréhension : l'analogie peut avoir un effet au moment de la première exposition au phénomène alors que le retour haptique apporte une amélioration dans les phases suivantes. Cependant, les groupes avec haptique prirent plus de temps. Cette propriété est peut être due à la plus grande motivation, ou plus probablement, à la nécessité de traiter l'information supplémentaire apportée par la modalité haptique.

La représentation Analogie, bien que préférée par les sujets, a un léger effet significatif lors de la découverte du phénomène, avec une meilleure identification de la courbe force-distance et en un temps plus court. De plus, un tiers des sujets des groupes avec la représentation Poutre génère spontanément l'analogie aimant-ressort, oralement, ou

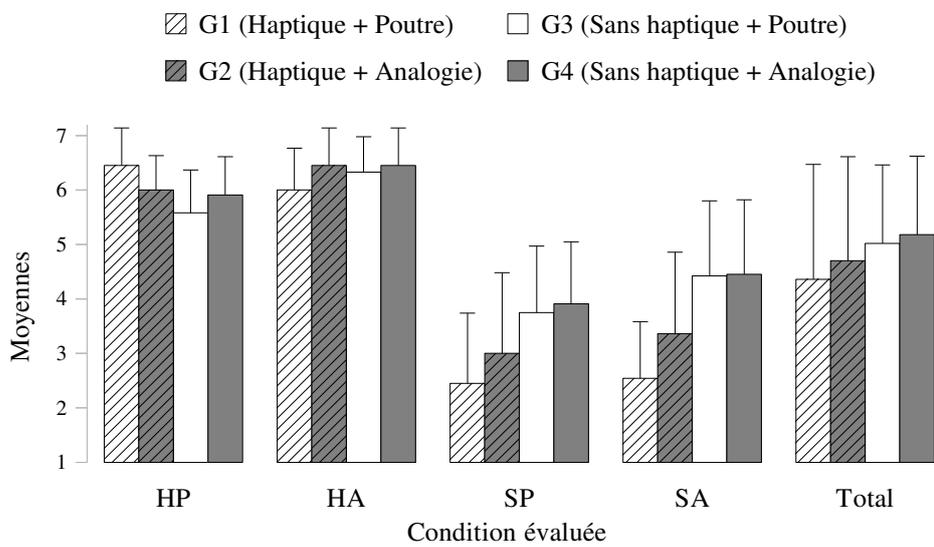


FIG. 3.17 – Moyennes des notes données à l’appréciation globale pour chaque condition et en fonction de la condition initiale des sujets.

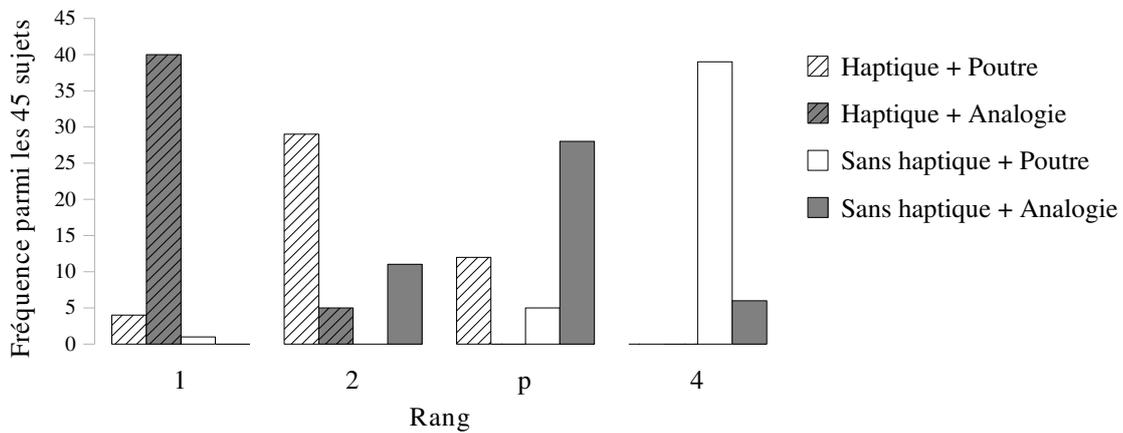


FIG. 3.18 – Ordre de préférence des conditions (fréquence parmi les 45 sujets) pour expliquer le phénomène AR.

par écrit. Ces sujets obtiennent un niveau d'identification correcte similaire à celui des sujets qui ont la représentation Analogie, c'est-à-dire 50 %, soit deux fois plus que sans raisonnement analogique. L'ACP a aussi montré que les sujets qui ont vu ou pensé à l'analogie ont produit de meilleurs dessins. Cela suggère que notre analogie peut être utile pour expliquer aux apprenants le phénomène AR, ou du moins le lien avec sa courbe force-distance.

Ce résultat est en accord avec les études de [Podolefsky et Finkelstein \[2006\]](#), qui suggèrent que les analogies peuvent améliorer l'apprentissage de la physique dans les cours d'introduction, notamment ceux devant beaucoup d'étudiants en amphithéâtre. Leurs études ont montré que « les représentations jouent un rôle clé en tant que mécanisme de l'utilisation d'une analogie. Les représentations semblent focaliser les étudiants sur des caractéristiques particulières des phénomènes physiques. » Dans notre cas, la représentation aimant-ressort cherche à expliquer le comportement hystérétique, en focalisant l'attention sur la combinaison d'une élasticité linéaire et d'une force attractive décroissante. En revanche, elle ne cherche pas à expliquer l'origine physique du comportement, qui elle, est différente — les forces magnétiques dans l'analogie aimant-ressort ne reproduisent pas la multiplicité en type et en échelle des forces aux échelles nanoscopiques. Podolefsky conclue que « les analogies peuvent être utilisées de façon productive pour enseigner dans un cours introductif de physique » (typiquement, un cours d'amphithéâtre de première année de licence) et que « lorsqu'il enseigne la physique par l'analogie, l'enseignant devrait réfléchir à la myriade de façons dont les représentations peuvent être interprétées, et chercher à créer des combinaisons entre les représentations efficaces ». L'analogie aimant-ressort semble ainsi être une bonne combinaison possible pour enseigner l'AFM dans un cours introductif.

Plus généralement, l'analogie aimant-ressort peut aussi aider à comprendre le lien entre un comportement hystérétique et tout système déformable interagissant avec des forces d'adhésion ou des forces attractives non-linéaires décroissantes. Elle peut également être utilisée comme un exemple mécanique de comportement hystérétique, que le phénomène soit électronique, magnétique, élastique, etc.

Le retour haptique a tendance, comme l'a montré l'ACP, à focaliser les explications des sujets sur les forces. Ce résultat est proche de celui de l'étude de [Persson et coll. \[2007\]](#) dans laquelle le retour d'effort est focalisé sur la compréhension (mesurée par les explications des sujets) des forces impliquées dans le processus de docking moléculaire.

Cependant, le retour haptique donne un effet d'interaction assez inattendu lorsqu'il est combiné avec la représentation Poutre. En effet, parmi les mauvaises réponses au choix 1 (voir figure [3.13a](#) page [67](#)), la courbe 6 a été la plus choisie dans le groupe Haptique+Poutre. Cette courbe possède une pente non-linéaire (augmentant avec la distance) durant la phase de retrait. Selon les commentaires de ces sujets sur leur réponse, tels que « ressenti non-linéaire » ou « je me suis dit que si la force augmente, alors ce n'est pas linéaire », ils ont traduit une force croissante par une pente croissante. Toutefois, cette interprétation incorrecte n'est pas survenue dans les autres groupes. Cette remarque peut être due à la combinaison de l'attention portée aux forces et de la vision de la poutre déformée (dans une forme non-linéaire), ce qui ressemble à un effet pseudo-haptique.

On remarque également qu'un tiers des sujets, quelque soit le groupe, choisit la

courbe 3, laquelle ne contient pas de sauts instables mais des transitions continues. Ces sujets expliquent qu'ils ont rejeté la courbe 4 parce qu'ils imaginent une courbe continue et, pour ceux avec le retour haptique, qu'ils ont pensé à la position de leur main durant le cycle AR mais sans prendre en compte la part du mouvement dû à l'inertie de leur bras dans leur raisonnement.

Le retour haptique s'est révélé utile pour percevoir l'influence de la raideur de la poutre. Ce type de résultat est assez similaire à celui obtenu dans [Bussell 2004] où le retour haptique aide des écoliers de CM2 à comprendre l'effet d'une augmentation de la gravité, dans une simulation informatique sur les concepts de gravité, de masse, de force et de mouvement.

En revanche, une partie de l'influence des forces électrostatiques, l'attraction avant le saut de contact, s'est révélée difficilement perceptible sur notre plate-forme. Différentes possibilités sont envisageables pour améliorer la perception de ces forces et déformations qui sont petites mais évoluent très rapidement, tout en rendant la totalité du cycle d'hystérésis. Visuellement, déplacer le substrat vers la poutre plutôt que l'inverse devrait faciliter la détection de ces petites déformations, car le repère des déformations est alors fixe. Une idée similaire est l'ajout d'un indice graphique affichant la forme non déformée de la poutre, la déformation apparaît alors par comparaison avec la forme courante. Haptiquement, l'utilisation d'une interface haptique haute-fidélité avec une faible friction peut affiner le rendu de ces efforts, bien que cela nécessite de posséder de bonnes capacités haptiques. Enfin, une meilleure solution est peut-être un retour sonore, comme l'ont proposé et expérimenté Marchi et coll. [2005].

Le protocole expérimental a montré quelques insuffisances par rapport à ses ambitions. Sur la procédure expérimentale, les simulations 2 à 4 ont confondu deux facteurs : le paramètre physique modifié et l'ordre de passage. En particulier pour les simulations 2 et 3, on ne peut pas dissocier les effets d'une certaine raideur de ceux du retour d'information donné au sujet. Pour remédier à ce problème, l'ordre de ces trois simulations aurait dû être aléatoire.

La tâche de dessin s'est révélée assez difficile pour les sujets. Dessiner la courbe force-distance où le temps est une troisième dimension ou un paramètre caché n'est apparemment pas évident. De plus, la compétence de chacun à dessiner, en particulier dessiner une courbe en fonction de deux paramètres, ajoute un bruit aléatoire sur l'exactitude du dessin. Des étapes intermédiaires (dessiner les courbes temporelles) auraient peut-être facilitées la tâche. Par ailleurs, une manière d'obtenir des dessins plus riches est peut-être de faire tester différentes raideurs explicites avant.

Enfin, sur l'analyse des dessins, notamment pour les sujets ayant produit un dessin correct, il est difficile de conclure sur leur compréhension des concepts sous-jacents : le sujet a-t-il inféré les concepts et réussi à les traduire en courbe force-distance, ou a-t-il simplement réussi à traduire sa perception en courbe force-distance ?

Notre dernière analyse concerne la condition expérimentale Analogie. Les sujets dans cette condition, avant de tester la simulation avec l'analogie, testent le cycle AR avec la représentation Poutre. Dans leur description du phénomène AR cependant, ils ont essentiellement décrit le comportement du système aimant-ressort. Pour axer leur description sur le comportement de la poutre et ainsi faciliter l'analyse comparative des représentations graphiques, une solution est de montrer dans la représentation Analogie la poutre

et l'analogie côte à côte.

3.4 Conclusion et perspectives

Nous avons développé une plate-forme expérimentale pour évaluer l'apport de l'utilisation du retour haptique et d'une analogie graphique aimant-ressort pour la compréhension du cycle approche-retrait d'une poutre AFM. Cette étude concerne des personnes **sans** connaissance préalable du domaine. Les résultats ont montré que les deux facteurs étudiés 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 phénomène 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.

Le choix dans notre protocole de laisser les sujets découvrir le phénomène AR et analyser leur compréhension a pour objectif d'explorer l'apport de chaque condition expérimentale sur leur compréhension. Dans le cadre d'un outil pédagogique, la procédure peut être fondamentalement différente ; les concepts sous-jacents au phénomène sont expliqués avant ou pendant la simulation.

Enfin, bien que les sujets n'aient pas mieux réussi avec l'haptique aux premiers tests de compréhension, une perspective intéressante est l'étude de l'effet de l'haptique sur la mémorisation de savoirs, nouveaux ou partiellement nouveaux, à plus long terme : un mois ou un an plus tard, les sujets ayant découvert le phénomène AR avec le retour haptique s'en souviennent-ils mieux ?

Le chapitre suivant s'intéresse au problème dual de l'haptique, l'interface. Il est apparu durant ces tests que les limites des interfaces actuelles étaient un frein à la perception et au ressenti des phénomènes nanophysiques. Le chapitre suivant propose une nouvelle approche pour une interface haute fidélité.

Chapitre 4

Nouvelle interface haptique haute-fidélité

DANS les deux premiers chapitres, nous avons abordé la problématique de la perception des forces sous les angles du couplage pour des tâches de micromanipulation et de l'analogie comportementale pour un contexte pédagogique. Une troisième direction d'étude est l'amélioration du rendu haptique en lui-même. Nous avons évoqué le compromis fait dans le choix des coefficients d'échelle amenant soit à masquer les phénomènes de faible amplitude, comme l'a montré le chapitre précédent pour le rendu des attractions à distance, soit à saturer la force rendue par le bras haptique. Ainsi, une interface haptique adaptée au rendu des échelles micro- et nanoscopique doit présenter une large plage dynamique, c'est-à-dire un faible frottement et un effort maximal élevé. Le rendu des forces transitoires doit bénéficier également d'une faible inertie, et plus généralement d'une grande transparence.

Les interfaces haptiques usuelles ne sont en général pas adaptées à cette problématique. À notre connaissance, il existe néanmoins deux modèles commerciaux proposant une large plage dynamique : le système à lévitation magnétique Maglev 200¹, et le système électromagnétique ERGOS². Ces hautes performances sont toutefois à relativiser avec l'inertie perçue, qui est assez grande ; par exemple, le flotteur (poignée) du Maglev a une masse de 500 g, et l'ERGOS une masse 300 g. Nous avons choisi d'explorer une nouvelle approche dans le but de concilier large plage dynamique et transparence.

4.1 Problématique

La transparence des interfaces haptiques est limitée par différents facteurs incluant les inconvénients typiques des systèmes mécaniques : inertie, jeu mécanique, frottements, hystérésis, élasticité et dynamique structurelle [Hayward et Astley 1996]. Une autre limitation est l'actionneur électromagnétique lui-même. Les interfaces à retour d'effort emploient presque toutes des moteurs à courant continu, avec aimants permanents et rotor sans fer. Ce type de moteur a des propriétés favorables pour les applications haptiques car l'inertie du rotor est petite, comparée à celle des rotors bobinés bien qu'il souffre de constantes de temps thermiques courtes et d'imperfections nuisibles résultant de la commutation par brosse des bobinages [Hayward 1995]. Après une longue évolution [Tesla 1888], le moteur à courant continu et aimants permanents a atteint aujourd'hui un haut niveau de perfectionnement qui, à moins d'une découverte majeure, indique que des améliorations significatives sont peu probables dans un avenir proche. L'actionnement peut toutefois trouver des améliorations dans les approches qui couplent

1. commercialisé par Butterfly Haptics, LLC. <http://www.butterflyhaptics.com>

2. commercialisé par l'association ACROE. <http://www.ergos-technologies.com>

des actionneurs différents à une même charge. Cette approche, détaillée dans la section suivante, est communément qualifiée de « mini-macro » ou « actionneurs à deux étages ».

Une contrainte commune à tous les actionneurs électromagnétiques est le fait que plus le couple requis est grand, plus l'inertie du rotor est grande. En fait, la physique des moteurs à courant continu et aimants permanents permet de quantifier cette observation [Ballantyne 1993]. La « constante de moteur » qui exprime la capacité d'un moteur à fournir un couple tout en prenant en compte les pertes thermiques est de la forme $\propto D^{3/2}L^{1/2}$ tandis que l'inertie du rotor est de la forme $\propto D^2L$, où D et L sont le diamètre et la longueur du moteur, respectivement. Cela signifie que l'inertie du rotor augmente plus rapidement que le couple maximum quand la taille du moteur augmente. Ces propriétés d'échelle deviennent significatives si un moteur est couplé à la main de l'utilisateur, directement par des transmissions (ou juste une poignée), et si cette pièce de liaison apporte une inertie plus petite que celle du rotor. S'il y a un mécanisme d'amplification de force ou de couple (typiquement, un réducteur à cabestan), alors, à cause de la dépendance de l'inertie équivalente à la sortie avec le carré du rapport d'amplification, les concepteurs se trouvent rapidement limités à un domaine où aucune conception à un seul moteur ne peut modifier une tendance ancrée dans la physique.

Pour la conception d'interfaces haptiques, cela signifie que la transparence diminue toujours avec la capacité à délivrer plus de couple ou plus de force. À ce problème s'ajoute bien sûr le fait que le surplus de force ou de couple obtenu par l'amplification de couple s'accompagne toujours de sa multitude de propriétés néfastes listées dans le premier paragraphe. Ces contraintes, cependant, peuvent être réduites en considérant les actionneurs à deux étages.

Nous décrivons dans ce chapitre une nouvelle approche pour la conception d'un actionneur à deux moteurs où un gros et un petit moteur sont couplés à un unique arbre. Le petit moteur est directement couplé à l'arbre de sortie et s'occupe uniquement de fournir les composantes transitoires ou hautes-fréquences de la consigne de couple. La puissance moyenne de ces signaux est généralement basse, donc le moteur pour les hautes-fréquences peut être petit et de préférence d'un type qui autorise des surcharges temporaires sans dommage. Le gros moteur est couplé à l'arbre de sortie *via* un coupleur visqueux et est asservi pour produire la vitesse relative nécessaire pour fournir le couple désiré. Comme ce moteur n'est pas directement couplé à la charge, ses détails de conception ne sont pas importants; toute technologie convient du moment que la vitesse est commandable. Le rôle du gros moteur est de fournir la puissance et celui du petit moteur les transitoires précises. Puisque l'inertie équivalente et le frottement sont ceux du petit moteur, le couple peut être augmenté sans compromis, ce qui mène à une conception qui peut approcher celle d'une « source pure » de couple, ou du moins une source qui a une très faible impédance et une large bande passante pour un couple arbitrairement grand.

Dans un premier temps, nous commentons les approches existantes dans la littérature. Nous décrivons ensuite le prototype réalisé pour valider notre approche. Puis, nous détaillons l'optimisation de la conception, qui nous a amené à réaliser un second prototype plus performant. Afin d'analyser la performance en boucle fermée de notre actionneur, nous utilisons la théorie des oscillateurs et re-démontrons les compromis bien connus sur les systèmes à retour de force, liant le retard et les caractéristiques du système à sa

stabilité, avec en plus la prédiction de la fréquence et de l'amplitude des cycles limites. Les résultats expérimentaux effectués sur le second prototype montrent l'influence de la commande du système sur les performances et révèlent aussi une résonance structurelle, encore inconnue de la littérature, qui est interne aux moteurs à courant continu fréquemment utilisés dans les interfaces haptiques et qui nécessite d'être compensée. Enfin, nous concluons sur le fait que de tels systèmes à deux moteurs peuvent être développés pour approcher ou dépasser les besoins dérivés des capacités moteurs et perceptuelles de la main humaine. Ces systèmes sont également prometteurs pour les applications de robotique *human-friendly* car ils n'exposent pas les utilisateurs à de l'énergie stockée, qu'elle soit inertielle ou élastique.

4.2 Approches existantes

Les systèmes robotiques à deux étages sont étudiés depuis plus d'une vingtaine d'années. Plusieurs raisons encouragent à utiliser plus qu'un seul actionneur par articulation. Une des premières motivations est probablement de pouvoir moduler la dynamique intrinsèque d'une articulation actionnée, de manière à imiter l'action antagoniste des muscles du squelette. Par exemple, les références [Sugano et coll. 1992; English et Russell 1999; Stramigioli et Duindam 2001] utilisent cette approche en modulant l'élasticité avec des moteurs électriques, et la référence [Boulet 1990] propose de moduler la viscosité avec des moteurs hydrauliques. Ces idées ont récemment été approfondies afin de créer des robots qui puissent interagir sans danger avec les personnes ; une synthèse sur ce domaine d'application est disponible dans [Bicchi et coll. 2008].

Il est courant d'utiliser les termes « série » et « parallèle » pour désigner les possibilités de couplage entre des éléments mécaniques. Malheureusement, cette terminologie peut prêter à confusion. En électronique, deux éléments en « série » partagent le même courant. Or deux analogies sont possibles entre les domaines électriques et mécaniques [Miles 1943], et les mêmes éléments mécaniques peuvent être en « série » ou en « parallèle » selon ce choix. Afin d'éviter toute confusion, nous parlerons des méthodes de couplage entre des moteurs et une charge, en évitant d'utiliser les termes « série » et « parallèle ».

La figure 4.1 page suivante présente différentes manières de coupler un ou deux moteurs à une charge. En référence à cette figure, le cas **a** est important car il modélise de nombreux systèmes haptiques actuels. En effet, la conception classique de ces systèmes exige de lier les actionneurs au bâti. Par conséquent, il existe au moins un élément élastique entre le moteur et la charge. Si l'élasticité est une caractéristique recherchée, alors il s'agit d'un « actionneur élastique série » [Pratt et Williamson 1995], mais pour les systèmes haptiques il est préférable de rendre cette élasticité aussi rigide que possible afin d'augmenter la fréquence propre du système [Hayward et Astley 1996]. Une variante de cette configuration est proposée dans [Lauria et coll. 2008] où l'élément élastique fait partie d'un mécanisme différentiel.

La configuration **b** est le cas standard, appelé en général actionneur macro-mini [Sharon et Hardt 1984; Sharon et coll. 1988; Salcudean et An 1989; Khatib 1990; Hollis et coll. 1991]. Dans ce cas, un gros moteur entraîne un plus petit, mais les deux partagent la même charge. Certains systèmes haptiques exploitent cette approche [Stocco et Salcudean 1996; Wall et Harwin 2001]. Avec une commande adaptée, cette configuration

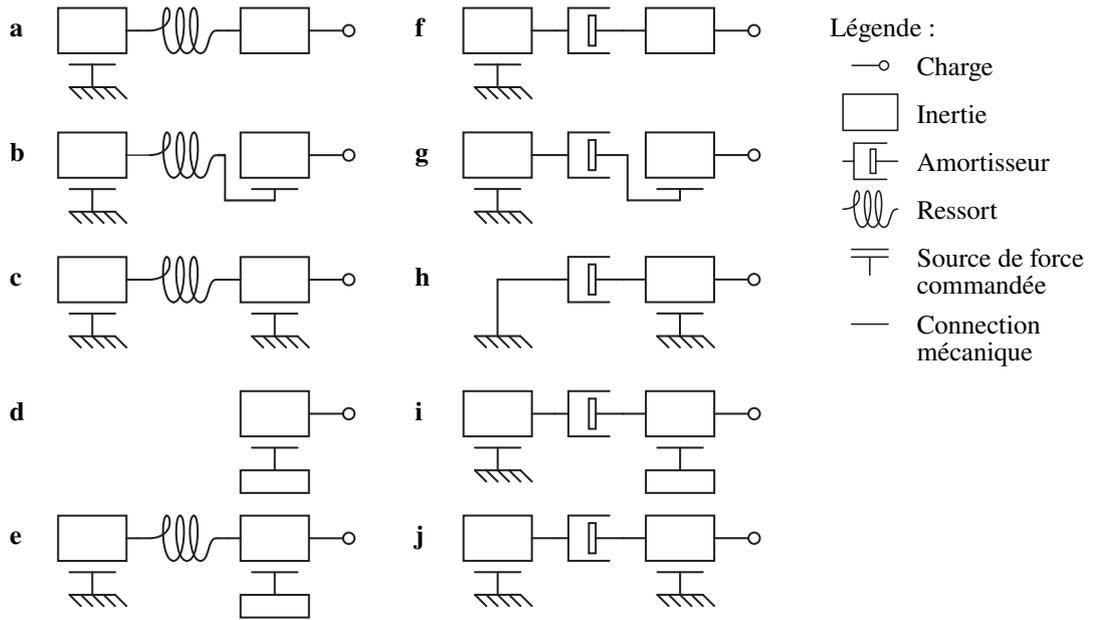


FIG. 4.1 – Plusieurs possibilités de coupler un ou deux moteurs à une charge. La source de force commandée est typiquement une force de Lorentz. La combinaison **j** est celle adoptée dans nos travaux.

peut réduire l’inertie apparente du système entier, toutefois le petit moteur doit pouvoir encaisser toute la charge. Cet inconvénient mène naturellement à considérer la configuration **c**, aussi décrite dans les travaux de [Morrell et Salisbury \[1997\]](#), qui n’a pas cette limitation et peut également s’appliquer à la conception de robots *human-friendly* [[Zinn et coll. 2004](#)]. Le gros moteur supporte l’essentiel de la charge et le petit moteur « complète » durant les phases transitoires. Avec une commande adaptée, l’utilisateur perçoit l’inertie de l’axe de sortie uniquement (celle du petit moteur et non celle du gros moteur). Une variante de cette configuration est proposée dans le travail de [Conti et coll. \[2007\]](#) où le gros moteur est remplacé par un frein.

Du point de vue du concepteur, trois types de forces peuvent être utilisés : élastique, dissipatif et inertiel. Ainsi, la configuration **d** est une possibilité de couplage, inertiel dans ce cas, que l’on trouve par exemple dans les téléphones portables et les manettes de jeu pour créer des vibrations. Donc pourquoi ne pas considérer le cas **e** pour obtenir une force similaire à celle du cas **c** ? En principe, c’est possible, mais probablement trop complexe à réaliser en pratique.

Les cas **f** à **j** schématisent plusieurs couplages visqueux possibles. L’équivalent du cas **a** avec un couplage visqueux, le cas **f**, est décrit dans les travaux de [Chew et coll. \[2004\]](#) pour des applications en robotique. À première vue, cette configuration n’est pas adaptée aux systèmes haptiques puisqu’avec une charge élastique comme la main, ce couplage introduit une atténuation de 6 dB/décade en plus des 12 dB/décade d’atténuation dus à l’inertie du moteur. On pourrait penser au cas **g** pour se charger de la réponse en hautes fréquences, comme avec le cas **b**, mais cette configuration a les mêmes limitations. Le cas **h** est mentionné car il est capable de générer des informations haptiques hautes

fréquences sans distorsion jusqu'à 100 Hz [Campion et coll. 2008]. Enfin, le cas **i** souffre des mêmes problèmes que le cas **e**. Il reste la configuration du cas **j**, qui fait l'objet de ce chapitre.

4.3 Conception et validation du concept

4.3.1 Justification

Les architectures à deux étages sont classiques en conception d'amplificateur électronique (comme l'amplificateur audio à *current dumping* de la marque QUAD [Walker 1975] ou le classique schéma de Doherty [1936]) où un amplificateur puissant supportant toute la charge est couplé à un autre amplificateur rapide et haute qualité pour produire le signal que le premier étage ne peut pas fournir pendant les transitoires. Nous avons ici une approche similaire.

Le couplage élastique est un couplage intéressant mais il a la propriété de stocker l'énergie. Cela peut être un avantage dans les applications où l'on cherche à conserver l'énergie, comme dans un robot marcheur par exemple, mais en haptique, la conservation de l'énergie est un inconvénient, voire même une propriété dangereuse. Les humains interagissent avec les systèmes physiques à des vitesses assez faibles en général. Pour qu'un couplage élastique produise une grande force, il doit emmagasiner de l'énergie. Si la force de sortie doit être annulée brusquement, par exemple à la rupture du contact avec un mur virtuel, le système de contrôle doit être capable de vider l'énergie stockée en très peu de temps puisque le déplacement est une double intégration de la force de sortie. Par ailleurs, si l'utilisateur lâche la sortie durant une interaction, l'énergie élastique est presque instantanément convertie en énergie cinétique, ce qui est risqué puisque l'organe de sortie doit être léger, et par conséquent entraîne un mouvement incontrôlable.

A l'inverse, un couplage visqueux n'a pas ces problèmes, ou du moins les réduit fortement. Pour produire une force, le gros moteur doit tourner, stockant ainsi de l'énergie sous forme cinétique. Cependant cette énergie ne peut être transférée à la sortie de façon transitoire car le couplage est dissipatif par construction. Ce dernier a tendance à dissiper l'énergie intérieurement plutôt que par l'utilisateur.

De plus, contrairement au cas du couplage élastique, la variable d'entrée est une vitesse, soit une simple intégration de la force de sortie. Par conséquent, la commande de la force est réalisée par une commande en vitesse, ce qui est beaucoup plus simple qu'une commande en position (un ordre de moins). Un avantage supplémentaire est la plus grande rapidité de réaction de la force transmise par le couplage visqueux, comparé au couplage élastique, ce qui diminue l'énergie demandée au petit moteur pour produire une force de sortie précise.

Le choix d'un couplage visqueux à courants de Foucault apporte d'autres avantages par rapport au couplage élastique, en particulier la précision. Les actionneurs à deux étages produisent une force de sortie précise parce qu'à la base, ce sont des systèmes asservis en effort. La résonance apportée par un couplage élastique rend la commande en effort complexe, et le ressort peut apporter de l'hystérésis et des perturbations hautes

fréquences s'il n'est pas de haute qualité. Contrairement à un couplage élastique, le couplage par courants de Foucault n'apporte pas de résonance et est parfaitement linéaire pour des vitesses modérées. En haptique, les vitesses usuelles sont bien en-dessous de la vitesse critique à laquelle le couplage à courants de Foucault devient non-linéaire [Gosline et Hayward 2008]. A condition de mesurer précisément la vitesse relative entre l'entrée et la sortie du coupleur, celui-ci constitue un capteur d'effort sans contact et de haute précision.

4.3.2 Étude de faisabilité

Cette nouvelle configuration d'actionneur à deux étages a été validée par la réalisation d'un premier prototype, constitué de deux moteurs dont les rotors sont couplés de manière visqueuse par un coupleur à courants de Foucault. Une représentation de la conception du prototype est donnée sur la figure 4.2. Les deux moteurs ont chacun une puissance différente. Le rotor du petit moteur est lié à l'axe de sortie, tandis que celui du gros moteur est lié au coupleur. Ce dernier comprend un disque en aluminium et des aimants permanents reliés magnétiquement par une pièce ferromagnétique.

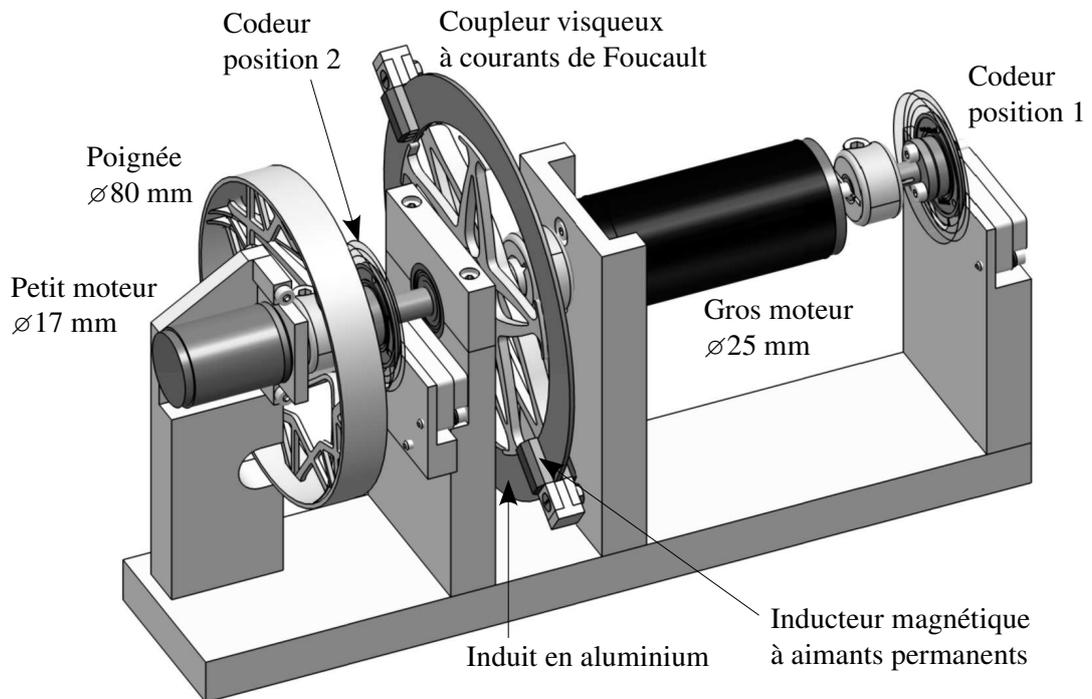


FIG. 4.2 – Représentation CAO du premier prototype réalisé (conçu avec CATIA, Dassault Systèmes).

4.3.2.1 Description du prototype

Le coupleur à courants de Foucault est le point clef dans la conception de cet actionneur. En effet, plus le coupleur est visqueux et léger, plus le gros moteur peut répondre rapidement à une consigne de couple. Ainsi, la principale caractéristique d'un coupleur

visqueux est le rapport de l'inertie de sa partie mobile sur son coefficient visqueux, J/b , lequel exprime une constante de temps (aussi bien pour les configurations angulaires que linéaires). Un coupleur visqueux a plus de paramètres qu'un frein visqueux puisqu'il y a deux rotors, l'inducteur à aimants permanents et le disque entraîné qui joue le rôle de l'armature (ou induit). Par conséquent, le nombre de facteurs à gérer est grand. Néanmoins, quelques variables de conception sont similaires.

Parmi celles-ci, il y a le coefficient visqueux, que l'on cherche à maximiser. Celui-ci dépend de la conductivité électrique et de l'épaisseur de l'armature ainsi que de la forme et de la densité du flux magnétique. Ce dernier dépend de tous les éléments constituant le circuit magnétique : les pièces polaires (aimants ou électroaimants), les conducteurs magnétiques (noyau ferromagnétique) et l'espace d'air entre les pièces. [Gosline et Hayward \[2008\]](#) ont trouvé expérimentalement qu'il était avantageux, d'une part, d'augmenter la dimension des pièces polaires qui est orthogonale au mouvement, et d'autre part, de diminuer l'épaisseur de l'armature pour améliorer la constante de temps du coupleur. De plus, comme annoncé avant, la forme du flux magnétique influe, dans le sens où le couple visqueux dépend du produit vectoriel du champ magnétique et de la vitesse relative ; il est donc préférable que le champ magnétique traversant l'armature soit orthogonal à la vitesse tangentielle de l'armature.

À partir de ces règles empiriques, nous avons choisi l'arrangement illustré sur la figure 4.3a page suivante. Le circuit magnétique est composé de deux paires d'aimants de même orientation magnétique et disposées de façon à obtenir des boucles magnétiques où l'armature, un anneau, circule entre les aimants de chaque paire. La figure 4.3a représente une vue en coupe du circuit magnétique illustrant les lignes de flux magnétique et la direction des courants de Foucault induits dans l'anneau lorsque celui-ci se déplace par rapport aux aimants. La figure 4.3b représente une vue en coupe de l'anneau illustrant les courants de Foucault induits dans celui-ci.

Le couple induit, opposé à la vitesse de rotation, peut s'expliquer de deux manières différentes. La première est avec la force de Laplace : les courants induits dans l'anneau créent en présence du champ magnétique des aimants une force de Laplace opposée à la vitesse linéaire de l'anneau. La deuxième est avec le champ magnétique induit, \vec{B}_{induit} : les courants induits créent trois dipôles magnétiques qui s'opposent au mouvement en interagissant avec le champ magnétique des aimants. Ces deux façons de voir le phénomène d'induction magnétique se résument dans la loi empirique de Lenz-Faraday : l'induction produit des effets qui s'opposent à leurs causes.

Dans notre actionneur à deux étages, la dynamique de la structure aura un effet seulement sur le deuxième étage qui doit être léger et rigide. Le prototype réalisé, illustré sur la figure 4.4 page suivante, a été fabriqué en combinant de l'usinage conventionnel et du prototypage rapide (plastique ABS), lequel est particulièrement efficace pour les pièces qui devaient être légères, en particulier la poignée et la roue tenant l'armature du coupleur. Des analyses structurelles numériques ont été effectuées lors de la conception afin de réduire l'inertie de ces pièces, tout en s'assurant qu'elles soient suffisamment rigides et que leur premier mode de résonance apparaissent au-dessus de 1 kHz.

Le coupleur réalisé comprend des aimants au néodyme avec un champ rémanent de 1,37 T et un anneau en aluminium de 0,6 mm d'épaisseur, 10 mm de largeur et 90 mm

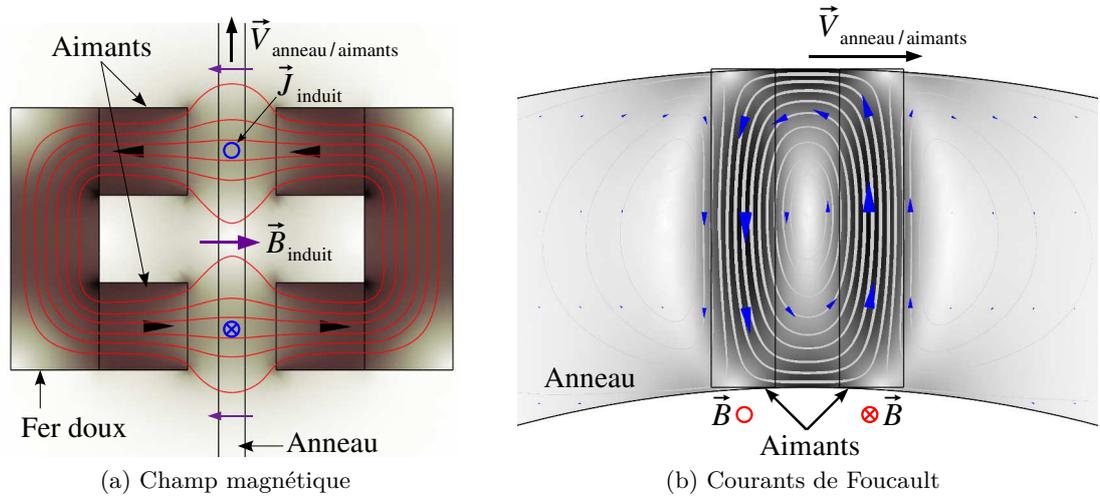


FIG. 4.3 – Principe du coupleur à courants de Foucault réalisé. (a) Vue en coupe du circuit magnétique : le fond indique la densité du flux magnétique créé par les aimants, les lignes rouges sont des lignes de flux magnétique, les flèches bleues sont des directions de densité de courant et les flèches violettes représentent les dipôles magnétiques induits par ces courants. (b) Vue en coupe dans le plan médian de l’anneau : le fond indique la densité de courant dans l’anneau, les courbes fermées grises sont des lignes de flux dont le sens est indiqué par les cônes bleus (simulations numériques calculées avec COMSOL).

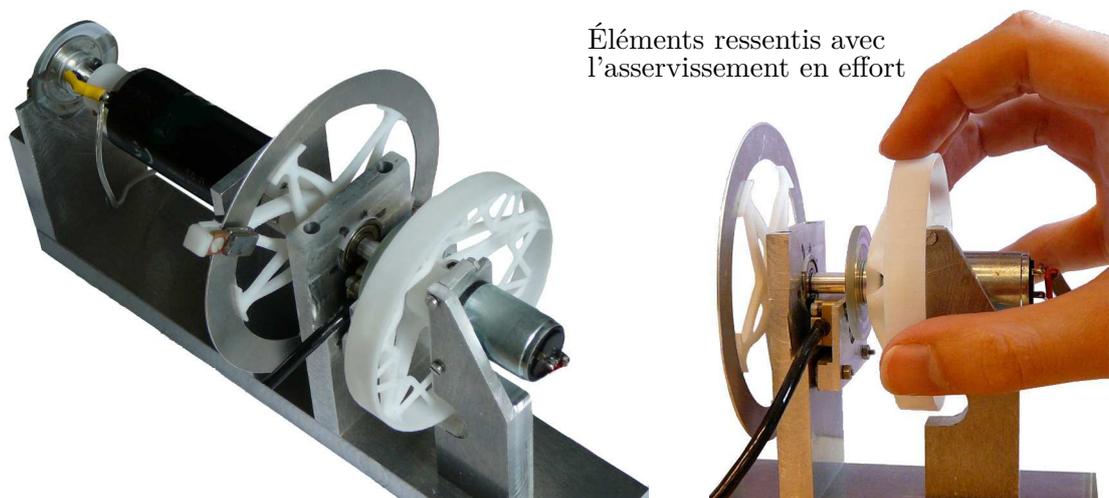


FIG. 4.4 – Premier prototype réalisé. Avec une commande adéquate, l’inertie perçue est essentiellement celle de l’anneau en aluminium plus la légère poignée. Le frottement est très faible puisque la transmission par induction magnétique est sans contact. L’image de droite illustre cela en montrant seulement les parties mobiles qui sont ressenties.

de diamètre extérieur, tenu par une roue de faible poids comme on le voit sur les figures 4.2 et 4.4. Cette roue est connectée au rotor du petit moteur.

Les moteurs utilisés sont des moteurs à courants continus à rotor sans fer, un classique Maxon RE 25 pour le gros moteur, et pour le petit, un Faulhaber 1724 ($\varnothing 17$ mm), dont le couple maximal continu est environ dix fois plus petit que celui du gros moteur. Chacun est piloté en courant par un amplificateur linéaire de courant, dont la régulation en courant (correcteur PI) est réglée de façon à atteindre une bande passante de 9 kHz. Enfin, pour obtenir une bonne précision sur le couple produit par le coupleur, les vitesses angulaires sont mesurées très précisément par des codeurs incrémentaux numériques à haute résolution donnant 1 638 400 incréments par tour pour celui lié à la poignée et 81 920 incréments par tour pour celui lié au gros moteur.³ Les critères de choix de ces matériels sont très bien résumés dans l'article [Hayward et MacLean 2007].

4.3.3 Commande

Le rôle du gros moteur est de fournir la puissance et celui du petit moteur les transitoires précises. La figure 4.5 donne le principe de la commande utilisée. La consigne de couple est comparée au couple appliqué par le coupleur sur la poignée, lequel est proportionnel à la vitesse relative entre les deux moteurs. Le gros moteur M_1 est asservi sur l'erreur de couple mesurée. Le petit moteur M_2 contribue à réduire cette erreur durant le temps de réponse du gros moteur. En régime stationnaire, le gros moteur M_1 fournit le couple désiré $C_{\text{désiré}}$. Lorsque la consigne de couple change, le petit moteur M_2 compense instantanément, dans la limite de ses capacités, la variation de couple, le temps que M_1 atteigne la nouvelle consigne.

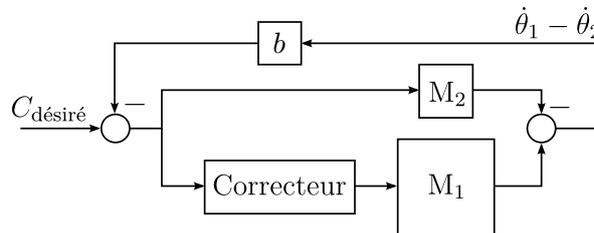


FIG. 4.5 – Diagramme simplifié de la commande en effort.

La figure 4.6 page suivante représente le schéma de commande, de façon plus détaillée. Un modèle simplifié du comportement électromécanique du système est représenté dans le cadre en pointillé. Les deux moteurs électriques sont commandés en courant et couplés par un coupleur visqueux de coefficient b . Le couple de sortie estimé, $\tilde{C}_{\text{sortie}}$, est la somme du couple transmis par le coupleur, proportionnel à la différence de vitesse entre les deux arbres, $b(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2)$, et du couple du petit moteur, C_2 . Le couple de sortie réel subit aussi les couples dus aux frottements (balais du petit moteur et liaisons pivots), $C_{2\text{frot}}$, et à l'inertie du deuxième étage, J_2 . La commande a une boucle de rétro-action pour réguler la vitesse relative entre les deux arbres. Si cette régulation est suffisamment bonne, alors la dynamique du gros moteur disparaît complètement du ressenti utilisateur. Ce qui est

3. La résolution du codeur à 1 638 400 incréments par tour est limitée à une vitesse de 250 tr/min, ce qui n'est pas suffisant pour l'arbre du premier étage.

ressenti est uniquement le deuxième arbre en mouvement. Comme les personnes interagissent plutôt lentement avec des systèmes électromécaniques, cette régulation n'est pas particulièrement difficile à réaliser. Dans un premier temps, un correcteur proportionnel s'est révélé suffisant puisque le système n'a qu'un pôle stable et que la principale perturbation est le frottement.

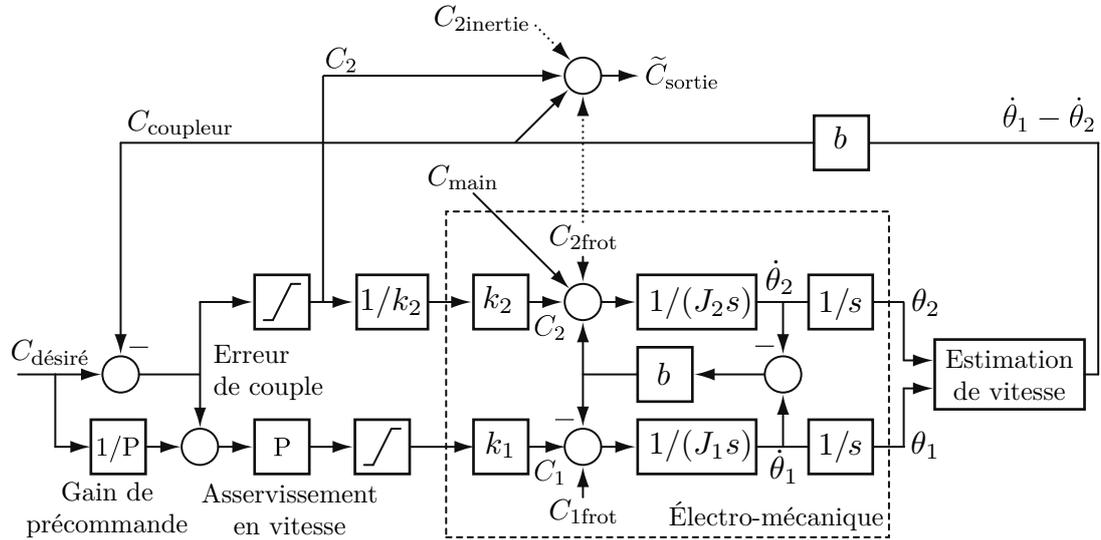


FIG. 4.6 – Diagramme de la commande en effort.

Ce schéma de commande s'appuie sur la connaissance précise du coefficient b . Dans le cas d'un couplage par courants de Foucault, ce coefficient reste constant sur une large plage de vitesse et peut être connu précisément. Le temps de montée est bien sûr limité par la constante de temps de l'asservissement du gros moteur. Pour compenser, l'erreur de couple est simplement envoyée au moteur du deuxième étage, comme s'il était en boucle ouverte, ce qui requiert également la connaissance de sa constante de couple, k_2 . Le temps de réponse du système complet est donc celui du deuxième étage, dans la limite de ses capacités à être surchargé. Par conséquent, la commande n'est pas seulement intrinsèquement robuste mais également inconditionnellement stable quelle que soit la charge.

Nous n'avons toutefois pas vérifié rigoureusement ce résultat, à cause de la séparation de la commande, mais ce schéma devrait a priori rester robuste lorsque qu'il est inclus dans la boucle d'un environnement virtuel ou d'un système de téléopération. Notre système se prête bien à de futures améliorations avec des commandes optimales plus avancées.

Par ailleurs, la vitesse est estimée à partir de la mesure des positions des deux arbres. L'estimation de la vitesse est réalisée par fenêtrage adaptatif en temps discret [Janabi-Sharifi et coll. 2000], afin d'obtenir une meilleure résolution sur la vitesse du gros moteur lorsque celle-ci est petite, tout en gardant un échantillonnage rapide de la vitesse. La commande a été implémentée sur un PC fonctionnant avec le système d'exploitation temps réel Linux RTAI. La fréquence d'échantillonnage était de 5 kHz.

Le système et la commande ont également été simulés afin d'étudier l'influence de divers paramètres, et en particulier celle du correcteur. Nous avons dans un premier temps utilisé des correcteurs P et PI, qui ont donné des résultats satisfaisants. Toutefois, la correction proportionnelle répond aux consignes d'échelon par des pics de courant relativement élevés, qui tendent, comme nous l'expliquons dans les essais sur le deuxième prototype, à exciter une résonance structurelle du gros moteur. Nous avons donc essayé d'utiliser un correcteur conçu par placement de pôles afin d'obtenir un comportement similaire à celui d'un système du deuxième ordre ayant un facteur d'amortissement de 0,9 et un temps de réponse 5 fois plus court que celui en boucle ouverte. La figure 4.7 montre, selon le type de correcteur, les consignes de couples envoyées au moteur et les réponses en couple du coupleur.

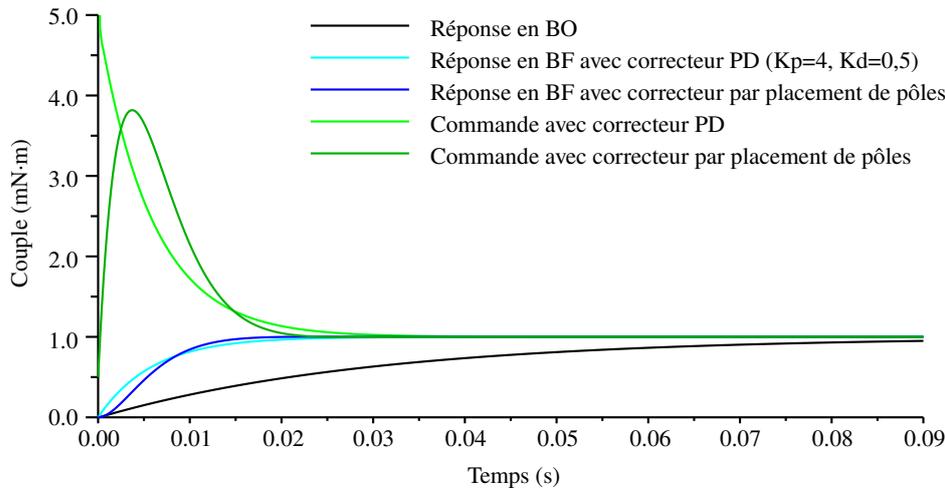


FIG. 4.7 – Couple transmis par le coupleur et consigne envoyée au gros moteur pour un échelon de couple, selon deux correcteurs différents.

Bien que le correcteur par placement de pôles améliore la bande passante du gros moteur (35 Hz au lieu de 20 Hz avec le correcteur PD), le déphasage du gros moteur par rapport au couple désiré nécessite une trop grande compensation de la part du petit moteur. La figure 4.8 page suivante montre cette perturbation qui apparaît sur une plage de fréquence débutant à la fréquence de coupure du gros moteur, 35 Hz, et allant jusqu'à 150 Hz environ.

Nous avons alors tenté de séparer en fréquence les commandes de chaque moteur. Notamment pour le gros moteur, un filtre passe-bas permettrait d'atténuer sa commande au-dessus de sa fréquence de coupure et ainsi d'éviter son apport contre-productif. Les simulations numériques ont montré cependant que le filtrage ne supprimait pas ce problème. L'atténuation gagnée dans les hautes fréquences est compensée par un déphasage supplémentaire aux basses fréquences, dit autrement, le filtrage passe-bas déplace la plage perturbée vers les basses fréquences sans la supprimer complètement.

Ces essais montrent que la conception du correcteur n'est pas simple, du fait des dynamiques différentes des deux étages. L'architecture de la commande semble juste mais l'étude du correcteur reste ouverte.

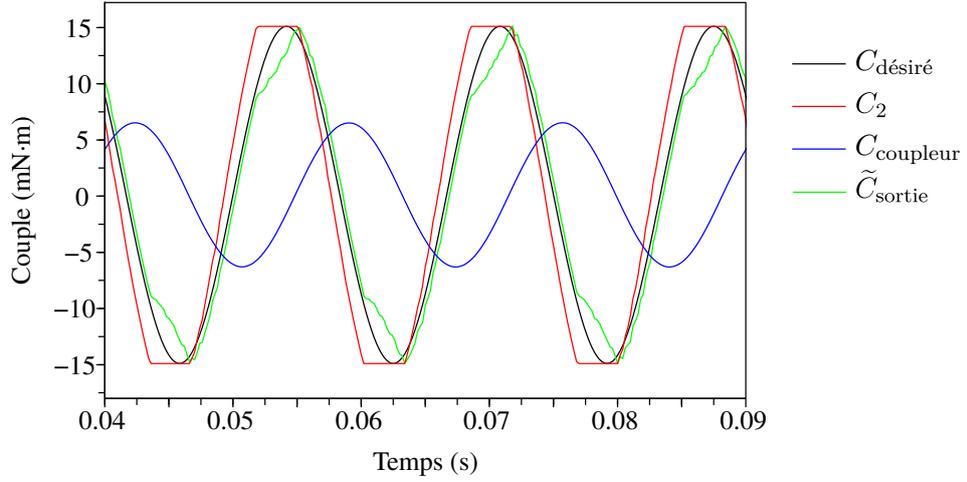


FIG. 4.8 – Réponse du système à un signal sinusoïdal à 60 Hz avec le correcteur par placement de pôle.

4.3.4 Résultats expérimentaux

4.3.4.1 Identification

La dynamique du deuxième étage n'est pas compensée. Il est donc très important d'obtenir des estimations précises de ses paramètres. Ceux-ci sont mesurés de la manière suivante.

Premièrement, la constante de couple du petit moteur, k_2 , est mesurée en considérant que sa dynamique électro-mécanique est gouvernée par

$$u_2 = k_2 \dot{\theta}_2 + R_2 i_2 + L_2 \dot{i}_2 \quad (4.1)$$

où u_2 est la tension appliquée, R_2 la résistance du bobinage, L_2 l'inductance et i_2 le courant. En régime stationnaire, quand le coupleur est déconnecté, la réponse mécanique à une tension est

$$\dot{\theta}_2 = \frac{u_2}{k_2} - \frac{R_2}{k_2} i_{2\text{frot}} \quad (4.2)$$

où $i_{2\text{frot}}$ est le courant nécessaire pour vaincre le frottement. En relevant la vitesse stationnaire pour différentes valeurs de tension, k_2 peut être déterminée par régression linéaire, voir figure 4.9a page ci-contre.

Ensuite, le coupleur visqueux et le gros moteur sont reconnectés et l'amplificateur est réglé en mode courant. La nouvelle dynamique, à l'état stationnaire, est alors

$$\dot{\theta}_2 = \frac{k_2}{b} i_2 - \frac{C_{2\text{frot}}}{b}. \quad (4.3)$$

De manière similaire, la vitesse stationnaire est mesurée pour différentes valeurs de courant et b est estimé par régression linéaire, voir figure 4.9b page suivante.

Pour trouver le moment d'inertie J_2 , nous appliquons un échelon de courant au moteur avec les mêmes conditions qu'avant. L'accélération initiale est le rapport du couple total

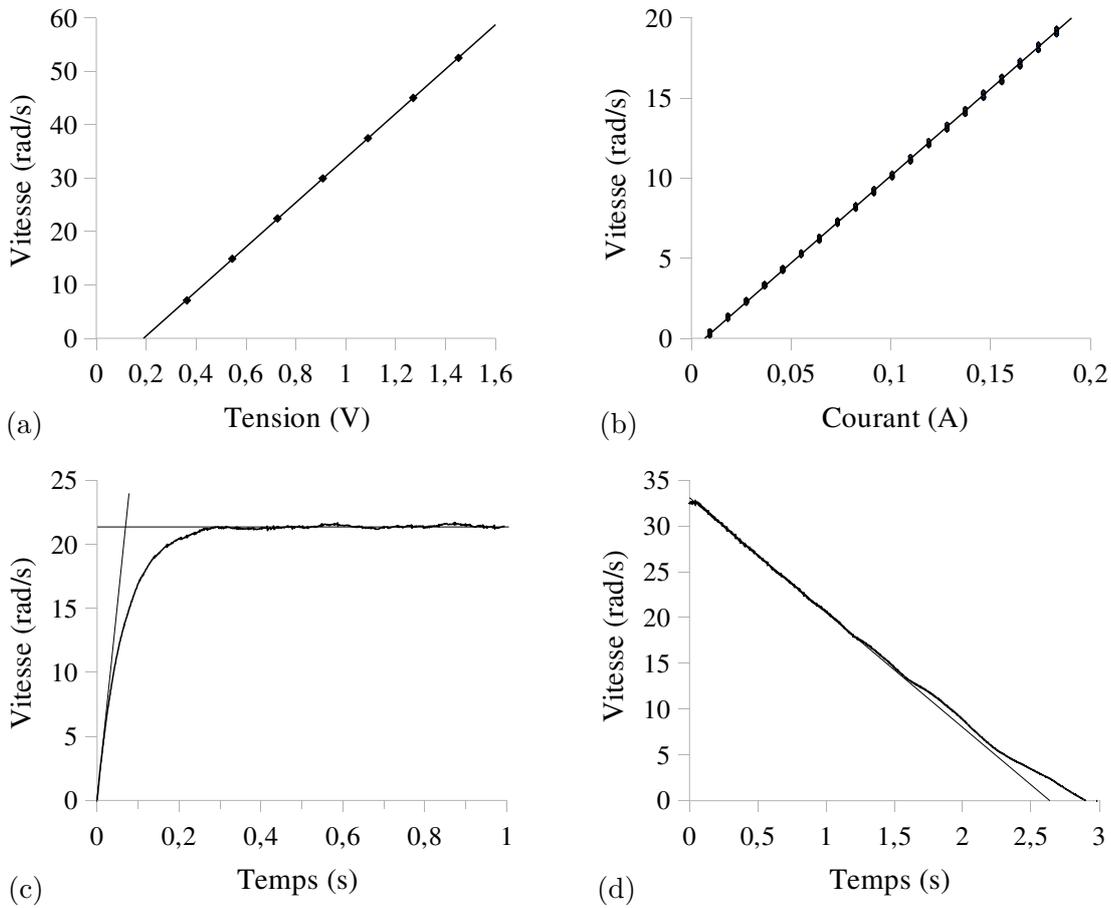


FIG. 4.9 – Mesures de vitesses de l'arbre de sortie dans différentes conditions pour identifier les paramètres du système. Les lignes fines montrent le résultat des régressions linéaires. Le graphique (a) montre l'identification de la constante de couple k_2 , (b) celle du coefficient du coupleur visqueux, (c) celle du moment d'inertie J_2 et (d) celle du couple de frottement $C_{2\text{frot}}$.

TAB. 4.1 – Paramètres identifiés sur le premier prototype

Paramètre	Valeur	
k_2	$24 \cdot 10^{-3}$	$\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{A}^{-1}$
b	$22 \cdot 10^{-5}$	$\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1}$
J_2	$15 \cdot 10^{-6}$	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
$C_{2\text{frot}}$	$19 \cdot 10^{-5}$	$\text{N}\cdot\text{m}$
$C_{1\text{max}}$	$45 \cdot 10^{-3}$	$\text{N}\cdot\text{m}$

initial sur l'inertie. Ce couple total est égal au couple appliqué par le coupleur lorsque le système est en régime stationnaire, soit $b\dot{\theta}_{2\infty}$. L'inertie est ainsi déduite par

$$J_2 = \frac{b\dot{\theta}_{2\infty}}{p} \quad (4.4)$$

où p est la pente initiale mesurée, voir figure 4.9c page précédente.

Enfin, pour identifier le couple de frottement, nous déconnectons le coupleur et observons la décélération du moteur après lui avoir donné une vitesse initiale. Sa vitesse diminue à cause du frottement, à un taux constant tel que

$$\dot{\theta}_2 = \dot{\theta}_2(0) - \frac{C_{2\text{frot}}}{J_2}t. \quad (4.5)$$

À partir de cette réponse, le couple de frottement est estimé par régression linéaire, voir figure 4.9d page précédente.

L'ensemble des paramètres identifiés sont résumés dans le tableau 4.1 page précédente.

4.3.4.2 Performances temporelles

Le système a été testé en tenant la poignée avec une prise normale et en imposant une consigne de couple. Le correcteur pour cette expérience est un PI. Les niveaux de saturation sont fixés à 8,5 mN·m pour le petit moteur et 45 mN·m pour le gros moteur, ce qui correspond à approximativement 150 % du couple maximal continu de chaque moteur. La fréquence d'échantillonnage est à 5 kHz et la sauvegarde des mesures à 500 Hz. La figure 4.10 page suivante montre les résultats à un échelon de montée et à un échelon de descente de 10 mN·m. Le couple de sortie est estimé comme la somme du couple transmis par le coupleur et de celui appliqué par le petit moteur, $\tilde{C}_{\text{sortie}} = C_{\text{coupleur}} + C_2$.

Sur la figure 4.10a page ci-contre, on peut voir que le gros moteur reçoit un pic de courant assez important qui entraîne une montée du couple progressive sur une durée de 40 ms. Le couple manquant est compensé par le petit moteur qui suit la consigne de façon précise. L'imperfection près de la valeur finale est due à la saturation du petit moteur. Dans le second essai affiché sur la figure 4.10b page suivante, le frottement contribue à amortir le gros moteur, ce qui entraîne une réponse nette, dont la transitoire est inférieure à 2 ms.

Plus généralement, la constante de temps mécanique du deuxième étage dépend de l'amplitude de la consigne d'échelon. Pour un échelon montant inférieur au niveau de saturation du petit moteur, elle est égale à la constante de temps électrique du petit moteur, c'est-à-dire presque instantanée.

4.3.4.3 Discussion

Les avantages par rapport à un système à un seul moteur ne sont pas immédiatement apparents dans ces premiers résultats. Toutefois, nous anticipons un avantage clé quant à l'inertie effective, qui devrait être toujours celle de l'arbre de sortie ; ce qui devient avantageux lorsque de grands couples sont nécessaires et donc lorsque de gros moteurs sont utilisés. En fait, nous nous attendons à ce que cette inertie soit toujours dominée par la poignée et non par le moteur. Notre premier prototype n'atteint pas ce comportement

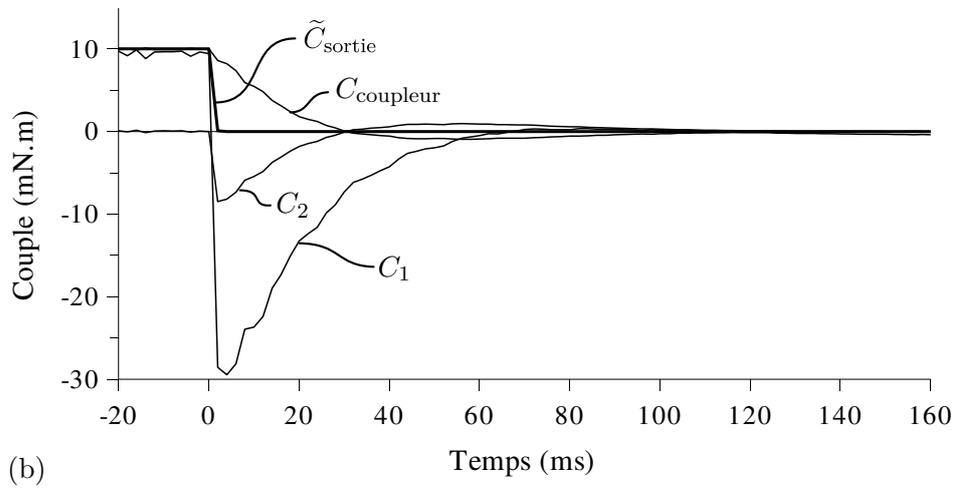
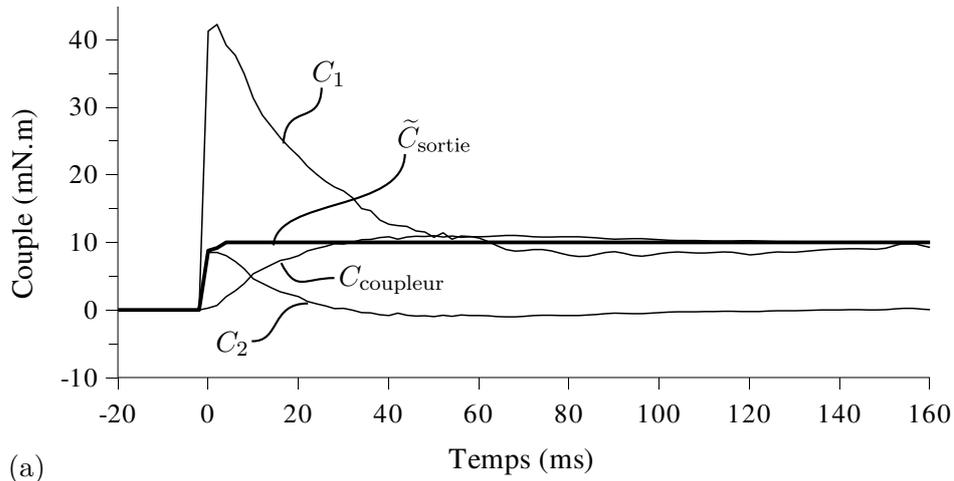


FIG. 4.10 – Réponses à un échelon de couple.

parce que le gros moteur est trop petit et l'anneau trop grand. Par ailleurs, le couple maximal que ce prototype peut délivrer est assez faible. De plus, quelques défauts d'alignements des axes ajoutent des frottements sur l'arbre de sortie. Enfin, les extrémités du coupleur, tenant les aimants, étaient fragiles et n'ont pas supportées la force centrifuge exercée lors d'un essai à la consigne de couple maximale.

Ces limitations ne présentent toutefois pas d'obstacles insurmontables si la conception de l'actionneur est faite avec plus d'attention. C'est pourquoi la section suivante présente une analyse plus détaillée de la conception d'un tel système, avec en particulier l'optimisation des performances du coupleur visqueux par une analyse multiphysique numérique.

4.4 Validation complémentaire avec un second prototype

4.4.1 Conception

4.4.1.1 Étude théorique

Pour améliorer les performances de notre système nous cherchons à optimiser deux critères : la constante de temps du coupleur, J_1/b , et l'inertie l'arbre de sortie, J_2 . Les dimensions des aimants sont fixes dans notre étude, soit des dimensions de $2 \times 2 \times 10$ mm et un champ rémanent de 1,37 T. Afin d'augmenter la viscosité du coupleur, nous reprenons le principe des boucles magnétiques mis en œuvre avec le premier prototype, en le dupliquant sur toute la circonférence. La figure 4.11 montre les paramètres géométriques utilisés pour la conception du coupleur.

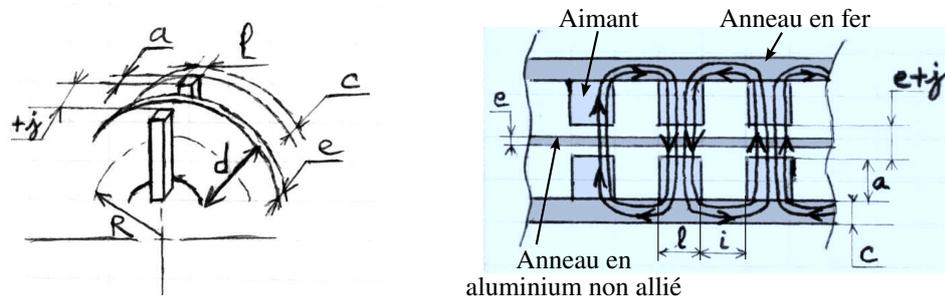


FIG. 4.11 – Paramètres géométriques pour la conception du coupleur visqueux.

Bien que l'induction magnétique soit difficile à analyser pour des géométries complexes, certaines hypothèses simplificatrices permettent de trouver une relation liant la vitesse de l'armature (anneau en aluminium) et la force visqueuse créée. En suivant le raisonnement de [Simeu et Georges 1996], on trouve la relation

$$C = \sigma S_{\text{mag}} e B^2 R^2 \dot{\theta} \quad (4.6)$$

où C est le couple de freinage, σ la conductivité électrique de l'anneau, S_{mag} la surface de l'anneau où le champ magnétique B s'exerce, e et R sont respectivement l'épaisseur et le rayon moyen de l'anneau, et $\dot{\theta}$ est sa vitesse de rotation. Cette relation fait l'hypothèse que le champ magnétique est uniformément réparti sur S_{mag} , ce qui revient à négliger

4.4 Validation complémentaire avec un second prototype

l'effet de l'espace d'air entre les aimants. Une autre hypothèse de cette relation est que le champ magnétique appliqué B est très supérieur au champ magnétique induit par les courants de Foucault. Cette hypothèse se vérifie bien dans les basses vitesses [Heald 1988]. Nous vérifions cette hypothèse lors de l'identification de b . Pour notre géométrie, $S_{\text{mag}} = dlN$, où d et l sont respectivement la hauteur et la largeur des aimants, et N est le nombre de boucles magnétiques (ce qui fait un total de $2N$ aimants). Le coefficient visqueux du coupleur vaut donc

$$b = \sigma dlNeB^2R^2. \quad (4.7)$$

Les inerties des différentes parties mobiles sont maintenant calculées. L'inertie J_1 du premier étage est la somme des inerties des $2N$ aimants, des deux anneaux ferromagnétiques, du rotor du gros moteur et des autres pièces de transmission (porte-aimants en plastique ABS, codeur). Les anneaux ferromagnétiques sont choisis avec une épaisseur égale à la moitié de la largeur des aimants, $l/2$, ce qui correspond, pour nos aimants, à ne pas atteindre la saturation magnétique du fer.

Après calculs, on obtient la constante de temps J_1/b à minimiser, telle que

$$\frac{J_1}{b} = \frac{2a\rho_a + \frac{2\pi R}{N}\rho_f + \frac{J_r}{NdlR^2}}{\sigma eB^2}, \quad (4.8)$$

où ρ_a et ρ_f sont les masses volumiques des aimants et du fer respectivement, J_r est l'inertie du rotor et du porte-aimants. Le deuxième critère à minimiser est l'inertie de l'anneau en aluminium J_{an} :

$$J_{\text{an}} = 2\rho_{\text{an}}\pi eRd\left(R^2 + \frac{d^2}{4}\right) \approx 2\rho_{\text{al}}\pi eR^3d \quad \text{si } d \ll R, \quad (4.9)$$

où ρ_{an} est la masse volumique de l'anneau.

Ces critères mettent en jeu de nombreuses variables. On peut cependant remarquer que, concernant l'armature, le choix de son matériau doit maximiser le rapport conductivité électrique sur densité. C'est pourquoi nous avons choisi l'aluminium et plus particulièrement un aluminium non allié, plutôt que le cuivre, qui présente un rapport 2 fois plus faible.

Par ailleurs, il est en fait difficile d'aller plus loin à partir de la relation (4.8) car le champ magnétique B dépend lui aussi de la géométrie de la boucle magnétique et du champ rémanent des aimants. On peut seulement dire que ce champ rémanent doit être le plus élevé possible, d'où le choix d'aimants en terres rares.

L'équation (4.7) montre également que les hypothèses prises, en particulier celle de champ magnétique uniforme sur S_{mag} , ne rendent pas compte des résultats expérimentaux de Gosline et Hayward [2008] sur l'orientation des aimants par rapport à la direction de déplacement de l'armature. En effet, les variables d et l ont une même influence sur b dans cette équation. Heald [1988] détermine une relation sans cette hypothèse de champ magnétique uniforme et donne une solution prenant en compte cette influence, qui montre que le couple de freinage par courants de Foucault est principalement un effet de bord.

Pour illustrer cette dépendance, la figure 4.12 montre l'influence de l'entrefer, $e + j$, et de la distance i entre aimants voisins sur le champ magnétique normal à l'anneau. La courbe théorique tracée en bleu est obtenue par l'étude d'une boucle magnétique en prenant des hypothèses classiques amenant à une résolution analytique, c'est-à-dire :

- une permittivité relative du fer infinie (pas de pertes dans le fer) ;
- des aimants idéaux (comportement linéaire) ;
- pas de fuites magnétiques dans l'air (conservation du flux magnétique) ;
- un champ magnétique uniforme.

On obtient alors la relation

$$B = B_r \frac{2a}{2a + e + j}, \quad (4.10)$$

où B_r est le champ rémanent des aimants. On peut voir sur la figure 4.12 que les hypothèses énoncées ne sont valables que pour de petites distances d'entrefer. Plus cette distance augmente, plus le champ magnétique dans l'entrefer diminue. De plus, plus les aimants sont proches (distance orthoradiale i petite), plus le champ magnétique tend à se refermer sur les aimants voisins plutôt que de traverser l'entrefer. Cette influence montre qu'il y a un optimum dans le choix du nombre d'aimants car, pour un même rayon moyen R , une distance i grande augmente le champ magnétique utile par boucle magnétique mais diminue le nombre total d'aimants et donc le couple total.

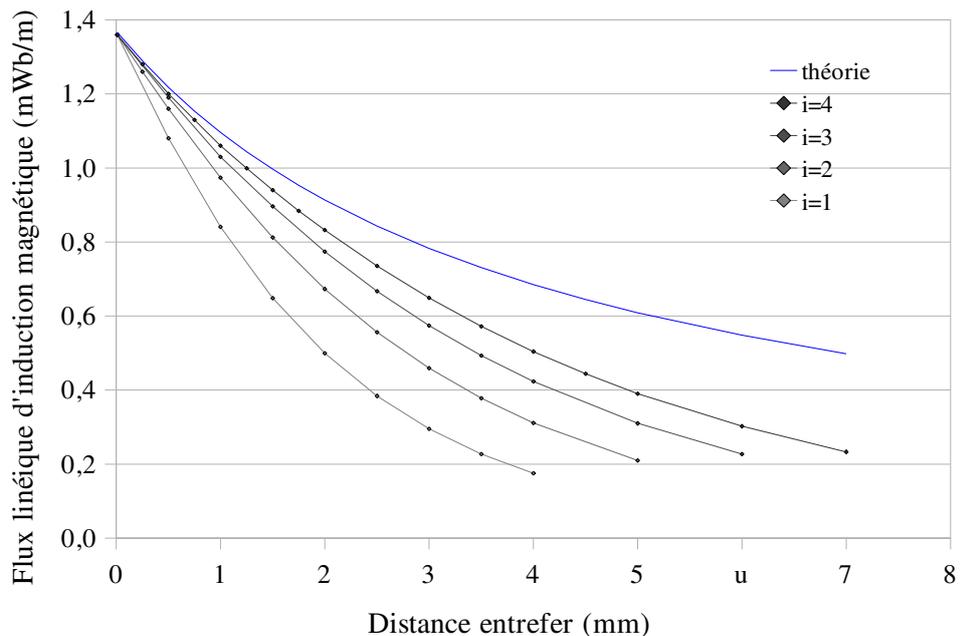


FIG. 4.12 – Champ magnétique normal à l'anneau en aluminium pour une demi-boucle magnétique.

4.4.1.2 Analyse numérique multiphysique

Afin de déterminer cet optimum, nous avons réalisé une simulation multiphysique de notre coupleur à courants de Foucault. Le logiciel utilisé, COMSOL, est adapté aux

4.4 Validation complémentaire avec un second prototype

problèmes multiphysiques, et en particulier dans notre cas à la simulation de l'induction de courants de Foucault dans un matériau conducteur. Afin de raccourcir les temps de calculs, nous cherchons les symétries du problème, pour en réduire la taille.

Le plan médian de l'anneau est dans le plan de symétrie de l'entrefer, donc le champ magnétique B appliqué par les aimants est orthogonal à l'anneau dans ce plan. Par conséquent, la densité des courants induits dans l'anneau sont également dans ce plan, puisqu'ils sont orthogonaux à B et à la vitesse linéaire de l'anneau. De même, le champ magnétique induit par ces courants est orthogonal à la densité de courant et est donc orthogonal au plan médian de l'anneau quelque soit la vitesse de rotation. En conclusion, on peut simplifier le problème en étudiant un seul côté du coupleur.

De plus, notre coupleur possède $2N$ plans de symétrie géométriques passant par l'axe de rotation. On peut montrer que chaque boucle magnétique présente des conditions aux frontières qui sont antipériodiques : la densité de courant dans le plan passant par l'axe de rotation et le plan médian d'un aimant est l'opposée de celle dans le plan de l'aimant voisin. Notre problème est donc constitué de N secteurs antipériodiques et la simulation d'un seul secteur est suffisante.

La figure 4.13 page suivante montre le modèle géométrique simulé ainsi que les résultats de la simulation pour une vitesse de rotation de 200 tr/min engendrant un couple de freinage de 50 mN·m. La résolution du maillage est de 0,3 mm pour les régions de l'anneau en face des aimants et elle est plus grossière dans les autres zones. Un important critère pour choisir la résolution du maillage est la profondeur de l'effet de peau des courants de Foucault. Le maillage aux frontières de l'anneau doit être suffisamment petit pour prendre en compte cet effet. Dans la géométrie présente, la profondeur de peau est de 5,3 mm lorsque la vitesse est de 430 tr/min, ce qui est bien supérieur à la résolution du maillage. Cet effet de peau est légèrement visible sur la figure 4.14 page suivante illustrant la densité des courants induits dans l'anneau ; en effet, la densité est légèrement inférieure dans le plan médian de l'anneau. La convergence est généralement obtenue en 15 étapes pour une précision relative de 10^{-6} .

Différentes variables ont été simulées : l'épaisseur e et la largeur d de l'anneau, le nombre d'aimants N et le jeu j entre l'anneau et les aimants. Les résultats sont donnés dans les figures 4.15, 4.16 et 4.17 page 101. La première montre que l'augmentation du nombre d'aimants augmente le couple total jusqu'à une certaine limite où les aimants sont si proches que le champ magnétique dans l'anneau chute. La prise en compte de l'inertie des aimants, dans la figure 4.16, diminue le nombre optimal des aimants par rapport à celui qui maximise le couple total. Ainsi, l'optimum pour notre géométrie est entre 30 et 36 aimants de chaque côté de l'anneau.

Par ailleurs, les simulations montrent que prendre une largeur d'anneau dépassant légèrement la hauteur des aimants a un effet bénéfique sans trop augmenter l'inertie de l'anneau. Ce résultat rejoint les résultats de l'expérience de [Gosline et Hayward \[2008\]](#).

Enfin, afin de réduire les fuites magnétiques, le jeu entre l'anneau et les aimants doit être minimal. En effet, le coefficient visqueux varie très rapidement en fonction du jeu. Il doit donc être choisi le plus petit possible, dans la limite des capacités techniques à fabriquer un anneau fin et plat.

À partir de ces résultats, nous avons développé un second prototype, plus compact et limitant les problèmes de coaxialité rencontrés sur le premier prototype. La figure 4.18 page 102 montre un écorché du coupleur constitué de 60 aimants et une photo du

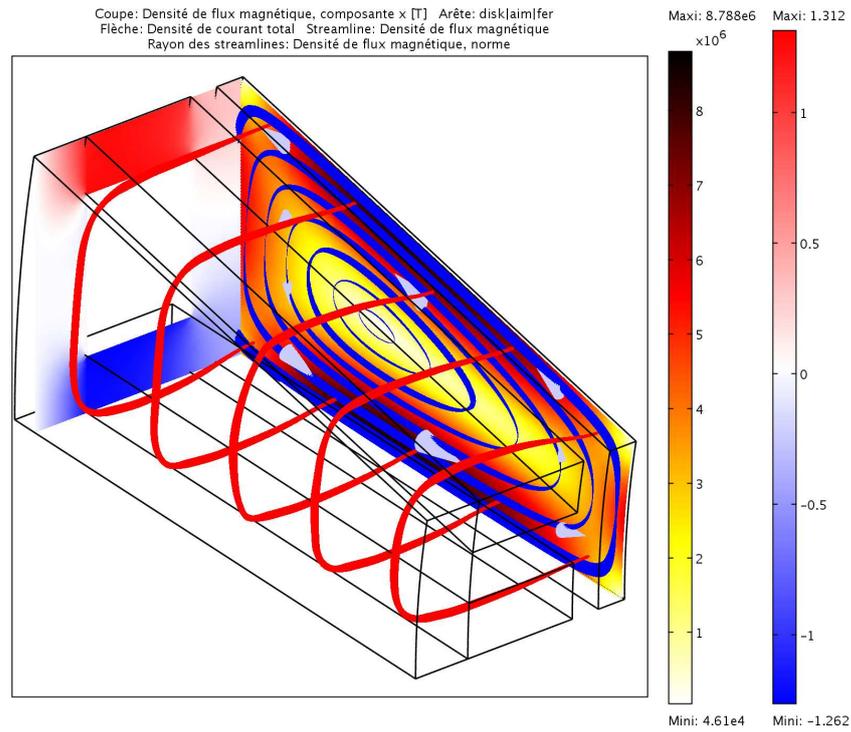


FIG. 4.13 – Résultats de la simulation d’une demi-boucle magnétique. Les lignes rouges sont des lignes de flux magnétiques; le plan de coupe avec le dégradé bleu-blanc-rouge illustre le champ magnétique orthogonal à l’anneau; les lignes bleues dans le plan médian de l’anneau sont des lignes de densité de courant induit; et les couleurs affichées dans ce plan indiquent la valeur de la densité de courant en chaque point.

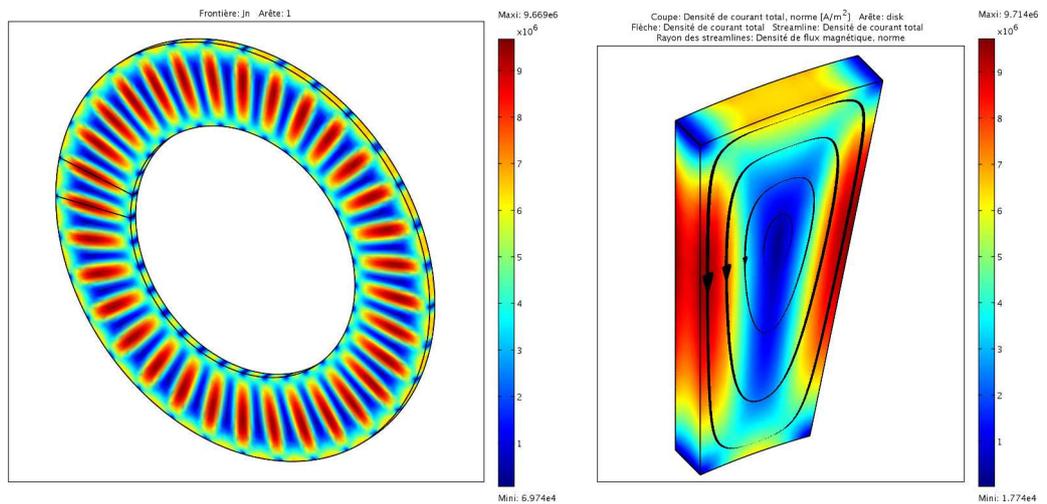


FIG. 4.14 – Densité des courants induits dans l’anneau lorsqu’il tourne à une vitesse de 200 tr/min.

4.4 Validation complémentaire avec un second prototype

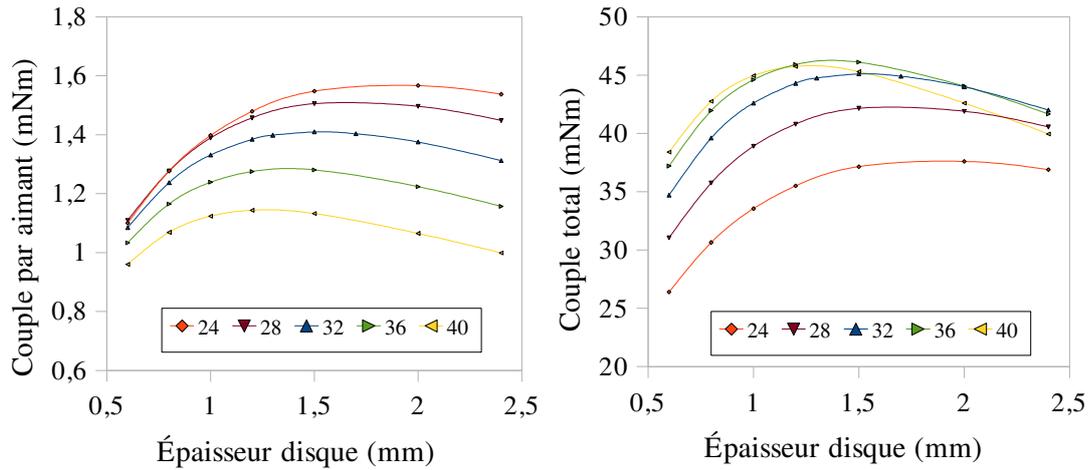


FIG. 4.15 – Couples par aimant et couple total en fonction de l'épaisseur du disque et du nombre d'aimants.

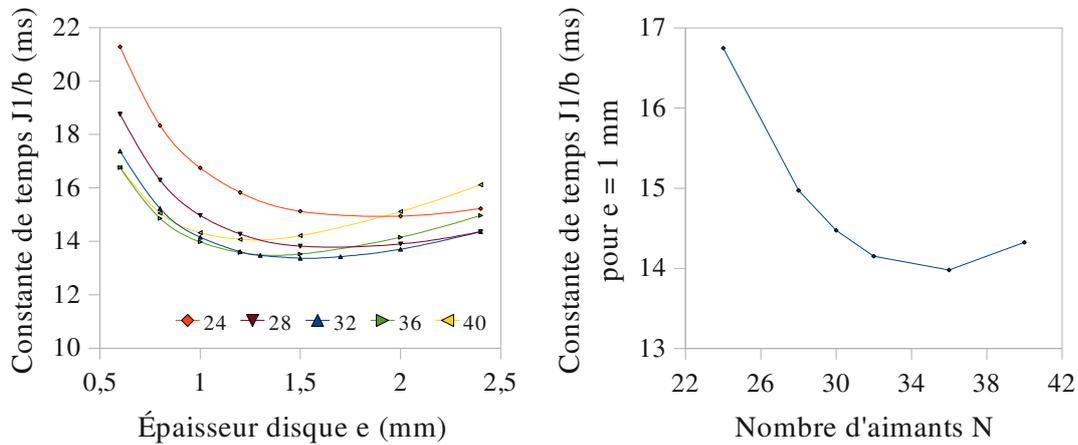


FIG. 4.16 – Constante de temps du coupleur en fonction de l'épaisseur du disque et du nombre d'aimants.

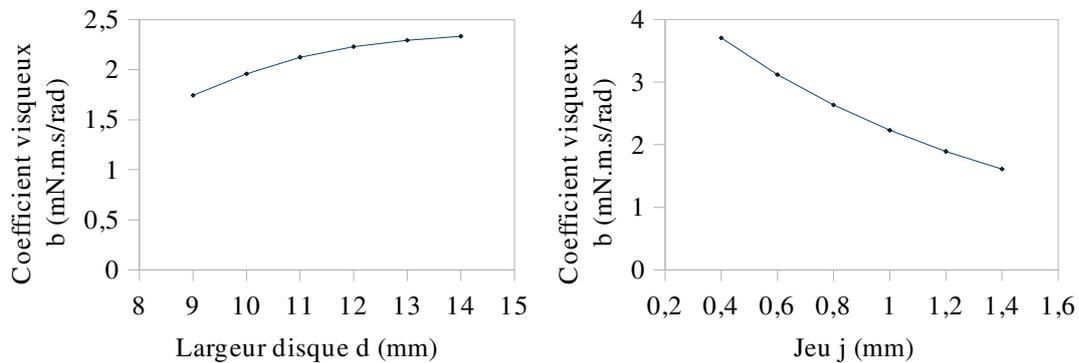


FIG. 4.17 – Influences de la largeur de l'anneau et du jeu entre celui-ci et les aimants sur le coefficient visqueux du coupleur.

deuxième prototype ainsi réalisé.

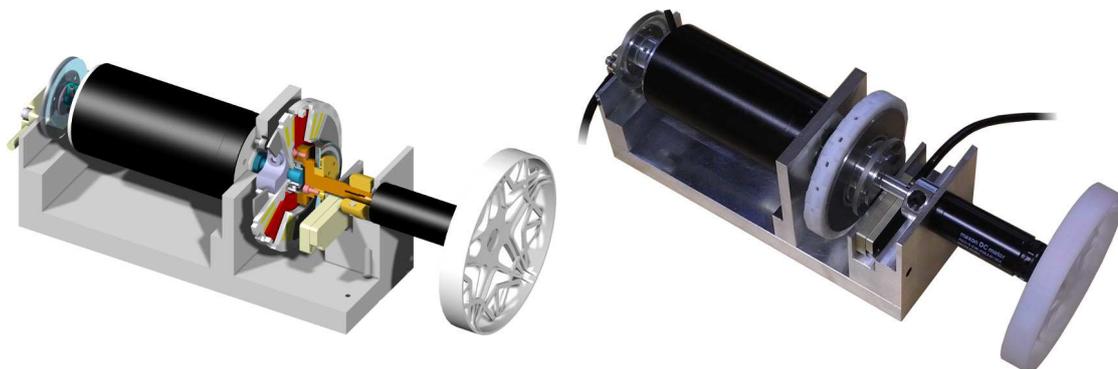


FIG. 4.18 – Représentation CAO montrant un écorché du coupleur ; photo du prototype.

4.4.2 Analyse de stabilité

4.4.2.1 Conditions de stabilité existantes

La littérature contient plusieurs analyses théoriques apportant des conditions nécessaires et suffisantes de stabilité. La première étude précise sur l'analyse de la stabilité des interfaces haptiques est la référence [Colgate et Schenkel 1994] qui détermine une condition nécessaire et suffisante (CNS) de passivité pour un système simulant un mur virtuel de raideur k . Cette condition est

$$b \geq \frac{kT_e}{2}, \quad (4.11)$$

où b est l'amortissement visqueux du système, T_e est la période d'échantillonnage. Cette expression signifie physiquement que l'énergie dissipée par l'amortissement visqueux doit être supérieure à l'énergie apportée par le processus d'échantillonnage.

Abbott et Okamura [2005] utilisent une analyse énergétique temporelle pour déterminer une CNS assurant la passivité d'une interface haptique simulant un mur virtuel :

$$k \leq \min \left(\frac{2b}{T_e}, \frac{2c}{\Delta} \right), \quad (4.12)$$

où c est la force de frottement sec dans le système. Par rapport à la condition (4.11), cette condition ajoute l'influence de la quantification ; l'énergie apportée par le processus de quantification doit être compensée par l'énergie dissipée par les frottements secs.

Diolaiti et coll. [2006] utilisent également une approche énergétique pour déterminer une CNS assurant la passivité d'un système haptique. En revanche, ils se placent dans le cas de la simulation d'un ressort virtuel. Ils obtiennent une condition moins conservatrice, liant les influences à la fois de la quantification et de l'échantillonnage. Ils proposent qu'un système haptique soit passif si

$$\dot{x}_{\max} \left(b - \frac{kT_e}{2} \right) + c - \frac{k\Delta}{2} > 0 \quad \text{et} \quad c \geq \frac{k\Delta}{2}, \quad (4.13)$$

4.4 Validation complémentaire avec un second prototype

où une vitesse maximale positive \dot{x}_{\max} existe telle que $|\dot{x}(t)| \leq \dot{x}_{\max}, \forall t \geq 0$. Leur analyse permet également de prendre en compte un retard supplémentaire dans la boucle de commande ; un système haptique avec un retard T_r est passif si

$$\dot{x}_{\max} \left(b - \frac{k(T_{\dot{e}} + T_r)}{2} \right) + c - \frac{k\Delta}{2} - \dot{x}_{\max} k T_r (T_{\dot{e}} + T_r) > 0 \quad \text{et} \quad c \geq \frac{k\Delta}{2}, \quad (4.14)$$

où une vitesse maximale positive \dot{x}_{\max} et une accélération maximale \ddot{x}_{\max} existent telles que $|\dot{x}(t)| \leq \dot{x}_{\max}$ et $|\ddot{x}(t)| \leq \ddot{x}_{\max}, \forall t \geq 0$. Parmi les hypothèses de leur analyse, la force du ressort virtuel est gouvernée par

$$F_{ext}(hT_{\dot{e}}) = -k\Delta \left(\left| \frac{x(hT_{\dot{e}})}{\Delta} \right| + \frac{1}{2} \right). \quad (4.15)$$

Cette hypothèse ajoute un biais de $\frac{k\Delta}{2}$, telle que la force soit symétrique par rapport à l'origine mais sans état de repos, $|F_{ext}(hT_{\dot{e}})| \geq \frac{k\Delta}{2}$. À notre sens, cette hypothèse ne semble pas justifiée puisque le ressort virtuel n'entraîne pas de lui-même ce biais. L'ajout d'une impédance extérieure ou d'un effort extérieur reviendrait peut-être à considérer dans l'analyse l'absence d'état de repos et donc ce biais, mais cela reste à vérifier.

Enfin, la référence [Gil et coll. 2007] propose également une CNS liant la raideur virtuelle maximale aux amortissements visqueux réel et virtuel, ainsi qu'au retard. Leur analyse suppose que les frottements secs et la quantification sont négligeables devant les effets de la viscosité. Par rapport à la condition de [Diolaiti et coll. 2006], et dans les hypothèses énoncées, leur condition de stabilité ajoute l'influence d'un amortissement visqueux virtuel B tel que

$$k < \frac{b + B}{\frac{T_{\dot{e}}}{2} + T_r}. \quad (4.16)$$

Les analyses numériques et expérimentales présentées montrent que cette condition est valable pour des retards inférieurs à quelques périodes d'échantillonnage, ce qui est en général le cas des systèmes haptiques.

4.4.2.2 Étude des oscillations à la limite de stabilité

Nous proposons une nouvelle approche de l'analyse du comportement d'un système haptique à travers l'étude du ou des oscillations créées par la simulation d'un ressort virtuel. Afin d'illustrer le problème, la figure 4.19 montre deux exemples de mouvements tracés dans l'espace des phases, en partant d'une position initiale x_0 positive. Le cercle limite de stabilité est un ensemble infiniment petit de comportements, situé entre deux ensembles de comportements possibles : soit le mouvement oscillant est stable et converge vers la position de repos du ressort virtuel, soit il est instable et diverge en s'éloignant de la position de repos. Nous cherchons donc les conditions amenant le système à osciller au-delà de son cercle limite.

Nous considérons un système mécanique d'inertie m , subissant des pertes par frottement sec c et un amortissement visqueux $b\dot{x}$. Un effecteur applique sur ce système un effort proportionnel à la position du système, mesurée avec un retard T , tel que $F_{ext}(t) = -kx(t - T)$, avec k la raideur de l'effort. Dans un premier temps, nous négligeons la quantification de la position mesurée par le système. En outre, nous supposons que :

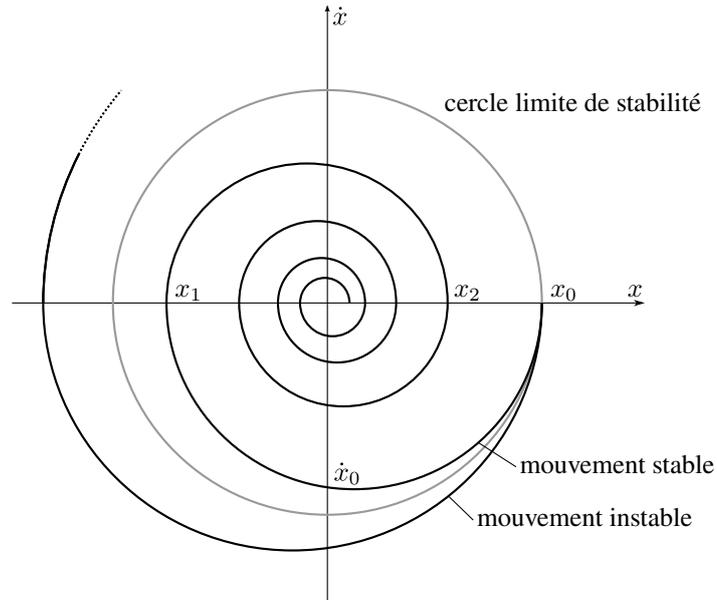


FIG. 4.19 – Mouvements stable et instable tracés dans l'espace des phases, lors de la simulation d'un ressort virtuel; x_k est la k^{e} position où $\dot{x}(t) = 0$ et \dot{x}_k est la k^{e} vitesse où $x(t) = 0$.

- les coefficients b et c des forces de frottement sec et d'amortissement visqueux respectivement sont constants, quels que soient la position, la vitesse et le temps;
- la force d'adhésion, lorsque la vitesse est nulle, ne dépasse pas celle des frottements secs, $F_{\text{adh}} \leq c$.

Si le système est à l'arrêt, il reste à l'arrêt si la force de rappel du ressort est inférieure à la force d'adhésion : $|kx(t - T)| < c$. Si la mesure de position est quantifiée, cette condition devient

$$|k\Delta| < c. \quad (4.17)$$

Cette condition est suffisante, mais non nécessaire, pour que le système soit stable lorsqu'il est au repos.

Lorsque le système est en mouvement, il vérifie l'équation différentielle linéaire

$$m\ddot{x}(t) + b\dot{x}(t) + c\text{sgn}(\dot{x}(t)) + kx(t - T) = 0, \text{ pour tout } \dot{x} \neq 0. \quad (4.18)$$

Pour éliminer la non-linéarité due à la force de frottement sec (fonction signe), nous cherchons la solution sur les domaines où $\text{sgn}(\dot{x}(t))$ est constant. L'équation linéaire homogène associée à (4.18) est

$$m\ddot{x}(t) + b\dot{x}(t) + kx(t - T) = 0, \text{ pour tout } \dot{x} \neq 0. \quad (4.19)$$

En supposant une solution de la forme exponentielle ($x = e^{\omega t}$), on obtient l'équation caractéristique

$$m\omega^2 + b\omega + ke^{-\omega T} = 0. \quad (4.20)$$

4.4 Validation complémentaire avec un second prototype

Pour continuer l'analyse dans le domaine linéaire, il est nécessaire d'approximer le terme $e^{-\omega T}$ dû à l'influence du retard dans la boucle de commande. Nous supposons que le retard T est très inférieur à la période d'oscillation du cycle limite, $T \ll \frac{1}{\omega}$ et approximations $e^{-\omega T}$ par un développement limité d'ordre deux, $e^{-\omega T} = 1 - \omega T + \frac{\omega^2 T^2}{2} + o(x^2)$. Approximée à l'ordre deux, l'équation caractéristique devient

$$\left(m + k\frac{T^2}{2}\right)\omega^2 + (b - kT)\omega + k = 0. \quad (4.21)$$

En utilisant les paramètres classiques $\tilde{\omega}_0$ pour la fréquence propre et $\tilde{\zeta}$ pour le facteur d'amortissement, l'équation caractéristique devient alors celle classique d'un système oscillant amorti :

$$\omega^2 + 2\tilde{\zeta}\tilde{\omega}_0\omega + \tilde{\omega}_0^2 = 0, \quad (4.22)$$

avec, pour une approximation quadratique de $e^{-\omega T}$,

$$\tilde{\omega}_0^2 = \frac{k}{m + \frac{1}{2}kT^2} = \frac{\omega_0^2}{1 + \frac{1}{2}(T\omega_0)^2} \text{ et } \tilde{\zeta} = \frac{b - kT}{2\sqrt{km + \frac{1}{2}k^2T^2}} = \frac{(\zeta - \frac{1}{2}T\omega_0)}{\sqrt{1 + \frac{1}{2}(T\omega_0)^2}}, \quad (4.23)$$

et pour une approximation linéaire de $e^{-\omega T}$,

$$\tilde{\omega}_0^2 = \frac{k}{m} = \omega_0^2 \text{ et } \tilde{\zeta} = \frac{b - kT}{2\sqrt{km}} = \zeta - \frac{1}{2}T\omega_0. \quad (4.24)$$

L'équation homogène (4.19) correspond au problème sans les frottements secs. L'approximation sur le retard ramène ce problème à l'étude d'un système du deuxième ordre. À ce stade, on remarque qu'une CNS de stabilité est que le facteur d'amortissement soit positif, ce qui correspond à la condition $b > kT$. Le processus d'échantillonnage apportant un retard de $\frac{T_s}{2}$, cette condition est équivalente à la condition (4.11) de [Colgate et Schenkel 1994].

La solution $x_h(t)$ de l'équation homogène (4.19) est

$$x_h(t) = Ae^{-\tilde{\zeta}\tilde{\omega}_0 t} \sin(\tilde{\omega}_0 \sqrt{1 - \tilde{\zeta}^2} t + \varphi), \quad (4.25)$$

où A et φ sont des constantes dépendant des conditions initiales. Nous ajoutons maintenant la solution particulière qui dépend des frottements secs. L'ensemble des solutions générales $x(t)$ de l'équation (4.18) est alors

$$x(t) = Ae^{-\tilde{\zeta}\tilde{\omega}_0 t} \sin(\tilde{\omega}_0 \sqrt{1 - \tilde{\zeta}^2} t + \varphi) - \frac{c}{k} \text{sgn}(\dot{x}(t + T)), \forall \dot{x} \neq 0. \quad (4.26)$$

Prenons comme conditions initiales une position initiale positive, $x(0) = x_0 > 0$, et une vitesse initiale nulle, $\dot{x}(0) = 0$. On obtient alors l'équation de mouvement

$$x(t, x_0) = \frac{x_0}{\sqrt{1 - \tilde{\zeta}^2}} e^{-\tilde{\zeta}\tilde{\omega}_0 t} \sin(\tilde{\omega}_0 \sqrt{1 - \tilde{\zeta}^2} t + \cos^{-1}\tilde{\zeta}) + \frac{c}{k}, \quad (4.27)$$

avec $A = \frac{x_0}{\sqrt{1 - \tilde{\zeta}^2}}$ et $\varphi = \cos^{-1}\tilde{\zeta}$, valable tant que $\dot{x}(t + T) \leq 0$.

Nous cherchons maintenant à quelles conditions le mouvement diverge ou converge vers une position fixe. Au lieu de s'intéresser directement à $x(t, x_0)$, nous allons considérer l'ensemble des points x_0, x_1, x_2, \dots correspondant aux intersections successives de la trajectoire $x(t, x_0)$ avec l'axe $\dot{x}(t) = 0$, appelé aussi la section de Poincaré à $\dot{x}(t) = 0$. Le frottement sec étant considéré constant, le mouvement est stable si la somme $x_k + x_{k+1}$ est positive. Par récurrence, on obtient la condition

$$x_0 + x_1 \geq 0. \quad (4.28)$$

La position x_1 est celle au moment où la vitesse du système s'annule. L'équation de mouvement (4.27) n'est valable que jusqu'au temps t tel que $\dot{x}(t+T) = 0$, c'est-à-dire légèrement avant que la vitesse du système $\dot{x}(t)$ ne s'annule. Il faudrait donc calculer l'équation de mouvement de la phase suivante, correspondant à $\dot{x}(t+T) \geq 0$, et déterminer avec cette équation la position x_1 . Toutefois, on peut montrer que, pour une approximation au premier ordre de $\omega T \ll 1$, la position x_1 peut être obtenue à partir de l'équation de mouvement (4.27) :

$$x_1 = (c/k - x_0)e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} + c/k \quad (4.29)$$

avec $\frac{\tilde{\zeta}}{\sqrt{1-\tilde{\zeta}^2}} = \frac{1}{\tan\varphi}$. On obtient alors la condition

$$x_0 k \tanh\left(\frac{\pi}{2 \tan\varphi}\right) + c \geq 0. \quad (4.30)$$

L'égalité dans la condition (4.30) correspond au cercle limite de stabilité. L'amplitude des oscillations à la limite de stabilité est donnée par x_0 , et la fréquence de résonance amortie est approximée par

$$\omega_d = \tilde{\omega}_0 \sqrt{1 - \tilde{\zeta}^2} = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2} + \frac{T\zeta\omega_0^2}{2\sqrt{1 - \zeta^2}}. \quad (4.31)$$

Afin de comparer ce résultat avec la condition (4.13) de [Diolaiti et coll. 2006] sans la quantification ($\Delta = 0$), nous cherchons à exprimer la condition (4.30) en fonction de la vitesse maximale. Celle-ci est obtenue en déterminant la position à laquelle l'accélération devient nulle. On obtient ainsi une relation liant x_0 et \dot{x}_0 telle que

$$x_0 = \frac{c}{k} + \frac{\dot{x}_0}{\tilde{\omega}_0} e^{\frac{\varphi}{\tan\varphi}}. \quad (4.32)$$

Avec cette relation, la condition de stabilité (4.30) devient

$$\frac{k\dot{x}_0}{2\tilde{\omega}_0} (e^{\frac{\varphi}{\tan\varphi}} - e^{\frac{\varphi-\pi}{\tan\varphi}}) + c \geq 0 \quad (4.33)$$

Toujours pour comparer notre résultat avec la condition (4.13), nous allons linéariser les deux exponentielles présentes autour $\zeta = 0$. En effet, les comportements à la limite de stabilité correspondent à un facteur d'amortissement négatif et proche de 0. De plus,

4.4 Validation complémentaire avec un second prototype

la condition (4.13) ne comporte pas de termes de retard au deuxième ordre. Nous ne gardons donc que les termes du premier ordre et obtenons l'inégalité

$$\dot{x}_{\max} \frac{\pi}{4} \left(b - \frac{kT}{2} \right) + c \geq 0. \quad (4.34)$$

Cette condition est moins conservative que celle sans le terme $\frac{\pi}{4}$ et donc elle vérifie la condition (4.13) sans quantification de [Diolaiti et coll. 2006]. Notre condition de stabilité (4.33) semble donc correcte. Nous utilisons cette condition dans la section suivante afin de comparer les comportements oscillants de notre actionneur à deux étages, avec ceux d'un actionneur à un seul moteur.

La prise en compte de la quantification de la position amène une fonction valeur entière dans l'expression de la force du ressort virtuel. Pour intégrer la valeur entière, il faut intégrer l'équation différentielle sur chaque quantum. La résolution mathématique devient toutefois beaucoup plus complexe et nous n'avons pas abouti pour l'instant à une condition de stabilité utilisable prenant en compte la quantification. Mais ceci ne pénalise pas notre étude puisque nos mesures de position ont une très haute résolution. Nous pouvons donc utiliser la condition (4.33) pour étudier le comportement de notre système.

4.4.3 Résultats expérimentaux

4.4.3.1 Identification

La procédure d'identification est identique à celle utilisée pour le premier prototype. L'ensemble des paramètres identifiés sont résumés dans le tableau 4.2.

TAB. 4.2 – Paramètres identifiés sur le deuxième prototype

Paramètre	Valeur	
k_2	79 10 ⁻⁴	N·m·A ⁻¹
b	87 10 ⁻⁵	N·m·s·rad ⁻¹
J_1	26 10 ⁻⁶	kg·m ²
J_2	64 10 ⁻⁷	kg·m ²
$C_{1\text{frot}}$	44 10 ⁻⁵	N·m
$C_{2\text{frot}}$	13 10 ⁻⁵	N·m
$C_{1\text{max}}$	20 10 ⁻²	N·m

Le coefficient visqueux b est quatre fois plus élevé que celui du premier prototype, mais plus faible que prévu car nous avons pris des marges de sécurité supplémentaires sur l'espace entre l'anneau et les aimants. L'inertie de l'arbre de sortie est également deux fois plus faible. Elle devient même difficile à percevoir lorsque le système est asservi.

Enfin, la plage dynamique est maintenant nettement plus large puisqu'elle couvre plus de 3 ordres de grandeur. Le couple de frottement sur l'arbre de sortie est également plus faible que dans le premier prototype, notamment grâce à une meilleure coaxialité des deux arbres.

4.4.3.2 Limite de stabilité

Afin de comparer les performances de notre actionneur à deux étages avec celles d'un système classique à un seul moteur, nous étudions le comportement oscillant du système constitué d'un moteur puissant (le gros moteur de notre prototype) couplé directement à une poignée légère. Différentes valeurs de ressort virtuel sont simulées et une impulsion de position est envoyée au système. On relève la vitesse initiale maximale pour une réponse proche du cycle limite mais qui ne diverge pas. Les résultats sont indiqués sur la figure 4.20 pour deux valeurs d'échantillonnage différentes, 5 et 1 kHz.

À partir des paramètres identifiés sur ce système ($J = 132 \text{ g}\cdot\text{cm}^2$, $c = 0,35 \text{ mN}\cdot\text{s}/\text{rad}$ et $b = 6 \cdot 10^{-6} \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$), les vitesses maximales prédites par la condition (4.33) et par la formule (4.13) de Diolaiti et coll. sont également tracées. La fréquence mesurée lors des cycles limites est très proche de la fréquence amortie calculée à partir des paramètres⁴.

Les vitesses initiales maximales mesurées suivent la même allure que celles prédites par la condition (4.33) et les valeurs mesurées restent supérieures à celles prédites, ce qui veut dire que le système réel dissipe plus d'énergie que ne le prédit la condition (4.33) à partir des caractéristiques du système. La formule de Diolaiti est plus conservatrice que notre condition puisqu'elle prédit une vitesse maximale encore plus petite.

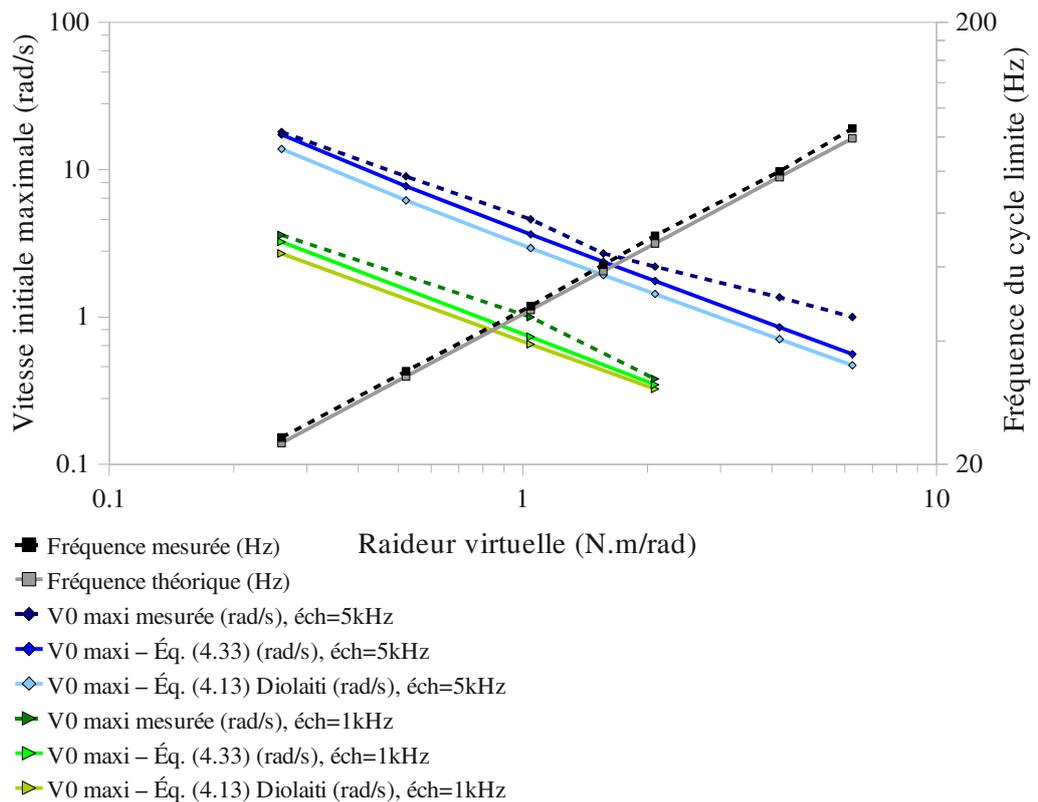


FIG. 4.20 – Résultats expérimentaux sur l'identification de cycles limites sur le moteur RE 35 seul, en fonction de la raideur du ressort virtuel.

4. Les fréquences de cycle limite mesurées à un échantillonnage 1 kHz étaient identiques au cas 5 kHz, c'est pourquoi elles n'ont pas été reportées sur le graphique.

Enfin, les mesures des oscillations à la limite de stabilité effectuées sur le deuxième prototype montrent nettement l'influence du correcteur sur sa stabilité (voir figure 4.21). Le correcteur utilisé pour cette expérience est un correcteur P. L'augmentation du gain du correcteur améliore la stabilité du système puisque la plage de vitesses stables est plus grande.

Toutefois, nous avons été limité dans l'augmentation du gain proportionnel par une résonance structurelle du gros moteur à 710 Hz. La mesure reportée sur la figure 4.21 pour $P=9$ à $k=0,8$ N·m/rad n'a pu être possible que par l'ajout d'un filtre coupe-bande⁵ pour diminuer l'instabilité due à cette résonance structurelle.

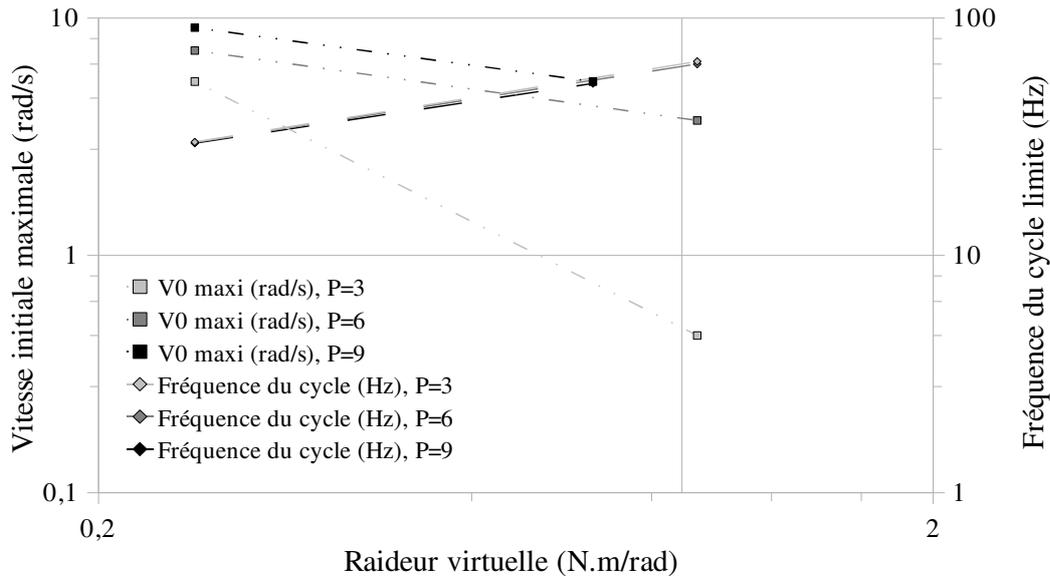


FIG. 4.21 – Résultats expérimentaux sur l'identification de cycles limites sur le deuxième prototype, en fonction de la raideur du ressort virtuel et pour trois valeurs de gain P .

Pour terminer, on constate que la fréquence de l'oscillation limite est plus haute sur le prototype. Par exemple, à $k=1$ Nm/rad, cette fréquence sur le moteur RE 35 seul est de 46 Hz alors que celle sur le prototype est de 65 Hz. Cette fréquence plus élevée montre que la dynamique du petit moteur est dominante dans les comportements oscillants, puisqu'elle reflète la réponse d'un système plus léger.

4.5 Discussion

Le degré de transparence atteint par notre système nous amène à la question des capacités tactiles. Dans cette discussion, nous cherchons à déterminer des spécifications en termes de performances pour une interface haptique qui atteindraient ou dépasseraient nos capacités.

Performances temporelles de la perception tactile au bout d'un doigt Une première approche pour évaluer cette performance est de considérer la capacité humaine de dis-

5. Un filtre Butterworth d'ordre 1 dont les bornes sont 660 et 760 Hz.

crimination des événements de courte durée. Cette valeur est située aux alentours de 30 ms [Pastor et coll. 2004]. D'un autre côté, des études vibrotactiles, réalisées en mesurant le déplacement d'un objet en contact avec la peau, indiquent que des déplacements de l'ordre de 1 μm sont ressentis à 1 kHz [Verrillo 1963]. On obtiendrait donc plutôt une valeur de l'ordre de 1 ms pour la performance recherchée. Cette différence entre les deux valeurs s'explique par le fait que la discrimination est une tâche relativement plus difficile que la détection. La valeur de 1 ms est choisie comme le temps de montée désiré du système.

Limite inférieure de la force détectable au bout d'un doigt Plusieurs travaux se sont intéressés à la discrimination des forces au bout du doigt. Les plus pertinents pour notre étude sont décrits dans [Wheat et coll. 2004]. L'unique étude où les sujets sont soumis à des forces très faibles est rapportée par Doshier et Hannaford [2005]. La manque de variété de ce type d'études peut s'expliquer par la difficulté de générer des stimulus électromécaniques proches du seuil inférieur. Néanmoins, il serait possible d'obtenir la valeur recherchée par une approche indirecte, en utilisant la raideur de la peau et sa plus petite déformation détectable. La raideur tangentielle du bout de doigt est maintenant bien estimée [Pataky et coll. 2005]. Elle est donnée comme égale à $0,2 \cdot 10^3 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$. La plus petite déformation détectable de la peau est au contraire mal connue et il n'existe aucune étude directe. Les études vibrotactiles [Verrillo 1963] suggèrent une valeur de l'ordre de 10^{-7} m . Néanmoins, il est peu crédible que la force d'interaction s'attribue uniquement à la force élastique à une fréquence de plusieurs centaines de Hz : ces fréquences impliqueraient des forces inertielles visqueuses. Statiquement, la déformation minimale ressentie par la peau est très petite, et selon plusieurs sources, [Johansson et Lamotte 1983; Srinivasan et coll. 1990], peut être estimée à 10^{-5} m . Dans ce cas, la force détectable la plus petite serait donc 10^{-2} N pour les basses fréquences. Par conséquent, les forces applicables par l'interface haptique parfaite seraient de 10^{-2} N en statique et 10^{-3} N en dynamique.

Capacités motrices de la main Comme les capacités motrices d'un humain sont extrêmement variables, la façon la plus raisonnable d'estimer l'accélération et la vitesse maximales serait de considérer une tâche spécifique, comme atteindre une cible. Fitts [1954] rapporte que ses sujets mettaient 0,2 s pour atteindre une cible distante de 5 cm de la position initiale. En faisant l'hypothèse d'une trajectoire parabolique, on peut en déduire que l'accélération serait de l'ordre de $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ et la vitesse atteindrait $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Il est clair que des accélérations et des vitesses supérieures peuvent apparaître, particulièrement dans des tâches balistiques. Néanmoins, ces types de tâches n'ont pas besoin d'être pris en compte pour une interface haptique.

Les performances ciblées L'analyse présentée ci-dessus permet de déterminer les spécifications en termes de performances pour une interface haptique parfaite. Le raisonnement qui a conduit à ces valeurs implique que quand la main interagit activement avec la poignée, les forces parasites soient inférieures au seuil de détectabilité. Le tableau 4.3 récapitule ces spécifications.

Il est à noter que l'intervalle dynamique pour la force couvre 4 ordres de grandeur

TAB. 4.3 – Spécifications des performances et leurs équivalents angulaires, dans le cas d'une poignée de $\varnothing 70$ mm.

Quantité	Unité	Valeur	Unité angulaire	Valeur
Masse ^a	kg	$0,5 \cdot 10^{-2}$	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$	$61 \cdot 10^{-7}$
Viscosité ^b	$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	$0,5 \cdot 10^{-1}$	$\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1}$	$61 \cdot 10^{-6}$
Frottement ^c	N	$1 \cdot 10^{-3}$	$\text{N}\cdot\text{m}$	$35 \cdot 10^{-6}$
Temps de montée ^d	s	$1 \cdot 10^{-3}$		
Force Max ^e	N	5	$\text{N}\cdot\text{m}$	$17,5 \cdot 10^{-2}$

^a est obtenu par l'accélération maximale et la force statique minimale détectable.

^b est obtenu par la vitesse maximale et la force statique minimale détectable.

^c est obtenu par la force dynamique minimale détectable (transitoire inverse).

^d obtenu par des performances vibrotactiles.

^e obtenu par le bon sens.

entre les limites inférieure et supérieure. Un moteur à courant continu, même de bonne qualité, ne serait capable de fournir que 2 ordres de grandeur. Il est donc indispensable de proposer une conception à étages pour atteindre les spécifications requises.

Comme on peut le voir en inspectant le tableau 4.2 page 107 et le tableau 4.3, notre prototype atteint presque ces spécifications, notamment en ce qui concerne l'inertie perçue et la force maximale. Les frottements résiduels sont principalement dus aux brosses dans le petit moteur. Ces frottements sont en général de l'ordre de 10^{-4} N pour ce type de moteur. Une solution possible pour diminuer ces frottements est d'utiliser des technologies sans brosse, comme les moteurs galvanométriques ou bien les moteurs à angle de couple restreint.

4.6 Conclusion et perspectives

Ce chapitre s'est intéressé à la conception d'une interface haute fidélité. Il est apparu que les larges plages de dynamique des phénomènes nanophysiques ne peuvent pas être ressenties par les interfaces classiques du fait de leur faible capacité dans ce domaine. Une interface basée sur deux moteurs et un couplage visqueux à courants de Foucault est proposée. Une simulation multiphysique de son comportement met en avant les critères de conception d'un tel actionneur. De même, une analyse de la performance en boucle fermée de notre actionneur prédit la fréquence et l'amplitude des cycles limites. Les premiers résultats expérimentaux ont mis à jour une résonance structurelle qui nécessite d'être compensée de façon adéquate. Ces résultats montrent également que cette interface semble avoir des capacités de perception très importantes.

Il reste encore beaucoup d'études à effectuer pour certifier son comportement. Par exemple, d'autres expériences montrant l'apport du prototype comme la détection de pic ou d'échelon, à une vitesse d'exploration donnée pourront être développées. Son application dans le domaine des nanosciences reste aussi à étudier même si les premiers tests sont prometteurs. De même, l'étude du correcteur et de la commande en général

reste ouverte pour compenser la résonance structurelle.

Cet actionneur a fait l'objet d'un brevet et de nombreuses applications au concept d'actionneur multi-étages couplés visqueusement existent en instrumentation (par exemple les pots vibrants), dans les transports (les suspensions actives ainsi que la motorisation électromécanique des sabots de frein à disque), en robotique (des systèmes d'assemblage haute performance à efforts de contact contrôlés) et en aérospatiale (des systèmes de pointage asservis, antenne ou radar, à haute performance).

Conclusion

CETTE thèse a abordé la problématique de la perception et d'une interface haptique pour les nanosciences. Pour atteindre cet objectif, nous avons proposé d'aborder cette recherche sous l'angle des utilisateurs potentiels. Ainsi, nous avons étudié en détail la perception utilisateur à l'aide d'un ensemble de tests, des expériences ciblées tâche (où la perception des phénomènes n'est pas primordiale comparée à la résolution de la tâche) et d'autres orientées compréhension des phénomènes dans une démarche pédagogique.

Les études détaillées ont montré un certain nombre d'apports :

- une plate-forme d'évaluation simulant les tâches de manipulations téléopérées expérimentées dans notre équipe et les modèles des phénomènes physiques développés ;
- la définition d'assistances haptiques dédiées à des stratégies complexes de manipulation comme le roulement ;
- la recherche d'analogies pertinentes pour les phénomènes nanophysiques ;
- une méthodologie d'évaluation utilisateur simplifiée pour les tâches et approfondie pour le test pédagogique ;
- des analyses de ces évaluations comme l'importance des assistances dans un contexte applicatif non intuitif, la pertinence des analogies pour débiter la phase de compréhension des phénomènes et l'influence du retour haptique pour percevoir des modifications de raideur ou l'amplitude des forces impliquées à cette échelle.

La seconde partie de ce travail a abordé la perception utilisateur du point de vue de la conception d'une interface haute fidélité. Il est en effet apparu que les phénomènes spécifiques engendrés (et leurs propriétés de haute dynamique, de faible inertie) ne pouvaient pas être ressentis du fait aussi de la faible capacité en plage dynamique des interfaces classiques. Une interface basée sur le couplage de deux moteurs est ainsi proposée et nos contributions dans ce domaine concernent principalement :

- la synthèse d'un actionneur basé sur un couplage original du point de vue de la littérature, un couplage visqueux à courants de Foucault ;
- la simulation multiphysique de son comportement mettant en avant les critères de conception de cet actionneur ;
- la mise en évidence d'une résonance structurelle, encore inconnue de la littérature, qui est interne aux moteurs à courant continu fréquemment utilisés dans les interfaces haptiques et qui nécessite d'être compensée ;
- une analyse de la performance en boucle fermée de notre actionneur avec la théorie des oscillateurs dont les résultats permettent de retrouver les compromis bien connus sur les systèmes à retour de force, liant le retard et les caractéristiques du système à sa stabilité ;
- la prédiction de la fréquence et de l'amplitude des cycles limites ;
- la perspective d'approcher ou de dépasser les besoins dérivés des capacités motrices et perceptuelles de la main humaine.

Ce travail a ouvert de nouvelles pistes en termes d'évaluation utilisateurs. Il semble

clair que les tests sont extrêmement complexes à construire. Les conclusions permettent ainsi d'appréhender si l'évaluation des propriétés recherchées est effective. Un travail itératif autour de ces tests semble aujourd'hui nécessaire pour améliorer encore le questionnement et les conclusions développées.

Du point de vue interface, il va s'agir d'évaluer, outre les nombreuses applications possibles, les potentialités pour la perception du nanomonde. La mise en place des tests est apparue trop longue à la fin de ma thèse pour effectuer cette démarche même si les premiers résultats sont prometteurs.

Un aspect plus fondamental de l'haptique pour les nanosciences concerne d'autres appareils que le microscope à force atomique. Ma thèse est entièrement centrée sur cet instrument scientifique. Autant celui-ci est aujourd'hui d'un apport considérable en nanotechnologies, autant son utilisation que ce soit dans un cadre de manipulation ou de perception des phénomènes semble discutable. La notion même de la poutre comme capteur d'efforts filtrant est ainsi à rediscuter. Pour appréhender les phénomènes, elle ne semble peut être pas la plus adaptée pour des personnes sans connaissance du domaine. De nouveaux champs apparaissent comme la manipulation sans contact, par exemple les pinces optiques ou magnétiques. Une autre alternative est le système à deux doigts à spectroscopie de force dont l'intuitivité en termes de couplage apparaît plus simple pour un utilisateur novice. L'haptique pour les nanosciences est un domaine ouvert et en pleine évolution. . .

Annexe A

Liste des symboles

Cette annexe recense l'ensemble des symboles utilisés dans ce mémoire.

Symbole	Description	Unités
a	Épaisseur des aimants	m
b	Coefficient visqueux du coupleur	N m s rad^{-1}
	Amortissement visqueux du système	N m s rad^{-1}
B	Champ magnétique	T
	Amortissement visqueux virtuel	N m s rad^{-1}
B_r	Champ magnétique rémanent des aimants	T
c_v	Coefficient en effort de l'assistance	–
c	Force de frottement sec dans le système	N
C, C_{coupleur}	Couple de freinage du coupleur	N
C_1, C_2	Couples appliqués par les moteurs	N
$C_{1\text{frot}}, C_{2\text{frot}}$	Couples de frottement	N
$C_{1\text{max}}, C_{2\text{max}}$	Couples de saturation utilisés pour la commande	N
Δ	Résolution de la quantification de la position	m
d	Hauteur des aimants	m
ϵ_0	Permittivité du vide ($8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$)	F m^{-1}
e	Épaisseur de l'induit (anneau en aluminium)	m
F	Force normale	N
F_{po}	Force de <i>pull-off</i> ou force de décollement	N
F_v	Force mesurée à la position de repos virtuelle	N
γ	Énergie de surface	J m^{-2}
h	Distance entre la pointe de la poutre et le substrat	m
h_{si}	Distance pointe–substrat lors du saut de contact	m
h_w	Épaisseur de la couche d'eau sur les surfaces	m
H	Constante de Hamaker	J
i_1, i_2	Courants dans les moteurs	A
j	Jeu entre l'anneau en aluminium et les aimants	m
J_{an}	Inertie de l'anneau en aluminium	kg m^2
J_r	Inertie du rotor de M1 et du porte-aimants	kg m^2

Annexe A Liste des symboles

J_1	Inertie du 1 ^{er} étage (rotor de M1, inducteur)	kg m^2
J_2	Inertie du 2 ^e étage (rotor de M2, induit, poignée)	kg m^2
k	Raideur de la poutre à son extrémité	N m^{-1}
	Raideur du mur ou du ressort virtuel simulé	N m^{-1}
k_v	Raideur du ressort virtuel de l'assistance	N m^{-1}
k_1, k_2	Constantes de couple des moteurs	N m A^{-1}
K	Rigidité relative ou module de Young effectif	GPa
λ	Paramètre d'élasticité	–
l	Largeur des aimants	m
L_1, L_2	Inductances dans les moteurs	H
N	Nombre de boucles magnétiques ($2N$ aimants)	–
ω_0	Fréquence propre	rad s^{-1}
ρ_a	Masse volumique des aimants	kg m^{-3}
ρ_f	Masse volumique du fer	kg m^{-3}
ρ_{an}	Masse volumique de l'anneau en aluminium	kg m^{-3}
R	Rayon de l'objet sphérique	m
	Rayon moyen de l'anneau en aluminium	m
R_1, R_2	Résistances des bobinages des moteurs	Ω
σ	Conductivité électrique de l'anneau en aluminium	$\Omega^{-1} \text{m}^{-1}$
σ_0	Densité de charge surfacique	C m^{-1}
s	Opérateur de Laplace	–
S_{mag}	Surface de l'anneau où B est normal à $\hat{\theta}$	m^2
θ_1, θ_2	Positions angulaires des arbres	rad
T	Retard pur	s
T_e	Période d'échantillonnage	s
u_1, u_2	Tensions électriques aux bornes des moteurs	V
V	Tension électrique	V
W	Travail d'adhésion ou travail de cohésion	J
ζ	Flèche de la poutre	m
	Facteur d'amortissement	–
ζ_a	Flèche de la poutre durant l'approche	m
ζ_r	Flèche de la poutre durant le retrait	m
z	Hauteur de la base de la poutre	m
z_{si}	Hauteur z lors du saut de contact	m

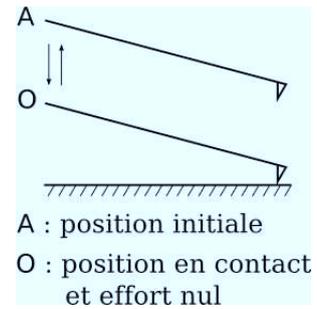
Annexe B

Questionnaires de l'évaluation pédagogique

Les quatre pages suivantes présentent le questionnaire donné aux sujets dans les conditions avec la représentation Poutre. La version donnée aux sujets dans les conditions avec la représentation Analogie diffère seulement pour la deuxième page où un paragraphe introduit l'analogie aimant-ressort. Seule cette page est ajoutée à la suite du questionnaire version Poutre.

2 Questionnaire

2.1 Essai 1



Consigne : Approchez la poutre de l'échantillon (sol) jusqu'à établir le contact et atteindre la configuration en O. Puis revenez à la position initiale de la poutre (en A).

Vous pouvez répéter cette opération autant de fois que souhaité.

Expliquez les phénomènes se produisant pendant l'approche/retrait de la poutre (comportement de la poutre, forces en présence, etc.).

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

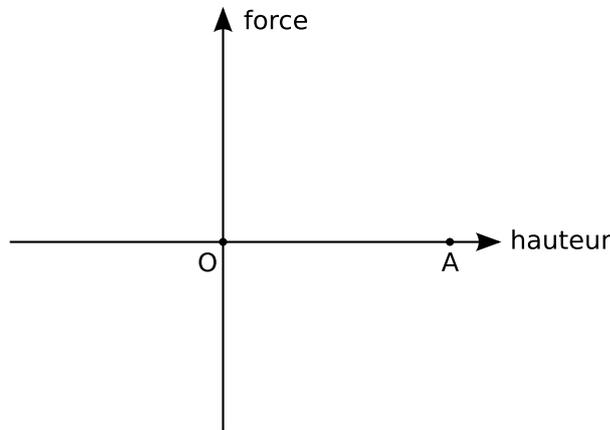
.....

.....

.....

.....

Essayez de dessiner une courbe représentant l'allure de la force appliquée par la surface sur la pointe en fonction de la hauteur.



Choisissez la courbe qui correspond au mieux au comportement de la poutre. Notez votre confiance dans ce choix de 1 à 7 (1 = très incertain ; 7 = certain) :

courbe n°. . . , confiance : . . . / 7

Commentaires :

.....

2.2 Essai 2

Les conditions expérimentales sont modifiées légèrement.

Expliquez la(les) différence(s) perçue(s) par rapport à l'essai 1.

.....
.....
.....

Quel(s) paramètre(s) physique(s) a pu changer ?

.....
.....

Choisissez la courbe qui correspond au mieux au comportement de la poutre. Notez votre confiance dans ce choix de 1 à 7 (1 = très incertain ; 7 = certain) :
courbe n°..., confiance :.../7

Commentaires :.....
.....

2.3 Essai 3

Les conditions expérimentales sont modifiées légèrement.

Expliquez la(les) différence(s) perçue(s) par rapport à l'essai 1.

.....
.....
.....

Quel(s) paramètre(s) physique(s) a pu changer ?

.....
.....

Choisissez la courbe qui correspond au mieux au comportement de la poutre. Notez votre confiance dans ce choix de 1 à 7 : courbe n°..., confiance :.../7

Commentaires :.....
.....

2.4 Essai 4

Les conditions expérimentales sont modifiées légèrement.

Expliquez la(les) différence(s) perçue(s) par rapport à l'essai 1.

.....
.....
.....

Quel(s) paramètre(s) physique(s) a pu changer ?

.....
.....

Choisissez la courbe qui correspond au mieux au comportement de la poutre. Notez votre confiance dans ce choix de 1 à 7 : courbe n°..., confiance :.../7

Commentaires :.....
.....

2.5 Test d'un système ressort-aimant

Prenez le système ressort-aimant et approchez le d'une surface métallique.

Choisissez la courbe qui correspond au mieux au comportement de ce système. Notez votre confiance dans ce choix de 1 à 7 : courbe n°. . . , confiance : . . . /7

Commentaires :

Trouvez-vous que le comportement du système ressort-aimant est proche de celui de la poutre AFM virtuelle? OUI/NON

Trouvez-vous que les forces ressenties sur le système ressort-aimant ont le même profil que celles ressenties en virtuel? OUI/NON

Commentaires :

2.6 Test comparatif des retours de Réalité Virtuelle

Nous vous proposons une représentation graphique basée sur l'analogie précédente, où la poutre est représentée par un ensemble composé d'une tige, d'un ressort et d'un aimant sans masse.

Testez successivement les quatres simualtions possibles, puis notez les de 1 à 7 (1 = très mauvais ; 7 = très bon) selon les critères suivants :

	avec haptique		sans haptique	
	poutre	aimant + ressort	poutre	aimant + ressort
compréhension globale des phénomènes présents				
perception des efforts (présence, variations)				
appréciation globale				

Classez par ordre de préférence (1 = le plus apprécié ; 4 = le moins apprécié) les simulations que vous choisiriez pour les tâches suivantes :

	avec haptique		sans haptique	
	poutre	aimant + ressort	poutre	aimant + ressort
nano-manipulation				

Explications :

expliquer à quelqu'un le phénomène AR				
---------------------------------------	--	--	--	--

Explications :

Toujours pour expliquer à quelqu'un, trouvez-vous utile d'utiliser le système ressort-aimant réel?

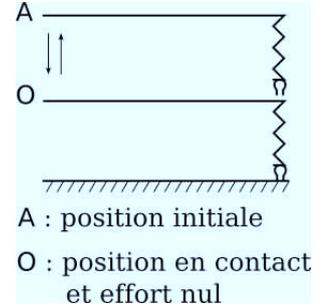
Mieux que les simulations virtuelles présentées?

Le comportement de la poutre AFM est en fait similaire à celui d'un aimant sans masse attaché à un ressort au bout d'une tige indéformable, que l'on approcherait d'une surface métallique. Nous vous proposons une représentation graphique basée sur cette analogie dans la simulation. La poutre est représentée par un ensemble composé d'une tige, d'un ressort et d'un aimant.

2 Questionnaire

2.1 Essai 1

Consigne : Approchez la poutre de l'échantillon (sol) jusqu'à établir le contact et atteindre la configuration en O. Puis revenez à la position initiale de la poutre (en A).
 Vous pouvez répéter cette opération autant de fois que souhaité.



Expliquez les phénomènes se produisant pendant l'approche/retrait de la poutre (comportement de la poutre, forces en présence, etc.).

.....

.....

.....

.....

.....

.....

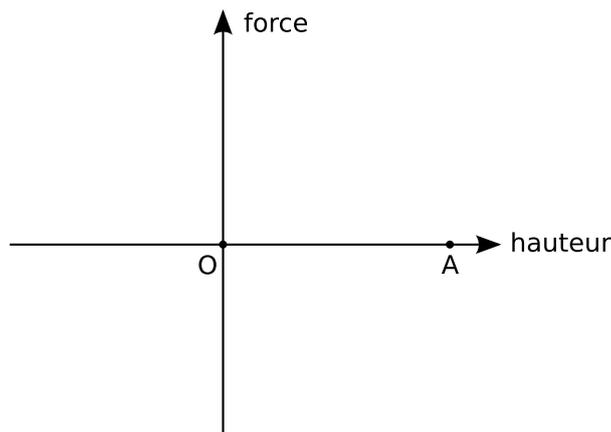
.....

.....

.....

.....

Essayez de dessiner une courbe représentant l'allure de la force appliquée par la surface sur l'aimant en fonction de la hauteur.



Choisissez la courbe qui correspond au mieux au comportement de la poutre. Notez votre confiance dans ce choix de 1 à 7 (1 = très incertain ; 7 = certain) :

courbe n°. . . , confiance : . . . / 7

Commentaires :

.....

Annexe C

Spécifications techniques

Cette annexe recense les principales caractéristiques techniques des éléments constitutifs des dispositifs à retour d'effort décrits au chapitre 4.

C.1 Capteurs

Les codeurs incrémentaux sont des codeurs Mercury M1800 utilisés avec des disques à 4096 incréments. Le codeur M1800-20 interpole 20 fois, donnant 81 920 incréments par tour. Le codeur M1800-400 interpole 400 fois, donnant 1 638 400 incréments par tour. La position est donnée par deux signaux numériques en quadrature.

C.2 Amplificateurs

Les amplificateurs contrôlant le courant dans les moteurs sont des amplificateurs linéaires de courant, LCAM, fabriqués par Quanser, Canada. Le courant peut être asservi par un correcteur PI. Les gains de ce correcteur doivent être adaptés pour chaque moteur, en changeant les valeurs d'une résistance et d'un condensateur dans l'amplificateur.

C.3 Acquisition et commande

Une carte National Instruments PCI-6221 contrôlée avec les pilotes temps réel du projet Comedi fait l'acquisition des mesures en quadrature des codeurs incrémentaux et commande en sortie les amplificateurs de courant. Le contrôleur est codé par un générateur de code temps-réel pour le système d'exploitation RTAI-Linux, à partir d'un schéma-bloc de la commande, implémenté avec ScicosLab, un logiciel libre de calcul scientifique développé par l'INRIA. Une contribution a été apportée au projet RTAI-Lab pour implémenter l'acquisition des signaux de codeurs incrémentaux.

C.4 Second prototype

Les moteurs utilisés sont des moteurs à courant continu et rotor sans fer, fabriqués par Maxon Motor ; le gros moteur est un RE 35, modèle 273754, et le petit est un RE 16, modèle 118698. Les aimants sont des parallélépipèdes de dimensions $2 \times 2 \times 10$ mm en terres rares (néodyme-fer-bore) fournis par Neotexx.

Bibliographie

- J.J. ABBOTT et A.M. OKAMURA : Effects of position quantization and sampling rate on virtual-wall passivity. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 21(5):952–964, Oct. 2005. 102
- M. AMMI et A. FERREIRA : Robotic assisted micromanipulation system using virtual fixtures and metaphors. Dans *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 454–460, 2007. 6, 13
- N. ANDO, M. OHTA et H. HASHIMOTO : Micro teleoperation with haptic interface. Dans *Proceedings of the 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, volume 1, pages 13–18, 2000. 6, 9
- P. ARCARA et C. MELCHIORRI : *Advances in control of articulated and mobile robots*, volume 10 de *Springer Tracts in Advanced Robotics*, chapitre Comparison and improvement of control scheme for robotic teleoperation systems with time delay, pages 39–60. Springer, 2004. 6
- W. J. BALLANTYNE : Simple scaling laws for permanent magnet motors. *Spar Journal Of Engineering and Technology*, 2(1):50–57, 1993. 82
- F. BARA, E. GENTAZ, P. COLÉ et L. SPRENGER-CHAROLLES : The visuo-haptic and haptic exploration of letters increases the kindergarten-children’s understanding of the alphabetic principle. *Cognitive development*, 19(3):433–449, 2004. 16
- A. BICCHI, M. PESHKIN et J. E. COLGATE : Safety for physical human-robot interaction. Dans *Springer Handbook of Robotics*, chapitre 57, pages 1335–1348. Springer-Verlag, 2008. 83
- 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*, 2009a. 8
- A. BOLOPION, B. CAGNEAU, S. REDON et S. RÉGNIER : Haptic feedback for molecular simulation. Dans *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2009b. accepted. 17
- M. BOUKHNIFER : *Architectures de commandes bilatérales pour un système de micro-téléopération*. Thèse de doctorat, Laboratoire Vision et Robotique, 2005. 10
- B. BOULET : Modeling and control of a robotic joint with inparallel redundant actuators. Mémoire de D.E.A., Department of Electrical Engineering, McGill University, Montréal, Qc, Canada, 1990. 83

Bibliographie

- F. P. BROOKS, JR., M. OUH-YOUNG, J. J. BATTER et P. J. KILPATRICK : Project grope—haptic displays for scientific visualization. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 24(4):177–185, août 1990. [16](#), [19](#)
- Linda BUSSELL : Force feedback and student reasoning. Dans *Proceedings of the 3rd Conference on Interaction Design and Children (IDC'04)*, pages 117–118, Maryland, NY, USA, juin 2004. ACM. ISBN 1-58113-791-5. [79](#)
- C. CADOZ, A. LUCIANI et J.-L. FLORENS : Cordis-anima : A modeling and simulation system for sound and image synthesis – the general formalism. *Computer Music Journal*, 17(1):19–29, 1993. [34](#)
- G. CAMPION, A. H. GOSLINE et V. HAYWARD : Passive viscous haptic textures. Dans *Proceedings of the 16th Symposium on Haptic Interfaces For Virtual Environment And Teleoperator Systems*, pages 379–380, 2008. [85](#)
- Robert W. CARPICK, D. Frank OGLETREE et Miquel SALMERON : A general equation for fitting contact area and friction vs load measurements. *Journal of Colloid and Interface Science*, 211(2):395–400, mars 1999. [34](#)
- M. CHEW, G.-S. HONG et W. ZHOU : Series damper actuator : a novel force/torque control actuator. Dans *Proceedings of the 4th IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots*, pages 473–478, 2004. [84](#)
- J.E. COLGATE et G. SCHENKEL : Passivity of a class of sampled-data systems : application to haptic interfaces. Dans *American Control Conference, 1994*, volume 3, pages 3236–3240, juin 1994. [102](#), [105](#)
- F. CONTI, O. KHATIB et C. BAUR : A hybrid actuation approach for haptic devices. Dans *Proceedings of the Second Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics 2007*, pages 367–372. IEEE, 2007. [84](#)
- B. DAUNAY, A. ABBACI, A. MICAELLI et S. REGNIER : The wave variables, a solution for stable haptic feedback in molecular docking simulations. *Innovative Algorithms and Techniques in Automation, Industrial Electronics and Telecommunications*, pages 67–73, 2007. [17](#)
- N. DIOLAITI, G. NIEMEYER, F. BARBAGLI et J.K. SALISBURY : Stability of haptic rendering : Discretization, quantization, time delay, and coulomb effects. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 22(2):256–268, avril 2006. [102](#), [103](#), [106](#), [107](#)
- Fabien DIONNET : *Télé-micro-manipulation par adhésion*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, Paris, France, 2005. [24](#), [36](#)
- W. H. DOHERTY : A new high efficiency power amplifier for modulated waves. *Proceedings of the IRE*, 24(9):1163–1182, 1936. [85](#)
- Jesse DOSHER et Blake HANNAFORD : Human interaction with small haptic effects. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 14(3):329–344, 2005. [110](#)

- C. ENGLISH et D. RUSSELL : Implementation of variable joint stiffness through antagonist actuation using rolamite springs. *Mechanisms and Machine Theory*, 34(1):27–40, 1999. 83
- S. FAHLBUSCH, A. SHIRINOV et S. FATIKOW : AFM-based micro force sensor and haptic interface for a nanohandling robot. Dans *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*, volume 2, pages 1772–1777, 2002. 12
- N. D. FINKELSTEIN, W. K. ADAMS, C. J. KELLER, P. B. KOHL, K. K. PERKINS, N. S. PODOLEFSKY, S. REID et R. LEMASTER : When learning about the real world is better done virtually : A study of substituting computer simulations for laboratory equipment. *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.*, 1(1):010103, octobre 2005. 20
- P. M. FITTS : The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47(6):381–391, 1954. 110
- M. GAUTHIER, S. RÉGNIER, P. ROUGEOT et N. CHAILLET : Analysis of forces for micromanipulations in dry and liquid media. *Journal of Micromechatronics*, 3(3):389–413, 2005. 5
- D. GENTNER : Structure-mapping : A theoretical framework for analogy. *Cognitive Science*, 7(2):155–170, 1983. 74
- J.J. GIL, E. SANCHEZ, T. HULIN, C. PREUSCHE et G. HIRZINGER : Stability boundary for haptic rendering : Influence of damping and delay. Dans *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 124–129, avril 2007. 103
- M. GOLDFARB : Dimensional analysis and selective distortion in scaled bilateral telemanipulation. Dans *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1609–1614, 1998. 7
- A. H. GOSLINE et V. HAYWARD : Eddy current brakes for haptic interfaces : Design, identification, and control. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 13(6):669–677, 2008. 86, 87, 97, 99
- F. GOSSELIN : Optimisation des interfaces haptiques : problèmes, méthodes, applications. Dans *Congrès français de Mécanique*, 2005. 39
- D. I. GROW, L. N. VERNER et A. M. OKAMURA : Educational haptics. Dans *Proceedings of the AAAI Spring Symposium on Robots and Robot Venues : Resources for AI Education*, Stanford, CA, USA, mars 2007. 16
- M. GUTHOLD, M.R. FALVO, W.G. MATTHEWS, S. PAULSON, S. WASHBURN, D.A. ERIE, R. SUPERFINE, F.P. Jr. BROOKS et R.M. TAYLOR II : Controlled manipulation of molecular samples with the nanomanipulator. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 5(2):189–198, 2000. 11
- D.S. HALIYO : *Les forces d'adhésion et les effets dynamiques pour la micromanipulation*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, Paris, France, 2002. 24

Bibliographie

- E. HARVEY et C. GINGOLD : Haptic representation of the atom. Dans *Proceedings of the International Conference on Information Visualization*, pages 232–235, London, UK, juillet 2000. IEEE Computer Society. ISBN 0-7695-0743-3/00. 16
- V. HAYWARD : Toward a seven axis haptic interface. Dans *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, volume 3, pages 133–139, 1995. 81
- V. HAYWARD et O. R. ASTLEY : Performance measures for haptic interfaces. Dans G. GIRALT et G. HIRZINGER, éditeurs : *Robotics Research : The 7th International Symposium*, pages 195–207, Heidelberg, 1996. Springer Verlag. 81, 83
- V. HAYWARD et K. E. MACLEAN : Do it yourself haptics, part-i. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 14(4):88–104, 2007. 7, 89
- Mark A. HEALD : Magnetic braking : Improved theory. *American Journal of Physics*, 56(6):521–522, 1988. 97
- R. L. HOLLIS, S. E. SALCUDEAN et A. Peter ALLAN : A six-degree-of-freedom magnetically levitated variable compliance fine-motion wrist : Design, modeling, and control. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7(3):320–332, 1991. 83
- R.L. HOLLIS, S. SALCUDEAN et D.W. ABRAHAM : Toward a tele-nanorobotic manipulation system with atomic scale force feedback and motion resolution. Dans *Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, pages 115–119, 1990. 9
- J. ISRAELACHVILI : *Intermolecular and Surface Forces*. ACADEMIC PRESS, 1991. 4, 5
- F. JANABI-SHARIFI, V. HAYWARD et C.-S.J. CHEN : Discrete-time adaptive windowing for velocity estimation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 8(6):1003–1009, novembre 2000. 90
- R. S. JOHANSSON et R. H. LAMOTTE : Tactile detection thresholds for a single asperity on an otherwise smooth surface. *Somatosensory and Motor Research*, 1(1):21–31, 1983. 110
- M. G. JONES, T. ANDRE, R. SUPERFINE et R. TAYLOR : Learning at the nanoscale : The impact of students’ use of remote microscopy on concepts of viruses, scale, and microscopy. *Journal of Research in Science Teaching*, 40(3):303–322, 2003. 18, 19
- M. G. JONES, J. MINOGUE, T. R. TRETTER, A. NEGISHI et R. TAYLOR : Haptic augmentation of science instruction : Does touch matter ? *Science Education*, 90:111–123, janvier 2006. 18, 19
- O. KHATIB : Reduced effective inertia in macro-/mini-manipulator systems. Dans H. MIURA et S. ARIMOTO, éditeurs : *Robotics Research 5*, pages 279–284. MIT Press, 1990. 83

- M. LAURIA, M.-A. LEGAULT, M.-A. LAVOIE et F. MICHAUD : Differential elastic actuator for robotic interaction tasks. Dans *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 3606–3611, 2008. 83
- G. LI, N. XI, M. YU et W.-K. FUNG : Augmented reality system for real-time nanomanipulation. Dans *Proceedings of the Third IEEE Conference on Nanotechnology*, volume 2, pages 64–67, 2003. 10
- G. LI, N. XI, M. YU et W.-K. FUNG : Development of augmented reality system for AFM-based nanomanipulation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 9 (2):358–365, 2004. 10
- F. MARCHI, S. MARLIERE, D. URMA, J.-L. FLORENS, J. CHEVRIER, C. CADOZ et A. LUCIANI : Interactive learning of nanophysics phenomena. Dans *Proceedings of the m-ICTE2005*, pages 510–515, Cáceres, Spain, juin 2005. 18, 20, 79
- S. MARLIÈRE, D. URMA, J.-L. FLORENS et F. MARCHI : Multi-sensorial interaction with a nano-scale phenomenon : the force curve. Dans *Proceedings of the EuroHaptics 2004*, pages 246–252, Munich, Germany, juin 2004. 19, 31
- Sylvain MARLIÈRE : *Conception et réalisation d'un nouvel outil à réalité mixte et retour d'effort pour toucher et créer les nanomondes*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, février 2006. 20, 21, 22
- D. MAUGIS : Adhesion of spheres : the JKR-DMT transition using a Dugdale model. *Journal of Colloid and Interface Science*, 150(1):243–269, 1992. 4, 34
- A. MICAELLI : *Téléopération et télérobotique, Traité IC2*, chapitre Chapitre 6 Asservissement et loi de couplage en téléopération. Hermès Science, 2002. 6
- J. MILES : Applications and limitations of mechanical-electrical analogies. *Journal of the Acoustical Society of America*, 14(3):183–192, 1943. 83
- J. MINOGUE et M. G. JONES : Haptics in education : exploring an untapped sensory modality. *Review of Educational Research*, 76(3):317–348, 2006. 16
- J. MINOGUE, M. G. JONES, B. BROADWELL et T. OPPEWALL : The impact of haptic augmentation on middle school students' conceptions of the animal cell. *Virtual Reality*, 10(3):293–305, 2006. 18, 19
- J. B. MORRELL et J. K. SALISBURY : In pursuit of dynamic range : Using parallel coupled actuators to overcome hardware limitations. Dans *Experimental Robotics IV : the 4th International Symposium, 1995*, volume 223 de *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, pages 263–273. Springer-Verlag, 1997. 84
- K. OGATA : *Discrete-time control systems, second edition*. Prentice Hall, 1995. 8
- A. M. OKAMURA, C. RICHARD et M. R. CUTOSEY : Abstract feeling is believing : Using a force-feedback joystick to teach dynamic systems. *Journal of Engineering Education*, juillet 2002. 16

Bibliographie

- C. D. ONAL et M. SITTI : A scaled bilateral control system for experimental one-dimensional teleoperated nanomanipulation. *The International Journal of Robotics Research*, 28(4):484–497, 2009. 6, 15
- M.K. ORGILL et G. BODNER : What research tells us about using analogies to teach chemistry. *Chemistry Education : Research and Practice*, 5(1):15–32, 2004. 20
- E. OSTERTAG : *Systèmes et asservissements continus. Modélisation, analyse, synthèse des lois de commande*. Ellipses, 2004. 8
- M. A. PASTOR, B. L. DAY, E. MACALUSO, K. J. FRISTON et R. S. J. FRACKOWIAK : The functional neuroanatomy of temporal discrimination. *The Journal of Neuroscience*, 24(10):2585–2591, 2004. 110
- T. C. PATAKY, M. L. LATASH et V. M. ZATSIORSKY : Viscoelastic response of the finger pad to incremental tangential displacements. *Journal of Biomechanics*, 38(7):1441–1449, 2005. 110
- 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. Dans *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference*, pages 171–178, Charlotte, NC, USA, mars 2007. 17, 18, 19, 78
- N. S. PODOLEFSKY et N. D. FINKELSTEIN : Use of analogy in learning physics : The role of representations. *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.*, 2(2):020101, juillet 2006. 20, 78
- G. A. PRATT et M. M. WILLIAMSON : Series elastic actuators. Dans *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 399–406, 1995. 83
- M. REINER : Conceptual construction of fields through tactile interface. *Interactive Learning Environments*, 7(1):31–55, avril 1999. 16
- C. RICHARD, A. M. OKAMURA et M. R. CUTKOSKY : Getting a feel for dynamics : Using haptic interface kits for teaching dynamics and controls. Dans *Proceedings of the ASME Dynamics Systems and Control Division*, volume 61, pages 153–157, Dallas, TX, USA, novembre 1997. ASME IMECE 6th Annual Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems. 17
- Y. ROLLOT : *Micro-manipulations par adhésion : Modélisations dynamiques et expérimentation*. Thèse de doctorat, , Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, Paris, France, 2000. 35
- H. ROUANET, B. LE ROUX et M.-C. BERT : *Statistique en sciences humaines : procédures naturelles*. Dunod, 1987. 66
- S. E. SALCUDEAN et C. AN : On the control of redundant coarse-fine manipulators. Dans *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1834–1840, 1989. 83

- G. SANKARANARAYANAN, S. WEGHORST, M. SANNER, A. GILLET et A. OLSON : Role of haptics in teaching structural molecular biology. Dans *Proceedings of the International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS'03)*, pages 363–366, Los Angeles, CA, USA, mars 2003. IEEE Computer Society. ISBN 0-7695-1890-7. **16**
- K. SATHIAN : Perceptual learning. *Current science*, 75(5):451–457, septembre 1998. **16**
- C.M. SAUER, W.A. HASTINGS et A.M. OKAMURA : Virtual environment for exploring atomic bonding. Dans *Proceedings of the EuroHaptics 2004*, pages 5–7, Munich, Germany, juin 2004. **16**
- M. SAUSSE-LHERNOULD, A. DELCHAMBRE, S. RÉGNIER et P. LAMBERT : Electrostatic forces in micromanipulations : review of analytical models and simulations including roughness. *Applied Surface Science*, 253(14):6203–6210, mai 2007. **33**
- A. SCHIRMEISEN, B. ANCZYKOWSKI et H. FUCHS : *Springer handbook of nanotechnology*, chapitre Dynamic Modes of Atomic Force, pages 737–766. Springer, 2ème édition, 2007. **31**
- A. SHARON et D. E. HARDT : Enhancement of robot accuracy using endpoint feedback and a macro-micro manipulator system. Dans *Proceedings American Control Conference*, pages 1836–1842, 1984. **83**
- A. SHARON, N. HOGAN et D. E. HARDT : High bandwidth force regulation and inertia reduction using a macro/micro manipulator system. Dans *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 126–132, 1988. **83**
- A. SHIRINOV, J. KAMENIK et S. FATIKOW : Haptic interface for a nanohandling robot. *Assembly Automation*, 24(1):78–87, 2004. **12**
- E. SIMEU et D. GEORGES : Modeling and control of an eddy current brake. *Control Engineering Practice*, 4(1):19–26, 1996. **96**
- M. A. SRINIVASAN, J. M. WHITEHOUSE et R. H. LAMOTTE : Tactile detection of slip : surface microgeometry and peripheral neural codes. *Journal of Neurophysiology*, 63(6):1323–1332, 1990. **110**
- L. STOCCO et S. E. SALCUDEAN : A coarse-fine approach to force-reflecting hand controller design. Dans *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 404–410, 1996. **83**
- S. STRAMIGIOLI et V. DUINDAM : Variable spatial springs for robot control applications. Dans *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1906–1911, 2001. **83**
- S. SUGANO, S. TSUTO et I. KATO : Force control of the robot finger joint equipped with mechanical compliance adjuster. Dans *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2005–2013, 1992. **83**

Bibliographie

- R.M. TAYLOR II, J. CHEN, S. OKIMOTO, N. LLOPIS-ARTIME, V. L. CHI, F. P. Brooks JR., M. FALVO, S. PAULSON, P. THIANATHAPORN, D. GLICK, S. WASHBURN et R. SUPERFINE : Pearls found on the way to the ideal interface for scanned-probe microscopes. Dans *8th conference on Visualization*, pages 467–ff., 1997. 11
- N. TESLA : Electro-magnetic motor. Brevet américain 381968, mai 1888. 81
- R. T. VERRILLO : Effect of contactor area on the vibrotactile threshold. *Journal of the Acoustical Society of America*, 35(12):1962–1966, 1963. 110
- J. VITARD : *Manipulation submicronique interactive sous différents environnements de microscopie*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, Paris, France, 2008. 27
- Wolfgang VOGL, Bernice Kai-Lam MA et Metin SITTI : Augmented reality user interface for an atomic force microscope-based nanorobotic system. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 5(4):397–406, juillet 2006. 14
- J. P. WALKER : Current dumping audio amplifier. *Wireless World*, 81:560–562, December 1975. 85
- S. A. WALL et W. HARWIN : A high bandwidth interface for haptic human computer interaction. *Mechatronics*, 11(4):371–387, 2001. 83
- H. E. WHEAT, L. M. SALO et A. W. GOODWIN : Human ability to scale and discriminate forces typical of those occurring during grasp and manipulation. *The Journal of Neuroscience*, 24(13):3394–3401, 2004. 110
- H. XIE, D. S. HALIYO et S. RÉGNIER : Parallel imaging/manipulation force microscopy. *Applied Physics Letters*, 94(15):153106, 2009. 25
- H. XIE et S. RÉGNIER : Calibration of lateral force measurements in atomic force microscopy. *J. Micromech. Microeng.*, 19:075009 (10 pages), 2009. 25
- M ZINN, B. ROTH, O. KHATIB et J. K SALISBURY : A new actuation approach for human friendly robot design. *International Journal of Robotics Research*, 23(4):379–398, 2004. 84

Articles dans des revues internationales

G. Millet, A. LÉCUYER, JM BURKHARDT, S. HALIYO ET S. RÉGNIER : Haptics and Graphic Analogy to Help Understand Atomic Force Microscopy. *ACM Transactions on Applied Perception* (En préparation)

Articles dans des conférences internationales

G. Millet, S. HALIYO, S. RÉGNIER ET V. HAYWARD : The ultimate haptic device : First step. Dans *Proc. Third Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics 2009*, pages 273–278, Salt Lake City, UT, USA. IEEE.

G. Millet, A. LÉCUYER, JM BURKHARDT, S. HALIYO ET S. RÉGNIER : Improving perception and understanding of nanoscale phenomena using haptics and visual analogy. Dans *Haptics : Perception, Devices and Scenarios. Proc. EuroHaptics 2008*, volume 5024 de LNCS, pages 847–856, Madrid, Spain. Springer-Verlag.

Brevet

G. MILLET, S. HALIYO, S. RÉGNIER ET V. HAYWARD : Dispositif pour générer un couple de façon rapide, sur une plage dynamique étendue et avec peu d'inertie. *Brevet français*, 09 01136, mars 2009.