



HAL
open science

Interface Homme-Machine Multimodale pour la Télé-Micromanipulation

Mehdi Ammi

► **To cite this version:**

Mehdi Ammi. Interface Homme-Machine Multimodale pour la Télé-Micromanipulation. Automatique / Robotique. Université d'Orléans, 2005. Français. NNT: . tel-00012163

HAL Id: tel-00012163

<https://theses.hal.science/tel-00012163>

Submitted on 19 Apr 2006

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.



École Doctorale Sciences et Technologies

THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ D'ORLÉANS

Spécialité
Robotique

Présentée par
Mehdi AMMI

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ D'ORLÉANS

Interface Homme-Machine Multimodale pour la Télé-Micromanipulation

Soutenue le 9 décembre 2005

Devant le jury composé de :

| | | |
|----------------------|--------------------|--|
| <i>Rapporteurs :</i> | PHILIPPE FUCHS | Professeur à l'École des Mines de Paris |
| | SIMON RICHIR | Professeur à l'ENSAM de Paris |
| <i>Président :</i> | FLORENT CHAVAND | Professeur à l'Université d'Evry Val d'Essonne |
| <i>Examineurs :</i> | FRÉDÉRIC LOULERGUE | Professeur à l'Université d'Orléans |
| | JEAN-GUY FONTAINE | Professeur à l'ENSI de Bourges |
| | ANTOINE FERREIRA | Maître de Conférences HDR à l'ENSI de Bourges |

Table des matières

| | |
|--|----------|
| Table des figures | vii |
| Liste des tableaux | xiii |
| Introduction | 1 |
| 1 Interfaces Homme-Machine pour la Télé-Micromanipulation : Etat de l'Art | 3 |
| 1.1 Introduction | 3 |
| 1.1.1 La micromanipulation : Un enjeu stratégique | 3 |
| 1.1.2 Applications de la micromanipulation | 3 |
| 1.1.2.1 Intégration de circuits à semiconducteurs | 3 |
| 1.1.2.2 Micromécanique | 4 |
| 1.1.2.3 Biotechnologies | 4 |
| 1.1.2.4 Médecine | 5 |
| 1.2 Téléopération et interface homme-machine en micromanipulation | 5 |
| 1.3 Moyens d'observation du micromonde | 6 |
| 1.3.1 Microscopie à champ lointain | 6 |
| 1.3.2 Microscopie à champ proche | 9 |
| 1.4 Moyens d'interaction : effecteurs et micromanipulateurs | 10 |
| 1.4.1 Micromanipulation par contact | 11 |
| 1.4.2 Micromanipulation sans contact | 12 |
| 1.4.3 Micromanipulation hybride | 13 |
| 1.5 Influences du micromonde | 14 |
| 1.5.1 Effets d'échelle | 14 |
| 1.5.2 Forces du micromonde | 14 |
| 1.5.2.1 Forces à longue portée | 14 |
| 1.5.2.2 Forces à courte portée : Forces de répulsion | 15 |
| 1.6 État de l'art des systèmes de télé-micromanipulation | 16 |
| 1.6.1 Systèmes de télé-micromanipulation classique | 17 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1.6.2 | Systèmes de télé-micromanipulation à désignation d'objectifs | 18 |
| 1.6.3 | Systèmes de télé-micromanipulation assistés par ordinateur | 20 |
| 1.7 | Synthèse de nos objectifs | 23 |
| 1.7.1 | Analyse des contraintes | 23 |
| 1.7.2 | Interface homme-machine multimodale proposée | 24 |
| 1.8 | Conclusion | 26 |
| 2 | Reconstruction Géométrique du Micro-environnement | 29 |
| 2.1 | Introduction | 29 |
| 2.2 | Localisation des constituants de la scène | 29 |
| 2.2.1 | Localisation des microbilles | 30 |
| 2.2.1.1 | Localisation pixelique des microbilles | 30 |
| 2.2.1.2 | Optimisation de la complexité | 31 |
| 2.2.1.3 | Classification des microbilles | 34 |
| 2.2.1.4 | Localisation subpixelique des microbilles | 34 |
| 2.2.1.5 | Suivi des microbilles | 37 |
| 2.2.2 | Localisation des particules de poussière | 38 |
| 2.3 | Calibrage des microscopes optiques | 38 |
| 2.3.1 | Problématique et contraintes du calibrage des microscopes optiques | 41 |
| 2.3.2 | Modèle optique du couple caméra/microscope | 42 |
| 2.3.3 | Méthode de calibrage proposée | 44 |
| 2.3.3.1 | Mire virtuelle haute-précision | 45 |
| 2.3.3.2 | Algorithme de calibrage proposé | 46 |
| 2.3.4 | Expérimentations | 51 |
| 2.3.4.1 | Étude de la robustesse aux bruits | 51 |
| 2.3.4.2 | Tests dans les conditions réelles | 51 |
| 2.4 | Reconstruction de la scène | 54 |
| 2.4.1 | Transformation des coordonnées entre les repères des microscopes et la scène virtuelle | 54 |
| 2.4.2 | Reconstruction géométrique 3-D de la scène | 56 |
| 2.4.3 | Recalage de la représentation virtuelle du micro-environnement | 57 |
| 2.5 | Analyse des erreurs dues à la chaîne de traitement | 57 |
| 2.5.1 | Limite de résolution de l'objectif | 58 |
| 2.5.1.1 | Les aberrations chromatiques | 59 |
| 2.5.1.2 | Les aberrations géométriques | 59 |
| 2.5.2 | Erreurs dues à la numérisation du signal | 60 |
| 2.5.3 | Erreur de mesure | 61 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.5.3.1 | Erreurs de localisation | 61 |
| 2.5.3.2 | Erreurs sur les paramètres du microscope | 61 |
| 2.5.4 | Représentation 3-D | 61 |
| 2.5.4.1 | Représentation 3-D des microbilles | 61 |
| 2.5.4.2 | Représentation 3-D de la pointe AFM | 62 |
| 2.6 | Conclusion | 62 |
| 3 | Immersion, Interaction et Métaphores d'Assistance | 65 |
| 3.1 | Introduction | 65 |
| 3.2 | Mode visuel | 66 |
| 3.2.1 | Perception de la profondeur | 66 |
| 3.2.1.1 | Les indices proprioceptifs | 67 |
| 3.2.1.2 | Les indices visuels | 68 |
| 3.2.2 | Navigation | 71 |
| 3.2.2.1 | La composante motrice | 71 |
| 3.2.2.2 | La composante cognitive | 71 |
| 3.2.2.3 | Métaphores de contrôle de point de vue proposées | 72 |
| 3.2.3 | Immersion du regard | 73 |
| 3.2.4 | Métaphores d'assistance visuelles | 74 |
| 3.3 | Mode haptique et interaction | 75 |
| 3.3.1 | Retour d'effort basé sur le capteur physique | 76 |
| 3.3.1.1 | Le micro-effecteur terminal | 76 |
| 3.3.1.2 | Le couplage bilatéral | 78 |
| 3.3.2 | Le mode épistémique | 79 |
| 3.3.3 | Métaphores d'assistance haptique : les guides virtuels | 79 |
| 3.3.3.1 | Guide à base d'un planificateur de chemins | 80 |
| 3.3.3.2 | Guide à base de champs de potentiel | 86 |
| 3.3.3.3 | Contraintes de mouvement | 89 |
| 3.3.4 | Stabilisation du rendu haptique par couplage virtuel | 89 |
| 3.3.4.1 | Conditions de stabilité | 92 |
| 3.3.4.2 | Implantation du couplage virtuel | 92 |
| 3.3.5 | Alignement proprioceptif : isomorphisme des transformations motrices | 93 |
| 3.4 | Mode Auditif | 95 |
| 3.4.1 | Métaphores sonores proposées | 95 |
| 3.4.1.1 | Représentation sonore de grandeurs physiques | 96 |
| 3.4.1.2 | Le pseudo son du micro-environnement | 97 |
| 3.5 | Conclusion | 98 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4 | Évaluation et Expérimentation | 99 |
| 4.1 | Introduction | 99 |
| 4.2 | Description du dispositif et des conditions expérimentales | 99 |
| 4.2.1 | Architecture matérielle | 99 |
| 4.2.1.1 | Le système de micromanipulation | 100 |
| 4.2.1.2 | Les moyens de calcul | 100 |
| 4.2.1.3 | Les interfaces comportementales | 100 |
| 4.2.2 | Architecture logicielle | 101 |
| 4.2.3 | Stratégies de micromanipulation | 104 |
| 4.2.3.1 | Micromanipulation par adhésion | 104 |
| 4.2.3.2 | Micromanipulation par poussée | 104 |
| 4.2.4 | Conditions expérimentales | 105 |
| 4.2.5 | Sujets | 105 |
| 4.3 | Évaluation des performances | 105 |
| 4.3.1 | Étude du geste durant la phase d’approche du micro-effecteur | 106 |
| 4.3.1.1 | Évaluation de l’apport de la vue 3D | 106 |
| 4.3.1.2 | Évaluation de l’apport des guides virtuels | 109 |
| 4.3.1.3 | Évaluation de l’alignement proprioceptif des transformations motrices | 113 |
| 4.3.2 | Étude du geste durant la phase de micromanipulation par poussée | 117 |
| 4.3.2.1 | Évaluation de l’apport de la vue 3D | 117 |
| 4.3.3 | Étude du geste durant la phase de micromanipulation par adhésion | 119 |
| 4.3.3.1 | Évaluation de l’apport des guides virtuels | 119 |
| 4.3.4 | Étude des moyens de navigation | 124 |
| 4.3.5 | Étude des niveaux d’immersion visuels | 127 |
| 4.3.6 | Étude de l’influence du pseudo son et du mode tactile sur la compréhension de la scène | 128 |
| 4.3.7 | Étude de l’influence d’une représentation pseudo-sonore et visuelle de l’effort | 128 |
| 4.4 | Discussion | 130 |
| 4.4.1 | Mode visuel | 130 |
| 4.4.2 | Mode haptique et guides virtuels | 131 |
| 4.4.3 | Mode sonore | 132 |
| 4.5 | Conclusion | 132 |
| 5 | Application au Domaine de la Micro-Injection Cellulaire | 135 |
| 5.1 | Introduction | 135 |
| 5.2 | Dispositif expérimental | 136 |

| | | |
|---------|---|------------|
| 5.3 | Caractéristiques des cellules étudiées | 136 |
| 5.4 | Extraction des composants de la scène | 138 |
| 5.4.1 | Localisation des micromanipulateurs | 138 |
| 5.4.1.1 | Localisation de la pipette d'injection | 138 |
| 5.4.1.2 | Localisation de la pipette de maintien | 138 |
| 5.4.2 | Segmentation de la cellule | 139 |
| 5.4.2.1 | Segmentation de la membrane externe | 139 |
| 5.4.2.2 | Segmentation de la membrane interne | 142 |
| 5.4.3 | Initialisation des nœuds des contours actifs | 143 |
| 5.4.4 | Calcul du moment et des lieux de contact et de ponction | 143 |
| 5.4.4.1 | Calcul du moment et du lieu de contact | 143 |
| 5.4.4.2 | Calcul du moment et du lieu de ponction | 144 |
| 5.5 | Reconstruction pseudo-3D de la cellule | 145 |
| 5.6 | Retour pseudo-haptique | 146 |
| 5.6.1 | Le concept proposé | 146 |
| 5.6.2 | Le modèle mécanique adopté | 147 |
| 5.6.3 | Identification des paramètres | 149 |
| 5.6.4 | Couplage virtuel | 152 |
| 5.7 | Guides virtuels haptiques | 152 |
| 5.7.1 | Contrainte conique | 153 |
| 5.7.2 | Contrainte rectiligne | 154 |
| 5.8 | Étude expérimentale et évaluation de l'IHM | 154 |
| 5.8.1 | Conditions expérimentales | 154 |
| 5.8.2 | Sujets | 154 |
| 5.8.3 | Évaluation des performances | 155 |
| 5.8.3.1 | Évaluation de l'apport de la visualisation 3D | 155 |
| 5.8.3.2 | Évaluation de l'apport du retour haptique | 159 |
| 5.8.3.3 | Évaluation de l'apport des guides virtuels | 161 |
| 5.9 | Conclusion | 164 |
| | Conclusion générale | 167 |
| | Annexe | 171 |
| | A Méthode de calibrage basée sur l'algorithme de Tsai | 171 |
| A.1 | Modèle optique du couple caméra/microscope | 171 |
| A.2 | Calcul des paramètres extrinsèques | 172 |
| A.3 | Calcul des paramètres intrinsèques | 173 |

| | |
|--|------------|
| Annexe | 175 |
| B Taxonomie des techniques de contrôle du point de vue | 175 |
| Annexe | 177 |
| C Les référentiels spatiaux | 177 |
| C.1 Définition générale des références spatiales d'un individu | 177 |
| C.2 Références spatiales d'un individu dans un environnement virtuel | 177 |
| Annexe | 179 |
| D Taxonomie des guides virtuels | 179 |
| D.1 Classification des guides virtuels | 179 |
| D.1.1 Guides virtuels dédiés à l'assistance de l'opérateur | 179 |
| D.1.2 Guides virtuels dédiés à la commande du robot | 179 |
| D.1.3 Guide virtuels partagés | 180 |
| D.2 Guides virtuels simples et composés | 180 |
| D.2.1 Guide virtuel simple | 180 |
| D.2.2 Guide virtuel composé | 180 |
| D.3 Guides virtuels actifs et passifs | 180 |
| D.3.1 Guide virtuel passif | 180 |
| D.3.2 Guide virtuel actif | 180 |
| Annexe | 181 |
| E Les indices acoustiques de localisation | 181 |
| E.1 Les indices binauriculaires | 181 |
| E.1.1 L'indice binauriculaire de temps (Différence Interaurale Temporelle : DIT) | 182 |
| E.1.2 L'indice binauriculaire de phase | 182 |
| E.1.3 L'indice binauriculaire d'intensité (Différence Interaurale d'Intensité : DII) | 182 |
| E.2 Les indices monauriculaires | 182 |
| E.2.1 Les indices monauriculaires liés aux mouvements | 182 |
| E.2.2 Les indices monauriculaires liés au pavillon | 183 |
| Annexe | 185 |
| F Étapes de localisation spatiale d'une source sonore | 185 |
| Bibliographie | 187 |

Table des figures

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Echelle des dimensions des objets concernés par la micromanipulation. | 4 |
| 1.2 | Architecture d'une chaîne de télé-micromanipulation à retour d'effort : (a) composants du système et (b) schéma-bloc. | 5 |
| 1.3 | Images issues de microscopes à champ lointain. | 8 |
| 1.4 | Microscopie en champ proche. | 9 |
| 1.5 | Limites de résolution des différentes techniques de microscopie. | 10 |
| 1.6 | Micromanipulation avec contact. | 12 |
| 1.7 | Micromanipulation sans contact. | 13 |
| 1.8 | Diagramme des différentes forces rencontrées par un levier AFM. | 14 |
| 1.9 | Amplitude des forces dans le micromonde. | 15 |
| 1.10 | Classification des systèmes de télé-micromanipulation. | 16 |
| 1.11 | Système de télé-micromanipulation classique. | 18 |
| 1.12 | Systèmes de télé-micromanipulation à désignation d'objectifs. | 19 |
| 1.13 | Recalage virtuel et réel : (a) Différentes vues (frontale et latérale) de tâches de micro-assemblage simulées en réalité virtuelle ; et (b) exécution en ligne des tâches simulées : transport (pass pose 1), alignement (pass pose 2), et insertion (pass pose 3). | 20 |
| 1.14 | Guides virtuels pour la micromanipulation. | 20 |
| 1.15 | Système de nanomanipulation utilisant un microscope à force atomique. | 21 |
| 1.16 | Modèle de déformation local. | 21 |
| 1.17 | Interfaces haptiques dédiées à la micro/nanomanipulation. | 22 |
| 1.18 | Plateforme multisensorielle pour la nanomanipulation d'après. | 23 |
| 1.19 | Le "Continuum réel - virtuel" proposé par Milgram. | 25 |
| 1.20 | Interface homme-machine proposée. | 26 |
| | | |
| 2.1 | Transition correspondant à la tâche spéculaire. | 32 |
| 2.2 | Opérateur de Laplace. | 33 |
| 2.3 | Filtre passe-haut. | 33 |
| 2.4 | Filtre passe-bas. | 33 |
| 2.5 | Étapes du filtrage. | 34 |
| 2.6 | Voisinage de corrélation. | 35 |
| 2.7 | Surface d'interpolation. | 35 |
| 2.8 | Surface d'intersection. | 37 |
| 2.9 | Comparaison des distances aux centres et distance aux bords. | 38 |
| 2.10 | Localisation des particules de poussières. | 39 |
| 2.11 | Algorithme de localisation des microbilles et des particules de poussières. | 40 |
| 2.12 | Temps de calcul en fonction du nombre de microbilles | 40 |

| | | |
|------|---|----|
| 2.13 | Relation entre la profondeur de champ et l'ouverture numérique de l'objectif. | 41 |
| 2.14 | Illustration du cas de la mire plane et parallèle. | 42 |
| 2.15 | Système à correction à l'infini. | 43 |
| 2.16 | Disposition de l'objectif et de la lentille de tube dans le microscope utilisé. | 43 |
| 2.17 | Modèle optique du microscope. | 44 |
| 2.18 | Mire réalisée par lithographie. | 45 |
| 2.19 | Mires virtuelles. | 46 |
| 2.20 | Erreurs relatives sur les paramètres intrinsèques et extrinsèques. | 52 |
| 2.21 | Réalisation de la mire virtuelle | 53 |
| 2.22 | Représentation des plans de mise au point frontal et latéral. | 55 |
| 2.23 | Passage entre les repères des microscopes et le repère de la scène virtuelle. | 56 |
| 2.24 | Reconstruction 3-D de la scène | 57 |
| 2.25 | Overture numérique. | 58 |
| 2.26 | Pouvoir séparateur : capacité à discriminer deux disques d'Airy. | 58 |
| 2.27 | Microbille vue sous microscope électronique à balayage (SEM). | 62 |
| 3.1 | Les indices permettant la perception de profondeur de l'espace tridimensionnelle. | 67 |
| 3.2 | Les indices monoculaires utilisés dans la représentation virtuelle du micro-environnement pour la perception de la profondeur. | 70 |
| 3.3 | Illustration des différents niveaux d'immersion du regard employés pour l'interface homme-machine en télé-micromanipulation. | 74 |
| 3.4 | Les différentes métaphores visuelles intégrées à la scène. | 75 |
| 3.5 | Pointe AFM utilisée comme micro-effecteur. | 77 |
| 3.6 | Configuration des jauges de contraintes sur le pont de Wheatstone. | 77 |
| 3.7 | Architecture de la commande position-force. | 78 |
| 3.8 | Utilisation de la méthode par pénalité pour le rendu d'effort. | 79 |
| 3.9 | Scène originale et espace des configurations des obstacles correspondant. | 81 |
| 3.10 | Exemples de décomposition d'un espace avec l'approche squelette. | 82 |
| 3.11 | Calcul du diagramme de Voronoï par la méthode d'expansion d'ondes. | 82 |
| 3.12 | Création du lien entre la configuration de départ et finale. | 83 |
| 3.13 | Procédure du parcours de graphe : <i>A-star</i> | 84 |
| 3.14 | Pseudo-code correspondant à l'algorithme <i>A-star</i> | 84 |
| 3.15 | Génération de la trajectoire optimale. | 85 |
| 3.16 | Guide virtuel à base d'un planificateur de chemins. | 85 |
| 3.17 | (a) Représentation graphique et (b) profil du champ de potentiel répulsif. | 87 |
| 3.18 | Modélisation des interactions effecteur/substrat et microforces d'adhésion : (a) cas d'un environnement où les forces de Van der Waals et les forces électrostatiques sont prépondérantes (air ambiant) et (b) cas d'un environnement où les forces de capillarité et les forces électrostatiques sont prépondérantes (environnement humide). | 88 |
| 3.19 | Les contraintes de mouvement. | 89 |
| 3.20 | Principe du couplage virtuel. | 90 |
| 3.21 | Modèle d'une interaction haptique avec un couplage virtuel. | 90 |
| 3.22 | Modèle mécanique de l'interaction pour un degré de liberté. | 91 |
| 3.23 | Représentation de la condition de stabilité inconditionnelle. | 93 |
| 3.24 | Différences de manipulation dues à l'utilisation, ou non, d'un repère de déplacement isomorphe. | 94 |
| 3.25 | Transformation nécessaire pour obtenir un déplacement moteur isomorphe. | 94 |

| | | |
|------|--|-----|
| 3.26 | Modulation du son en fonction des grandeurs à représenter. | 97 |
| 4.1 | Architecture matérielle de l'interface homme-machine. | 102 |
| 4.2 | Diagramme de déploiement de l'IHM. | 103 |
| 4.3 | Manipulation par adhésion. | 104 |
| 4.4 | Manipulation par poussée. | 105 |
| 4.5 | Phase d'approche : (a) et (b) images issues du microscope frontal, (c) et (d) images issues du microscope latéral, (e) et (f) images issues de la scène virtuelle. | 106 |
| 4.6 | Trajectoires du bras maître pour trois opérateurs différents : 1) en utilisant les vues issues des microscopes (a), (b) et (c) et 2) en utilisant la représentation 3D du microenvironnement (e), (f) et (g). | 107 |
| 4.7 | Évolution de la vitesse du bras maître suivant les trois axes pour un opérateur : 1) en utilisant les vues issues des microscopes (a), (b) et (c) et 2) en utilisant la représentation 3D du micro-environnement (e), (f) et (g). | 108 |
| 4.8 | Temps d'exécution pour la réalisation de la phase d'approche. | 108 |
| 4.9 | Notes d'appréciation pour la réalisation de la phase d'approche. | 109 |
| 4.10 | Guides virtuels utilisés durant la phase d'approche. | 110 |
| 4.11 | Évolution de la vitesse du bras maître suivant les trois axes en utilisant : 1) un champ de potentiel sonore (a), (b) et (c), et 2) un champ de potentiel atténuateur de mouvement (e), (f) et (g) et 3) un champ de potentiel atténuateur de mouvement avec une composante répulsive (g), (h) et (i). | 111 |
| 4.12 | Temps d'exécution de la phase d'approche eu utilisant 1) un champ sonore, 2) un champ atténuateur et 3) un champ atténuateur avec une composante répulsive. | 112 |
| 4.13 | Notes d'appréciation pour la réalisation de la phase d'approche eu utilisant 1) un champ sonore, 2) un champ atténuateur et 3) un champ atténuateur avec une composante répulsive. | 112 |
| 4.14 | Trajectoires du bras maître en utilisant : 1) un champ de potentiel atténuateur sans contrainte sur le mouvement (a), (b) et (c) ; 2) une contrainte plane sur le mouvement (e), (f) et (g) et 3) une contrainte rectiligne sur le mouvement (g), (h) et (i). | 113 |
| 4.15 | Évolution de la vitesse du bras maître suivant les trois axes en utilisant une contrainte plane : 1) sans champ de potentiel (a), (b) et (c) et 2) avec champ de potentiel (e), (f) et (g). | 114 |
| 4.16 | Évolution de la vitesse du bras maître suivant les trois axes en utilisant une contrainte rectiligne : 1) sans champ de potentiel (a), (b) et (c) et 2) avec champ de potentiel (e), (f) et (g). | 114 |
| 4.17 | Temps pour la réalisation de la phase d'approche en utilisant : 1) une contrainte plane et 2) une contrainte rectiligne. | 115 |
| 4.18 | Notes d'appréciation pour la réalisation de la phase d'approche en utilisant : 1) une contrainte plane et 2) une contrainte rectiligne. | 115 |
| 4.19 | Vue proposée à l'opérateur. | 116 |
| 4.20 | Trajectoires du bras maître dans le cas ou on utilise pas d'alignement proprioceptif. | 116 |
| 4.21 | Temps pour la réalisation de la phase d'approche 1) avec un alignement proprioceptif et 2) sans alignement proprioceptif. | 116 |
| 4.22 | Notes d'appréciation pour la réalisation de la phase d'approche 1) avec un alignement proprioceptif et 2) sans alignement proprioceptif. | 117 |
| 4.23 | Étapes de manipulation par poussée. | 117 |

| | | |
|------|--|-----|
| 4.24 | Trajectoires du bras maître en utilisant : 1) les vues des microscopes (a), (b) et (c) et 2) la représentation 3D du microenvironnement (d), (e) et (f). | 118 |
| 4.25 | Temps d'exécution pour la réalisation de la phase de poussée avec : 1) les vues des microscopes et 2) la représentation 3D. | 119 |
| 4.26 | Notes d'appréciation pour la réalisation de la phase de poussée avec : 1) les vues des microscopes et 2) la représentation 3D. | 119 |
| 4.27 | Micromanipulation par adhésion. | 120 |
| 4.28 | Trajectoires du bras maître en utilisant : 1) une représentation visuelle des champs de potentiel (a),(b) et (c) et 2) une représentation visuelle et haptique des champs de potentiel (d),(e) et (f). | 121 |
| 4.29 | Évolution des vitesses en utilisant : 1) une représentation visuelle des champs de potentiel (a),(b) et (c) et 2) une représentation visuelle et haptique des champs de potentiel (d), (e) et (f). | 121 |
| 4.30 | Temps d'exécution pour le déplacement d'une microbille par adhésion avec : 1) une représentation visuelle des champs de potentiels et 1) une représentation visuelle et haptique. | 122 |
| 4.31 | Notes d'appréciation pour le déplacement d'une microbille par adhésion avec : 1) une représentation visuelle des champs de potentiels et 2) une représentation visuelle et haptique. | 122 |
| 4.32 | Trajectoires du bras maître en utilisant : 1) une représentation sonore du chemin optimal (a), (b) et (c) et 2) une représentation haptique du chemin optimal (d), (e) et (f). | 123 |
| 4.33 | Temps pour le déplacement d'une microbille par adhésion avec : 1) une représentation visuelle chemin optimal et 2) une représentation haptique du chemin optimal. | 123 |
| 4.34 | Notes d'appréciation pour le déplacement d'une microbille par adhésion avec : 1) une représentation visuelle chemin optimal et 2) une représentation haptique du chemin optimal. | 124 |
| 4.35 | Métaphores de navigation proposées à l'opérateur. | 125 |
| 4.36 | Notes d'appréciation pour la tâche d'exploration en utilisant les différentes métaphores de navigation. | 126 |
| 4.37 | Notes d'appréciation pour la tâche de recherche en utilisant les différentes métaphores de navigation. | 126 |
| 4.38 | Notes d'appréciation pour la tâche d'ajustement en utilisant les différentes métaphores de navigation. | 127 |
| 4.39 | Notes d'appréciation pour les trois niveaux d'immersion. | 128 |
| 4.40 | Notes d'appréciation pour l'exploration avec le mode 1) visuel, 2) visuel et pseudo-sonore et 2) visuel et tactile. | 129 |
| 4.41 | Représentation visuelle de l'effort exercé. | 129 |
| 4.42 | Notes d'appréciation pour une représentation de l'effort exercé : 1) sans déformation visuelle, 2) avec une déformation visuelle uniquement 3) avec une déformation visuelle et un retour sonore. | 130 |
| 5.1 | Station de micro-injection. | 137 |
| 5.2 | Ovocyte I et II. | 137 |
| 5.3 | Composition de la scène. | 138 |
| 5.4 | Pseudo-code de l'algorithme de Williams. | 141 |
| 5.5 | Voisinage utilisé pour le calcul de la fonction d'énergie. | 141 |

| | | |
|------|--|-----|
| 5.6 | Effacement des pipettes de la scène. | 141 |
| 5.7 | Opérations réalisées pour l'extraction de la membrane externe. | 142 |
| 5.8 | Opérations réalisées pour l'extraction de la membrane interne. | 142 |
| 5.9 | Initialisation des contours. | 143 |
| 5.10 | Calcul du moment de contact. | 144 |
| 5.11 | Calcul du moment de ponction. | 144 |
| 5.12 | Calcul du maillage par symétrie. | 145 |
| 5.13 | Surface NUBS. | 145 |
| 5.14 | Évolution du volume calculé de la cellule en fonction de la déformation. | 146 |
| 5.15 | Les deux modes d'utilisation du système mécanique. | 147 |
| 5.16 | Structure d'une liaison entre deux nœuds d'un système MRV. | 147 |
| 5.17 | Illustration du phénomène de déformation brusque au voisinage de certaines configurations. | 149 |
| 5.18 | Configuration géométrique du maillage interne et externe du modèle retenu. | 149 |
| 5.19 | Courbe représentant la force en fonction de la déformation pour des membranes d'ovocytes et des embryons de souris. | 150 |
| 5.20 | Simulations de la cellule par un modèle par éléments finis à partir du logiciel MSC-Marc. | 151 |
| 5.21 | Simulations menées pour l'identification des paramètres du système MRV. | 151 |
| 5.22 | Représentation 3D de la cellule. | 152 |
| 5.23 | Résultats sur la stabilité pour rendu en impédance. | 153 |
| 5.24 | Guides virtuels proposés. | 154 |
| 5.25 | Vues frontale et latérale proposées à l'opérateur. | 155 |
| 5.26 | Trajectoires du bras maître durant la phase d'approche : 1) en utilisant les vues latérale et frontale (a), (b) et (c) et 2) en utilisant la représentation 3D de la cellule (e), (f) et (g). | 156 |
| 5.27 | Trajectoires du bras maître durant la phase de pénétration : 1) en utilisant les vues latérale et frontale (a), (b) et (c) et 2) en utilisant la représentation 3D de la cellule (e), (f) et (g). | 157 |
| 5.28 | Évolution de la vitesse du bras maître suivant les trois axes durant la phase d'approche : 1) en utilisant les vues frontale et latérale (a), (b) et (c) et 2) en utilisant la représentation 3D de la cellule (e), (f) et (g). | 157 |
| 5.29 | Évolution de la vitesse du bras maître suivant les trois axes durant de pénétration de la cellule : 1) en utilisant les vues frontale et latérale (a), (b) et (c) et 2) en utilisant la représentation 3D de la cellule (e), (f) et (g). | 158 |
| 5.30 | Temps pour la réalisation des phases (a) d'approche et de (b) pénétration. | 158 |
| 5.31 | Notes d'appréciation pour la réalisation des phases (a) d'approche et de (b) pénétration. | 159 |
| 5.32 | Évolution de la vitesse du bras maître suivant les trois axes durant de pénétration de la cellule en utilisant le retour pseudo-haptique. | 160 |
| 5.33 | Temps pour la réalisation de la phase de pénétration en utilisant le retour pseudo-haptique. | 160 |
| 5.34 | Notes d'appréciation pour la réalisation de la phase de pénétration en utilisant le retour pseudo-haptique. | 161 |
| 5.35 | Évolution de la vitesse du bras maître suivant les trois axes durant de pénétration de la cellule : 1) sans utiliser le retour pseudo-haptique (a), (b) et (c) et 2) en utilisant le retour pseudo-haptique (e), (f) et (g). | 162 |

| | | |
|------|--|-----|
| 5.36 | Trajectoires du bras maître durant la phase d'approche : 1) en utilisant une contrainte cône (a), (b) et (c) et 2) en utilisant la la contrainte rectiligne (e), (f) et (g). | 162 |
| 5.37 | Temps pour la réalisation de la phase de pénétration. | 163 |
| 5.38 | Notes d'appréciation pour la réalisation de la phase de pénétration. | 163 |
| 5.39 | Temps pour la réalisation de la phase d'approche avec les deux aides proposées. . | 164 |
| 5.40 | Notes d'appréciation pour la réalisation de la phase d'approche avec les deux aides proposées. | 164 |
| 1 | Supervision des opérations à l'aide d'une plateforme sphérique située à Saragosse. | 168 |
| B.1 | Taxonomie des techniques de contrôle du point de vue. | 175 |
| D.1 | Classification de la métaphore des guides virtuels. | 179 |
| E.1 | Les indices acoustiques de localisation. | 181 |
| F.1 | Étape de localisation d'une source sonore. | 185 |
| F.2 | Incertitude sur la localisation circulaire. | 186 |

Liste des tableaux

| | | |
|-----|--|-----|
| 2.1 | Temps de calcul du bloc de traitement d'image pour 4 microbilles présentent dans la scène. | 39 |
| 2.2 | Calcul des paramètres pour différents grossissements et erreurs de reprojection 3D. Les paramètres T_x , T_y , E_{moy} , E_{max} et σ sont donnés en μm , T_z en m et α en radians. | 54 |
| 2.3 | Propriétés des objectifs M Plan Apo utilisés. | 59 |
| 3.1 | Mesures des performances des utilisateurs en fonction des différents indices visuels. | 69 |
| 3.2 | Paramètres du couplage virtuel. | 92 |
| 5.1 | Caractéristiques mécaniques des membranes d'ovocyte et d'embryon de souris. . . | 150 |
| 5.2 | Paramètres du couplage virtuel pour le système MRV | 153 |

Introduction

Aujourd'hui, la manipulation du micromonde constitue un enjeu extraordinaire dont on entrevoit déjà des applications dans tous les domaines : la santé, l'automobile, l'aéronautique, la chimie des matériaux, l'électronique, l'énergie, l'espace, l'environnement et les biotechnologies. En biologie, ces techniques de micromanipulation peuvent permettre de caractériser le comportement de macromolécules individuelles (molécule d'ADN par exemple), de groupes de molécules ou du cytosquelette des cellules vivantes. En physique des matériaux, la micromanipulation appliquée à l'étude des propriétés mécaniques exceptionnelles des structures en nanotubes de carbone permet d'envisager la construction, à l'échelle nanométrique, de matériaux extrêmement résistants. Il est clair que dans le cadre de la micromanipulation, les recherches en téléopération, microrobotique et réalité virtuelle peuvent jouer un rôle essentiel.

Néanmoins, il n'existe pas un système de micromanipulation satisfaisant l'ensemble des critères requis, qui sont à la fois liés aux performances dynamiques (comme pour les systèmes de téléopération) et aux qualités quant à l'interaction entre l'opérateur humain et la microscène. Des études récentes sur les facteurs humains ont montré certaines limitations des téléopérateurs à appréhender et à maîtriser les interactions lors de la manipulation d'objets à l'échelle micrométrique et nanométrique. Le problème majeur provenant de la valeur importante des facteurs d'échelle reliant l'opérateur à son environnement (position : 10^{-9} m et force : 10^{-6} N), de l'inadéquation des moyens d'observation et d'interaction par rapport au contexte naturel d'action de l'opérateur, où encore, de la méconnaissance de l'opérateur des forces d'adhésion à l'échelle micrométrique. De ce fait, l'interfaçage homme-machine joue un rôle prépondérant dans les systèmes de télé-micromanipulation. Des interfaces et des dispositifs ergonomiques adaptés aux modalités sensorielles de l'opérateur humain doivent donc être recherchés.

Nos travaux de recherche se sont orientés vers l'amélioration du triptyque " Perception - Communication - Interaction " entre l'opérateur et le micromonde en incluant de nouveaux moyens d'interaction. Ces nouvelles interfaces homme-machine (IHM) ont pour rôle d'assister l'opérateur dans ses tâches de manipulation en lui fournissant une aide contextuelle et parfaitement bien adaptée aux contraintes du micromonde (effets d'échelle, environnement, tâches, etc.). Dans ce contexte, nous avons développé une interface homme-machine intuitive et multimodale, dédiée à la télé-micromanipulation d'objets de taille micrométrique et travaillant sous le champ de vue de plusieurs microscopes optiques.

Les travaux décrits dans ce mémoire de thèse sont les suivants.

Le chapitre 1 décrit la problématique liée à l'interfaçage homme-machine dans un système de télé-micromanipulation. Une description détaillée des moyens d'observation et d'interaction disponibles à l'échelle du micromonde permet de mettre en évidence leurs limitations techno-

logiques. Compte tenu des moyens d'observation et d'interaction utilisés, une classification des systèmes bilatéraux de télé-micromanipulation est ensuite proposée en fonction du degré d'autonomie requis par les applications, à savoir : à commande directe, à désignation d'objectifs ou assisté par ordinateur. A partir de cette analyse, nous introduisons les objectifs de recherche qui sont traités dans cette thèse.

Dans le chapitre 2, nous nous intéresserons à la reconstruction tridimensionnelle de la scène (scène virtualisée) à partir des images issues de microscopes optiques (scène réelle). Pour cela, des algorithmes de traitement d'image dédiés à la localisation des micro-objets statiques (poussières, microbilles) et à la poursuite des micro-objets dynamiques (microbille manipulée) sont décrits. Une nouvelle méthode de calibrage virtuel des microscopes optiques est développée en vue de satisfaire les contraintes de précision, d'encombrement et de flexibilité d'emploi lors de la procédure de recalage entre la scène réelle et sa représentation virtuelle. Une contrainte forte des algorithmes de traitement d'image et de calibrage développés est leur caractère temps-réel.

Les objectifs de l'interface homme-machine (IHM) multisensorielle à réaliser sont ensuite décrits dans le chapitre 3. En vue d'améliorer la communication entre l'opérateur et le micro-environnement, différents modes de perception sont proposés : mode visuel, haptique et sonore. Pour chaque modalité étudiée, nous proposons un rehaussement de la perception de l'opérateur avec plusieurs moyens d'immersion et d'interaction. Une analyse de ces modes permet enfin d'établir des classes de métaphores d'assistance pour guider l'opérateur dans sa tâche, en lui fournissant une aide adaptée au contexte opérationnel et à sa logique d'interaction avec le micromonde.

Le chapitre 4 décrit l'architecture matérielle et logicielle d'une plateforme multimodale dédiée à la télémanipulation de micro-objets à partir d'un microlevier AFM. Afin de valider expérimentalement les performances des téléopérateurs, et cela pour certains aspects de l'IHM développée, deux stratégies de micromanipulation vont être adoptées : la micromanipulation par adhésion et la micromanipulation par poussée. Pour chacune d'entre-elles, plusieurs scénarios d'essais regroupant un ensemble d'indices quantitatifs et qualitatifs de mesure sont expérimentés. Enfin, une analyse détaillée des performances et limitations de l'IHM est proposée en vue de son application industrielle.

Finalement, le chapitre 5 décrit une application potentielle de l'IHM développée dans le domaine biologique, et plus particulièrement au niveau de la micro-injection cellulaire. Les étapes d'extraction des différents composants de la scène, pour réaliser la reconstruction 3D de la cellule biologique dans son milieu physiologique sont présentées. Une nouvelle méthodologie de calcul du rendu de l'effort retourné à l'opérateur est ensuite proposée. Cette dernière est basée sur un modèle mécanique viscoélastique de la cellule. Enfin, une étude expérimentale de l'IHM est réalisée afin d'évaluer les performances de l'opérateur dans les conditions normales de manipulation.

Chapitre 1

Interfaces Homme-Machine pour la Télé-Micromanipulation : Etat de l'Art

1.1 Introduction

1.1.1 La micromanipulation : Un enjeu stratégique

D'énormes efforts de recherche et développement sont réalisés en permanence en matière de miniaturisation et d'intégration. Que ce soit pour les objets d'usage quotidien (notamment les appareils électroniques grand public) ou pour des dispositifs industriels professionnels, la miniaturisation est devenue un argument commercial extrêmement important. La miniaturisation est donc fortement liée au domaine de la micromanipulation des microcomposants, c'est-à-dire la manipulation d'objets de dimensions variant généralement de $1\mu m$ à $1mm$. Manipuler signifie saisir, maintenir, transporter, positionner et lâcher des micro-objets. Les manipulateurs de dimensions métriques, souvent à bras polyarticulés, ne permettent pas d'effectuer des tâches de manipulation précises lorsque la taille des objets est très faible. Leur précision est limitée par des phénomènes de frottement, de jeu dans les engrenages, de dilatation thermique, etc. Un micromanipulateur est fonctionnellement comparable à un manipulateur traditionnel. Cependant, les principes d'actionnement utilisés sont très différents.

1.1.2 Applications de la micromanipulation

Les efforts de miniaturisation consentis ainsi que les dernières découvertes réalisées dans le domaine biomédical ont créé une forte demande concernant les outils de micromanipulation. Les développements les plus importants des systèmes de micromanipulation sont pressentis dans deux disciplines : le biomédical et les microproduits industriels. La figure 1.1 présente la plage de dimensions des objets concernés par la micromanipulation. Il est difficile de donner une liste exhaustive des applications de la micromanipulation, nous pouvons citer quelques domaines d'application.

1.1.2.1 Intégration de circuits à semiconducteurs

Les microcontrôleurs et les microprocesseurs représentent une part très importante de la production mondiale de circuits intégrés. D'autres types de circuits connaissent actuellement des développements considérables. Il s'agit notamment de circuits analogiques, hybrides et surtout des circuits à hautes fréquences employés dans la téléphonie mobile, domaine qui représente

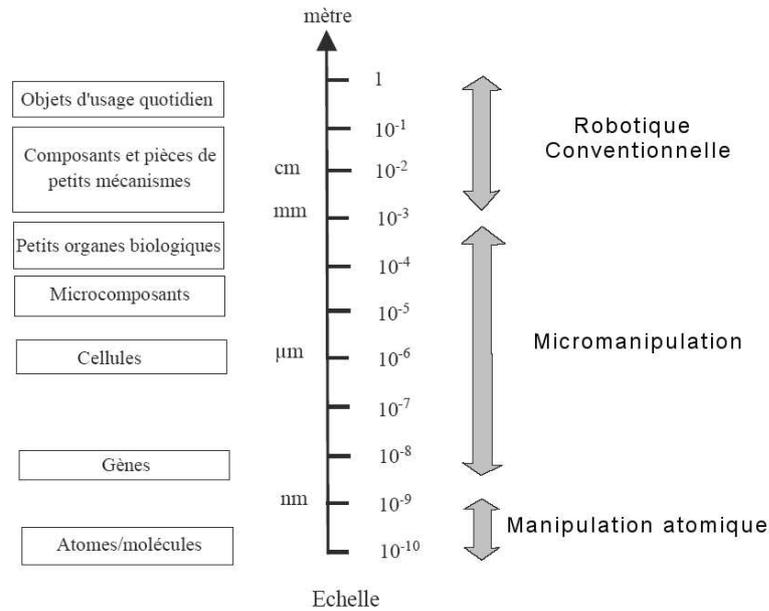


FIG. 1.1 – Echelle des dimensions des objets concernés par la micromanipulation.

un enjeu économique et stratégique majeur. Les tâches robotiques attribuées aux systèmes de micromanipulation sont le test des circuits intégrés, la fabrication de microcircuits, la correction de circuits, etc. Les microcircuits sont souvent très fragiles, il convient de les manipuler avec précision en ajustant les forces de contact avec le micromanipulateur.

1.1.2.2 Micromécanique

La fabrication de micropièces a connu des grandes évolutions ces dernières années, notamment avec le développement de méthodes modernes de micro-usinage 3D (LIGA, microstéréolithographie, etc.). Cela concerne de nombreux secteurs, tel que l'assemblage de pièces micromécaniques rigides (microroues dentées, microlentilles optiques, etc.). La réalisation des microsystèmes requiert l'utilisation de micromanipulateurs 3D pour l'assemblage, l'ajustage et le test de ces microdispositifs.

1.1.2.3 Biotechnologies

Une des applications phares concerne la manipulation du génome humain. La génétique est une discipline qui fascine bon nombre de chercheurs pour toutes les solutions qu'elle peut apporter dans le traitement de certaines maladies graves. Le décodage du génome humain a fait apparaître un nouveau moyen de prodiguer des soins. Il s'agit de la thérapie génique. Les techniques de micromanipulation sont alors essentielles pour réaliser les manipulations précises et non contaminantes. D'autres disciplines de la biologie requièrent également l'emploi de systèmes de micromanipulation. Il s'agit entre autres de la fécondation in vitro (FIV), la micro-injection intracellulaire de gènes (ICTS), les réactions chimiques en toxicologie, etc.

1.1.2.4 Médecine

Certaines interventions chirurgicales requièrent une précision que le bras humain ne peut pas atteindre notamment en chirurgie ophtalmique et en neurochirurgie. Le développement de divers outils de micromanipulation et d'endoscopie représente un apport considérable. Le concepteur de micro-outils destinés à être utilisés en milieu médical doit de plus respecter des normes de sécurité sévères (isolation galvanique, matériaux biocompatibles, etc.).

1.2 Téléopération et interface homme-machine en micromanipulation

Le micromonde étant inaccessible directement à l'opérateur, la téléopération reste le moyen le plus sûr pour réaliser les tâches de micromanipulation (figure 1.2(a)). Contrairement au cas du macromonde, l'opérateur n'a pas directement accès par ses sens à ce qui se passe dans le micro-monde. Il est donc indispensable, pour la réussite des tâches de micromanipulation qu'il pilote, de lui fournir dans les meilleures conditions ergonomiques et de précision possibles une information visuelle et haptique. L'interface homme-machine (IHM) y constitue un élément très important. Cette dernière forme une jonction indispensable entre l'opérateur et le micro-environnement, tant sur la commande des micromanipulateurs que celui de la perception sensorielle du micro-environnement.

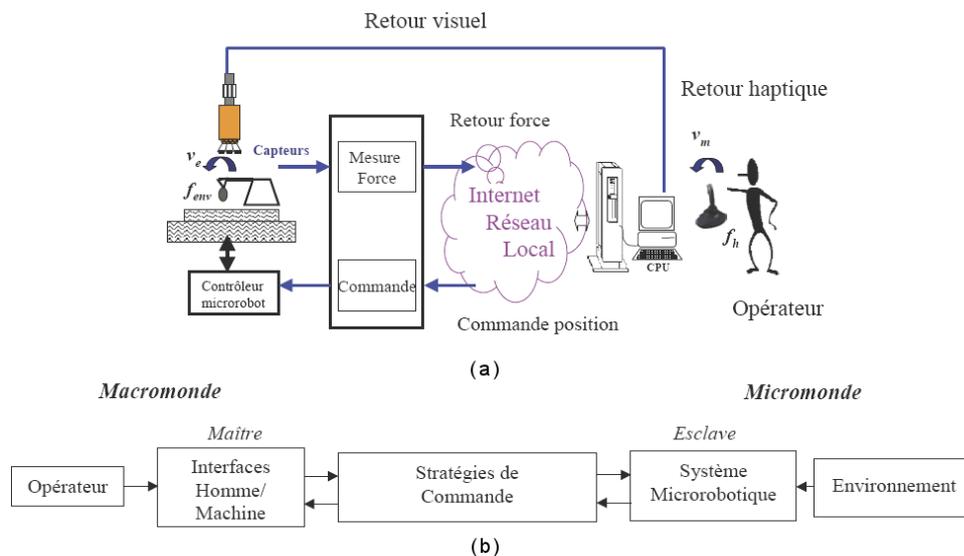


FIG. 1.2 – Architecture d'une chaîne de télé-micromanipulation à retour d'effort : (a) composants du système et (b) schéma-bloc.

Les systèmes de téléopération aux échelles micro et nanoscopiques, quelque soient leurs niveaux hiérarchiques de commande, sont essentiellement basés sur des structures de type "Maître-Esclave" :

1. Le bras de téléopération, à l'échelle humaine, permet à l'opérateur de piloter les degrés de liberté du microrobot en position et/ou en effort, par commande en boucle fermée des mouvements des actionneurs.

2. En retour, des microcapteurs proprioceptifs et/ou extéroceptifs renvoient en temps réel des informations permettant un retour d'effort ou visuel à l'opérateur.

Ces structures sont constituées de cinq sous-systèmes agissant l'un sur l'autre : l'opérateur humain, le dispositif Maître (interfaçage homme/machine), les stratégies de commande, le microrobot Esclave et le micro/nano-environnement comme illustré à la (figure 1.2(b)). En télé-micromanipulation bilatérale, les parties maître et esclave diffèrent complètement de part leur structure cinématique, leurs degrés de liberté ainsi que leur précision de positionnement. La partie maître est constituée généralement par une interface haptique à retour d'effort alors que la partie esclave peut-être constituée soit par un simple effecteur terminal (microlevier AFM, micropipette d'injection, pointe de test électrique, etc.) ou soit par un micropréhenseur.

Dans le but de concevoir des interfaces homme-machine (IHM) ergonomiques, parfaitement adaptées aux modalités de l'opérateur et capables de fournir une aide contextuelle suivant la tâche de micromanipulation, il est important de comprendre les limitations et contraintes des moyens d'observation et d'interaction dans le micromonde. Le concepteur doit également prendre en compte, dans sa réalisation, les différents phénomènes d'interaction qui existent entre l'organe terminal du micromanipulateur et les objets à manipuler. Ces différentes problématiques sont décrites dans les paragraphes suivants.

1.3 Moyens d'observation du micromonde

La révolution qui consiste, à la fin du XVIe siècle, à regarder "à la loupe" non plus directement un objet, mais son image agrandie est à l'origine de la microscopie. L'étymologie (du grec *mikros*, petit, et *skopein*, examiner) renvoie à l'examen d'objets ou de détails d'objets à peine perceptibles ou invisibles à l'œil nu. Au fur des avancées technologiques, la microscopie s'est ensuite progressivement imposée comme une technique d'observation indispensable pour accéder aux propriétés de la matière, inanimée ou vivante.

On distingue deux classes de microscopes : **1) les microscopes à champ lointain** qui utilisent le rayonnement réfléchi, réfracté ou diffracté par l'objet étudié, dans ces microscopes les distances séparant la source de rayonnement de l'objet et du détecteur sont grandes ; c'est le régime de propagation. **2) Les microscopes à champ proche** dans lesquels une sonde est déplacée à la surface de l'objet étudié et maintenue en contact ou à très faible distance de celui-ci au moyen d'une boucle de rétroaction. Ici l'information est saisie à la source même de sa production. La distance objet-détecteur (souvent quelques nanomètres) est faible par rapport à la longueur d'onde du rayonnement.

1.3.1 Microscopie à champ lointain

La classification des microscopes à champ lointain repose sur la nature du rayonnement. On distingue la microscopie optique (ou photonique), qui utilise les radiations électromagnétiques du spectre visible ou encore les radiations infrarouges ou ultraviolettes proches du visible et même des rayons X. La microscopie électronique, utilise, quant à elle, les propriétés ondulatoires de faisceaux d'électrons accélérés, auxquels peut être associée une courte longueur d'onde ; elle atteint ainsi des résolutions bien meilleures que la microscopie optique. Enfin la microscopie acoustique, qui repose sur l'utilisation d'ondes mécaniques.

A. Microscope optique ou photonique : Dans sa version la plus simple, le microscope optique

(OM ¹), dit "à plein champ", est constitué par une association adéquate de lentilles permettant de recueillir les rayons lumineux diffractés par l'objet observé. L'intérêt principal de ce microscope est son fonctionnement qui ne requiert pas d'atmosphère contrôlée, de plus il autorise un champ d'analyse relativement important (comparé aux autres techniques). L'inconvénient principal de ce microscope est sa faible profondeur de champ [ZHOU ET NELSON, 1999] [McCULLAGH ET SHEVLIN, 2004], celle-ci est d'autant plus faible que l'agrandissement est important.

De récentes recherches ont toutefois tenté de résoudre ce problème, cela en exploitant le critère de "la profondeur à partir de la mise au point" (de l'anglais, *depth from focus*) [OHBA ET AL., 2002]. Le système proposé est composé d'une lentille souple actionnée par un dispositif piézoélectrique, permettant à la lentille de passer d'une configuration concave à une configuration convexe. Une fois le système calibré, la scène observée est ensuite balayée en profondeur. Un coefficient de qualité est attribué à chaque pixel durant toute la phase de balayage. Une fois toutes les images obtenues, nous obtenons une image claire de la scène (voir figure 1.3(d)). Cette technique permet d'obtenir une carte de profondeur de la scène, permettant ainsi une reconstruction 3D de la scène.

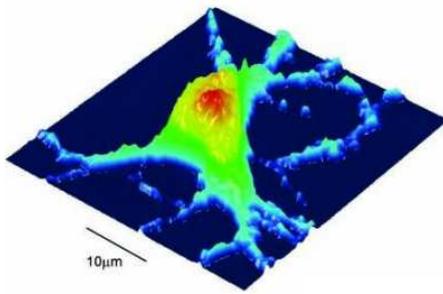
Au microscope optique classique sont venus s'adjoindre plusieurs autres dispositifs :

- I. **Microscopie à contraste de phase** : Appelée également microscopie holographique, ce mode de microscopie repose sur le principe de l'holographie [KIM, 2000], il permet de relever la topographie 3D de la surface de l'objet observé (voir figure 1.3(a)).
 - II. **Microscopie à fluorescence** : Dans ce mode d'observation, l'échantillon est marqué avec un corps fluorescent procurant ainsi une image d'excellent contraste. L'inconvénient majeur de ce microscope est une perte de résolution due à l'émission de fluorescence défocalisée qui se superpose à l'image du plan focal. Ce problème a été résolu avec la microscopie confocale.
 - III. **Microscopie confocale** : Ce mode d'observation consiste à pratiquer des "coupes optiques virtuelles" dans l'objet observé et de n'enregistrer que l'image de la fluorescence émise dans un plan (voir figure 1.3(c)). On obtient ainsi une distribution tridimensionnelle de la fluorescence dans la substance étudiée.
- B. **Microscope électronique** : La microscopie électronique (EM ²) emploie la propagation des électrons auxquels est associée une longueur d'onde beaucoup plus courte que celle de la lumière. Les électrons impressionnant la plaque photographique ou excitant la fluorescence. Le fait d'utiliser des électrons au lieu de photons impose cependant un certain nombre de contraintes, même s'ils sont relativement faciles à obtenir et à accélérer par un champ électrostatique. En raison de leur fort pouvoir d'interaction avec la matière, ils ne se propagent librement que dans une enceinte sous vide (ou ultravide). Pour les dévier ou les focaliser, l'optique adaptée fait appel à des lentilles électroniques, où des champs électriques ou magnétiques de révolution modifient leurs trajectoires. Il existe actuellement deux grandes familles de microscopes électroniques :
- I. **Microscopes électroniques à transmission** : La microscopie électronique à transmission (TEM ³) est une méthode permettant de voir le cœur de la matière. Elle consiste à placer un échantillon mince sous un faisceau fixe d'électrons, et de visualiser l'impact

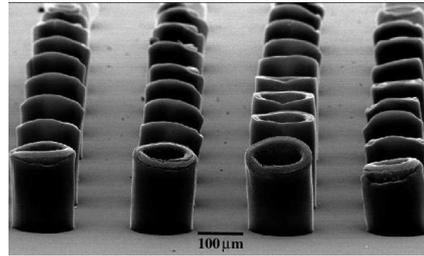
¹de l'anglais *Optical Microscopy*

²de l'anglais *Electron Microscopy*

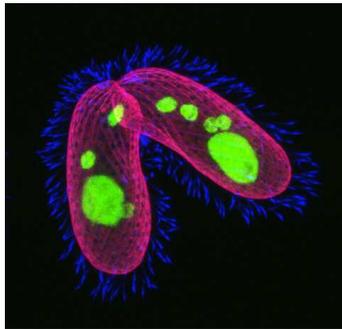
³de l'anglais *Transmission Electron Microscopy*



(a) Cellule neuronale observée avec un microscope à contraste de phase [KIM, 2000]



(b) Nanotubes observés avec un SEM



(c) Cellules tetrahymena thermophila observées avec un microscope confocal



(d) Circuit intégré observé avec un microscope optique classique et avec un microscope optique équipé d'un dispositif "multifocusing" [OHBA ET AL., 2002]

FIG. 1.3 – Images issues de microscopes à champ lointain.

des électrons sur un écran fluorescent. Cette méthode est utilisée principalement en biologie et en métallurgie.

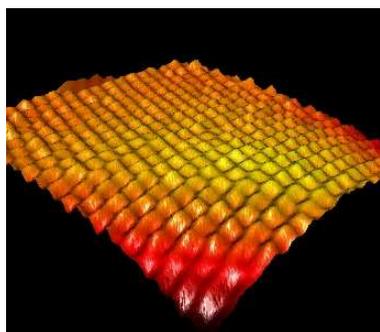
II. Microscopes électroniques à balayage : Dans la microscopie électronique à balayage (SEM ⁴) l'image est obtenue séquentiellement, point par point, en déplaçant la sonde d'électrons primaires sur la surface de l'échantillon. Les électrons diffusés ou émis par la surface explorée sont focalisés pour former une image que l'on peut observer directement. Bien que la résolution d'un microscope électronique à balayage soit, en général, inférieure à celle d'un microscope électronique à transmission, cet appareil est un outil incomparable pour l'observation de la surface des objets ; la grande profondeur de champ de ce microscope permet d'obtenir des images ayant un relief apparent important (voir figure 1.3(b)).

C. Microscope acoustique : La microscopie acoustique n'est ni corpusculaire, ni électromagnétique : elle utilise les ondes mécaniques longitudinales que sont les vibrations acoustiques. Elle permet de ce fait l'obtention d'images en profondeur. Elle est ainsi la seule méthode de visualisation à fournir des images du cœur de la matière à l'échelle du micromètre.

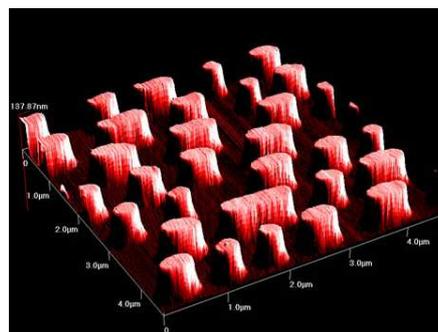
⁴de l'anglais *Scanning Electron Microscopy*

1.3.2 Microscopie à champ proche

Les années 1980 ont vu la naissance et le développement de la microscopie en champ proche, encore appelée microscopie à sonde locale, avec, notamment, les succès du microscope à effet tunnel (STM ⁵) et du microscope à force atomique (AFM ⁶). Avec ces nouveaux instruments, l'objet est analysé point par point par balayage d'une sonde locale, une pointe très effilée, placée à quelques distances atomiques de sa surface. L'image obtenue est une cartographie d'une grandeur physique caractéristique de l'objet sondé. Ces nouveaux microscopes sont caractérisés par l'absence d'une optique de transmission ; ils échappent donc aux limitations inhérentes à ces composants optiques. Les différents types de microscopes sont caractérisés par le phénomène physique choisit pour mesurer la distance entre pointe et surface.



(a) Surface d'un cristal observée avec un STM



(b) Surface d'un DVD observée avec un AFM

FIG. 1.4 – Microscopie en champ proche.

- A. **Microscope à effet tunnel** : Ce type de microscope repose sur la mesure du courant tunnel entre une pointe et un échantillon, tous deux conducteurs. Cette mesure, couplée à un balayage XY de l'échantillon ou de la pointe, permet d'obtenir des images dans l'espace direct de la surface analysée, images dont le contraste est pour l'essentiel fixé par la densité d'états électroniques. Étant donnée la dépendance exponentielle du courant tunnel avec la distance, la résolution atomique est assez facilement obtenue par STM (voir figure 1.4(a)), que ce soit sous ultra-vide ou même à l'air ambiant. Cependant, la limite d'utilisation aux échantillons conducteurs réduit considérablement le domaine d'étude.
- B. **Microscope à force atomique** : Le premier microscope dérivé du microscope à effet tunnel est le microscope à force atomique. Celui-ci utilise l'effet de proximité de la pointe et de l'échantillon et non le contrôle du courant tunnel. L'interaction de la pointe avec la surface est mesurée via la déflexion du microlevier (ou cantilever) qui supporte la pointe. Le cantilever peut être défléchi sous l'action de forces de différents types : Van der Waals, électrostatique, magnétique, chimique, etc. L'étude n'est donc plus limitée aux échantillons conducteurs (voir figure 1.4(b)). Cependant, de telles forces suivent en général des lois de puissance, ce qui fait que la résolution latérale en AFM est, dans la plupart des cas, moins bonne que celle du STM, car une plus grande partie de la pointe et de l'échantillon contribue à l'interaction. Outre l'imagerie traditionnelle qui permet de caractériser la topographie d'une surface, l'AFM, de par la multitude des interactions qu'il peut mesurer, permet l'étude des propriétés mécaniques, magnétiques, électrostatiques, tribologiques, etc. sur pratiquement n'importe

⁵de l'anglais Scanning Tunneling Microscopy

⁶de l'anglais Atomic Force Microscopy

quel type d'échantillon, et permet en outre une caractérisation à l'air libre ou en atmosphère contrôlée. Les AFM ont également été développés pour des tâches plus spécifiques telles que la nano-lithographie ou la micro/nanomanipulation (voir section 1.6).

- C. **Microscope optique en champ proche** : Une des limitations de la microscopie optique classique est la diffraction. En effet, lorsqu'un objet, ou le détail d'un objet, est plus petit que la longueur d'onde de la lumière qui l'éclaire, la lumière est diffusée sous la forme d'une tâche, on ne peut donc pas avoir une image nette du détail.

Une des manières de résoudre ce problème consiste à placer le détecteur de lumière très proche de la surface. Ainsi, on observe l'onde évanescente et non pas l'onde dispersée. On peut donc visualiser des détails plus petits que la longueur d'onde de la lumière. La lumière est apportée et récupérée par une fibre optique ; la surface observée est limitée par un trou plus petit que la longueur d'onde de la lumière.

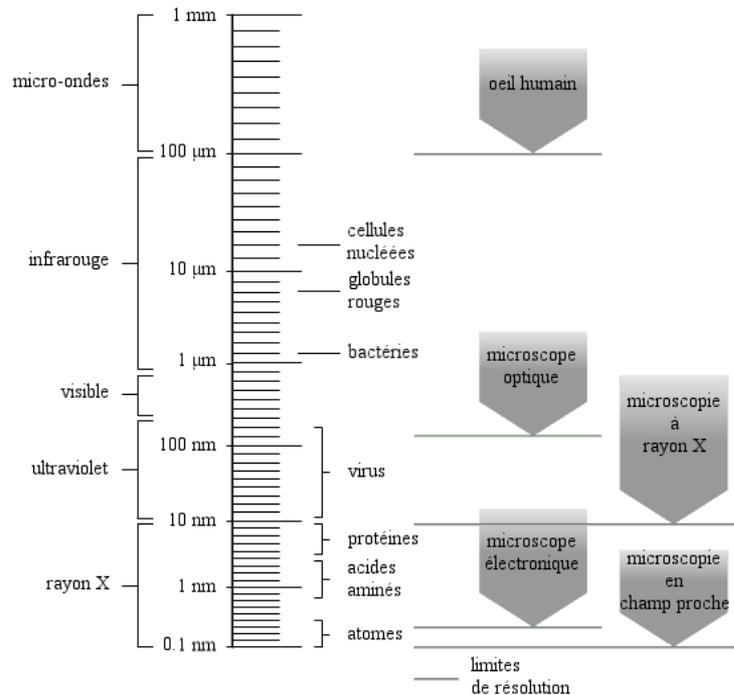


FIG. 1.5 – Limites de résolution des différentes techniques de microscopie.

1.4 Moyens d'interaction : effecteurs et micromanipulateurs

La micromanipulation concerne de nombreux secteurs, que ce soit l'assemblage de pièces micromécaniques rigides (microues dentées, microlentilles optiques, circuits hybrides, etc.) ou la manipulation d'éléments biologiques pour la médecine ou les biotechnologies (micro-organismes, cellules, ADN, etc.). Pour répondre à ces besoins, il existe plusieurs principes plus ou moins adaptés aux domaines d'applications. Parmi ces principes de micromanipulation, deux catégories se distinguent : 1) la **micromanipulation par contact** et 2) la **micromanipulation sans contact**.

1.4.1 Micromanipulation par contact

Dans cette catégorie, chacune des solutions met en œuvre un préhenseur, c'est-à-dire un organe, dont un ou plusieurs points de contact sont nécessaires pour saisir un micro-objet. Nous rencontrons plusieurs principes de fonctionnement :

I. Préhenseurs à simple effecteur

A. **Microlevier AFM** : En complément de ses différents modes de fonctionnement, l'AFM peut être utilisé comme un outil de manipulation de micro et nano-objets. La pointe AFM permet différents types de manipulation, dont les plus importants sont :

- i. *le positionnement* : la pointe pousse ou tire un micro-objet sur une surface. Dans cette configuration l'objet reste en contact physique avec la surface et le microlevier en contact avec l'objet. Le déplacement est réalisé à partir de poussées successives d'un (ou plusieurs) objet(s) afin de réaliser un motif 2D [SITTI ET HASHIMOTO, 2000].
- ii. *le transport* : ce type de manipulation consiste à saisir le micro ou nano-objet, le déplacer puis le déposer sur une zone choisie. La phase de saisie repose sur l'utilisation des forces d'adhésion existant au niveau du micro-environnement. Pour le lâcher de l'objet, une très forte accélération est donnée au microlevier afin de vaincre les forces d'adhésion à l'interface pointe AFM-objet [HALIYO ET AL., 2002].
- iii. *la modification* : dans cette configuration, la pointe AFM tire ou appuie pour déformer un micro ou nano-objet (rigide, flexible, vivant) afin par exemple, d'observer l'évolution de ses propriétés mécaniques sous contraintes, de réaliser une dissection d'un chromosome, de réaliser des motifs de nanogravure, etc.[STARK ET AL., 1998] (voir figure 1.6(a)).

B. **Manipulateur magnétique** : Cette catégorie de manipulateurs repose sur l'exploitation de l'énergie magnétique créée par un aimant. Dans certaines applications, le champ magnétique engendré est utilisé pour contrôler un effecteur élaboré avec un matériau ferromagnétique [GAUTHIER, 2002]. On peut grâce à ce dispositif positionner en milieu liquide des micro-objets jusqu'à $20\mu\text{m}$ de diamètre avec une précision du micron (voir figure 1.6(b)). On peut également quantifier et contrôler l'effort appliqué sur l'objet manipulé afin de ne pas le détériorer.

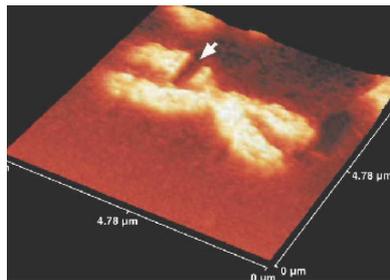
Dans d'autres applications (microbiologiques) l'effecteur est remplacé par de fines particules paramagnétiques ou ferromagnétiques attachées à des anticorps. Une fois ces particules plongées dans l'échantillon à analyser, les anticorps se fixent sur les cellules cibles, permettant ainsi leur manipulation avec un champ magnétique.

C. **Micropipettes** : Les instruments les mieux adaptés à la chirurgie cellulaire sont les micropipettes et les micro-aiguilles [KAPOOR ET AL., 2003]. Les micropipettes, fabriquées à la microforge ou à l'aide d'appareils appelés étireurs de pipettes, peuvent être utilisées, si elles sont de fort calibre, comme instruments de contention d'une cellule. Plus petites, elles servent à l'injection de diverses substances ou à l'aspiration du contenu cellulaire (voir figure 1.6(d)). Leur diamètre intérieur peut être réduit de façon courante à un micron. De récents travaux ont permis l'intégration de capteurs d'efforts aux micropipettes d'injection, permettant ainsi à l'opérateur de ressentir l'effort exercé durant les différentes phases de la micro-injection [YU ET NELSON, 2001].

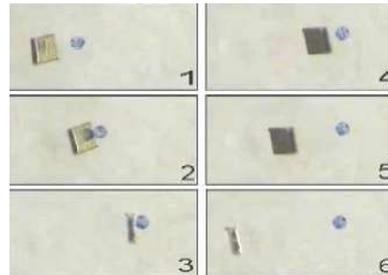
II. **Préhenseurs à doigts de serrage** : Les préhenseurs à doigts de serrage, ou micropince, sont des outils intuitifs pour l'utilisateur, ils peuvent aussi s'adapter à la préhension de bon nombre de micro-objets (voir figure 1.6(c)). Ils sont composés généralement de deux ou trois effecteurs comprenant chacun un ou deux degrés de libertés. De nombreuses réalisations existent actuellement, il est possible de les classer en deux grandes catégories [AGNUS ET AL., 2003] :

- A. *Les micropinces « discrètes »* composées d'actionneurs, lesquels déforment une structure compliant passive réalisée dans un matériau tel que le nickel, l'acier, le silicium ou même le verre pour ne citer que les exemples les plus répandus, et d'une interface spécifique entre les mouvements de la pince et l'objet à manipuler, appelée organe terminal [TANIKAWA ET ARAI, 1999].
- B. *les micropinces partiellement ou totalement monolithiques*, pour lesquelles un matériau actif joue le rôle à la fois de structure mécanique [POPA ET STEPHANOU, 2004], voire d'amplificateur de mouvement, mais aussi d'actionneur ; les déformations peuvent alors être directement utilisées à des fins de manipulation.

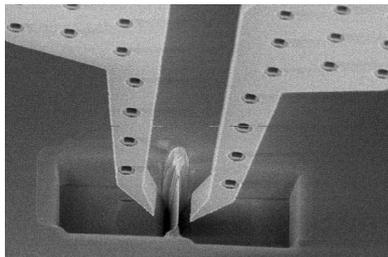
Certains de ces systèmes sont équipés de capteurs d'effort, généralement intégrés aux effecteurs, permettant ainsi à l'opérateur de ressentir l'effort durant la phase de serrage [AGNUS, 2003].



(a) Dissection d'un chromosome avec un AFM [STARK ET AL., 1998]



(b) Manipulation d'une microbille de polystyrène avec un micropousseur magnétique [GAUTHIER, 2002]



(c) Manipulation d'un MEMS avec une micropince



(d) Micro-injection cellulaire à l'aide de micropipettes

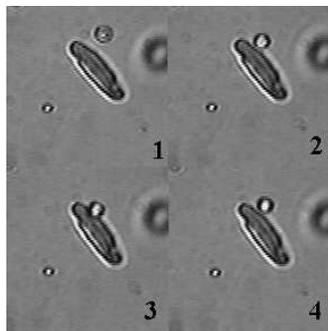
FIG. 1.6 – Micromanipulation avec contact.

1.4.2 Micromanipulation sans contact

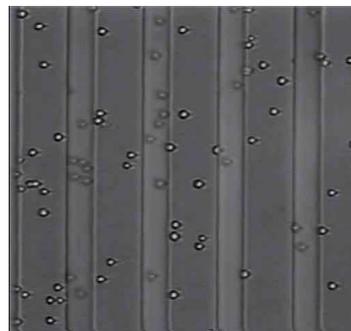
Nous entendons par manipulation sans contact toutes les techniques dont les effets à distance permettent la maîtrise des mouvements des objets. Parmi les nombreux principes existant nous

pouvons citer :

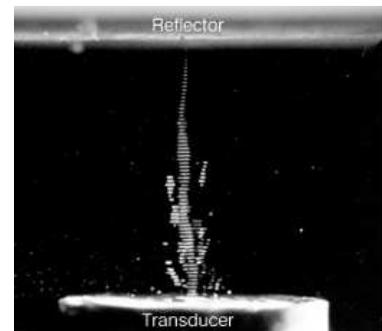
- I. **Manipulateur optique** : Le principe physique utilisé pour la manipulation optique (de l'anglais, *laser trapping*) est la pression lumineuse [ASHKIN ET AL., 1986]. Cette force est due à la pression exercée par la réflexion d'un rayon lumineux sur la surface d'un objet (voir figure 1.7(a)). Une limitation de ce procédé réside dans la forme de l'objet à déplacer. Celui-ci doit être transparent, de forme elliptique ou sphérique et posséder un indice de réfraction supérieur au milieu ambiant (liquide pour minimiser les frottements).
- II. **Manipulateur diélectrophorétique** : Lorsqu'une particule est plongée dans un champ électrique non constant, elle est soumise à une force diélectrophorétique. Suivant la constante diélectrique de la particule et de la fréquence du signal électrique, la particule se dirige vers la zone de fort champ électrique ou vers la zone de faible champ de potentiel.
Le dispositif permettant d'exploiter ce phénomène pour la micromanipulation utilise le concept de l'onde progressive positive [BAKEWELL ET AL., 1998]. Une série d'électrode situées dans le milieu et alimentées en quadrature de phase sont utilisées pour créer l'onde électrique (voir figure 1.7(b)). Le sens de déplacement et la vitesse de déplacement de la particule dans ce champ électrique dépend alors de ses propriétés diélectriques et de sa morphologie ainsi que de la fréquence et de l'amplitude de l'onde progressive.
- III. **Manipulateur acoustique** : Le principe physique utilisé pour la manipulation acoustique (ultrasonore) est la pression exercée par une onde acoustique lorsqu'elle est stoppée par un objet [HAAKE, 2004]. Cette pression va exercer une force pour déplacer l'objet dans le sens de propagation de l'onde (voir figure 1.7(c)). Malgré le fait que cette force soit très faible, il est possible de la faire converger et de l'utiliser pour déplacer des micro-objets.



(a) Manipulation d'un globule rouge avec un micromanipulateur optique [ASHKIN ET AL., 1986]



(b) Manipulation de microbilles en polystyrène par onde progressive positive diélectrophorétique [BAKEWELL ET AL., 1998]



(c) Transport de particules avec des ondes ultrasonores [HAAKE, 2004]

FIG. 1.7 – Micromanipulation sans contact.

1.4.3 Micromanipulation hybride

Les systèmes cités ci-dessus utilisent tous un seul mode de micromanipulation (contact ou sans contact). Ils sont destinés à des tâches relativement simples. Pour des procédés de micromanipulation beaucoup plus évolués, il existe des techniques qui utilisent les deux modes simultanément, permettant ainsi de combiner les avantages des deux modes suivant le contexte de manipulation [STARK ET AL., 2003].

1.5 Influences du micromonde

1.5.1 Effets d'échelle

La micromanipulation pose des problèmes spécifiques différents de ceux de la manipulation classique de dimensions plus traditionnelles, du fait du facteur d'échelle. En effet, dès lors que les dimensions deviennent suffisamment petites, l'effet d'échelle trouve son origine dans le fait que les grandeurs physiques ont des dépendances différentes par rapport à la variable de dimension. La conséquence majeure de ce phénomène est l'augmentation de l'importance des forces de surface proportionnellement aux forces inertielles (volumiques). Les forces de Van der Waals, de capillarité et électrostatiques quasi non perceptibles à l'échelle humaine deviennent largement prépondérantes par rapport aux forces de gravité. Une autre influence de l'effet d'échelle est la différence de dynamique entre le nano et le macromonde. Celle-ci est en effet beaucoup plus rapide au niveau nanométrique.

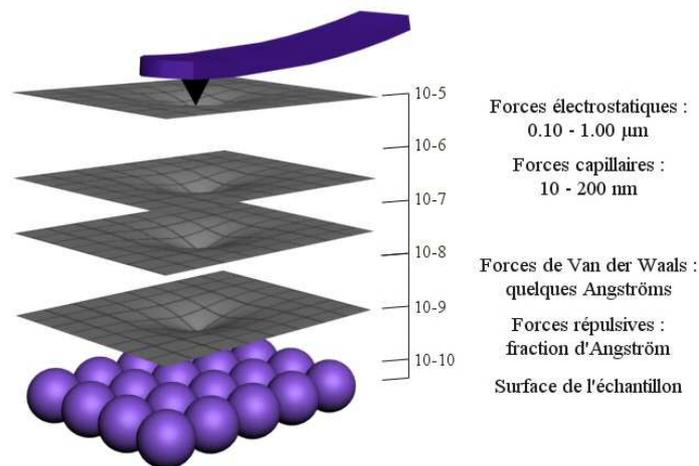


FIG. 1.8 – Diagramme des différentes forces rencontrées par un levier AFM.

1.5.2 Forces du micromonde

Les forces d'adhésion font essentiellement intervenir des forces à longue et courte portée :

1.5.2.1 Forces à longue portée

A. *Forces de Van der Waals* : L'appellation "forces de Van der Waals" englobe trois formes distinctes d'interaction entre les molécules. Ces forces se caractérisent par une dépendance spatiale en $1/r^6$, où r est la distance entre les molécules considérées. Ces forces résultent des interactions suivantes :

- i. La force d'orientation de Keesom (dipôle permanent - dipôle permanent) : cette force caractérise l'interaction entre dipôles permanents d'orientation aléatoire, en l'absence de contrainte extérieure, les dipôles s'alignent pour minimiser l'énergie.
- ii. La force d'induction de Debye (dipôle permanent - dipôle induit) : cette force est provoquée par le champ électrique entourant une molécule dipolaire. Ce champ électrique

polarise les molécules qui s'y trouvent, ces molécules sont alors attirées par les molécules polaires.

- iii. La force de dispersion de London (dipôle induit - dipôle induit) : Cette force est la composante la plus importante et apporte le plus de contribution à la force générale de Van der Waals. Elle existe et agit entre toutes les molécules, atomes ou particules, à partir de 2 jusqu'à plus de $10\eta m$.

Elle est liée à la polarisabilité électronique des atomes et résulte de la création d'un moment dipolaire instantané induit dans le temps, ce dipôle agit sur une molécule voisine et y induit un dipôle. Pendant une durée très courte apparaît une force d'attraction entre les deux molécules.

- B. *Forces capillaires* : Cette force a pour origine le mince film d'eau qui est toujours présent à la surface d'un échantillon se trouvant dans l'air humide ambiant. A proximité de la surface, cette force est attractive et tend à retenir les objets en contact, il faut alors s'éloigner de quelques centaines d'Angströms pour réussir à séparer les deux surfaces. On peut éliminer ces forces de capillarité en travaillant en atmosphère contrôlée sèche, ou sous vide, ou encore en solution aqueuse.
- C. *Forces électrostatiques* : De manière volontaire ou par triboélectrification, il peut apparaître des charges sur la surface des objets en interaction. Celles-ci peuvent alors engendrer des forces électrostatiques (forces de Coulomb). Elles peuvent être attractives ou répulsives. Parmi les trois forces présentées, ce sont les forces électrostatiques qui sont les plus fortes. Cependant, elles peuvent être plus facilement supprimées par exemple en plaçant les objets en interaction au même potentiel.

1.5.2.2 Forces à courte portée : Forces de répulsion

En rapprochant deux objets à quelques Angströms, les nuages électroniques des ions se recouvrent et créent une force répulsive qui augmente rapidement si l'on continue à rapprocher les deux corps. La force de répulsion ionique est une force à courte portée qui peut être décrite par une loi en puissance du type $F \approx 1/r^n$ ou n est compris entre 10 et 16.

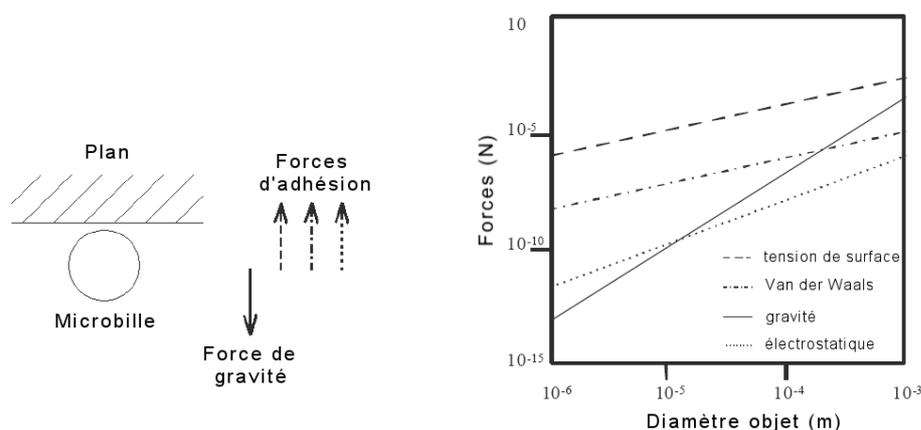


FIG. 1.9 – Amplitude des forces dans le micromonde.

A titre d'illustration, la figure 1.9 représente l'amplitude des forces mises en jeu entre une microsphère de rayon r et un plan à la distance z de la microsphère dans l'air. A travers cet

exemple, on se rend ainsi compte que la force de gravité n'est pas prépondérante dans les dimensions considérées ici, et devient même la plus faible pour des microsphères de rayon inférieur à $10.0 \mu m$.

1.6 État de l'art des systèmes de télé-micromanipulation

Le niveau d'interaction homme/machine dépendant fortement de la tâche dévolue, de l'échelle dimensionnelle des objets à manipuler, de la nature de l'environnement et de la précision requise, plusieurs stratégies de télé-micromanipulation ont été étudiées dans la littérature scientifique. Dans cet état de l'art, nous proposons une classification des différents systèmes de télé-micromanipulation suivant le type de couplage entre l'opérateur et le système de micromanipulation. Nous distinguons sur cette base trois classes de systèmes de télé-micromanipulation (voir figure 1.10) :

- Systèmes de télé-micromanipulation classiques ;
- Systèmes de télé-micromanipulation à désignation d'objectifs ;
- Systèmes de télé-micromanipulation assistés par ordinateur.

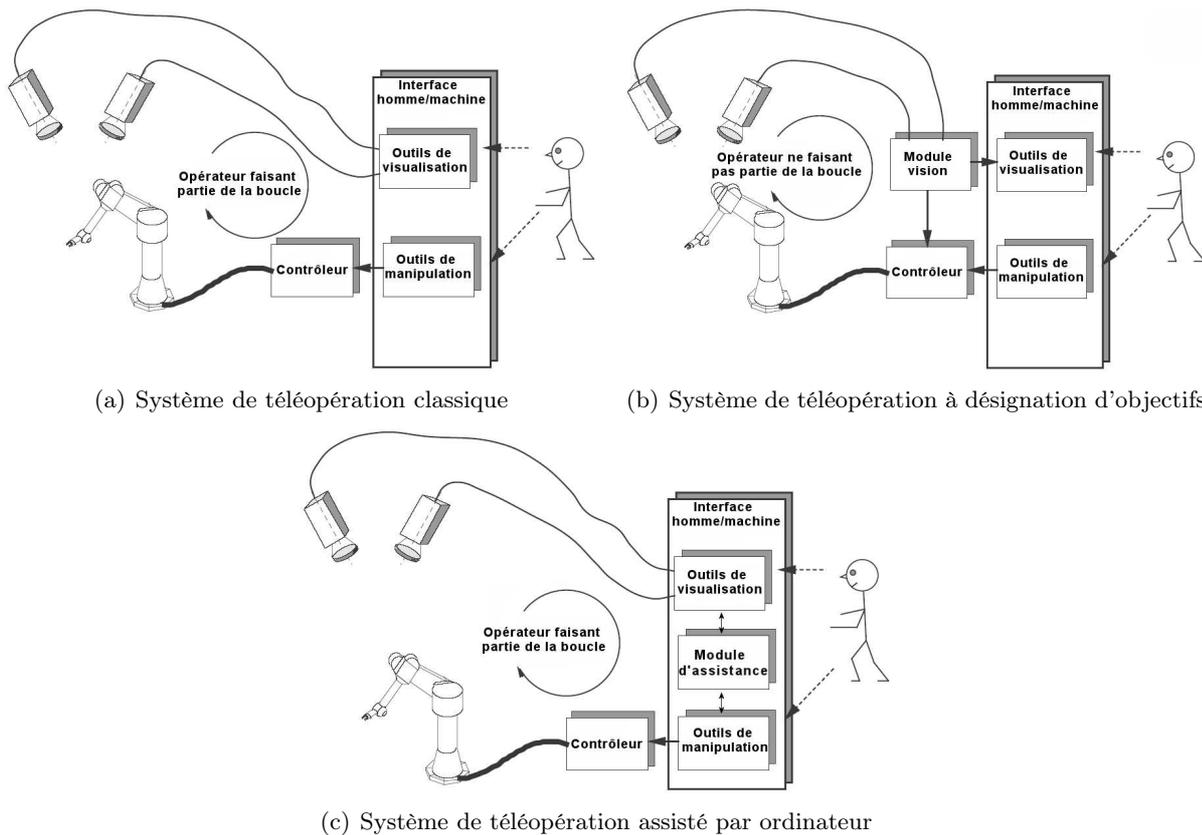


FIG. 1.10 – Classification des systèmes de télé-micromanipulation.

Nous allons détailler dans la suite de cette section les aspects technologiques de ces procédés, nous introduirons également quelques rares travaux portant sur l'aspect cognitif de l'interfaçage homme-machine pour les systèmes de télé-micromanipulation.

1.6.1 Systèmes de télé-micromanipulation classique

L'idée d'injecter des substances chimiques dans une cellule biologique est sans doute à l'origine de la micromanipulation, les premiers dispositifs à pouvoir réellement porter le nom de système de micromanipulation furent mis au point par Barber et Schouten au début du XXe siècle [KORZH ET STRAHLE, 2002]. Ce sont des appareils utilisant des systèmes de transmission mécaniques, à vis micrométriques, capables de réaliser des mouvements fins d'une pipette d'injection. Les tâches de micromanipulation sont directement observées par l'opérateur à travers l'objectif d'un microscope optique (voir figure 1.11(a)).

Depuis, les systèmes de micromanipulation se sont généralisés à d'autres applications comme la manipulation de pièces micromécaniques ou microélectromécaniques [NELSON ET AL., 1998] (voir figure 1.11(b)). Ces nouveaux dispositifs se caractérisent par une plus grande précision de déplacement grâce à l'adjonction d'actionneurs plus performants (piézoélectrique, électromagnétique, etc.) possédant des boucles de rétroaction en position et en force [LUO ET NELSON, 2001]. Ces dispositifs sont également plus ergonomiques et prennent en compte le facteur humain pour améliorer les performances de l'opérateur, cela, en rehaussant en premier lieu le mode visuel, avec l'utilisation, par exemple, de plusieurs vues de la scène de travail afin d'augmenter le champ de vision de l'opérateur [KIM ET AL., 2001], ou pour lui offrir différents points de vues de la scène de travail [SONG ET AL., 2001]. Ces nouveaux systèmes introduisent également de nouvelles modalités comme le retour d'effort [SUN ET AL., 2003] [FUNG ET AL., 2002], ils utilisent pour cela des micromanipulateurs équipés de microcapteurs de force ainsi que d'interfaces haptiques adaptées. L'opérateur peut ensuite, à l'aide d'un couplage bilatéral adéquat, ressentir les efforts exercés durant les tâches de micromanipulation.

L'arrivée de nouveaux moyens d'observation tels que les microscopes électroniques ou les microscopes à force atomique a permis d'entrevoir des applications à des échelles encore plus petites [SITTI ET HASHIMOTO, 1999] [DONG ET AL., 2001]. Les systèmes de télé-micromanipulation classiques trouvent là leurs limites d'utilisation. Les nouvelles contraintes technologiques apportées par les nouveaux moyens d'observation, ainsi que la dynamique de la physique du micromonde, limitent l'interaction directe entre l'opérateur et la tâche à réaliser. Ceci pour diverses raisons :

- *observation et manipulation différées* : Dans le cas de la microscopie à champ proche (AFM ou STM), il y a impossibilité d'interagir en temps-réel avec le micro-objet car l'observation et la manipulation sont menées de manière séparées. La pointe AFM (ou STM) sert dans un premier temps à scanner la surface à observer (pendant quelques dizaines de secondes à quelques minutes) et puis dans un second temps, à manipuler les micro-objets. La représentation étant statique, il est nécessaire de scanner régulièrement la surface afin de mettre à jour la scène de manipulation.
- *espace de travail fortement confiné* : Compte tenu de la méthode d'observation utilisée par la microscopie à champ proche, l'espace de travail est très localisé autour de l'objet (confiné à quelques μm^3) et de ce fait, l'opérateur n'a pas accès visuellement à tout l'espace de travail.
- *dynamique de l'environnement* : La dynamique du micro-environnement est sujette à de nombreuses variations (lumière, température, vibrations) et non-linéarités des micromanipulateurs (dérives, hystérésis, etc.), qui conduisent la plupart du temps à des dérives des commandes envoyées par le téléopérateur. De plus, la forte dynamique et les non-linéarités des microforces d'adhésion rendent les opérations de télémanipulation très difficiles à exécuter par l'opérateur, car l'un des problèmes majeurs des forces d'adhésion concerne la dépose précise du micro-objet manipulé qui a tendance à coller au micromanipulateur.

Ces différentes contraintes technologiques et physiques font que l'opérateur doit recourir à d'autres stratégies d'intervention plus évoluées.

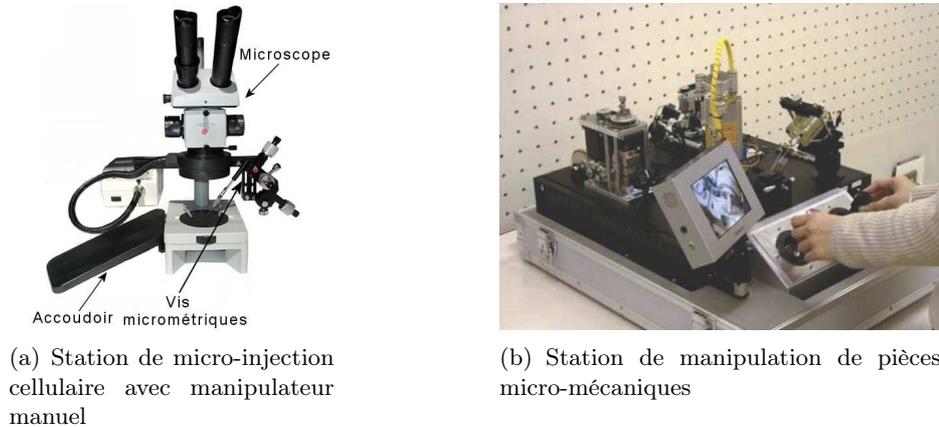


FIG. 1.11 – Système de télé-micromanipulation classique.

1.6.2 Systèmes de télé-micromanipulation à désignation d'objectifs

Afin d'augmenter la précision et la fiabilité des procédés de micromanipulation, différentes solutions basées sur le concept de la commande partagée (de l'anglais, *shared control*) ont été proposées. Ces approches reposent sur une plus grande autonomie du système de micromanipulation à l'aide de boucles réflexes qui s'appuient sur une perception proprioceptive et/ou extéroceptive du micro-environnement par le microrobot. L'opérateur est dans ce cas vu comme un superviseur [SHERIDAN, 1992] (voir figure 1.17(b)).

Sulzmann propose un système de télé-micromanipulation où l'opérateur programme *hors ligne* les trajectoires du microrobot [SULZMANN ET AL., 1995]. Il utilise pour cela une interface graphique 3D pour une programmation plus intuitive des tâches (voir figure 1.12). Les trajectoires sont ensuite envoyées au site esclave pour être exécutées, et sont éventuellement réajustées durant le déroulement des opérations à l'aide d'un système de vision ou directement par l'opérateur. Dans [CODUREY ET AL., 1996] [JOSEPH ET AL., 2000], les auteurs proposent des systèmes de télé-micromanipulation où les tâches à réaliser sont spécifiées *en ligne* juste avant leurs exécutions. L'opérateur spécifie cette fois-ci uniquement des tâches élémentaires, telles que la saisie et la dépose de micro-objets par adhésion, le déplacement ou encore le suivi de trajectoires. Le système génère ensuite les trajectoires nécessaires pour l'exécution de cette tâche. Dans [RAMACHANDRAN ET AL., 1997] et [KASAYA ET AL., 1999], les auteurs proposent des méthodologies évoluées de planification de tâches de micro/nanomanipulation. Les auteurs présentent une décomposition hiérarchique des tâches en opérations élémentaires suivant un protocole propre à chaque procédé de micro/nano manipulation. Ces opérations sont à leur tour décomposées en mouvements élémentaires jusqu'à l'obtention d'un ensemble de déplacements. L'inconvénient principal des approches précédentes est le fait qu'elles reposent uniquement sur le modèle géométrique de la scène et qu'elles ne prennent pas en considération la réalité des forces au niveau du micro-environnement, telles que les forces de Van der Waals, de capillarité ou électrostatiques.

Dans [FEDDEMA ET AL., 1999] et [ZHOU ET AL., 2000a], les auteurs introduisent des modèles physiques dans leurs stratégies de planification de tâches. Les modèles utilisés sont toutefois propres aux tâches à réaliser et aux conditions de manipulation. Il s'est avéré que dans la plupart des cas, les programmes élaborés *hors ligne* n'ont pas pu être exécutés correctement. Il peut se

faire, en effet, que le micro-environnement modélisé vienne à varier durant l'exécution (température, humidité, manipulateur, etc.). Des écarts de représentation entre les modèles synthétiques (3D) et la cellule réelle sont alors inévitables. Ces incertitudes sont des :

- *Incertitudes géométriques* : liées au dimensionnement des modèles synthétiques ou encore à la mauvaise qualité du retour visuel, pour estimer la position exacte de l'objet saisi pendant les phases de préhension, manipulation, assemblage ou dépose ;
- *Incertitudes dynamiques* : essentiellement dues aux non-linéarités dynamiques de l'environnement notamment les micro-forces d'interaction de non contact (forces adhésives) et de contact (frottement, viscosité, etc.).

Ces modèles microphysiques n'ont pas pu être validés expérimentalement dans des tâches réelles de micro-assemblage.

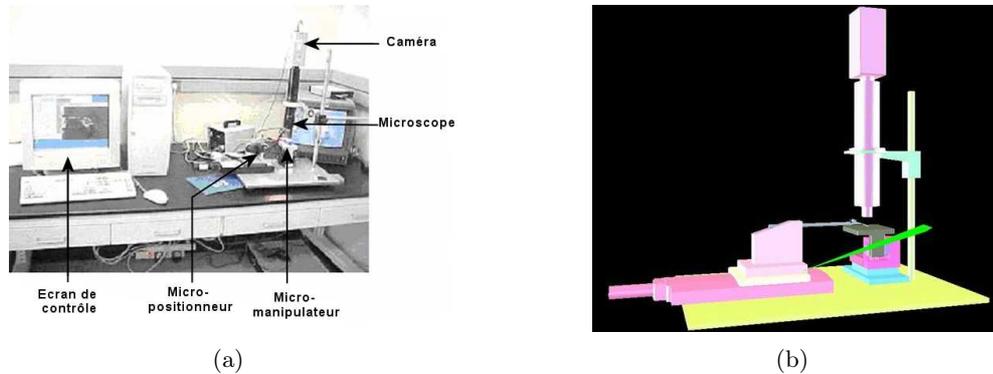


FIG. 1.12 – Systèmes de télé-micromanipulation à désignation d'objectifs [SULZMANN ET AL., 1995].

Une solution plus robuste est proposée dans [FERREIRA ET AL., 2004] où un recalage des modèles microphysiques virtuels et des images réelles est réalisé par l'intermédiaire d'une interprétation référencée vision. A partir des commandes " Meta " et d'un langage de programmation de haut-niveau, diverses séquences de planification ont été implémentées en ligne avec succès (voir figure 1.13).

Malgré le gain considérable en précision et en temps d'exécution apporté aux tâches de micromanipulation, actuellement, la télé-micromanipulation à désignation d'objectifs reste difficilement généralisable à toutes les applications de micro/nanomanipulation, et reste spécifique aux applications où les conditions de manipulation restent relativement maîtrisées. Par ailleurs, on remarque actuellement une nouvelle tendance qui consiste à faire usage à la fois de la téléopération classique (propriétés d'adaptation de l'opérateur) et de la téléopération à désignation d'objectifs (autonomie du système) [THOMPSON ET FEARING, 2001] [SAHAI ET AL., 2003] [FERREIRA, 2003]. La présence permanente d'un téléopérateur humain dans la boucle de commande s'est avérée primordiale compte tenu de ses capacités d'intervention, lors de phases de micromanipulation erronées ; ou encore d'assistance, lors de la prise de décision au niveau de conflits de commande entre le modèleur virtuel et le contrôleur. Ces constatations ont amené les chercheurs à redéfinir le rôle de l'opérateur humain dans la boucle de commande d'une chaîne de micro-téléopération et concevoir des architectures centrées sur l'opérateur.

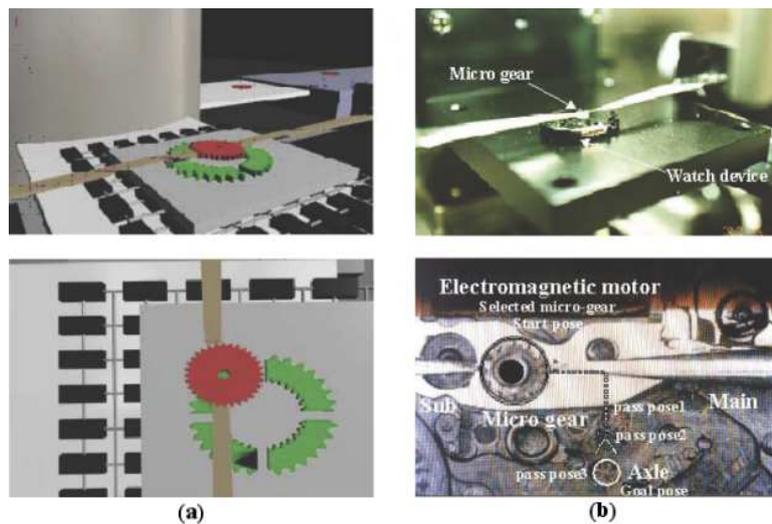


FIG. 1.13 – Recalage virtuel et réel : (a) Différentes vues (frontale et latérale) de tâches de micro-assemblage simulées en réalité virtuelle ; et (b) exécution en ligne des tâches simulées : transport (pass pose 1), alignement (pass pose 2), et insertion (pass pose 3) [FERREIRA ET AL., 2004].

1.6.3 Systèmes de télé-micromanipulation assistés par ordinateur

La télé-micromanipulation assistée par ordinateur est la voie médiane entre les dispositifs de télé-micromanipulation classique et la télé-micromanipulation supervisée ou à commande partagée. Cette approche se caractérise par une tendance d'assistance orientée vers l'opérateur [KHEDDAR ET COIFFET, 2002], le système de micromanipulation reste toutefois esclave des actions de l'opérateur. Ce dernier est assisté par des interfaces homme-machine adaptées et proposant des aides en ligne telles que : le rehaussement de contours, des contraintes de déplacement, des guides visuels, etc.

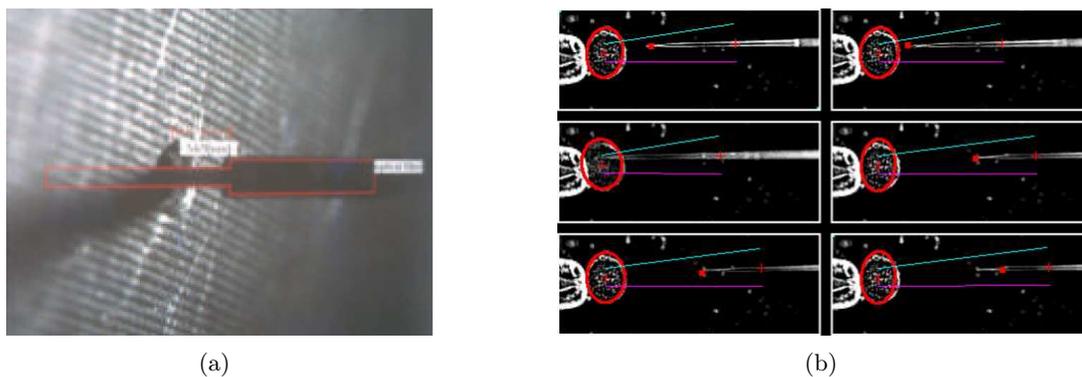


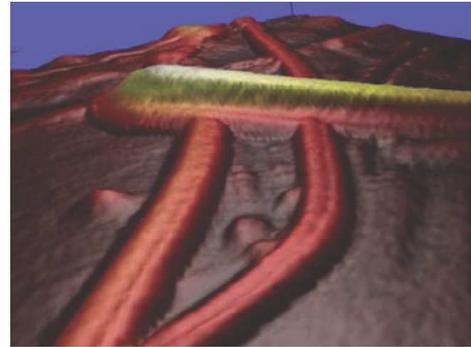
FIG. 1.14 – Guides virtuels pour la micromanipulation.

Dans [SONG ET AL., 2001], les auteurs proposent un système de micro-assemblage assisté par des techniques de réalité augmentée. L'interface homme-machine dédiée à ce système de micromanipulation propose d'une part, le rehaussement des contours des objets manipulés pour compenser le manque de visibilité de la scène et d'autre part, l'affichage de guides visuels pour indiquer à l'opérateur les meilleures configurations pour l'assemblage des micro-objets (voir figure 1.14(a)). L'interface propose également à l'opérateur l'affichage textuel de différentes informations rela-

tives aux tâches réalisées, comme la hauteur de la pièce manipulée ou encore les caractéristiques géométriques des composants. Kapoor a proposé par la suite un système de micro-injection cellulaire avec le même principe d'assistance [KAPOOR ET AL., 2003]. Le micromanipulateur est toutefois contraint dans ses mouvements par l'intermédiaire de guides virtuels afin d'éviter de détruire les cellules biologiques manipulées (voir figure 1.14(b)).



(a) Système de nanomanipulation



(b) Rendu visuel proposé à l'opérateur

FIG. 1.15 – Système de nanomanipulation utilisant un microscope à force atomique [TAYLOR ET AL., 1993].

Ce n'est que depuis peu que les techniques de réalité virtuelle ont été appliquées à la télé-micro/nanomanipulation. La réalité virtuelle étant la technologie de l'interaction homme-environnement par excellence, elle permet un échange d'informations plus naturelle entre le micro-environnement (capteurs, manipulateurs, etc) et l'opérateur. Une des premières applications a été proposée, en 1993, par l'équipe de Taylor dans le cadre du développement d'un système de télé-nanomanipulation à base d'un microscope à force atomique (AFM) [TAYLOR ET AL., 1993]. Le concept proposé consiste à convertir les images 2D issues du microscope, représentant la topologie de la nanosurface en niveaux de gris, en surfaces 3D texturées et ombrées plus faciles à interpréter. L'opérateur peut ensuite être immergé et naviguer dans la représentation 3D à l'aide d'un système semi-immersif dans le but de compléter sa compréhension du nano-environnement (voir figure 1.15). Pour la nanomanipulation, Taylor propose de compenser le délai de rafraîchissement de l'image par l'utilisation d'un retour d'effort basé sur le mode de contact de l'AFM. L'opérateur continue ainsi à ressentir les efforts d'interaction malgré les délais de mise à jour relativement lents de la scène. Par la suite, Ramachandran a proposé différents protocoles de commutation entre le mode d'imagerie et le mode de manipulation de l'AFM [RAMACHANDRAN ET AL., 1997]. Couplées à un dispositif de balayage plus rapide, ces techniques permettent de maintenir la cohérence entre le rendu visuel et haptique.

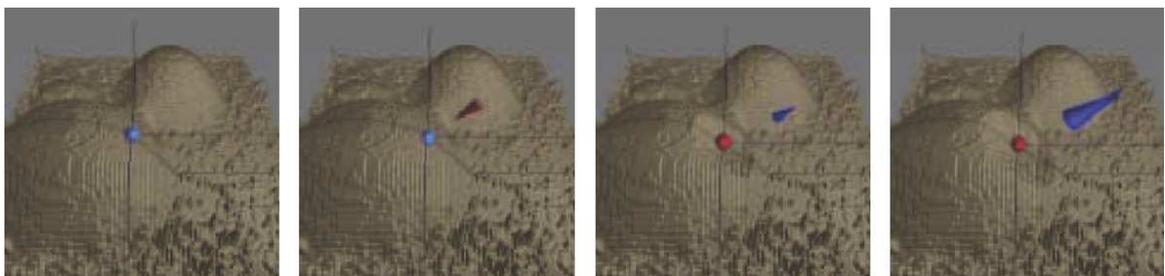


FIG. 1.16 – Modèle de déformation local [ARUK ET AL., 2001].

Pour contourner les limitations de la nanomanipulation à base d'un AFM, divers modèles de déformation ont été proposés en vue de réaliser la visualisation et la manipulation simultanément. Aruk et Sitti proposent de représenter la surface manipulée par un modèle de déformation, local, couplé avec une surface Spline pour la représentation graphique (voir figure 1.16) [ARUK ET AL., 2001]. La méthode de calcul des déformations repose sur un modèle flou [TAKAGI ET SUGENO, 1985] qui utilise la position de la pointe AFM pour mettre à jour la représentation 3D de la surface. Afin d'obtenir un rendu visuel et haptique temps-réel, Xi et al. proposent de réactualiser de manière dynamique les images 2D issues du microscope AFM à partir d'un modèle de force de la pointe AFM [LI ET AL., 2003]. Les forces ressenties par l'opérateur sont estimées à partir du modèle de déformation 3D, puis interprétées, afin de réactualiser de manière locale l'image actuelle. L'erreur entre l'image réelle finale et l'image estimée est inférieure à 3%.

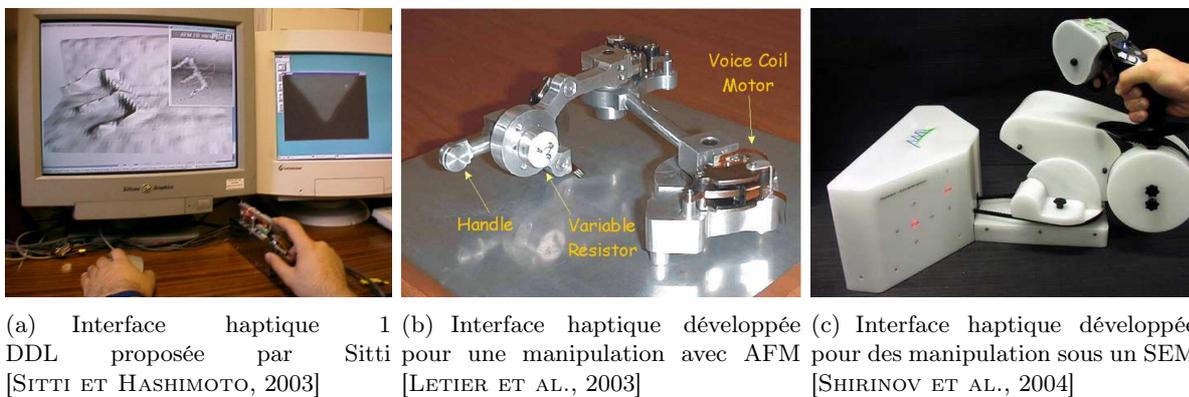


FIG. 1.17 – Interfaces haptiques dédiées à la micro/nanomanipulation.

Sur ce même principe, d'autres applications utilisant cette fois-ci les microscopes à champ lointain ont vu le jour. Le grand avantage vient du moyen d'observation utilisé. Il est complètement indépendant de l'outil de manipulation, ce qui permet un rafraîchissement de la représentation 3D plus rapide d'où un meilleur niveau d'interaction entre l'opérateur et la scène. Arai et al. proposent l'utilisation d'un microscope optique couplé à un module de traitement d'image pour l'obtention d'une représentation pseudo-3D de cellules biologiques [ARAI ET AL., 2001]. La manipulation se fait avec plusieurs manipulateurs équipés de capteurs d'effort 3D permettant à l'opérateur de ressentir les efforts d'interaction à l'aide d'une interface haptique adéquate. Pour améliorer la fidélité de la représentation de la scène, Ohba propose d'utiliser un microscope optique équipé d'un objectif avec une focale variable [OHBA ET AL., 2002]. La carte de profondeur obtenue permet ensuite une représentation fidèle du micro-environnement. Pour contourner les difficultés des représentations graphiques 3D, Bethel et al. propose l'utilisation d'un microscope électronique à balayage couplé à un dispositif d'affichage stéréoscopique à base de lunettes actives [BETHEL ET AL., 2002]. La navigation est toutefois plus limitée que dans le cas de l'utilisation d'une représentation 3D. Par ailleurs, l'importance du mode haptique dans le renforcement du couplage action-perception de l'opérateur a conduit certains chercheurs à proposer de nouvelles interfaces haptiques adaptées aux contraintes des différents systèmes de micromanipulation [SITTI ET HASHIMOTO, 2003] [LETIER ET AL., 2003] [SHIRINOV ET AL., 2004] (voir figure 1.17). Ces interfaces possèdent toutes des caractéristiques mécaniques particulières [FERREIRA ET MAVROIDIS, 2006] : rigidité structurelle élevée pour ressentir une large gamme de forces de contact ; degrés de libertés en adéquation avec la tâche de manipulation ; pas de

singularités mécaniques ; mécanismes de haute précision, etc.

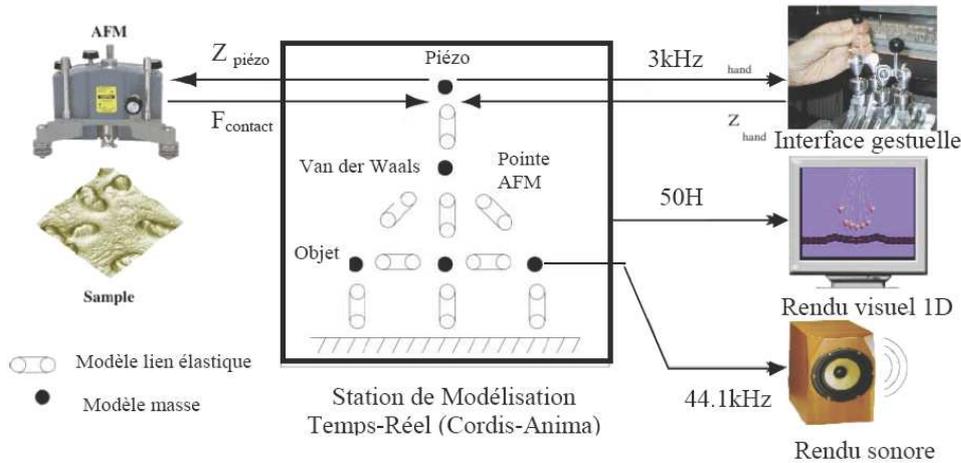


FIG. 1.18 – Plateforme multisensorielle pour la nanomanipulation d’après [MARCHI ET AL., 2005].

Par ailleurs, d’autres recherches ont tenté d’introduire le mode sonore pour alléger, ou compléter, le mode haptique durant les tâches de micro/nanomanipulation. Actuellement, ce mode est principalement utilisé pour le rendu sonore des efforts d’interaction [EME ET AL., 1999], [MURAYAMA ET AL., 2004]. Les résultats des études menées ont montré que les performances de l’opérateur étaient améliorées lorsque celui-ci utilisait simultanément le retour haptique et auditif. La plateforme développée au LEPES-ICA de Grenoble, illustrée à la figure (1.18), présente un concept de rendu multisensoriel pour l’apprentissage des phénomènes physiques du micromonde (forces de Van der Waals, de capillarité ou électrostatiques). Celui-ci est réalisé à travers un simulateur 1D, temps-réel, développé à partir d’un modèle Cordis-Anima [MARCHI ET AL., 2005]. Le rendu multisensoriel peut être également utilisé pour rehausser la perception visuelle, haptique et sonore de l’opérateur lors de tâches de nanomanipulation. Une des applications envisagées de cette plateforme concerne la conception de nanocircuits électroniques.

1.7 Synthèse de nos objectifs

1.7.1 Analyse des contraintes

A l’issue de cette analyse, il est possible de résumer l’ensemble des contraintes rencontrées en télé-micromanipulation en deux grandes catégories :

1. **Les contraintes liées au micro-environnement** : Nous faisons référence à l’ensemble des microforces d’adhésion agissant au niveau du micro-environnement ainsi qu’au changement de dynamique introduit par l’effet d’échelle. Cette classe de contrainte fait que le comportement du micro-environnement est totalement différent de la dynamique de l’environnement de référence de l’opérateur : les masses et inerties étant négligeables, les microforces d’interaction par adhésion vont imposer le comportement de l’opérateur. Ceci peut introduire d’une part, une mauvaise compréhension de certaines situations durant le déroulement des opérations et d’autre part, des instabilités au niveau de la commande des micromanipulateurs.
2. **Les contraintes liées à la téléopération** : On regroupe ici les contraintes qui n’ont pas un lien direct avec l’environnement de la tâche, à savoir les moyens d’action et de perception

proposés à l'opérateur. Tout d'abord, on remarque que les moyens conventionnels d'observation présentent des limitations technologiques liées à la faible profondeur de champ, au manque de perception visuelle temps-réel, à la difficulté ou l'impossibilité de naviguer, etc. Les solutions apportées par certains dispositifs de télé-micromanipulation remédient en partie à ces contraintes, en proposant, par exemple, des solutions à base d'une représentation tridimensionnelle de l'environnement. Ces solutions sont toutefois marquées par un manque de fidélité des représentations tant au niveau géométrique et dynamique, qu'au niveau des délais de rafraîchissement. Par ailleurs, on constate que les rares dispositifs proposant un retour haptique à l'opérateur, n'exploitent pas complètement cette modalité. En effet, pour pouvoir être réalisées de manière intuitive, certaines tâches doivent être guidées par des métaphores virtuelles pour diminuer l'effort mental de l'opérateur ainsi que la complexité de réalisation de la tâche. Pour les rares applications où ceux-ci sont proposés, les guides sont passifs et se présentent sous la forme d'un simple indicateur visuel. Les guides actifs représentés par des plans de contrainte avec des paramètres physiques variables (raideur, frottement) permettent d'améliorer considérablement les performances gestuelles de l'opérateur, mais pour autant ceux-ci n'ont jamais été proposés. Enfin, le mode sonore est exploité principalement pour compléter et améliorer le mode haptique. L'inexistence de capteurs sonores pour ces échelles de manipulation rend impossible tout rendu auditif direct.

1.7.2 Interface homme-machine multimodale proposée

Sur la base de cette analyse, le système de télé-micromanipulation assisté par ordinateur proposé utilise une représentation fonctionnelle intermédiaire dont les objectifs sont les suivants :

1. Rehausser la perception de l'opérateur sur le plan visuel, haptique et sonore. Ceci, dans le but de rendre l'interaction plus proche de la représentation de l'action du point de vue de l'opérateur et participer ainsi au renforcement de son couplage action-perception.
2. Assister l'opérateur dans ses actions à l'aide de métaphores d'assistance projetées sur ses différentes modalités de perception. Les guides virtuels n'éliminent pas les contraintes requises pour la micromanipulation, mais aident et assistent l'opérateur à satisfaire un certain nombre d'entre-elles avec des conditions d'ergonomie adaptées.

La représentation fonctionnelle intermédiaire sera donc un modèle représentatif, mais transformé, du site de micromanipulation comprenant les moyens d'observation et les contraintes du micro-environnement. Celle-ci possède la propriété de restituer à l'opérateur des informations pertinentes, sous un aspect adapté aux capacités de perception et d'action de l'opérateur, tout cela, en conservant l'aspect fonctionnel des tâches de micromanipulation à réaliser [KHEDDAR, 1997]. Cette représentation sert donc d'intermédiaire entre l'opérateur et le site de la tâche [MILGRAM ET BALLANTYNE, 1997].

La réalité virtuelle étant la technique d'interaction homme-machine par excellence, nous avons choisi d'élaborer la représentation fonctionnelle intermédiaire sur la base d'une représentation virtuelle du site de micromanipulation. Cette approche est un cas particulier des systèmes de téléopération assistés par ordinateur, et plus précisément, ceux assistés par les techniques de la réalité virtuelle. Pour plus de clarté, nous allons nous attacher à situer l'approche proposée par rapport aux techniques classiques de réalité virtuelle et de réalité augmentée.

Milgram a proposé dans [MILGRAM ET KISHINO, 1994] un continuum qui s'étend du virtuel au réel (voir figure 1.19), le réel correspond dans notre cas au micro-environnement, et le virtuel correspond à l'environnement simulé. Entre ces deux extrémités, Milgram introduit le concept de la réalité mixte. Celui-ci représente l'ensemble des approches combinant environnements virtuels et environnements réels dans des proportions variables. Lorsque nous sommes plus ou moins proches du virtuel, on parle de "Virtualité Augmentée", cela correspond à l'ajout d'objets réels dans un environnement virtuel. Lorsque l'on se rapproche du réel, on parle de "Réalité Augmentée", cela correspond à l'ajout du virtuel dans un environnement réel. C'est à cette dernière catégorie qu'appartient la majorité des systèmes de téléopération utilisant les techniques de la réalité virtuelle et en particulier l'approche proposée.



FIG. 1.19 – Le "Continuum réel - virtuel" proposé par Milgram [MILGRAM ET KISHINO, 1994].

Par ailleurs, Fuchs propose dans [FUCHS ET MOREAU, 2003] une classification fonctionnelle des techniques de réalité augmentée. Cette classification souligne le type de lien entre les images réelles et les entités virtuelles affichées en surimpression. Les fonctionnalités proposées par Fuchs sont les suivantes :

1. Fonctionnalité 1 : "Réalité documentée" ou "Virtualité" documentée ;
2. Fonctionnalité 2 : "Réalité à compréhension ou visibilité augmentée" ;
3. Fonctionnalité 3 : "Association visuelle du réel et du virtuel" ;
4. Fonctionnalité 4 : "Association comportementale du réel et du virtuel" ;
5. Fonctionnalité 5 : "Substitution du réel par le virtuel" ou "Réalité Virtualisée".

Pour le système élaboré, nous nous intéressons uniquement à la 5^{ème} fonctionnalité à savoir la "Réalité Virtualisée". Celle-ci repose sur une bonne connaissance du modèle géométrique de la scène dans le but de remplacer les images réelles par une représentation 3D. L'utilisation d'une caméra virtuelle permet par la suite de naviguer librement dans la scène, sans contrainte matérielle, pour améliorer sa compréhension de la scène. Il est également possible d'introduire dans cette représentation le mode haptique et sonore, cela, sur la base d'informations réelles (issues de capteurs physiques) ou synthétiques (issues de modèles mécaniques et mathématiques). Avec une mise à jour fréquentielle adéquate pour chacun des modes, il est possible d'immerger facilement l'opérateur dans l'équivalent virtuel de la scène, contournant ainsi l'ensemble des contraintes qui peuvent caractériser la scène réelle (caméra fixe, milieux confinés, milieux hostiles, etc.).

Parmi l'ensemble des fonctionnalités de la réalité augmentée, la réalité virtualisée est celle qui offre le plus de possibilités pour remédier aux différentes contraintes de la télé-micromanipulation. En effet, un équivalent virtuel de la scène permettrait d'une part, d'améliorer les conditions d'immersion et d'interaction et d'autre part, faciliterait l'introduction de métaphores d'assistance pour satisfaire certaines contraintes et effets liés aux facteurs d'échelle. Ainsi, la représentation virtualisée du micro-environnement va servir de base à l'élaboration de l'interface homme-machine (IHM) dédiée au système de télé-micromanipulation. La figure (1.20) schématise le concept retenu.

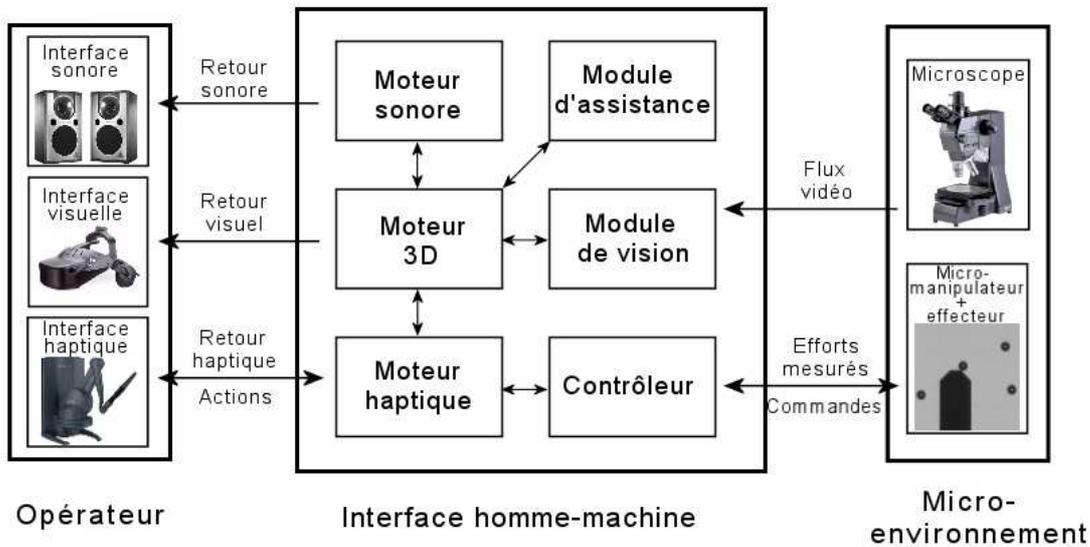


FIG. 1.20 – Interface homme-machine proposée.

L'interface homme-machine proposée est composée d'une architecture modulaire : un moteur de rendu pour chacune des modalités de l'opérateur. La reconstruction géométrique du micro-environnement est confiée à un module de vision et à un moteur de reconstruction 3D. Ce dernier se charge également de l'immersion visuelle de l'opérateur. Les moteurs haptique et sonore se chargent respectivement de l'immersion du sens haptique et auditif. Le module d'assistance intègre l'ensemble des métaphores d'assistance ainsi que les guides virtuels pouvant être de nature haptique, visuelle ou auditive. Le contrôleur, quant à lui, se charge du couplage entre le micro-manipulateur et le moteur haptique pour permettre la transmission des actions de l'opérateur.

1.8 Conclusion

Ce chapitre fait un état de l'art des interfaces homme-machine dédiées à la télémanipulation à l'échelle micro et nanométrique. Afin de mieux cerner la problématique spécifique liée à la conception des interfaces à l'échelle macro/micro/nano, nous avons analysé les différents aspects de la télé-micromanipulation en mettant en avant les avantages, les inconvénients et les limitations de chaque procédé.

Dans un premier temps, les moyens d'observation et de manipulation à l'échelle du micro et nanomonde ont été introduits pour mettre en évidence les contraintes technologiques actuelles. Nous nous sommes intéressés par la suite à démontrer l'importance des forces du micromonde sur les tâches de micromanipulation. Bien que celles-ci soient non perceptibles à l'échelle humaine, elles deviennent prépondérantes aux échelles de manipulation envisagées. De ce fait, celles-ci faussent complètement les modalités sensorielles du téléopérateur. L'état de l'art dans le domaine montre que les systèmes de télé-micromanipulation peuvent être répertoriés suivant le degré d'interaction homme-machine : télé-micromanipulation classique, télé-micromanipulation à désignation d'objectifs et télé-micromanipulation assistée par ordinateur.

En se basant sur les résultats de l'analyse des systèmes existants, nous avons opté pour un

système de téléopération assisté par ordinateur basé sur une représentation fonctionnelle intermédiaire reposant sur un modèle virtualisé du micromonde. Nous avons montré l'intérêt de cette représentation qui permettrait d'une part, d'améliorer l'immersion et l'interaction de l'opérateur et d'autre part, d'introduire plus facilement des guides virtuels actifs et passifs pour assister et guider l'opérateur dans la réalisation de ces tâches de micromanipulation. L'architecture modulaire de l'interface homme-machine adoptée permettra ainsi de découpler les différentes contraintes imposées par le micro-environnement et d'améliorer les capacités d'adaptation de l'opérateur.

Chapitre 2

Reconstruction Géométrique du Micro-environnement

2.1 Introduction

Le premier chapitre nous a présenté les différentes technologies existantes pour l'observation et l'interaction avec le micro/nano-environnement. Les avantages et inconvénients de chaque procédé ont été énoncés afin de les prendre en considération lors de l'élaboration d'un système de téléopération. Nous avons également présenté les différentes stratégies de télé-micromanipulation existantes pour situer l'approche retenue pour l'élaboration de l'interface homme/machine. Cette approche est basée sur la virtualisation du micro-environnement. Nous allons décrire dans ce chapitre les différentes étapes nécessaires pour cette reconstruction tridimensionnelle (3D).

Dans la première partie de ce chapitre, nous détaillerons la stratégie adoptée pour l'élaboration du module de traitement d'image. Ce module doit minimiser un certain nombre de contraintes comme l'erreur de localisation et le temps calcul, il doit également être robuste à certains cas de figure comme l'occlusion partielle des objets à localiser (microbilles en polystyrène de 50 et 20 μm).

Dans la deuxième partie du chapitre nous aborderons le calibrage des microscopes optiques. Devant le manque de précision des techniques existantes, nous avons proposé une nouvelle méthode de calibrage - spécifique à la microscopie optique - nous permettant d'obtenir une meilleure précision sur les paramètres intrinsèques et extrinsèques du microscope.

Nous verrons dans la troisième partie du chapitre le procédé de reconstruction géométrique adopté. Nous développerons dans cette partie l'ensemble des composants du module concerné ainsi que ses interconnexions avec le reste du système. Finalement, nous conclurons ce chapitre avec une étude portant sur les limitations ainsi que sur les erreurs introduites par les différents blocs de la chaîne de traitement d'image (acquisition, calibrage, etc.).

2.2 Localisation des constituants de la scène

Le micro-environnement utilisé est composé d'un substrat en aluminium sur lequel nous avons déposé des microbilles en polystyrène de 50 et 20 μm de diamètre. Nous avons également déposé sur ce substrat des particules de poussière. Ces particules représentent des obstacles durant les opérations de micromanipulation. Nous allons détailler dans les deux prochaines sections les méthodes adoptées pour la localisation de ces deux classes d'objets [AMMI ET FERREIRA, 2004d].

2.2.1 Localisation des microbilles

Le choix de l'algorithme de localisation des microbilles a été guidé par les besoins de l'application. La contrainte principale dans le cas de notre dispositif de micromanipulation est le recouvrement partiel des microbilles par l'effecteur terminal durant certaines phases de manipulation (micromanipulation par poussée ou par adhésion). À cela, vient s'ajouter le fait que les microbilles peuvent - dans certains cas - se trouver en contact entre elles, ou avec des particules de poussières, rendant ainsi difficile leur identification et localisation.

2.2.1.1 Localisation pixellique des microbilles

Les méthodes classiques de localisation de microbilles - basées sur la segmentation - n'étant pas adaptées aux contraintes du système de micromanipulation, notre choix s'est rapidement orienté vers l'appariement de gabarits (Template matching). Cette technique consiste à comparer l'intensité des pixels entre un gabarit prédéfini et plusieurs sous-régions de l'image à analyser. La partie de l'image retenue est celle qui offre le plus grand degré de similitude avec le motif de référence. Il existe différentes techniques pour la mesure de similarité, les plus classiques peuvent se classer en deux grandes classes : les méthodes de mesure de distance et de mesure de corrélation [DEW ET HOLMLUND, 2000] [DEVERNAY, 2004]. Dans la suite du paragraphe, les mesures de similarité sont calculées pour un motif I_1 de taille $(m \times n)$ et comparées à la zone de même taille dans l'image I_2 à la position (i, j) .

A. **Mesure de distance** : Les méthodes de mesure de distance s'appuient sur les mesures SAD, ZSAD, SSD, et ZSSD définies par les formules suivantes :

$$\begin{aligned}
 SAD &= \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |I_1(i, j) - I_2(i, j)| \\
 SSD &= \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (I_1(i, j) - I_2(i, j))^2 \\
 ZSAD &= \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |(I_1(i, j) - \bar{I}_1) - (I_2(i, j) - \bar{I}_2)| \\
 ZSSD &= \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n ((I_1(i, j) - \bar{I}_1) - (I_2(i, j) - \bar{I}_2))^2
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

avec :

SAD : somme des valeurs absolues des différences ;

SSD : somme des différences des carrés ;

ZSAD : somme des valeurs absolues des différences moyennes ;

ZSSD : somme des différences moyennes des carrés.

Les techniques SAD et SSD sont les plus simples à utiliser et ont donc un coût en calcul moins important. Elles reposent sur la comparaison simple des luminances entre les pixels des deux images, ce qui leur confère une forte sensibilité aux images bruitées. Les méthodes SAD et SSD sont connues pour leur faible complexité, et sont souvent prises comme référence pour illustrer les performances des algorithmes. La méthode SAD compare les valeurs d'un pixel de l'image 1 originale (I_1), avec les pixels de l'image 2 dans un voisinage de taille $(m \times n)$. En pratique, il est plus intéressant de sommer les carrés des différences de pixels car cela fait

intervenir une multiplication moins coûteuse en temps que le calcul d'une valeur absolue. On parle alors de SSD.

Les techniques ZSAD et ZSSD introduisent un terme de moyennage (\bar{I}_1 et \bar{I}_2). Cette régularisation permet une mesure pondérée par rapport à la moyenne de la luminosité de l'image. Ce terme correctif limite les erreurs lors de changements globaux de luminosité sur l'image. Cette amélioration se fait cependant au détriment de la complexité et donc du temps de calcul. Ce type de mesure de distance perd de son efficacité dans les scènes très texturées, pour lesquelles les écarts entre pixels voisins restent faibles.

B. Mesure de corrélation : L'expression la plus simple de la corrélation est celle de la corrélation croisée (de l'anglais, *Cross-Correlation*). Elle s'exprime comme suit :

$$CC = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I_1(i, j) \times I_2(i, j) \quad (2.2)$$

Cette méthode est cependant connue pour être trop sensible au bruit et au type d'image, elle n'est donc pas très utilisée. Les mesures de corrélation, caractérisées par le produit des luminosités, se présentent donc sous deux formes : NCC et ZNCC. Ces calculs normalisés prennent en compte les différences de luminance entre les blocs, permettant une grande robustesse, au prix d'un calcul plus coûteux. Elles sont exprimées par :

$$\begin{aligned} NCC &= \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I_1(i, j) \times I_2(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (I_1(i, j))^2 \times \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (I_2(i, j))^2}} \\ ZNCC &= \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (I_1(i, j) - \bar{I}_1) \times (I_2(i, j) - \bar{I}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (I_1(i, j) - \bar{I}_1)^2 \times \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (I_2(i, j) - \bar{I}_2)^2}} \end{aligned} \quad (2.3)$$

avec :

NCC : corrélation normalisée ;

ZNCC : corrélation normalisée moyenne.

On se reportera à [ASCHWANDEN ET GUGGENBÜL, 1992] pour une étude expérimentale comparative de mesures de similarité. Cette étude rapporte le taux de réussite (motif localisé au pixel près) en fonction de la taille du motif et pour différents types de distorsions. Il en ressort que les résultats des différentes mesures de similarité sont généralement proches. Cependant la corrélation normalisée (NCC) semble présenter une fiabilité supérieure aux techniques basées sur la mesure de distance (SAD, SDD, ZSAD, ZSDD), particulièrement sur les variations lumineuses car elle suppose une relation affine entre les intensités lumineuses des deux images. Cette méthode est par ailleurs plus robuste à l'occultation partielle des objets, elle permet également une détection plus stable comparée à la corrélation normalisée moyenne (ZNCC) [MARTIN ET CROWLEY, 1995]. Pour toutes ces raisons, nous avons retenu la corrélation normalisée pour la reconnaissance et la localisation des microbilles.

2.2.1.2 Optimisation de la complexité

Le temps de calcul de la fonction de corrélation normalisée étant proportionnel au carré de la taille du gabarit et de la taille de l'image à analyser, il n'est pas possible de localiser les

microbilles en temps réel (20-30 Hz). Une solution pour obtenir des temps de calcul convenables est de réduire le nombre de positions à tester.

Bhashkaran et Konstantinides [BHASKARAN ET KONSTANTINIDES, 1997] décrivent un grand nombre de solutions, permettant d'éviter un parcours exhaustif de l'ensemble des solutions. Le plus célèbre étant l'algorithme dichotomique à 3 étapes où la fonction de similitude est évaluée trois fois de suite sur un nombre réduit de points particuliers. Initialement, les points choisis sont le centre, les sommets et les milieux d'un carré. On choisit le point minimisant l'erreur et on recommence la recherche avec un carré deux fois plus petit et centré sur le point choisi.

La seconde possibilité pour faire chuter la complexité est d'avoir recours à une approche hiérarchique, qui peut être couplée à une recherche dichotomique [CALIFANO ET MOHAN, 1994] : une mesure grossière de la corrélation est faite avec une image à faible résolution, puis cette mesure est affinée avec une image à pleine résolution. Cela permet d'avoir une grande fenêtre de recherche et donc de pouvoir traiter les mouvements rapides, sans devoir explorer toute la fenêtre, mais seulement une sous-fenêtre qui aura été déterminée grâce à un ou plusieurs sous-échantillonnages de l'image.

Une façon totalement différente pour délimiter la zone de recherche consiste à exploiter les caractéristiques particulières des objets à détecter [DEVERNAY, 2004] [ZHANG ET ZHOU, 2004], comme les zones à fort gradient, ou tout simplement, le niveau de gris des objets. Ces caractéristiques dépendent d'une part, des propriétés physiques des objets à observer (matériaux, formes, etc) et d'autre part, de l'éclairage utilisé (intensité, orientation, etc). Dans le cas de la microscène que nous utilisons, les microbilles en polystyrène sont transparentes et possèdent une surface moyennement réfléchissante. Lorsque nous les observons sous microscope optique (frontal) avec un éclairage approprié, nous remarquons la formation de tâches spéculaires sur leurs surfaces (figure 2.1). La position et la taille de ces tâches varient en fonction de l'orientation et de l'intensité de la source de lumière. Ces tâches spéculaires représentent une fréquence spatiale propre aux microbilles. Elle vont de ce fait nous permettre de les localiser approximativement dans la microscène et ainsi limiter la fenêtre de recherche dans un voisinage très proche des positions effectives des microbilles (2×2 à 3×3 pixels).

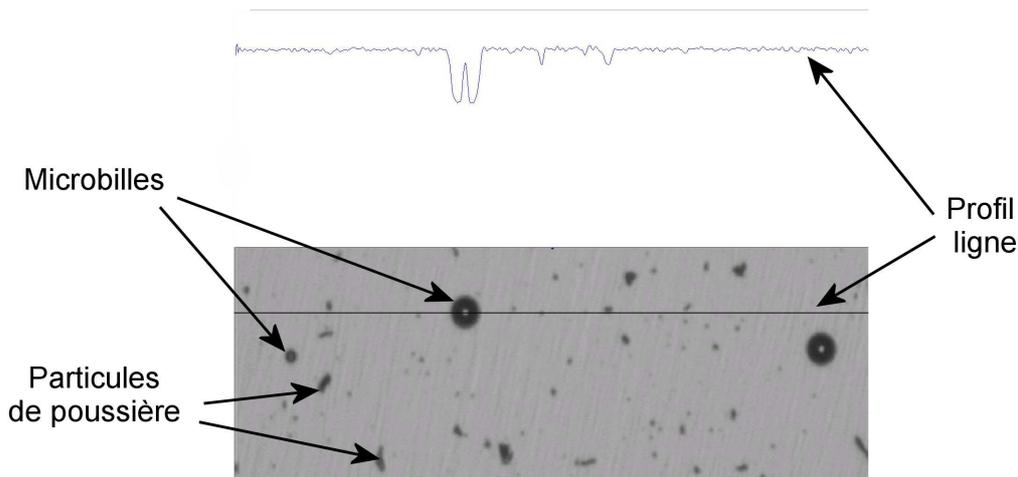


FIG. 2.1 – Transition correspondant à la tâche spéculaire.

En utilisant l'éclairage frontal du microscope, nous sommes arrivés à positionner les tâches spéculaires au centre des microbilles. Ce mode d'éclairage permet également de rehausser le

contraste des tâches par rapport au reste de la scène. Les marques spéculaires possédant une haute fréquence spatiale, il paraît naturel d'utiliser un filtre passe-haut pour les extraire du reste de la scène. Parmi les différentes solutions existantes, notre choix s'est porté sur la dérivation d'ordre deux en utilisant l'opérateur Laplacien [LAURENTINI, 1990]. Cette méthode de filtrage est celle qui a donnée les meilleurs résultats expérimentaux pour l'extraction des transitions générées par les tâches spéculaires. L'opérateur Laplacien s'écrit :

$$L(x, y) = \frac{\delta^2 I(x, y)}{\delta x} + \frac{\delta^2 I(x, y)}{\delta y} \quad (2.4)$$

Le noyau de convolution utilisé pour le filtrage est de taille (3×3) , en prenant en considération quatre connexités. Les coefficients du masque sont donnés par la figure 2.2.

| | | |
|----|----|----|
| 0 | -1 | 0 |
| -1 | 4 | -1 |
| 0 | -1 | 0 |

FIG. 2.2 – Opérateur de Laplace.

Afin d'améliorer la détection des tâches spéculaires par le filtre de Laplace, il est nécessaire d'augmenter le rapport entre l'amplitude de la transition et l'amplitude du bruit. Nous avons utilisé pour cela une combinaison successive de filtres passe-haut/passe-bas (figures 2.5(a), 2.5(b) et 2.5(c)). Le rôle du filtre passe-haut est de favoriser les hautes fréquences présentes dans l'image, ce qui a pour effet d'améliorer le contraste de la tâche spéculaire par rapport au reste de la sphère. Le filtre passe-bas, quant à lui, permet d'atténuer le bruit généré et de lisser l'effet de couronne qui se crée autour des microbilles (haute-fréquence). Les noyaux utilisés pour le filtre passe-bas et le filtre passe-haut sont représentés dans les figures 2.3 et 2.4

| | | |
|----|----|----|
| 0 | -1 | 0 |
| -1 | 5 | -1 |
| 0 | -1 | 0 |

FIG. 2.3 – Filtre passe-haut.

| | | | |
|-----------------------|---|---|---|
| $\frac{1}{16} \times$ | 1 | 2 | 1 |
| | 2 | 4 | 2 |
| | 1 | 2 | 1 |

FIG. 2.4 – Filtre passe-bas.

Dans le but d'obtenir un rehaussement significatif du signal utile, il est nécessaire de répéter cette opération une deuxième fois. Une fois le prétraitement terminé, nous appliquons le filtre de Laplace (figure 2.5(d)). Nous obtenons ainsi une image où la tâche spéculaire est suffisamment

contrastée par rapport au reste de l'image. Par la suite, le calcul des maxima locaux permet d'obtenir les positions approximatives des centres des microbilles. Nous commençons par l'application d'un seuil pour limiter les calculs aux zones les plus intéressantes, le maxima local correspondra alors au centre géométrique des pixels restants. Une fois les positions approximatives des microbilles obtenues, le test de corrélation est réduit à un voisinage déterminé autour de cette position : (5×5) , (7×7) ou (9×9) (voir figure 2.6). Le temps de calcul s'en trouve ainsi considérablement réduit.

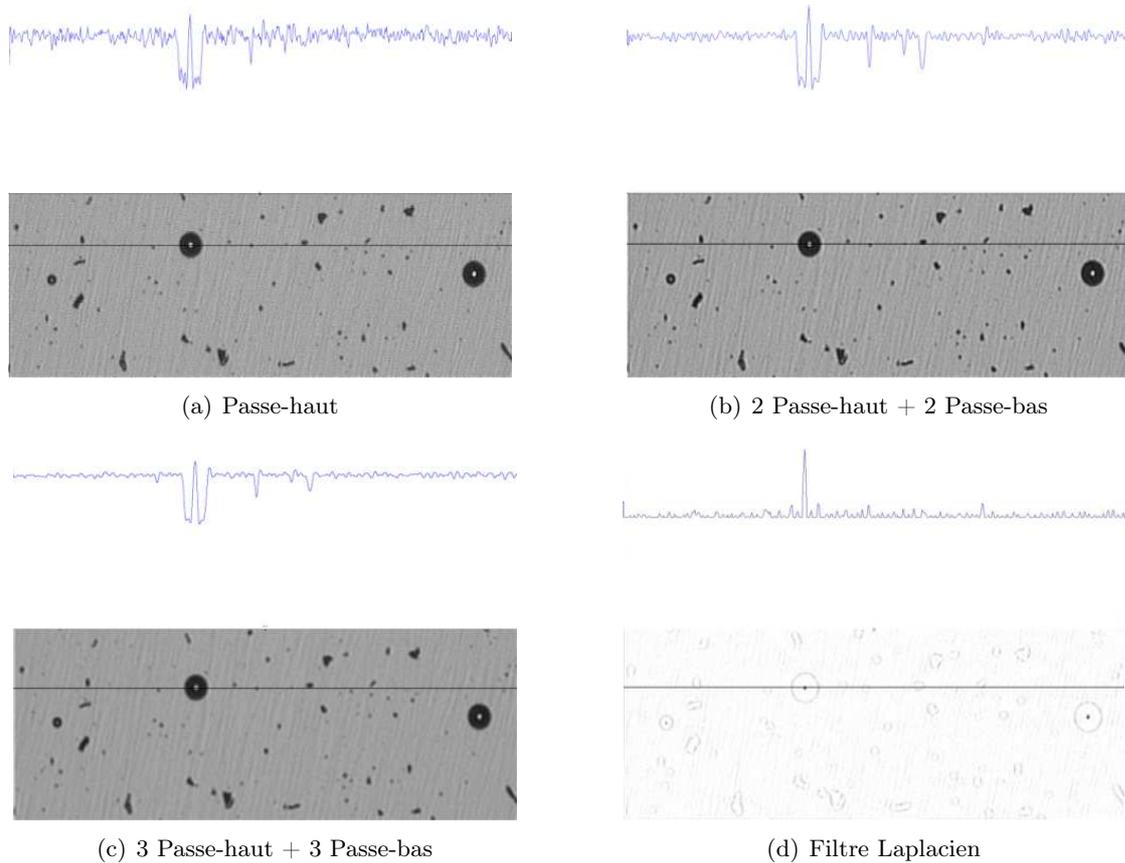


FIG. 2.5 – Étapes du filtrage.

2.2.1.3 Classification des microbilles

La scène étant composée de microbilles de différentes tailles (20 et $50\mu m$ de diamètre), il est nécessaire pour optimiser les temps de calculs de la fonction de corrélation de les classer suivant leurs rayons respectifs. Ce rayon correspond à la distance - en pixels - séparant le maxima local du bord de la microbille. Nous exploitons pour cela la différence de niveau de gris entre le substrat et la microbille. Le seuil de transition choisi correspond à la moyenne entre le niveau de gris moyen de la microbille et le niveau de gris moyen du substrat.

2.2.1.4 Localisation subpixelique des microbilles

Les résultats issus du calcul de corrélation étant exprimés sous forme d'un nombre entier de pixels, la précision de localisation va être limitée de ce fait. En réalité, il est possible de

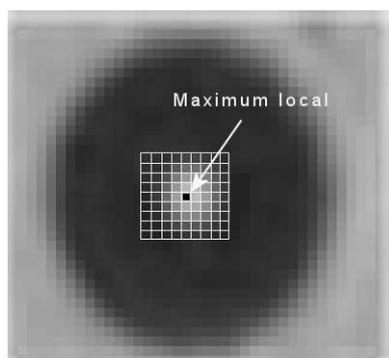


FIG. 2.6 – Voisinage de corrélation.

déterminer la position des microbilles avec une précision inférieure au pixel. Cet accroissement de résolution est obtenu en réalisant une interpolation entre les valeurs entières de la fonction de corrélation (figure 2.7). Pour cela, on commence par déterminer le maxima local de la fonction de corrélation, puis on calcule les valeurs de la fonction de corrélation avoisinantes (3×3 pixels). Différentes méthodes d'interpolation sont présentées dans la littérature à savoir : la méthode du centroïde, l'interpolation bilinéaire ou encore les splines.

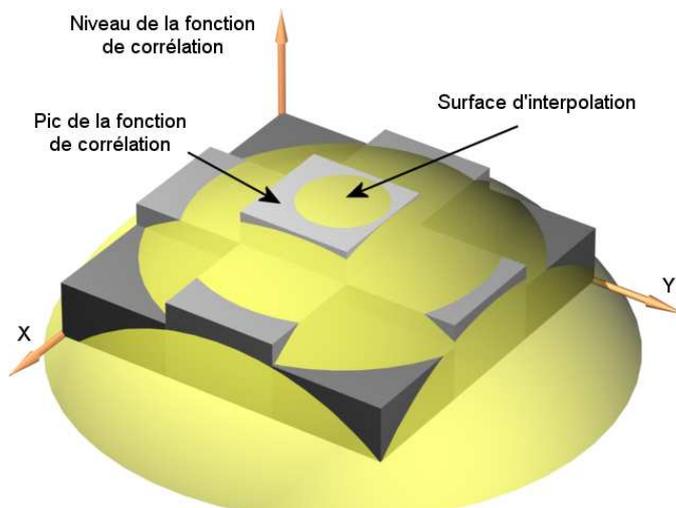


FIG. 2.7 – Surface d'interpolation.

La méthode retenue repose sur l'utilisation d'une surface parabolique [GLEASON ET AL., 1991]. Cette méthode consiste à réaliser une interpolation entre les différentes valeurs de corrélation calculées par l'intermédiaire d'une surface parabolique, puis à déterminer le maximum de cette courbe afin d'obtenir la position subpixelique de la microbille. L'équation de la surface est donnée par l'équation 2.5 :

$$z = a x^2 + b y^2 + c x y + d x + e y + f \quad (2.5)$$

Les coefficients du paraboloïde peuvent s'obtenir par la résolution du système d'équations :

$$A x = b \quad (2.6)$$

où

$$A = \begin{bmatrix} x_0^2 & y_0^2 & x_0 y_0 & x_0 & y_0 & 1 \\ x_1^2 & y_1^2 & x_1 y_1 & x_1 & y_1 & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ x_8^2 & y_8^2 & x_8 y_8 & x_8 & y_8 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$b = \begin{bmatrix} z_0 \\ z_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ z_8 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad x^T = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Les valeurs discrètes de corrélation ($z_{0,0}, z_{0,1}, z_{0,2}, \dots, z_{0,8}$) ont été reformulées dans le vecteur b (z_0, z_1, \dots, z_8) afin d'être compatibles avec la matrice A . Les couples (x_i, y_i) correspondent aux positions "relatives" des valeurs de la corrélation dans le plan image.

La matrice A étant rectangulaire, nous utilisons une regression par moindre carré pour résoudre le système x .

$$x = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (2.9)$$

Une fois les coefficients de la surface obtenus, la valeur maximale du paraboloidé peut s'obtenir en annulant les dérivées de l'équation (2.5) suivant les coordonnées x et y :

$$\begin{aligned} \frac{\delta z}{\delta x} &= 2 a x + c y + d = 0 \\ \frac{\delta z}{\delta y} &= 2 b y + c x + e = 0 \end{aligned} \quad (2.10)$$

La position du maximum de la courbe est donnée comme suit :

$$\begin{aligned} x &= \frac{2 d b - c e}{c^2 - 4 a b} \\ y &= \frac{2 a e - d c}{c^2 - 4 a b} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Les valeurs subpixeliques sont ensuite ajoutées aux valeurs entières retournées par la fonction de corrélation. Actuellement, nous avons limité la précision de l'interpolation au 1/10 de pixel. La taille d'un pixel étant de $1.6 \mu m$ (avec un grossissement optique de $\times 4$), cela revient à une erreur maximale de localisation de l'ordre de $\pm 0.08 \mu m$. Néanmoins, des études expérimentales [GLEASON ET AL., 1991] ont montré qu'il est possible d'atteindre facilement des précisions

de l'ordre de 1/16 de pixel. L'implémentation de l'algorithme sous forme fermée (de l'anglais, *closed form*), nous a permis d'obtenir des temps d'exécution compatibles avec les besoins de l'application.

2.2.1.5 Suivi des microbilles

Après avoir déterminé les positions des microbilles, il est nécessaire d'assurer la correspondance temporelle de leurs positions suite aux différentes tâches de micromanipulation. Différentes méthodes de suivi (*tracking*) sont présentées dans la littérature, parmi les plus répandues nous pouvons citer la méthode cinématique et les méthodes basées sur les surfaces d'intersection.

La méthode cinématique repose sur l'utilisation d'un filtre prédictif (filtre de Kalman) afin de prédire la position actuelle d'un objet en fonction des positions antérieures [SHALOM ET LI, 1998]. Cette méthode s'avère être très utile lorsque l'objet n'est pas détecté pendant quelques itérations, suite à une occultation totale par exemple. Elle peut également gérer le cas de croisement de trajectoires.

Dans le cas de mouvements lents, par rapport à la fréquence de rafraîchissement, il est possible de suivre les objets en utilisant le concept des surfaces d'intersection (figure 2.8). Il s'agit dans cette approche de calculer la zone de recouvrement des rectangles englobants des objets. Cette surface peut être positive, nulle ou négative. Plus la valeur de la surface est grande, plus le mouvement entre les deux images est important. Une fois l'ensemble des surfaces d'intersection calculées, une procédure de tri associée à chaque parcours de l'arbre des solutions possibles permet de définir l'association temporelle adéquate des micro-objets.

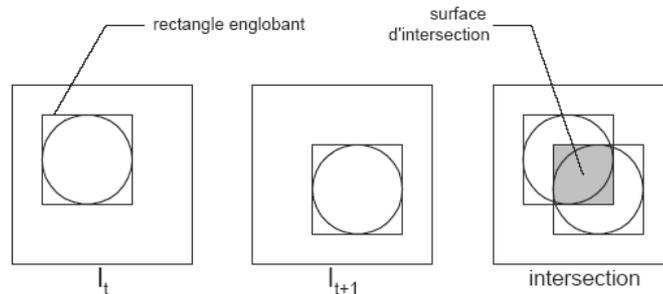


FIG. 2.8 – Surface d'intersection.

Il existe d'autres mesures basées sur le même principe autorisant le calcul d'écart entre objets citons par exemple, la distance de Hausdorff, la distance de Chamfer, la distance aux centres, etc. La méthode que nous avons retenue est "la distance aux bords" [LACASSAGNE, 2000]. Cette grandeur correspond à l'écart entre des rectangles englobants (figure 2.9), le signe de cette distance tient compte de l'intersection des surfaces ainsi que de la taille des objets à suivre (microbilles de 20 et 50 μm). Comme nous pouvons le constater sur la figure 2.9, bien que les deux petites régions circulaires soient plus proches l'une de l'autre ($dc_{ab} < dc_{AB}$), on constate visuellement le contraire car l'écart le plus faible ($db_{AB} < db_{ab}$) est donné pour les deux grandes surfaces.

Afin de prendre en compte la forme des microbilles, tout en réduisant la complexité des calculs, nous avons remplacé les rectangles englobants par des cercles englobants. La distance aux bords se calcule ainsi beaucoup plus facilement. Une fois l'ensemble des distances calculé, nous éliminons les valeurs positives (mouvements lents) pour réduire le nombre de combinaisons

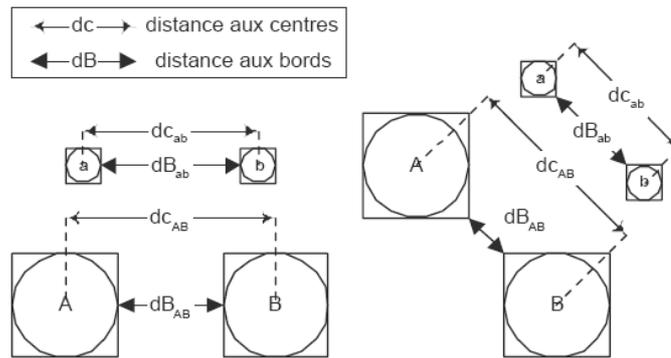


FIG. 2.9 – Comparaison des distances aux centres et distance aux bords.

possibles. Enfin, une procédure de tri, puis un tirage sans remise, permettent d'obtenir la bonne association temporelle des positions.

2.2.2 Localisation des particules de poussière

Les particules de poussière déposées sur le substrat constituent des obstacles durant la réalisation des tâches de micromanipulation. Afin de pouvoir les afficher dans la scène virtualisée, il est nécessaire de localiser leurs positions et de déterminer leurs dimensions. Le micro-environnement peut être décomposé en trois classes d'objets :

- les microbilles ;
- les particules de poussière ;
- et le substrat.

Une fois les microbilles localisées avec une résolution pixellique, il est possible de les extraire de l'image en substituant aux niveaux de gris des pixels qu'elles occupent, une valeur égale à la moyenne du niveau de gris du substrat (figure 2.10(a)). L'application d'un seuil permet par la suite d'isoler les particules de poussières (figure 2.10(b)). Une opération de labellisation permet enfin de regrouper les pixels connexes. Les rectangles englobants des ensembles connexes sont ensuite calculés (figure 2.10(c)).

La figure 2.11 résume les étapes de localisation des microbilles et des particules de poussières. L'algorithme dédié à la localisation des microbilles est réalisé de manière cyclique afin de permettre la mise à jour en temps réel de la scène. A titre d'illustration, les temps de calcul correspondant aux étapes de localisation sont reportés dans le tableau 2.1. Comme on peut le constater à la figure 2.12, l'évolution du temps de calcul est quasi-linéaire en fonction du nombre de microbilles dans la scène. Afin d'alléger la charge de travail du module de traitement d'image, on cherchera à activer le moins régulièrement possible la partie dédiée à la localisation des particules de poussière.

2.3 Calibrage des microscopes optiques

Une fois les constituants de la scène localisés, il est nécessaire de calibrer les microscopes utilisés dans le but de réaliser une correspondance entre l'environnement virtuel obtenu et l'environnement réel. Devant le manque de précision des procédés de calibrage existants, nous avons

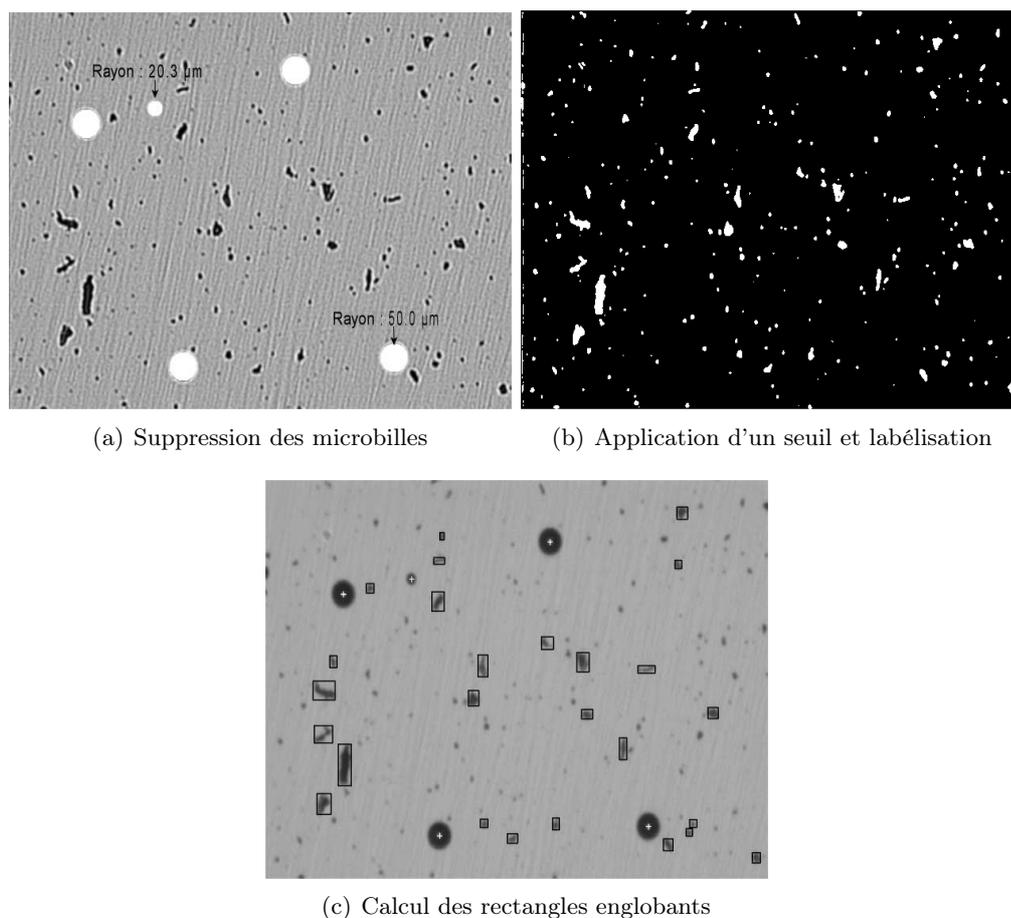


FIG. 2.10 – Localisation des particules de poussières.

TAB. 2.1 – Temps de calcul du bloc de traitement d'image pour 4 microbilles présentes dans la scène.

| Opération | T1(ms) | T2(ms) |
|---|--------|--------|
| Localisation approximative | 35.98 | 39.00 |
| Classification | 1.04 | 1.50 |
| Corrélation | 23.11 | 23.37 |
| Localisation subpixellique | 0.54 | 0.61 |
| Localisation des particules de poussières | 10.14 | 13.45 |
| Suivi | 0.76 | 1.10 |
| Temps d'exécution total | 71.57 | 79.03 |

proposé une nouvelle méthode de calibrage spécifique aux microscopes optiques. Cette méthode permet d'obtenir les paramètres intrinsèques et extrinsèques du microscope avec une grande précision, garantissant ainsi une reconstruction géométrique plus fidèle [AMMI ET AL., 2005].

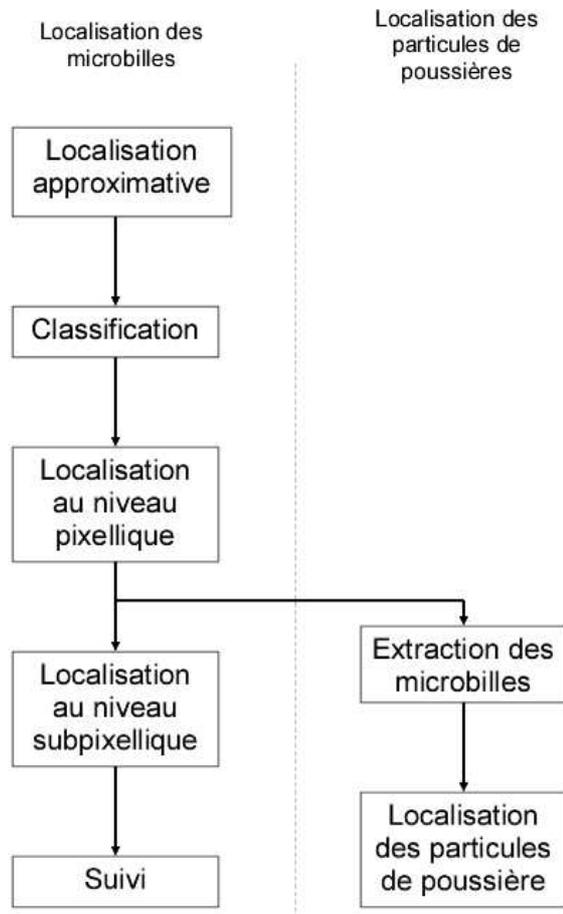


FIG. 2.11 – Algorithme de localisation des microbilles et des particules de poussières.

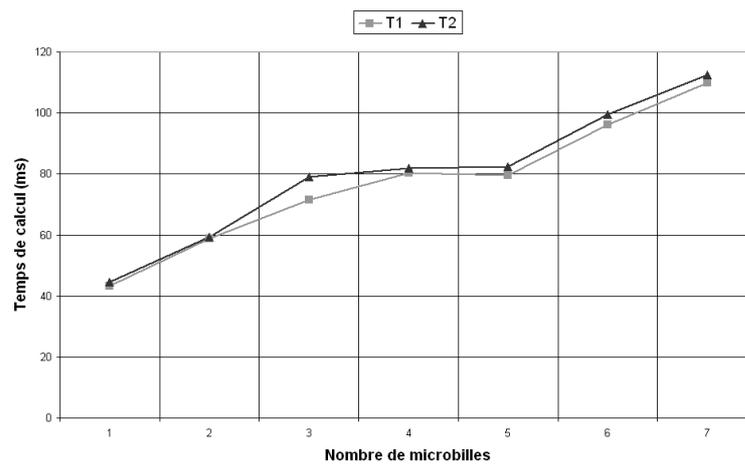


FIG. 2.12 – Temps de calcul en fonction du nombre de microbilles

2.3.1 Problématique et contraintes du calibrage des microscopes optiques

La contrainte principale du calibrage des microscopes optiques est leur faible profondeur de champ (*PDC*). La profondeur de champ peut être définie comme étant l'épaisseur de la tranche d'espace dans laquelle tous les points de l'objet donnent une image nette. Celle-ci est inversement proportionnelle à l'ouverture numérique de l'objectif et donc, de ce fait, au facteur de grossissement (voir figure 2.13). Elle s'exprime mathématiquement comme suit [MEIER, 2004] :

$$PDC = \frac{\lambda \sqrt{n^2 - O_n^2}}{O_n^2} \quad (2.12)$$

où O_n représente l'ouverture numérique de l'objectif, n l'indice du milieu, et λ la longueur d'onde de la lumière.

L'inconvénient majeur est lié au fait que l'image devient rapidement floue lorsqu'on s'éloigne du plan de mise au point. Dans le cas de l'appareil que nous utilisons, un microscope Mitutoyo [Mit, 2001] avec un objectif de type M-Plan Apo, cette profondeur de champ est égale à $91.0\mu\text{m}$ pour un grossissement de $\times 2$ et à $3.5\mu\text{m}$ pour un grossissement de $\times 10$. Cette faible profondeur de champ implique deux types de contraintes sur la mire de calibrage (voir figure 2.14) :

1. la mire doit être collinéaire (mire plane) ;
2. le plan de la mire doit être parallèle au plan image (cas parallèle).

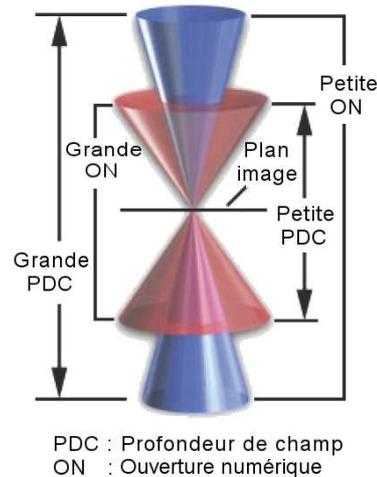


FIG. 2.13 – Relation entre la profondeur de champ et l'ouverture numérique de l'objectif.

La méthode conventionnelle de calibrage pour mires planes repose sur l'utilisation de deux contraintes qui sont dérivées du modèle de projection. En couplant ces contraintes avec un certain nombre d'images (3 images au minimum), il est possible d'exprimer un système de 6 équations au minimum permettant la détermination de l'ensemble des paramètres de la caméra. Les images utilisées doivent impérativement posséder des orientations différentes afin de garantir l'indépendance des équations.

Dans le cas parallèle (cas du microscope optique), le système d'équations se réduit aux contraintes dérivées d'une seule image (2 contraintes), ce qui limite le nombre de paramètres pouvant être résolus [McCULLAGH ET SHEVLIN, 2004]. Par ailleurs, le cas parallèle implique

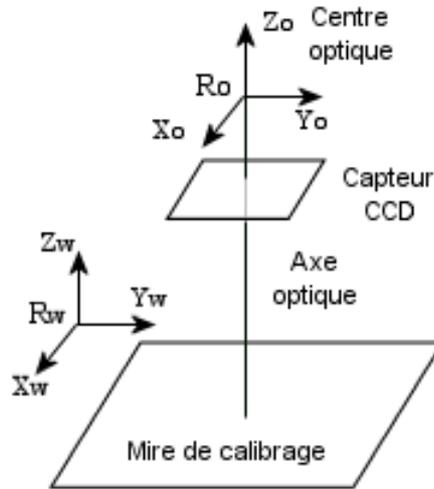


FIG. 2.14 – Illustration du cas de la mire plane et parallèle.

également de très faibles valeurs de rotation suivant les axes X et Y . Les matrices de rotation correspondantes (axes X et Y) tendent alors vers la matrice identité. La matrice de rotation globale, définie par le produit des matrices de rotation suivant les 3 axes (X , Y et Z), peut s'exprimer sous la forme :

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\tau) & \sin(\tau) & 0 \\ -\sin(\tau) & \cos(\tau) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

L'analyse de l'équation (2.13) nous indique qu'il est impossible de résoudre plus de trois paramètres internes au maximum. Par conséquent, le calcul des valeurs de la focale du microscope f_{tot} et de la profondeur de la mire T_z ne peut être déterminé à partir de l'équation (2.13), on ne pourra calculer uniquement que le rapport f_{tot} / T_z .

2.3.2 Modèle optique du couple caméra/microscope

Généralement, les microscopes modernes sont équipés d'objectifs corrigés à l'infini (*infinity corrected system*). Ces objectifs produisent un faisceau de lumière parallèle appelé espace infini [DAVIDSON ET ABRAMOWITZ, 2004] (voir figure 2.15). Cet espace se termine par une lentille de tube (de l'anglais, *tube lens*) qui rend au faisceau sa convergence, permettant ainsi son exploitation par un oculaire ou un dispositif de prise de vue (ex : caméra CCD). L'intérêt principal des dispositifs à correction infinie est de pouvoir intercaler facilement, dans l'espace infini, des modulateurs pupillaires permettant de meilleures conditions optiques de travail (voir figure 2.16). Ces modulateurs pupillaires peuvent être des filtres, des lames de phase, des réticules ou encore des miroirs pour l'épiscopie.

Le modèle optique retenu pour le microscope est le modèle du pinhole [FAUGERAS ET AL., 2001], celui-ci est illustré à la figure 2.17. Dans ce modèle, les systèmes de coordonnées utilisés sont les suivants :

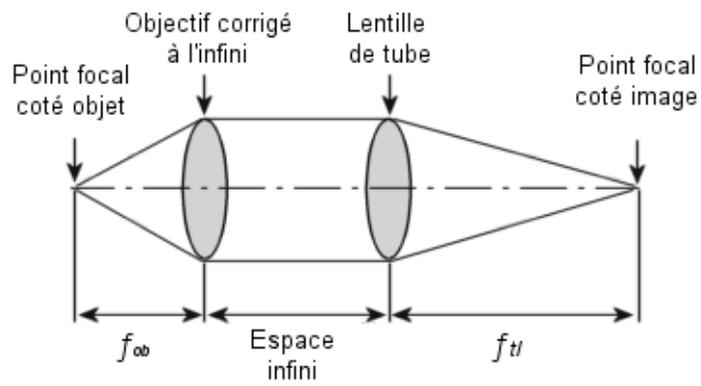


FIG. 2.15 – Système à correction à l'infini.

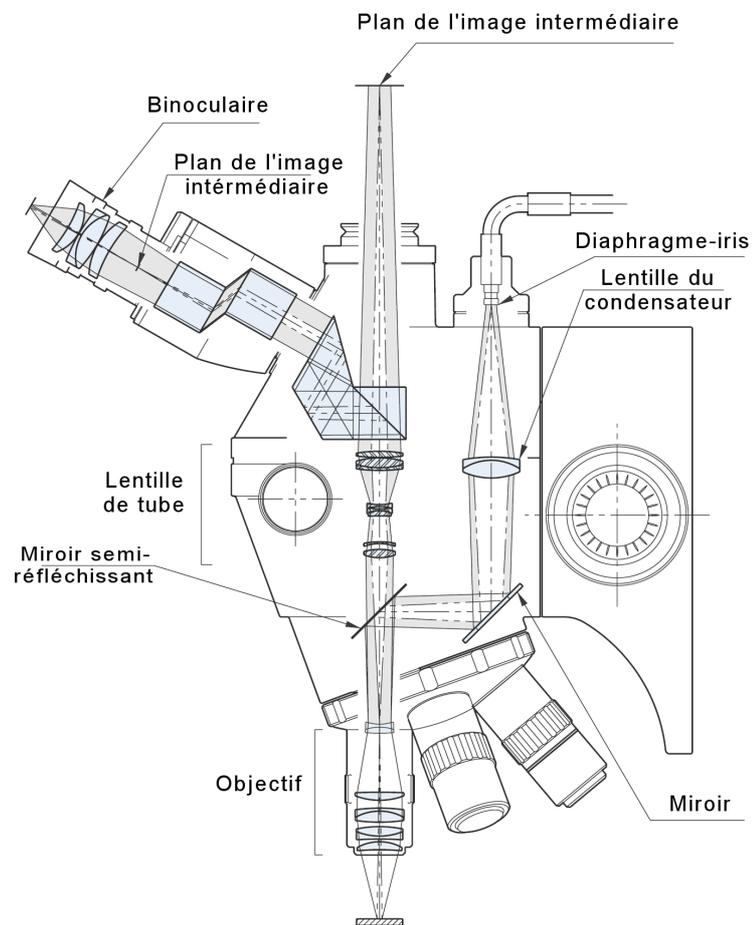


FIG. 2.16 – Disposition de l'objectif et de la lentille de tube dans le microscope utilisé (*MitutoyoFS70Z*).

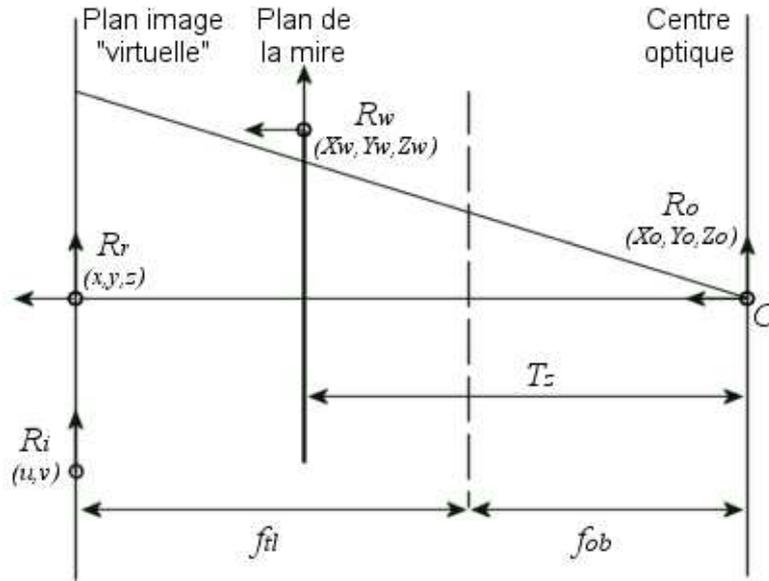


FIG. 2.17 – Modèle optique du microscope.

R_w repère objet (repère monde) : Ce repère est arbitraire. Dans notre approche les points de la mire appartiennent au plan X_w, Y_w avec $Z_w = 0$;

R_o repère objectif (repère microscope) : Ce repère a pour origine le centre optique C de l'objectif du microscope. Les axes X_o et Y_o sont alignés respectivement avec les colonnes et les lignes du plan image alors que l'axe Z_o est confondu avec l'axe optique du microscope ;

R_r repère rétinien : Ce repère est lié à la matrice CCD. Son origine se trouve au point d'intersection de l'axe optique avec le plan de l'image virtuelle. Les axes x et y sont parallèles avec les axes X_o et Y_o du repère R_o ;

R_i repère image : Physiquement, ce repère se trouve sur le même plan que R_r . La transformation entre ces deux repères se fait par l'intermédiaire des gains de projection k_u et k_v , ainsi que les coordonnées du point principal u_0 et v_0 .

2.3.3 Méthode de calibrage proposée

Dans le cas parallèle, les méthodes classiques de calibrage ne peuvent pas être utilisées compte tenu de l'absence d'information de profondeur qui est, généralement, le résultat d'une distribution en profondeur des points caractéristiques de la mire (mire 3-D, translation en profondeur, rotation par rapport au plan rétinien, etc.). Par exemple, la procédure de calibrage proposée par Tsai [TSAI, 1987] nécessite une rotation minimale de la mire de 30° par rapport au plan rétinien, sans quoi, l'algorithme de calibrage subit des altérations (perte de rang du système, grande sensibilité au bruit de mesure) [MCCULLAGH ET SHEVLIN, 2004]. Afin de prendre en compte le cas parallèle, il est possible de simplifier le modèle de projection utilisé en approchant les angles de tangage et de lacet (axes X et Y) de la matrice de rotation par des faibles angles [ZHOU ET NELSON, 1999]. Cette méthode n'est pas cependant adaptée au cas parallèle parfait, c'est-à-dire lorsque les angles de tangage et de lacet sont nuls. En effet, lorsque la valeur des angles approchés augmente (cas réel), l'erreur qui est due à l'approximation linéaire augmente

de manière significative.

Par ailleurs, il existe des procédures de calibrage spécifiques aux mires planes. Parmi ces méthodes, un des algorithmes les plus connus est celui proposé par Zhang [ZHANG, 1999]. Cette méthode étant basée sur le concept de la transformation homographique [SHACKLOCK, 2004], elle nécessite l'utilisation de plusieurs mires avec différentes orientations [ZHANG, 1999]. Il est possible de réduire le nombre d'images utilisées au détriment du nombre de paramètres intrinsèques pouvant être résolus (système sous contraint).

La méthode de calibrage que nous proposons est basée sur l'algorithme de Zhang [ZHANG, 1999]. Elle a été modifiée pour tenir compte du cas parallèle du microscope. Dans cette méthode, nous ne calculons pas directement la focale totale du microscope (f_{tot}), mais le rapport entre f_{tot} et la distance T_z :

$$M = \frac{f_{tot}}{T_z} = \frac{f_{ob} + f_{tl}}{T_z} \quad (2.14)$$

La procédure de calibrage se déroule en deux étapes. Dans un premier temps, nous créons une mire haute-précision afin de réduire au maximum le bruit de mesure. La deuxième étape consiste à remonter aux paramètres intrinsèques, puis extrinsèques, du microscope en utilisant l'algorithme de calibrage proposé ci-dessous.

2.3.3.1 Mire virtuelle haute-précision

Dans le but d'obtenir des résultats de calibrage suffisamment précis, une attention particulière doit être portée à la réalisation de la mire, ainsi qu'au choix de la méthode d'extraction des coordonnées des points de calibrage. En effet, une mauvaise détection introduit généralement des instabilités dans la résolution des systèmes non linéaires.

Actuellement, les mires utilisées pour le calibrage des microscopes sont réalisées par microlithographie (voir figure 2.18). Ainsi, la précision de la mire dépend de la précision du procédé de gravure. Par ailleurs, ce type de mire ne s'avère pas être très adapté au cas de la micromanipulation, puisqu'il faut dans un premier temps installer la mire dans l'espace de travail (milieu très confiné), puis la retirer une fois l'opération de calibrage terminée. L'opération doit être répétée à chaque modification de la focale (changement de l'objectif ou de la focale de la lentille de tube).

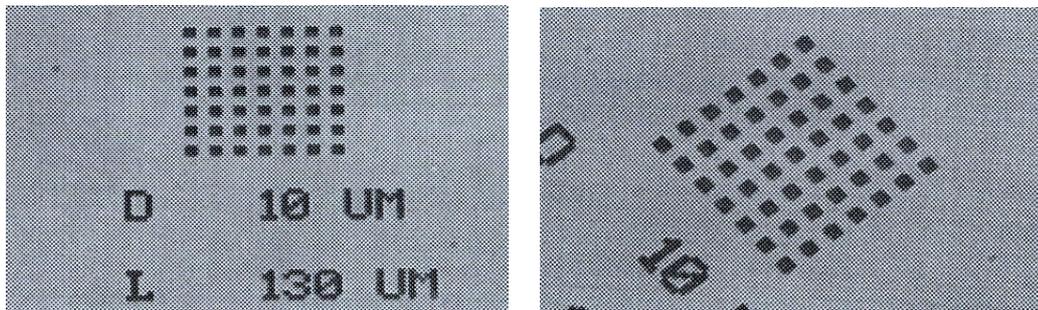


FIG. 2.18 – Mire réalisée par lithographie.

Pour ces différentes raisons, nous avons choisi de réaliser une mire de calibrage virtuelle à l'aide de l'effecteur du micromanipulateur (voir figure 2.19). La cible est constituée par le microlevier AFM de manipulation fixé à l'extrémité du micromanipulateur. Celle-ci est ensuite positionnée aléatoirement dans le plan focal de l'objectif avec une répétabilité de $100\eta m$. Les positions de l'effecteur dans le repère objet R_w sont obtenues grâce aux capteurs optiques de

position du micromanipulateur. Les positions de la pointe AFM sur le plan image sont ensuite retournées par le bloc de traitement d'image. La méthode employée pour la localisation de la pointe au niveau pixellique est basée sur la technique de corrélation normalisée (NCC). Nous utilisons ensuite une interpolation parabolique des valeurs de la fonction de corrélation pour une localisation au niveau subpixellique.

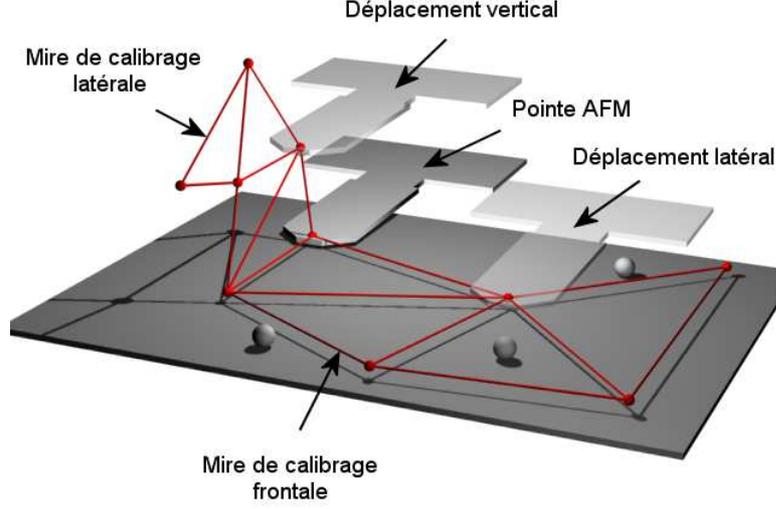


FIG. 2.19 – Mires virtuelles.

2.3.3.2 Algorithme de calibration proposé

Pour une caméra basée sur le modèle du pinhole [FAUGERAS ET AL., 2001], la relation entre les points 3-D $\tilde{\mathbf{M}} = [X, Y, Z, 1]^t$ et leur image 2-D projetée $\tilde{\mathbf{m}} = [u, v, 1]^t$ est donnée par l'équation (2.15) :

$$s\tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{A} [\mathbf{R} \ \mathbf{t}] \tilde{\mathbf{M}} \quad (2.15)$$

où \sim représente la notation des vecteurs homogènes et s le facteur d'échelle arbitraire. \mathbf{R} et \mathbf{t} représentent respectivement la matrice de rotation, et le vecteur de translation (également appelés paramètres extrinsèques). \mathbf{A} est la matrice des paramètres intrinsèques, elle est donnée par l'équation suivante :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

avec (u_0, v_0) coordonnées du point principal dans l'image, $\alpha = k_u f_{tot}$ et $\beta = k_v f_{tot}$ représentent la focale de la caméra suivant les axes u et v , et γ représente le paramètre d'inclinaison des pixels (de l'anglais, *skew*). Les paramètres k_u et k_v représentent les tailles des pixels (en mètres) suivant les axes u et v et s'expriment par :

$$k_u = s_x d_x^{-1} \quad \text{et} \quad k_v = d_y \quad (2.17)$$

avec :

$$d'_x = d_x \frac{N_{cx}}{N_{fx}} \quad (2.18)$$

d_x et d_y sont les distances effectives entre les centres des capteurs élémentaires (CCD) suivant les axes u et v ; N_{cx} est le nombre de capteurs élémentaires suivant la direction u ; N_{fx} est le nombre de pixels présents dans une ligne après échantillonnage par la carte d'acquisition; s_x est un rapport d'échelle entre la surface du capteur (CCD) et la mémoire tampon de la carte d'acquisition vidéo [MELZER, 1999], défini par :

$$s_x = \left(\frac{CCD_x}{CCD_y} \right) / \left(\frac{N_{fx}}{N_{fy}} \right) \quad (2.19)$$

où CCD_x et CCD_y sont les dimensions de la surface du capteur suivant les axes u et v , N_{fy} est le nombre de pixels dans la mémoire tampon suivant la direction v .

L'origine et l'orientation du repère objet sont choisis de telle sorte que le plan de la mire coïncide avec le plan $Z = 0$. Nous obtenons, après simplification, le système suivant :

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

où r_i est la i^{me} colonne de la matrice \mathbf{R} . Ainsi la relation entre un point dans le repère objet et le point correspondant dans le repère image est donnée par l'homographie \mathbf{H} :

$$s\tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{H}\tilde{\mathbf{M}} \quad (2.21)$$

avec

$$\mathbf{H} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix}$$

A. Calcul des paramètres intrinsèques : La matrice d'homographie \mathbf{H} de taille 3×3 est une transformation linéaire entre le plan objet et le plan image. Elle est définie à un facteur d'échelle près et peut être estimée en utilisant les points 3D retournés par la mire virtuelle et les points images correspondants. Il est nécessaire de disposer de six points au minimum pour pouvoir la calculer. Pour plus de détails, le lecteur pourra se référer à [KANATANI, 1998].

Si l'on définit \mathbf{h}_i comme étant la i^{me} colonne de \mathbf{H} , nous pouvons écrire à partir de (2.20) et (2.21) :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{h}_1 & \mathbf{h}_2 & \mathbf{h}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda} \mathbf{A} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

où λ représente un facteur d'échelle. L'équation (2.22) nous permet d'écrire les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_1 &= \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1 \\ \mathbf{r}_2 &= \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 \end{aligned} \quad (2.23)$$

Introduisons maintenant la matrice \mathbf{B} définie par $\mathbf{B} = \mathbf{A}^{-T}\mathbf{A}^{-1}$. Compte tenu de l'orthogonalité des vecteurs \mathbf{r}_1 et \mathbf{r}_2 , nous pouvons déduire de l'équation (2.23), les contraintes suivantes :

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_1^T \mathbf{r}_1 &= \lambda^2 \mathbf{h}_1^T \mathbf{B} \mathbf{h}_1 = 1 \\ \mathbf{r}_2^T \mathbf{r}_2 &= \lambda^2 \mathbf{h}_2^T \mathbf{B} \mathbf{h}_2 = 1 \\ \mathbf{r}_1^T \mathbf{r}_2 &= \lambda^2 \mathbf{h}_1^T \mathbf{B} \mathbf{h}_2 = 0 \end{aligned} \quad (2.24)$$

où

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_1^T \mathbf{B} \mathbf{h}_2 &= 0 \\ \mathbf{h}_1^T \mathbf{B} \mathbf{h}_1 &= \mathbf{h}_2^T \mathbf{B} \mathbf{h}_2 \end{aligned} \quad (2.25)$$

La matrice \mathbf{B} représente l'image de la conique absolue [TRIGGS, 1997] et peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha^2} & -\frac{\gamma}{\alpha^2\beta} & \frac{v_0\gamma - u_0\beta}{\alpha^2\beta} \\ -\frac{\gamma}{\alpha^2\beta} & \frac{\gamma^2}{\alpha^2\beta} + \frac{1}{\beta^2} & -\frac{\gamma(v_0\gamma - u_0\beta)}{\alpha^2\beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} \\ \frac{v_0\gamma - u_0\beta}{\alpha^2\beta} & -\frac{\gamma(v_0\gamma - u_0\beta)}{\alpha^2\beta^2} - \frac{v_0}{\beta^2} & \frac{(v_0\gamma - u_0\beta)^2}{\alpha^2\beta^2} + \frac{v_0^2}{\beta^2} + 1 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Étant donné que nous ne disposons que d'une seule image, nous ne pouvons déterminer que deux paramètres intrinsèques au maximum, à savoir α et β . Pour cela, nous imposons la contrainte $\gamma = 0$ et nous supposons que les paramètres u_0 et v_0 sont localisés au centre de l'image (optiques corrigées). La matrice \mathbf{B} peut s'écrire alors sous la forme :

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\beta^2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

La matrice \mathbf{B} étant symétrique, elle peut être réduite au vecteur suivant :

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{11} & \mathbf{B}_{22} & \mathbf{B}_{33} \end{bmatrix}^T \quad (2.28)$$

avec

$$\mathbf{h}_i^T \mathbf{B} \mathbf{h}_j = \mathbf{V}_{ij}^T \mathbf{b} \quad (2.29)$$

et

$$\mathbf{V}_{ij} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{i1}\mathbf{h}_{j1} & \mathbf{h}_{i2}\mathbf{h}_{j2} & \mathbf{h}_{i3}\mathbf{h}_{j3} \end{bmatrix}^T$$

Les deux contraintes fondamentales (2.25) peuvent être réécrites sous la forme de deux équations homogènes en fonction du vecteur \mathbf{b} comme suit :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{12}^T \\ (\mathbf{V}_{11} - \mathbf{V}_{22})^T \end{bmatrix} \mathbf{b} = 0 \quad (2.30)$$

Ce système d'équation ne permet de déterminer que les deux paramètres α et β . Afin de pouvoir remonter au paramètre λ , il est nécessaire de rajouter une troisième contrainte qui peut être obtenue à partir de l'expression (2.21). La paramètre λ s'exprime alors sous la forme :

$$\lambda = \frac{1}{\|\mathbf{A}^{-1}\mathbf{h}_1\|} \quad (2.31)$$

Après développement, nous obtenons :

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{\left(-\frac{h_{11}}{\alpha} + \frac{u_0 h_{31}}{\alpha}\right)^2 + \left(-\frac{h_{21}}{\beta} + \frac{v_0 h_{31}}{\beta}\right)^2 + (h_{31})^2}} \quad (2.32)$$

où h_{ij} sont les éléments ligne-colonne de la matrice \mathbf{H} . Étant donné que nous sommes dans le cas parallèle, les paramètres h_{31} et h_{32} (r_{31} et r_{32} respectivement) peuvent être négligés. L'équation (2.32) peut être alors simplifiée sous la forme :

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{h_{11}}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{h_{21}}{\beta}\right)^2 + (h_{31})^2}} \quad (2.33)$$

Nous obtenons enfin :

$$\frac{h_{11}^2}{M_1^2} + \frac{h_{21}^2}{M_2^2} + h_{31}^2 \lambda^2 = 1 \quad (2.34)$$

où $M_1 = \frac{\alpha}{\lambda}$ et $M_2 = \frac{\beta}{\lambda}$ sont respectivement le facteur de grossissement suivant les axes u et v .

En ajoutant cette nouvelle contrainte au système (2.25), nous obtenons un système contraint qui nous permet de calculer les deux facteurs de grossissement M_1 et M_2 , ainsi que le facteur d'échelle λ . Le système final peut s'exprimer sous la forme :

$$\begin{bmatrix} h_{11}h_{12} & h_{21}h_{22} & h_{31}h_{32} \\ h_{11}^2 - h_{12}^2 & h_{21}^2 - h_{22}^2 & -h_{32}^2 - h_{31}^2 \\ h_{11}^2 & h_{21}^2 & h_{31}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{M_1^2} \\ \frac{1}{M_2^2} \\ \lambda^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

A partir de l'équation (2.14), la focale de la lentille de tube ainsi que la focale totale du microscope peuvent être obtenues avec les équations suivantes :

$$\begin{aligned} f_{tl} &= f_{tl1} = M_1 \times f_{ob} \\ &= s_x \times f_{tl2} \\ &= s_x \times M_2 \times f_{ob} \end{aligned} \quad (2.36)$$

Soit la focale totale du microscope :

$$f_{tot} = f_{tl} + f_{ob} \quad (2.37)$$

B. **Calcul des paramètres extrinsèques** : Une fois la matrice \mathbf{A} connue, nous calculons les paramètres extrinsèques de la caméra. Pour cela, nous commençons par extraire la matrice de rotation à partir de l'équation (2.21) :

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_1 &= \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1 \\ \mathbf{r}_2 &= \lambda \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 \\ \mathbf{r}_3 &= \mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2 \end{aligned} \quad (2.38)$$

Les paramètres T_x et T_y sont calculés directement à partir de l'équation 2.20. Afin de réduire l'influence du bruit de mesure, nous réalisons la moyenne sur l'ensemble des points utilisés (six points au minimum).

$$\begin{aligned} T_x &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{k_u \cdot u_i}{M} - r_{11} X_i - r_{12} Y_i \\ T_y &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{k_v \cdot v_i}{M} - r_{21} X_i - r_{22} Y_i \end{aligned} \quad (2.39)$$

Enfin, le paramètre T_z est calculé à partir de l'équation (2.14) comme suit :

$$T_z = f_{ob} \cdot \frac{M+1}{M} \quad (2.40)$$

C. **Calcul des paramètres de distorsion** : Les paramètres (u, v) représentent les coordonnées idéales (sans distorsion) des pixels dans le repère image. Ils sont calculés en utilisant le modèle direct du microscope. Les paramètres (\check{u}, \check{v}) sont les coordonnées réelles des pixels correspondants (avec distorsion). De manière similaire, les paramètres (x, y) et (\check{x}, \check{y}) représentent respectivement les coordonnées idéales et réelles sur le plan rétinien. Les relations entre les coordonnées idéales et réelles sont données par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} \check{x} &= x + x [k_1 r^2 + k_2 r^4] \\ \check{y} &= y + y [k_1 r^2 + k_2 r^4] \end{aligned} \quad (2.41)$$

où k_1 et k_2 représentent les coefficients de la distorsion radiale. Les coordonnées du centre de la distorsion sont les mêmes que le point principal. Sachant que le passage du repère rétinien au repère image est défini par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \check{u} &= u_0 + \alpha \check{x} \\ \check{v} &= v_0 + \beta \check{y} \end{aligned} \quad (2.42)$$

le système 2.41 peut être reformulé dans le repère image sous la forme :

$$\begin{aligned} \check{u} &= u + (u - u_0) [k_1 r^2 + k_2 r^4] \\ \check{v} &= v + (v - v_0) [k_1 r^2 + k_2 r^4] \end{aligned} \quad (2.43)$$

Finalement, nous calculons les coefficients de distorsion k_1 et k_2 en résolvant le système suivant par les méthodes classiques :

$$\begin{bmatrix} (u - u_0) r^2 & (u - u_0) r^4 \\ (v - v_0) r^2 & (v - v_0) r^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \check{u} - u \\ \check{v} - v \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

2.3.4 Expérimentations

Afin de caractériser l'efficacité de la procédure de calibrage proposée, deux types d'études ont été menées. La première porte sur la robustesse de l'algorithme vis-à-vis du bruit de mesure. Nous utilisons pour cela un simulateur pour le couple caméra/microscope. La deuxième étude réalisée consiste à utiliser des données réelles pour estimer la précision des résultats retournés par l'algorithme. Dans le but d'offrir une base comparative à l'étude de notre algorithme, nous avons mené en parallèle une étude similaire sur l'algorithme de Tsai modifié (appliqué au cas parallèle) [ZHOU ET NELSON, 1999] [TSAI, 1987]. L'implémentation algorithmique de cette méthode est détaillée dans l'annexe A.

2.3.4.1 Étude de la robustesse aux bruits

Les caractéristiques de la caméra simulée sont les suivantes : $u_0 = 384$ $v_0 = 288$, la résolution de l'image est de 768×576 pixels. La distance focale de l'objectif du microscope est de $f_{ob} = 100$ mm avec une distance focale de la lentille de tube de $f_{tl} = 200$ mm. La mire de calibrage est composée de 100 points distribués aléatoirement dans la scène. La contrainte du cas parallèle est représentée par un très petit angle de lacet (pas d'angles de tangage et roulis). Un bruit Gaussien de moyenne nulle et d'écart type σ (niveau du bruit) est rajouté aux points projetés sur le plan image. Ce bruit simule d'éventuelles imperfections de mesure (mauvaise détection, mire pas suffisamment précise, etc.). Pour chaque niveau de bruit, nous réalisons une centaine de tests - le bruit étant régénéré à chaque fois - et nous calculons ensuite une moyenne correspondant à l'ensemble de ces mesures.

Comme le montre la figure (2.20), la méthode proposée présente une robustesse aux bruits de mesure supérieure à celle proposée par Tsai pour le calcul du facteur de grossissement (figure 2.20(a)) et du paramètre T_z (figure 2.20(b)). Ceci est dû à la prédominance de ces paramètres dans le calcul de la transformation homographique, cette transformation étant relativement plus robuste aux bruits dans le cas parallèle. Par ailleurs, nous remarquons une équivalence entre les deux méthodes dans le calcul du paramètre T_y (figure 2.20(c)). La méthode de Tsai présente toutefois un avantage pour le calcul du paramètre T_x (figure 2.20(d)). Les paramètres angulaires (roulis, tangage, lacet) n'ont pas été représentés étant donné leurs faibles valeurs numériques. Néanmoins, on constate que les deux méthodes présentent des résultats similaires pour ces paramètres. Enfin, nous remarquons que la méthode proposée possède une erreur de reprojection 3-D beaucoup plus faible (figure 2.20(e)).

2.3.4.2 Tests dans les conditions réelles

Le dispositif expérimental est composé des éléments suivants :

- Microscope frontal : Microscope Mitutoyo FS70Z (de chez SUSS Microtec, France) équipé de trois objectifs de type M Plan Apo ($\times 2$, $\times 20$ et $\times 50$) et d'une lentille de tube dont le facteur de grossissement varie de $\times 1$ à $\times 2$;

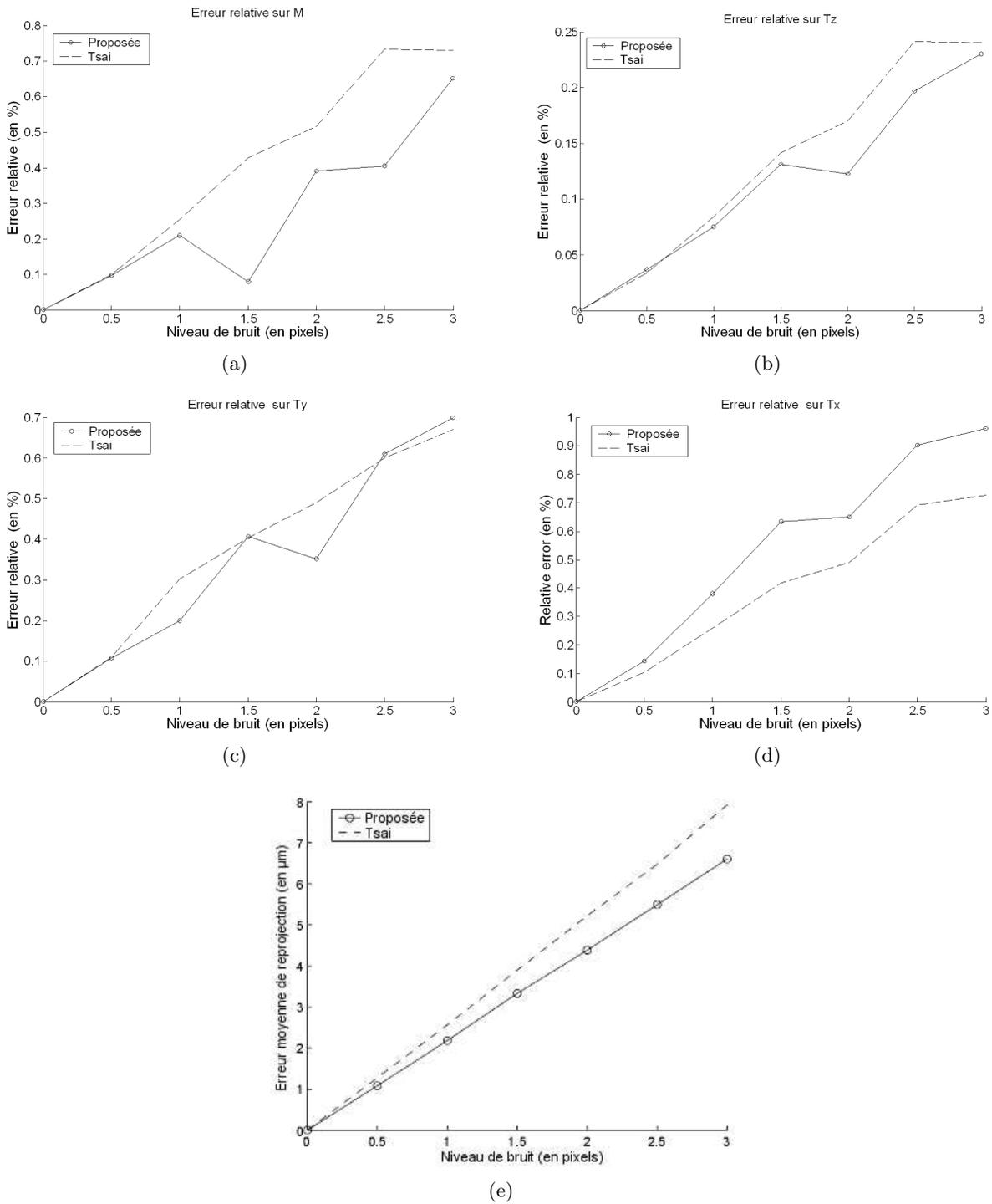


FIG. 2.20 – Erreurs relatives sur les paramètres intrinsèques et extrinsèques.

- Microscope latéral : Microscope TIMM-150 (de chez TECIN, Allemagne) avec un grossissement continu de 0.1 à 150. La caméra CCD est intégrée au microscope, elle possède 540×600 capteurs élémentaires. Chaque capteur élémentaire possède une taille de $7.3 \times 4.7 \mu\text{m}$;
- Caméra CCD : Caméra Chugai Boyeki *N&B* FC-55-II équipée d'un capteur Sony disposant

de 500×582 cellules élémentaires (de taille $9.8 \times 6.3 \mu m$);

- Carte d’acquisition : Une carte Matrix mvDELTA, avec 768×576 pixels et une fréquence pixel de 14.750 MHz (afin d’obtenir des pixels carrés);
- Micromanipulateur : Tables de micropositionnement à trois axes ($x-y-z$) M-111 (de chez Polytec-PI, Allemagne), avec un déplacement minimal de $0.05 \mu m$ et une répétabilité de l’ordre de $0.1 \mu m$. La cible utilisée est constituée par la pointe d’un microlevier AFM avec capteurs de force piézorésistifs intégrés.

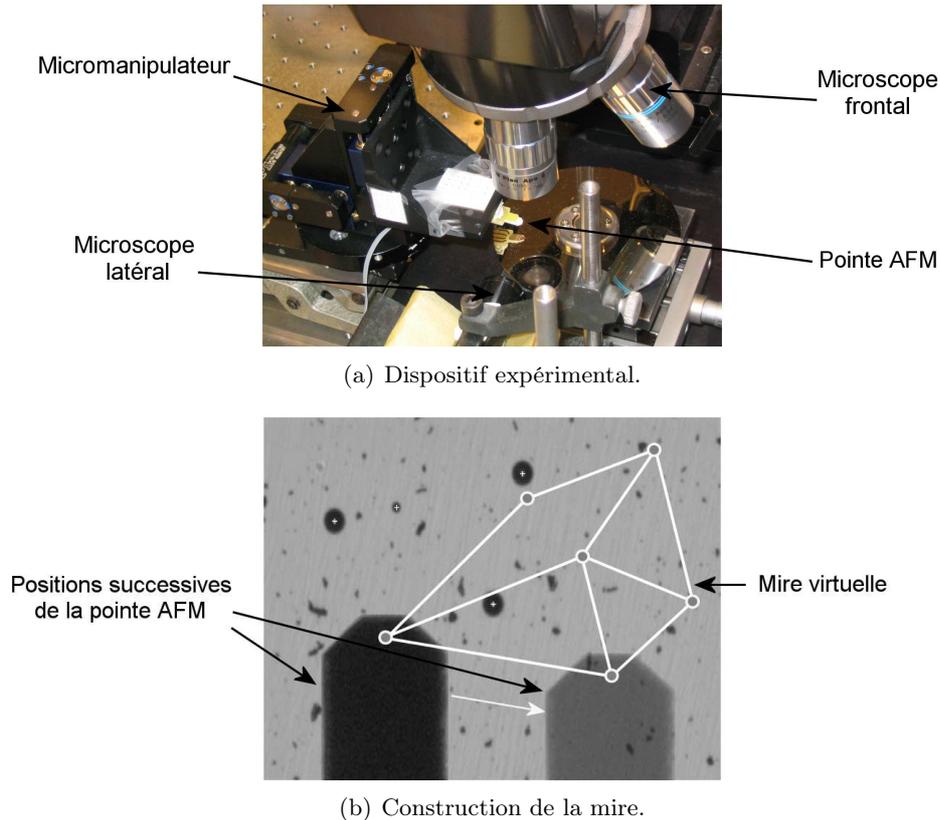


FIG. 2.21 – Réalisation de la mire virtuelle

La procédure de calibrage se déroule en deux étapes. La première étape consiste à générer la mire de calibrage (figure 2.21(b)). Cette étape est accomplie par le module d’asservissement du micromanipulateur ainsi que par le module de traitement d’image. Dans un premier temps, le module de contrôle du micromanipulateur envoie une séquence de positions aléatoires afin de positionner le micro-effecteur à différents endroits de la scène (figure 2.21(b)). Pour chaque position retournée le module de traitement, après avoir numérisé l’image, calcule la position exacte de la pointe AFM, tout d’abord au niveau pixelique, en utilisant la corrélation normalisée, puis au niveau subpixelique, en réalisant une interpolation entre les valeurs de corrélation. Une fois la mire obtenue, nous calculons les paramètres du modèle du microscope avec l’algorithme de calibrage proposé.

Pour l’analyse des résultats, nous avons utilisé les méthodes d’analyse d’erreurs classiques, à savoir : l’erreur moyenne, l’erreur maximale et l’écart type. Ces erreurs s’expriment par les

relations suivantes :

$$\begin{aligned}
 Err\ moy &= \frac{\sum_{i=1}^N [(\hat{X}_i - X_i)^2 + (\hat{Y}_i - Y_i)^2 + (\hat{Z}_i - Z_i)^2]^{1/2}}{N} \\
 Err\ max &= \max [(\hat{X}_i - X_i)^2 + (\hat{Y}_i - Y_i)^2 + (\hat{Z}_i - Z_i)^2]^{1/2} \\
 \sigma &= \left[\frac{\sum_{i=1}^N [(\hat{X}_i - X_i)^2 + (\hat{Y}_i - Y_i)^2 + (\hat{Z}_i - Z_i)^2] - N \times mean^2}{N-1} \right]^{1/2}
 \end{aligned} \tag{2.45}$$

où N représente le nombre de points utilisés, (X_i, Y_i, Z_i) représentent les coordonnées réelles de l'objet, et $(\hat{X}_i, \hat{Y}_i, \hat{Z}_i)$ représentent les coordonnées calculées de l'objet.

TAB. 2.2 – Calcul des paramètres pour différents grossissements et erreurs de reprojection 3D. Les paramètres $T_x, T_y, E_{moy}, E_{max}$ et σ sont donnés en μm , T_z en m et α en radians.

| | Objectif $\times 2$ | | | | Objectif $\times 20$ | | | |
|-----------|-----------------------------|-----------|-----------------------------|-----------|-----------------------------|----------|-----------------------------|----------|
| | Lentille de tube $\times 1$ | | Lentille de tube $\times 2$ | | Lentille de tube $\times 1$ | | Lentille de tube $\times 2$ | |
| | Proposée | Tsai | Proposée | Tsai | Proposée | Tsai | Proposée | Tsai |
| M | 2.143 | 2.156 | 4.042 | 4.035 | 20.841 | 20.833 | 39.1323 | 39.1353 |
| T_x | -554.01 | -554.62 | -280.94 | -281.37 | -72.24 | -71.82 | -38.42 | -38.02 |
| T_y | 325.32 | 321.24 | 97.87 | 97.58 | -28.14 | -28.58 | -14.99 | -15.21 |
| T_z | 0.14626 | 0.14636 | 0.12480 | 0.12479 | 0.104796 | 0.104776 | 0.10255 | 0.10254 |
| α | 0.019 | 0.036 | 2.53E-03 | 5.95E-02 | 3.95E-06 | 1.53E-03 | 1.65E-12 | 1.69E-03 |
| k_1 | -1.93E-20 | -2.63E-10 | -4.7E-09 | -2.59E-10 | 4.76E-10 | 2.32E-10 | -6.19E-008 | 4.01E-10 |
| k_2 | 7.55E-16 | / | 5.16E-14 | / | -9.90E-14 | / | 4.29E-11 | / |
| E_{moy} | 0.835 | 0.955 | 7.34E-02 | 4.21E-02 | 1.60E-03 | 1.43E-02 | 5.70E-04 | 2.64E-03 |
| σ | 0.538 | 0.618 | 8.08E-2 | 1.08E-01 | 9.04E-04 | 3.87E-02 | 3.13E-05 | 1.66E-03 |
| E_{max} | 2.010 | 1.937 | 0.123 | 0.291 | 1.71E-02 | 1.42E-02 | 6.09E-04 | 2.66E-03 |

Le tableau 2.2 présente les erreurs de reprojection 3D pour différents grossissements de l'objectif. On constate que la procédure de calibrage proposée présente une erreur moyenne inférieure à la procédure proposée par Tsai. L'écart entre les deux méthodes devient plus important lorsque l'on augmente le grossissement de l'objectif. Le tableau 2.2 présente également les résultats de calcul de différents paramètres. On remarque que les résultats sont relativement similaires à l'exception du vecteur de translation (T_x, T_y, T_z) . La méthode proposée présente par ailleurs l'avantage de retourner les deux coefficients de distorsion k_1 et k_2 .

2.4 Reconstruction de la scène

2.4.1 Transformation des coordonnées entre les repères des microscopes et la scène virtuelle

Nous allons définir dans cette section les transformations des systèmes de coordonnées nécessaires pour le passage entre les images des microscopes (frontal et latéral) et la scène virtuelle reconstruite. Comme il a été expliqué précédemment, la faible profondeur de champ implique que le plan de mise au point doit coïncider avec le plan de l'objet à observer. Dans le cas du

microscope frontal, le plan de mise au point est fixé à demi-hauteur des microbilles ($50.0\mu m$). Dans le cas du microscope latéral le problème est légèrement différent car les microbilles à manipuler peuvent être à différentes profondeurs de la scène. Afin de résoudre ce problème, nous avons monté le microscope latéral sur une table de translation à deux degrés de liberté. Nous avons ensuite réalisé un asservissement entre la position de la table de translation et la position du micromanipulateur (figure 2.22). Cette solution nous permet ainsi de maintenir le plan de mise au point sur la microbille tout au long de la tâche de micromanipulation.

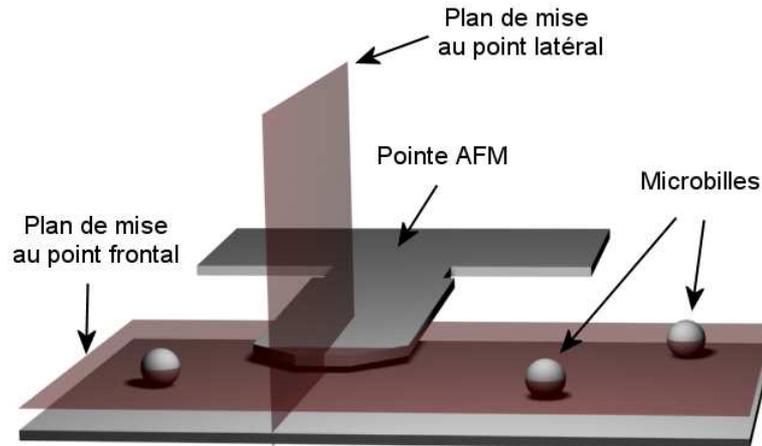


FIG. 2.22 – Représentation des plans de mise au point frontal et latéral.

Les transformations homogènes entre les repères des microscopes et la scène virtuelle sont représentées dans la figure (2.23). Les repères R_{o1} et R_{o2} représentent respectivement le repère du microscope frontal et latéral. R'_{o2} correspond au repère du microscope latéral lorsque le micromanipulateur est en mouvement. R_w est le repère global dans la scène réelle. R_v correspond au repère de la scène virtuelle. R_m est un repère fixé sur le micromanipulateur. Les transformations entre ces différents repères sont les suivantes :

1. \mathbf{T}_1 et \mathbf{T}_2 sont respectivement les transformations entre R_w et R_{o1} , R_{o2} . Ces transformations sont retournées par la procédure de calibrage, elle sont composées de translations et de rotations ;
2. \mathbf{T}_m correspond à la transformation entre R_w et R_m . Cette transformation correspond aux coordonnées du micromanipulateur dans le repère R_w durant la manipulation, elle comprend la composante de translation. Cette transformation est identique à la transformation entre R_{o2} et R'_{o2} , la position du microscope latéral étant asservie sur la position du micromanipulateur ;
3. \mathbf{T}_v est la transformation entre R_w et R_v . Cette transformation comprend une translation, une rotation, et un facteur d'échelle. Ainsi, les transformations totales entre les repères des microscopes et le repère de la scène virtuelle peuvent s'exprimer comme suit :

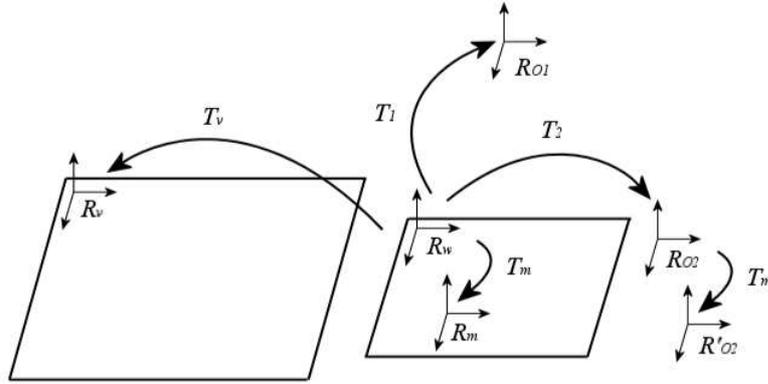


FIG. 2.23 – Passage entre les repères des microscopes et le repère de la scène virtuelle.

$$\begin{aligned}\mathbf{T}_{tot1} &= \mathbf{T}_v \mathbf{T}_1^{-1} \\ \mathbf{T}_{tot2} &= \mathbf{T}_v \mathbf{T}_2^{-1} \mathbf{T}_m^{-1}\end{aligned}\tag{2.46}$$

2.4.2 Reconstruction géométrique 3-D de la scène

L'opération de reconstruction géométrique du micro-environnement se déroule en trois phases. La première étape consiste à calibrer les deux microscopes afin d'extraire les paramètres extrinsèques et intrinsèques. Ces données permettront par la suite de faire la liaison entre le micro-environnement et sa représentation virtuelle. Cette opération se déroule en amont de la phase opérationnelle. La deuxième étape de reconstruction est la localisation des différents constituants de la microscène. Les microbilles ainsi que les particules de poussière sont localisées par le bloc de traitement d'image, la position de la pointe AFM est retournée par les capteurs de position des micromanipulateurs. La troisième phase repose sur les données retournées par les deux premières étapes de reconstruction. Les microbilles sont représentées pas des sphères, alors que les particules de poussière (de formes complexes) sont représentées pas des boites englobantes, afin de simplifier la représentation géométrique de la scène. Cette simplification profite aussi au temps de calcul, puisque ce type de représentation nécessite beaucoup moins de triangles qu'une représentation fidèle. La hauteur des boites englobantes a été fixée arbitrairement [AMMI ET FERREIRA, 2004c]. Le modèle 3-D de la pointe AFM a été réalisée avec un logiciel de CAO sur la base d'images obtenues avec un microscope électronique à balayage (SEM).

Le module de rendu 3-D de la scène est basé sur la librairie graphique OpenInventor (TGS). Basée sur OpenGL, cette bibliothèque fournit des fonctionnalités logicielles, graphiques et d'immersion avancées (multipipe, stéréo-vision, mutlitexturing, ombrage, outils interactifs, etc.). Il offre par ailleurs la simplicité et l'efficacité d'un système orienté objet complet.

Une fois le micro-environnement reconstruit, il est possible d'obtenir une vue perspective des différents points de vue de la scène (figure 2.24). Au moyen des outils de navigation proposés, l'opérateur peut ainsi naviguer dans la représentation graphique du micro-environnement afin de compléter sa compréhension de l'environnement et de la tâche à réaliser.

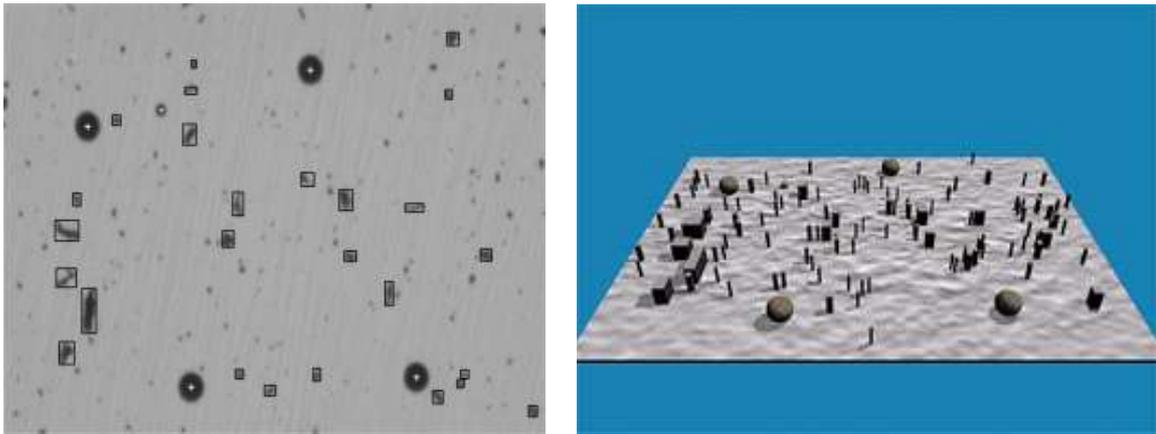


FIG. 2.24 – Reconstruction 3-D de la scène

2.4.3 Recalage de la représentation virtuelle du micro-environnement

Le recalage est la procédure qui permet de faire la correspondance dimensionnelle entre l'environnement réel et sa représentation virtuelle [NICOLAU ET AL., 2003]. Dans le cas de la scène étudiée, la correspondance se fait à un facteur d'échelle près. Ce facteur est fixé arbitrairement en fonction des interfaces comportementales utilisées (écran, interface haptique, etc.).

Nous utilisons deux procédures de recalage. La première est dynamique et est appliquée aux objets localisés par le module de traitement d'image [AZUMA ET BISHOP, 1994] (micro-billes et particule de poussière). Elle repose sur le modèle calculé du microscope (paramètres extrinsèques et intrinsèques) et sur les positions des composants retournées par le module de traitement d'image. La deuxième procédure de recalage est statique [AZUMA ET BISHOP, 1994], elle concerne la représentation virtuelle de l'effecteur terminal. Celle-ci est réalisée au début des opérations et peut être mise à jour durant l'intervention. Elle comporte principalement deux étapes :

1. La première correspond au recalage suivant le plan frontal de la scène. On utilise pour cela le module de traitement d'image et le modèle calculé du microscope pour faire la correspondance entre la représentation virtuelle et réelle du micro-effecteur.
2. La deuxième étape se déroule suivant le plan latéral de la scène. Elle consiste à balayer verticalement le micro-environnement avec le microlevier AFM jusqu'au point de contact avec le substrat. La correspondance entre la représentation virtuelle et réelle de micro-effecteur est réalisée à ce moment là. Pour détecter le moment et le point de contact entre la pointe AFM et le substrat, nous réalisons un asservissement (contrôleur proportionnel-intégral) entre le déplacement vertical du micromanipulateur et l'effort mesuré avec le capteur d'effort fixé sur le microlevier AFM.

2.5 Analyse des erreurs dues à la chaîne de traitement

Dans les sections qui suivent, nous allons aborder les différentes erreurs introduites par la chaîne de mesure. Le but ici est de donner dans un premier temps une estimation des erreurs maximales pouvant être introduites au cours du traitement [DESVIGNES, 2002] [MENEGAZ, 2004]

[SURREL, 1999]. Nous exposerons par la suite les limitations inhérentes aux différentes parties du système de mesure.

2.5.1 Limite de résolution de l'objectif

Il existe toujours une valeur de grossissement au-delà de laquelle la perception des détails n'est plus améliorée [MARTIN, 1931]. Celle-ci est limitée parce que l'image d'un point objet n'est jamais rigoureusement ponctuelle, en raison des aberrations et des phénomènes de diffraction qui doivent être pris en considération pour des détails avoisinant la longueur d'onde de la lumière utilisée. De ce point de vue, la qualité des optiques dépend principalement de l'ouverture numérique O_n qui caractérise le demi-angle maximal α sous lequel l'objet immergé dans un milieu d'indice n peut être observé (figure 2.25). Celle-ci s'exprime par la relation suivante :

$$O_n = n \sin \alpha \quad (2.47)$$

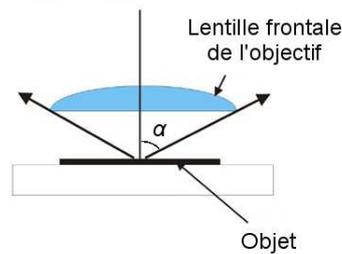


FIG. 2.25 – Overture numérique.

Suivant le critère de *lord Rayleigh* [MEILANY ET GARAVAGLIAZ, 1997], la limite de résolution s correspond à la distance entre deux points objets pour laquelle le maximum d'intensité du disque d'Airy du premier point correspond au premier minimum d'intensité du disque d'Airy du second point (voir figure 2.26). Elle est égale en théorie à :

$$s = \frac{0.61 \lambda}{O_n} \quad (2.48)$$

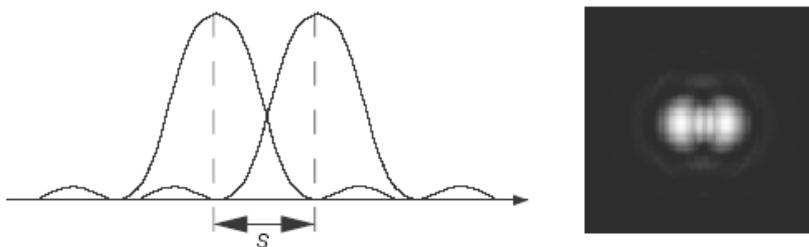


FIG. 2.26 – Pouvoir séparateur : capacité à discriminer deux disques d'Airy.

Le pouvoir séparateur, ou pouvoir de résolution, est définie comme étant l'inverse de la limite de résolution ; plus la limite de résolution est petite, plus le pouvoir de résolution de l'appareil est grand. Il est possible de résumer les propriétés des objectifs utilisés dans le tableau 3.1 [Mit, 2001] :

TAB. 2.3 – Propriétés des objectifs M Plan Apo utilisés.

| | ×2 | ×5 | ×10 | ×20 | ×50 | ×100 |
|--|-------|------|------|------|------|------|
| Ouverture numérique | 0.055 | 0.14 | 0.28 | 0.42 | 0.55 | 0.70 |
| Distance de travail (<i>mm</i>) | 34.0 | 34.0 | 33.5 | 20.0 | 13.0 | 6.0 |
| Distance focale (<i>mm</i>) | 100 | 40 | 20 | 10 | 4 | 2 |
| Limite de résolution (μm) | 5.0 | 2.0 | 1.0 | 0.7 | 0.5 | 0.4 |
| Profondeur de champ (μm) | 91 | 14.0 | 3.5 | 1.6 | 0.9 | 0.6 |

Les objectifs des microscopes comportent également des aberrations autres que celles dues à la diffraction [USSON, 1999] [SURREL, 1999] [MEIER, 2004]. Celles-ci peuvent être classées en deux catégories : aberrations géométriques, qui existent même en lumière monochromatique et les aberrations chromatiques, dues aux dispersions inégales des différentes longueurs d'onde dans les milieux.

2.5.1.1 Les aberrations chromatiques

Elles résultent du décalage dans l'espace des différentes couleurs issues d'un même objet coloré après avoir traversé une ou plusieurs lentilles ; plus la longueur d'onde est grande, plus l'image se positionne vers l'arrière. On trouve successivement le bleu, le vert puis le rouge. Ce phénomène est en partie responsable du liseré coloré qui entoure les objets observés au microscope.

2.5.1.2 Les aberrations géométriques

Elles sont dues aux défauts des systèmes optiques. Les composantes les plus importantes sont l'aberration sphérique, la coma, la courbure de champ, l'astigmatisme et la distorsion.

1. *L'aberration sphérique* : Elle résulte du fait que les rayons frappant le bord des lentilles sont plus fortement réfractés que ceux passant à proximité de l'axe optique. Ces rayons périphériques passent donc à côté du point focal. Ce type d'aberration réduit ainsi considérablement la netteté de l'image.
2. *La coma* : L'existence de cette aberration a pour effet de transformer l'image du point situé en dehors de l'axe en une figure ayant l'apparence d'une comète.
3. *La courbure de champ* : L'image d'un objet plan ne forme pas un plan au foyer mais une surface courbe si bien que l'image ne peut pas être au point (en même temps) sur toute sa surface.
4. *L'astigmatisme* : Cette aberration résulte du fait que l'image des rayons horizontaux se forme sur des plans plus éloignés que celle des rayons verticaux ; ainsi la netteté de l'image dépend de la direction des détails photographiés.

5. *La distorsion* : La distorsion est une aberration uniquement fonction de la position du point objet dans le champ, elle n'affecte pas la qualité de l'image d'un point. Seule la position est modifiée. Selon la déformation observée, on parle de déformation en barillet ou de déformation en coussinet.

Afin de minimiser les erreurs liées aux aberrations chromatiques et géométriques, nous avons pris le soin de choisir des objectifs avec un haut niveau de correction. L'objectif que nous utilisons actuellement (objectif plan-apochromatique) [Mit, 2001] comprend une correction pour les trois longueurs d'onde (rouge, bleu et vert), il permet ainsi de préserver la cohérence des couleurs dans l'image. D'autre part, l'objectif comprend une correction des aberrations géométriques : l'aberration sphérique et l'aberration de courbure de champ. Nous obtenons ainsi une image plane, et nette, du centre à la périphérie de l'objectif.

2.5.2 Erreurs dues à la numérisation du signal

Le dispositif utilisé pour l'acquisition du signal vidéo est composé, d'une part, d'une caméra vidéo dotée d'un capteur CCD, et d'autre part, d'une carte d'acquisition vidéo ; le signal subit ainsi une double discrétisation.

La numérisation du signal vidéo implique trois types de discrétisations : spatiale, temporelle, et en amplitude [MELZER, 1999] [MENEGAZ, 2004]. Chaque composante va générer un certain nombre de contraintes sur l'image finale. Il est possible de les résumer dans les points suivants :

1. *Discrétisation spatiale* : Appelée aussi "résolution" spatiale, elle est liée à la taille des capteurs élémentaires de la matrice CCD. Le signal renvoyé par chaque capteur représente l'intensité lumineuse moyenne reçue sur sa surface. Un nombre non suffisant de capteurs produit des images de faible niveau de détail et donc un possible crénelage (de l'anglais, *aliasing*) spatial.
2. *Discrétisation en amplitude (quantification)* : La quantification consiste à affecter une valeur numérique à l'échantillon "analogique" prélevé (pixel), cela suivant une échelle déterminée. Les valeurs attribuées sont entières, elles correspondent aux valeurs arrondies des intensités lumineuses capturées. Ainsi, la précision du signal converti dépend de la résolution du système de conversion (CAN).
3. *Discrétisation temporelle* : Elle est caractérisée en grande partie par le temps d'intégration du capteur CCD. Si ce temps est long, l'image est plus lumineuse, mais il se produit un effet de saccade dès le moindre mouvement. Inversement, un temps d'obturation court permet la capture des mouvements rapides. Cependant, le temps d'exposition des capteurs étant moins important, l'image résultante est moins lumineuse. La discrétisation temporelle est donc à l'origine de la perte d'information temporelle et du crénelage (*aliasing*) temporel.

Afin de tenir compte des effets de discrétisation (principalement spatial et temporel) tout en minimisant leurs effets sur la partie algorithmique, un certain nombre de précautions et de contraintes ont été appliquées au système de micromanipulation. La première précaution consistait à choisir un bon coefficient de grossissement afin de réduire l'effet de l'*aliasing* spatial devant la taille des objets observés. Par ailleurs, la dynamique relativement lente du geste de l'opérateur durant les différentes phases de la micromanipulation permet de réduire les effets de la discrétisation temporelle.

2.5.3 Erreur de mesure

L'erreur de mesure regroupe deux catégories d'erreurs : les erreurs de localisation des micro-composants (microbilles, particules de poussière) ainsi que les erreurs sur les paramètres du microscope retournées par la procédure de calibrage [THACKER ET AL., 2005] [DESVIGNES, 2002].

2.5.3.1 Erreurs de localisation

La localisation des microbilles comporte principalement deux niveaux de mesure, pixelique et subpixelique. La localisation pixelique étant accomplie par la méthode de la corrélation, celle-ci introduit une erreur maximale estimée à ± 0.5 pixel [PAL ET BISWAS, 2000]. Cette erreur est due essentiellement à la discrétisation spatiale de l'image et la quantification des niveaux de gris.

Par ailleurs, des études ont permis de caractériser le niveau de précision de l'interpolation parabolique pour la localisation subpixelique [GLEASON ET AL., 1991]. Ces études comprenaient une série de tests sur des images à haute et à basse résolution et de nature différentes. Les résultats de ces études démontrent qu'il est possible d'atteindre facilement une précision du 1/16 de pixel. Dans le cas de l'algorithme de localisation proposé, nous avons fixé le niveau de localisation subpixelique au 1/10 de pixel. Nous avons jugé que ce niveau de précision était suffisant pour l'application envisagée.

En combinant l'erreur de localisation pixelique et subpixelique, il nous est possible de donner une estimation de l'erreur maximale pouvant être commise sur le plan image de la position des microbilles. Celle-ci est estimée à 0.05 pixel (0.5×0.1). Le grossissement optique total utilisé étant de $\times 4$, l'équivalent du pixel en unité métrique est de $1.6\mu m$ (retourné par la procédure de calibrage). Ainsi, l'erreur maximale sur la position des microbilles dans le repère monde est de $160.0\eta m$ ($0.1\text{pixel} \times 1.6\mu m$).

Concernant la localisation de la pointe AFM, nous avons choisi d'utiliser les positions retournées par les capteurs de position des micromanipulateurs (capteur optique pour les tables de micropositionnement électromagnétique et capteur piézorésistif pour le nanositionneur piézo-électrique). Ainsi l'erreur de localisation de la pointe AFM est liée essentiellement à la répétabilité des micromanipulateurs. Celle-ci est égale à $100\eta m$ pour la table *XYZ* électromagnétique et de $5\eta m$ pour le nanositionneur piézoélectrique ; l'erreur maximale sur la position de la pointe AFM est donc de $100\eta m$.

2.5.3.2 Erreurs sur les paramètres du microscope

Ce type d'erreur se répercute directement sur le recalage entre la scène virtuelle et la scène réelle ainsi que sur la correspondance des données retournées par le microscope frontal et latéral. L'étude expérimentale menée sur la procédure de calibrage proposée nous a permis de caractériser la précision des résultats retournés. Pour le grossissement optique utilisé ($\times 4$), l'erreur moyenne de reprojection (dans le repère monde) est de $0.0734\mu m$ avec un écart type de $0.0808\mu m$ et une erreur maximale de $0.123\mu m$.

2.5.4 Représentation 3-D

2.5.4.1 Représentation 3-D des microbilles

Les microbilles utilisées dans notre dispositif de micromanipulation sont réalisées en polystyrène. Leurs diamètres sont certifiés avec une erreur inférieure à $0.100\mu m$. Lorsque nous observons ces microbilles avec le microscope optique - en utilisant le même grossissement que lors des tâches

de micromanipulation : $\times 4$ - leurs formes paraissent uniformes et régulières. Cependant, l'utilisation d'un microscope électronique à balayage nous révèle des imperfections au niveau de la texture de la surface externe (voir figure 2.27). Néanmoins, ces imperfections restent négligeables devant les contraintes de précision requises pour la reconstruction de la scène.

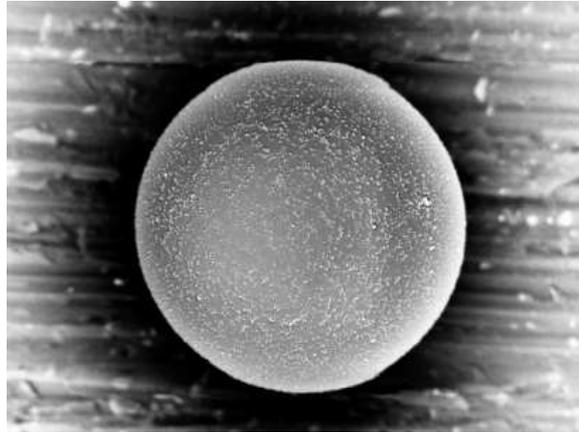


FIG. 2.27 – Microbille vue sous microscope électronique à balayage (SEM).

Pour la représentation géométrique des microbilles, nous avons utilisé une représentation à base de surfaces triangulaires. Ce choix nous a été imposé par les solutions technologiques adoptées pour l'élaboration du moteur de rendu visuel (OpenInventor) et du moteur de détection de collision (OPCODE) [TERDIMAN, 2002]. Néanmoins, le niveau variable de discrétisation des sphères permet d'avoir des formes suffisamment lisses, et donc proches de la forme réelle des microbilles.

2.5.4.2 Représentation 3-D de la pointe AFM

La pointe AFM étant l'effecteur terminal du micromanipulateur, nous avons accordé un soin particulier à la réalisation de son modèle géométrique. Nous nous sommes basés sur différentes images obtenues avec un microscope électronique à balayage (vue de face, de profil et de perspective). Puis, à l'aide d'un logiciel de CAO (3D Studio Max), nous avons ensuite sculpté la forme de la pointe AFM à l'aide de la technique des LPM (Low Polygonal Modelling) [ROGER, 2004]. Cette méthode de modélisation nous permet ainsi de tenir compte des malformations structurales liées à chaque pointe AFM. Le levier de la pointe AFM étant une partie flexible, nous avons opté pour la représentation de cette partie de l'effecteur pour un système déformable mécanique de type masse-ressort-viscosité. Les détails de la mise en œuvre de cette partie sont similaires à ceux présentés dans le Chapitre IV à la section 5.6.2.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé les différentes étapes nécessaires à la reconstruction géométrique du micro-environnement. Nous avons commencé par présenter un algorithme temps-réel pour la localisation et le suivi des microbilles et des particules de poussière. L'algorithme proposé permet une localisation subpixellique tout en étant robuste à l'occultation partielle des objets à détecter. Nous avons proposé par ailleurs une nouvelle procédure de calibrage spécifique

aux microscopes. Celle-ci prend en considération la contrainte principale de la microscopie optique à savoir la faible profondeur de champ des objectifs. Nous avons enregistré ainsi un gain important sur les erreurs de calcul des paramètres intrinsèques et extrinsèques du microscope par rapport à la méthode existante. La méthode proposée est par ailleurs plus simple à mettre en œuvre.

Le troisième volet du chapitre est consacré à la reconstruction géométrique du micro-environnement. Nous avons présenté tout d'abord les différentes transformations nécessaires pour le passage entre les images des microscopes et la scène virtuelle. Nous avons détaillé ensuite les présentations adoptées pour chaque constituant de la scène. Nous terminons cette partie par les procédures de recalage utilisées pour la mise en correspondance entre l'environnement réel et sa représentation virtuelle. Nous avons conclu ce chapitre par une étude portant sur les erreurs liées à la chaîne de traitement.

Chapitre 3

Immersion, Interaction et Métaphores d'Assistance

3.1 Introduction

Contrairement au cas du macromonde, l'opérateur n'a pas directement accès par ses sens à ce qui se passe dans le micromonde. Il est donc indispensable, pour la réussite des tâches microrobotiques qu'il pilote, de lui fournir dans les meilleures conditions ergonomiques et de précision possibles une information visuelle tridimensionnelle ainsi qu'une information des efforts de contact entre le micromanipulateur et les objets manipulés. L'utilisation de systèmes capables de transmettre les microforces d'interaction agissant au niveau du micromonde, ainsi que des images issues de microscopes à haute résolution (optique, à force atomique, électronique à balayage) de la scène manipulée, atténue considérablement les problèmes liés aux effets d'échelle. Cependant, l'expérience montre que ceux-ci ne sont pas suffisants. La réalité virtuelle peut donc apporter une aide précieuse à la télé-micromanipulation, principalement en proposant à l'opérateur une représentation intermédiaire du micro-environnement intégrant différents retours informatifs (haptiques, visuels, sonores). Il est également nécessaire d'intégrer à cette représentation un ensemble d'aides ayant pour rôle d'assister l'opérateur dans ses tâches de manipulation, tout en lui fournissant une aide contextuelle et parfaitement bien adaptée aux contraintes du micromonde. Pour cela, l'utilisation d'une IHM ergonomique et intuitive capable de projeter sur les modes perceptifs de l'opérateur les différents retours informatifs ainsi que l'assistance nécessaire au bon déroulement des opérations doit être recherchée.

L'objectif de ce chapitre est donc d'étudier les différents moyens d'immersion et d'interaction ainsi que différentes métaphores d'assistance capables de rehausser la perception visuelle, haptique et sonore du téléopérateur. Nous aborderons dans un premier temps les techniques de virtualisation du micromonde réel pour le rehaussement de la perception visuelle de l'opérateur. Nous expliquerons ensuite les outils et les métaphores d'assistance haptiques proposés à l'opérateur afin de l'aider dans l'exécution des tâches de micromanipulation. Finalement, l'association de signaux sonores à la visualisation, à l'interaction et aux guides virtuels d'assistance en effort est abordée en vue de concevoir une interface sensori-motrice intuitive alliant la vision, l'haptique et le son.

3.2 Mode visuel

L'environnement de travail doit être complètement perçu par l'opérateur de manière directe et naturelle. En pratique, la perception visuelle de l'opérateur est restreinte par le caractère bidimensionnel des images provenant d'un microscope optique, ou encore, d'un microscope électronique à balayage (SEM). Une des premières contraintes liées à la micromanipulation sous microscope optique est sans doute la faible profondeur de champ des objectifs. En effet, la faible profondeur de champ rend inexploitable toute information ou action ne se trouvant pas dans un voisinage très proche du plan de mise au point. A cette contrainte vient s'ajouter le fait que les images 2-D retournées par le microscope sont données suivant une configuration fixe, généralement verticale ou latérale, par rapport au plan de la scène. Malgré le fait que ce type d'image donne une bonne vue d'ensemble de la scène, elles sont toutefois démunies de toute information de profondeur et ne permettent pas à l'opérateur d'explorer intuitivement le micro-environnement.

L'utilisation d'une caméra virtuelle a pour but de pallier ces différences. En effet, une fois l'étape de reconstruction géométrique terminée, l'opérateur dispose d'un équivalent virtuel du micro-environnement. Il lui est ainsi possible - via une caméra virtuelle - d'obtenir des images de différents points de vue de la scène. Les points de vue peuvent être fixes, attachés à un moyen de navigation, ou encore à toute autre partie de la scène permettant ainsi une navigation intuitive et une meilleure compréhension des tâches à réaliser.

L'autre intérêt de cette représentation virtuelle est la possibilité d'apporter certaines modifications par rapport à la scène réelle. Ces modifications visent à rendre l'équivalent virtuel plus fonctionnel afin d'améliorer la dextérité du geste de l'opérateur. Les modifications apportées peuvent aller de l'application de simples textures sur la surface des microbilles, jusqu'à la modification de la représentation géométrique de certains objets, comme par exemple la simplification de la représentation géométrique des particules de poussières contenues dans le micromonde.

Dans les prochains paragraphes nous allons détailler l'ensemble des aides apportées à l'opérateur sur le plan visuel.

3.2.1 Perception de la profondeur

Dans le cas de la télé-micromanipulation, la perception de la profondeur est limitée par deux catégories de contraintes. Tout d'abord, les contraintes générales liées à la téléopération. Elles sont dues à l'utilisation d'écrans vidéos pour le guidage de l'organe terminal. Ce mode de visualisation s'accompagne généralement d'une détérioration des performances par rapport à une situation de contrôle direct du mouvement. Cette détérioration se traduit par une difficulté à évaluer les positions relatives des éléments structurant la scène visuelle, ceci affectant en particulier l'évaluation des distances relatives. Pour Massimo et Sheridan [MASSIMO ET SHERIDAN, 1989], cette baisse de performance résulterait en partie de la constriction du champ visuel, du fait d'une réduction des indices permettant, en situation naturelle, la perception de la structure de l'espace d'action. Cette réduction concerne, au niveau rétinien, les indices monoculaires structuraux ou dynamiques de profondeur spatiale (interposition, taille, luminance et densité relative, disparité monoculaire). En outre, la scène visuelle est projetée sur un plan bidimensionnel rendant inopérants certains indices binoculaires (disparité et parallaxe binoculaire) qui contribuent habituellement à la perception de l'éloignement des objets [CUTTING ET VISHTON, 1995] [REINHARDT-RUTLAND, 1996].

La deuxième catégorie de contraintes concerne les limitations dues à l'observation sous microscope optique, car la faible profondeur de champ induit un espace d'observation de très faible épaisseur [ZHOU ET NELSON, 1999] [McCULLAGH ET SHEVLIN, 2004]. L'une des solutions les

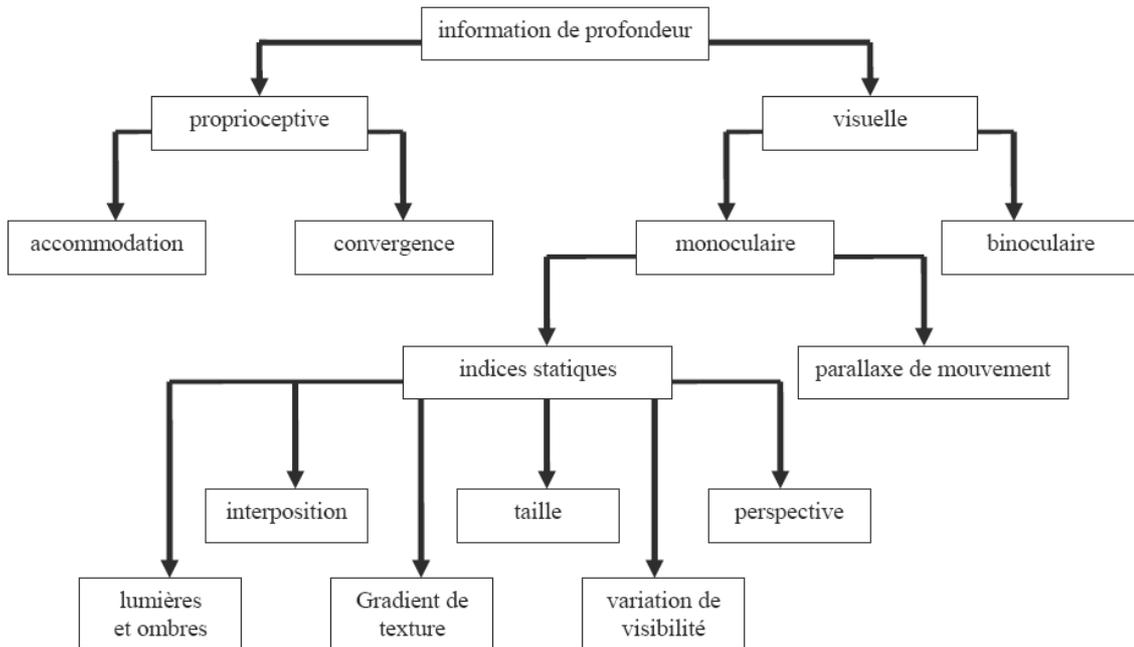


FIG. 3.1 – Les indices permettant la perception de profondeur de l’espace tridimensionnelle [FUCHS ET MOREAU, 2003].

plus abouties pour remédier à ce problème est sans doute le balayage en profondeur du champ visuel (de l’anglais, *multi-focusing*) [OHBA ET AL., 2002]. Cette solution comporte toutefois plusieurs inconvénients, dont un des plus importants est le temps de calcul dépendant directement du niveau de discrétisation horizontale (résolution de l’image en nombre de pixels) et verticale (nombre de plans nécessaires). L’observation suivant une configuration verticale, ou horizontale, par rapport au plan de la scène constitue une autre limitation de ce mode d’observation. Malgré le fait que ces configurations permettent d’obtenir un large champ de vision, elles contribuent aussi à réduire considérablement les indices de profondeur. Pour palier ce problème, certains dispositifs intègrent plusieurs images provenant d’objectifs de microscope situés à différents points de vue [KIM ET AL., 2001]. Cette solution a certaines limitations pratiques car l’opérateur doit suivre le déroulement des opérations sur plusieurs écrans simultanément.

Afin d’aider l’opérateur à améliorer sa perception de la profondeur de la scène, nous avons proposé, sur la base d’une reconstruction 3-D du micro-environnement, l’intégration d’un certain nombre d’indices de profondeur. Ces aides peuvent être considérées en tant que métaphores permettant de rapprocher l’environnement virtuel du contexte naturel de l’opérateur, l’information de profondeur est ensuite déduite par traitement cognitif.

Il est possible de classer les indices de profondeur en deux grandes catégories : 1) les indices proprioceptifs ; et 2) les indices visuels [FUCHS ET MOREAU, 2003] (voir figure 3.1).

3.2.1.1 Les indices proprioceptifs

Il s’agit d’indices oculomoteurs basés sur les informations de profondeur retournées par les yeux (muscles orbitaux et ciliaires) sans prendre en compte les images projetées sur la rétine. On distingue deux indices oculomoteurs : l’accommodation et la convergence. Ces deux indices sont

fortement couplés [SEKULER ET BLAKE, 1990] et sont fiables à faible distance [ROCK, 2001]. Cette classe d'indices reste toutefois inexploitable dans le cas de l'utilisation d'écrans vidéos.

3.2.1.2 Les indices visuels

Cette catégorie regroupe deux classes d'indices complémentaires : les indices binoculaires et les indices monoculaires.

Les premiers permettent une évaluation métrique de la distance entre les objets, ce sont des indices quantitatifs. Ils sont obtenus à partir de la disparité entre les deux images droite et gauche formées sur chaque rétine. Cette disparité résulte du décalage horizontal des deux yeux. L'inconvénient de ce type d'indice est qu'il apporte des contraintes et une fatigue oculaire [MAMAN ET AL., 1998].

Les indices monoculaires permettent de positionner les objets d'une même scène, les uns par rapport aux autres ; ce sont des indices qualitatifs. Ils se regroupent en deux sous-classes : les indices monoculaires statiques (perspective, interposition, gradient de texture, dimensions relatives, ombrage et ombres portées, variation de visibilité) accessibles sur une image fixe et les indices monoculaires dynamiques (parallaxe due au mouvement) accessibles sur une séquence temporelle d'images.

Dans leurs recherches, Ware et ses collaborateurs rapportent les résultats d'une étude empirique sur l'efficacité relative des différents indices visuels dans la perception de l'espace en trois dimensions [WARE ET AL., 1993]. Leur système expérimental met en oeuvre trois types d'indices : les indices monoculaires statiques (IMS), les indices monoculaires dynamiques (IMD) et les indices binoculaires (IB). Quatre conditions expérimentales sont considérées :

- présence des indices monoculaires statiques uniquement ;
- présence des indices monoculaires statiques + indices binoculaires ;
- présence des indices monoculaires statiques + indices monoculaires dynamiques ;
- présence des indices monoculaires statiques + indices monoculaires + indices binoculaires dynamiques.

Deux expériences complémentaires ont été effectuées. L'une, dite "subjective", consiste en une série de comparaisons des conditions expérimentales deux-à-deux : pour chaque combinaison, les sujets doivent identifier laquelle des deux conditions est la plus convaincante pour la perception d'une scène en trois dimensions. Les résultats obtenus ne sont pas différents de manière significative. Tous révèlent une forte préférence pour la condition 3. En particulier, la parallaxe (indice monoculaire dynamique) seule est jugée plus convaincante en comparaison de la stéréoscopie (indices binoculaires) seule pour environ 90% des sujets.

Une deuxième expérience, dite "objective", mesure les performances utilisateur pour une tâche de perception en trois dimensions. Les différences de taux d'erreur sont toutes significatives, elles sont rapportées dans le tableau 3.1.

Cette expérience met en évidence l'efficacité de la parallaxe par mouvement au regard de la réduction des taux d'erreurs et sa supériorité sur la stéréoscopie pour la perception de l'espace en trois dimensions. Cependant, le couplage parallaxe-stéréoscopie permet d'améliorer les performances par un facteur 16 sur les indices statiques seuls. Si l'on note la nette préférence subjective pour la parallaxe mais aussi de la fatigue oculaire occasionnée par la stéréoscopie, il convient de retenir qu'un bon rendu de la perception en 3D doit passer par le couplage des indices monoculaires statiques et dynamiques.

Nous allons développer dans les prochaines sections les différents indices monoscopiques (sta-

TAB. 3.1 – Mesures des performances des utilisateurs en fonction des différents indices visuels [WARE ET AL., 1993].

| IMS | IMD | IB | Taux d'erreur |
|-----|-----|----|---------------|
| X | - | - | 21.8 % |
| X | - | X | 14.7 % |
| X | X | - | 3.7 % |
| X | X | X | 1.3 % |

tique et dynamique) mis en oeuvre [AMMI ET FERREIRA, 2004c] :

- A. *Ombre et ombres portées* : L'ombre portée est un indice essentiel, voire indispensable pour la perception de profondeur. L'ombre des objets fournit des indicateurs sur les relations spatiales et sur la profondeur [RAMACHANDRAN, 1988]. Elles permettent à l'opérateur d'inférer à la fois la position et la localisation d'un objet (microbilles, pointe AFM, ...). L'écart sur la surface de la scène entre un objet et son ombre indique sa hauteur, la localisation de l'ombre sur la surface indique la distance de l'objet [GRAHAM, 1965], [RAMACHANDRAN, 1988]. En complément du gradient de texture, l'ombrage (ombre qu'un objet produit sur lui-même) permet d'avoir une meilleure perception de la forme des objets (voir figure 3.2(d)).
- B. *Gradient de texture* : Afin de compléter l'information de localisation, et mieux rendre l'information de profondeur de la scène, différents types de texture (cadrié, motif naturel, ...) ont été appliqués au substrat et aux microbilles (voir figure 3.2(c)). Le gradient de texture qui en résulte est un indice monoculaire de perception de la profondeur prépondérant, il tient compte des variations de densité, de taille et de forme, de la projection sur la rétine des motifs picturaux qui recouvrent les objets. Il permet ainsi d'obtenir facilement une estimation des distances relatives ou absolues [HOCHBERG, 1978]. Cet indice est par ailleurs fiable quelle que soit la distance à laquelle se situent les objets.
- C. *Perspective* : Dans le but d'obtenir des images proches de la vision naturelle de l'opérateur, nous avons utilisé la perspective conique (photographique ou encore euclidienne) pour la projection du modèle géométrique de la scène [RÉMOND, 2004] (voir figure 3.2(b)). Ce mode de projection est la règle de base pour percevoir le relief sur un écran monoscopique [FUCHS ET MOREAU, 2003].
- D. *Dimensions relatives* : On parle de taille relative quand on ne connaît pas, a priori, la taille exacte de deux objets, mais que l'on sait par avance qu'ils sont identiques. Celui qui projette la plus petite image sur la rétine est alors interprété comme étant le plus lointain [HERSHENSON, 1999]. Si la taille d'un objet familier est bien connue, on utilise alors cette référence pour évaluer la distance de l'objet, sachant bien entendu que sa taille apparente diminue avec la distance (voir figure 3.2(f)).
- E. *Interposition* : Cet indice survient à chaque fois qu'il y a occultation - partielle ou totale - d'un objet par rapport à un autre. L'opérateur déduit alors que l'objet caché se trouve plus ou moins loin [HERSHENSON, 1999] (voir figure 3.2(e)).
- F. *Parallaxe due aux mouvements* : De manière formelle, la parallaxe est l'angle formé par deux droites menées de l'objet observé à deux points d'observation. En pratique [FRANÇOIS, 1999], la parallaxe dénote le déplacement de la position apparente d'un objet dû à un changement de position de l'observateur [CLARK ET AL., 1996] (voir figures 3.2(e) et 3.2(f)). Plus l'objet

est distant, plus le mouvement de parallaxe est faible, et inversement. Dans notre dispositif d'affichage, cet indice est mis en oeuvre à l'aide d'un ensemble de moyens de navigation (traqueur 3D, souris 3D, etc.). Ces procédés seront détaillés dans les prochaines sections.

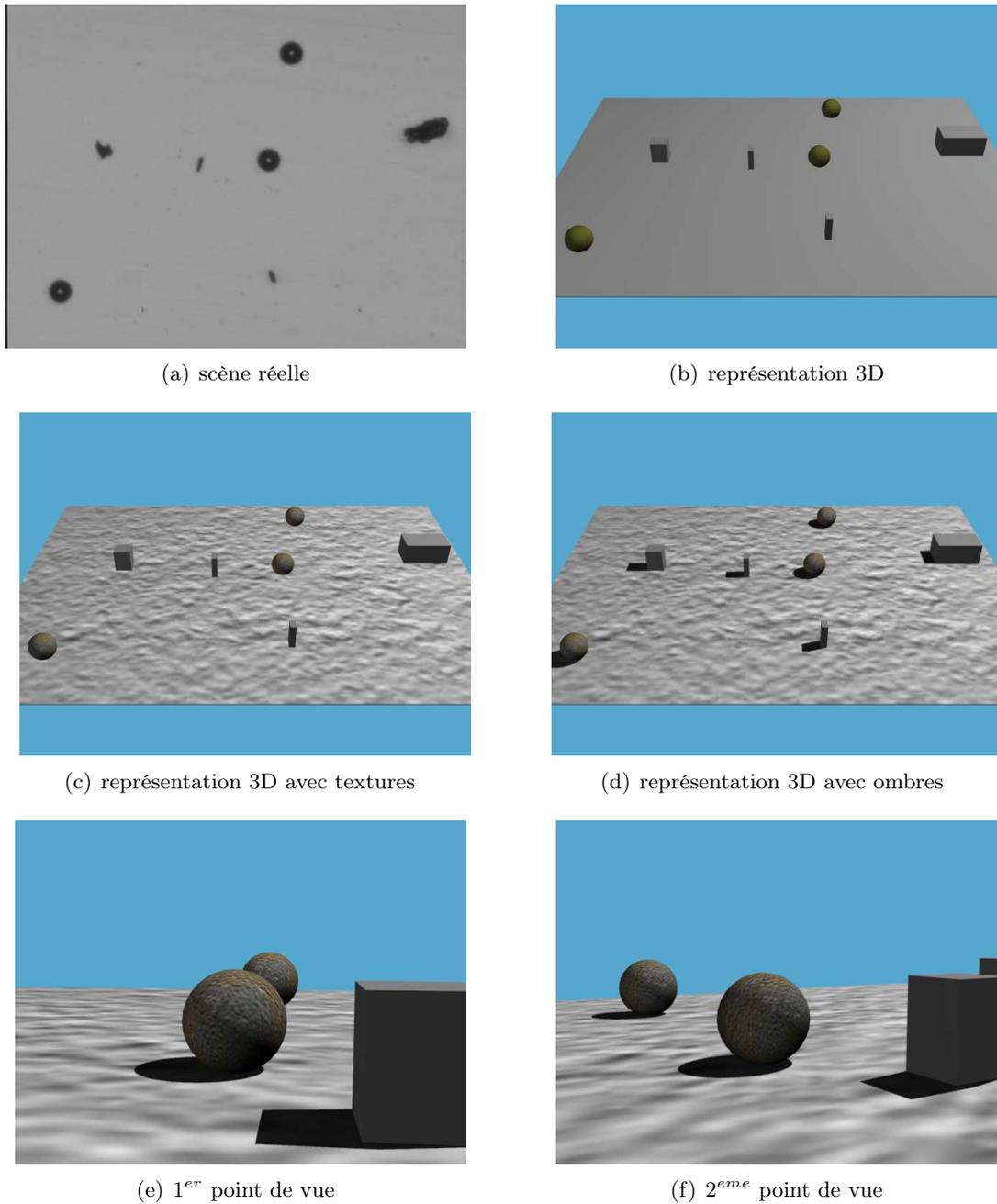


FIG. 3.2 – Les indices monoculaires utilisés dans la représentation virtuelle du micro-environnement pour la perception de la profondeur.

3.2.2 Navigation

L'autre avantage de l'utilisation d'une représentation graphique intermédiaire dans un système de télé-micromanipulation est sans-doute la possibilité de naviguer librement dans le site de manipulation, le micromonde en l'occurrence. L'opérateur peut ainsi explorer librement, sans contraintes matérielles, le micro-environnement et ajuster facilement son point de vue pour d'éventuelles interventions. Dans le cadre de l'interface homme-machine développée, nous proposons à l'opérateur un ensemble d'outils de navigation inspirés en grande partie des techniques utilisées en réalité virtuelle. Avant de présenter ces méthodes, nous allons commencer par introduire les différentes composantes et fonctions de la navigation.

Pour toute personne naviguant dans un environnement réel ou virtuel, la navigation peut se définir par les composantes motrice (le contrôle du point de vue) et cognitive (la recherche de chemin) [TYNDIUK ET THOMAS, 2001].

3.2.2.1 La composante motrice

Cette composante définit le mouvement d'un utilisateur entre son point de départ et sa cible. Elle décrit sa position, sa vitesse et son orientation. En réalité virtuelle, l'utilisateur dispose de trois techniques différentes pour atteindre sa cible [BOWMAN ET AL., 1999] :

- a. spécification directe de la cible ;
- b. spécification d'une trajectoire discrète ;
- c. spécification de la totalité du chemin.

Pour ces trois techniques, la représentation mentale de l'environnement est meilleure lorsque l'utilisateur choisit ses parcours [HODGES ET AL., 1998]. Il faut noter également que ces méthodes maintiennent l'orientation spatiale de l'utilisateur.

Il est possible de résumer les objectifs de la composante motrice de navigation dans les trois points suivants [BOWMAN, 2002] :

- A. *Exploration* : [KRUIJFF ET AL., 2000] Cette tâche n'a pas d'objectif explicite, l'opérateur navigue dans l'environnement 3D dans le but de construire une carte mentale.
- B. *Recherche* : [DARKEN ET SIBERT, 1996b] Cette classe nécessite la spécification de la position de l'objectif. Dans certaines études, cette composante est subdivisée en deux catégories : la recherche naïve, dans laquelle la position de la cible n'est pas connue à l'avance, et la recherche préparée, ici la position de la cible est précisée, à un certain degré, avant le début des opérations.
- C. *Ajustement* : [BOWMAN, 2002] Cette tâche implique des mouvements relativement précis afin de bien ajuster le point de vue caméra, cette opération précède généralement l'exécution d'une tâche particulière.

3.2.2.2 La composante cognitive

Cette composante est un processus cognitif dynamique et coûteux, de définition d'un chemin à travers un environnement. Elle a pour rôle principal la construction d'une représentation mentale de la scène visitée, elle correspond par ailleurs au processus d'utilisation de cette carte

au cours des opérations [KRUIJFF ET AL., 2000]. Cette composante est très liée à la construction dynamique par l'opérateur d'une "carte cognitive" [TOLMAN, 1948]. Une carte cognitive nécessite des connaissances visuelles de l'environnement, des connaissances procédurales et des connaissances topologiques. L'acquisition de ces connaissances se fait par la multiplication des visites et par l'identification des caractéristiques physiques de l'environnement (limites, repères visuels) [DARKEN ET SIBERT, 1996a]. Quand un niveau de connaissance suffisant est atteint, les cartes cognitives acquièrent une flexibilité permettant de les utiliser indépendamment du point de vue [MALLOT ET AL., 1998].

Dans un environnement virtuel, la technique de déplacement choisie (composante motrice) va influencer la qualité de la représentation mentale construite lors de la navigation (composante cognitive). Pour éviter la désorientation de l'opérateur et diminuer ainsi la surcharge cognitive, il est primordial d'optimiser les techniques de déplacement. Cette optimisation passe par la définition d'interfaces et de métaphores de contrôle de point de vue aidant l'utilisateur dans ses déplacements.

3.2.2.3 Métaphores de contrôle de point de vue proposées

Nous allons présenter dans ce qui suit différentes métaphores de contrôle de point de vue intégrées à l'IHM. Il est à noter que par changement du point de vue on peut considérer des facteurs tels que la focale ou le niveau de zoom par exemple, et non pas uniquement la position et l'orientation, même si par la suite on s'intéressera principalement à ces deux derniers. La taxonomie des techniques de contrôle du point de vue ainsi que les référentiels spatiaux utilisés sont définis respectivement dans les Annexes (B) et (C).

- A. **Métaphore de la direction du regard** : Il s'agit d'une commande continue (succession de petits déplacements instantanés suffisamment rapprochés pour maintenir une illusion de continuité) et égocentrique qui peut être utilisée pour un déplacement immersif [KHEDDAR ET AL., 1995]. Elle consiste à coupler les mouvements (orientation, translation, vitesse et accélération) de la caméra virtuelle avec ceux de la tête de l'opérateur par l'intermédiaire d'un traqueur 3-D et d'une mise à l'échelle (opérateur/micro-environnement). C'est le mode de navigation qui se rapproche le plus de la navigation en environnement naturel. Ce mode de navigation est intuitif et permet une reconnaissance assez aisée de la scène et de ses composants. Cependant, il devient vite contraignant durant les phases délicates de manipulation (posture inconfortable).
- B. **Direction pointée** : Il s'agit là aussi d'une approche continue et égocentrique. La différence essentielle avec l'approche précédente est que la position et la vitesse de déplacement de la caméra sont liées cette fois-ci, directement ou indirectement, au mouvement de la main. Sur la base de cette approche, nous avons intégré à l'interface homme/machine les quatre métaphores suivantes :
- B.I. *Métaphore de la scène dans la main* : Cette métaphore consiste à modifier le point de vue sur la scène en manipulant la scène elle-même. Les transformations retournées par le traqueur 3D (fixé sur la main) sont appliquées directement à la racine de la scène.
 - B.II. *Métaphore de la caméra dans la main* : La métaphore caméra dans la main, ou encore globe oculaire dans la main, permet de déplacer directement la caméra, comme si celle-ci était tenue directement par la main du téléopérateur [BOECK ET CONINX, 2002],

[WARE ET OSBORNE, 1990]. Les transformations géométriques dues aux déplacements de la main sont repérées à l'aide d'un capteur de positionnement électromagnétique tridimensionnel (de type *Flick of Birds*), puis sont ensuite directement appliquées à la caméra virtuelle. Il est possible également de coupler cette métaphore avec la métaphore de la scène dans la main pour plus de flexibilité d'emploi lors de la navigation.

B.III. *Métaphore de la caméra liée à l'effecteur terminal* : Cette technique est très répandue dans le domaine de la robotique [TENDICK ET CAVUSOGLU, 1997]. Elle consiste à lier le mouvement de la caméra à celui de l'effecteur terminal [RASTOGI, 1996] (dans notre cas représenté par la pointe AFM), donc indirectement, au mouvement de la main. Cette fois-ci, les transformations géométriques sont obtenues par l'intermédiaire de l'interface haptique. L'orientation de la caméra peut être fixe (par exemple, dirigée vers le micro-effecteur) ou mobile. Cette métaphore permet à l'utilisateur d'avoir un point de vue directement sur l'espace de micromanipulation.

B.IV. *Métaphore du vol* : Le principe de cette métaphore, appelée aussi métaphore du contrôle de véhicule, est de "voler" dans la scène, comme on le ferait si on conduisait un véhicule [WARE ET FLEET, 1997]. On utilise dans ce mode de navigation une souris 3D (six degrés de liberté) à laquelle on applique des contraintes sur certains degrés de liberté afin de limiter les mouvements de rotation parasites.

C. **Sélection discrète** : C'est une approche discrète et exocentrique qui consiste à proposer à l'opérateur un ensemble de points de vue redéfinis ou non [STOAKLEY ET AL., 1995]. Actuellement, nous proposons à l'opérateur les points de vue statiques suivants : 1) une vue globale en perspective ; 2) une vue frontale en orthogonale ; 3) une vue latérale en orthogonale et 4) une vue du dessus en orthogonale.

3.2.3 Immersion du regard

Afin d'étudier les répercussions du degré de présence de l'opérateur dans le micro-environnement, sur ses performances de manipulation, nous proposons plusieurs niveaux d'immersion visuelle. L'objectif final est de caractériser ces niveaux d'immersion suivant les différentes tâches de micromanipulation à réaliser et d'entrevoir les limitations des interfaces comportementales utilisées.

En se basant sur le concept d'immersion du regard, on propose à l'opérateur les niveaux d'immersion suivants :

A. **Mode non-immersif** : Comme son nom l'indique, c'est le niveau d'immersion le plus bas au niveau sensori-moteur. Il repose sur l'utilisation d'écrans d'ordinateurs multiples offrant à l'opérateur des vues différentes de l'espace de travail. Un des grands avantages vient de la bonne qualité du rendu des images en termes de résolution et de contraste (voir figure 3.3(a)). Par ailleurs, le mode non-immersif ne demande aucun dispositif supplémentaire et très peu de contraintes [COSTELLO, 1997]. L'inconvénient principal de ce mode d'immersion est sans doute le faible champ de vision, celui-ci limite considérablement la sensation de présence de l'opérateur.

B. **Mode semi-immersif** : C'est le niveau d'immersion intermédiaire, il consiste à augmenter le champ de vision de l'opérateur à l'aide d'écrans de grande taille (voir figure 3.3(b)). Il a été mis en œuvre à l'aide d'un écran de projection. Ce mode d'immersion bénéficie d'une utilisation

non contraignante et d'une certaine liberté de mouvement pour la navigation (rotation $\pm 45^\circ$, translation \pm la demi-largeur de l'écran) [FUCHS ET MOREAU, 2003]. Par ailleurs, la qualité d'image reste sensiblement identique.

- C. **Mode immersif** : Par l'intermédiaire du visiocasque couplé à un capteur de positionnement 3D, le regard de l'opérateur est complètement immergé dans l'environnement virtuel (voir figure 3.3(c)). L'opérateur peut ainsi se déplacer et diriger son regard dans toutes les directions de la scène. La principale contrainte de ce mode d'affichage est la faible résolution de l'image et la latence du traqueur électromagnétique [KALAWSKY, 1996]. L'opérateur doit en outre porter le visiocasque, ce qui constitue une gêne importante après de longues séances de manipulation (câbles, poids).

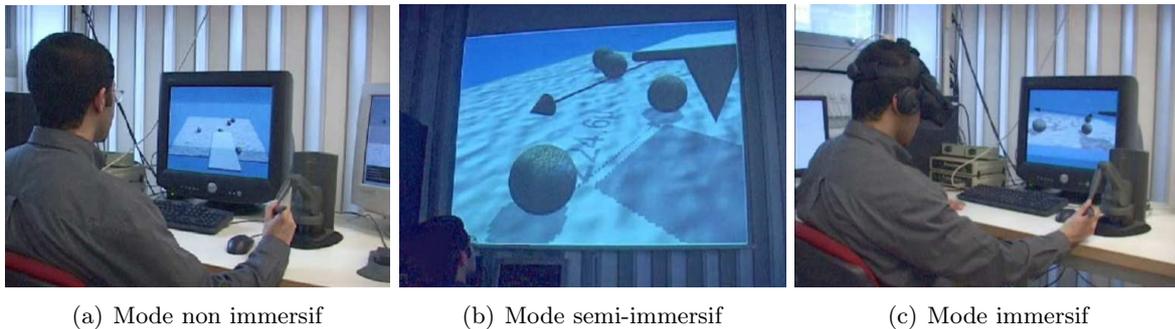


FIG. 3.3 – Illustration des différents niveaux d'immersion du regard employés pour l'interface homme-machine en télé-micromanipulation.

3.2.4 Métaphores d'assistance visuelles

Les métaphores d'assistance visuelles sont des guides virtuels dédiés à l'assistance de l'opérateur (voir Annexe D). Ils se présentent sous forme d'un ensemble d'outils et de modifications graphiques apportées à la scène pour aider et assister l'opérateur dans l'exécution des tâches de micromanipulation. Nous allons détailler ci-dessous les métaphores proposées :

- A. **Affichage d'informations** : Il s'agit ici d'afficher visuellement des informations relatives aux constituants de la scène et des informations sur le déroulement des opérations. Actuellement, nous proposons d'afficher une nomenclature des micro-objets (microbilles et particules de poussière) avec leurs caractéristiques physiques et géométriques (type de matériaux, dimensions, label, etc.). L'affichage se présente sous forme d'une nomenclature textuelle associée à chaque composant de la scène. Ce type d'informations permet à l'opérateur de mieux apprécier le contenu de la scène (objets fragiles, rigides, transparents, flexible, etc) afin d'adapter ses gestes de manipulation au préalable. Nous proposons, par ailleurs, l'affichage des distances inter-objets pour renseigner le téléopérateur sur les distances, absolues ou relatives, de séparation entre le micromanipulateur, les microbilles ou encore, les particules de poussière. Ici, l'information est présentée sous forme d'un vecteur dynamique reliant les deux objets concernés avec une indication textuelle. L'information est remise à jour à chaque cycle de rafraîchissement de l'algorithme de reconstruction.
- B. **Affichage des guides virtuels** : Il s'agit de représenter graphiquement les différents guides virtuels proposés à l'opérateur (trajectoire optimale, champs de potentiel, contrainte, etc.). Cette partie sera plus détaillée dans la section 3.3.3.

- C. **Utilisation de la transparence** : Il s'agit ici d'exploiter l'un des avantages des représentations virtuelles. La représentation logique du micromanipulateur sous forme d'un modèle ombré opaque peut parfois être gênante. Nous donnons donc à l'opérateur la possibilité d'utiliser une représentation intégrant un certain niveau de transparence. A titre d'illustration, la transparence peut être utilisée durant la phase d'approche afin permettre à l'opérateur de mieux apprécier la distance entre la pointe AFM et la microbille.
- D. **Apparence des particules de poussière** : Les particules de poussières étant de forme aléatoire et parfois complexe, nous avons choisi de les représenter sous forme de boîtes englobantes. Cette représentation permet à la fois de simplifier la scène virtuelle, pour un meilleur confort visuel, et de diminuer la charge de calcul en réduisant le nombre de facettes des objets.

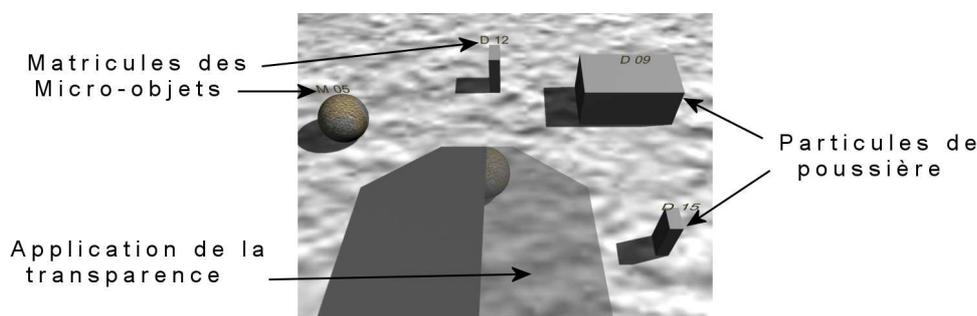


FIG. 3.4 – Les différentes métaphores visuelles intégrées à la scène.

3.3 Mode haptique et interaction

En général, si la vision permet d'interpréter une bonne partie des phénomènes en téléopération, et joue de ce fait un rôle essentiel dans le contrôle des actions physiques de l'opérateur, le sens haptique y tient probablement une place tout aussi importante. En complément des autres sens, la perception haptique par l'intermédiaire des fonctions épistémique⁷ et ergotique⁸ du geste de l'opérateur [CADOZ, 1994] est essentielle à la compréhension du micro-environnement durant la phase exploratoire, et par la suite, à la régulation du geste durant la phase de micro-manipulation.

Il est convenu que le sens haptique comprend deux modalités sensorielles aux frontières psychophysique et physiologique floues [KHEDDAR, 2004] :

- A. **La kinesthésie** : Celle-ci traduit la proprioception, c'est-à-dire la perception des mouvements propres de notre corps et la perception des efforts musculaires. Ce mode prend en charge les forces de contact, la dureté, le poids et l'inertie d'un objet. Il sollicite les muscles, tendons et articulations.
- B. **Le tactile** : Celui-ci fournit des informations cutanées concernant le contact de la peau avec l'environnement. Ce mode permet la perception de propriétés surfaciques des objets en contact, comme la rugosité, les glissements, la détection des arêtes, la température, etc. On s'intéresse ici moins à la force reçue qu'à sa répartition spatiale.

⁷La fonction épistémique consiste à utiliser la main en tant qu'organe de perception au travers du sens haptique.

⁸La fonction ergotique correspond à l'utilisation de la main en tant qu'organe d'action sur l'environnement.

Suivant ces deux modalités sensorielles, on peut distinguer deux types de perception haptique [HATWELL ET AL., 2000] :

- I. **La perception cutanée ou passive** : Elle résulte de la stimulation d'une partie de la peau alors que le segment corporel qui la porte est totalement immobile ;
- II. **La perception tactilo-kinesthésique ou active** : Elle résulte de la stimulation de la peau résultant des mouvements actifs d'exploration de la main entrant en contact avec les objets.

Sur la base de ces différentes modalités ainsi que sur la nature de l'information véhiculée par l'interface homme-machine, il est possible de regrouper les différentes utilisations du mode haptique proposées dans le cadre du système de télé-micromanipulation en deux grandes catégories :

- A. **Information physique** : Cette information repose sur l'utilisation du capteur mécanique fixé sur le micromanipulateur pour représenter l'effort d'interaction entre l'effecteur terminal et le micro-environnement. Cette information permet à l'opérateur par l'intermédiaire de la fonction ergotique et du retour kinesthésique correspondant de réaliser les tâches de micromanipulation avec plus de dextérité [SITTI ET HASHIMOTO, 2003].
- B. **Information synthétique** : Elle repose principalement sur l'utilisation de l'équivalent virtuel de la scène. Ce modèle peut servir de deux façons différentes :
 - B.I. *Mode épistémique* : L'opérateur utilise ici la fonction épistémique par l'intermédiaire du mode tactilo-kinesthésique pour compléter et affiner sa connaissance de la scène sur le plan haptique.
 - B.II. *Métaphores virtuelles* : L'équivalent virtuel sert dans ce cas à obtenir et à représenter des contraintes virtuelles haptiques (contraintes sur les trajectoires, champs de potentiel, etc.) pour aider l'opérateur dans la réalisation de certaines tâches de micromanipulation.

Dans la suite de ce chapitre, nous allons détailler les différentes utilisations du mode haptique proposé, ainsi que les techniques utilisées pour leur mise en œuvre.

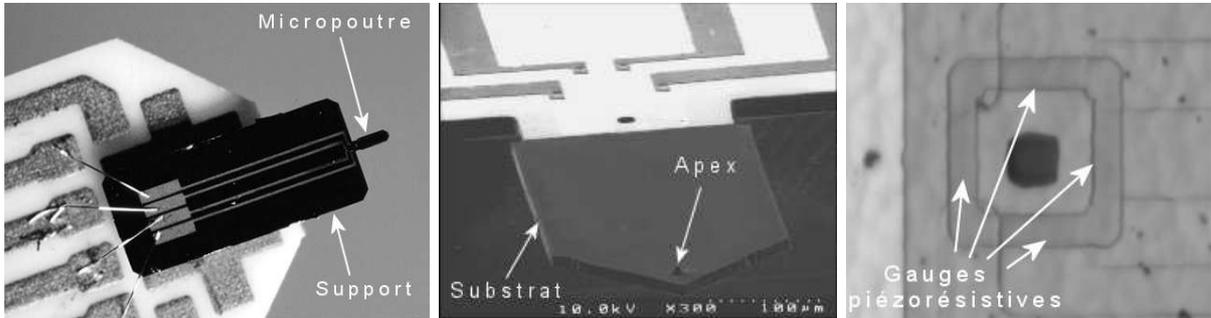
3.3.1 Retour d'effort basé sur le capteur physique

3.3.1.1 Le micro-effecteur terminal

L'effecteur de micromanipulation proposé à l'opérateur est un microlevier de microscope à force atomique (AFM). Cet outil est une micropoutre constituée d'une pointe rigide (apex) fixée sur un substrat en silicium [NASCATEC, 2005] (voir les figures 3.5(a) et 3.5(b)). L'effecteur constitué par le microlevier AFM est solidaire d'un bras mécanique couplé à un micromanipulateur hybride composé de trois degrés de liberté (X, Y, Z) pilotés par trois micropositionneurs électromagnétiques linéaires pour des mouvements d'approche grossiers (course utile de $25mm$ et résolution de l'ordre de $100nm$) et de trois nanopositionneurs piézoélectriques (que l'on appellera, *nanocube*) pour des mouvements d'approche très précis (course utile de $100\mu m$ et résolution $5nm$). Ce micromanipulateur possède une inertie très faible, une étendue de mesure importante ainsi qu'une résolution de position nanométrique.

Sur un tel système, les interactions de contact (appui du levier sur le substrat et forces de tension de surface) et celles de non contact (forces électrostatiques et de Van der Waals) sont

obtenues par la mesure de la déflexion du levier. La mesure de la déflexion est réalisée par un pont de jauges piézorésistives intégrées sur le microlevier. Le microlevier AFM est utilisé comme effecteur terminal pour réaliser la micromanipulation des micro-objets, soit par forces d'adhésion, soit par poussage du micro-objet.



(a) La pointe AFM sur son support (b) Position du capteur d'effort (c) Le capteur d'effort

FIG. 3.5 – Pointe AFM utilisée comme micro-effecteur.

Le microcapteur de force piézorésistif se présente sous forme de quatre jauges de contraintes montées en pont de Wheatstone (voir figure 3.5(c) et figure 3.6). La résistance des jauges est identique en l'absence de contrainte (1750Ω). Les jauges sont placées de façon symétrique sur le cantilever de telle façon que $J1$ et $J3$ subissent des allongements positifs tandis que $J2$ et $J4$ sont comprimées. Sous l'action d'une contrainte, R_i devient $R_i + dR_i$ avec $dR_i > 0$ ou < 0 . La tension de sortie est égale dans ce cas à :

$$V_{ac} = V_a - V_c = \frac{E}{4R} (dR1 - dR4 + dR3 - dR2) \quad (3.1)$$

En pratique, un conditionnement du signal de sortie V_{ac} est nécessaire car celui-ci n'est pas directement exploitable (rapport signal/bruit trop faible). Le signal est amplifié (sur la base d'un circuit AD625), numérisé, puis filtré (filtre numérique du premier ordre) avant d'être exploité par le système d'acquisition de données.

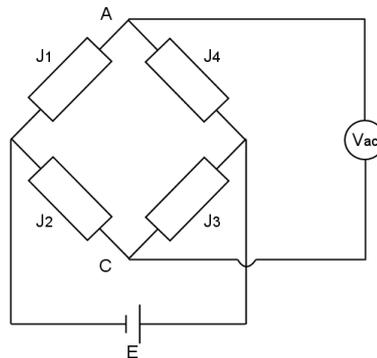


FIG. 3.6 – Configuration des jauges de contraintes sur le pont de Wheatstone.

Les microforces d'interaction peuvent être ainsi retransmises au macromonde en temps-réel pour être appliquées au système à retour d'effort.

3.3.1.2 Le couplage bilatéral

Les systèmes de téléopération aux échelles micro et nanoscopiques, quels que soient leurs niveaux hiérarchiques de commande, sont essentiellement basés sur des structures de type "Maître-Esclave" :

1. Le bras de téléopération, à l'échelle humaine, permet à l'opérateur de piloter les degrés de liberté du microrobot en position et/ou en effort, par commande en boucle fermée des mouvements des actionneurs.
2. En retour, des microcapteurs proprioceptifs et/ou extéroceptifs renvoient en temps réel des informations permettant un retour d'effort ou visuel à l'opérateur.

Il existe différentes architectures pour la commande bilatérale d'un dispositif maître-esclave à retour d'effort [ROVERS, 2002]. Celle qui a été retenue dans le cadre de notre système de télé-micromanipulation est une commande de type position-force⁹. Cette commande présente l'avantage d'exploiter la mesure d'effort retournée par le microcapteur de force. Elle est caractérisée par sa grande bande passante. La commande consiste d'une part, à asservir la position du micromanipulateur x_e sur l'erreur de position entre l'interface haptique et le micromanipulateur e et d'autre part, à retourner l'effort exercé sur l'effecteur terminal à l'interface haptique (voir figure 3.7).

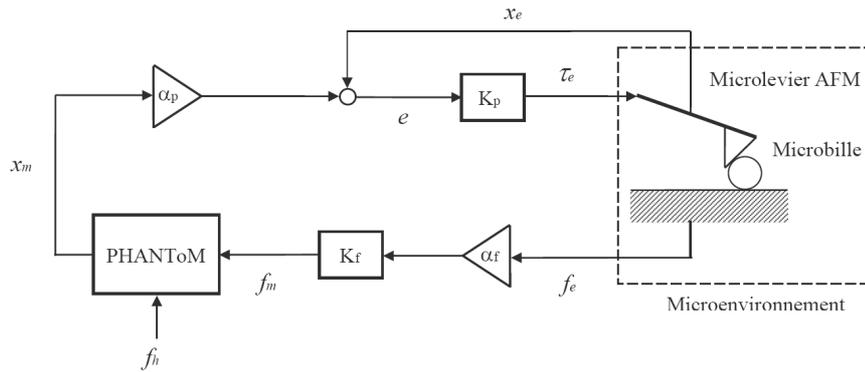


FIG. 3.7 – Architecture de la commande position-force.

La réponse "idéale" du contrôleur est donnée comme suit :

$$\begin{aligned} X_e &\rightarrow \alpha_p X_m \\ F_m &\rightarrow \alpha_f F_e \end{aligned} \quad (3.2)$$

où $\alpha_p > 0$ et $\alpha_f > 0$ sont respectivement les facteurs d'échelle pour la position et la force. Le contrôleur bilatéral position-force est choisit tel que :

$$\begin{aligned} f_m &= \alpha_f k_f f_e \\ \tau_e &= K_p (\alpha_p x_m - x_e) \end{aligned} \quad (3.3)$$

où K_p et K_f représentent respectivement le gain de compensation en position et de force.

⁹de l'anglais Kinesthetic Force Feedback (KFF)

3.3.2 Le mode épistémique

Cette fonction repose sur l'utilisation du modèle géométrique de la scène, l'opérateur interagit dans ce cas hors-ligne avec le micro-environnement par l'intermédiaire de la représentation virtuelle de la pointe AFM [TAYLOR ET AL., 1993] [ZHOU ET AL., 2000b]. Ici, c'est la détection de collision qui fait office de capteur de contact (capteur numérique). Nous avons utilisé pour cela la librairie OPCODE [TERDIMAN, 2002]. Cette librairie propose un algorithme de détection de collision objet-objet, et permet par ailleurs de prendre en compte le cas de plusieurs contacts à la fois. Le retour d'effort repose sur une méthode de rendu par pénalité. Cette méthode consiste à utiliser une liaison élastique entre les différents points de contact des objets (voir figure 3.8). Il faut noter que la faible fréquence de rafraîchissement du moteur 3D introduit des instabilités au niveau du rendu haptique. La résolution de ce problème est détaillée dans la section 3.3.4.

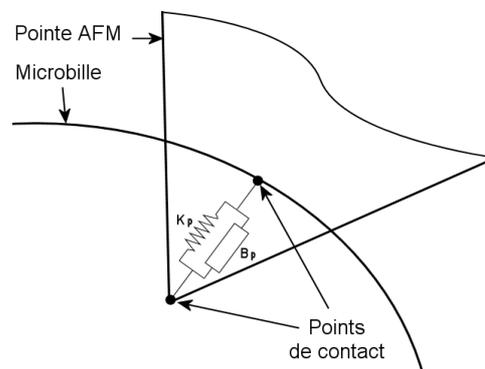


FIG. 3.8 – Utilisation de la méthode par pénalité pour le rendu d'effort.

La restitution de l'effort repose sur l'utilisation d'une interface haptique de type PHANTOM Desktop (de la compagnie Sensable). Cette interface permet à l'origine de ressentir des interactions de type point-objet ; il est néanmoins possible, sous certaines hypothèses, de restituer des interactions objet-objet [AMMI, 2002].

3.3.3 Métaphores d'assistance haptique : les guides virtuels

Les guides virtuels - et plus généralement les métaphores virtuelles d'assistance - sont un apport important de la réalité virtuelle dans le domaine de l'assistance à la téléopération. Ces guides se présentent sous forme d'appareils ou d'accessoires spécifiques aux tâches réalisées. Ils peuvent être de formes abstraites et façonnées afin de s'adapter à une tâche particulière ou à un besoin particulier de l'opérateur. Il est possible également de les utiliser seuls ou en diverses combinaisons. L'avantage premier de ces outils est sans doute l'allègement de la complexité de la tâche à réaliser, ceci, grâce à l'adjonction de fonctions telles que le guidage des opérations manuelles ou encore des contraintes sur le mouvement. L'effort mental requis durant le déroulement des opérations s'en trouve ainsi considérablement réduit, l'opérateur peut plus facilement se concentrer sur le geste ou la phase opératoire la plus délicate.

Les guides virtuels se présentent généralement dans un environnement virtuel sous forme d'additifs perceptibles, ils sont donc générés par ordinateur. Contrairement à un outil ou à un appareillage réel, ces guides n'interagissent pas directement avec l'environnement (le robot distant). La difficulté réside donc dans l'implantation d'outil ou d'appareillage virtuels offrant les mêmes possibilités (voir davantage) que ces outils ou appareillages réels en agissant uniquement

sur la perception et l'interface de l'opérateur. Ainsi, l'objectif voulu par l'utilisation des guides virtuels n'est pas d'éliminer les contraintes requises pour la réalisation d'une tâche donnée, mais plutôt de fournir une aide et une assistance afin de permettre à l'opérateur de satisfaire un certain nombre d'entre elles.

Nous allons dans la suite de ce chapitre détailler les différents guides virtuels proposés à l'opérateur. L'ensemble de ces guides sont dédiés à la commande du micromanipulateur et se présentent tous sous forme de mécanismes virtuels. La taxonomie utilisée pour la définition de ces guides est expliquée dans l'Annexe D.

3.3.3.1 Guide à base d'un planificateur de chemins

Afin de minimiser le nombre de manipulations durant le déplacement d'une microbille, il est nécessaire d'utiliser un guide virtuel qui génère la trajectoire optimale pour passer d'une configuration initiale à une configuration finale [AMMI ET FERREIRA, 2004b]. Ce guide intègre des fonctions qui lui permettent de prendre en compte les contraintes cinématiques du micromanipulateur, ainsi que les contraintes physiques du micro-environnement [ZHOU ET AL., 2000b]. Le guide virtuel proposé se présente sous forme d'un mécanisme virtuel composé (combinaison de plusieurs segments de trajectoires) et actif (il agit par un effet attractif sur la trajectoire). On considère, pour ce guide, que le seul objet mobile dans l'espace de manipulation est la microbille choisie par l'opérateur, les obstacles étant constitués par des particules de poussière ainsi que par les autres microbilles. On considèrera que les obstacles sont rigides et fixes au cours de la manipulation. La planification de chemin se résume à un problème purement géométrique où :

- A est la microbille à manipuler (objet rigide), elle peut se déplacer dans l'espace euclidien W ;
- B_1, \dots, B_n constituent les obstacles, ce sont des objets rigides et fixes dans W .

La planification de chemin consiste donc à générer une séquence continue, et optimisée géométriquement, des différentes positions permettant à A de passer d'une configuration initiale à une configuration finale, et cela en évitant toute collision avec les obstacles $B_i (i \in 1, \dots, n)$. Pour simplifier ce problème, on introduit le concept de l'espace des configurations.

A. Espace des configurations : Ce concept, bien qu'apparu en robotique en 1977 [UDUPA, 1977], n'a réellement été introduit que deux ans plus tard par Lozano-Perez et Wesley [WESLEY, 1979]. L'espace des configurations dans le cas de notre manipulation désigne l'espace propre de la microbille A , par opposition à l'espace euclidien W , dans lequel elle évolue ; la microbille A y est représentée par un point, et non par un objet comme dans l'espace euclidien. La planification dans un tel espace se ramène donc à la recherche d'une courbe continue de la configuration initiale jusqu'à la configuration finale.

Par définition, une configuration est, pour un objet quelconque, une spécification de la position de tous les points de cet objet par rapport à un système de référence. Elle est représentée par une liste de paramètres indépendants (position/orientation) liée à la nature de l'objet devant se déplacer. L'espace des configurations de A , noté (CS) , est l'ensemble des configurations que peut prendre le robot (voir figure 3.9(b)). Sa dimension m est donnée par le cardinal de cette liste de paramètres. Cet espace est constitué principalement de trois parties :

1. *Espace interdit* : Cet espace désigne l'ensemble des régions de W qui ne sont pas (ou ne doivent pas être) accessibles à A , il est noté $CS - obstacles$. Si on note $A(q)$ l'ensemble

des points occupés par la microbille dans la configuration q on a :

$$CS - obstacles_j = \{ q \in CS / A(q) \cap B_j \neq \emptyset \}$$

Cet espace est généralement déterminé par les contraintes cinématiques. Néanmoins, dans le cas de tâches de micromanipulation, il faut ajouter à cela des contraintes liées à la physique du micro-environnement (forces de Van der Waals, forces électrostatiques, forces de tension de surface). Afin de prendre en considération cette catégorie de contraintes, les obstacles sont élargis pour délimiter des zones de non-attraction (voir figure 3.9(b)) .

2. *Espace libre* : Le complémentaire des $CS - obstacles$ définit un sous-espace de CS où A se trouve libre de collision. Cet espace est appelé l'espace libre, que l'on note $CS - libre$.
3. *Espace de contact* : Cet espace regroupe l'ensemble des configurations où A est en contact (sans recouvrement) avec l'espace interdit ($CS - obstacles$). Il est noté $CS - contact$.

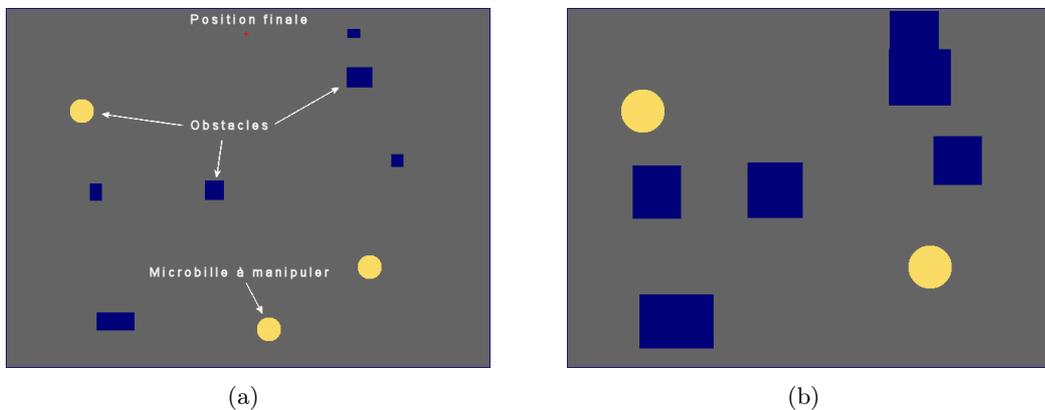


FIG. 3.9 – Scène originale et espace des configurations des obstacles correspondant.

Les positions et les formes des obstacles $B_i (i \in 1, \dots, n)$ ainsi que celle de la microbille à manipuler A sont supposées connues. La microbille A étant de forme symétrique, les seuls degrés de liberté pris en considération pour ses déplacements sont les translations suivant les axes X et Z (aucune contrainte n'est imposée sur le type de déplacement). L'espace de configuration est ainsi isomorphe à l'espace euclidien.

- B. Construction du graphe :** Une fois l'espace de configuration établi, une discrétisation de l'espace de recherche ($CS - libre$) est effectuée. L'approche retenue pour cette étape est de type "squelette"¹⁰. Cette méthode consiste à ramener la recherche du mouvement du micromanipulateur dans un espace de plus faible dimension que celui de l'espace admissible. Cela consiste à représenter la connectivité de l'espace libre de A par un réseau de courbes unidimensionnelles pouvant être représentées entièrement dans l'espace libre ou de contact de A . La planification de mouvement entre deux configurations données est alors résolue en trois étapes : a) détermination d'un chemin ramenant A de sa configuration initiale à un point situé sur l'une des courbes du réseau de connectivité ; b) détermination d'un chemin entre la configuration finale et le réseau ; c) enfin, extraction d'un chemin reliant les deux points connectés aux configurations initiale et finale.

Une première méthode basée sur ce concept a été proposée par Nilsson pour un espace de travail bidimensionnel encombré d'obstacles polygonaux [NILSSON, 1969]. Dans cette mé-

¹⁰en l'anglais *roadmap*

thode, le réseau est décrit par un graphe, dit *graphe de visibilité* (voir figure 3.10(a)), où les noeuds correspondent aux sommets des obstacles et les arêtes à des segments de droite reliant ces sommets dans l'espace libre. L'inconvénient de cette méthode est que les solutions obtenues peuvent conduire A à être en contact avec les obstacles, en certains de leurs points (les sommets), même en présence d'une solution entièrement contenue dans l'espace libre. Afin de remédier à ce problème, une seconde méthode, connue sous le nom de rétraction [O'DUNLAING ET YAP, 1982], consiste à utiliser un diagramme de *Voronoi* pour capturer la connectivité de l'espace libre et générer des solutions équidistantes des obstacles (voir figure 3.10(b)).

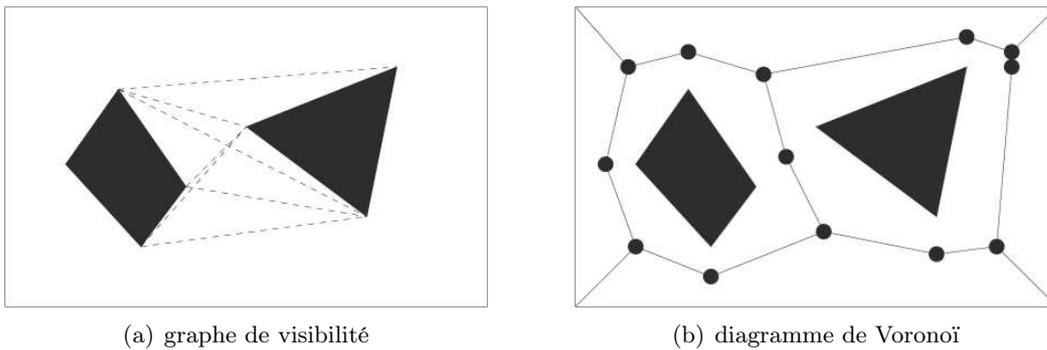


FIG. 3.10 – Exemples de décomposition d'un espace avec l'approche squelette.

Cette dernière stratégie est celle qui a été retenue pour la génération du graphe des chemins possibles. Cette solution présente l'avantage de générer les chemins les plus éloignés des obstacles (microbilles et particules de poussière), évitant ainsi les forces d'attraction et de répulsion du micro-environnement. Le déroulement des opérations pour le calcul du graphe de l'ensemble des chemins possibles peut se résumer dans les points suivants :

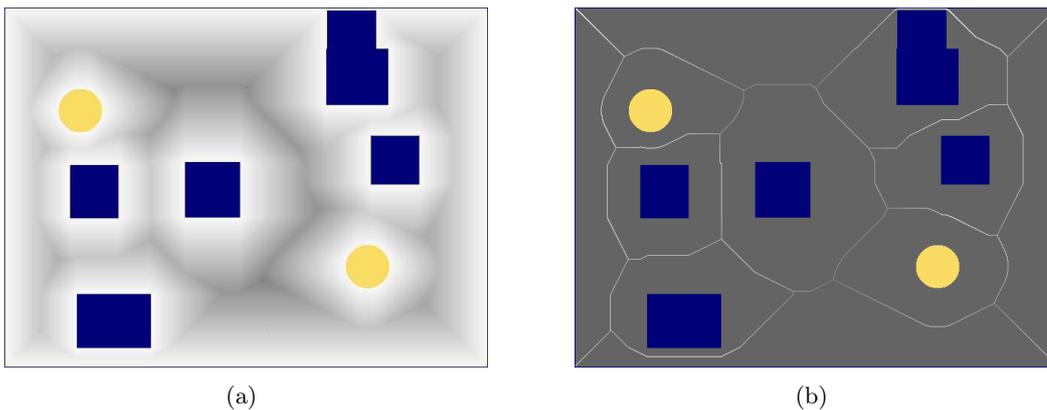


FIG. 3.11 – Calcul du diagramme de Voronoï par la méthode d'expansion d'ondes.

1. Discrétisation de l'espace des configurations par une grille régulière. Chaque cellule est marquée suivant son état : pleine ou vide. La résolution de la grille doit être élevée afin de saisir le plus grand nombre de détails. La résolution choisie est la même que pour l'image, soit 640×480 éléments.

2. Calcul du diagramme de Voronoï avec la méthode d'expansion d'ondes (voir figure 3.11(a)). Cette méthode consiste à construire, couche par couche, la carte des distances séparant les différents obstacles. Le résultat est un graphe de cellules élémentaires équidistant de deux obstacles à la fois (voir figure 3.11(b)).
3. Joindre la position actuelle et finale de A avec le réseau de courbes généré. Parmi les méthodes existantes, la solution retenue consiste à connecter ces configurations avec les points d'intersection entre le segment de droite qui les relie et le diagramme de Voronoï obtenu (voir figure 3.12).

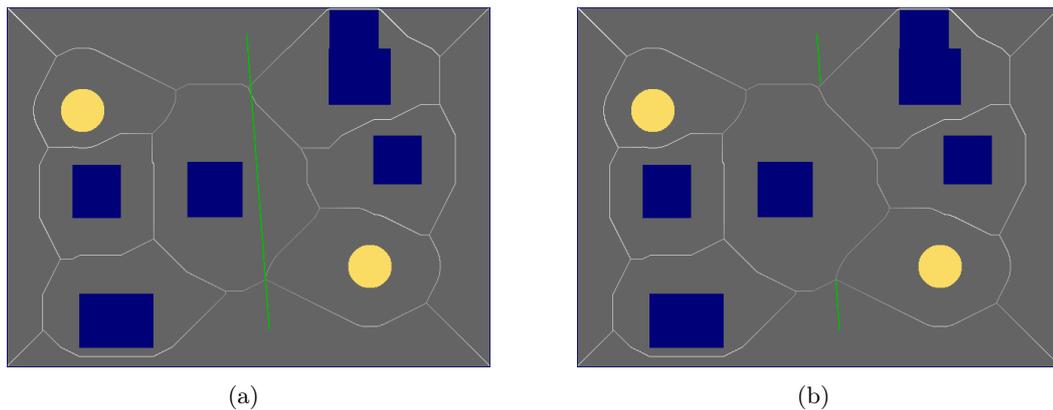


FIG. 3.12 – Création du lien entre la configuration de départ et finale.

C. **Parcours du graphe** : C'est la partie la plus délicate de la planification de chemin ; elle consiste à définir une suite d'arrangements de nœuds pour lier les configurations initiale et finale de A . Cela, évidemment, en respectant la contrainte d'optimisation géométrique. Cette opération est réalisée à l'aide d'une procédure de parcours de graphe informé ou "heuristique". Les techniques de recherche heuristiques [GREENWALD, 2005] utilisent un ensemble de règles qui permettent d'évaluer la probabilité qu'un chemin, allant du nœud courant au nœud solution, soit meilleur que les autres. Cette information, qui permet l'estimation des divers chemins avant de les parcourir, améliore dans la plupart des cas le processus de recherche. Ces techniques sont largement utilisées pour les problèmes caractérisés par une explosion combinatoire d'états. L'algorithme "A-star" [HART ET AL., 1968] est sans doute celui qui est le plus utilisé dans la famille des algorithmes de parcours de graphes. C'est cette procédure de parcours que nous avons retenue pour la détermination du plus court chemin. L'algorithme *A-star* reprend l'algorithme de Dijkstra [DIJKSTRA, 1959] mais en ajoutant une analyse d'orientation de la recherche [GREENWALD, 2005]. Le parcours, en plus d'être guidé par le poids réel des cellules (distance séparant la configuration initiale et actuelle), est orienté par une estimation de la distance séparant l'état actuel et final suivant la formule :

$$f(n) = g(n) + \mu h(n) \quad (3.4)$$

où

- $f(n)$: est le coût total estimé du chemin passant par n pour se rendre au but ;
- $h(n)$: est le coût estimé du nœud n jusqu'au but ;
- $g(n)$: est le coût du nœud de départ jusqu'au nœud n ;

– μ : représente un poids lié à l'importance de $h(n)$.

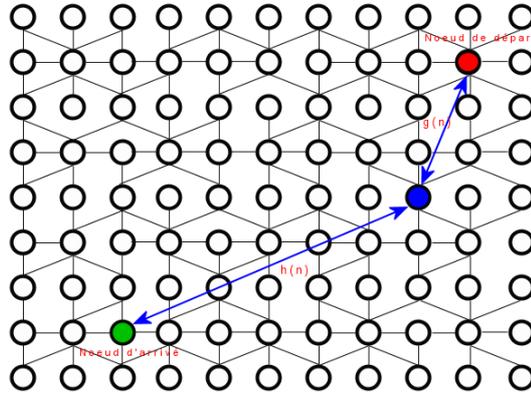


FIG. 3.13 – Procédure du parcours de graphe : *A-star*.

Parmi les méthodes existantes pour le calcul de distance [HART ET AL., 1968] (Manhattan, max, etc.), nous avons retenu la distance euclidienne (D). Dans les expérimentations réalisées, cette méthode s'est avérée être très efficace. La distance euclidienne s'écrit :

$$D = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (3.5)$$

Sommet source (S)
 Sommet destination (D)
 Liste des sommets à explorer (E) : sommet source S
 Liste des sommets visités (V) : vide

Tant que (la liste E est non vide) *et* (D n'est pas dans E) *Faire*
 + Récupérer le sommet X de coût total F minimum
 + Ajouter X à la liste V
 + Ajouter les successeurs de X (non déjà visités) à la liste E en évaluant leur coût total F et en identifiant leur prédécesseur
 + *Si* (un successeur est déjà présent dans E)
 et (nouveau coût est inférieur à l'ancien) *Alors* :
 Changer son coût total
 Changer son prédécesseur
 FinSi
FinFaire

FIG. 3.14 – Pseudo-code correspondant à l'algorithme *A-star*.

D. Guidage du geste de l'opérateur :

Une fois le plus court chemin généré (voir figure 3.15), le module de planification de chemins transmet la trajectoire simultanément au module de reconstruction 3D et au module haptique.

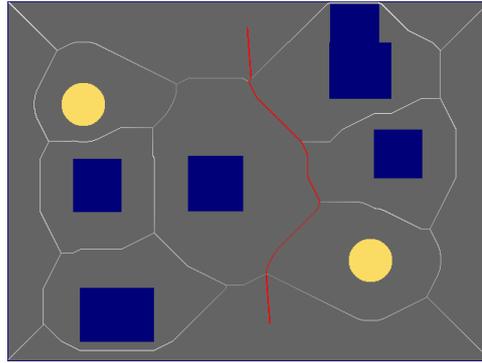


FIG. 3.15 – Génération de la trajectoire optimale.

Le module de reconstruction 3D se charge de l’affichage de la trajectoire, en superposant la représentation de cette trajectoire à celle de la scène virtuelle tridimensionnelle. La trajectoire se présente sous forme d’une texture semi-transparente appliquée à un plan parallèle au substrat et décalée d’une distance équivalente au rayon de la microbille manipulée (voir figure 3.16(b)). Ainsi, cette représentation permet à l’opérateur dans une phase de préparation des tâches de micromanipulation, d’avoir une idée au préalable sur le trajet que devrait suivre la microbille pour atteindre l’objectif. Cet affichage permet ensuite de guider visuellement l’opérateur durant le transport de la microbille.

La trajectoire peut également être rendue sur le plan haptique en générant un guide virtuel. Le mouvement de l’opérateur est de ce fait contraint à suivre ce guide tout au long du déplacement. Le guide virtuel se présente sous forme d’une liaison viscoélastique entre la position du dispositif maître (Interface PHANToM) et la trajectoire optimale (voir figure 3.16(a)). La raideur K et la viscosité B caractérisant la liaison mécanique doivent permettre le lissage de la trajectoire tout en contraignant suffisamment le mouvement de l’opérateur. En effet, une valeur trop faible de ce couple de paramètres induit un mauvais suivi de la trajectoire, à l’inverse une valeur trop importante génère un rendu saccadé pouvant introduire des instabilités au niveau du rendu haptique. Afin de limiter l’effet du guide virtuel sur le plan spatial, une zone d’influence de forme sphérique est établie autour de la position du dispositif maître. Cette zone d’influence permet également de réduire considérablement les temps de calcul et d’obtenir de ce fait un rendu haptique stable.

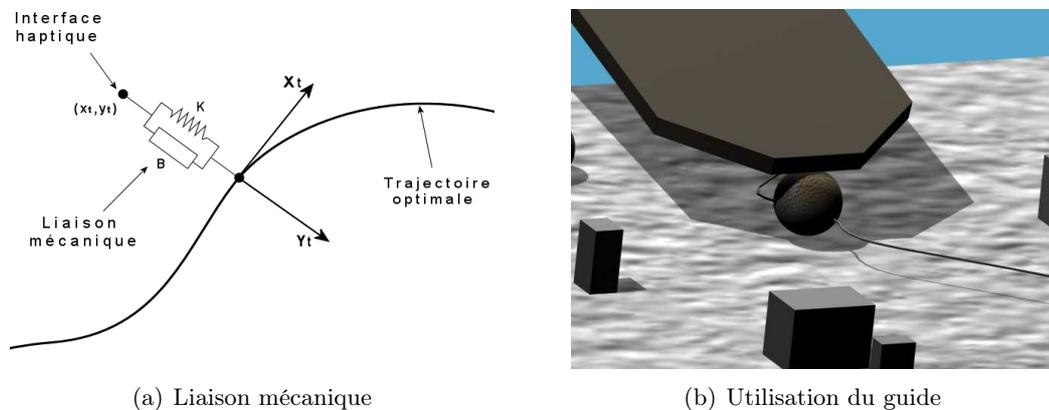


FIG. 3.16 – Guide virtuel à base d’un planificateur de chemins.

3.3.3.2 Guide à base de champs de potentiel

Les guides virtuels à base de champs de potentiel constituent une aide précieuse pour l'opérateur lorsque celui-ci manipule une microbille dans un voisinage proche d'obstacles potentiels. L'aide proposée se présente sous forme d'un guide actif pouvant être facilement couplé à d'autres types de guides (voir section 3.3.3.3). Les champs de potentiels employés dans ce guide ont pour principal objectif de fiabiliser le geste de l'opérateur lorsque le micromanipulateur est au voisinage des micro-objets [ABBOTT ET AL., 2005]. Contrairement au guide basé sur la planification de chemins, le mouvement de l'opérateur est dans ce cas moins contraint ; l'opérateur dispose d'un degré d'initiative dans le choix de ses actions. Ce type de guide est par ailleurs inspiré des champs de potentiel utilisés dans la planification de chemins en robotique mobile [KHATIB, 1986], la seule différence vient du fait que nous n'utilisons pas de force attractive pour simuler la cible. La scène comprend également un autre type de champ de potentiel permettant, cette fois-ci, d'atténuer les mouvements brusques de l'opérateur. Suivant la nature et l'objectif des champs de potentiel utilisés, il est possible de les classer en deux catégories [AMMI ET FERREIRA, 2004a] :

A. Champ de potentiel répulsif :

Ce type de champ de potentiel entoure les différents obstacles présents dans la scène. Son rôle est d'éviter - au travers du geste de l'opérateur - que la pointe AFM soit attirée par les micro-objets sous l'effet des forces d'adhésion (forces électrostatique, de Van der Waals, capillaires). Ce guide a également pour objectif de limiter l'espace de travail du micro-effecteur en l'empêchant de dépasser les bords de la scène observée sous microscope. Ce guide est inspiré des techniques de planification de chemins et se présente sous la forme d'une impédance mécanique élastique créée au moment du contact entre la pointe AFM et la représentation géométrique du champ de potentiel. L'expression de ce champ de potentiel est donnée comme suit (voir figure 3.17) :

$$U_{obstacle}(d) = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d_0} \right) & \text{si } d \leq d_0 \\ 0 & \text{si } d > d_0 \end{cases} \quad (3.6)$$

où

- d : est la distance minimale séparant la pointe AFM de l'obstacle. Elle est retournée par le module de détection de collision (distance de pénétration) ;
- d_0 : est une constante positive qui représente la distance d'action du champ de potentiel ;
- η : est un facteur d'échelle en position.

La forme géométrique employée pour ce champ de potentiel dépend des objets entourés : sphérique pour les microbilles et les particules de poussière, et plane pour les bords de la scène. Afin d'amortir légèrement le geste de l'opérateur lors d'un contact, nous avons ajouté à cette impédance une composante visqueuse de faible valeur.

B. Champ de potentiel atténuateur de mouvement :

Ce champ de potentiel entoure la microbille à manipuler. Il est destiné à atténuer les tremblements et les gestes brusques de l'opérateur pendant une phase d'approche ou de contact. Ce type de champ possède une géométrie sphérique et intègre un élément visqueux agissant comme un filtre passe-bas sur le geste de l'opérateur. Cette forme géométrique, bien que

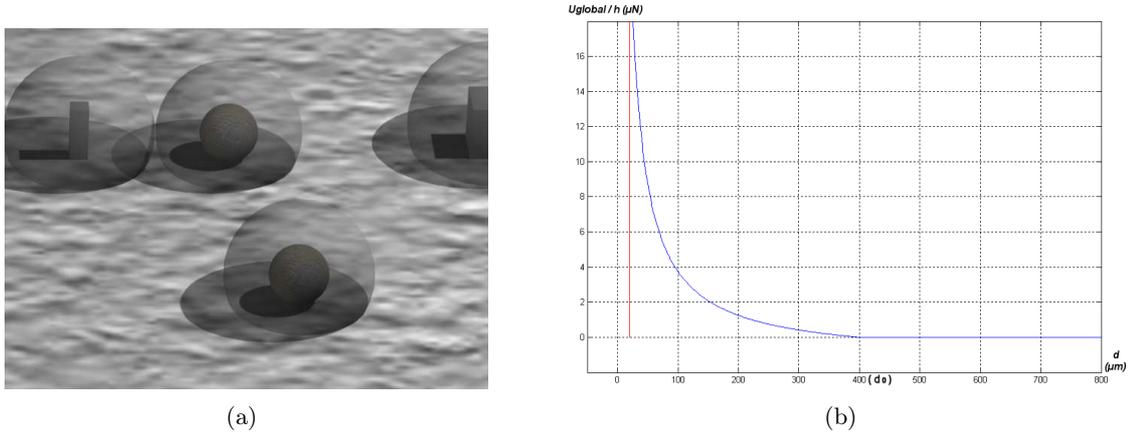


FIG. 3.17 – (a) Représentation graphique et (b) profil du champ de potentiel répulsif.

simple par sa structure, offre l'avantage d'être symétrique et continue, ce qui permet de minimiser d'éventuels sauts de mouvement liés à la géométrie du guide. Le potentiel atténuateur s'écrit :

$$U_{sphere}(d) = \begin{cases} \lambda \frac{\delta d}{\delta t} & \text{si } d \leq d_0 \\ 0 & \text{si } d > d_0 \end{cases} \quad (3.7)$$

où :

- δ : représente la dérivée partielle ;
- λ : représente le facteur d'échelle en position

Le champ de potentiel global est calculé par sommation des différentes primitives présentes dans la scène, et s'exprime comme suit :

$$U_{global}(d) = U_{sphere}(d) + U_{obstacle}(d) \quad (3.8)$$

Durant la phase de micromanipulation, la force appliquée au bras maître s'exprime comme étant la dérivée du champ de potentiel résultant, soit :

$$\vec{F}(d) = -\nabla U_{global}(d) \quad (3.9)$$

où

$$\nabla U_{global}(d) = \begin{bmatrix} \frac{\delta U}{\delta x} \\ \frac{\delta U}{\delta y} \\ \frac{\delta U}{\delta z} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Les dimensions des champs de potentiel proposés sont calibrés à partir d'un modèle physique d'interaction intégrant les forces surfaciques de non-contact (F_{noncon}). Ces forces sont définies comme étant la somme des forces de tension de surface (F_{cap}), des forces électrostatiques (F_{el}) et des forces de Van des Waals (F_{vdw}) (voir équation 3.11). Le modèle d'interaction prend également en considération les différentes géométries des objets entrant en interaction, celles-ci peuvent être de type sphère/plan, sphère/sphère ou plan/plan. A titre d'exemple, la figure (3.18) illustre l'existence de ces forces de non-contact suivant l'environnement de manipulation, ce qui dans le cas considéré est représenté par un contact sphère (extrémité de l'effecteur) et plan (surface de l'objet).

$$F_{noncon} = F_{cap} + F_{el} + F_{vdw} \quad (3.11)$$

Les expressions des forces de non-contact s'expriment par [SITTI ET HASHIMOTO, 2000] :

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{vdw}(h) = - \left(\frac{h}{h + b/2} \right)^2 + \frac{HR_1}{6h^2} \\ F_{cap}(h) = -4\pi\gamma R_1 \left(1 - \frac{h-2e}{2R_2} \right) \\ F_{el}(h) = -\frac{\xi_0 U^2 S}{2h^2} \end{array} \right. \quad (3.12)$$

où H est la constante de Lifshitz-Van der Waals. $H = 9eV$ car le substrat est en métal ($1eV = 1,60210^{-19} J$). Par ailleurs, h représente la très faible distance existante entre les deux objets lorsque ceux-ci "se touchent" (ce terme correspondant à la description macroscopique habituelle). Dans ce cas, h est généralement estimé entre $0,1nm$ et $1nm$. La valeur R_2 étant le rayon de courbure du ménisque, R_1 le rayon de courbure de la pointe AFM, e l'épaisseur du film de liquide, γ la tension de surface ($\gamma = 73 mN.m^{-1}$ pour l'eau), ξ_0 la permittivité électrique de l'air ($\xi_0 = 8,854 \times 10^{12} F.m^{-1}$), U la différence de potentiel entre la pointe et la surface et S la surface d'échange considérée.

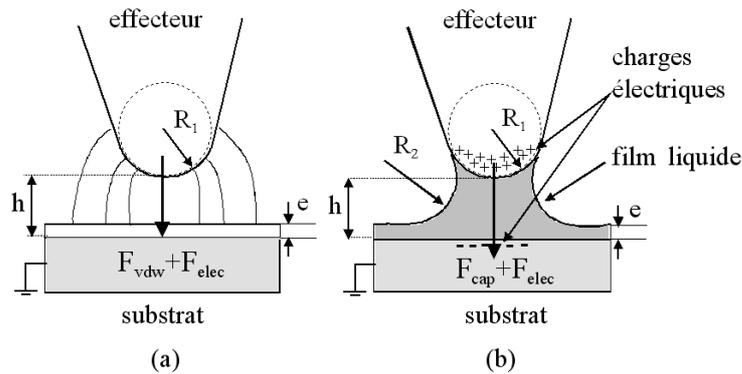


FIG. 3.18 – Modélisation des interactions effecteur/substrat et microforces d'adhésion : (a) cas d'un environnement où les forces de Van der Waals et les forces électrostatiques sont prépondérantes (air ambiant) et (b) cas d'un environnement où les forces de capillarité et les forces électrostatiques sont prépondérantes (environnement humide).

3.3.3.3 Contraintes de mouvement

Pendant l'exécution d'une tâche de micromanipulation par adhésion ou par poussée, la phase d'approche est sans doute l'une des étapes les plus délicates à réaliser. Dans le but de sécuriser le geste de l'opérateur, il est nécessaire de fournir à celui-ci des outils permettant de contraindre le mouvement suivant certains axes de mouvement. Ces contraintes permettent d'éviter tout mouvement du micromanipulateur en dehors des zones prédéfinies, l'opérateur peut ainsi se concentrer sur la partie utile du geste opératoire. Ce guide se présente sous la forme de deux mécanismes virtuels suivants :

- A. **Contrainte plane** : Le déplacement du micromanipulateur est contraint suivant un plan (voir figure (3.19(a))), l'orientation et la position de ce plan dépendent de la tâche à réaliser (phase d'approche, déplacement plan au dessus du substrat, etc.) ;
- B. **Contrainte rectiligne** : Le déplacement du micromanipulateur suit cette fois-ci une trajectoire rectiligne (voir figure 3.19(b)) qui est généralement centrée sur la microbille.

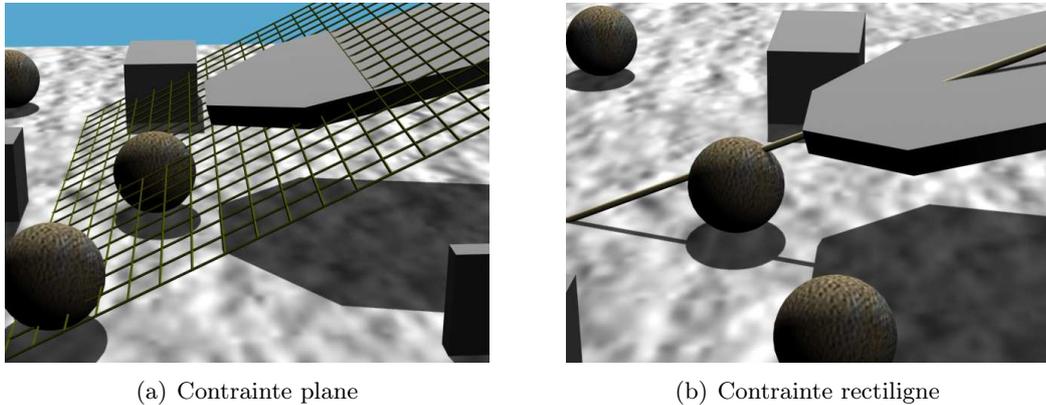


FIG. 3.19 – Les contraintes de mouvement.

3.3.4 Stabilisation du rendu haptique par couplage virtuel

Le rendu haptique synthétique présenté précédemment (principalement le mode épistémique et les champs de potentiels) est basé par définition sur un algorithme de détection de collision. Le module haptique étant lié au module de reconstruction 3D, et donc indirectement au module de vision, la fréquence de rafraîchissement de la détection de collision ne peut pas dépasser les $15Hz$ (fréquence de mise à jour du module de vision). Par ailleurs, la boucle interne de fonctionnement de l'interface haptique fonctionne à une fréquence de $1000Hz$. Cette différence importante de fréquences ne permet pas d'assurer la cohérence entre ces deux systèmes (moteur haptique/interface haptique) ce qui introduit une instabilité au niveau du rendu haptique. Ces instabilités peuvent être gênantes, voire même risquées, lors de certaines opérations de micromanipulation.

Une des solutions des plus abouties pour remédier à ce problème d'instabilité consiste à utiliser un couplage virtuel [BROWN ET COLGATE, 1997], [ADAMS ET AL., 1998]. Cette approche repose sur l'insertion d'une liaison virtuelle passive entre le module haptique (équivalent virtuel haptique) et le dispositif de rendu haptique afin d'assurer la stabilité et les performances du système (voir figure 3.20). Ainsi, l'insertion de ce calculateur numérique dans la boucle de commande permet à l'opérateur d'utiliser les différents outils relatifs au rendu haptique synthétique avec

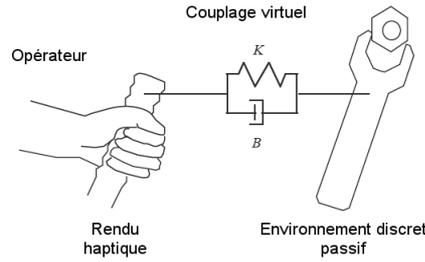
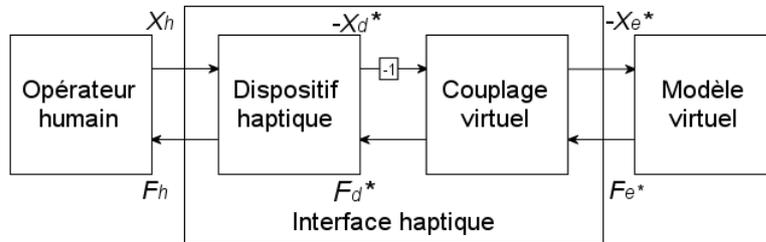
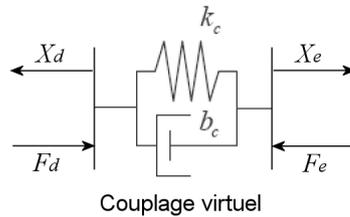


FIG. 3.20 – Principe du couplage virtuel [BROWN ET COLGATE, 1997].

plus d'efficacité et de sûreté, en assurant toujours un retour bilatéral. Le modèle d'interaction se met sous forme de schéma blocs connectés en cascade (figure 3.21).



(a) Le modèle d'interaction



(b) Impédance correspondant au couplage virtuel

FIG. 3.21 – Modèle d'une interaction haptique avec un couplage virtuel.

où :

- $G^*(j\omega)$: représente la dynamique du mécanisme Echantillonneur/Bloqueur et de l'opérateur humain.
- $C(z)$: représente le couplage virtuel.
- m et b : sont respectivement la masse et la viscosité de l'interface haptique. La fonction de transfert Z_{di} (à un degré de liberté) correspondante s'exprime comme suit :

$$Z_{di} = (m s + b)|_{s \rightarrow (2/T)(z-1/z+1)} \tag{3.13}$$

- T : est le pas temporel d'échantillonnage.

TAB. 3.2 – Paramètres du couplage virtuel.

| Paramètre | Valeur |
|-----------|-----------------|
| b_c | 0.0035 N/(mm/s) |
| k_c | 0.91 N/mm |

La matrice hybride de l'interface haptique est :

$$\begin{bmatrix} F_h \\ -X_e^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{di}(z) & BOZ(z) \\ -1 & \frac{1}{Z_{cvi}(z)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_h \\ F_e^* \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

3.3.4.1 Conditions de stabilité

Le critère de stabilité inconditionnelle de Llewellyn [LLEWELLYN, 1952] pour les quadripôles linéaires donne la condition nécessaire et suffisante suivante :

$$\begin{cases} \operatorname{Re}(s_{11}) \geq 0 \\ 2 \operatorname{Re}(s_{11}) \operatorname{Re}(s_{22}) \geq |s_{12}s_{21}| \operatorname{Re}(s_{12}s_{21}) \end{cases} \quad (3.19)$$

En appliquant ce critère au système de rendu haptique (comprenant le couplage virtuel) décrit par l'équation(3.18), nous obtenons :

$$\begin{cases} \operatorname{Re}(Z_{di}(z)) \geq 0 \\ \frac{1}{Z_{cvi}(z)} \geq 0 \\ \cos(\angle BOZ(z)) + \frac{2 \operatorname{Re}(Z_{di}(z)) \operatorname{Re}(\frac{1}{Z_{cvi}(z)})}{|BOZ(z)|} \geq 1 \end{cases} \quad (3.20)$$

ceci permet d'écrire la condition de stabilité inconditionnelle suivante :

$$\frac{1}{Z_{cvi}(z)} \geq \frac{1 - \cos(\angle BOZ(z))}{2 \operatorname{Re}(Z_{di}(z))} |BOZ(z)| \quad (3.21)$$

3.3.4.2 Implantation du couplage virtuel

A partir de la condition de stabilité (3.21), nous pouvons remonter dans un premier temps aux paramètres de l'impédance du couplage virtuel. Connaissant la viscosité ($b = 0.005N/(mm/s)$) et la masse ($m = 45g$) de l'interface haptique, ainsi que le temps d'échantillonnage ($T = 0.066s$), nous commençons par représenter la partie droite de l'inégalité (3.21), puis à rechercher les valeurs limites des paramètres k_c et b_c pour que cette inégalité soit toujours vérifiée. La recherche de ces paramètres consiste à donner une valeur fixe à k_c puis à faire varier b_c jusqu'au point limite de stabilité. La présente méthode permet d'obtenir les paramètres offrant le meilleur compromis entre stabilité et transparence du couplage virtuel (voir figure 3.23 et tableau 3.2).

L'implantation du couplage virtuel consiste à intégrer un moteur physique au moteur haptique existant. Le modèle mécanique de ce moteur est celui du couplage virtuel représenté par

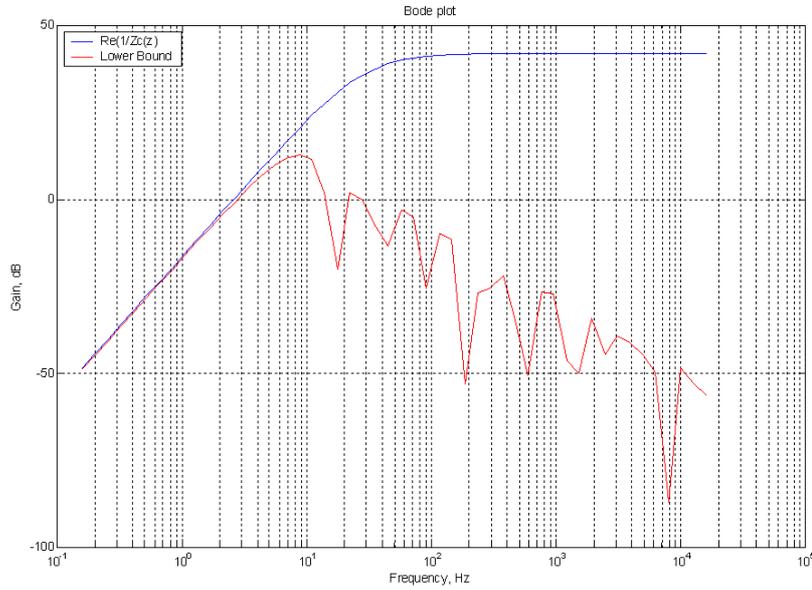


FIG. 3.23 – Représentation de la condition de stabilité inconditionnelle.

les paramètres k_c , et b_c . L'intégration numérique des équations se fait par la méthode d'Euler implicite. Le pas d'intégration est constant et est égal à la fréquence de la boucle interne de l'interface PHANTOM (1000Hz).

3.3.5 Alignement proprioceptif : isomorphisme des transformations motrices

En situation naturelle, l'organisation et le guidage des segments corporels s'appuient largement sur une mise en correspondance des informations proprioceptives (tactilo-kinesthésiques) et visuelles [JEANNEROD, 1988]. Dans les tâches visuo-manuelles, les mouvements sont en effet plus précis lorsque ces informations sont cohérentes. Or, l'introduction d'un écran vidéo entre le geste perçu et le geste réellement effectué en situation de télémanipulation entraîne un décalage entre ces deux sources d'informations induisant une détérioration des performances motrices. Une première source de difficulté provient de l'impossibilité de visualiser et de réaliser des mouvements dans un même plan de l'espace. En effet, l'écran vidéo servant au contrôle des mouvements étant positionné verticalement en face ou sur le côté de l'opérateur, les mouvements de manipulation d'objets sont suivis visuellement dans le plan frontoparallèle, alors qu'ils sont habituellement réalisés dans le plan sagittal. Par ailleurs, l'orientation de la scène visuelle sur l'écran vidéo va dépendre de la position et de l'orientation de la caméra. De ce fait, une absence d'isomorphisme entre la direction du mouvement dans l'espace de travail et celle dans l'espace de l'opérateur est fréquente (voir figure 3.24). L'opérateur doit donc apprendre à réorganiser son espace sensorimoteur afin de pouvoir réaliser des tâches de haute précision [ORLIAGUET ET COELLO, 1998].

Pour remédier à ce problème de décalage entre l'axe du regard et la direction du mouvement, nous proposons dans la cadre de notre IHM de transformer le repère de commande cartésien du micromanipulateur (virtuel) et de le rendre isomorphe au repère corporel de l'opérateur (voir figure 3.25). L'opérateur peut donc projeter son schéma corporel dans l'espace de travail du micromanipulateur et générer un schéma moteur directionnel adéquat. Les réajustements sont

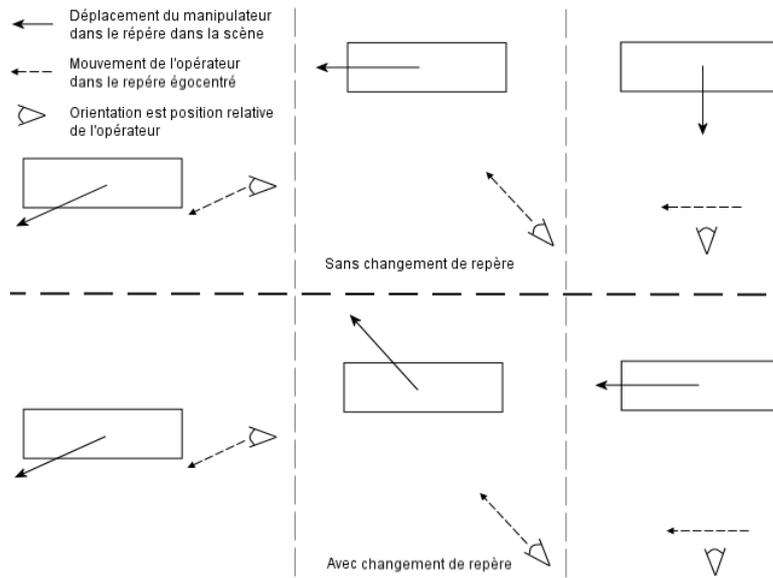


FIG. 3.24 – Différences de manipulation dues à l'utilisation, ou non, d'un repère de déplacement isomorphe.

peu nombreux et la situation permet le transfert de la directionnalité du mouvement avec une économie d'apprentissage. Ainsi, dès le premier essai, l'opérateur procède à un contrôle interne du mouvement [PEW, 1974] et à une planification efficace de celui-ci par isomorphisme spatial homme-machine.

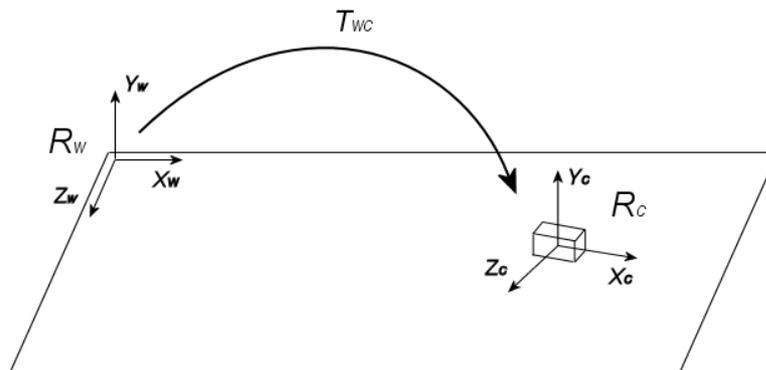


FIG. 3.25 – Transformation nécessaire pour obtenir un déplacement moteur isomorphe.

où :

1. R_w correspond au repère de la scène ;
2. R_c correspond au repère de la caméra ;
3. T_{wc} est la transformation entre R_w et R_c . Cette transformation comprend une translation, une rotation.

3.4 Mode Auditif

La perception auditive fournit un canal de communication supplémentaire qui permet d'alléger ou de remplacer le système humain de perception visuelle. Cette propriété s'avère utile dans les situations mobiles, où la vue de l'utilisateur est nécessaire à la navigation [DAUDÉ ET NIGAY, 2004]. Par ailleurs, l'ouïe est particulièrement compétente pour traiter certains types d'information [CONVERSY ET BEAUDOUIN-LAFON, 1996]. Les alertes, par exemple, sont un type d'informations où l'oreille s'avère très efficace, du fait que le son est non évitable et que le système auditif est très réactif (parce que sa fonction première est de permettre une réaction rapide en cas de danger immédiat). Par ailleurs, de récentes études ont montré que l'ouïe pouvait être plus efficace que la vue pour analyser des données complexes, comme l'évolution de données numériques d'un nombre élevé de dimensions [FITCH ET KRAMER, 1994]. Utilisé en arrière-plan, le son devient un média d'ambiance [ISHII ET AL., 1998] qui se fond naturellement dans l'environnement perceptif de l'utilisateur. Si un événement inhabituel intervient dans une source sonore présentée à l'utilisateur, son attention est automatiquement attirée (écoute passive); à l'inverse, il peut choisir d'écouter une source sonore particulière (écoute active). Ces deux types d'écoute lui permettent de suivre des sources sonores en arrière-plan tout en menant une activité principale indépendante. Enfin, le son, lorsqu'il est spatialisé, peut procurer à l'utilisateur un sentiment d'immersion, et donc une plus grande impression de présence dans la scène. Il permet également d'avoir quasi instantanément des hypothèses précises de localisation (à quelques degrés près et en quelques millisecondes).

3.4.1 Métaphores sonores proposées

L'objectif visé par l'introduction du mode sonore dans l'interface homme-machine proposée, est principalement d'alléger le flux sensoriel du canal visuel et haptique. En effet, certaines informations, comme la distance d'approche ou les signaux d'alerte, peuvent facilement saturer la perception de l'opérateur dans le cas où ces informations empruntent un canal déjà utilisé pour d'autres fonctions (par exemple : l'observation pour le mode visuel, le retour d'effort pour le mode haptique, etc.). Cet effet s'accroît durant les phases critiques de la micromanipulation. Enfin, les guides virtuels ne produisant pas d'actions directes sur le geste de l'opérateur, celles-ci peuvent s'avérer utiles lorsque l'intervention requiert des mouvements non contraints (guide virtuel passif).

Il est utile de distinguer deux principaux aspects de la perception auditive de l'espace [JULLIEN ET WARUSFEL, 1994] :

- A. *La localisation* : Celle-ci correspond à la capacité de déterminer la position d'une source sonore dans l'espace en terme de direction, d'élévation et de distance (voir Annexe F).
- B. *La caractérisation* : Celle-ci fait référence aux informations liées à l'environnement spatial de l'événement sonore tels que les messages d'état, d'avertissements, d'alarmes, etc.

Il faut noter que dans un environnement réel la relation entre un son et l'événement qui le produit est unique. Ceci permet d'identifier d'une manière distincte les différents événements. Cependant, cette correspondance "naturelle", si elle existe, n'est pas forcément optimale [DERVEER, 1979]. L'avantage des environnements virtuels, est la possibilité de réaliser différentes associations entre sons et événements, ce qui permet d'améliorer les performances et le confort de l'utilisateur. Les environnements virtuels permettent également de projeter sur des dimensions sonores des grandeurs qui ne le sont pas à l'origine. Gaver [GAVER, 1989] définit pour

cela trois niveaux de correspondance perceptuelle entre sons et informations : 1) symbolique, 2) métaphorique et 3) iconique.

1. La correspondance symbolique : Celle-ci est à la base de l'auralisation de données ; les données multidimensionnelles (longueur, poids, etc.) sont projetées sur des dimensions sonores comme le volume, le timbre ou la hauteur des sons.
2. La correspondance iconique : Cette correspondance est la plus facile à comprendre, car la relation entre le son et l'événement est causale. Elle est généralement utilisée pour accompagner des événements, et la seule information donnée par ce type de sons passe par l'identification [CONVERSY, 2000]. Les sons utilisés sont des séquences sonores de tous les jours, à l'exclusion des sons musicaux et de la parole (par exemple : associer un bruit de frottement au déplacement du manipulateur).
3. La correspondance métaphorique : Cette correspondance permet de connaître l'état d'un événement par un lien immédiat entre cet événement et le son généré (par exemple : association d'un son de remplissage d'une bouteille avec l'état d'avancement d'un processus).

Sur la base de ces correspondances perceptuelles ainsi que sur les différentes fonctions du mode sonore, nous avons proposé à l'opérateur différents types d'information. Il est possible de les regrouper en deux grandes catégories : 1) la représentation de grandeurs physiques et 2) la représentation de messages d'alertes sous forme d'un pseudo son du micro-environnement.

3.4.1.1 Représentation sonore de grandeurs physiques

Cette aide concerne principalement l'auralisation (correspondance symbolique) de certaines grandeurs physiques liées aux tâches de micromanipulation. Les grandeurs étudiées sont les suivantes :

- a) La distance minimale entre la pointe AFM et la microbille à manipuler (voir 3.3.3.2) ;
- b) La distance minimale entre la pointe AFM et la trajectoire idéale dans le cas de l'utilisation du guide virtuel à base de planificateur de chemins (voir 3.3.3.1) ;
- c) L'effort exercé par la pointe AFM durant les phases d'exploration (fonction épistémique) et durant la manipulation (voir 3.3.2 et 3.3.1).

Ces grandeurs sont représentées par un son continu proportionnel à leurs amplitudes. Nous avons utilisé pour cela trois types de correspondance (voir figure 3.26) :

- a) Modulation en amplitude de la grandeur (MA) ;
- b) Modulation en fréquence de la grandeur (MF) ;
- c) Modulation en amplitude et en fréquence de la grandeur.

Le son généré est par ailleurs spatialisé afin de permettre à l'opérateur d'apprécier la direction de variation de la grandeur représentée. Nous exploitons pour cela les indices binauricaux et indirectement les indices monoauricaux de localisation. L'ensemble de ces indices ainsi que leurs caractéristiques sont détaillés dans l'Annexe E. Nous les avons exploités de la manière suivante :

1. *L'indice de temps* : Celui-ci a été exploité par l'apport d'un retard temporel entre le signal auditif droite et gauche en fonction de la direction de variation ;
2. *L'indice d'intensité* : Afin d'accentuer cet indice, on introduit dans le signal sonore des hautes fréquences. La différence d'intensité entre les deux signaux sont fonction de la direction de variation ;
3. *L'indice de phase* : Cet indice est mis en évidence en modulant le signal haute fréquence par un signal basse fréquence. La période relativement importante (0.5s) de ce signal permet d'introduire les basses fréquences dans le son final.

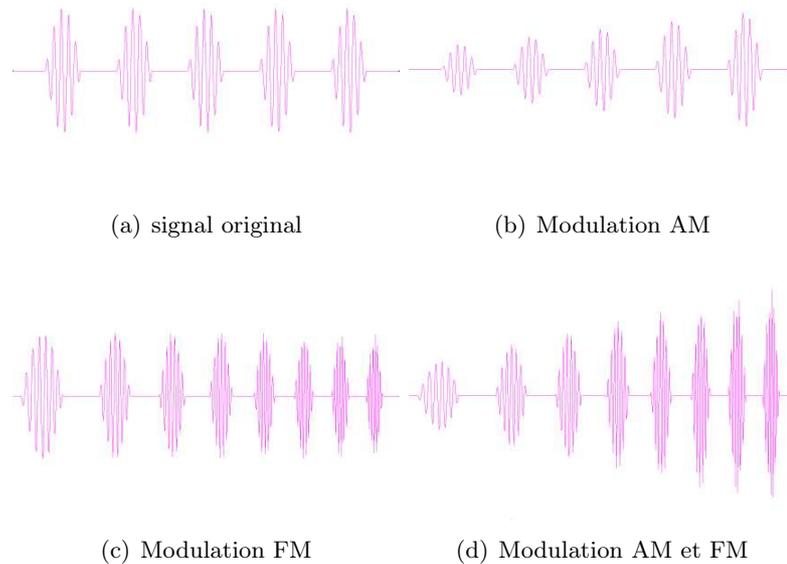


FIG. 3.26 – Modulation du son en fonction des grandeurs à représenter.

3.4.1.2 Le pseudo son du micro-environnement

Il s'agit ici, de faire correspondre à certains événements physiques du micro-environnement, comme le frottement ou le contact entre objets, des alertes sous forme d'icônes auditives inspirées de la vie courante de l'opérateur. Actuellement nous proposons trois types de correspondances :

1. Le son de frottement entre le manipulateur et le substrat ;
2. Le son de contact entre le manipulateur et les microbilles ;
3. Le son de contact entre le manipulateur et les champs de potentiels.

L'icône auditive sonore est spatialisé afin d'indiquer à l'opérateur le lieu et la direction de l'événement. Nous exploitons pour cela : 1) l'indice binaurculaire d'intensité et 2) l'indice monaurculaire lié aux mouvements.

1. *l'indice binaurculaire d'intensité* : Celui-ci est intégré à l'IHM par l'apport d'un retard entre le signal auditif gauche et droite en fonction de la position relative de la source par rapport à la tête de l'opérateur .

2. *l'indice monauriculaire liés aux mouvements* : Le retard est cette fois-ci fonction du mouvement de la tête de l'opérateur.

3.5 Conclusion

Au vu des solutions proposées dans ce chapitre, on constate que la réalité virtuelle peut apporter une aide précieuse à la télé-micromanipulation, principalement en proposant à l'opérateur une représentation intuitive et fonctionnelle du micro-environnement. Nous nous sommes intéressés dans ce chapitre à développer un ensemble de techniques d'immersion, d'interaction et d'assistance pour la conception d'une IHM ergonomique et intuitive. Trois modes perceptifs ont été développés : le mode visuel, le mode haptique et le mode sonore.

Pour le mode visuel, nous avons proposé à l'opérateur une représentation tridimensionnelle du micro-environnement. Celle-ci intègre un ensemble d'indices visuels permettant l'amélioration de la perception de profondeur de la scène, fournissant ainsi à l'opérateur un degré supplémentaire au niveau de la localisation spatiale de l'effecteur et sur la notion de distance. L'opérateur dispose également de moyens de navigation pour explorer et ajuster facilement son point de vue dans le micromonde.

Le mode haptique est utilisé de deux façons différentes. Le premier mode haptique consiste à rehausser la perception haptique de l'opérateur par l'intermédiaire d'un microcapteur d'effort fixé sur l'effecteur terminal. Ceci, permet à l'opérateur de ressentir les microforces exercées pendant la manipulation des micro-objets par l'intermédiaire d'un retour d'effort. Le deuxième mode haptique, beaucoup moins conventionnel en micromanipulation, repose sur l'exploitation des guides virtuels. Ces guides permettent d'assister et de guider l'opérateur durant toute la durée d'exécution des tâches de micromanipulation. Le geste de l'opérateur est plus sûr et mieux maîtrisé avec un confort d'utilisation indéniable.

Enfin, le mode sonore vient en complément des deux autres sens. Son rôle principal est d'alléger le flux sensoriel du canal visuel et haptique. Ce mode est exploité pour traiter les messages d'alerte mais aussi pour l'auralisation de certaines grandeurs physiques liées aux tâches de micromanipulation.

Afin de valider le concept d'interface homme/machine multimodale adaptée aux contraintes de la télé-micromanipulation, il nous apparaît important, maintenant, d'expérimenter les différents concepts évoqués dans ce chapitre au travers d'une plate-forme expérimentale. L'expérience nous permettra d'évaluer le degré de rehaussement visuel, haptique et sonore atteint, ainsi que le niveau d'assistance procuré par les métaphores virtuelles proposées à l'opérateur. Ces différents développements sont traités dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

Évaluation et Expérimentation

4.1 Introduction

Diverses expériences sur les facteurs humains ont montré que certaines limitations provenant principalement de la mauvaise maîtrise des interactions macro/micro [BARIS ET AL., 2001] [FATIKOW ET SHIRINOV, 2003] rendaient caduques toute utilisation des systèmes de télé-micro-manipulation en milieu industriel : micro-assemblage de microsystèmes, micro-injection cellulaire, etc. Une contrainte importante vient de l'environnement de travail qui doit être complètement perçu par l'opérateur de manière directe et naturelle : vue, toucher, audition, etc. D'autre part, pour pouvoir être réalisées de manière intuitive, certaines tâches doivent être guidées et assistées par des métaphores virtuelles pour diminuer l'effort mental de l'opérateur ainsi que la complexité de réalisation de la tâche [KIM ET AL., 2002].

Dans ce contexte, le chapitre précédent s'est attaché à développer divers moyens d'immersion, d'interaction ainsi qu'à proposer différentes métaphores d'assistance dans le but de concevoir une interface homme-machine (IHM) ergonomique et parfaitement adaptée aux modalités sensorielles de l'opérateur humain. En vue de valider et d'évaluer d'un point de vue expérimental les différentes modalités et métaphores proposées, ce chapitre propose une plateforme expérimentale multimodale. Différents scénarios d'essais ont été conduits sur un nombre de candidats important, en vue d'avoir un retour d'expérience significatif sur la conception et l'ergonomie de l'interface homme-machine développée.

Ce chapitre débute tout d'abord par une description détaillée du dispositif matériel et logiciel utilisé par l'IHM. Nous abordons ensuite les stratégies de manipulation utilisées, ainsi que les conditions expérimentales fixées pour la réalisation de l'ensemble des essais. Les scénarios d'essais sont ensuite décrits précisément. Une attention toute particulière est portée au niveau de l'objectif de l'expérimentation, de la procédure suivie, et de la manière dont sont obtenus les résultats. Nous concluons enfin cette étude expérimentale par une analyse détaillée des performances et limitations de l'IHM proposée.

4.2 Description du dispositif et des conditions expérimentales

4.2.1 Architecture matérielle

Nous allons dans ce qui suit décrire les différents composants matériels du système de télé-micromanipulation. Nous pouvons classer ces éléments en trois grandes catégories : 1) le système de micromanipulation, 2) les moyens de calcul et 3) les interfaces comportementales.

4.2.1.1 Le système de micromanipulation

Le dispositif de micromanipulation comporte d'une part, les moyens d'observation du micro-environnement et d'autre part, les moyens de micromanipulation. L'observation du micro-environnement est basée sur les dispositifs suivants :

- Microscope frontal : Un microscope optique de type *Mitutoyo FS70Z* équipé de trois objectifs M Plan Apo ($\times 2$, $\times 20$ et $\times 50$) et d'une lentille de tube dont le facteur de grossissement varie de $\times 1$ à $\times 2$;
- Microscope latéral : Un microscope optique de type *TIMM - 150* avec un grossissement continu de $\times 0.1$ à $\times 150$. La caméra CCD est intégrée au microscope, et possède 540 par 600 capteurs élémentaires de taille $7.3 \times 4.7 \mu m$;
- Caméra CCD : Une caméra de type *Chugai Boyeki N&B FC - 55 - II* équipée d'un capteur *Sony* disposant de 500×582 cellules élémentaires (de taille $9.8 \times 6.3 \mu m$);
- Carte d'acquisition : Une carte d'acquisition vidéo de type *Matrix mvDELTA* avec une résolution de 768×576 pixels.

Le micromanipulateur est composé d'un micro-effecteur et de deux étages de positionnement à 3 degrés de liberté. Les déplacements du micro-effecteur sont assurés par une unité de positionnement hybride : une table de micropositionnement X-Y-Z, pour effectuer les grands déplacements et un nanomanipulateur X-Y-Z (appelé Nanocube) pour effectuer des déplacements de haute-précision. Les caractéristiques des deux manipulateurs sont les suivantes :

- Table de micropositionnement : Une table de positionnement électromagnétique X-Y-Z (*M-111* de chez Polytec-PI), avec un déplacement minimum de $0.05 \mu m$ et une répétabilité de $0.1 \mu m$. La course totale de déplacement est de $25 mm$;
- Nanomanipulateur : Un nanopositionneur X-Y-Z (*nanocube P-611.3SF* de chez Polytec-PI), possédant un déplacement maximal de $100 \mu m$ et une répétabilité de $1 \eta m$.

Le micro-effecteur terminal - fixé sur l'unité de micromanipulation - est constitué d'un microlevier de microscope à force atomique (AFM) [NASCATEC, 2005] intégrant sur sa structure un microcapteur piézorésistif de force. Ce microcapteur permet la mesure des forces d'interaction entre l'effecteur et les micro-objets manipulés. Les forces mesurées sont ensuite retournées en temps-réel à l'interface haptique en vue de réaliser le retour de force de la chaîne de micro-téléopération.

4.2.1.2 Les moyens de calcul

La partie logicielle du système de télé-micromanipulation est supportée par trois ordinateurs de type PC *P4* cadencés à $2.8 GHz$. Les trois unités sont reliées par un réseau local (LAN) à $100 Mbits$ et sont organisées suivant une architecture serveur/clients détaillée dans la section 4.2.2.

4.2.1.3 Les interfaces comportementales

Pour l'évaluation des différentes stratégies d'immersion, de navigation, d'interaction et d'aide proposées à l'opérateur, nous avons intégré à l'IHM diverses interfaces sensorielles et motrices. Dans la première catégorie d'interfaces, nous retrouvons les moyens d'immersion visuelle suivants :

- Un visiocasque de type V6 de Virtual Research avec une résolution de 640×480 pixels;

- Un grand écran basé sur un rétroprojecteur d'une résolution maximale de 1024×768 pixels ;
- Un écran d'ordinateur d'une taille de 21pouces avec une résolution maximum de 1800×1350 pixels.

Le retour d'effort repose sur une interface haptique de type PHANToM Desktop avec 3 degrés de liberté actifs et 3 degrés de liberté passifs. Enfin, le retour sonore est assuré par un système d'enceintes composé d'un caisson de basses et de deux enceintes satellites.

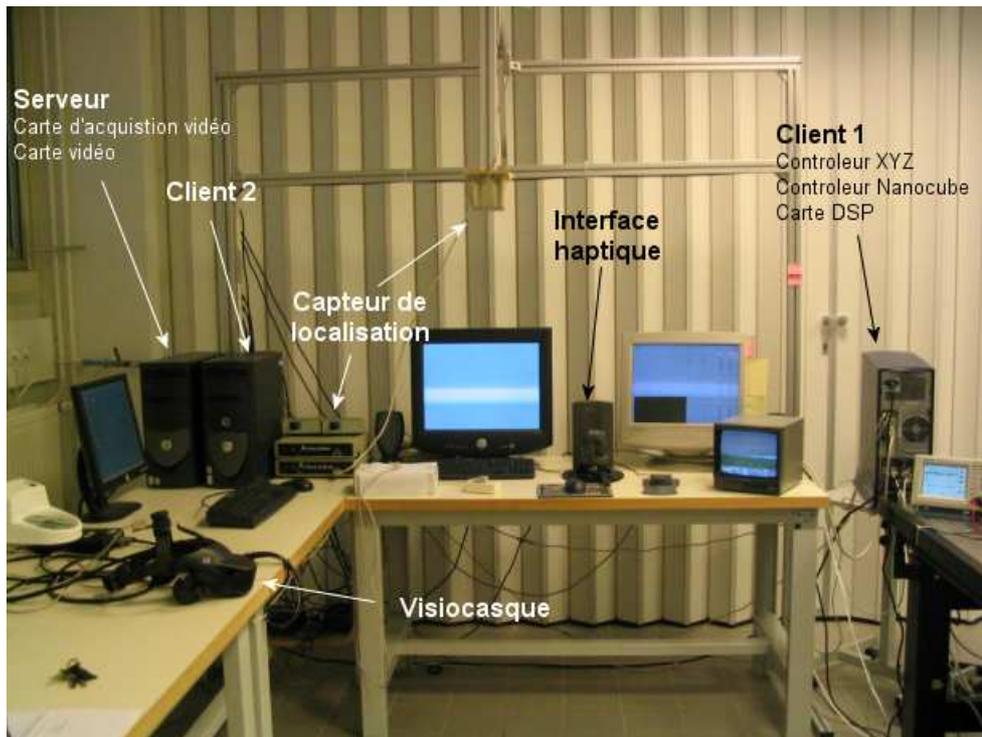
Pour localiser les mouvements des différentes parties du corps de l'opérateur, nous avons utilisé un capteur de localisation électromagnétique de type Flick of Birds (Ascension Technology). Cette interface motrice comporte certaines limitations : 1) un espace de travail restreint (une sphère de rayon de 80cm par rapport à l'émetteur) et 2) des distorsions de localisation dans les limites de l'espace de travail. Ces défauts restent toutefois tolérables, car cette interface est utilisée principalement pour la navigation.

4.2.2 Architecture logicielle

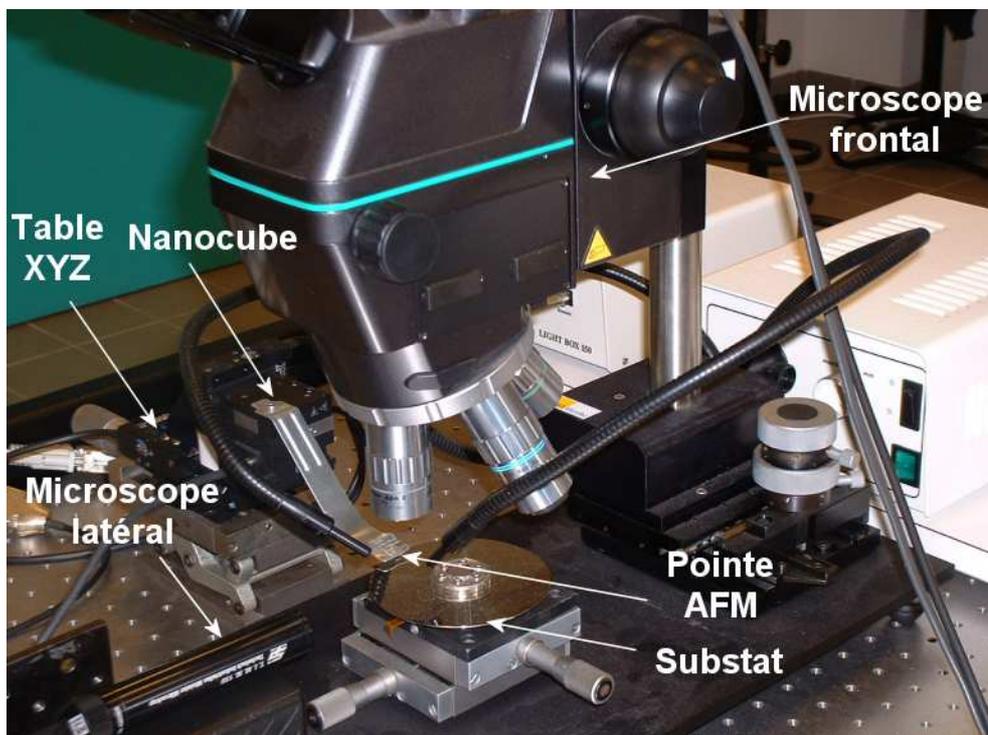
La partie logicielle de l'IHM a été organisée sous forme d'un système serveur/clients, ceci dans le but de répartir la charge de calcul sur plusieurs nœuds. La communication entre les différents nœuds est basée sur un système de sockets utilisant le protocole TCP/IP, assurant de ce fait une transmission fiable des données (mode connecté). Dans la suite du chapitre, la notion de moteur fait référence à un système Thread. Cette solution permet la parallélisation de plusieurs processus en s'affranchissant du mécanisme de synchronisation, celui-ci étant à la charge du système d'exploitation. Le mécanisme de synchronisation retenu pour l'ensemble des Threads est du type exclusion mutuelle (Mutex).

Nous allons décrire dans ce qui suit l'ensemble des composants logiciels ainsi que leur distribution sur les différents nœuds (voir figure 4.2).

- Le serveur* : Il s'agit du nœud central comprenant la classe principale de l'IHM, le moteur de traitement d'image, le moteur 3D, ainsi que le moteur sonore. La classe principale repose sur les MFC (Microsoft foundation class), elle offre une interface graphique (2D) qui permet l'initialisation et le réglage des différents modules. Le moteur de traitement d'image englobe les algorithmes de suivi des micro-objets et de calibrage du microscope. Le moteur 3D repose sur la librairie "OpenInventor". Il est principalement chargé de la reconstruction et de la mise à jour de la représentation tridimensionnelle de la scène. Le moteur sonore a pour fonction de générer les différents effets sonores produits dans la scène virtualisée. Il repose sur la librairie "Bass".
- Le client 1* : Ce nœud comprend principalement le module d'acquisition de données issu du module de contrôle des micromanipulateurs (table de micropositionnement et Nanocube). Afin d'éviter d'éventuelles instabilités dues au temps de transmission entre nœuds, nous avons placé le moteur haptique sur ce même nœud. Le module de détection de collision - basé sur la librairie OPCODE - et le module des guides virtuels ont également été placés de ce fait sur ce même nœud (pour des raisons identiques).
- Le client 2* : Ce nœud supporte la partie planification de chemin de l'IHM, il comporte le moteur de calcul du diagramme de Voronoï ainsi que le module de parcours de graphe. Une fois la trajectoire optimale calculée, elle est envoyée dans un premier temps au serveur pour être affichée visuellement, éventuellement avec le moteur sonore, et ensuite au "client 2" pour générer le guide haptique.



(a) Partie matérielle de l'IHM



(b) Système de micromanipulation

FIG. 4.1 – Architecture matérielle de l'interface homme-machine.

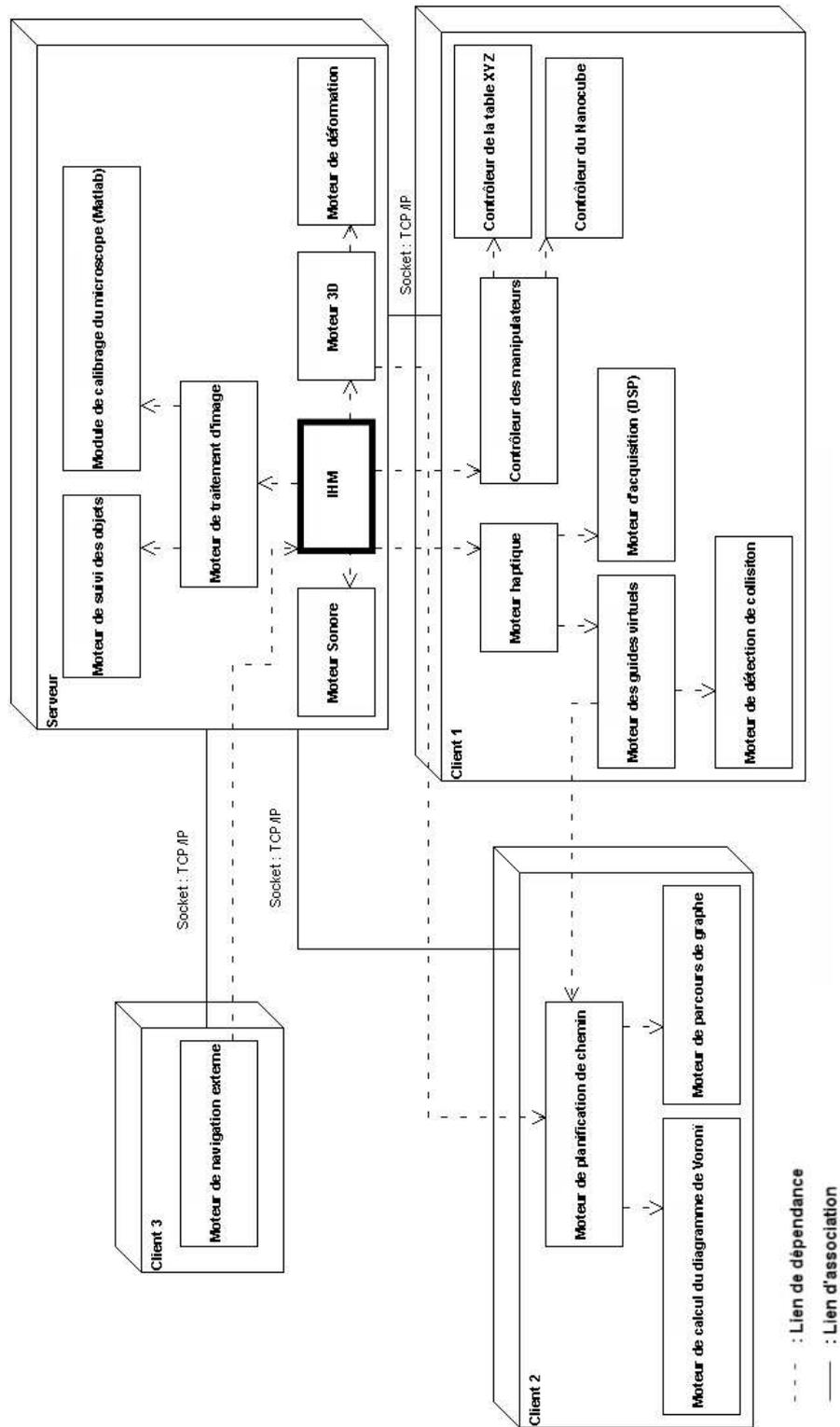


FIG. 4.2 – Diagramme de déploiement de l'IHM.

D. *Le client 3* : Contrairement aux nœuds précédents, le nœud client 3 n'a aucun rôle dans le fonctionnement de l'IHM. Il offre simplement à l'opérateur un moyen matériel pour accéder à la représentation 3D de la scène. Ainsi, ce nœud permet par exemple, à un expert de superviser visuellement les opérations de micromanipulation à partir d'un site local ou distant.

4.2.3 Stratégies de micromanipulation

Afin de valider l'IHM proposée, nous avons retenu deux stratégies de micromanipulation : 1) la manipulation par adhésion et 2) la manipulation par poussée.

4.2.3.1 Micromanipulation par adhésion

Cette stratégie consiste à utiliser les forces d'adhésion (essentiellement les forces de capillarité) entre le microlevier AFM et l'objet pour accomplir la tâche de préhension. La préhension n'est possible que dans le cas où les microforces d'adhésion à l'interface substrat/objet sont inférieures à celles de l'interface pointe AFM/objet. La micromanipulation par adhésion comporte principalement trois phases [HALIYO ET AL., 2005] (voir figure 4.3) :

- saisie du micro-objet par l'intermédiaire des microforces d'adhésion ;
- déplacement du micro-objet vers sa destination finale ;
- dépose sur le substrat et lâcher du micro-objet par l'intermédiaire d'une forte accélération du microlevier.

Pour que les microbilles puissent être facilement localisées par le module de traitement d'image lors de la phase de déplacement, celles-ci sont surélevées d'une distance inférieure à la profondeur de champ de l'objectif utilisé (soit $91.0\mu\text{m}$ de profondeur pour un objectif $\times 2$).

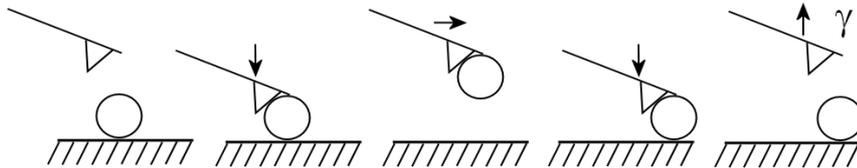


FIG. 4.3 – Manipulation par adhésion (γ correspond à une accélération).

4.2.3.2 Micromanipulation par poussée

C'est l'une des stratégies de manipulation 2D les plus faciles à mettre en œuvre. Elle consiste à déplacer un micro-objet, d'un point à un autre, par une succession de poussées en utilisant le microlevier AFM [ZESCH ET FEARING, 1998]. Ce schéma de manipulation ne requiert aucune contrainte pour la localisation des microbilles, celles-ci n'étant jamais cachées par l'effecteur terminal et toujours situées dans le plan focal de l'objectif. La manipulation par poussée comporte principalement deux phases (voir figure 4.4) :

- Phase d'approche du microlevier AFM jusqu'au point de contact avec le micro-objet ;
- Phase de poussée le long du substrat jusqu'à la destination.

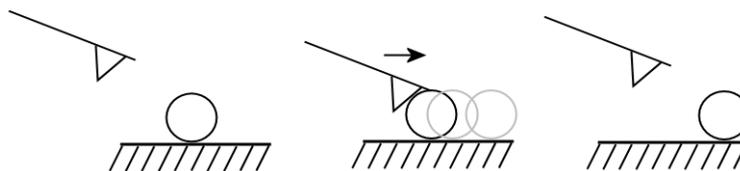


FIG. 4.4 – Manipulation par poussée.

4.2.4 Conditions expérimentales

Les étapes de micromanipulation sont supposées se dérouler dans des conditions atmosphériques dites classiques, c'est-à-dire lorsque le taux d'humidité et la température ambiante sont respectivement fixés à 50% et 20°C . Les tâches de micromanipulation à réaliser consistent à déplacer plusieurs microbilles d'un point à un autre suivant les stratégies de manipulation développées précédemment. Les microbilles utilisées (polystyrène) sont déposées sur un substrat en aluminium et possèdent deux diamètres différents, à savoir $50.0\mu\text{m}$ et $20.3\mu\text{m}$. Nous déposons également sur ce substrat des particules de poussière afin de simuler la présence d'obstacles durant les phases de micromanipulation.

4.2.5 Sujets

Les expérimentations ont été menées sur une population de huit personnes composée d'étudiants et de membres du laboratoire, tous âgés entre 22 et 44 ans. Aucun des candidats évalués n'avait de compétences particulières en micromanipulation avant les séances d'essais. Les différentes expériences duraient environ cinq heures par sujet. Le protocole expérimental débutait d'abord par une explication du contexte général de la micromanipulation, puis au fur et à mesure, des explications leurs étaient fournies sur les expériences à mener. Les scénarios d'essais se déroulaient sous forme d'une série de couples de tests, comme par exemple : une expérience était tout d'abord menée sans aucune aide extérieure, puis une aide était apportée au candidat par un opérateur expérimenté. Chaque expérience était précédée d'une courte période d'entraînement, n'excédant jamais les 5 minutes (2 à 3 minutes en moyenne). Pendant ce court laps de temps, le sujet évaluait le système de télé-micromanipulation afin de planifier ses gestes avant de débiter l'expérience.

4.3 Évaluation des performances

La présentation des différents scénarios d'expérimentation a été organisée en deux grandes parties. La première regroupe les expérimentations menées pour l'évaluation des performances de l'opérateur durant les différentes phases de télé-micromanipulation. La deuxième partie regroupe les expérimentations réalisées pour l'évaluation des différentes stratégies d'immersion et de navigation.

L'évaluation des performances de l'opérateur a fait l'objet de trois types de mesures : 1) un relevé des trajectoires et des vitesses au cours des opérations, 2) une mesure du temps d'exécution de la tâche, et 3) une note d'appréciation donnée par l'opérateur à la fin des opérations. L'évaluation de la deuxième partie des expérimentations se base principalement sur les appréciations et les commentaires de chaque opérateur.

4.3.1 Étude du geste durant la phase d'approche du micro-effecteur

4.3.1.1 Évaluation de l'apport de la vue 3D

A. **Objectifs** : L'objectif de cette étude concerne l'évaluation de l'apport de la représentation tridimensionnelle (3D), par rapport à une vue classique issue d'un moniteur connecté à un microscope optique, pendant l'exécution du geste opératoire. Cette première étude concerne la phase d'approche de l'effecteur terminal jusqu'au contact avec une microbille. Cette phase d'approche est identique pour les deux stratégies de micromanipulation décrites précédemment.

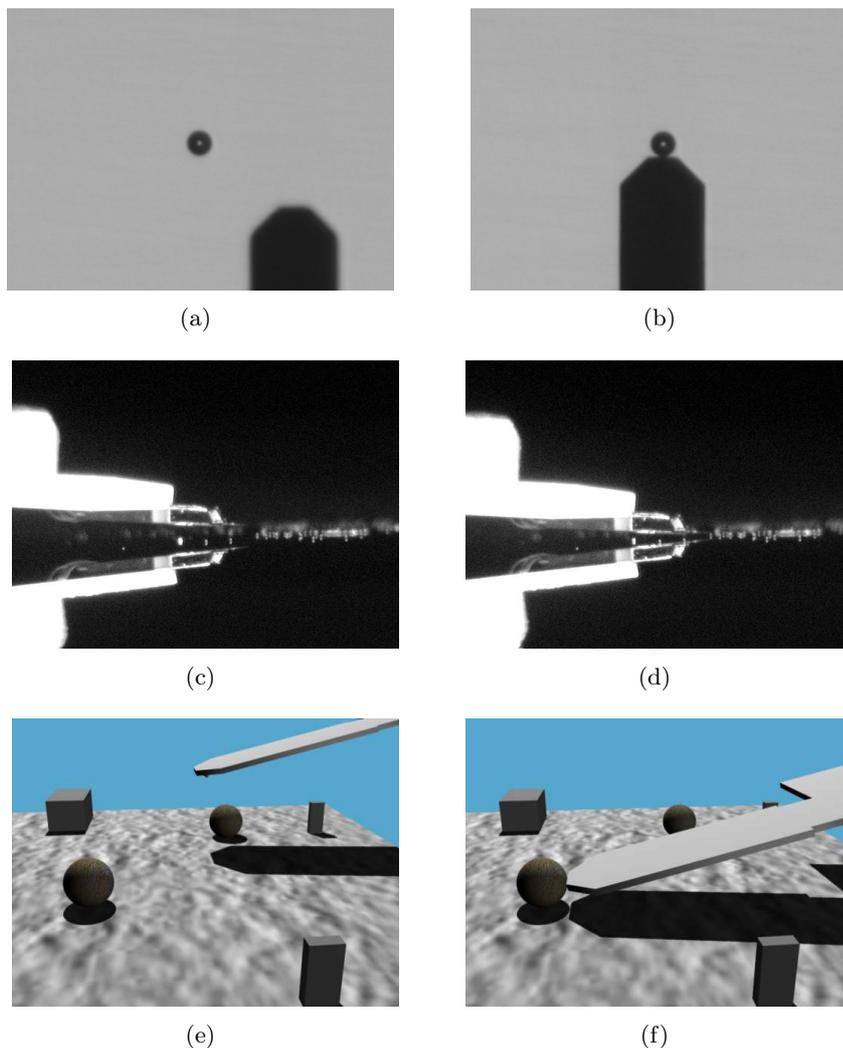


FIG. 4.5 – Phase d'approche : (a) et (b) images issues du microscope frontal, (c) et (d) images issues du microscope latéral, (e) et (f) images issues de la scène virtuelle.

B. **Procédure** : Cette étude a nécessité la mise en place de deux bancs d'essai. Le matériel expérimental utilisé est composé de deux écrans de 21pouces qui servent de support pour la visualisation de la scène de micromanipulation. Le périphérique d'entrée utilisé est une interface haptique PHANTOM. Le premier banc d'essai offre à l'opérateur les conditions classiques de micromanipulation (voir les figures 4.5(a), 4.5(b), 4.5(c) et 4.5(d)). L'opérateur

est assis face aux deux écrans et visualise les images retournées par les microscopes frontal et latéral. Le deuxième banc d'essai repose sur l'IHM développée et propose à l'opérateur une représentation 3D du micro-environnement sur un des écrans (voir les figures 4.5(e) et 4.5(f)). L'opérateur dispose également de moyens de navigation. Il faut noter que dans les deux cas cités, le retour visuel est complété par un retour haptique basé sur le capteur d'effort du microlevier AFM.

Dans cette première étude, la manipulation consiste à déplacer l'effecteur terminal d'une configuration initiale, située à une certaine distance et une certaine hauteur de la microbille, vers une configuration finale au contact de la microbille. Dès que l'effecteur atteint la microbille, la condition d'arrêt de l'expérience est validée.

C. Résultats :

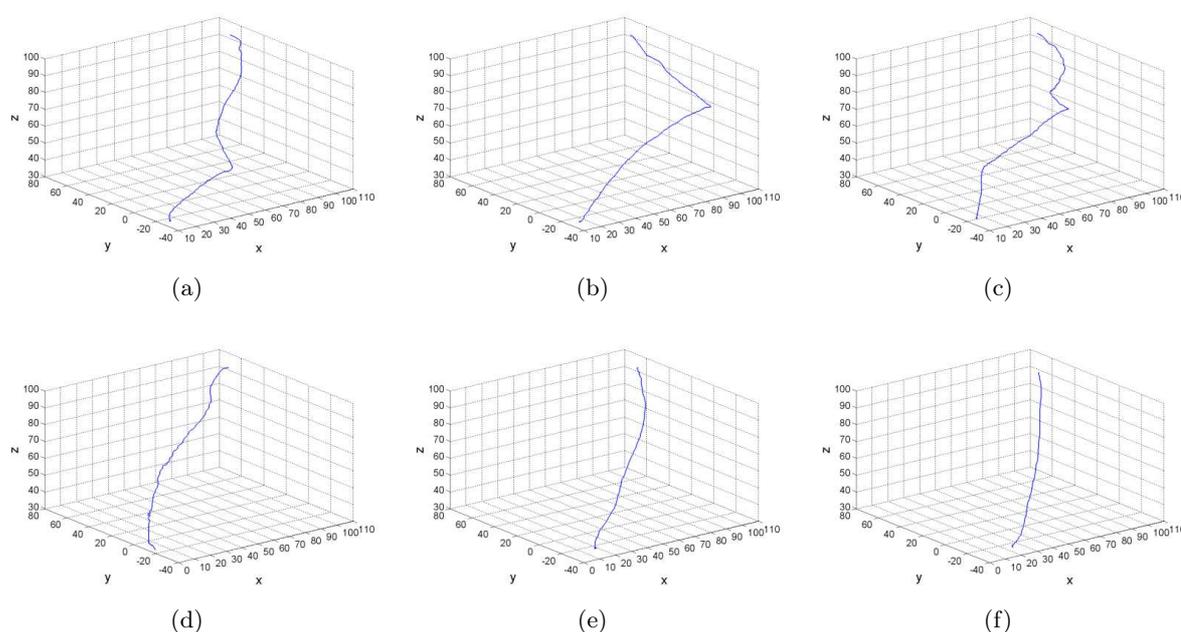


FIG. 4.6 – Trajectoires du bras maître pour trois opérateurs différents : 1) en utilisant les vues issues des microscopes (a), (b) et (c) et 2) en utilisant la représentation 3D du microenvironnement (e), (f) et (g).

Les figures 4.6(a), 4.6(b) et 4.6(c) montrent successivement les trajectoires typiques du bras maître dans le cas où l'opérateur utilise les vues issues des microscopes. On remarque que le geste de l'opérateur se décompose essentiellement en deux phases. La première consiste à déplacer l'effecteur dans le plan horizontal, afin de rapprocher le microlevier de la microbille dans le plan Oxy , et ceci, en utilisant principalement la vue du microscope frontal. La seconde phase du geste consiste à déplacer la pointe dans le plan vertical Ozx afin d'abaisser le microlevier au niveau de la microbille. L'opérateur utilise principalement le retour haptique pour ressentir le moment de contact avec la microbille (mode épistémique). La vue issue du microscope frontal lui permet essentiellement d'améliorer le positionnement horizontal de l'effecteur. Cette décomposition du geste de l'opérateur se remarque clairement sur les courbes d'évolution des vitesses (figures 4.7(a), 4.7(b) et 4.7(c)). Le mouvement du bras maître comporte là aussi deux paliers : le premier correspond à la première étape du mouvement où l'on peut remarquer une phase d'accélération, puis une phase de décélération dans le plan

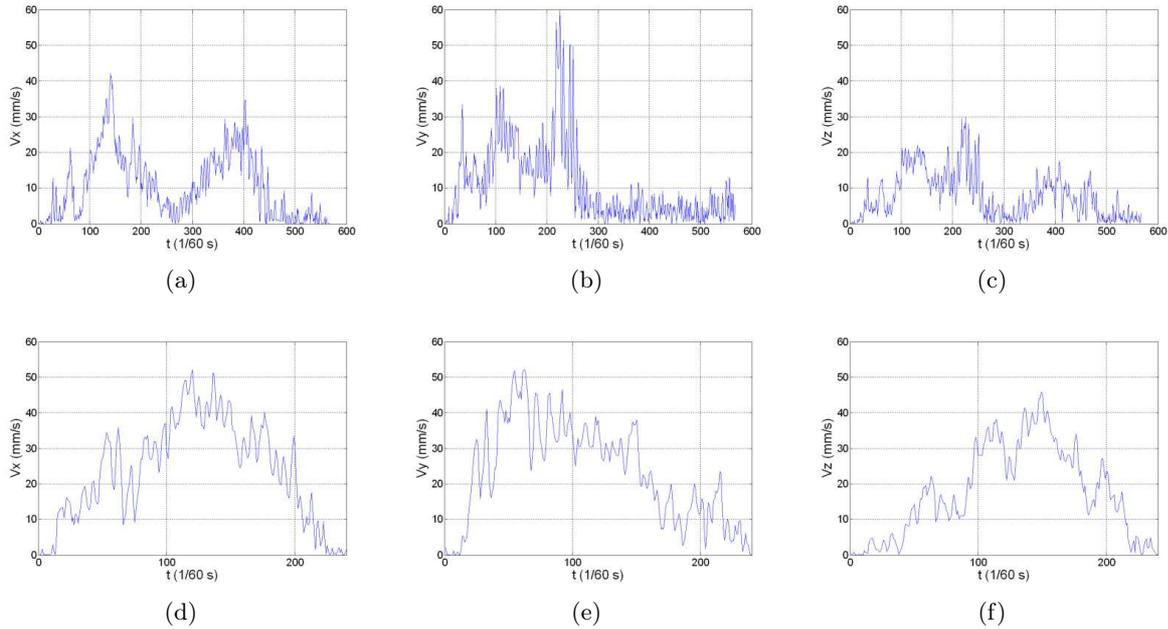


FIG. 4.7 – Évolution de la vitesse du bras maître suivant les trois axes pour un opérateur : 1) en utilisant les vues issues des microscopes (a), (b) et (c) et 2) en utilisant la représentation 3D du micro-environnement (e), (f) et (g).

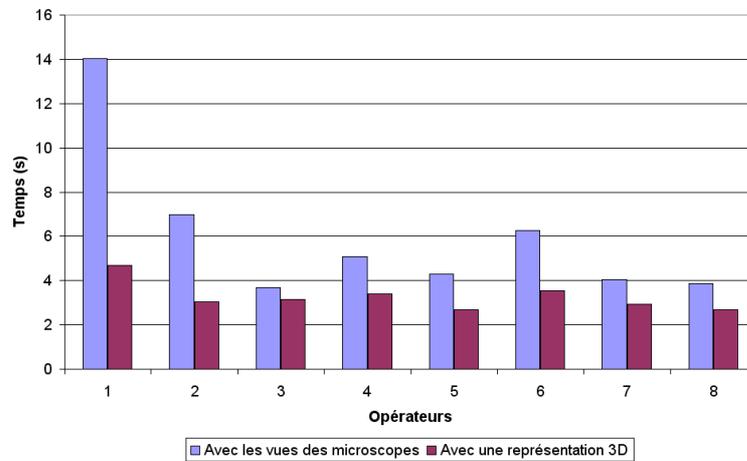


FIG. 4.8 – Temps d'exécution pour la réalisation de la phase d'approche.

Oxy. La deuxième partie du geste est caractérisée par de faibles vitesses suivant l'axe y . Les vitesses v_x et v_z correspondent ici au mouvement d'ajustement dans le plan Oxz

Les figures 4.6(d), 4.6(e) et 4.6(f) montrent les trajectoires du bras maître lorsque l'opérateur utilise la représentation 3D du micro-environnement. On remarque que le geste de l'opérateur est plus direct et mieux maîtrisé que dans le cas précédent. L'évolution des vitesses (figures 4.7(d), 4.7(e) et 4.7(f)) montre un mouvement relativement homogène suivant les trois axes. Il est composé pour les trois axes, d'une phase d'accélération correspondant au début du geste et d'une phase de décélération correspondant à la fin du mouvement. Les courbes d'évolution

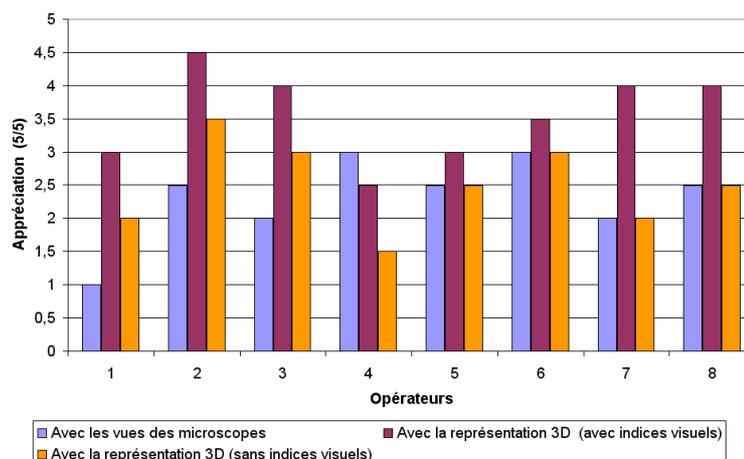


FIG. 4.9 – Notes d’appréciation pour la réalisation de la phase d’approche.

des vitesses montrent par ailleurs un taux de tremblement physiologique moins important que dans le cas précédent. Le gain obtenu sur le temps d’exécution de la tâche en utilisant une représentation 3D est notable (figure 4.8). Cette figure nous renseigne également sur le fait que les opérateurs ne sont pas tous égaux devant l’utilisation des vues des microscopes. En effet, les temps d’exécution varient fortement entre deux types d’opérateurs (de 3,68s à 14,03s), ce qui peut s’expliquer par les difficultés rencontrées par les opérateurs à effectuer une représentation mentale de la scène de manipulation. Les temps d’exécution sont toutefois plus homogènes dans le cas de l’utilisation d’une représentation tridimensionnelle (3D) (temps d’exécution de la tâche allant de 2,68s à 4,69s).

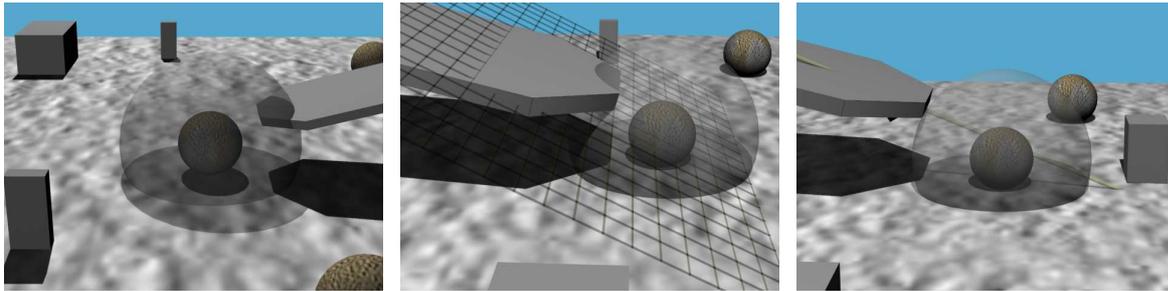
Enfin, la figure 4.9 donne les appréciations des opérateurs. On remarque la différence significative de notation entre l’utilisation d’images réelles issues des microscopes et la représentation 3D. Ces notes corroborent les résultats précédents dans le sens où elles reflètent l’importance d’une représentation 3D pour la maîtrise des mouvements de l’opérateur. Des essais complémentaires ont permis de montrer que l’absence de certains indices visuels comme l’ombre et les textures rendait difficile le positionnement de l’effecteur durant la phase d’approche. L’ombre portée de l’effecteur a permis aux utilisateurs d’inférer à la fois la position et la hauteur (absolues et relatives) de l’effecteur dans la scène. D’autre part, l’utilisation d’indices comme les textures, l’interposition, la parallaxe de mouvement, etc. a révélé leur importance au niveau de la qualité des trajectoires d’approches.

4.3.1.2 Évaluation de l’apport des guides virtuels

A. **Objectifs** : Après avoir étudié l’apport de la représentation 3D de la scène durant la phase d’approche de l’effecteur, nous allons nous intéresser cette fois-ci à démontrer l’intérêt des guides virtuels, ainsi que leurs répercussions sur les performances du geste de l’opérateur. La session expérimentale étudiée reste identique à la précédente. Les guides virtuels étudiés dans cette section sont ceux présentés au chapitre 3, à savoir :

- (a) Champs de potentiel haptiques :
 - Champs de potentiel atténuateurs de mouvements ;

- Champs de potentiel atténuateurs de mouvements avec une composante répulsive.
- (b) Champs de potentiel sonores.
- (c) Contraintes sur le mouvement :
 - Contrainte plane ;
 - Contrainte rectiligne.



(a) Champ de potentiel visuel et haptique
 (b) Champ de potentiel visuel et haptique et guide plan
 (c) Champ de potentiel visuel et haptique et guide rectiligne

FIG. 4.10 – Guides virtuels utilisés durant la phase d’approche.

- B. **Procédure** : Le dispositif expérimental utilisé pendant cette série d’expériences intègre la représentation 3D du micro-environnement ainsi que les différents guides virtuels dédiés à l’assistance de l’opérateur durant la phase d’approche (voir la figure 4.10). L’opérateur utilise un écran de 21pouces comme support pour la visualisation de la scène et des guides virtuels. Le périphérique d’entrée utilisé est une interface haptique PHANTOM. La manipulation consiste comme précédemment à déplacer l’effecteur terminal d’une configuration initiale jusqu’au point de contact avec la microbille à déplacer. Les expérimentations sont menées dans le même ordre chronologique qu’indiqué ci-dessus.
- C. **Résultats** : La figure 4.11 représente les courbes d’évolution des vitesses du bras maître suivant les trois axes de l’espace (x, y, z) en utilisant des guides virtuels. Les figures 4.11(a), 4.11(b) et 4.11(c) correspondent à l’utilisation d’un champ de potentiel uniquement sonore (sans aucun champ répulseur). On remarque ici, qu’après une courte période d’accélération correspondant à l’étape de rapprochement de l’effecteur du champ de potentiel, l’opérateur commence à diminuer progressivement sa vitesse jusqu’au point de contact. Les figures 4.11(d), 4.11(e) et 4.11(f) montrent que dans le cas de l’utilisation d’un champ de potentiel atténuateur de mouvement, le mouvement de l’opérateur est freiné par le guide virtuel ($80 > t > 90$). Nous remarquons également que les vitesses atteintes dans ce deuxième cas sont relativement importantes : $50mm/s$ dans le cas d’un champ de potentiel sonore et $140mm/s$ dans le cas d’un champ de potentiel atténuateur de mouvement. Ceci explique le gain en temps d’exécution obtenu avec ce deuxième guide (figure 4.12). Les trois dernières figures (figures 4.11(g), 4.11(h) et 4.11(i)) montrent que l’ajout d’une force répulsive au champ de potentiel atténuateur n’influe pas le comportement de l’opérateur : l’opérateur accélère dans un premier temps puis son mouvement est freiné par le guide. La différence réside dans les accélérations et les vitesses atteintes durant la première phase du mouvement (avant le contact avec le champ de potentiel). Celles-ci sont plus importantes dans le cas d’une force répulsive additionnelle, de l’ordre de $200mm/s$. La figure 4.12 montre une légère

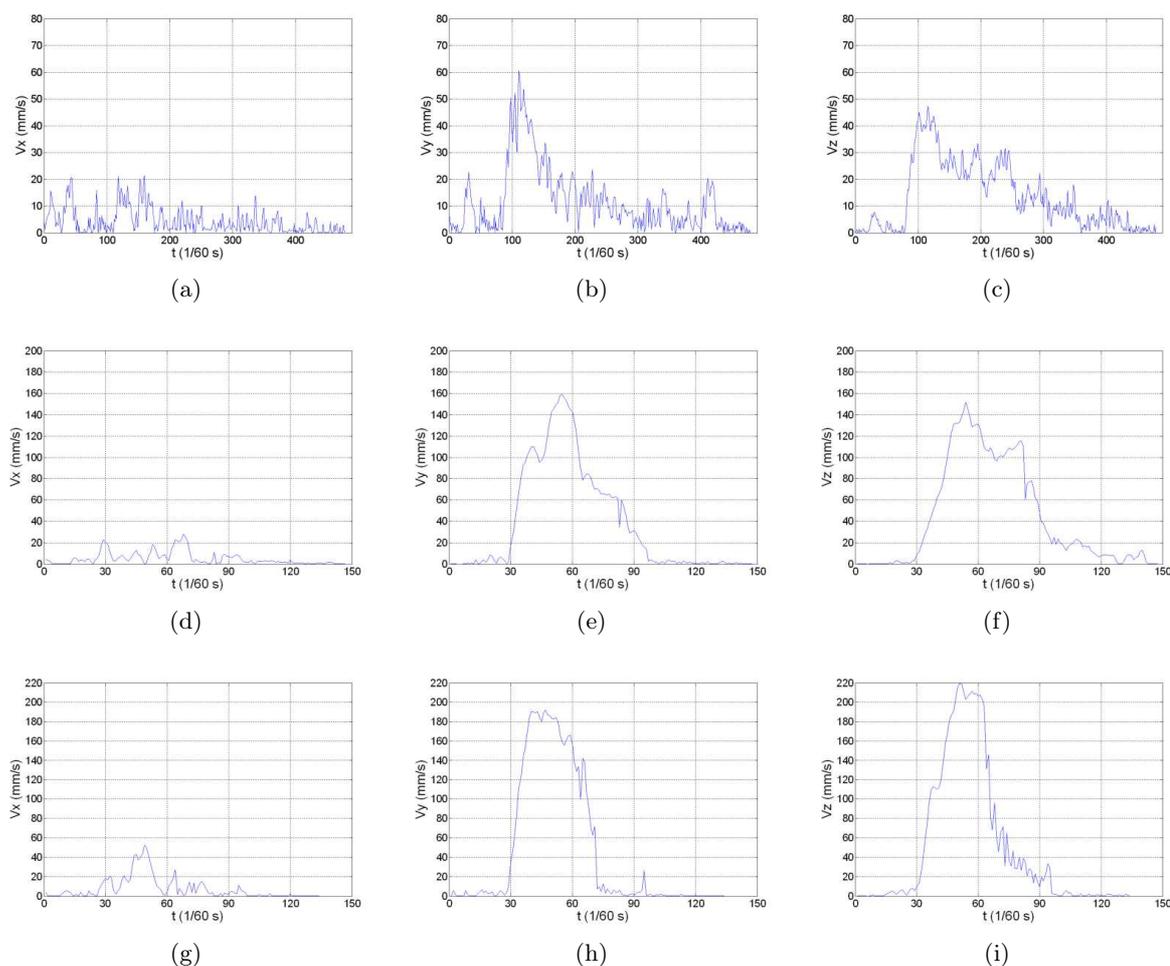


FIG. 4.11 – Évolution de la vitesse du bras maître suivant les trois axes en utilisant : 1) un champ de potentiel sonore (a), (b) et (c), et 2) un champ de potentiel atténuateur de mouvement (e), (f) et (g) et 3) un champ de potentiel atténuateur de mouvement avec une composante répulsive (g), (h) et (i).

amélioration du temps d'exécution de la tâche par rapport au guide atténuateur de mouvement. Il faut noter enfin, que les notes d'appréciation données par les différents candidats (figure 4.13) ne permettent pas de dégager des conclusions précises sur le choix apporté par les expérimentateurs.

Nous nous intéressons maintenant à l'évaluation expérimentale des guides virtuels. La figure 4.14 représente les différentes trajectoires dans le cas de l'utilisation de contraintes de mouvement sur le bras maître. Dans un premier temps, les résultats expérimentaux présentés par les figures 4.14(a), 4.14(b) et 4.14(c) sont réalisées sans contraintes sur le bras maître. On remarque que le geste de l'opérateur comporte des mouvements supplémentaires dans le plan transversal au geste efficace. Dans le cas de l'application d'une contrainte plane (voir figures 4.14(d), 4.14(e) et 4.14(f)), on remarque que ces mouvements sont contenus dans le plan de la contrainte, améliorant ainsi légèrement le geste de l'opérateur. Enfin, dans le cas de l'application d'une contrainte rectiligne (voir figures 4.14(g), 4.14(h) et 4.14(i)), le mouvement ne comporte plus que la composante utile du geste.

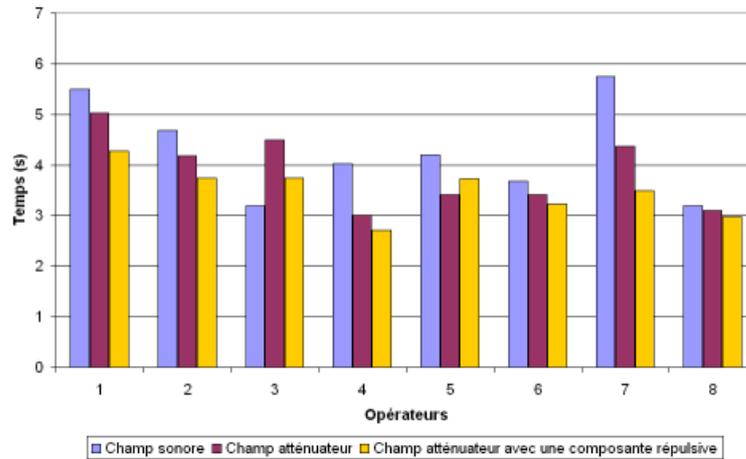


FIG. 4.12 – Temps d'exécution de la phase d'approche eu utilisant 1) un champ sonore, 2) un champ atténuateur et 3) un champ atténuateur avec une composante répulsive.

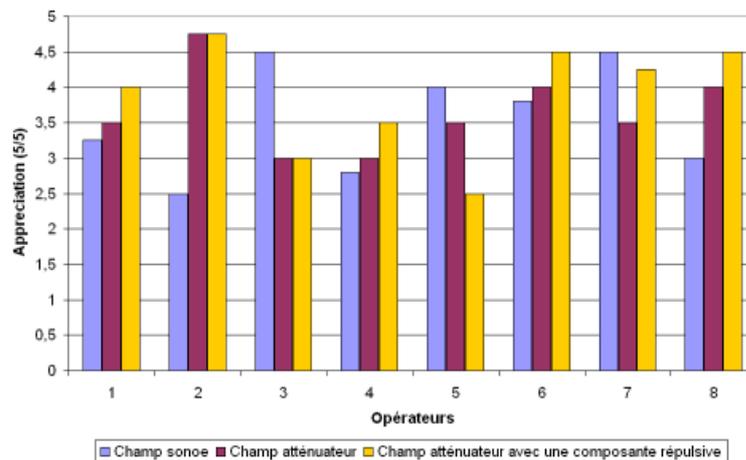


FIG. 4.13 – Notes d'appréciation pour la réalisation de la phase d'approche eu utilisant 1) un champ sonore, 2) un champ atténuateur et 3) un champ atténuateur avec une composante répulsive.

Les figures 4.15 et 4.16 montrent l'évolution des vitesses du bras maître respectivement dans le cas d'un mouvement contraint suivant un plan et contraint suivant une ligne. Dans les deux cas, nous avons réalisé des tests avec/sans champs de potentiel (champ atténuateur avec une composante répulsive). Dans le cas où le champ de potentiel est désactivé, le mouvement comporte principalement deux phases (voir les figures 4.15(a), 4.15(b) et 4.15(c) pour la contrainte plane et les figures 4.16(a), 4.16(b) et 4.16(c) pour la contrainte rectiligne). Durant la première phase, l'opérateur accélère pour rapprocher le micro-effecteur du champ de potentiel, puis durant la deuxième phase, l'opérateur diminue progressivement sa vitesse jusqu'au point de contact. Une fois le champ de potentiel activé (voir les figures 4.15(d), 4.15(e) et 4.15(f) pour la contrainte plane et les figures 4.16(d), 4.16(e) et 4.16(f) pour la contrainte rectiligne), nous remarquons que durant la deuxième phase le geste de l'opérateur est subi-

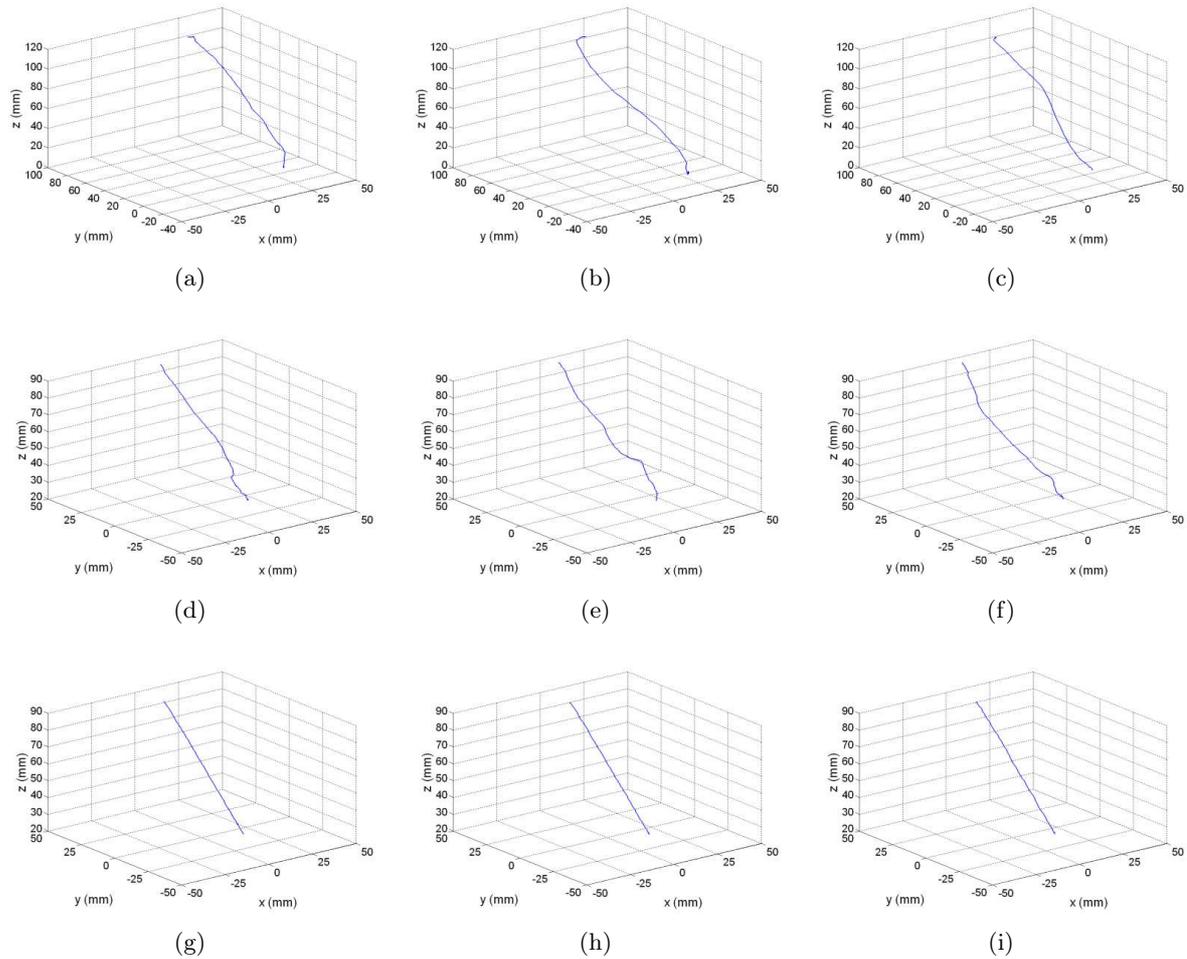


FIG. 4.14 – Trajectoires du bras maître en utilisant : 1) un champ de potentiel atténuateur sans contrainte sur le mouvement (a), (b) et (c) ; 2) une contrainte plane sur le mouvement (e), (f) et (g) et 3) une contrainte rectiligne sur le mouvement (g), (h) et (i).

tement freiné à partir d'un moment donné ($t \approx 150s$ pour la contrainte plane et $t \approx 90s$ pour la contrainte rectiligne). Nous remarquons par ailleurs que dans le cas de l'utilisation des champs de potentiels, les vitesses générées sont là aussi sensiblement plus importantes.

La figure 4.17 montre la différence en terme de temps d'exécution entre l'utilisation d'une contrainte plane et une contrainte rectiligne. Pour l'ensemble des candidats, le temps d'exécution est sensiblement réduit lors de l'utilisation d'une contrainte rectiligne. Les notes d'appréciation sont là aussi à l'avantage de la contrainte rectiligne, mais sans toutefois être très convaincant (figure 4.18).

4.3.1.3 Évaluation de alignement proprioceptif des transformations motrices

A. **Objectifs** : L'objectif de cette expérimentation est de mesurer la différence de performances entre avant et après la mise en correspondance des informations proprioceptives et visuelles durant le geste opératoire. L'étude expérimentale a été réalisée pour la phase d'approche dans les mêmes conditions expérimentales que celles décrites auparavant.

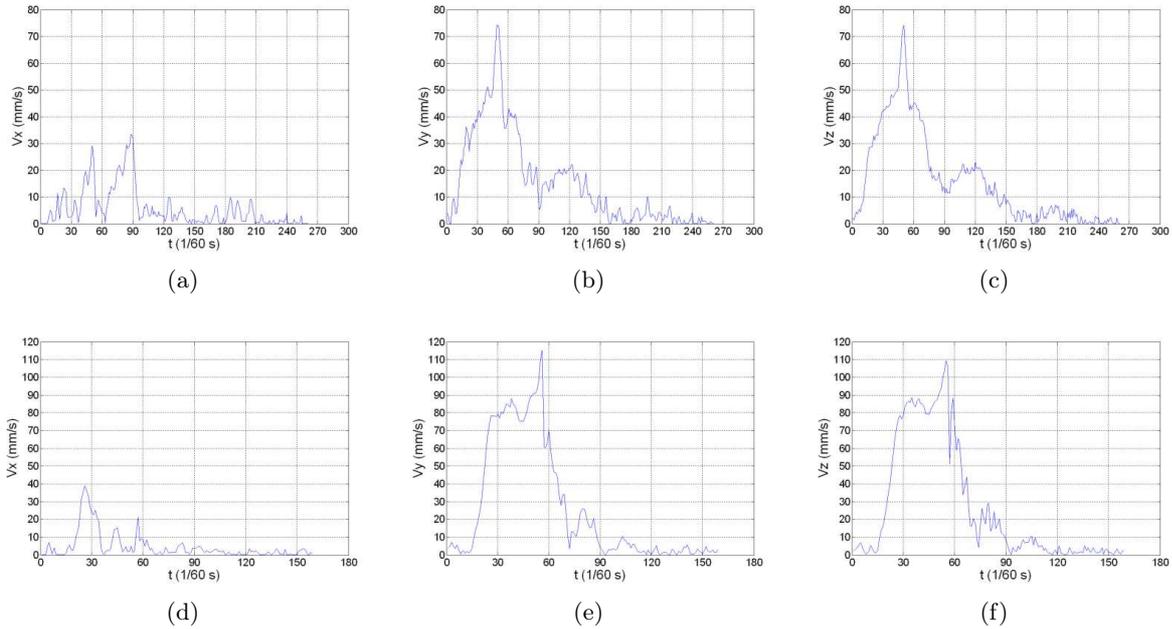


FIG. 4.15 – Évolution de la vitesse du bras maître suivant les trois axes en utilisant une contrainte plane : 1) sans champ de potentiel (a), (b) et (c) et 2) avec champ de potentiel (e), (f) et (g).

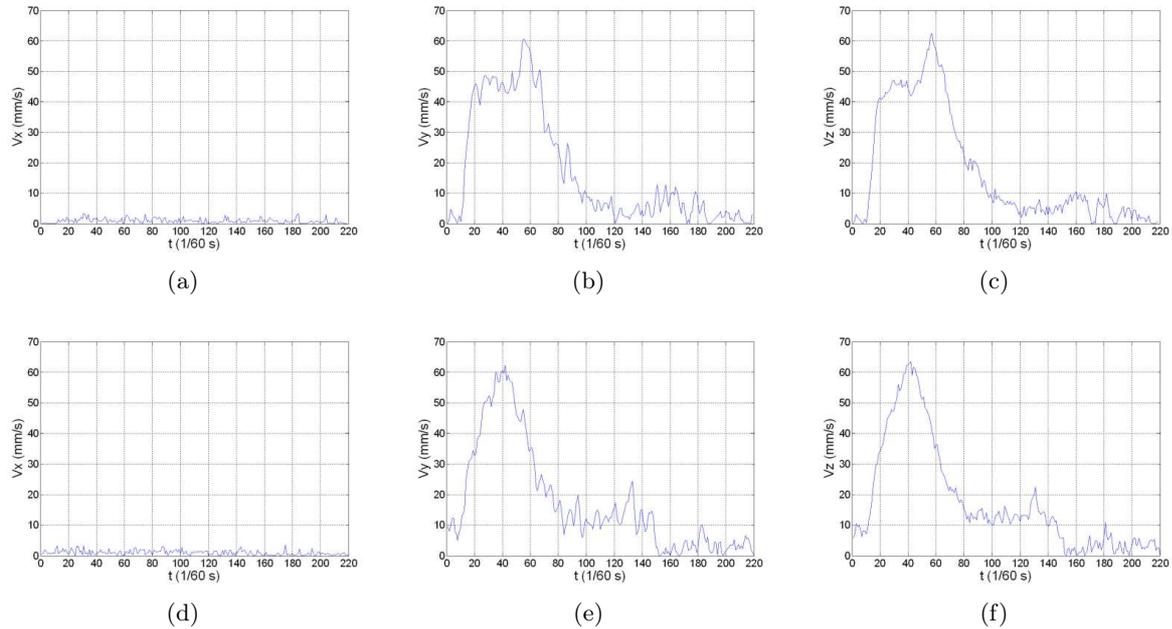


FIG. 4.16 – Évolution de la vitesse du bras maître suivant les trois axes en utilisant une contrainte rectiligne : 1) sans champ de potentiel (a), (b) et (c) et 2) avec champ de potentiel (e), (f) et (g).

B. Procédure : Les deux bancs d'essai utilisés pour cette expérimentation sont similaires aux précédents, nous n'utilisons pas cependant de guides virtuels. Un des bancs d'essai intègre toutefois les transformations géométriques nécessaires pour l'alignement proprioceptif des transformations motrices. Dans cette série d'expérimentations le point de vue de l'opérateur

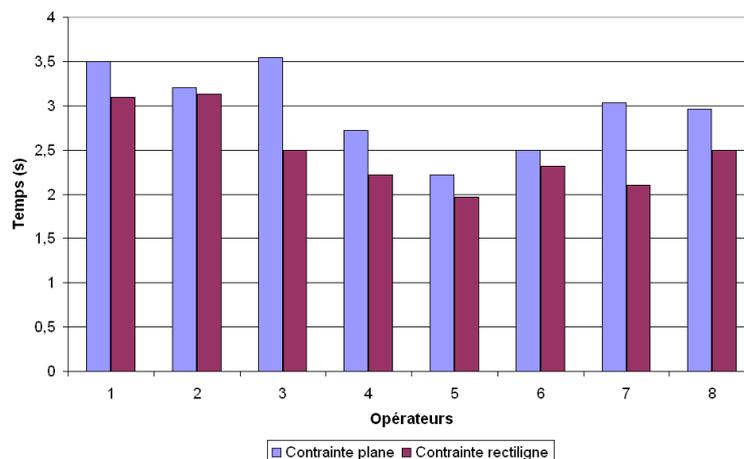


FIG. 4.17 – Temps pour la réalisation de la phase d’approche en utilisant : 1) une contrainte plane et 2) une contrainte rectiligne.

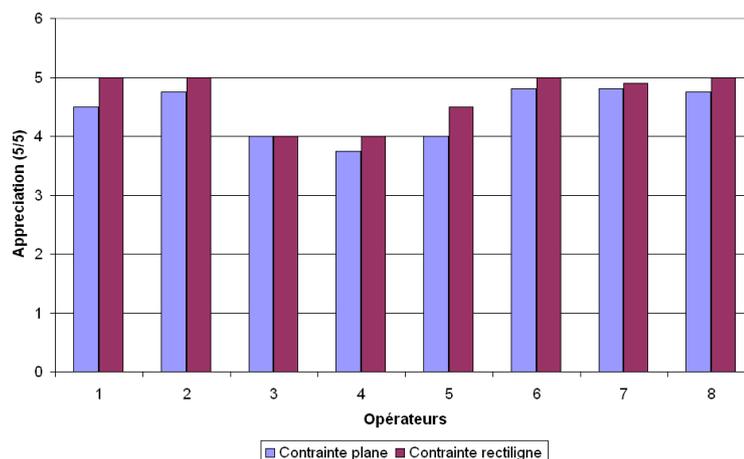


FIG. 4.18 – Notes d’appréciation pour la réalisation de la phase d’approche en utilisant : 1) une contrainte plane et 2) une contrainte rectiligne.

est fixe. La figure (4.19) montre la vue latérale de la scène proposée en perspective à l’opérateur. Nous offrons ainsi à celui-ci un cas classique de discordance entre les informations proprioceptives et visuelles. De manière identique aux expériences précédentes, l’opérateur doit déplacer l’effecteur terminal d’une configuration initiale jusqu’au contact avec une microbille.

C. Résultats : Les figures 4.20(a), 4.20(b) et 4.20(c) montrent des trajectoires du bras maître en cas d’absence d’alignement proprioceptif des repères. Ces courbes montrent clairement l’intérêt de cette aide durant le geste opératoire. La figure 4.21 montre d’une part, les pertes en terme de temps d’exécution en l’absence d’alignement et d’autre part, le fait que tous les opérateurs n’ont pas les mêmes aptitudes face à ce type de discordance. Cette dernière remarque découle du fait que la différence des temps d’exécution (avec et sans alignement

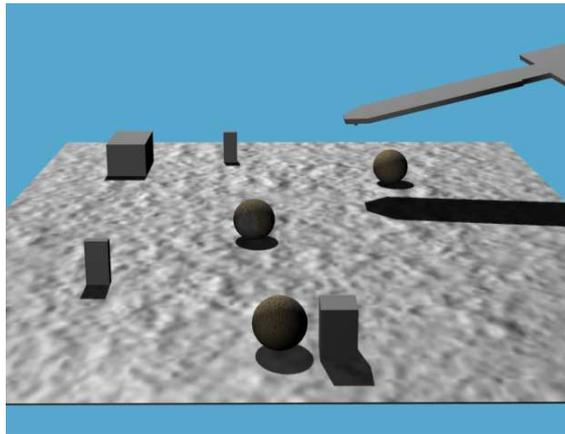


FIG. 4.19 – Vue proposée à l'opérateur.

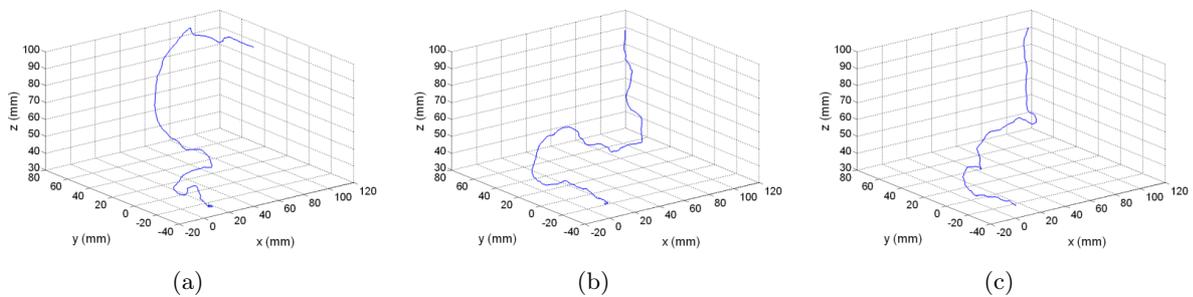


FIG. 4.20 – Trajectoires du bras maître dans le cas où on utilise pas d'alignement proprioceptif.

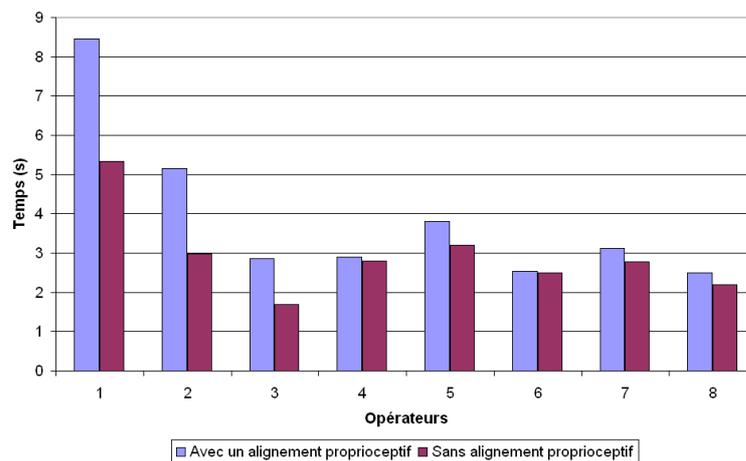


FIG. 4.21 – Temps pour la réalisation de la phase d'approche 1) avec un alignement proprioceptif et 2) sans alignement proprioceptif.

proprioceptif) entre opérateurs est beaucoup trop importante pour être attribuée à un manque d'entraînement.

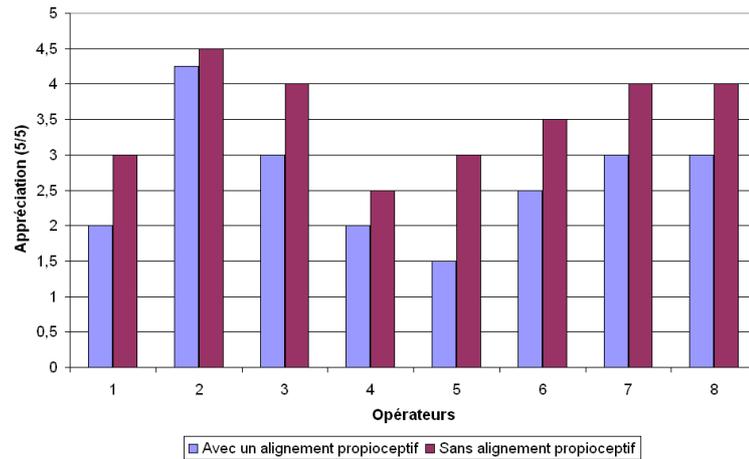


FIG. 4.22 – Notes d’appréciation pour la réalisation de la phase d’approche 1) avec un alignement proprioceptif et 2) sans alignement proprioceptif.

4.3.2 Étude du geste durant la phase de micromanipulation par poussée

4.3.2.1 Évaluation de l’apport de la vue 3D

A. **Objectifs** : Après s’être intéressé à l’apport de la représentation 3D durant la phase d’approche, nous allons étudier dans cette partie l’influence de ce type de représentation pendant la phase de déplacement d’une microbille.

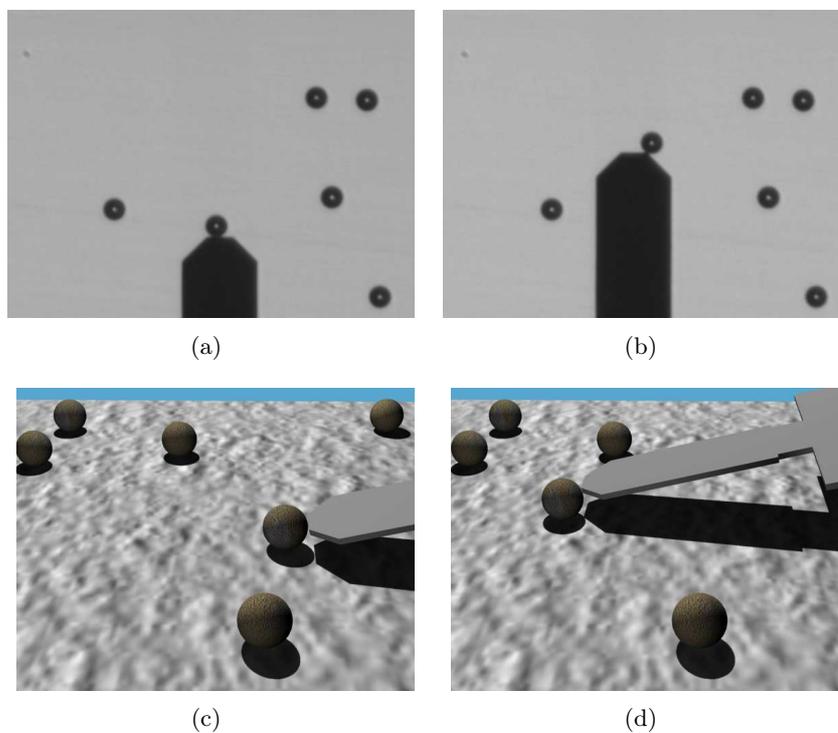


FIG. 4.23 – Étapes de manipulation par poussée.

B. Procédure : Cette étude utilise le même matériel expérimental que celui de la section 4.3.1.1. L'opérateur doit déplacer une microbille d'une position initiale à une position finale. Ces deux configurations sont préalablement définies et restent identiques pour l'ensemble des opérateurs. Le schéma de manipulation retenu pour cette étude est le déplacement par poussée. La microbille va être déplacée jusqu'à sa position finale en la poussant avec le microlevier AFM. Cette méthode de manipulation a été retenue compte tenu du fait que celle-ci présente des mouvements planaires plus complexes que ceux de la manipulation par adhésion. L'opérateur réalise la première série d'expériences à partir des vues issues des microscopes (voir les figures 4.23(a) et 4.23(b)), puis à partir de la représentation 3D du micro-environnement (voir les figures 4.23(c) et 4.23(d)). Les efforts de contact sont également retournés à l'opérateur pendant les deux sessions d'expérimentales.

C. Résultats : Les figures 4.24(a), 4.24(b) et 4.24(c) et les figures 4.24(d), 4.24(e) et 4.24(f)

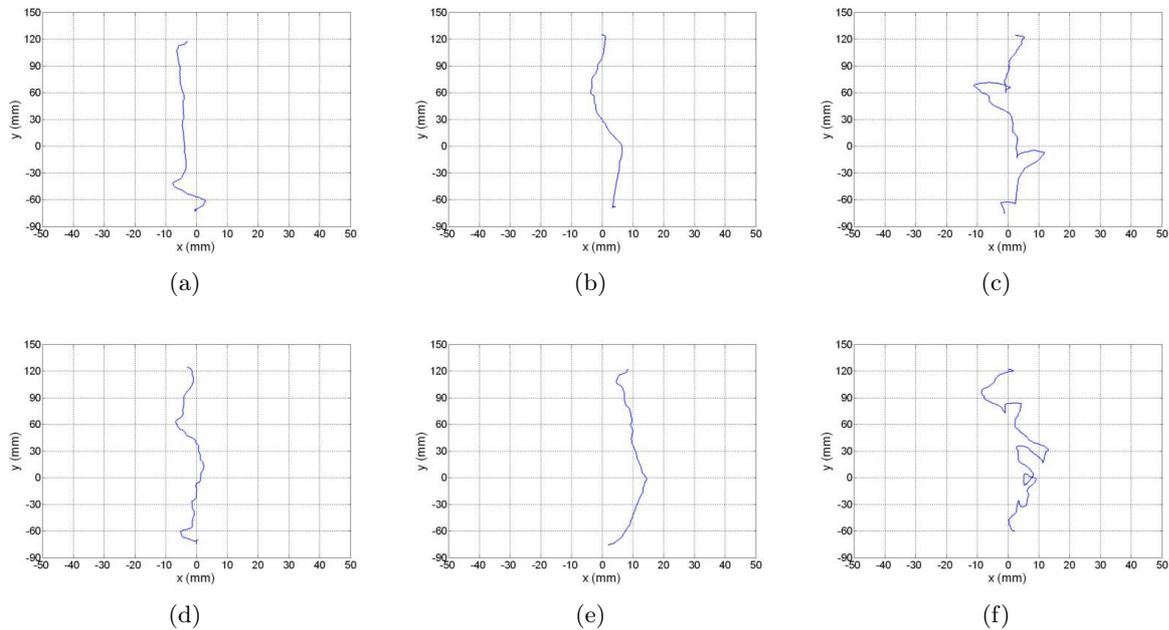


FIG. 4.24 – Trajectoires du bras maître en utilisant : 1) les vues des microscopes (a), (b) et (c) et 2) la représentation 3D du microenvironnement (d), (e) et (f).

montrent les trajectoires du bras maître durant la phase de poussée, dans le cas de l'utilisation des images des microscopes et dans le cas de l'utilisation de la représentation 3D de la scène, respectivement. Ces courbes montrent clairement qu'il n'y a pas une stratégie de poussée privilégiée, mais plutôt des stratégies propres à chaque expérimentateur. Sur cette base, on peut distinguer globalement deux stratégies : 1) une consistant à déplacer la microbille au cours d'une seule poussée et 2) une autre consistant à réaliser le déplacement total par une succession de poussées. La figure 4.25 marque un léger avantage en terme de temps d'exécution pour la micromanipulation utilisant les vues réelles des microscopes. Cette préférence est confirmée lorsque l'on prend en considération les notations des opérateurs (figure 4.26). Ceci peut être expliqué par le caractère beaucoup plus réaliste de la représentation visuelle compte tenu de la nature planaire des mouvements de micromanipulation. La notion de profondeur de champ de vue beaucoup moins importante.

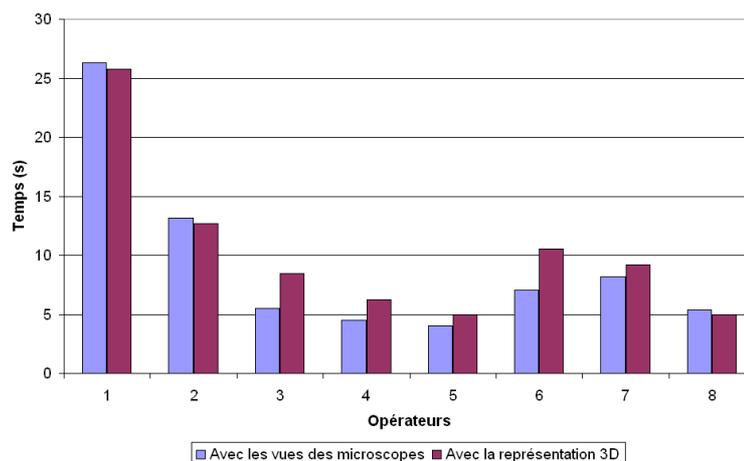


FIG. 4.25 – Temps d'exécution pour la réalisation de la phase de poussée avec : 1) les vues des microscopes et 2) la représentation 3D.

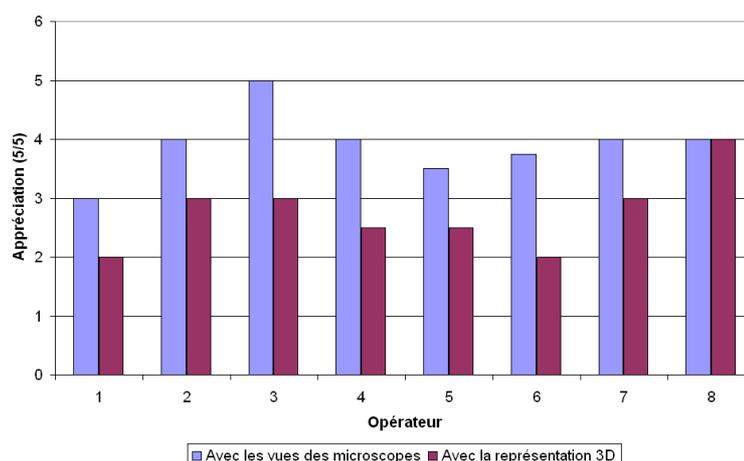


FIG. 4.26 – Notes d'appréciation pour la réalisation de la phase de poussée avec : 1) les vues des microscopes et 2) la représentation 3D.

4.3.3 Étude du geste durant la phase de micromanipulation par adhésion

4.3.3.1 Évaluation de l'apport des guides virtuels

- A. **Objectifs** : Nous allons dans cette section nous intéresser à la manipulation par adhésion assistée par des guides virtuels. L'objectif des expérimentations est de caractériser les différents guides proposés et ainsi de rechercher le guide le plus adapté à ce type de micromanipulation.
- B. **Procédure** : Le banc d'essai utilisé pour cette série de manipulations est basé sur l'IHM développée. Il offre d'une part, une représentation 3D du micro-environnement et d'autre part, les guides virtuels suivants (voir la figure 4.27 et le Chapitre III pour plus de détails) :

- (a) Champs de potentiel :

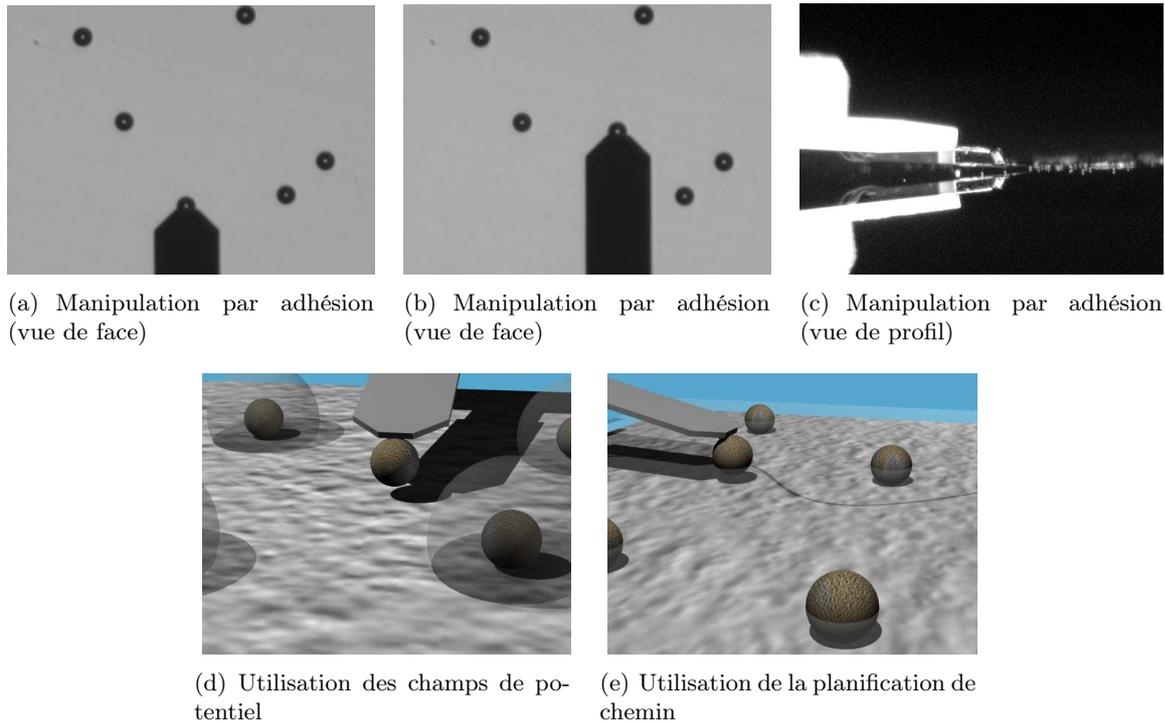


FIG. 4.27 – Micromanipulation par adhésion.

- Champs de potentiel visuels ;
 - Champs de potentiel haptiques répulsifs.
- (b) Trajectoire optimale par planification de chemin :
- Trajectoire affichée visuellement dans la représentation 3D ;
 - Trajectoire avec contraintes haptiques ;
 - Trajectoire rendue avec le mode sonore.

La phase de saisie de la microbille est supposée préalablement réalisée. L'opérateur doit donc simplement déplacer le micromanipulateur d'une position initiale à une position finale en évitant les obstacles présents dans la scène (microbilles, particules de poussières). Les configurations initiale et finale sont fixées avant le début des opérations, elles restent fixes pour l'ensemble des opérateurs. Les expérimentations se déroulent dans l'ordre de leurs définition (voir ci-dessus).

C. Résultats :

La figure 4.28 représente les trajectoires du bras maître durant la phase de déplacement de la microbille. Les figures 4.28(a), 4.28(b) et 4.28(c) correspondent à l'utilisation de la représentation uniquement visuelle du champ de potentiel. Dans ce cas, l'opérateur déplace l'effecteur terminal en évitant un contact géométrique entre la représentation de l'effecteur et les champs de potentiel liés aux obstacles. Dans le cas considéré, l'opérateur asservi visuellement son geste opératoire en se basant uniquement sur la représentation des champs. De ce fait, l'opérateur réajuste régulièrement la position de l'effecteur pour s'éloigner des champs de potentiel. Lorsque l'on rehausse les champs de potentiel par un retour de force répulsif, on constate que le geste de l'opérateur est mieux maîtrisé et plus direct (voir figures

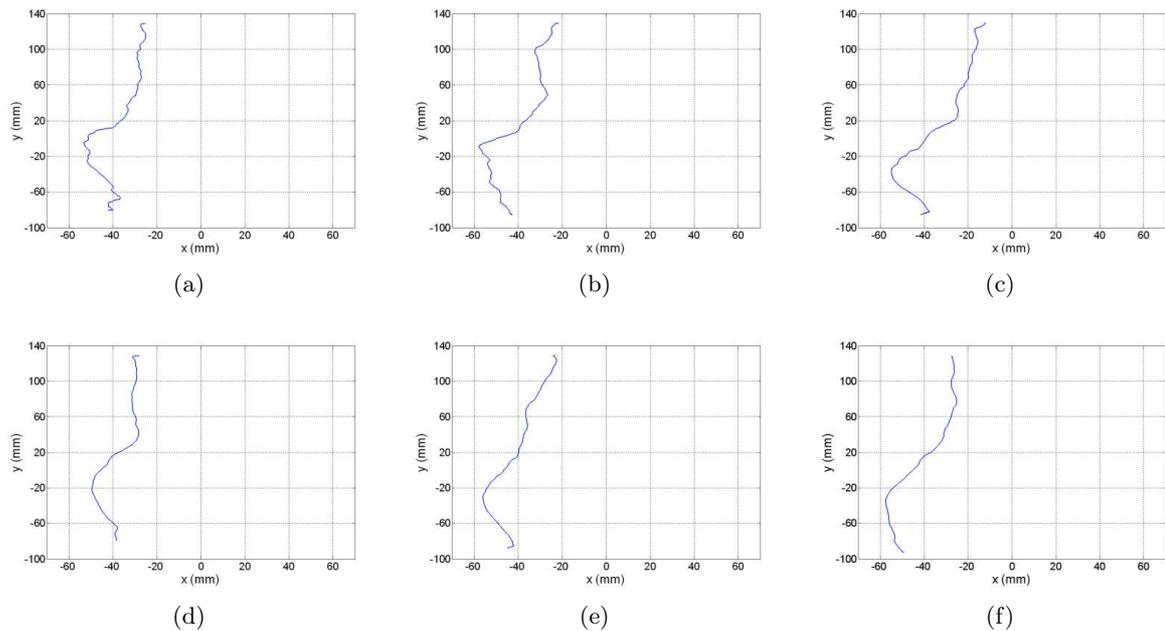


FIG. 4.28 – Trajectoires du bras maître en utilisant : 1) une représentation visuelle des champs de potentiel (a),(b) et (c) et 2) une représentation visuelle et haptique des champs de potentiel (d),(e) et (f).

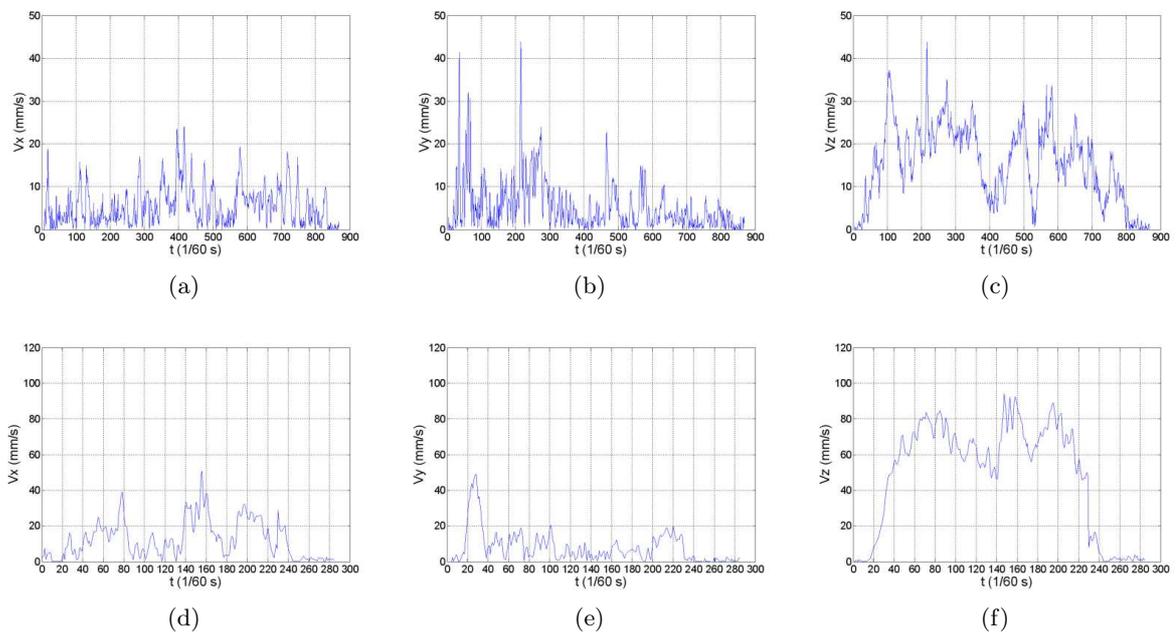


FIG. 4.29 – Évolution des vitesses en utilisant : 1) une représentation visuelle des champs de potentiel (a),(b) et (c) et 2) une représentation visuelle et haptique des champs de potentiel (d), (e) et (f).

4.28(d), 4.28(e) et 4.28(f)). Il comporte de ce fait beaucoup moins de réajustements que dans le cas précédent. Les courbes d'évolution des vitesses (figure 4.29) confirment ces premières

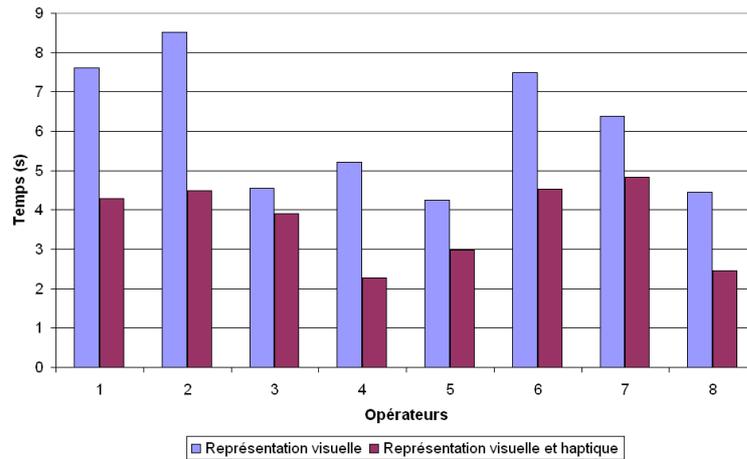


FIG. 4.30 – Temps d’exécution pour le déplacement d’une microbille par adhésion avec : 1) une représentation visuelle des champs de potentiels et 2) une représentation visuelle et haptique.

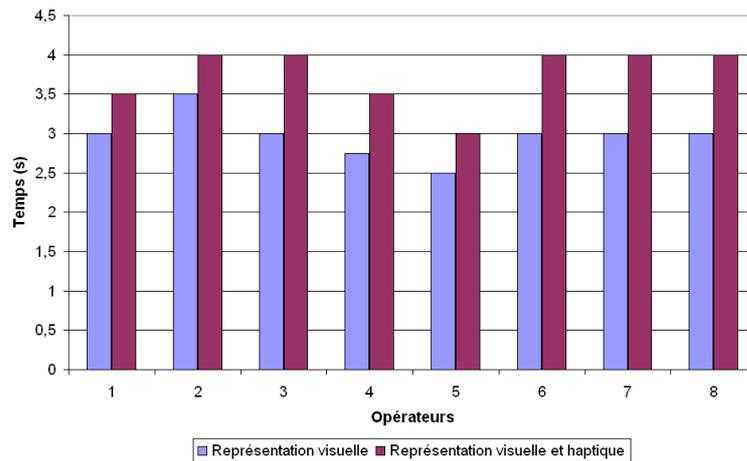


FIG. 4.31 – Notes d’appréciation pour le déplacement d’une microbille par adhésion avec : 1) une représentation visuelle des champs de potentiels et 2) une représentation visuelle et haptique.

constatations. On remarque que dans le cas de l’utilisation de la représentation visuelle uniquement (figures 4.29(a), 4.29(b) et 4.29(c)) le geste de l’opérateur est relativement long. Il comporte par ailleurs plusieurs séries d’accélération et de décélération, traduisant de ce fait un réajustement fréquent de la position de l’effecteur. À l’inverse, les courbes de vitesses dans le cas de l’utilisation d’un retour haptique (figures 4.29(d), 4.29(e) et 4.29(f)) indiquent un geste maîtrisé, l’opérateur n’étant plus inquiet par les distances effecteur/champs de potentiels. Les vitesses atteintes dans ce deuxième cas de figure sont plus importantes, de l’ordre de $v_z \approx 80\text{mm/s}$ par rapport à $v_z \approx 30\text{mm/s}$ dans le cas précédent. La figure 4.30 met l’accent sur le gain relativement important au niveau du temps d’exécution. Enfin, la figure 4.31 marque une nette préférence des opérateurs lors de l’utilisation des champs de potentiel visuels rehaussés par un retour haptique répulsif.

La figure 4.32 représente des trajectoires générées par l’opérateur en utilisant le module de

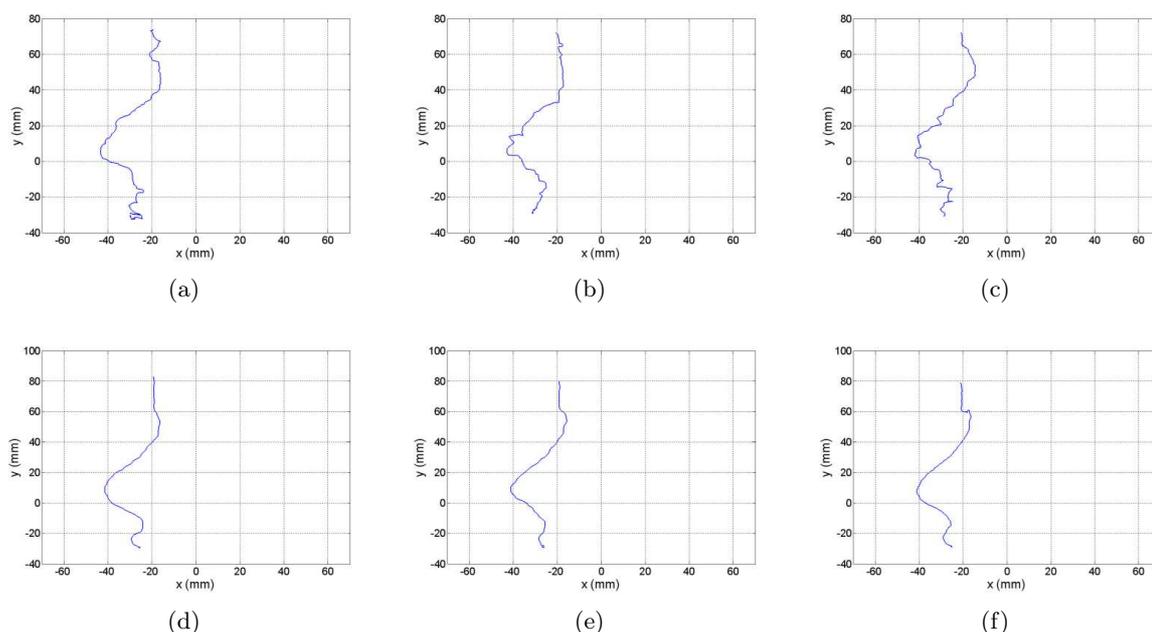


FIG. 4.32 – Trajectoires du bras maître en utilisant : 1) une représentation sonore du chemin optimal (a), (b) et (c) et 2) une représentation haptique du chemin optimal (d), (e) et (f).

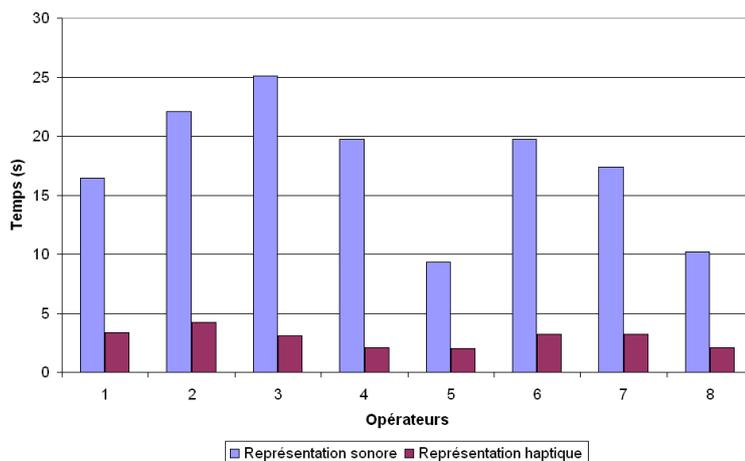


FIG. 4.33 – Temps pour le déplacement d'une microbille par adhésion avec : 1) une représentation visuelle chemin optimal et 2) une représentation haptique du chemin optimal.

planification de chemin. Les figures 4.32(a), 4.32(b) et 4.32(c) correspondent à l'utilisation d'une représentation sonore du chemin optimal, alors que les figures 4.32(d), 4.32(e) et 4.32(f) correspondent à l'utilisation d'une contrainte haptique. La première série de courbes montre bien la difficulté que rencontre l'opérateur à suivre le chemin optimal en utilisant le mode sonore. L'opérateur réajuste très fréquemment, à l'aide d'un son modulé en amplitude et en fréquence, la position de l'effecteur afin de ne pas s'éloigner du chemin optimal. Les trajectoires obtenues en utilisant une contrainte haptique sont plus lissées, le geste de l'opérateur étant entièrement guidé par le guide virtuel haptique. Par ailleurs, le temps d'exécution de

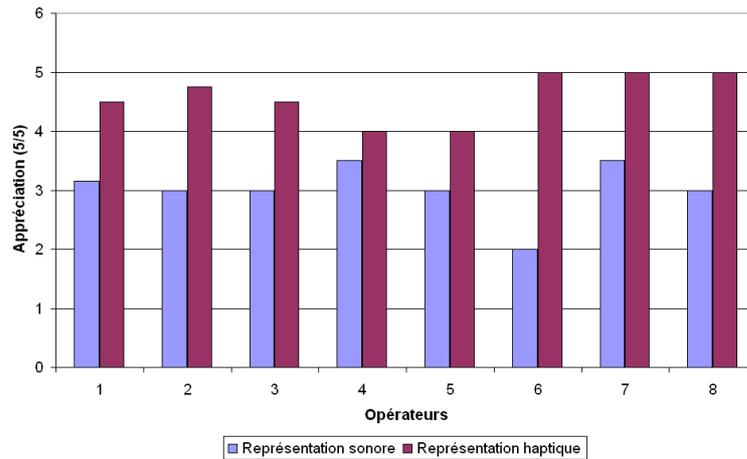


FIG. 4.34 – Notes d’appréciation pour le déplacement d’une microbille par adhésion avec : 1) une représentation visuelle chemin optimal et 2) une représentation haptique du chemin optimal.

la tâche et nettement moins important que dans le cas de l’utilisation du mode sonore (figure 4.33). La figure 4.34 marque une préférence générale pour la représentation haptique du chemin optimal.

4.3.4 Étude des moyens de navigation

A. **Objectifs** : Le but de cette étude est l’évaluation des différentes métaphores de contrôle de point de vue pour les trois fonctions principales de la navigation :

- Exploration ;
- Recherche ;
- Ajustement.

L’objectif final de l’étude est de trouver une méthode de navigation qui présente un bon compromis entre ces trois fonctionnalités.

B. **Procédure** :

Parmi les différentes métaphores de navigation intégrées à l’IHM, nous nous sommes concentrés sur l’étude des quatre techniques suivantes (voir la section 3.2.2 du chapitre 3 pour plus de détails) :

- Métaphore de la direction du regard (voir la figure 4.35(a)) ;
- Métaphore de la scène dans la main (voir la figure 4.35(b)) ;
- Métaphore de la caméra dans la main (voir la figure 4.35(c)) ;
- Métaphore de la caméra liée à la l’effecteur terminal (voir la figure 4.35(d)).

Pour chacune des métaphores étudiées, il est demandé à l’opérateur de réaliser des tâches bien précises. Nous permettons ainsi à l’opérateur d’apprécier d’une manière concise les trois fonctionnalités étudiées. Les opérations se déroulent comme suit. Dans un premier temps, il est demandé à l’opérateur d’explorer la scène, afin qu’il s’habitue aux moyens de navigation de l’IHM. Une fois cette étape terminée (à la demande de l’opérateur), il est demandé à

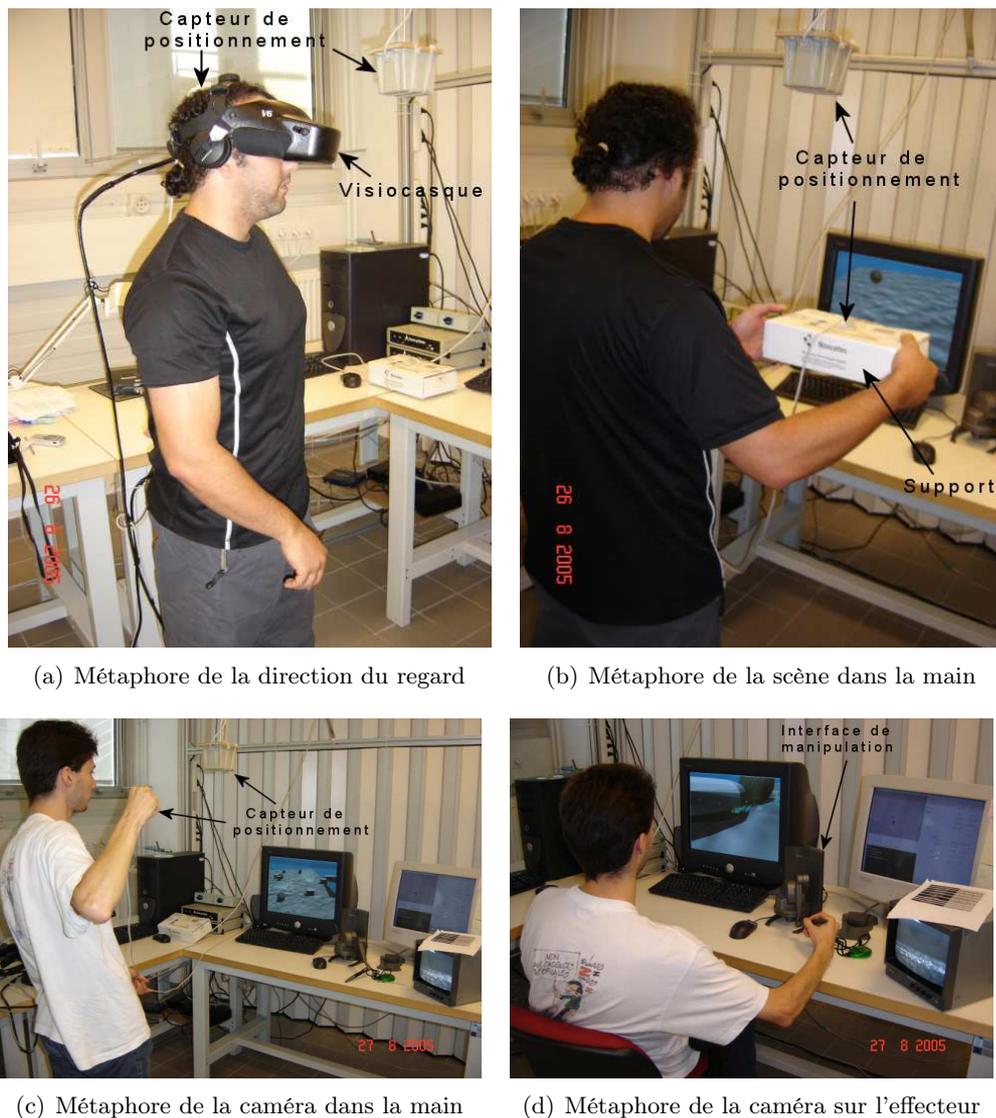


FIG. 4.35 – Métaphores de navigation proposées à l'opérateur.

l'opérateur de localiser un composant particulier dans la scène 3D (microbille ou particule de poussière). La dernière tâche demandée à l'opérateur consiste, au moyen des outils de navigation, d'ajuster la caméra virtuelle pour une éventuelle manipulation. Cet ajustement se fait suivant une configuration précisée au préalable. Après avoir essayé chaque fonction de navigation, l'opérateur donne une note d'appréciation sur chaque type de métaphore testée.

C. Résultats :

Les figures 4.36, 4.37 et 4.38 représentent les appréciations données par les opérateurs aux différentes métaphores de navigation, ceci, pour les fonctions d'exploration, de recherche et d'ajustement du point de vue. Les résultats obtenus par cette étude sont relativement mitigés, nous allons toutefois essayer de les analyser afin d'extraire les grandes tendances pour chaque fonction. Ces résultats doivent cependant être confortés et vérifiés par une étude portant sur une plus grande population, nous devons également adopter un protocole expérimental plus rigoureux (tri de la population, choix des tâches, etc.).

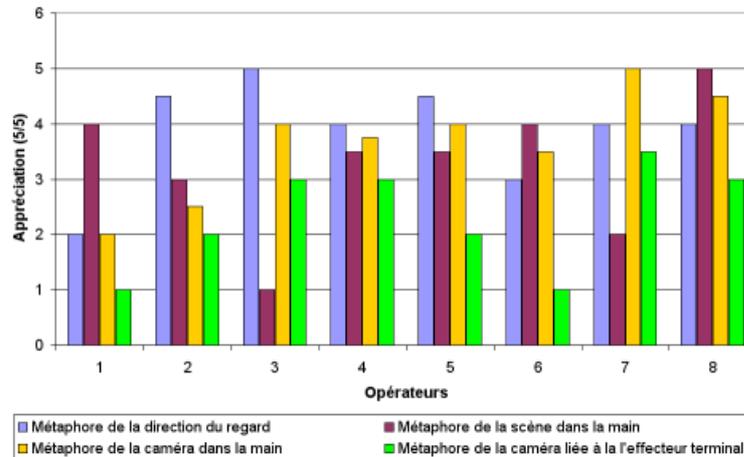


FIG. 4.36 – Notes d'appréciation pour la tâche d'exploration en utilisant les différentes métaphores de navigation.

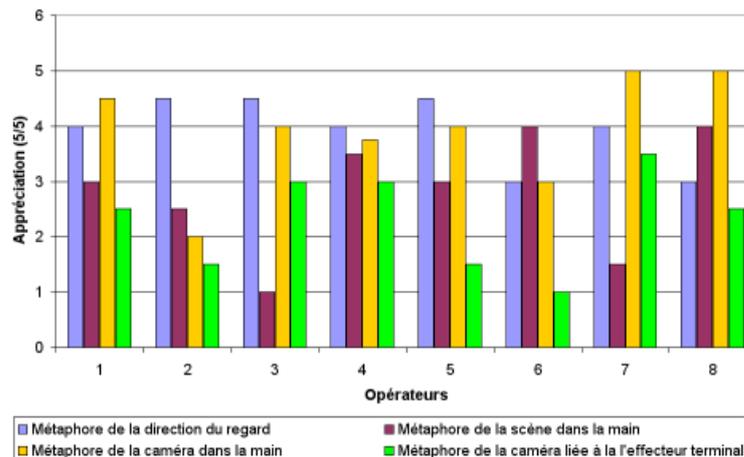


FIG. 4.37 – Notes d'appréciation pour la tâche de recherche en utilisant les différentes métaphores de navigation.

Pour la fonction d'exploration, en considérant uniquement les meilleures notes d'appréciation, nous remarquons la formation de deux groupes. Le premier a une préférence pour la métaphore de la direction du regard. Le second préfère la métaphore de la scène dans la main. On note que ce dernier groupe classe généralement la métaphore de la caméra dans la main en deuxième place. Pour la fonction de recherche, nous constatons que les opérateurs qui avaient une préférence pour la métaphore de la direction du regard pour l'exploration gardent la même préférence pour la fonction de recherche. Le second groupe marque cette fois-ci une préférence pour la métaphore de la caméra dans la main. Enfin, pour la fonction d'ajustement du point de vue, on remarque tout d'abord une augmentation générale des notes données à la métaphore de la caméra sur l'effecteur (par rapport aux autres fonctions). On constate là aussi, la formation de deux groupes différents. Le premier groupe marque une préférence pour la métaphore de la caméra dans la main alors que le second préfère la métaphore de la

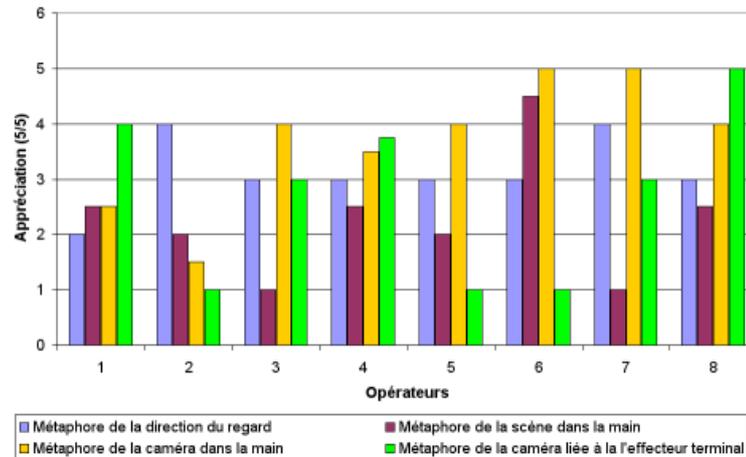


FIG. 4.38 – Notes d’appréciation pour la tâche d’ajustement en utilisant les différentes métaphores de navigation.

caméra sur l’effecteur.

4.3.5 Étude des niveaux d’immersion visuels

A. **Objectifs** : Il s’agit dans cette étude d’examiner et de caractériser les trois niveaux d’immersion possibles :

- le mode non-immersif ;
- le mode semi-immersif ;
- le mode immersif.

L’objectif de cette étude est de déterminer le mode d’immersion le plus adapté pour la réalisation de l’ensemble des opérations.

B. **Procédure** : L’ensemble des expérimentations ayant été réalisé principalement avec le mode non-immersif (sur écran d’ordinateur), nous avons examiné dans cette partie plus particulièrement les modes immersif et semi-immersif. Les deux bancs d’essai mis en place proposent deux types de manipulations : 1) la phase d’approche et 2) la phase de déplacement par adhésion. Aucun guide virtuel n’as été utilisé pour cette étude.

C. **Résultats** : La figure 4.39 représente les notes d’appréciation données par les opérateurs aux trois niveaux d’immersion. On constate que les préférences sont partagées entre le mode semi-immersif et le mode non-immersif. Le mode immersif, bien qu’apprécié dans certains cas (exploration et recherche), ne peut être envisagé pour la réalisation de longues séances de micromanipulation. Les principaux inconvénients de ce mode d’immersion - évoqués par la plupart des opérateurs - sont la faible résolution de ses afficheurs ainsi que la gêne occasionnée par le port du casque.

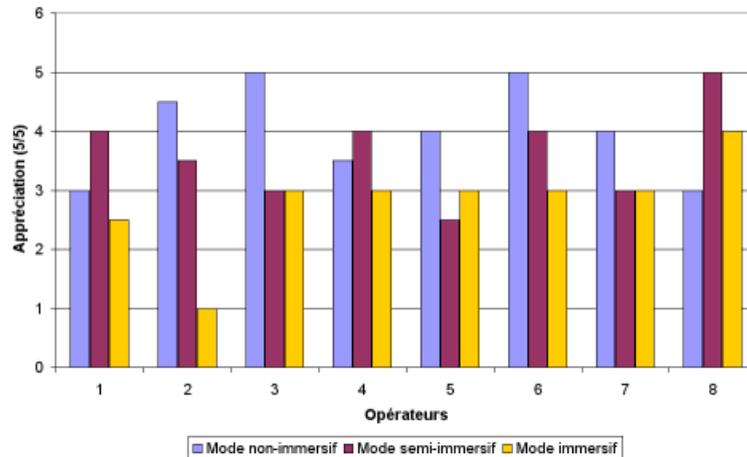


FIG. 4.39 – Notes d’appréciation pour les trois niveaux d’immersion.

4.3.6 Étude de l’influence du pseudo son et du mode tactile sur la compréhension de la scène

A. **Objectifs** : Après s’être intéressé à l’immersion et la navigation visuelle, nous allons étudier dans cette section l’influence du retour pseudo sonore et de la fonction épistémique dans l’amélioration de la compréhension du micro-environnement.

B. **Procédure** : Le banc d’essai dédié à cette série d’expériences fonctionne en mode hors-ligne : la représentation du micro-environnement reste statique et le manipulateur est désactivé. L’opérateur peut toutefois utiliser la représentation virtuelle de l’effecteur terminal pour explorer la scène, et cela suivant les deux modes étudiés (mode sonore et haptique). Il faut noter que les moyens de navigation visuels sont toujours disponibles.

La tâche demandée à l’opérateur est la suivante. Dans un premier temps, nous activons la fonction épistémique du module haptique, puis nous demandons à l’opérateur de balayer la scène par de petits tapotements à l’aide de la représentation virtuelle de l’effecteur, et ceci, dans le but d’apprécier le relief de la scène. La deuxième expérience consiste à activer le module sonore de l’IHM en vue de permettre à l’opérateur d’explorer intuitivement la scène à partir d’un rendu pseudo-sonore.

C. **Résultats** : La figure 4.40 représente les notes d’appréciation données par les opérateurs à une navigation utilisant le mode visuel, une navigation utilisant le mode pseudo-sonore associé au mode visuel et enfin une navigation multimodale intégrant le mode pseudo-sonore, le mode tactile et le mode visuel. Les notes données par les opérateurs sont relativement identiques, elles marquent toutes d’une manière claire l’intérêt du mode pseudo-sonore et surtout du mode tactile dans l’amélioration de la compréhension de la scène.

4.3.7 Étude de l’influence d’une représentation pseudo-sonore et visuelle de l’effort

A. **Objectifs** : Le retour d’effort durant la micromanipulation étant très important, nous nous sommes proposés d’étudier l’influence d’autres formes de représentation pour cette grandeur.

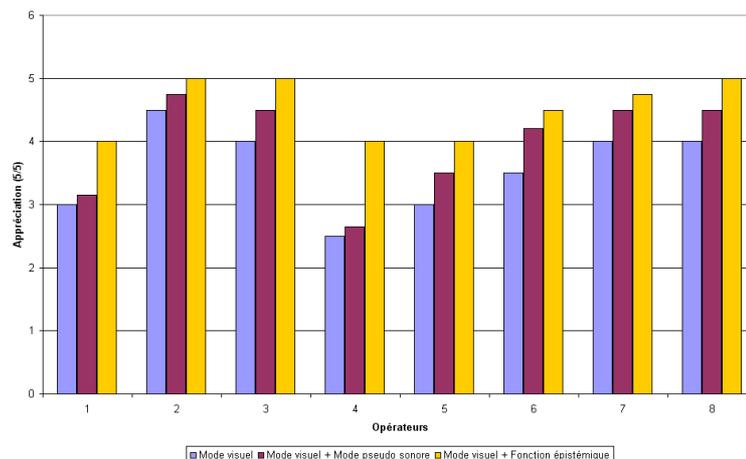


FIG. 4.40 – Notes d’appréciation pour l’exploration avec le mode 1) visuel, 2) visuel et pseudo-sonore et 2) visuel et tactile.

Les représentations étudiées sont :

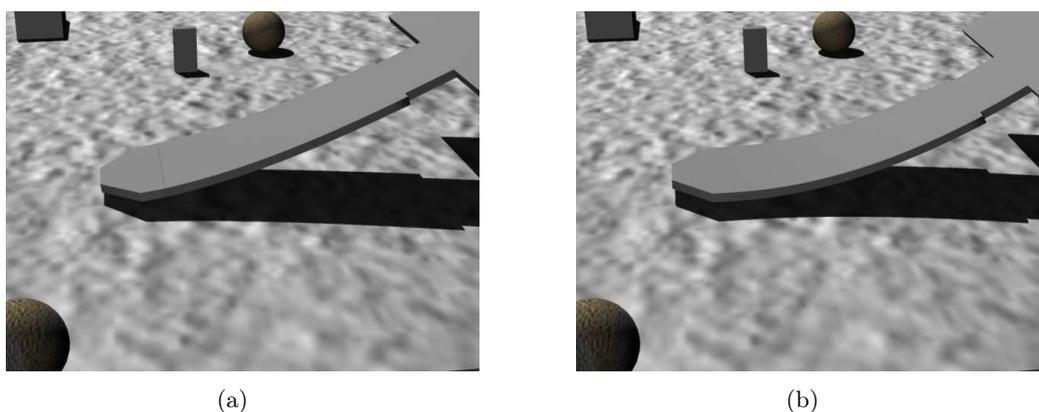


FIG. 4.41 – Représentation visuelle de l’effort exercé.

- Une représentation visuelle (voir la figure 4.41) ;
- Une représentation sonore.

B. Procédure : Le banc d’essai dédié à cette expérience repose sur l’effort retourné par le microcapteur de force intégré au microlevier AFM. L’expérience consiste à exercer une force sur le substrat et à apprécier l’effort avec les différentes représentations. Dans un premier temps nous utilisons uniquement l’interface haptique, puis cette représentation est rehaussée par une représentation visuelle. Finalement, on couple la représentation visuelle avec une représentation pseudo-sonore avec une modulation de fréquence.

C. Résultats :

La figure 4.42 montre les notes d’appréciation données par les opérateurs aux trois cas de figures :

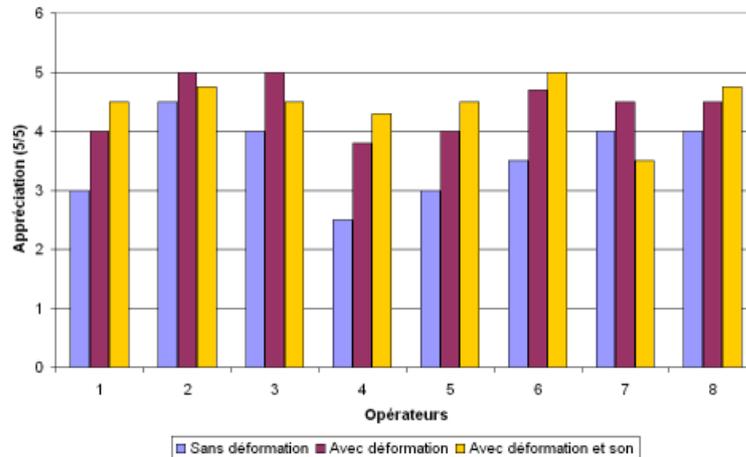


FIG. 4.42 – Notes d’appréciation pour une représentation de l’effort exercé : 1) sans déformation visuelle, 2) avec une déformation visuelle uniquement 3) avec une déformation visuelle et un retour sonore.

- une représentation haptique ;
- une représentation haptique et visuelle ;
- une représentation haptique, visuelle et pseudo-sonore.

On remarque la formation de deux groupes : le premier, majoritaire, présente un grand intérêt pour la représentation visuelle, le mode pseudo-sonore apporte dans ce cas une petite amélioration. Le second groupe porte également un intérêt à la représentation visuelle, il est cependant gêné par la représentation pseudo-sonore.

4.4 Discussion

4.4.1 Mode visuel

Les expérimentations présentées dans ce chapitre, nous ont permis d’évaluer l’apport de la représentation 3D durant les différentes phases de la micromanipulation. Les résultats montrent clairement l’utilité de ce type de représentation pour des manipulations impliquant des mouvements libres (3D) dans l’espace, tel que ceux rencontrés dans les phases d’approche du micro-effecteur. De manière générale, on constate que le geste de l’opérateur est plus optimisé et mieux maîtrisé avec moins de tremblements physiologiques. A partir des vues issues des microscopes frontal et latéral, le sujet ne peut accomplir la tâche avec autant de dextérité. Ce dernier éprouve certaines difficultés à planifier les vitesses et les déplacements du micromanipulateur par manque d’indices perceptifs de profondeur [MASSIMO ET SHERIDAN, 1989].

Les résultats ont montré également que la structuration visuelle de la scène 3D pour rendre l’interaction plus proche de la représentation de l’action du point de vue de l’opérateur jouait un rôle important. L’ajout d’indices permet de créer des comportements implicites dans l’espace de travail [DUMAS ET PLÉNACOSTE, 2000]. A titre d’illustration, la présence de l’ombre portée au dessous du micro-effecteur est un indice qui permet de renseigner naturellement l’opérateur à la fois sur la position absolue de l’effecteur et sur les distances relatives entre l’effecteur et les autres composants de la scène. De même, l’ajout de textures sur les objets, qui n’en possèdent

pas dans le réel (substrat réfléchissant, microbilles transparentes) permet d'une part, de fournir un ensemble implicite de relations pour une meilleure perception de la profondeur et d'autre part, de rapprocher la scène du contexte naturel d'action de l'opérateur.

Par contre, fait étonnant, pendant l'exécution de tâches de micromanipulation impliquant essentiellement des mouvements planaires (cas de la manipulation par poussée), les meilleures performances ont été obtenues dans le cas d'une visualisation directe par microscopie. Plusieurs raisons peuvent expliquer cela. La première concerne le fait que ce type de micromanipulation implique des mouvements planaires du manipulateur, et que les images issues du microscope frontal sont suffisantes [TAYLOR ET AL., 1993]. L'information de profondeur n'a plus autant d'importance que dans le cas d'un mouvement spatial 3D. Toutefois, l'opérateur utilise le retour d'effort occasionné par le contact avec le substrat pour ajuster la position verticale de l'effecteur par rapport à la hauteur de la microbille.

Par ailleurs, l'évaluation des différentes techniques de navigation et d'immersion, nous a permis de retenir certaines solutions adaptées aux tâches de micromanipulation. Le mode semi-immersif et non-immersif paraissent être un bon compromis entre le niveau d'immersion du regard et le confort d'utilisation. Le mode immersif, malgré le haut niveau de présence procuré à l'opérateur, a été pénalisé par la gêne occasionnée par le port du casque durant les phases de navigation. Les non linéarités de localisation du capteur électromagnétique jouent également en défaveur de ce mode, car les erreurs de position créent chez l'utilisateur une sensation de désorientation. Comme compromis de navigation, nous pouvons retenir la métaphore de la caméra dans la main. Cette dernière est celle qui présente le meilleur compromis pour les trois fonctions de navigation. Il est toutefois possible d'imaginer l'utilisation de plusieurs métaphores pouvant être commutées suivant le contexte de la tâche à réaliser.

4.4.2 Mode haptique et guides virtuels

Les différentes expérimentations menées pour l'étude du mode haptique montrent clairement l'intérêt de ce mode dans la réalisation de tâches de micromanipulation. Tout d'abord au début des opérations, les résultats montrent que la fonction épistémique est très utile pour aider l'opérateur à compléter sa compréhension de la représentation géométrique de la scène. Ensuite, durant la micromanipulation, le retour d'effort est indispensable pour le bon déroulement des opérations [HUANG ET AL., 2002]. Dans le cas de manipulations utilisant uniquement les vues provenant des microscopes, l'opérateur compense le manque d'information de profondeur à l'aide du retour d'effort lors du contact du microlevier AFM avec le substrat.

Le mode kinesthésique permet également à l'opérateur d'ajuster correctement la hauteur de microlevier au niveau de la microbille durant les phases de poussée. Il faut noter que des essais de micromanipulation sans utiliser de retour d'effort ont été réalisés ; ils ont conduit pour la plupart à la destruction du microlevier au bout de quelques minutes d'utilisation.

Un des problèmes importants dans la réalisation d'une tâche de micromanipulation vient de la grande différence d'échelle physique entre le macro et le micromonde (position : de 10^2m à plusieurs 10^{-9}m et force : de 10^1N à plusieurs 10^{-6}N). Dans des conditions normales d'expérimentation, les résultats montrent que l'opérateur est rapidement sujet à des tremblements musculaires, liés à la fatigue et à l'effort de concentration, ainsi qu'à une dérive significative de son geste par manque d'attention, dès lors que celui-ci cherche à manipuler avec précision des micro-objets. L'analyse des résultats montre que les guides virtuels utilisés fournissent des indications visuelles, haptiques et sonores capables d'aider et d'assister l'utilisateur à effectuer des tâches avec vitesse, maîtrise et précision [ROSENBERG, 1993].

Nous avons également constaté que l'ajout de métaphores d'assistance, à base de planification

de chemin ou de contraintes de mouvement, permet de guider le geste de l'opérateur suivant certains degrés de liberté tout au long de l'intervention. L'opérateur se concentre ainsi sur la partie utile de son geste. Ces guides réduisent également l'effort mental nécessaire à l'opérateur pour décomposer et exécuter les tâches, ce qui contribue à augmenter l'endurance de l'opérateur.

L'introduction de champs de potentiel dans la scène 3D permet de compléter l'aide et l'assistance proposée à l'opérateur :

- *Champs de potentiels répulsifs* : ils évitent à l'opérateur d'entrer en contact direct avec des micro-objets indésirables, tels que les particules de poussières ou les microbilles. Ils offrent ainsi à l'opérateur un espace de travail dénué de toute contrainte lié au micro-environnement. Comparés aux guides avec contrainte de mouvement, les champs de potentiel offrent un degré de liberté de mouvement supérieur mais sans pour autant améliorer le niveau de performance.
- *Champs de potentiel atténuateurs de mouvement* : Ceux-ci constituent une protection indispensable pendant la phase d'approche de l'effecteur. Ce guide offre une meilleure maîtrise des vitesses et des efforts exercés, tout en atténuant les gestes brusques et tremblements de l'opérateur. En pratique, cela permet d'éviter la destruction ou la détérioration des micro-objets à manipuler qui peuvent être de nature (fragile, flexible, etc.) et de forme différentes. La combinaison des champs de potentiel atténuateurs avec des contraintes de mouvement particulières (planes, rectilignes) autorise une parfaite maîtrise de la trajectoire du mouvement aboutissant à un contrôle total du geste opératoire.

4.4.3 Mode sonore

Les résultats expérimentaux montrent que l'utilisation du mode pseudo-sonore, pour représenter notamment les messages d'alerte sous forme d'icônes auditives, augmente la compréhension des événements lors de l'exécution des tâches de micromanipulation. Cela s'explique par le fait que l'ouïe est particulièrement compétente [CONVERSY ET BEAUDOUIN-LAFON, 1996] pour traiter ce type d'information. Cette représentation permet, par ailleurs, d'augmenter le niveau de présence de l'opérateur dans la scène de manipulation, en rapprochant le micro-environnement du contexte d'action naturel de l'opérateur.

D'autres expérimentations ont montré que l'utilisation du son, pour l'auralisation de certaines données, comme la distance d'approche ou l'effort exercé, est pénalisant en terme de performance. Cela s'explique par le fait que le son apporte surtout une information qualitative à l'opérateur, qui n'est pas suffisamment riche pour permettre une appréciation correcte de la grandeur étudiée. Par contre, nous constatons que le fait de coupler ce type de représentation avec d'autres modes, tels que le retour kinesthésique ou visuel, permet d'améliorer sensiblement l'appréciation et la compréhension de l'information [EME ET AL., 1999].

Enfin, nous avons noté un manque de confort général pour l'utilisation du mode sonore dans le cas de l'auralisation des données [CONVERSY, 2000]. Cela est essentiellement lié au fait que cette représentation implique l'utilisation d'un son continu, comprenant souvent de hautes fréquences pour obtenir une bonne spatialisation du son, ce qui peut s'avérer gênant lors de longues séances d'utilisation.

4.5 Conclusion

L'interface homme-machine développée a pour objectif essentiel d'assister l'opérateur dans ses tâches de manipulation en lui fournissant une aide contextuelle et parfaitement bien adaptée aux

contraintes du micromonde (effets d'échelle, environnement, tâches, etc.). L'étude expérimentale présentée dans ce chapitre avait pour vocation de réaliser une étude exhaustive sur l'ensemble des modalités sensori-motrices et des guides d'assistance proposées à l'opérateur.

En analysant les résultats obtenus, nous pouvons dire que la réalité virtuelle contribue d'une manière générale à l'amélioration de l'interfaçage homme-machine pour les tâches de télé-micromanipulation, et cela, en présentant à l'opérateur une représentation intermédiaire du micro-environnement lui permettant d'accomplir plus facilement les tâches de micromanipulation. Il faut toutefois noter, que cette technique d'interfaçage reste appropriée aux applications dans lesquelles l'opérateur doit réaliser des opérations comprenant des mouvements 3D comme le micro-assemblage, ou bien encore, la micro-injection cellulaire.

Sur la base des résultats obtenus, nous allons présenter dans le chapitre suivant une première application de l'interface homme-machine au domaine microbiologique. Nous commencerons par détailler l'approche retenue pour l'adaptation de l'IHM développée au cas étudié. Nous proposons ensuite une série d'études pour l'évaluation du concept proposé.

Chapitre 5

Application au Domaine de la Micro-Injection Cellulaire

5.1 Introduction

L'analyse des expériences menées dans le chapitre 4, nous a permis de valider quelques outils et méthodes pour la conception d'interfaces homme-machine dédiées aux applications macro/micro. Afin de valider ces concepts d'immersion, d'interaction et d'assistance dans le monde industriel, nous avons choisi d'appliquer ces techniques à la micromanipulation biologique et plus précisément, à la micro-injection cellulaire téléopérée. Ces travaux ont été menés en étroite collaboration avec le Centre de Recherches Biologiques de Baugy (CERB), France [CER, 2005]. Cette société offre principalement des services d'évaluation en toxicologie de molécules - en phase 1 - pour différents secteurs, comme l'industrie pharmaceutique, chimique ou agrochimique.

La micro-injection est une technique qui permet d'injecter des gènes bien spécifiques et choisis de la cellule donneuse dans une autre cellule (ovule, par exemple). Elle est utilisée principalement pour les manipulations biologiques. La nouvelle séquence ADN est injectée directement dans un ovule fécondé (zygote) avant qu'il ne commence à se diviser. Celle-ci s'intègre dans un chromosome et sera dès lors présent dans chaque cellule de l'animal qui en résultera. La micro-injection peut être utilisée à d'autres fins, comme la fécondation *in vitro*. On parle ici de l'ICSI (Intra Cytoplasmic Sperm Injection). Cette technique consiste à introduire le spermatozoïde dans le cytoplasme d'un ovocyte. L'objectif étant d'assurer la fécondation de la cellule. L'ICSI semble nécessaire dans le cas où les spermatozoïdes sont incapables de pénétrer l'ovule (spermatozoïdes non fécondants).

Actuellement, la majorité des stations de micro-injection propose uniquement un mode manuel pour réaliser les opérations de micro-injection. L'opérateur utilise dans ce cas un ou plusieurs microscopes pour observer l'environnement biologique. Il manipule ensuite la cellule avec une pipette de maintien et une pipette d'injection. Ces techniques, déjà très largement éprouvées dans le milieu biologique, souffrent cependant d'un faible taux de réussite compte tenu des tâches éprouvantes pour l'opérateur (concentration, baisse de l'acuité visuelle, précision des gestes, fatigue et tremblements) lors de longues séances de manipulation. Pour cela, il faut être capable de manipuler l'objet biologique, c'est-à-dire de le positionner et de le maintenir avec une grande précision. L'outil d'injection doit être commandé avec des précisions et des résolutions inférieures aux dimensions de l'objet pour les déplacements et de l'ordre des forces cytoplasmiques pour les efforts. Les échecs sont généralement dus à une mauvaise interprétation des situations, à un manque de vigilance ou à une mauvaise commande du manipula-

teur. Ce nouveau champ d'investigation a donné lieu à de nombreuses approches scientifiques, toutes basées cependant sur des stratégies de téléopération : téléopération avec asservissement visuel [KAPOOR ET AL., 2003],[YU ET NELSON, 2001], téléopération supervisée [LI ET AL., 2001] et téléopération assistée [KAWAJI ET AL., 2001]. A la vue de ce travaux, il nous semble que les nouveaux téléopérateurs doivent progresser vers l'exploitation des techniques de réalité virtuelle pour améliorer l'interaction homme-machine.

De nouvelles interfaces homme-machine (IHM) plus ergonomiques et intuitives, parfaitement adaptées aux modalités sensorielles de l'opérateur humain, doivent être recherchées. L'approche proposée consiste dans un premier temps, à rehausser la perception de l'opérateur sur le plan visuel, pour compléter la compréhension de la scène, et dans un deuxième temps, sur le plan haptique pour améliorer la régulation du geste durant les phases d'injection. L'objectif du système proposé est ensuite d'assister l'opérateur par l'intermédiaire de guides virtuels pour fiabiliser le geste opératoire. Les guides virtuels apportent une assistance à plusieurs niveaux : un guidage précis des opérations de micromanipulation, l'apport de références de localisation dans l'image ou encore la diminution de la complexité de la phase d'insertion lors de la perforation du tissu membranaire.

Ce chapitre débute par la description du dispositif expérimental utilisé. Nous détaillons ensuite les étapes d'extraction des différents composants de la scène, pour réaliser la reconstruction 3D de la cellule biologique dans son milieu physiologique. Une nouvelle méthodologie de calcul du rendu de l'effort retourné à l'opérateur est proposée. Cette dernière est basée sur un modèle mécanique visco-élastique de la cellule. Enfin, une étude expérimentale de l'IHM est réalisée afin d'évaluer les performances de l'opérateur dans les conditions normales de manipulation.

5.2 Dispositif expérimental

Les dispositif expérimental mis à notre disposition est composé principalement de deux parties : une station de micro-injection et une interface homme-machine. La station de micro-injection (voir figure 5.1) est basée sur un microscope inversé de type *Nikon Eclipse TE – 300*. L'objectif utilisé offre un grossissement global de $\times 20$. La micromanipulation de la cellule est réalisée grâce à l'aide de deux pipettes : a) une pipette de maintien, montée sur un manipulateur hydraulique manuel, et b) une pipette d'injection, montée sur un micromanipulateur de type *Eppendor – f 5171*. Ce manipulateur possède une course utile de l'ordre de 20mm avec une répétabilité de $60\ \mu\text{m}$ et un déplacement minimal de $40\ \mu\text{m}$ suivant chaque axe x, y, z . La caméra utilisée (*CoolsnapFX*) possède une résolution maximale de 1300×1030 pixels. La taille de chaque cellule élémentaire est de $6.7 \times 6.7\ \mu\text{m}$.

Les moyens de calcul comportent actuellement une seule unité de type PC cadencée à $2.8\ \text{MHz}$. Des travaux en cours visent à augmenter la puissance de calcul par l'intermédiaire d'une version parallèle de l'IHM [JEBABLI, 2004] composée d'un cluster de seize ordinateurs PC Pentium IV, bi-processeurs $2.6\ \text{GHz}$. Les interfaces comportementales se résument actuellement à un écran d'ordinateur pour la visualisation de la scène et une interface haptique de type PHANToM Desktop pour la micromanipulation et l'interaction.

5.3 Caractéristiques des cellules étudiées

Les cellules étudiées sont des ovocytes (cellule reproductrice femelle) de souris. Les ovocytes sont des cellules sphériques, immobiles, mesurant entre $100\ \mu\text{m}$ et $150\ \mu\text{m}$ de diamètre en fin de phase de croissance. Chaque cellule est entourée d'une enveloppe translucide, formée de protéines :

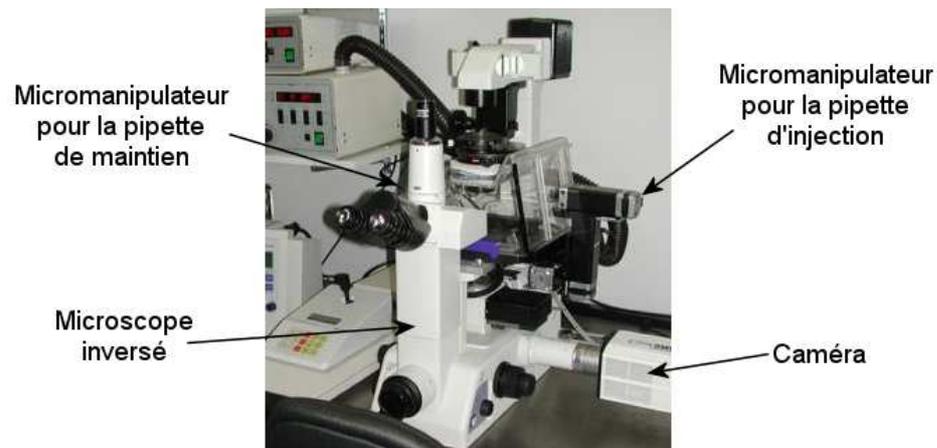


FIG. 5.1 – Station de micro-injection.

la zone pellucide. A l'extérieur de la zone pellucide, l'ovocyte est inclus dans une masse cellulaire, appelée cumulus oophorus, dont la couche en contact avec la zone pellucide est nommée corona radiata. On distingue deux types d'ovocyte : l'ovocyte I (voir figure 5.2(a)), ou ovocyte immature, dont le noyau est bloqué en prophase de 1^{ère} division de la méiose (vésicule germinale) et qui n'a pas de globule polaire et l'ovocyte II (voir figure 5.2(b)), ou ovocyte mature, dont le noyau est bloqué en métaphase de 2^{me} division de la méiose et qui possède un globule polaire dans l'espace séparant la zone pellucide et l'ovocyte (espace péri-vitellin). Les cellules utilisées sont des ovocytes II. Dans la suite du chapitre, nous appellerons la paroi interne et externe de la zone pellucide respectivement membrane interne et membrane externe.

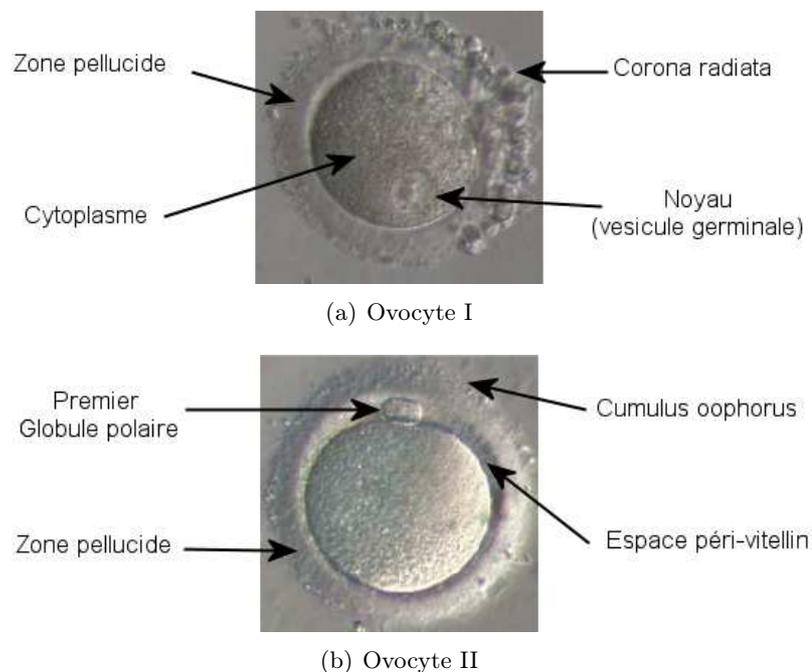


FIG. 5.2 – Ovocyte I et II.

5.4 Extraction des composants de la scène

La reconstruction géométrique de l'environnement de manipulation, à partir des images 2D issues du microscope optique, a nécessité le développement de différents algorithmes de traitement d'image [AMMI ET FERREIRA, 2006]. Contrairement au cas des microbilles rigides des chapitres précédents, les cellules vivantes étant des corps déformables, il est nécessaire de représenter en temps-réel les déformations des membranes tout au long de la phase de micro-injection. On doit également localiser et suivre la position de l'injecteur : avant contact, au contact et durant l'injection. Cette partie a fait l'objet de l'élaboration d'un module de traitement d'image adapté à la micro-injection [OUANEZAR, 2004]. Comme on peut le constater sur la figure 5.3, la scène est essentiellement composée de deux classes d'objets : 1) les pipettes de manipulation et 2) la cellule manipulée. Cette dernière est composée d'une membrane externe et d'une membrane interne. Nous allons voir dans les prochaines sections les moyens mis en œuvre pour localiser chacun de ces constituants.

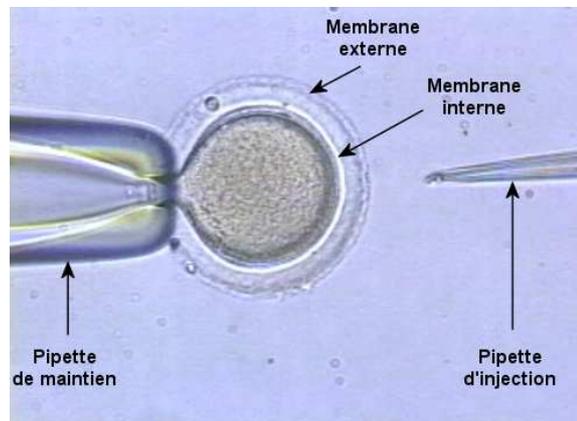


FIG. 5.3 – Composition de la scène.

5.4.1 Localisation des micromanipulateurs

5.4.1.1 Localisation de la pipette d'injection

Comme il a été précisé précédemment, la pipette d'injection est montée sur un micromanipulateur motorisé possédant une grande répétabilité en déplacement. Une fois le microscope et le micromanipulateur calibrés, il est alors possible d'obtenir la position de la pipette avec une précision de l'ordre de 60nm .

5.4.1.2 Localisation de la pipette de maintien

À l'inverse, la pipette de maintien est montée sur un micromanipulateur ajusté manuellement lors du positionnement de la cellule. Il est nécessaire dans ce cas, de recourir aux techniques de traitement d'image pour obtenir la position exacte de la pipette de maintien. La méthode retenue pour cette opération est l'appariement de gabarits basé sur la corrélation normalisée. Pour plus de renseignements, cette technique est détaillée dans le chapitre 2 à la section 2.2.1. Dans l'objectif d'optimiser les temps de calcul, nous réduisons la taille de la fenêtre de recherche au voisinage immédiat de la dernière position calculée de la pipette de maintien.

5.4.2 Segmentation de la cellule

La détection de contours et la segmentation d'images sont probablement les domaines qui ont reçu la plus grande attention de la part de la communauté scientifique. Les approches les plus répandues consistent à utiliser une détection locale à l'aide de détecteurs d'arêtes, citons par exemple les filtres de Sobel [SOBEL, 1970], Marr-Hildreth [MARR ET HILDRETH, 1980] ou Canny [CANNY, 1986] suivie d'une méthode de regroupement. Le regroupement des arêtes est le procédé par lequel une liste ordonnée d'arêtes est formée à partir d'une liste non-ordonnée [JAIN ET AL., 1995]. Ce type d'approche est cependant sévèrement affecté par le bruit contenu dans l'image, le flou visuel (total ou partiel) des motifs de l'image, ou encore, d'autres anomalies comme l'éclairage non-uniforme de la scène. Plus récemment, d'autres classes d'algorithmes ont été proposées, et qui sont essentiellement basées sur une détection globale du contour de l'objet. Pour cela, un modèle paramétrique déformable est utilisé à partir des contours actifs¹¹ introduit par Kass [KASS ET AL., 1987].

Les développements présentés dans ce paragraphe sont comme suit. Dans un premier temps, nous commencerons par expliquer brièvement l'approche des contours actifs, et plus particulièrement, la méthode de minimisation d'énergie. Nous verrons après-cela, l'application de cette méthode pour la détection des membranes interne et externe de la cellule biologique. Nous détaillerons également l'ensemble des prétraitements nécessaires pour le bon fonctionnement de l'approche. Enfin, nous aborderons la procédure retenue pour l'initialisation des contours au début des opérations.

5.4.2.1 Segmentation de la membrane externe

A. **Bilan d'énergie** : Dans l'approche des contours actifs, le contour est défini par une courbe déformable paramétrée $v(s, t)$, où s représente l'indice spatial et t l'indice de temps. Cette courbe déformable est fonction des coordonnées x et y :

$$v(s, t) = (x(s, t), y(s, t)) : s \in \Omega \quad t \in T; \quad (5.1)$$

avec Ω le domaine unité, et T est un intervalle ouvert. Chaque configuration du contour est associée à une certaine énergie finie. Cette énergie est d'une part, fonction de la configuration géométrique du contour (énergie interne) et d'autre part, fonction de l'image (énergie externe). Elle s'écrit sous la forme :

$$E_{Globale}(v) = \int_{\Omega} E_{Interne}(v) + E_{Externe}(v) \quad (5.2)$$

L'énergie interne est conçue de façon à autoriser des déformations longitudinales (élongations ou contractions) et des déformations de courbure. On la modélise par :

$$E_{Interne}(v) = E_{Elastique}(v) + E_{Courbure}(v) \quad (5.3)$$

$$E_{Interne}(v) = \frac{1}{2} \left[\alpha(s) |v_s|^2 + \beta(s) |v_{ss}|^2 \right] \quad (5.4)$$

$$\text{avec } v_s = \frac{dv(s)}{ds} \text{ et } v_{ss} = \frac{d^2v(s)}{ds^2}$$

¹¹de l'anglais, *Snakes*

Le terme v_s donne la valeur de l'élongation au point s du contour. Il est contrôlé par la fonction $\alpha(s)$ qui règle la tension en fonction de la position sur le contour ($E_{Elastique}$). Le terme v_{ss} quantifie la courbure du contour ($E_{Courbure}$) dont la rigidité est également paramétrable (par $\beta(s)$).

Le rôle de l'énergie externe est de créer une attraction du contour actif par les contours de l'image. On utilise pour cela le gradient de l'image, celui-ci représente les variations d'intensité du signal. L'énergie externe s'écrit alors :

$$E_{Externe}(v) = -|\nabla(v(s))|^2 \quad (5.5)$$

B. Discrétisation : Le modèle discret du contour actif s'obtient naturellement en construisant un vecteur u comprenant n nœuds. Ces nœuds correspondent aux points du contour $v(ih) = (x(ih), y(ih))$ avec $i = 0..n - 1$ et $h = 1/(n - 1)$. Les formes discrètes des énergies abordées sont les suivantes :

$$\begin{aligned} E_{Elastique}(i) &= \frac{1}{2} \alpha(i) \left| \frac{u_i - u_{i-1}}{h} \right|^2 \\ E_{Courbure}(i) &= \frac{1}{2} \beta(i) \left| \frac{u_{i-1} - 2u_i + u_{i+1}}{h^2} \right|^2 \\ E_{Externe}(i) &= -|\nabla I(u_i)|^2 \end{aligned} \quad (5.6)$$

Ici, $u_i = (x_i, y_i)$ représente la position du i^{me} nœud du contour actif.

C. Minimisation de l'énergie : La minimisation d'énergie est basée sur la méthode de Williams [WILLIAMS ET SHAH, 1992]. Dans cette approche, la minimisation se fait tour à tour sur chaque nœud du contour, indépendamment de celle des autres. Soit u_i le nœud considéré, son énergie est évaluée suivant l'équation 5.2. Cette opération est effectuée pour toutes les positions du voisinage de u_i . Nous utilisons pour cela un voisinage de neuf points (voir figure 5.5). La position correspondant à l'énergie minimale est retenue comme nouvelle position de u_i et on passe au traitement du nœud suivant. La minimisation globale se termine lorsqu'après un cycle de traitement sur tous les nœuds, le nombre de nœuds ayant varié est inférieur à un certain seuil.

Ce fonctionnement est résumé par le pseudo-code donné dans la figure 5.4.

D. Prétraitements : La présence des pipettes de manipulation et des particules d'impureté dans le voisinage immédiat de la cellule rend l'utilisation directe des contours actifs impossible. À cet effet, nous réalisons un ensemble de prétraitements afin d'éliminer les composants indésirables et fiabiliser ainsi la segmentation de la cellule. L'ensemble de ces opérations est basé sur des opérations élémentaires de traitement d'image afin d'optimiser le temps de calcul global du module de traitement d'image. La première étape du prétraitement consiste à effacer de l'image les pipettes de maintien et d'injection. Connaissant les positions relatives des deux micromanipulateurs (voir section 5.4.1), cette opération repose sur l'approximation des surfaces occupées par les pipettes par des formes géométriques polygonales (figure 5.6(b)). Seules les parties se situant à l'extérieur de la cellule sont prises en considération. Pour cela, nous calculons les points de contact externes entre les pipettes et la cellule, ces points ayant été obtenus en mesurant les niveaux de gris le long des contours des pipettes. Le point de contact injecteur/cellule correspond alors à la zone de plus grande variation du niveau de gris (figure 5.6(a)).

```

# n           = nombre de nœuds
# déplacés   = nombre de points déplacés au cours d'un cycle
# m           = nombre de voisins
# V[0..m-1]  = voisins

# Boucle de minimisation globale
Répéter
  déplacés = 0;

  # Cycle de minimisation (traitement de tous les nœuds
  #                               un par un)
  Pour (i = 0 à n) # Le nœud 0 est traité en premier et dernier
    Emin = MAXIMUM
    V = les voisins de ui

    # Boucle sur le voisinage
    Pour (j = 0 à m-1)
      Ej = EInterne(V[j]) + EExterne(V[j])

      Si (Ej < Emin)
        Emin = Ej
        jmin = j

    Si (V[jmin] différent de la position courante)
      Déplacer nœud courant vers V[jmin]
      déplacés = déplacés + 1

Jusqu'à (déplacés < seuil)

```

FIG. 5.4 – Pseudo-code de l'algorithme de Williams.

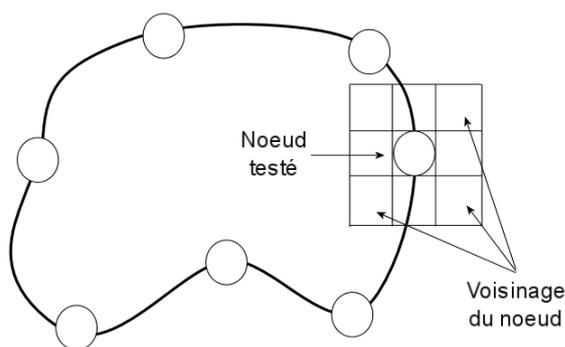
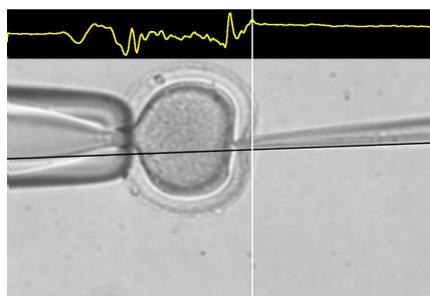
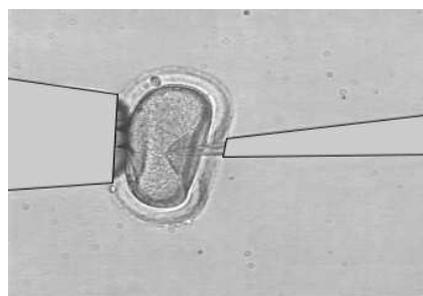


FIG. 5.5 – Voisinage utilisé pour le calcul de la fonction d'énergie.



(a) Profil le long de la pipette d'injection



(b) Approximation des pipettes par des polygones

FIG. 5.6 – Effacement des pipettes de la scène.

La seconde étape de prétraitement consiste à éliminer les particules d'impureté de l'image.

Pour cela, nous appliquons dans un premier temps un filtre de type Sobel (figure 5.7(a)), pour augmenter le contraste de la cellule et des impuretés par rapport au reste de la scène. Nous appliquons ensuite un seuil afin d'éliminer les faibles variations de gradient. Enfin, nous labellisons les ensembles connexes et définissons la surface occupée par la cellule correspondant au plus grand ensemble (figure 5.7(b)). Une fois la cellule isolée, il est alors possible d'utiliser les contours actifs pour extraire le contour externe de la cellule.

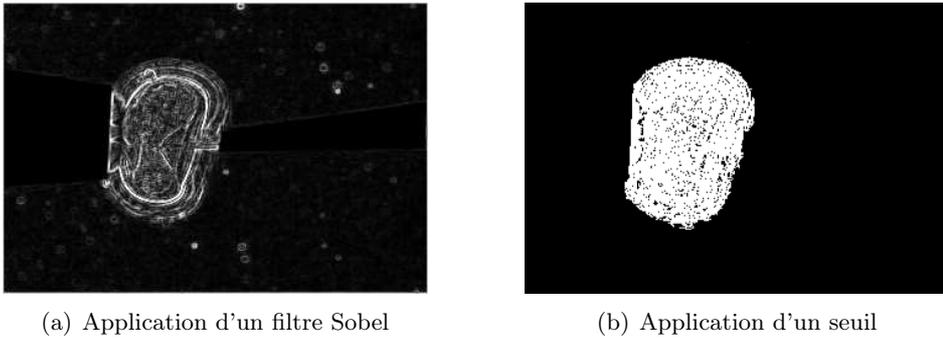


FIG. 5.7 – Opérations réalisées pour l'extraction de la membrane externe.

5.4.2.2 Segmentation de la membrane interne

L'utilisation des contours actifs pour la segmentation de la membrane interne est réalisée de la même manière que pour la membrane externe. Seule la partie de prétraitement est différente. Dans le cas considéré, les prétraitements visent essentiellement à rehausser le contraste du noyau par rapport au reste de la cellule, une fois les particules d'impuretés et les pipettes effacées de l'image (figure 5.8(a)), nous appliquons un seuil sur une des trois composantes couleurs de l'image. La composante utilisée correspond à la couleur dominante du noyau (la composante bleu dans notre cas) afin d'éliminer la membrane externe de l'image. Enfin, nous réalisons une opération de labellisation pour garder uniquement le noyau (figure 5.8(b)). La membrane interne peut ensuite être segmentée avec les contours actifs de la même façon que la membrane externe.

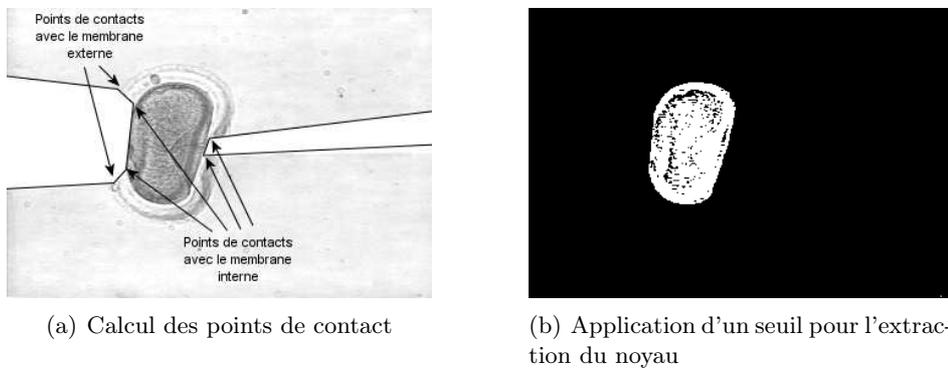


FIG. 5.8 – Opérations réalisées pour l'extraction de la membrane interne.

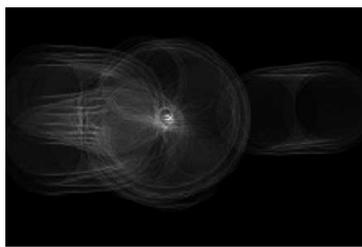
5.4.3 Initialisation des nœuds des contours actifs

La mise en œuvre de la segmentation de la cellule par contours actifs comprend deux types d'initialisation. La première intervient au début des opérations (hors-ligne), et repose sur l'utilisation de la transformée de Hough (figure 5.9(a)). Pour cette étape, la cellule est supposée de forme circulaire.

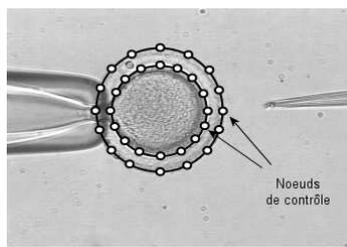
En utilisant l'équation paramétrique suivante :

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = r^2 \quad (5.7)$$

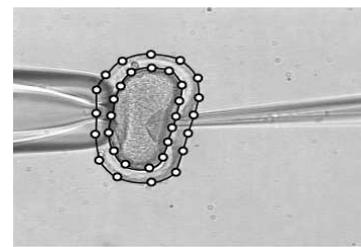
Dans notre application, la transformée de Hough se présente sous forme d'un accumulateur à trois dimensions (espace de Hough), les deux premières dimensions correspondent au centre du cercle (x_c , y_c), la troisième dimension correspond au rayon (r). Chaque point de l'espace image (carte des arêtes obtenue après traitement de l'image originale) correspond à un cercle dans le plan (x_c , y_c) de l'accumulateur. L'intersection de ces cercles augmente la valeur correspondante de l'accumulateur. Cette opération est répétée pour l'ensemble des rayons possibles compris entre deux valeurs prédéfinies pour limiter le temps de calcul. Une fois l'opération terminée, nous adoptons la plus grande valeur de l'accumulateur 3D comme centre du rayon de la membrane externe. Sur la base de ce contour, le module de traitement d'image commence à poursuivre les deux contours de la cellule (figure 5.9(b)).



(a) Transformée de Hough pour un rayon donné



(b) Initialisation au début des opérations



(c) Initialisation dynamique des contours

FIG. 5.9 – Initialisation des contours.

Le second type d'initialisation des contours actifs se déroule en-ligne. Cette initialisation se produit au début de chaque étape de minimisation d'énergie. Elle consiste à donner au contour actif une configuration initiale permettant de minimiser les temps de calculs. Nous utilisons pour cela la dernière configuration calculée du contour (figure 5.9(c)).

5.4.4 Calcul du moment et des lieux de contact et de ponction

Le contact entre la pipette d'injection et la cellule, ainsi que la ponction des membranes, sont les deux étapes les plus délicates d'une opération de micro-injection. La détermination en temps réel du lieu et du moment de leur déroulement permet à l'opérateur de mieux gérer la dextérité de son geste opératoire.

5.4.4.1 Calcul du moment et du lieu de contact

La détection de contact commence par une opération de dilatation binaire de l'image. Nous utilisons pour cela une structure verticale à quatre éléments. Cette opération permet d'homogénéiser les constituants de l'image suivant la direction verticale sans toutefois altérer les dimensions

horizontales. Une fois l'image dilatée, nous labellisons les ensembles connexes. Avant le contact, nous distinguons deux grands ensembles (figure 5.10(a)) : le premier correspond à la pipette d'injection, le deuxième comprend la cellule et la pipette de maintien. Le moment de contact correspond au moment où ces deux blocs fusionnent (figure 5.10(b)). Une fois ce paramètre connu, nous calculons ensuite le lieu de contact correspondant à l'extrémité de la pipette. La position de la pipette étant connue (voir section 5.4.1), et le microscope étant calibré (voir la section 2.3 du chapitre 2), il est alors possible de remonter à la valeur de ce paramètre.

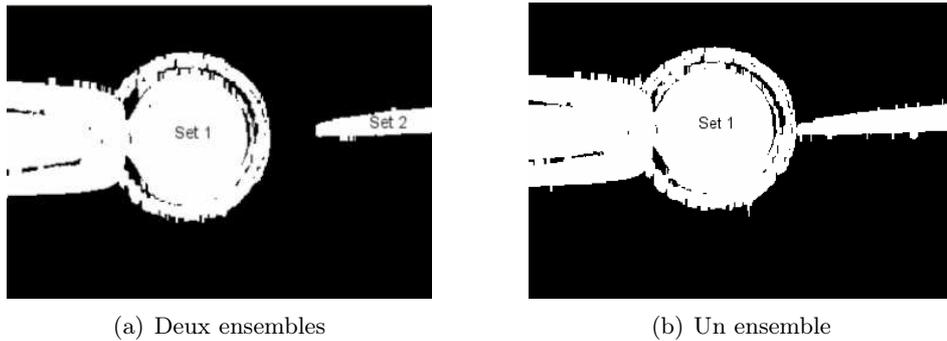


FIG. 5.10 – Calcul du moment de contact.

5.4.4.2 Calcul du moment et du lieu de ponction

Pour la détection du moment de ponction, notre approche est basée sur une simple observation. Durant la phase d'injection (après contact), le déplacement des membranes (au voisinage du point de contact) comprend deux étapes :

1. La première se déroule avant la ponction, elle est caractérisée par une direction de déplacement similaire entre la membrane et la pipette d'injection (figure 5.11(a)) ;
2. La seconde étape intervient juste après la ponction, elle est caractérisée par une inversion des sens de déplacements (figure 5.11(b)).

Le moment de ponction correspond ainsi à la transition entre ces deux phases.

Dans notre application, la détection de cette transition repose sur le calcul des vitesses relatives pipette/points de contacts. La position du point de contact correspond comme dans le cas précédent à l'extrémité de l'effecteur.

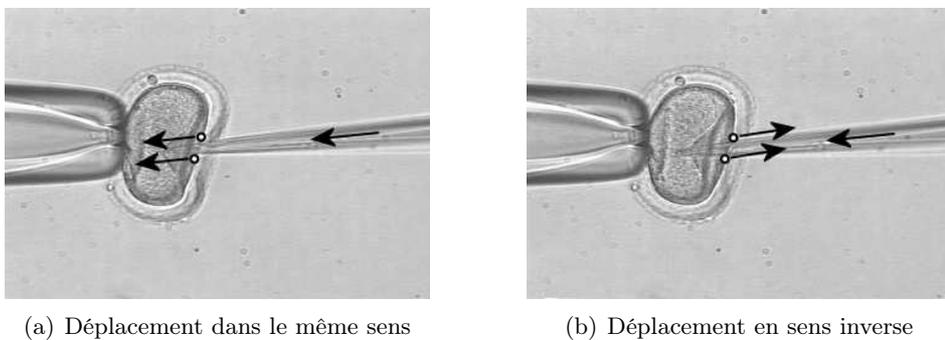


FIG. 5.11 – Calcul du moment de ponction.

5.5 Reconstruction pseudo-3D de la cellule

Durant la phase de micro-injection qui suit le moment de contact, la cellule présente une symétrie par rapport à l'axe formé par l'extrémité de la pipette d'injection et le point milieu de la pipette de maintien. Nous avons exploité cette symétrie pour proposer une représentation pseudo-3D de la cellule. Sur la base des points de contrôle retournés par le module de traitement d'image (contours actifs), nous commençons par le calcul d'un maillage externe de la cellule. Ce maillage est obtenu en appliquant une rotation des contours, calculés autour de l'axe de symétrie, par un pas de discrétisation donné (voir figure 5.12). Le maillage obtenu par cette méthode représente une approximation - par extrapolation - de la forme réelle de la cellule [AMMI ET FERREIRA, 2005].

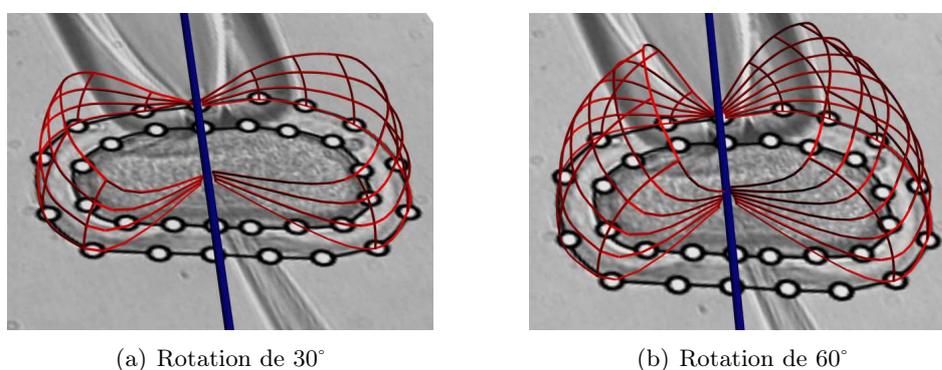


FIG. 5.12 – Calcul du maillage par symétrie.

L'habillage du maillage consiste ensuite à utiliser des surfaces NURBS. Ce type de représentation permet à partir de quelques points de contrôle d'obtenir une surface lissée, ceci, avec une grande simplicité de mise en œuvre. Les NURBS sont des surfaces que l'on pourrait qualifier de carrées car elles s'appuient obligatoirement sur 4 points. Il est alors impossible de représenter une surface fermée (comme celle de la sphère) par une seule NURBS. Notre approche a donc consisté à diviser la surface de la cellule en deux sous-surfaces ouvertes. Le plan de découpe retenu est transversal à l'axe de l'injection.

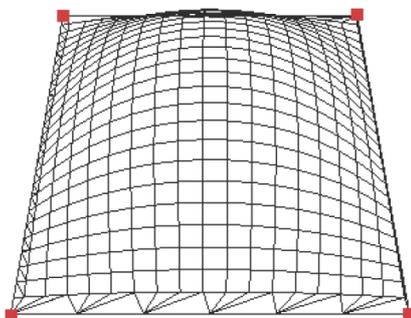


FIG. 5.13 – Surface NUBS.

5.6 Retour pseudo-haptique

En complément du retour visuel, la perception haptique est essentielle à la régulation du geste durant les différentes phases de la micro-injection. Actuellement, les systèmes de micro-injection proposés sur le marché ne disposent pas de manipulateurs équipés de capteurs d'effort. Seuls, quelques récents dispositifs expérimentaux commencent à intégrer des prototypes de micromanipulateur munis de capteurs [GREMINGER ET NELSON, 2004]. Dans ce paragraphe, nous proposons une méthode numérique de calcul et de rendu d'effort. Cette méthode est basée sur un système inspiré du modèle mécanique de la cellule. Celle-ci permet de ce fait d'approcher, d'une façon relativement précise, les efforts exercés par la pipette sur la cellule durant la micro-injection. La méthode proposée offre également un outil de préparation au geste opératoire. L'opérateur peut ainsi s'entraîner et perfectionner son geste en amont des opérations.

5.6.1 Le concept proposé

L'idée de base du concept est de contraindre un système mécanique déformable par le volume calculé de la cellule (voir section 5.5). Au début des opérations, le volume du système mécanique au repos correspond au volume de la cellule (voir figure 5.14(a)). Le système étant en équilibre, aucun effort n'est retourné. Au cours de l'injection, ce volume est recalculé en fonction des contours retournés par le module de traitement d'image. L'enveloppe externe du système mécanique est donc contrainte en fonction de ce volume (voir figure 5.14(b)). Une fois le système mécanique mis-à-jour, il nous est possible d'obtenir en temps-réel les efforts exercés sur l'ensemble des noeuds en surface du système et en particulier, au point de contact entre la cellule et la pipette.

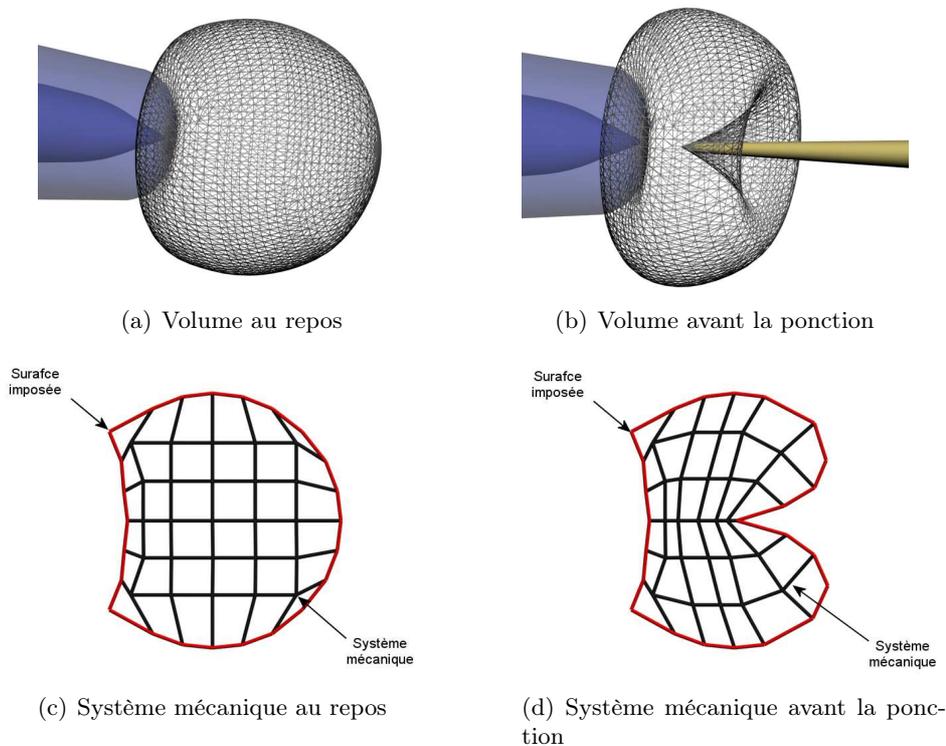


FIG. 5.14 – Évolution du volume calculé de la cellule en fonction de la déformation.

L'approche proposée offre également à l'opérateur la possibilité de préparer le geste opératoire en mode hors-ligne (voir figure 5.15). Le système mécanique est alors utilisé en tant que simulateur, il est de cette façon indépendant des contours retournés par le module de traitement d'image. Dans ce cas, l'opérateur interagit directement avec la cellule "virtuelle" en utilisant l'interface haptique. Les efforts ressentis correspondent alors aux contraintes appliquées par l'interface haptique - via la représentation virtuelle de la pipette - sur le système mécanique.

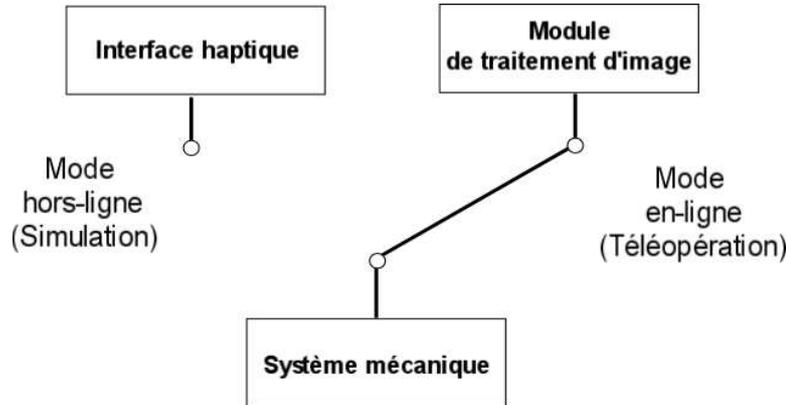


FIG. 5.15 – Les deux modes d'utilisation du système mécanique.

5.6.2 Le modèle mécanique adopté

Après une brève étude menée sur les différents systèmes mécaniques déformables, notre choix s'est orienté vers les systèmes Masse-Ressort-Viscosité (MRV). Les motivations d'un tel choix sont essentiellement liées à la modularité du système (géométrie, type d'interaction,...), la simplicité de mise-en-œuvre, et surtout la possibilité d'interaction en temps réel [GUERCHOUCHE, 2005].

Le système MRV est composé de particules reliées par des interactions du type ressort-amortisseur (voir figure 5.16). On attribue à chaque nœud une masse, et à chaque interaction un coefficient de raideur et de viscosité. Le système MRV repose sur une méthode itérative de mise à jour de la structure de particules qui consiste à calculer, pour chaque itération et pour chaque particule, la somme des forces qui lui sont appliquées. On en déduit par le principe fondamental de la dynamique son accélération, sa vitesse, et ainsi sa nouvelle position.

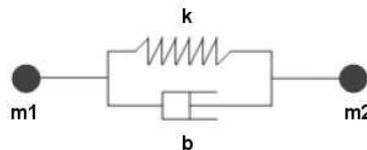


FIG. 5.16 – Structure d'une liaison entre deux nœuds d'un système MRV.

A. **Forces appliquées** : L'équation 5.8 spécifie le vecteur de force F_i agissant sur le nœud i de masse m_i . Les paramètres k_{ij} et b_{ij} sont respectivement la constante de raideur du ressort et le coefficient de viscosité de l'amortisseur ; L_{ij} est la longueur au repos de la liaison. Enfin p_{ij} et v_{ij} correspondent respectivement à la position relative et à la vitesse relative du nœud i par rapport à un nœud j qui lui est connecté.

$$F_i = \sum_i \left\{ k_{ij} \left(\frac{L_{ij}}{|p_{ij}|} - 1 \right) - b_{ij} \frac{v_{ij} \cdot p_{ij}}{p_{ij} \cdot p_{ij}} \right\} p_{ij} \quad (5.8)$$

B. **Intégration numérique** : On peut écrire l'équation 5.8 d'une manière à faire apparaître les dérivées de la position et de la vitesse du nœud sous la forme :

$$M \frac{d^2}{dt^2} \vec{X}(t) + B \frac{d}{dt} \vec{X}(t) + K \vec{X}(t) = \vec{f}_a \quad (5.9)$$

où M est la matrice des masses, B est la matrice des viscosités, K la matrice des raideurs ; f_a représente la somme des forces appliquées au nœud.

Une fois les forces calculées en chaque nœud du maillage (pour chaque itération), le système doit être intégré numériquement dans le temps afin d'obtenir le comportement dynamique. L'intégration numérique consiste à calculer l'état du système à l'instant suivant à partir de l'instant courant :

$$q(t+h) = q(t) + \int_t^{t+h} \dot{q}(q,t) dt \quad (5.10)$$

où h représente la longueur du pas de temps.

Le schéma d'intégration numérique retenu est de type Euler implicite. L'équation différentielle du second ordre de l'état des nœuds est alors implémentée par deux équations du premier ordre :

$$\begin{cases} v_i(t + \Delta t) = v_i(t) + \frac{F_i(t + \Delta t)}{m_i} \Delta t \\ x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + v_i(t + \Delta t) \Delta t \end{cases} \quad (5.11)$$

où Δt représente le pas de temps et doit être suffisamment petit pour garantir la convergence de la solution.

C. **Configuration géométrique du modèle** : Plusieurs configurations de maillage - interne et externe - du système MRV ont été étudiées. Une grande partie de ces maillages présente un problème de déformations brusques (nœuds avoisinant le point d'attaque) au passage de certaines configurations (voir figure 5.17). Ces instabilités se répercutent sur le rendu haptique et par conséquence, sur la stabilité de la manipulation.

Parmi les solutions étudiées, notre choix s'est orienté vers une structure élémentaire présentant uniquement des liaisons en "X" (voir figure 5.18(a)). Cette configuration nous a permis de réduire considérablement les sauts brusques des nœuds au voisinage du point d'attaque. Elle permet par ailleurs une bonne approche du comportement mécanique de la cellule une fois les paramètres du modèle calculés (voir section 5.6.3). Les structures élémentaires sont ensuite assemblées suivant un volume sphérique pour former le corps de la cellule (voir figure 5.18(b)). Le maillage global externe et interne de la cellule est montré sur la figure 5.18(c) et la figure 5.18(d).

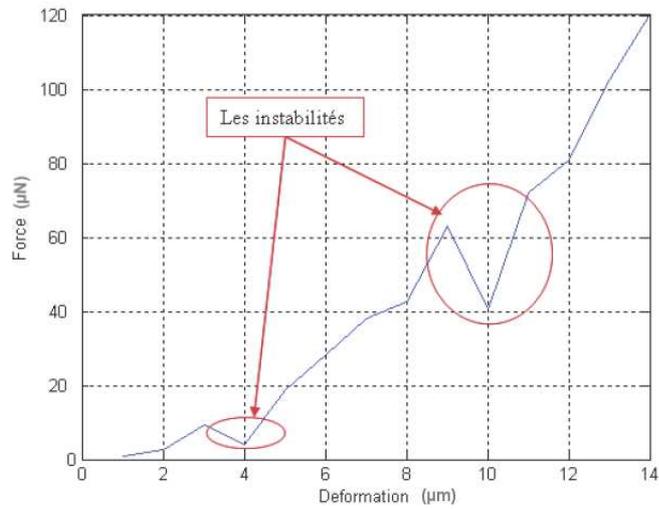


FIG. 5.17 – Illustration du phénomène de déformation brusque au voisinage de certaines configurations.

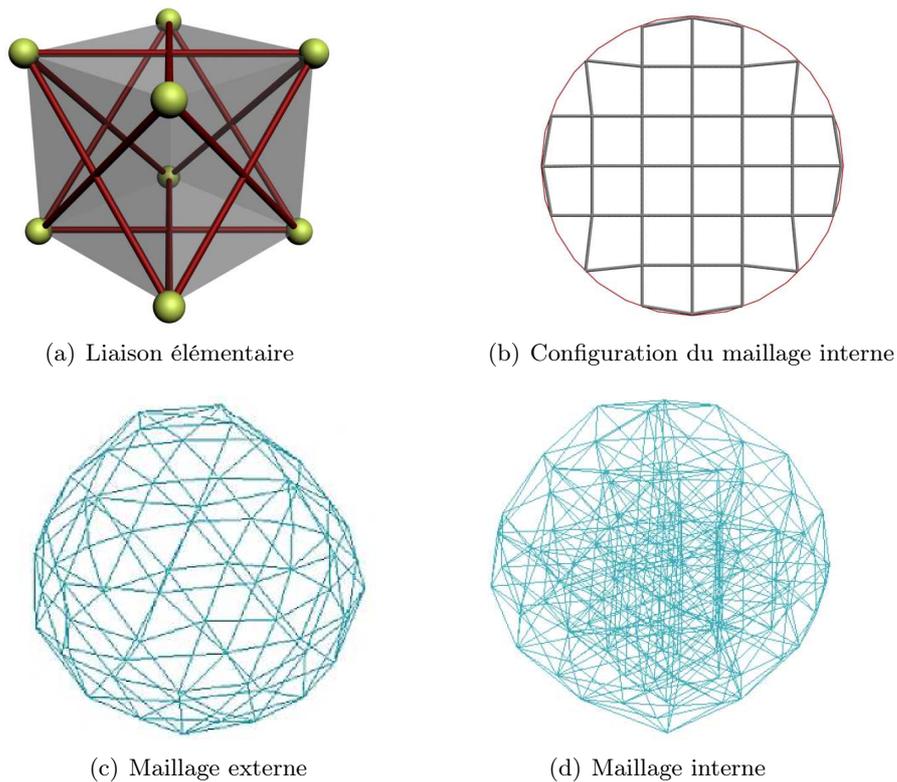


FIG. 5.18 – Configuration géométrique du maillage interne et externe du modèle retenu.

5.6.3 Identification des paramètres

L'identification des paramètres du système MRV repose sur les travaux de B. J. Nelson [SUN ET AL., 2003] [GREMINGER ET NELSON, 2004] portant sur la caractérisation mécanique des ovocytes et des embryons de souris (voir figure 5.19). Les travaux en question ont permis

TAB. 5.1 – Caractéristiques mécaniques des membranes d'ovocyte et d'embryon de souris.

| Type de membrane | Déformation maximale | Force de ponction | Module de Young | Coefficient de Poisson |
|------------------|----------------------|-------------------|-----------------|------------------------|
| Ovocyte | $44\mu m$ | $7.5\mu N$ | $17.9kPa$ | 0.5 |
| Embryon | $53\mu m$ | $13\mu N$ | $42.2kPa$ | 0.5 |

de donner des mesures expérimentales des caractéristiques mécaniques de cellules d'ovocytes et d'embryons de souris (coefficient de Poisson et module de Young). Cette étude a permis par ailleurs de mesurer la déformation et l'effort maximal exercé au moment de la ponction (voir la figure 5.19 et le tableau 5.1) .

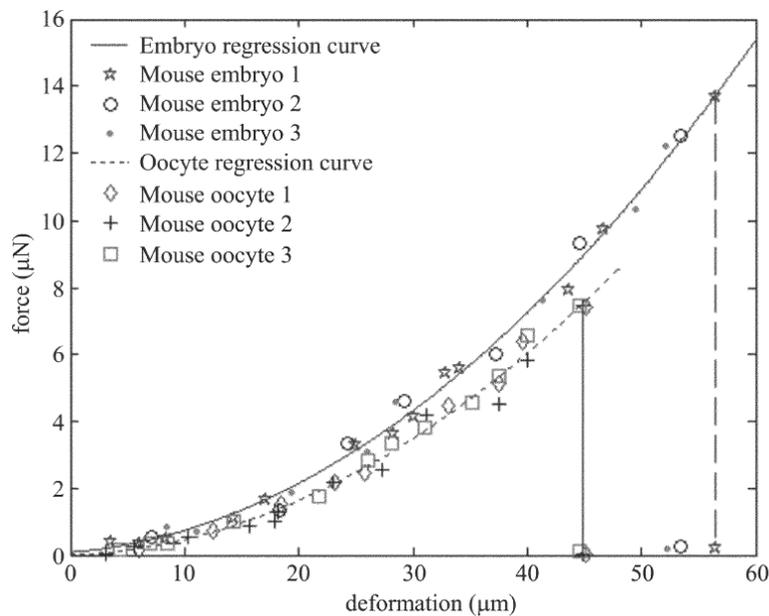


FIG. 5.19 – Courbe représentant la force en fonction de la déformation pour des membranes d'ovocytes et des embryons de souris [SUN ET AL., 2003].

L'identification des paramètres du système MRV se base sur une modélisation par éléments finis de la cellule. Celle-ci est réalisée sur la base des caractéristiques mécaniques (coefficient de Poisson ν et module de Young E) données dans le tableau 5.1. Le logiciel utilisé à cet effet est MSC-Marc.

Une fois la modélisation de la cellule par éléments finis réalisée, l'identification des paramètres k , b et m du modèle MRV consiste à ajuster expérimentalement la réponse de ce système sur la réponse observée à partir du modèle par éléments finis. La recherche de ces paramètres est basée sur deux types d'expérience :

A. Mesures aux points d'attaque : Ce type d'expérience consiste à réaliser sur le modèle par éléments finis des essais de pénétration de l'injecteur suivant différentes configurations. Les paramètres du modèle MRV sont ensuite ajustés pour approcher au mieux les réponses obtenues avec le modèle par éléments finis.

Les configurations étudiées sont les suivantes (voir figures 5.21(a) et 5.21(c)) :

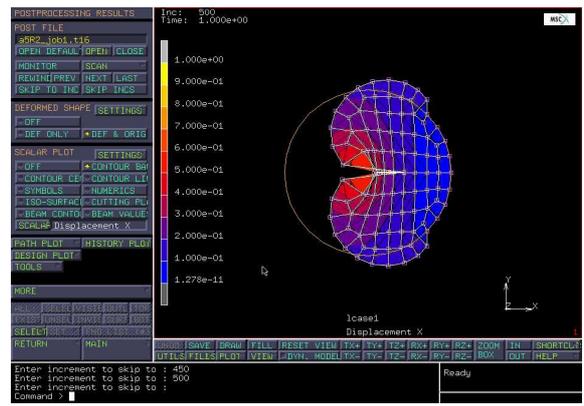
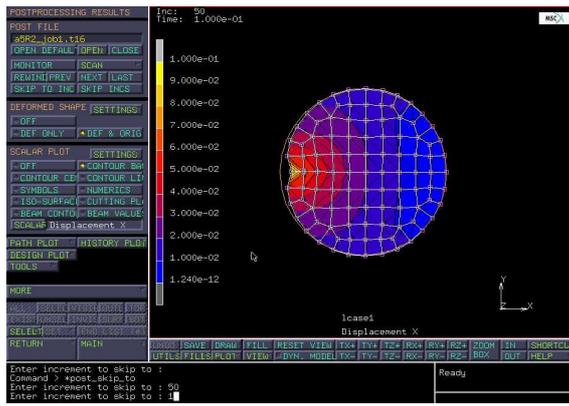
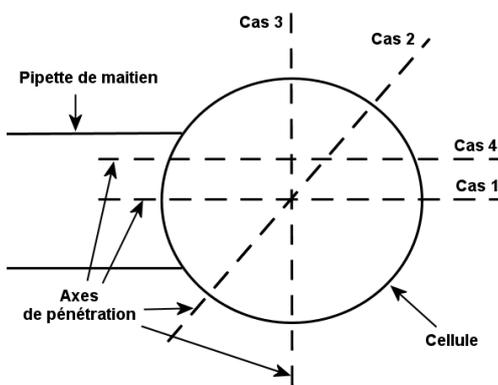
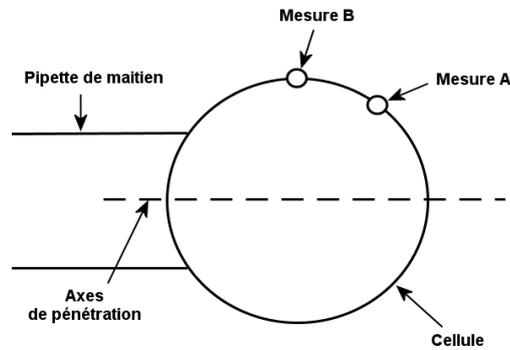


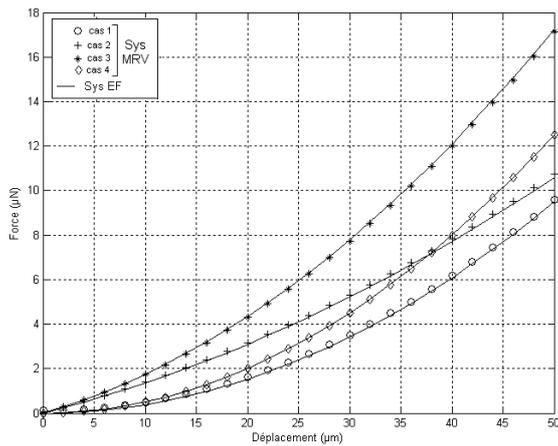
FIG. 5.20 – Simulations de la cellule par un modèle par éléments finis à partir du logiciel MSC-Marc.



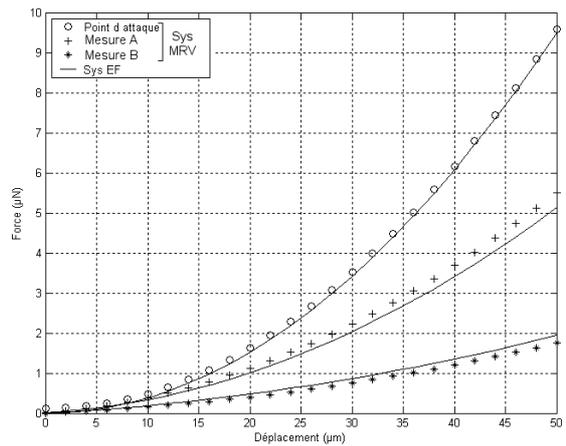
(a) Mesures aux points d'attaque



(b) Mesures sur des points particuliers de l'enveloppe



(c) Forces correspondant aux points d'attaque



(d) Forces correspondant aux points particuliers de l'enveloppe

FIG. 5.21 – Simulations menées pour l'identification des paramètres du système MRV.

1. Configuration 1 (cas 1) : L'axe de pénétration est aligné avec le centre géométrique de la cellule. Il présente un angle nul avec la pipette de maintien.
2. Configuration 2 (cas 2) : L'axe de pénétration est aligné avec le centre géométrique de la cellule. Il présente un angle de 45° avec la pipette de maintien.
3. Configuration 3 (cas 3) : L'axe de pénétration est aligné avec le centre géométrique de la cellule. Il présente un angle de 90° avec la pipette de maintien.
4. Configuration 4 (cas 4) : L'axe de pénétration est légèrement décalé par rapport au centre géométrique de la cellule. Il présente un angle nul avec la pipette de maintien.

B. Mesures sur des points particuliers de l'enveloppe : Cette étude vient compléter les mesures précédentes. Elle consiste à réaliser une pénétration suivant une certaine configuration et prélever des mesures sur d'autres points de l'enveloppe (voir les figures 5.21(d) et 5.21(b)). L'ajustement des paramètres consiste à obtenir le meilleur compromis avec les résultats des expériences précédentes, pour rapprocher le comportement du modèle MRV au modèle par éléments finis.

La méthode d'identification utilisée nous a permis de simuler d'une façon relativement précise le comportement mécanique de la cellule étudiée. Les erreurs enregistrées par rapport au modèle par éléments finis sont toutes inférieures à $\pm 5\%$.

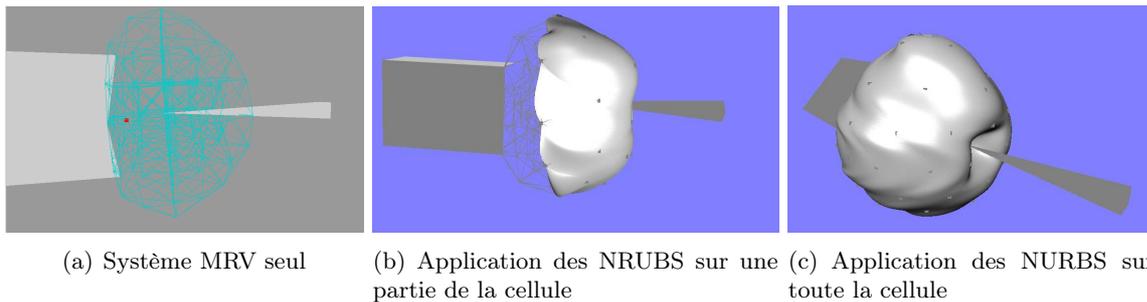


FIG. 5.22 – Représentation 3D de la cellule.

5.6.4 Couplage virtuel

Le rendu haptique est basé sur une interface haptique de type PHANToM Desktop. La boucle interne de fonctionnement de cette interface nécessite des fréquences de rafraîchissement avoisinant les $1000Hz$. Hors, la fréquence de mise à jour du système MRV ne dépasse pas les $21,27Hz$. Cette différence importante des fréquences de fonctionnement ne permet pas d'assurer une cohérence entre les deux systèmes, ce qui introduit une instabilité au niveau du rendu haptique. La solution retenue pour remédier à ce problème et d'utiliser un couplage virtuel entre l'interface haptique et le système MRV. Une étude détaillée de cette solution est donnée dans le chapitre 3, à la section 3.3.4. Le tableau 5.2 et la figure 5.23 donnent les valeurs des paramètres du couplage virtuel.

5.7 Guides virtuels haptiques

Afin de faciliter le geste opératoire durant l'intervention, nous proposons à l'opérateur des guides virtuels basés sur des contraintes de mouvement. L'objectif de ces guides est de sécuri-

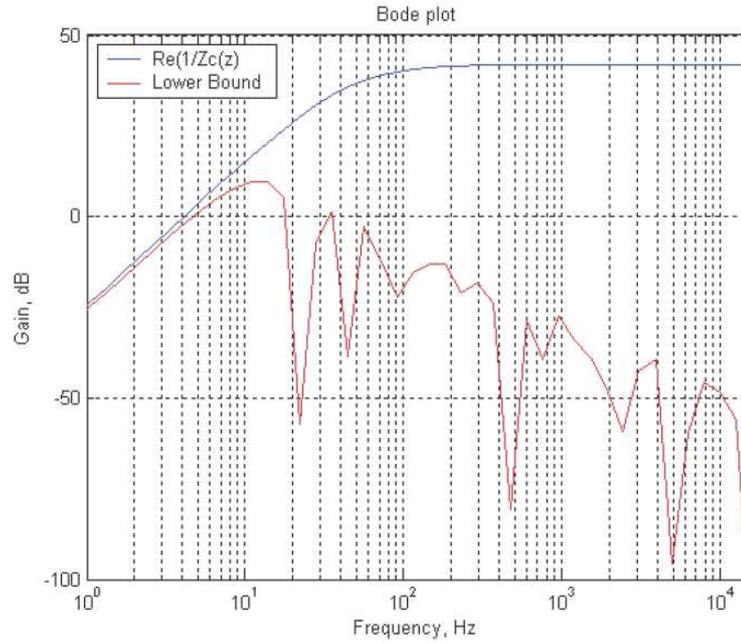


FIG. 5.23 – Résultats sur la stabilité pour rendu en impédance.

TAB. 5.2 – Paramètres du couplage virtuel pour le système MRV

| Paramètre | Valeur |
|-----------|----------------|
| b_c | 0.008 N/(mm/s) |
| k_c | 2.3 N/mm |

ser le geste en éliminant toutes sortes de perturbations comme les tremblements ou les gestes brusques. Ces guides visent aussi à compléter l'information visuelle et haptique pour améliorer les performances de l'opérateur.

Les guides proposés se présentent sous forme de mécanismes virtuels appliqués au dispositif maître. Actuellement, nous proposons deux types de guides : la contrainte conique et la contrainte rectiligne.

5.7.1 Contrainte conique

Ce guide présente deux comportements illustrés à la figure 5.24(a). Un premier comportement prend effet à l'extérieur de la cellule, il est caractérisé par une force répulsive qui tend à rapprocher progressivement la pipette d'injection de l'axe de pénétration. Le guide présente ainsi une forme conique aux frontières. Le deuxième comportement prend effet lorsque la pipette entre en contact avec la cellule. Il est caractérisé par une contrainte rectiligne le long de l'axe de pénétration. L'expression du guide est la suivante :

$$\begin{cases} F_x = -k_1 d D & \text{si } D > R \\ F_x = -k_2 d & \text{si } D < R \end{cases} \quad (5.12)$$

avec k_1 et k_2 les coefficients de raideur du guide respectivement à l'extérieur et à l'intérieur

de la cellule.

5.7.2 Contrainte rectiligne

Ce guide présente le même comportement à l'extérieur et à l'intérieur de la cellule (voir figure 5.24(b)). Il se résume en une contrainte rectiligne le long de l'axe de pénétration et s'exprime par la relation suivante :

$$F_x = -k d \quad (5.13)$$

avec k le coefficient de raideur du guide virtuel.

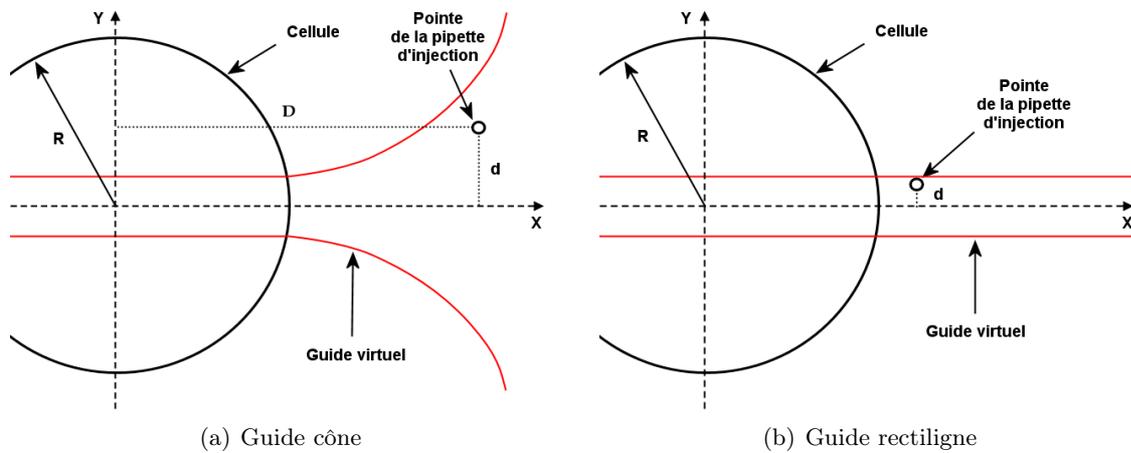


FIG. 5.24 – Guides virtuels proposés.

5.8 Étude expérimentale et évaluation de l'IHM

5.8.1 Conditions expérimentales

Ne pouvant pas accéder à la station de micro-injection du CERB pendant la période prévue, nous avons élaboré des scénarios d'essais basés sur la partie simulation du système proposé. L'objectif du scénario est de recréer, dans la mesure du possible, les conditions expérimentales du protocole de micro-injection. L'étude expérimentale comporte deux phases :

- une phase d'approche : il s'agit de déplacer la pipette d'une position initiale à une position finale au contact de la surface de la cellule. Les deux configurations sont prédéfinies à l'avance.
- une phase de pénétration : il s'agit ici de pénétrer la cellule du point de contact à un autre point situé à l'intérieur de la cellule. Ce point correspond à la position du point de ponction (voir tableau 5.1).

5.8.2 Sujets

Les expérimentations ont été menées sur une population de treize étudiants ou membres du laboratoire tous âgés entre 20 et 44 ans. Aucun des candidats évalués n'avait de compétences particulières ou d'expérience en micro-injection cellulaire. Les expériences ont duré entre 40 et

60 mn par sujet. Le protocole expérimental commençait d'abord par une brève introduction au domaine de la micro-injection biologique ainsi qu'au protocole expérimental adopté. Nous expliquions ensuite, au fur et à mesure, l'objectif de chacune des expériences menées. Les expérimentations se sont déroulées sous forme d'une série de couples de test. Chaque expérience a été précédée par une courte période d'entraînement n'excédant pas les 5 minutes (2 à 3 minutes en moyenne).

5.8.3 Évaluation des performances

L'évaluation des performances de l'opérateur a fait l'objet de trois types de mesures : 1) un relevé des trajectoires et des vitesses au cours des opérations, 2) une mesure du temps d'exécution de la tâche et 3) une note d'appréciation donnée par l'opérateur à la fin des opérations.

5.8.3.1 Évaluation de l'apport de la visualisation 3D

A. **Objectifs** : Cette première série d'expérience porte sur les deux phases de la micro-injection étudiée : 1) l'étape d'approche et 2) l'étape pénétration. L'objectif est l'évaluation de l'apport de la représentation 3D de la cellule par rapport aux deux images issues des microscopes frontal et latéral proposée habituellement à l'opérateur.

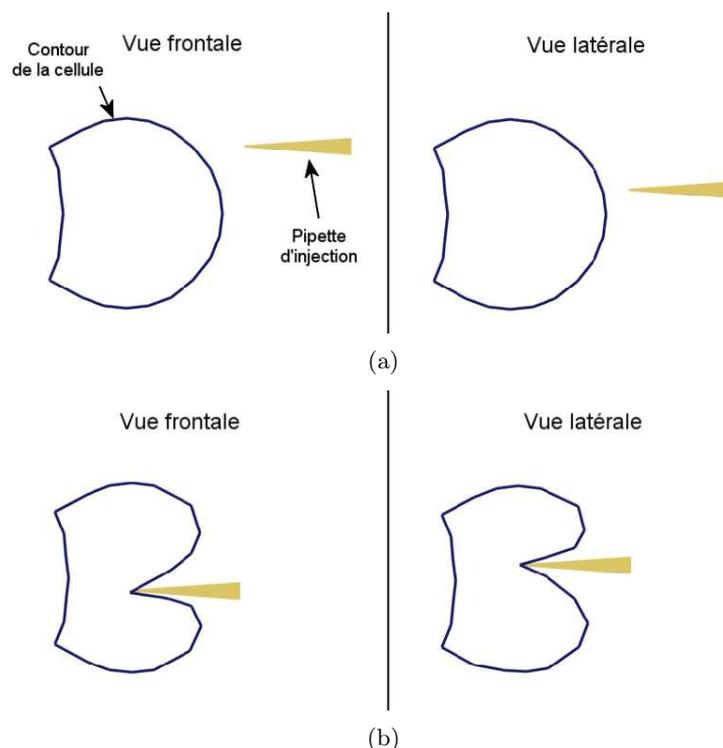


FIG. 5.25 – Vues frontale et latérale proposées à l'opérateur.

B. **Procédure** : Pour cette étude, nous avons mis en place deux scénarios d'essais. Le premier offre à l'opérateur les conditions classiques d'une station de micro-injection. Il propose une vue frontale et une vue latérale des contours de la cellule. Les deux points de vues sont fixes. Le deuxième scénario est basé sur la représentation 3D de la cellule. L'opérateur dispose dans ce

deuxième cas de moyens de navigation. Pour cette première série d'expériences aucun retour haptique n'est proposé à l'opérateur.

Pour les deux scénarios, l'expérience se déroule en deux étapes : l'opérateur commence par une phase d'approche puis une phase de pénétration de la cellule.

C. Résultats :

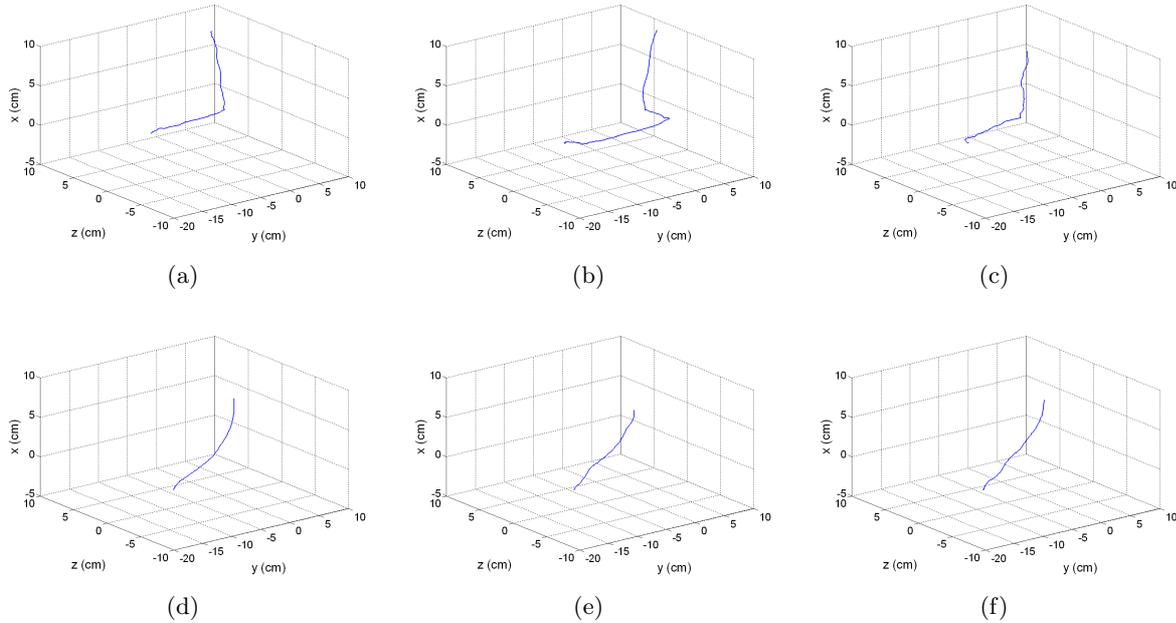


FIG. 5.26 – Trajectoires du bras maître durant la phase d'approche : 1) en utilisant les vues latérale et frontale (a), (b) et (c) et 2) en utilisant la représentation 3D de la cellule (e), (f) et (g).

Les figures 5.26(a), 5.26(b) et 5.26(c) montrent des trajectoires typiques du bras maître durant la phase d'approche, dans le cas où l'opérateur utilise les vues 2D (vue latérale et frontale). Après avoir analysé les trajectoires de l'ensemble des personnes testées, nous remarquons que le geste opératoire se décompose généralement en deux ou trois phases (suivant la stratégie de déplacement adoptée par l'opérateur). La première étape sert à déplacer la pipette dans le plan Ozx pour aligner le manipulateur avec l'axe passant par le centre la cellule. L'opérateur utilise ici les deux vues 2D proposées. La deuxième phase du geste opératoire consiste à déplacer la pipette suivant l'axe y pour la rapprocher du point de contact. L'opérateur utilise là aussi les deux vues pour ajuster le déplacement de la pipette suivant l'axe voulu. Sur les courbes d'évolution des vitesses (figures 5.28(a), 5.28(b) et 5.28(c)), nous constatons tout d'abord plusieurs phases d'accélération et de décélération suivant les axes x et z . Ces changements de vitesse correspondent au départ à l'ajustement de la position de la pipette suivant le plan $0xz$. Une fois la pipette placée sur l'axe de pénétration, on remarque une phase d'accélération et de décélération suivant l'axe y correspondant à la phase de rapprochement de la pipette de la cellule. Nous remarquons également de faibles variations de vitesse suivant le plan Oxz tout au long de cette étape. Ces variations de vitesse correspondent à des ajustements suivant l'axe principal de mouvement (axe y).

Les figures 5.26(d), 5.26(e) et 5.26(f) montrent les trajectoires du bras maître - durant la phase d'approche - lorsque l'opérateur utilise la représentation 3D de la cellule. On

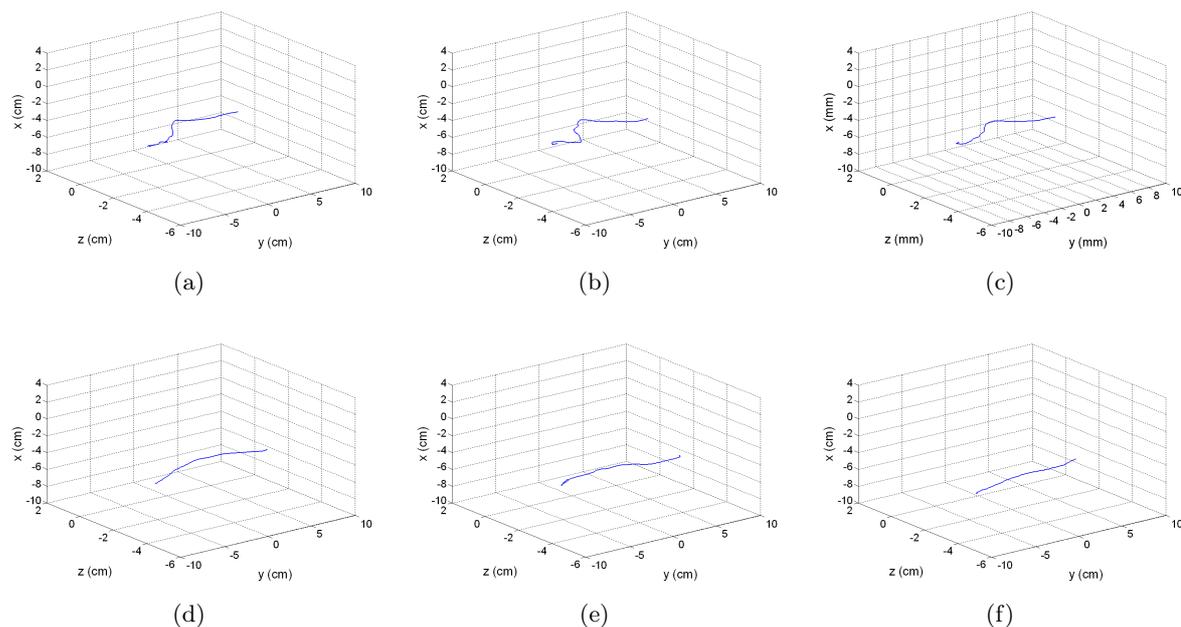


FIG. 5.27 – Trajectoires du bras maître durant la phase de pénétration : 1) en utilisant les vues latérale et frontale (a), (b) et (c) et 2) en utilisant la représentation 3D de la cellule (e), (f) et (g).

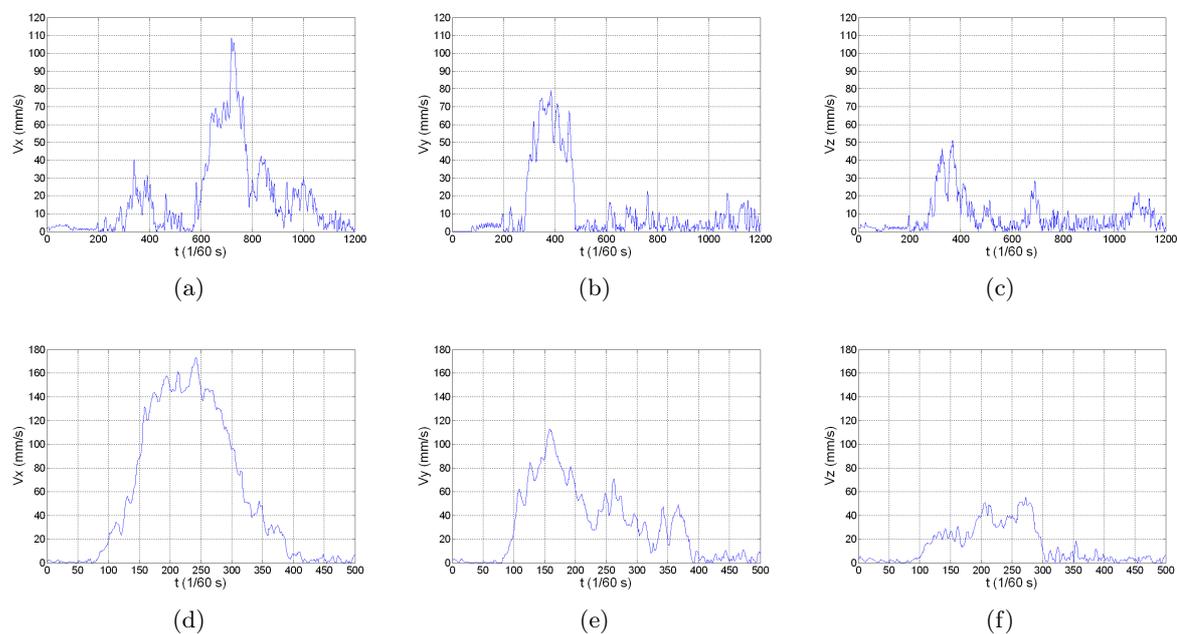


FIG. 5.28 – Évolution de la vitesse du bras maître suivant les trois axes durant la phase d'approche : 1) en utilisant les vues frontale et latérale (a), (b) et (c) et 2) en utilisant la représentation 3D de la cellule (e), (f) et (g).

remarque que le geste comporte une seule phase de mouvement. Les courbes d'évolution des vitesses (figures 5.28(d), 5.28(e) et 5.28(f)) confirment cette constatation. Le mouvement est

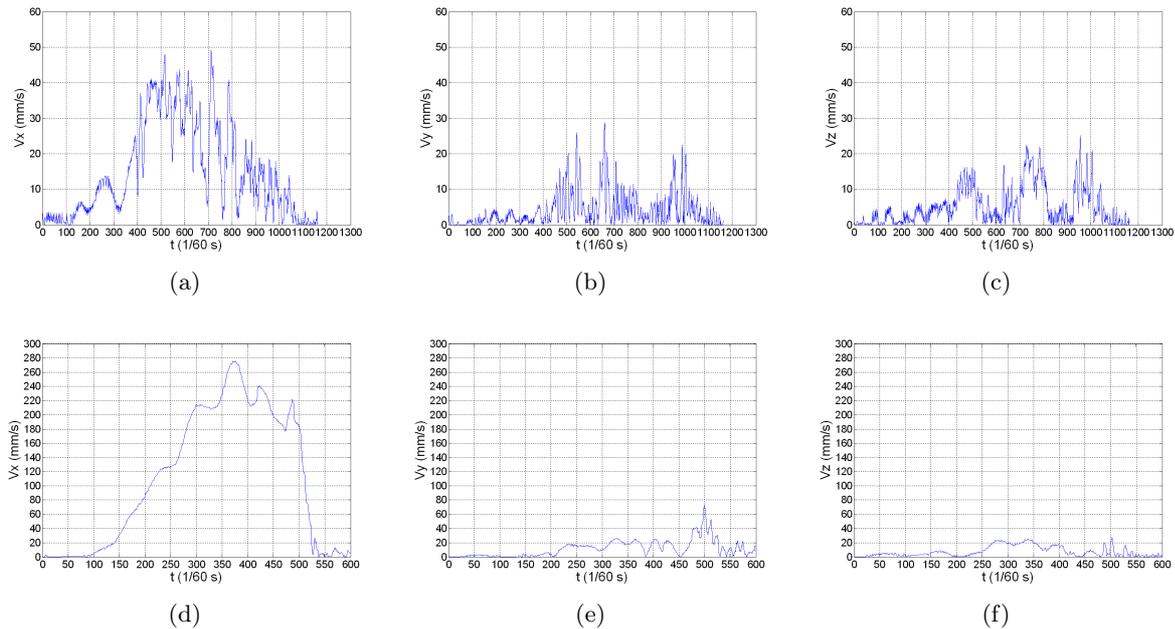


FIG. 5.29 – Évolution de la vitesse du bras maître suivant les trois axes durant de pénétration de la cellule : 1) en utilisant les vues frontale et latérale (a), (b) et (c) et 2) en utilisant la représentation 3D de la cellule (e), (f) et (g).

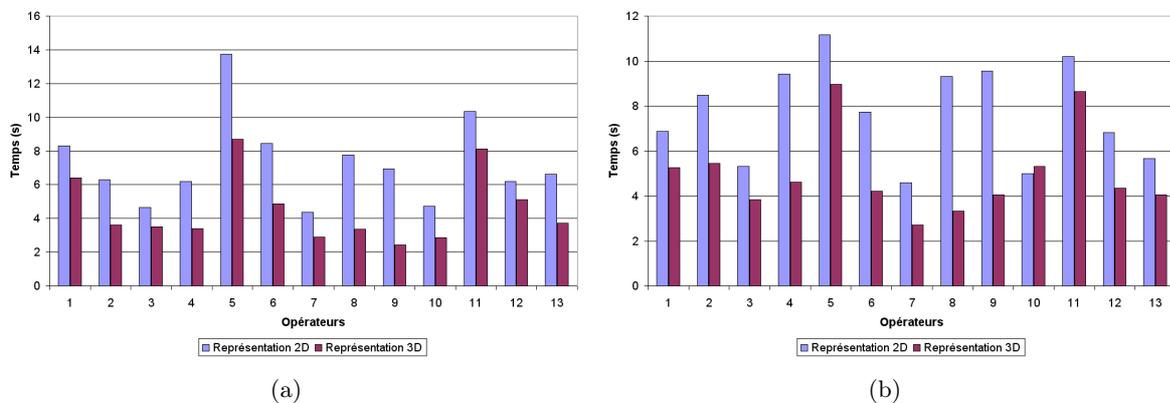


FIG. 5.30 – Temps pour la réalisation des phases (a) d'approche et de (b) pénétration.

relativement homogène suivant les trois axes, il comporte une phase d'accélération pendant la première partie du geste, l'opérateur décélère ensuite jusqu'au point de contact avec la cellule. La figure 5.30(a) montre les gains - en terme de temps d'exécution - obtenus en utilisant une représentation 3D de la cellule. Ces gains s'expliquent par les vitesses élevées des gestes de l'opérateur lorsque ce dernier utilise la représentation 3D : $Vx_{max} \approx 180 \text{ mm/s}$ avec une représentation 3D par rapport à $Vx_{max} \approx 110 \text{ mm/s}$ en utilisant les deux vues. Les notes d'appréciation (figure 5.31(a)) montrent de façon unanime l'intérêt de ce type de représentation pour l'opérateur durant la phase d'approche.

Durant la phase de pénétration, on remarque là aussi l'intérêt de la représentation 3D de la

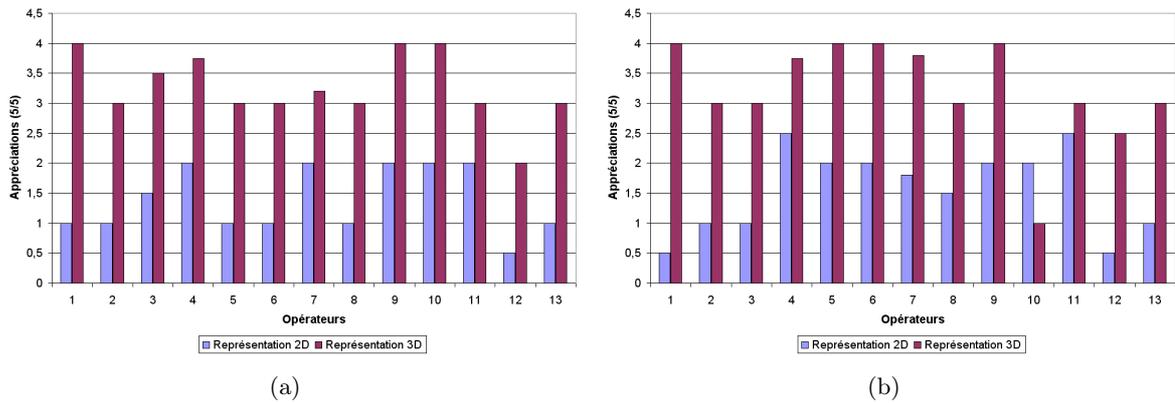


FIG. 5.31 – Notes d'appréciation pour la réalisation des phases (a) d'approche et de (b) pénétration.

cellule. Les figures 5.27(a), 5.27(b) et 5.27(c) correspondent au geste de l'opérateur en utilisant les vues 2D de la cellule et les figures 5.27(d), 5.27(e) et 5.27(f) correspondent au même geste, mais en utilisant la représentation 3D. Nous constatons que le type de représentation influe sur la trajectoire du geste de l'opérateur. Dans le cas de l'utilisation des vues 2D, l'opérateur réajuste constamment son mouvement afin de rapprocher la pipette de l'axe passant par le centre de la cellule. Il faut noter cependant que les figures correspondantes représentent des cas extrêmes de réajustement. Ces remarques peuvent être également observées sur les courbes d'évolution des vitesses correspondantes (voir figure 5.29(a), 5.29(b) et 5.29(c)). Lorsque l'opérateur utilise la représentation 3D, le geste de ce dernier est plus direct et comporte moins de réajustements (voir figure 5.29(d), 5.29(e) et 5.29(f)). Ces courbes montrent également les vitesses importantes pratiquées par l'opérateur en utilisant la représentation 3D : $V_{x_{max}} \approx 280 \text{ mm/s}$ avec une représentation 3D par rapport à $V_{x_{max}} \approx 50 \text{ mm/s}$ en utilisant les image 2D. Ces vitesses expliquent les gains importants en temps d'exécution (voir figure 5.30(b)). Enfin, les notes d'appréciation sont largement en faveur de la représentation 3D pendant la phase de pénétration de la cellule (voir figure 5.31(b)). On constate que ces expérimentations valident également les conclusions du chapitre 4.

5.8.3.2 Évaluation de l'apport du retour haptique

- A. **Objectifs** : Après s'être intéressés à l'apport de la représentation 3D de la scène, nous allons aborder dans cette section l'influence du retour pseudo-haptique durant la phase de pénétration de la cellule.
- B. **Procédure** : Le scénario réservé à cette série d'expériences intègre d'une part, la représentation 3D de la cellule et d'autre part, le retour pseudo-haptique (voir section 5.6). Nous nous intéressons à la phase de pénétration de la cellule.
- C. **Résultats** : La figure 5.32 représente les courbes d'évolution des vitesses du bras maître - durant la phase de pénétration - en utilisant un retour pseudo-haptique. Afin d'évaluer l'effet du facteur d'échelle sur le retour d'effort, nous avons utilisé deux facteurs d'échelle différents K_1 et K_2 ($K_2 = 4 K_1$). La première série de courbes (figures 5.32(a), 5.32(b) et 5.32(c)) correspond au facteur d'échelle K_1 . Nous constatons que le geste de l'opérateur est

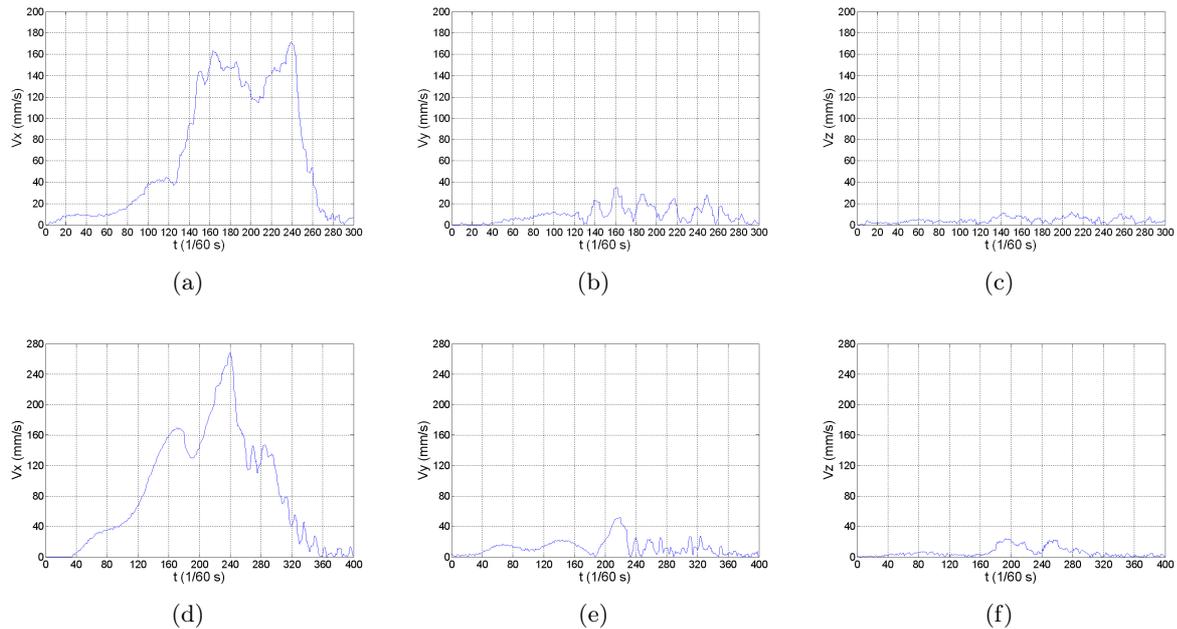


FIG. 5.32 – Évolution de la vitesse du bras maître suivant les trois axes durant de pénétration de la cellule en utilisant le retour pseudo-haptique.

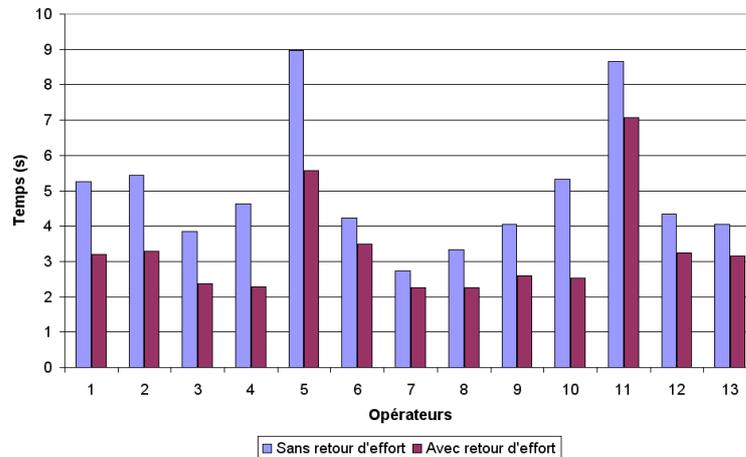


FIG. 5.33 – Temps pour la réalisation de la phase de pénétration en utilisant le retour pseudo-haptique.

freiné tout au long du mouvement. Cela se remarque au niveau de l'évolution de la vitesse suivant l'axe x durant la phase d'accélération, celle-ci est plus lente que dans le cas libre de la figure 5.29(d). Le même constat est valable sur l'étape de décélération, car l'opérateur diminue la vitesse de son geste, au fur et à mesure qu'il se rapproche du point de ponction. Ce comportement est dû à la gestion du mouvement de l'opérateur en prenant en compte l'effort croissant exercé par la cellule pendant la phase de pénétration.

La deuxième série de courbes (figures 5.32(d), 5.32(e) et 5.32(f)) correspond au facteur d'échelle K_2 . Nous remarquons tout d'abord la difficulté que rencontre l'opérateur à faire

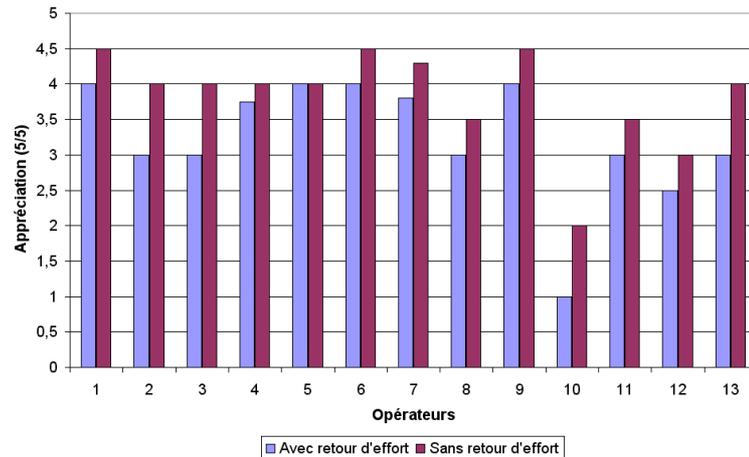


FIG. 5.34 – Notes d’appréciation pour la réalisation de la phase de pénétration en utilisant le retour pseudo-haptique.

avancer la pipette. Cela se remarque par la vitesse d’avancement suivant l’axe x qui semble plus amortie que dans le premier cas. On remarque également de faibles discontinuités de mouvement (courte phase d’accélération et de décélération) au début et à la fin du geste. Ces perturbations sont dues au fait que l’opérateur n’arrive pas à bien gérer son mouvement car l’effort ressenti est trop important, ce qui l’oblige à réajuster sa vitesse.

La figure 5.33 montre l’amélioration des temps d’exécution par rapport à une manipulation sans retour d’effort. La différence est assez importante, et marque l’intérêt du retour pseudo-haptique pour la micro-injection. Les appréciations données dans la figure 5.34 sont majoritairement en faveur d’une manipulation avec un retour pseudo-haptique, ce qui souligne le confort d’utilisation apporté à l’opérateur.

5.8.3.3 Évaluation de l’apport des guides virtuels

- A. **Objectifs** : Nous allons nous intéresser dans cette section à l’assistance du geste opératoire par des guides virtuels. L’objectif des expérimentations menées est de caractériser les deux guides proposés sur le plan des performances gestuelles, mais aussi en terme de confort d’utilisation.
- B. **Procédure** : Les scénarios proposés dans cette série de tests intègrent d’une part, la représentation 3D de la cellule et d’autre part, les guides virtuels. Un retour pseudo-haptique est également proposé à l’opérateur pour certaines expériences. L’ensemble des expériences décrit ci-dessous se déroule en deux étapes : 1) une phase d’approche et 2) une phase de pénétration de la cellule.
- C. **Résultats** : La figure 5.35 représente l’évolution de vitesse du bras maître durant la phase de pénétration en utilisant une contrainte de mouvement rectiligne. La première série de courbes (figures 5.35(a), 5.35(b) et 5.35(c)) correspond à l’utilisation du guide virtuel seul. On remarque que le geste de l’opérateur comprend généralement deux étapes. La première correspond au déplacement de la pipette du point de départ au point d’arrivée. Le geste de l’opérateur comprend ici une accélération et une décélération correspondant respective-

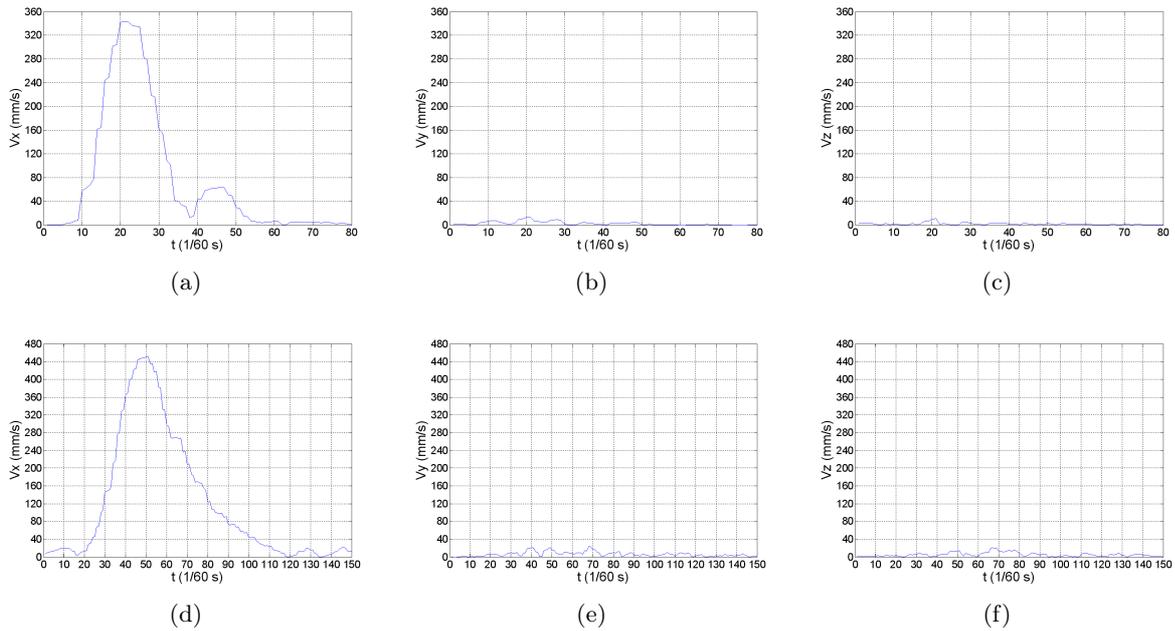


FIG. 5.35 – Évolution de la vitesse du bras maître suivant les trois axes durant de pénétration de la cellule : 1) sans utiliser le retour pseudo-haptique (a), (b) et (c) et 2) en utilisant le retour pseudo-haptique (e), (f) et (g).

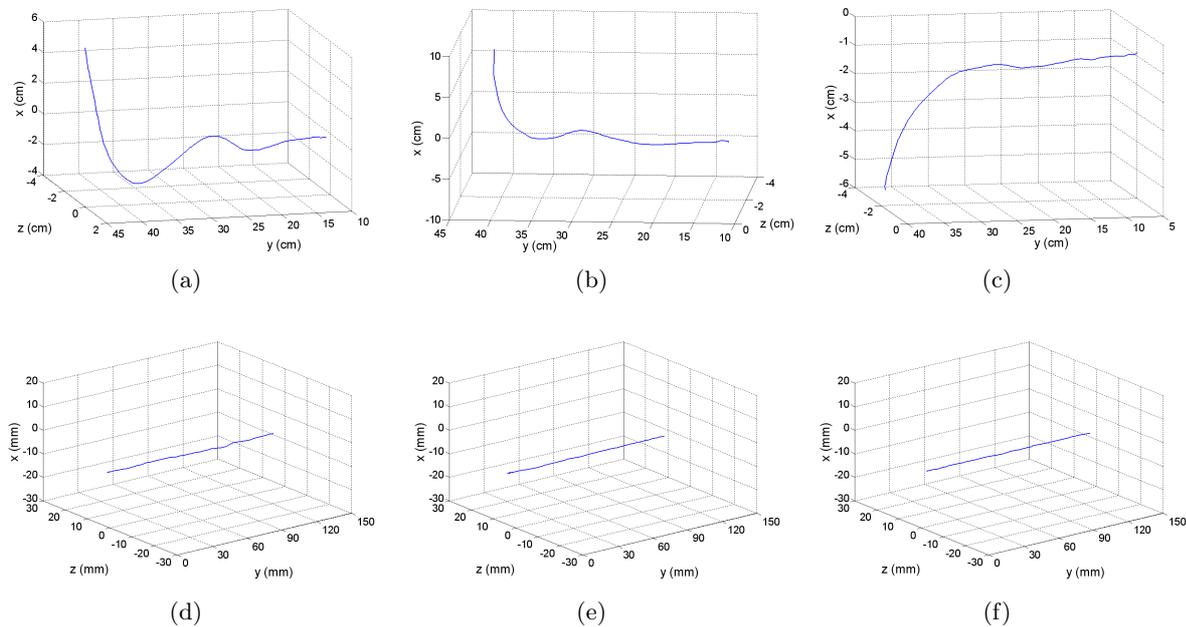


FIG. 5.36 – Trajectoires du bras maître durant la phase d'approche : 1) en utilisant une contrainte cône (a), (b) et (c) et 2) en utilisant la la contrainte rectiligne (e), (f) et (g).

ment au début et à la fin de cette étape. La deuxième phase du mouvement correspond à l'amortissement du geste au voisinage du point d'arrivée. Cette étape est marquée par faibles changements de vitesse en fin du mouvement. Lorsque nous rehaussons le guide vir-

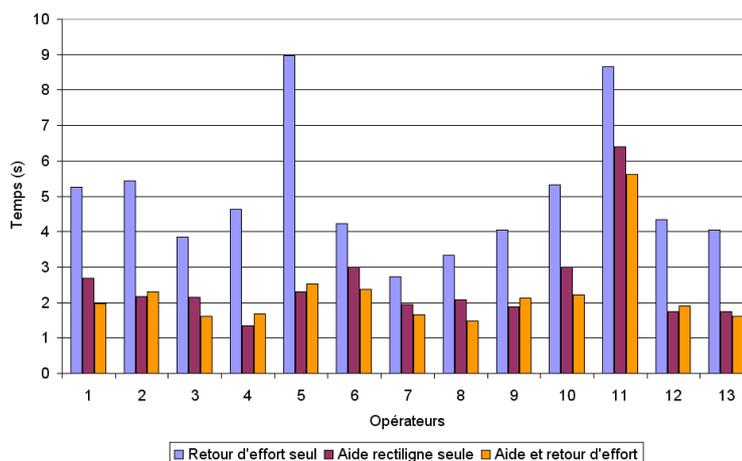


FIG. 5.37 – Temps pour la réalisation de la phase de pénétration.

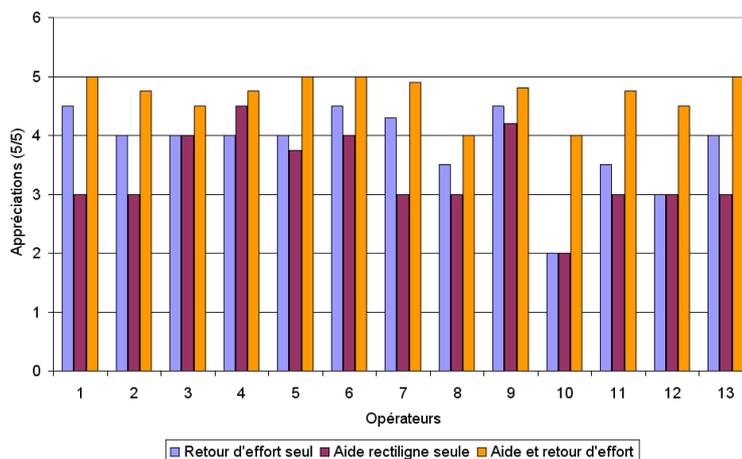


FIG. 5.38 – Notes d'appréciation pour la réalisation de la phase de pénétration.

tuel par un retour haptique (voir figures 5.35(d), 5.35(e) et 5.35(f)), nous remarquons un meilleur contrôle du geste lorsque la pipette s'approche de la cible. Le geste d'amortissement est atténué, et le déplacement est plus facilement maîtrisé. La figure 5.37 montre les temps d'exécution obtenus avec ce guide. On constate tout d'abord le gain important apporté par le guide rectiligne par rapport à une manipulation sans guide. Nous remarquons ensuite, qu'il n'y a pas d'apport significatif lorsque nous couplons l'aide avec le retour pseudo-haptique. Le retour d'effort peut même parfois pénaliser la vitesse d'exécution. A l'inverse, les appréciations données par les opérateurs (figure 5.38) montrent l'intérêt de coupler le guide virtuel avec le retour pseudo-haptique. En effet les opérateurs préfèrent de manière unanime cette dernière configuration malgré les faibles performances en temps d'exécution.

Les figures 5.36(a), 5.36(b) et 5.36(c) et les figures 5.36(d), 5.36(e) et 5.36(f) correspondent au geste de l'opérateur durant la phase d'approche lorsque il utilise respectivement le guide cône et le guide rectiligne. Dans la première série de courbes, on remarque que le geste est guidé de manière à ce que la pipette arrive toujours dans l'axe de pénétration lorsque qu'elle

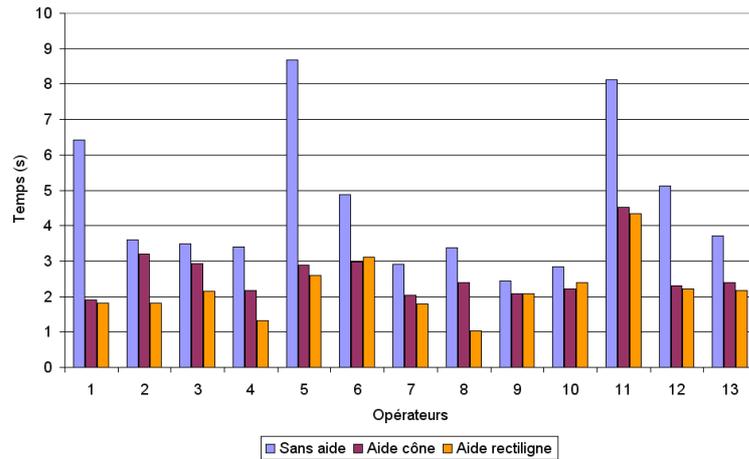


FIG. 5.39 – Temps pour la réalisation de la phase d’approche avec les deux aides proposées.

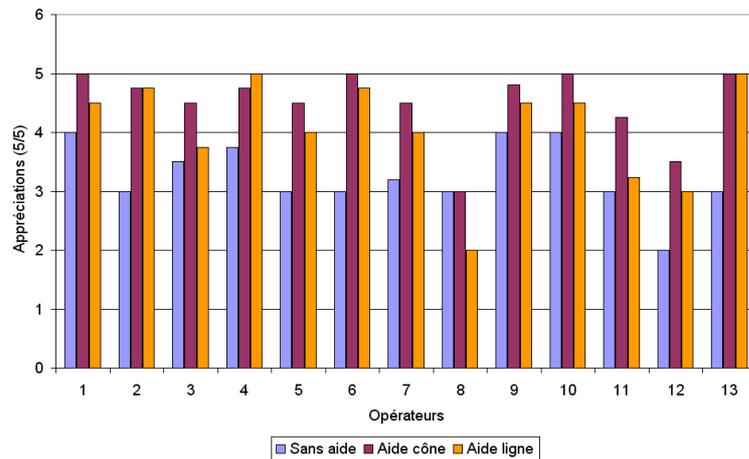


FIG. 5.40 – Notes d’appréciation pour la réalisation de la phase d’approche avec les deux aides proposées.

se rapproche du point de contact. Le geste de l’opérateur est par ailleurs progressivement amorti à l’approche de la position finale. La deuxième série de courbes montre des trajectoires rectilignes obtenues en utilisant le deuxième guide. Les temps d’exécution présentés dans la figure 5.39 montrent le gain significatif en temps d’exécution apporté par les deux guides virtuels. La préférence des opérateurs va en faveur du guide conique (voir figure 5.40)

5.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une application de l’IHM au domaine de l’injection intra-cellulaire. Nous avons décrit dans un premier temps les différentes étapes de reconstruction de la cellule (traitement d’image et reconstruction géométrique). Nous avons ensuite abordé le système de retour pseudo-haptique mis-au-point pour le rendu d’effort, ainsi que les différents guides virtuels associés. Enfin, nous avons exposé les expériences réalisées pour l’évaluation les

différents aspects de l'IHM.

L'analyse des résultats montre l'intérêt de la représentation 3D pour l'ensemble des opérations étudiées. Le retour d'effort constitue également une fonction indispensable pour la régulation du geste durant la phase de pénétration de la cellule. Le système pseudo-haptique proposé, fondé sur un modèle mécanique, présente un bon moyen pour le renforcement du couplage "action-perception" dans le cas où le système ne dispose pas de capteurs d'effort au niveau du site esclave. Par ailleurs, les métaphores haptiques basées sur des guides virtuels apportent un bon complément perceptif pour la fiabilisation du geste opératoire.

En conclusion, les interfaces homme-machine apparaissent tout a fait bien adaptées au rehaussement de la perception visuelle et haptique des interactions pipette/cellule dans un environnement biologique. Les fondements des différentes approches de substitution pseudo-haptique proposées devraient aboutir prochainement au développement d'interfaces sensorimotrices (vision + effort + son) multimodales et intuitives. Les travaux préliminaires présentés dans ce chapitre vont être approfondis dans un travail de thèse par monsieur Issam LADJAL dans le cadre d'une convention CIFRE avec la société CERB.

Conclusion générale

Les travaux présentés dans ce rapport abordent les différentes phases de développement nécessaires à la conception d'interfaces homme-machine (IHM) temps-réel, pour la perception et l'interaction multi-sensorielle dans le domaine de la micromanipulation robotisée à micro-échelle. L'approche adoptée est basée sur le concept de la télé-micromanipulation utilisant une représentation intermédiaire du micro-environnement. Pour cela, nous nous sommes fixés un certain nombre d'objectifs pour améliorer l'interfaçage homme-machine. On propose pour cela à l'opérateur une IHM ergonomique et intuitive capable de projeter sur les modes perceptifs de l'opérateur (visuel, haptique et sonore), les différents retours informatifs ainsi que l'assistance nécessaire au bon déroulement des opérations.

Afin de rehausser la perception visuelle de téléopérateur, le chapitre 2 traite des différentes étapes qui ont permis la virtualisation 3D du micro-environnement à partir des images réelles fournies par les microscopes optiques. Dans un premier temps, les algorithmes de traitement d'image développés ont permis une localisation et un suivi dynamique des constituants de la scène avec une précision subpixelaire, et cela tout en étant robuste vis-à-vis de l'occultation partielle des objets. Une méthode de calibrage innovante basée sur une mire virtuelle a été proposée en vue de satisfaire les contraintes liées à la microscopie optique, à savoir une faible profondeur de champ, d'encombrement et de précision. Cette méthode beaucoup plus simple à mettre en œuvre a montré de meilleures performances en termes de précision et de robustesse que la méthode classique de Tsai. Finalement, la représentation virtuelle est ensuite juxtaposée sur le micro-environnement réel par l'intermédiaire d'une procédure de recalage automatique.

Sur la base de cette représentation virtuelle du micro-environnement, nous avons proposé au chapitre 3 un ensemble de moyens pour améliorer la perception visuelle, haptique et sonore de l'opérateur. La représentation intermédiaire vise dans ce cas à rapprocher l'opérateur de la tâche à réaliser en projetant sur ces différents modes de perception (de manière directe et indirecte). Sa perception visuelle est améliorée par l'ajout d'indices visuels dans la scène 3D couplés à des moyens de navigation intuitifs, alors que sa perception haptique est rehaussée à partir de l'introduction de capteurs d'effort (physique ou virtuel). Un mode sonore est également proposé en vue d'alléger le flux sensoriel du canal visuel et haptique pour l'auralisation de certaines grandeurs physiques liées à la micromanipulation. En complément à cette représentation intermédiaire, nous avons proposé un ensemble de guides virtuels permettant d'assister l'opérateur dans la réalisation de ces tâches, en lui proposant une aide adaptée à différents cas de micromanipulation.

Le chapitre 4 présente une validation expérimentale ainsi qu'une évaluation des différentes modalités et métaphores d'assistances proposées. Un banc expérimental multimodal dédié à la télé-micromanipulation par pointe AFM a été développé. Les différentes techniques d'immersion, d'interaction et d'assistance ont été validées pour des stratégies de micromanipulation : la

micromanipulation par adhésion et la micromanipulation par poussée. Pour chacune d'entre-elles, plusieurs scénarios d'essais regroupant un ensemble d'indices quantitatifs et qualitatifs de mesure sont expérimentés. Les résultats obtenus ont permis de valider l'approche retenue sur une population de candidats significative.

Sur la base des résultats et de l'analyse des performances de l'opérateur obtenus avec l'IHM développée, nous avons proposé dans le chapitre 5 d'appliquer ce concept d'interfaçage homme-machine au domaine de la micro-injection cellulaire. Nous avons décrit d'une part les différentes étapes de reconstruction géométrique et d'autre part, une nouvelle procédure de calcul et de rendu d'effort proposée pour renforcer le couplage action-perception de l'opérateur. Des guides virtuels ont également été proposés afin d'assister les gestes de l'opérateur durant les phases de micromanipulation (approche et injection). Une étude expérimentale sur une population de 12 sujets a permis de valider le concept de l'IHM multimodale. Les résultats d'expérience ont montré de meilleures performances en termes de précision, confort d'utilisation et maîtrise du geste opératoire de l'opérateur dans les conditions normales de manipulation.



FIG. 1 – Supervision des opérations à l'aide d'une plateforme sphérique située à Saragosse.

Il est vrai que ce travail a mis l'accent sur l'importance du rehaussement de la communication entre l'opérateur et la tâche à réaliser. Il ne faut cependant pas oublier que ce type de concept nécessite une mise en œuvre assez compliquée, et reste encore mal maîtrisée, notamment sur le plan de la reconstruction du micro-environnement, où les techniques actuelles trouvent leurs limites. Ce travail n'a d'autre prétention que d'être exploratoire, et il reste bien plus de problèmes à examiner et à résoudre qu'il en a été résolu.

Les travaux de recherche à court terme concernent principalement l'intégration de modèles physiques au système de télé-micromanipulation développé. L'intégration de modèles micro-physiques robustes aux incertitudes de modélisation permettra, à terme, de simuler des tâches difficiles à téléopérer ou à automatiser, offrant ainsi à l'opérateur l'opportunité de valider les stratégies de manipulation adéquates. Ces stratégies pouvant être enregistrées et réalisées de manière automatique par la suite (*programmation par apprentissage*). L'opérateur serait à même de proposer des stratégies anticipatoires afin de prédire certains effets liés aux forces du micro-environnement lors de tâches de micromanipulation téléopérées ou automatisées.

La supervision des opérations de télé-micromanipulation à distance est aussi une autre voie de recherche à court terme. Des premiers essais sur une plateforme sphérique de mouvements (6 degrés de liberté) développée à l'Université de Saragosse (Barcelone, Espagne) sont en cours d'élaboration pour valider ces concepts et l'intégrer au sein de la plateforme du LVR. Ce simulateur de mouvement permettra de retransmettre les mouvements et la gestuelle de l'opérateur durant les phases de micromanipulation et d'exploration physique dans le micro et nanomonde. L'expert peut ainsi naviguer à distance et proposer une assistance à l'opérateur débutant qui réalise les tâches de micromanipulation (voir figure 1).

Annexe A

Méthode de calibrage basée sur l'algorithme de Tsai

A.1 Modèle optique du couple caméra/microscope

Comme pour la méthode proposée, le modèle optique retenu pour le microscope est le modèle du pinhole [FAUGERAS ET AL., 2001]. La transformation permettant le passage du repère objet (R_w) au repère rétinien (R_r) inclue une rotation \mathbf{R} et une translation \mathbf{T} . Cette transformation peut s'exprimer par le système d'équations A.1 :

$$\begin{bmatrix} \check{x} \\ \check{y} \\ \check{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{ob} + f_{lt} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_{ob} + f_{lt} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & 0 & T_y \\ 0 & 0 & 1 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & 0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & 0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

f_{lt} et f_{ob} représentent respectivement la distance focale de la lentille de tube et de l'objectif. \check{x} et \check{y} représentent les coordonnées sur le plan rétinien en prenant en considération les distorsions de l'objectif. Dans le modèle étudié, nous considérons uniquement les distorsions radiales du 1^{er} ordre, elles s'expriment par les équations A.2 comme suit :

$$\begin{aligned} \check{x} &= x (1 + k_1 r^2) \\ \check{y} &= y (1 + k_1 r^2) \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

Où $r^2 = x^2 + y^2$ et (x, y) sont les coordonnées sur le plan rétinien sans subir de distorsion.

En combinant les deux systèmes d'équations A.1 et A.2 nous obtenons le système A.3. Celui-ci exprime une relation entre les coordonnées dans le repère objet, les coordonnées sur le plan rétinien et les paramètres intrinsèques et extrinsèques du microscope. Les coordonnées et l'orientation du repère objet son pris de manière à ce que la mire de calibrage appartienne au plan $Z_w = 0$.

$$\begin{aligned} x(1 + k_1 r^2) &= (f_{ob} + f_{lt}) \frac{r_{11}X_w + r_{12}Y_w + T_x}{r_{31}X_w + r_{32}Y_w + T_z} \\ y(1 + k_1 r^2) &= (f_{ob} + f_{lt}) \frac{r_{21}X_w + r_{22}Y_w + T_y}{r_{31}X_w + r_{32}Y_w + T_z} \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

L'algorithme retenu pour le calcul des paramètres intrinsèques et extrinsèques du microscope repose sur la contrainte d'alignement radiale (RAC Model) [TSAI, 1987]. Il se déroule en deux étapes. Nous commençons par le calcul des paramètres extrinsèques du microscope par une méthode directe (closed-form). Nous utilisons ensuite ces résultats pour calculer les paramètres intrinsèques à savoir le grossissement, le coefficient de distorsion et la profondeur de la mire (T_z).

A.2 Calcul des paramètres extrinsèques

La contrainte d'alignement radiale implique que le vecteur, qui s'étend de l'origine du plan rétinien à un point p_r donné appartenant à ce plan, est radialement parallèle avec le vecteur qui s'étend de l'axe optique au point objet p_o correspondant. Cette contrainte est indépendante des distorsions radiales de l'objectif, de la distance focale et de la profondeur de l'objet (T_z). Elle est également valide même si le plan objet et le plan image ne sont pas parallèles.

A partir de cette contrainte, nous pouvons obtenir une solution directe pour l'obtention des paramètres extrinsèques du microscope. Cette solution s'obtient en posant le produit croisé des vecteurs cités plus haut égal à zéro (vecteurs parallèles) [HORN, 2000]. Il nous est possible ainsi d'exprimer une relation qui réunit les coordonnées 2-D sur le plan rétinien, les coordonnées 3-D dans le repère objet et les paramètres extrinsèques du microscope. Cette relation est donnée par l'équation A.4 :

$$(r_{11}X_w + r_{12}Y_w + T_x) y - (r_{21}X_w + r_{22}Y_w + T_y) x = 0 \quad (\text{A.4})$$

Afin de transformer l'équation homogène A.4 en équation non-homogène, nous posons le terme T_y égale à 1. Nous pouvons ainsi écrire l'équation linéaire à cinq inconnues suivante :

$$(X_w y) r'_{11} + (Y_w y) r'_{12} + y t'_x - (X_w x) r'_{21} + (Y_w x) r'_{22} + x = 0 \quad (\text{A.5})$$

Pour résoudre cette équation A.5, il est nécessaire d'avoir cinq correspondances - entre le repère objet et le repère rétinien - au minimum.

Une fois les paramètres r'_{11} , r'_{12} , r'_{21} , r'_{22} , t'_x calculés, il est nécessaire de calculer le facteur d'échelle pour remonter aux valeurs homogènes de ces paramètres. Nous utilisons pour cela la condition d'orthogonalité de la matrice de rotation :

$$\begin{aligned} r_{11}^2 + r_{12}^2 + r_{13}^2 &= 1 \\ r_{21}^2 + r_{22}^2 + r_{23}^2 &= 1 \\ r_{11}r_{21} + r_{12}r_{22} + r_{13}r_{23} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

En remplaçant les paramètres non homogènes dans le système A.6, nous obtenons les équations suivantes :

$$\begin{aligned} r'_{11}{}^2 + r'_{12}{}^2 + r'_{13}{}^2 &= k^2 \\ r'_{21}{}^2 + r'_{22}{}^2 + r'_{23}{}^2 &= k^2 \\ r'_{11}r'_{21} + r'_{12}r'_{22} + r'_{13}r'_{23} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

En combinant les équations données en A.7, nous obtenons l'équation A.8 :

$$k^4 - k^2 (r'_{11}{}^2 + r'_{12}{}^2 + r'_{21}{}^2 + r'_{22}{}^2) + (r'_{11} r'_{12} - r'_{21} r'_{22})^2 = 0 \quad (\text{A.8})$$

Cette équation nous permet ainsi de calculer les paramètres r'_{13} et r'_{23} à partir du système A.7 comme suit :

$$\begin{aligned} r'_{13}{}^2 &= k^2 - (r'_{11}{}^2 + r'_{12}{}^2) \\ r'_{23}{}^2 &= k^2 - (r'_{21}{}^2 + r'_{22}{}^2) \end{aligned} \tag{A.9}$$

Pour résoudre ce système, il est nécessaire de prendre la plus grande racine positive de l'équation A.8. Seule cette solution permet de satisfaire la contrainte du membre droit du système A.9 (≥ 0). Une fois le paramètre k calculé, nous normalisons les deux premières lignes de la matrice de rotation en les divisant par la valeur k . Nous calculons ensuite la troisième ligne de la matrice en prenant le produit croisé des deux premières lignes. Enfin, le signe des paramètres r_{13} et r_{23} est obtenu en réalisant des tests de projection dans le repère objet avec le modèle obtenu. Les signes corrects de ces paramètres permettent d'obtenir les projections les plus proches des points réels.

A.3 Calcul des paramètres intrinsèques

Le calcul des paramètres intrinsèques du microscope repose sur une modification de la deuxième étape de l'algorithme de Tsai. Cette modification consiste à approximer les angles de tangage et de lacet par de petits angles [ZHOU ET NELSON, 1999]. Nous réduisons ainsi considérablement les effets du bruit dû au cas parallèle (instabilités, divergence des solutions). Sur la base de cette approximation, nous pouvons négliger les paramètres r_{31} et r_{32} dans le système d'équation A.3 comme suit :

$$\begin{aligned} x(1 + k_1 r^2) &= M(r_{11}X_w + r_{12}Y_w + T_x) \\ y(1 + k_1 r^2) &= M(r_{21}X_w + r_{22}Y_w + T_y) \end{aligned} \tag{A.10}$$

Enfin, en réalisant la somme des deux équations du système A.10 nous obtenons l'équation A.11 :

$$((r_{11}X_w + r_{12}Y_w + T_x) + (r_{21}X_w + r_{22}Y_w + T_y))M - ((x + y)r^2)k_1 = x + y \tag{A.11}$$

L'équation A.11 peut être reformulée sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Phi & \Psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M \\ k_1 \end{bmatrix} = \Omega \tag{A.12}$$

Avec :

$$\Phi = (r_{11}X_w + r_{12}Y_w + T_x) + (r_{21}X_w + r_{22}Y_w + T_y)$$

$$\Psi = (x + y)r^2$$

$$\Omega = x + y$$

En prenant un nombre suffisant de correspondance (2-D/3-D), nous pouvons calculer les paramètres M et k_1 avec une procédure de minimisation par moindre carré. Afin de garantir

le découpage entre les différentes équations du système calculé, il est nécessaire de prendre des points non-alignés sur la plan de la mire (distribution aléatoire).

Annexe B

Taxonomie des techniques de contrôle du point de vue

Dans la définition des méthodes de contrôle de point vue, on utilise la taxonomie proposée par Bowman [BOWMAN ET AL., 1997], celle-ci est présentée dans la figure B.1 :

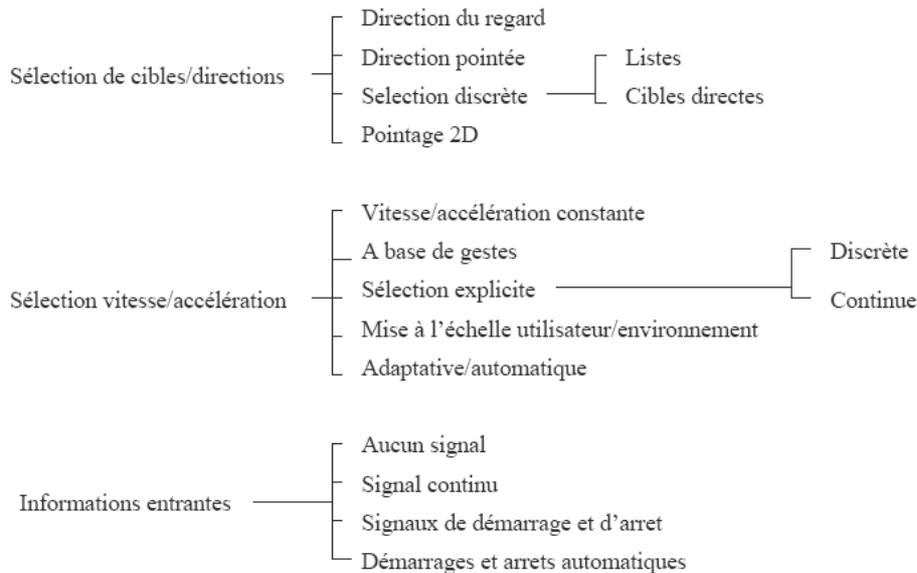


FIG. B.1 – Taxonomie des techniques de contrôle du point de vue, selon Bowman [BOWMAN ET AL., 1997].

où :

- A. *Sélection de cibles/directions* : fait référence aux méthodes dans lesquelles la direction du regard ou l'objet cible sont spécifiés. La commande peut être continue ou discrète. Dans le cas discret le point de vue est ajusté suivant des configurations prédéfinies fixes (liste de configuration, position de la cible). Dans le cas continu, la direction du point de vue est liée à une composante de la dynamique de la scène.

- B. *Sélection vitesse/accélération* : Ces techniques permettent à l'opérateur de changer la vitesse de déplacement. Une grande partie des applications virtuelles emploient des vitesses constantes. Cependant, il existe plusieurs approches de contrôle de vitesse (basée sur le geste d'opérateur, contrôle adaptatif, etc.).
- C. *Informations entrantes* : font référence aux informations requises par le système afin de commencer, continuer ou arrêter le déplacement. Dans le cas d'un mouvement constant, aucune information n'est requise. Dans le cas inverse, le système requiert soit un flux continu d'information - afin de mettre à jour l'état de l'opérateur - soit une information au début et à la fin du mouvement.

Annexe C

Les référentiels spatiaux

C.1 Définition générale des références spatiales d'un individu

Dans un environnement réel, les deux systèmes de référence spatiale d'un individu sont :

- A. *le système égocentré* : qui prend pour origine l'individu. Par exemple, l'objet est à ma droite ;
- B. *le système exocentré* : qui prend pour origine des indices extérieurs à l'individu. Par exemple, l'objet est à côté de la fenêtre.

La référence égocentrée doit être réactualisée à chaque déplacement tandis que la référence exocentrée est indépendante de l'individu.

C.2 Références spatiales d'un individu dans un environnement virtuel

Dans un environnement virtuel, Kruijff [KRUIJFF ET AL., 2000] définit deux types de référentiel pour un visiteur :

- A. *le référentiel égocentrique* : dans lequel la position, l'orientation et les mouvements de la caméra respectent la position et l'orientation du corps, de la tête et des yeux du visiteur ;
- B. *le référentiel exocentrique* : dans lequel la position, l'orientation et le mouvement de la caméra sont définis dans des coordonnées externes au visiteur.

Annexe D

Taxonomie des guides virtuels

D.1 Classification des guides virtuels

La notion de guides virtuels initialement introduite par Rosenberg peut être décomposée en trois classes [KHEDDAR, 2001] :

D.1.1 Guides virtuels dédiés à l'assistance de l'opérateur

On y regroupe toutes les métaphores dont la fonction n'a pas de lien direct avec le robot esclave. A titre d'exemple, les divers marqueurs graphiques de position/orientation, les substituts sensoriels, le sons 3D, les effets synthétiques tels que l'ombrage, la texture, la transparence. Le rôle de cette catégorie de métaphore est l'amélioration de la perception de l'opérateur sans pour autant avoir un effet direct sur le robot.

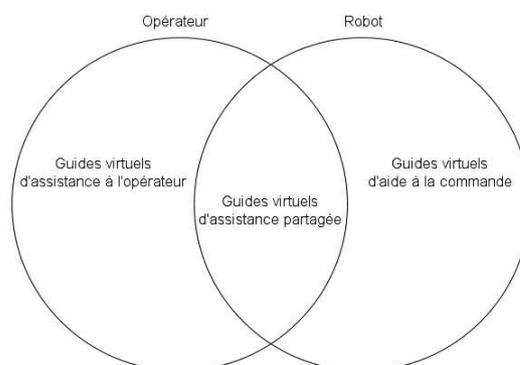


FIG. D.1 – Classification de la métaphore des guides virtuels.

D.1.2 Guides virtuels dédiés à la commande du robot

Cette catégorie de guide concerne les systèmes nécessaires à la stricte exécution de la tâche, elle englobe principalement les mécanismes virtuels [JOLY ET ANDRIOT, 1995]. Ceux-ci peuvent être considérés comme un ensemble d'éléments simples [KOSUGE ET AL., 1995] tels qu'une compliance, une rotation, une composante de glissement, etc., de telle sorte que les contraintes imposées au mouvement satisfassent la tâche à réaliser. Dans certaines approches les mécanismes virtuels se présentent sous forme de trajectoires (chemins guides) [BACKES ET AL., 1998], le robot esclave est alors contraint à suivre cette trajectoire.

Généralement les mécanismes virtuels sont associés uniquement à l'opérateur. Néanmoins dans certaines approches le mécanisme est appliqué à la fois au dispositif maître et au robot [JOLY ET ANDRIOT, 1995]. Les gestes de l'opérateur, tout comme la commande du robot, sont contraints à partir du mécanisme virtuel.

D.1.3 Guide virtuels partagés

Cette catégorie de guide est située à un niveau d'abstraction plus élevé que les deux premières, c'est une extension des guides virtuels introduits par Rosenberg [ROSENBERG, 1992]. Ils sont dédiés à la fois à l'assistance de l'opérateur et à l'exploitation de l'autonomie des robots, le principe de base de ce type de guide consiste à fixer dans l'environnement des métaphores dont le résultat de l'action est une tâche issue d'une combinaison de la tâche réalisée par l'opérateur et de celle d'un module autonome lié à la tâche robotique. Ces guides sont à la base d'approches évoluées de la TAO tel que le concept du robot caché [KHEDDAR, 2001] ou encore la réalité virtuelle projective [FREUND ET ROBMANN, 1999].

D.2 Guides virtuels simples et composés

Suivant la complexité des guides virtuels, on peut distinguer [OTMANE, 2000] :

D.2.1 Guide virtuel simple

Un guide virtuel simple est représenté par une simple primitive géométrique. Elle peut être un segment de droite, un plan ou bien un volume. Ces guides canoniques sont généralement utilisés pour réaliser des tâches simples telles que le suivi d'une ligne droite, évitement d'obstacles (champ répulsif) ou bien atteindre un objet dans l'environnement virtuel (champ attractif).

D.2.2 Guide virtuel composé

Un guide virtuel composé est constitué de plusieurs guides virtuels simples (un ensemble de segments définissant une trajectoire, un ensemble de plans ou bien un ensemble d'objets de forme quelconque). Ces guides sont généralement utilisés pour réaliser des tâches de téléopération complexes tel que suivre une trajectoire quelconque ou bien assembler et désassembler des objets.

D.3 Guides virtuels actifs et passifs

Suivant le type d'assistance qu'offre un guide virtuel on peut distinguer [ABBOTT ET AL., 2005] :

D.3.1 Guide virtuel passif

Un guide virtuel (simple ou composé) est dit passif lorsque son utilisation est limitée à l'assistance de la perception de l'opérateur (il n'a pas d'effet direct sur le robot ni sur son environnement).

D.3.2 Guide virtuel actif

Un guide virtuel (simple ou composé) est dit actif lorsque son utilisation a un effet direct sur le robot ou sur son environnement.

Annexe E

Les indices acoustiques de localisation

L'homme dispose d'un certain nombre d'outils redondants pour la localisation d'un signal acoustique dans l'espace. Il est possible de les diviser en deux grandes classes. Chacune de ces classes comprend plusieurs instruments aptes à fournir les indices nécessaires à la localisation de la source émettrice. Ils sont [BERNASCHINA, 2003], [LINDSAY ET NORMAN, 1980] : 1) binauriculaires, quand ils nécessitent la comparaison des informations interauriculaires ; et 2) monauriculaires, quand les informations traitées par une seule oreille sont suffisantes.

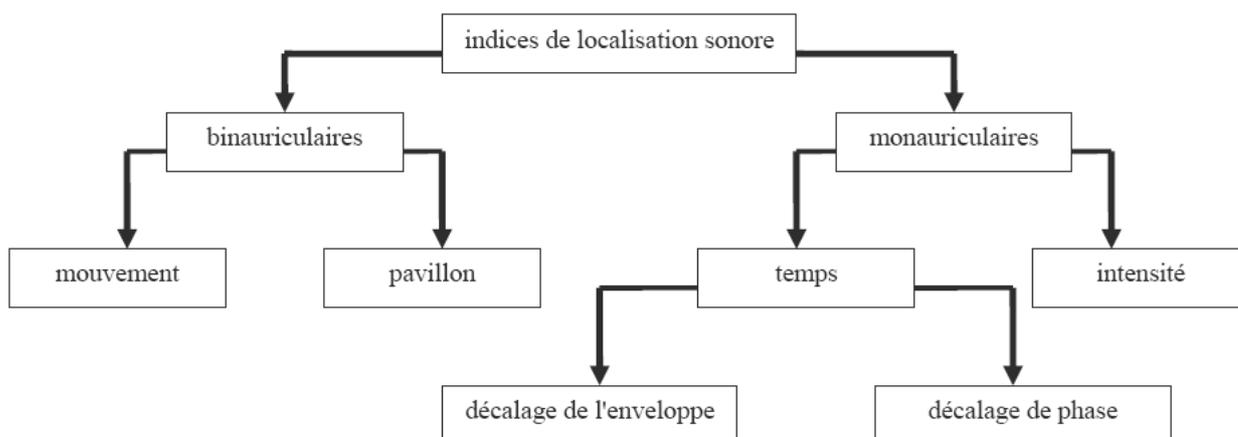


FIG. E.1 – Les indices acoustiques de localisation.

E.1 Les indices binauriculaires

Les indices binauriculaires fonctionnent sur l'acquisition et la comparaison d'informations qui viennent des deux oreilles, d'où leur nom. On parle aussi d'indices interauriculaires. Les différences interauriculaires sur lesquelles se fondent ces indices sont : 1) le temps d'arrivée du signal ; qui se divise en décalage de la phase et de l'enveloppe, et 2) l'intensité du signal perçu.

E.1.1 L'indice binaurculaire de temps (Différence Interaurale Temporelle : DIT)

Cet indice concerne toutes les fréquences audibles. Il provient du fait que le son ne met pas le même temps pour parvenir à chaque oreille : il existe une différence (Δt) dont notre cerveau se sert pour construire la perception spatiale. Cette différence est d'autant plus importante que la source est située sur les côtés de la tête (c'est-à-dire que la source est proche d'un plan passant par les oreilles et les pieds) et que la source est proche de nous. En effet, plus la source est éloignée, moins la différence temporelle est importante. Cet indice est donc négligeable pour les sources éloignées mais utile pour ceux qui sont proches.

$$\Delta t = \frac{r\Pi}{V}$$

Où :

- Δt : est le temps de parcours entre les deux oreilles ;
- r : est rayon de la tête ($18cm <$);
- V : vitesse de propagation du son dans l'air ($335.5m/s$).

E.1.2 L'indice binaurculaire de phase

Cet indice concerne les basses fréquences ($800Hz <$). Si le son est grave, la longueur d'onde λ est grande ; si elle est supérieure à la distance d entre les deux oreilles, celles-ci ne pourront pas être en phase, et ce décalage permet au centre nerveux central de localiser la source. Dans les conditions réelles, pour une précision optimale, la longueur d'onde doit être telle que :

$$\frac{\lambda}{2} > d$$

E.1.3 L'indice binaurculaire d'intensité (Différence Interaurale d'Intensité : DII)

Cet indice concerne les hautes fréquences ($> 4000Hz$). Il représente la différence perçue entre les intensités. Il est dû à l'ombre sonore que crée la tête d'une personne. Si l'onde a une longueur d'onde plus grande que la largeur de la tête, la différence ne sera pas perçue. En revanche, si elle est plus petite, une ombre sonore se forme, différenciant ainsi les sons reçus par chaque oreille.

E.2 Les indices monauriculaires

Les indices monauriculaires permettent la localisation d'une source sonore sur la base des informations qui parviennent à une seule oreille. Ces indices sont : 1) les mouvements ou changements de position de la tête ou du corps dans l'espace, et 2) les modifications du signal par le pavillon ou pinna.

E.2.1 Les indices monauriculaires liés aux mouvements

Plusieurs signaux acoustiques peuvent présenter les mêmes caractéristiques interauriculaires de temps d'arrivée, d'intensité ou de phase. Par exemple, un signal acoustique émis par une source fronto-latérale a les mêmes caractéristiques qu'un signal ipsilatéral qui aurait les mêmes coordonnées mais sur l'arrière. Afin de lever l'ambiguïté relative à la position de la source d'un

signal acoustique, l'homme déplace et réoriente sa tête. Il arrive ainsi à moduler les informations qui lui parviennent ; il analyse la qualité du son et les différences créées par la réflexion et la réfraction des fréquences perçues au niveau de la tête et des pavillons.

E.2.2 Les indices monauriculaires liés au pavillon

Le rôle majeur que tiennent les pavillons dans la localisation de la position d'un signal acoustique a été démontré. On sait que le pavillon et le conduit auditif agissent à la manière d'un résonateur qui amplifie certaines fréquences du spectre au détriment d'autres en fonction de l'angle d'incidence sous lequel le signal lui parvient. La forme de l'oreille externe est primordiale, car elle permet la réflexion du signal acoustique sur ses circonvolutions. Les pavillons permettent de lever l'ambiguïté que constituent les sources : directement face au sujet ou directement derrière lui. La forme du pavillon canalise le signal acoustique vers le conduit auditif.

Annexe F

Étapes de localisation spatiale d'une source sonore

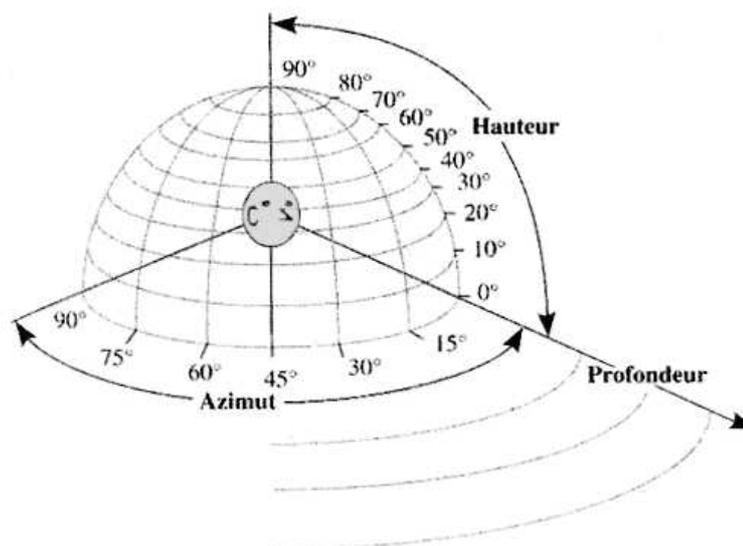


FIG. F.1 – Étape de localisation d'une source sonore [LÉOT, 2005].

La localisation complète d'une source sonore suppose trois étapes [LÉOT, 2005], [VANONY, 2002] :

1. **Une localisation circulaire (azimut)** : c'est la plus précise, la plus importante, et la mieux connue. Le système nerveux central exploite pour cela les indices acoustiques de localisation - détaillés dans l'Annexe E. Le seuil minimum de discrimination angulaire audible dans l'axe est de 1 à 2°. La précision de localisation dépend de l'angle d'incidence de la source (figure F.2).
2. **Une appréciation de l'élévation (hauteur)** : Cette propriété est beaucoup moins précise que la localisation circulaire. Ceci est dû à des différences interaurales particulièrement réduites : seules interviennent quelques asymétries du corps humain, notamment celle des

pavillons. L'incertitude de localisation atteint 15 à 20° pour une source située au-dessus de la tête.

3. **Une appréciation de la distance (profondeur) :** Il s'agit d'une propriété différente des précédentes, et qui n'est pas directement en rapport avec la physiologie du système auditif. Elle est liée à l'expérience, et n'est donc pas innée. Elle s'apprend, et est fonction des informations déjà stockées en mémoire. D'une façon générale, le cerveau effectue une comparaison entre les sons entendus et les sons de même nature mémorisés : la comparaison porte non seulement l'intensité mais aussi sur le timbre.

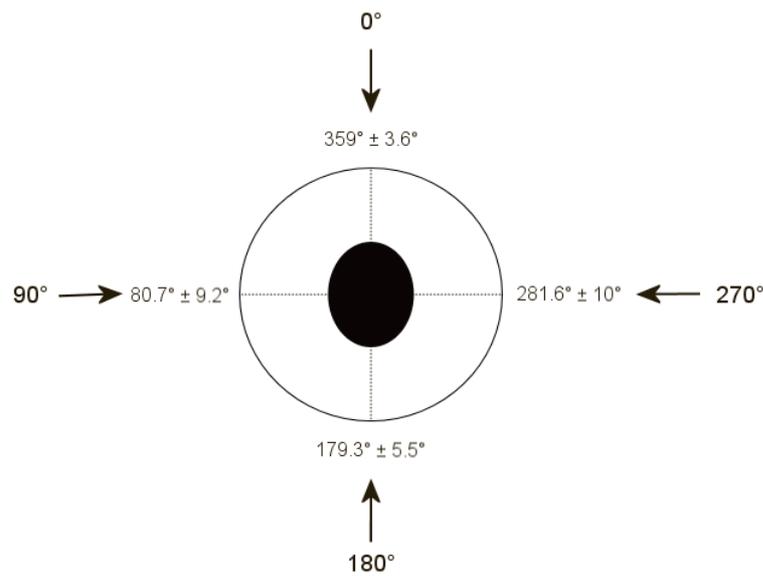


FIG. F.2 – Incertitude sur la localisation circulaire [VANONY, 2002].

Bibliographie

- [Mit, 2001] **2001**. *Mitutoyo, microscope units, technical catalog*.
- [CER, 2005] **2005**. «Centre de Recherches Biologiques». URL <http://www.cerb.fr>.
- [ABBOTT ET AL., 2005] J. J. ABBOTT, P. MARAYONG ET A. M. OKAMURA, **2005**. «Haptic virtual fixtures for robot-assisted manipulation». Dans «Proceeding of the 12th International Symposium of Robotics Research», San Francisco, USA.
- [ADAMS ET AL., 1998] R. ADAMS, M. MOREYRA ET B. HANNAFORD, **November 1998**. «Stability and performance of haptic displays : theory and experiments». Dans «Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting Haptics Workshop», p. 227–234. Anaheim, USA.
- [AGNUS, 2003] J. AGNUS, **2003**. *Contribution à la micromanipulation. Etude, réalisation, caractérisation et commande d'une micropinçe piézoélectrique*. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté.
- [AGNUS ET AL., 2003] J. AGNUS, P. D. D. LIT ET N. CHAILLET, **Décembre 2003**. «Une nouvelle micropinçe MMOC à quatre degrés de liberté». Dans «Techniques de l'Ingénieur, Vol. S1, Dos. IN13», .
- [AMMI, 2002] M. AMMI, **2002**. *Etude et développement d'algorithmes de détection de collision et de retour d'effort en réalité virtuelle*. Thèse de maître, Rapport de Stage, DEA de réalité virtuelle et maîtrise des systèmes complexes.
- [AMMI ET FERREIRA, 2004a] M. AMMI ET A. FERREIRA, **2004a**. «Haptically generated paths of an AFM-based nanomanipulator using potential fields». Dans «IEEE International Conference on Nanotechnology (NANO'04)», Munich, Germany.
- [AMMI ET FERREIRA, 2004b] M. AMMI ET A. FERREIRA, **2004b**. «Path planning of an AFM-based nanomanipulator using virtual force-reflection». Dans «IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'04)», p. 224–229. Sendai, Japan.
- [AMMI ET FERREIRA, 2004c] M. AMMI ET A. FERREIRA, **2004c**. «Virtualized reality interface for tele-micromanipulation». Dans «IEEE International Conference on Robotics and automation (ICRA'04)», p. 2776–2781. New-Orleans, USA.
- [AMMI ET FERREIRA, 2004d] M. AMMI ET A. FERREIRA, **2004d**. «Vision-based extraction of micro object geometry for micro world observation». Dans «IEEE International Conference on Instrumentation and Measurement Technology (IMT'04)», p. 762–772. Como, Italy.
- [AMMI ET FERREIRA, 2005] M. AMMI ET A. FERREIRA, **2005**. «Realistic visual and haptic rendering for biological-cell injection». Dans «IEEE International Conference on Robotics and automation (ICRA'05)», p. 930–935. Barcelona, Spain.
- [AMMI ET FERREIRA, 2006] M. AMMI ET A. FERREIRA, **2006**. «Biological-cell injection assisted by virtual reality techniques». Dans «Journal of Advanced Robotics, Vol. 20, N° 3», .

- [AMMI ET AL., 2005] M. AMMI, V. FRÉMONT ET A. FERREIRA, **2005**. «Flexible microscope calibration using virtual pattern for 3D telemicromanipulation». Dans «IEEE International Conference on Robotics and automation (ICRA'05)», p. 3855–3904. Barcelona, Spain.
- [ARAI ET AL., 2001] F. ARAI, A. KAWAJI, P. LUANGJARMEKORN, T. FUKUDA ET K. ITOIGAWA, **21-26 Mai 2001**. «Three-dimensional bio-micromanipulation under the microscope». Dans «IEEE - International Conference on Robotics & Automation (ICRA)», p. 604–609. Séoul, Corée.
- [ARUK ET AL., 2001] B. ARUK, H. SHINTANI, M. K. PARK, M. SITTI ET H. HASHIMOTO, **April 2001**. «Man-machine interface for micro-nano manipulation with an afm probe». Dans «Proceedings of the 32nd International Symposium on Robotics», p. 670–675. Seoul, Korea.
- [ASCHWANDEN ET GUGGENBÜL, 1992] P. ASCHWANDEN ET W. GUGGENBÜL, **March 1992**. «Experimental results from a comparative study on correlation type registration algorithms». Dans «Robust computer vision : Quality of Vision Algorithms», p. 268–289. Wichmann, Germany.
- [ASHKIN ET AL., 1986] A. ASHKIN, J. M. DZIEDZIC, J. E. BJORKHOLM ET S. CHU, **May 1986**. «Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles». Dans «Optics Letters, Vol. 11, No. 5», p. 288–290.
- [AZUMA ET BISHOP, 1994] R. AZUMA ET G. BISHOP, **1994**. «Improving static and dynamic registration in an optical see-through HMD». Dans «Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques», p. 197 – 204. NY, USA.
- [BACKES ET AL., 1998] P. G. BACKES, K. S. TAO ET G. K. THARP, **16-20 Mai 1998**. «Mars pathfinder mission internet-based operations using wits». Dans «IEEE - International Conference on Robotics & Automation (ICRA)», p. 284 – 291. Leuven, Belgique.
- [BAKEWELL ET AL., 1998] D. BAKEWELL, M. HUGHES, J. MILNER ET H. MORGAN, **October 1998**. «Dielectrophoretic manipulation of Avidin and DNA». Dans «Proceedings 20th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Vol. 20, N°. 2», p. 1079–1082. Hong Kong, China.
- [BARIS ET AL., 2001] A. BARIS, S. HIROAKI, H. HASHIMOTO, P. M. KEE ET S. METIN, **April 2001**. «Man-machine interface for micro/nano manipulation with an AFM probe». Dans «32nd International Symposium on Robotics», p. 670–675. Munich, Germany.
- [BERNASCHINA, 2003] F. BERNASCHINA, **2003**. *Localisation spatiale acoustique en milieu sub-aquatique*. Thèse de doctorat, Université de Genève, Genève.
- [BETHEL ET AL., 2002] W. BETHEL, S. J. BASTACKY ET K. SCHWARTZ, **2002**. «Interactive stereo electron microscopy enhanced with virtual reality». Dans «Proceedings of SPIE : Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems, Vol. 4660», p. 391–400.
- [BHASKARAN ET KONSTANTINIDES, 1997] V. BHASKARAN ET K. KONSTANTINIDES, **1997**. *Image and video compression standards algorithms and architectures*. Kluwer Academic Publishers.
- [BOECK ET CONINX, 2002] J. BOECK ET K. CONINX, **July 2002**. «Haptic camera manipulation : extending the camera in hand metaphor». Dans «Proceedings of Eurohaptics 2002», p. 36–40. Edinburgh, UK.
- [BOWMAN, 2002] D. A. BOWMAN, **2002**. «Navigation in virtual environments». Dans «Course : Navigation», University of Virginia, USA.

- [BOWMAN ET AL., 1999] D. A. BOWMAN, E. DAVIS, A. BADRE ET L. HODGES, **November 1999**. «Maintaining spatial orientation during travel in an immersive virtual environment». Dans «Presence : Teleoperators and Virtual Environments, Vol.8, N° 6», p. 618–631.
- [BOWMAN ET AL., 1997] D. A. BOWMAN, L. F. HODGES ET D. KOLLER, **1997**. «Travel in immersive virtual environments : an evaluation of viewpoint motion control techniques». Dans «Proceedings of the Virtual Reality», p. 45–52. Washington, USA.
- [BROWN ET COLGATE, 1997] J. M. BROWN ET J. E. COLGATE, **1997**. «Passive implementation of multibody simulations for haptic display». Dans «Proceedings of the 1997 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, Vol. 61», p. 85–92. Dallas, USA.
- [CADOZ, 1994] C. CADOZ, **February 1994**. «Le retour d'effort dans la communication gestuelle avec la machine. le concept de communication instrumentale». Dans «L'interface des mondes réels et virtuels», Montpellier, France.
- [CALIFANO ET MOHAN, 1994] A. CALIFANO ET R. MOHAN, **April 1994**. «Multidimensional indexing for recognizing visual shapes». Dans «IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 16, N° 4», p. 373–392.
- [CANNY, 1986] J. F. CANNY, **1986**. «A Computational Approach to edge detection». Dans «IEEE Transactions on pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 8, N° 6», p. 679–698.
- [CLARK ET AL., 1996] M. CLARK, P. JACKSON ET H. COHEN, **1996**. *Understanding the role of depth perception in slip, trip and fall incidents*. Ergonomics in Design.
- [CODOUREY ET AL., 1996] A. CODOUREY, M. RODRIGUEZ ET I. PAPPAS, **November 1996**. «Human machine interaction for manipulations in the microworld». Dans «Proceedings 5th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication», p. 11–14. Tsukuba, Japan.
- [CONVERSY, 2000] S. CONVERSY, **2000**. *Conception d'icônes auditives paramétrées pour les interfaces homme-machine*. Thèse de doctorat, Université Paris-Sud XI, Paris.
- [CONVERSY ET BEAUDOUIN-LAFON, 1996] S. CONVERSY ET M. BEAUDOUIN-LAFON, **December 1996**. «Le son dans les applications interactives». Dans «Nouvelles Interfaces Homme-Machine, du groupe de travail de l'OFTA, N° 18», p. 65–81.
- [COSTELLO, 1997] P. COSTELLO, **July 1997**. «Health and safety issues associated with virtual reality - a review of current literature». Dans «Technical Reports», Loughborough University of Technology, UK.
- [CUTTING ET VISHTON, 1995] J. E. CUTTING ET P. M. VISHTON, **1995**. «Perceiving layout and knowing distances : the integration, relative potency, and contextual use of different information about depth». Dans «Handbook of perception and cognition, Perception of space and motion, Vol. 5», p. 69–117. San Diego, USA.
- [DARKEN ET SIBERT, 1996a] R. P. DARKEN ET J. L. SIBERT, **1996a**. «Navigation in large virtual spaces». Dans «Journal of Human-Computer Interaction, Vol.8, N°1», p. 49–71.
- [DARKEN ET SIBERT, 1996b] R. P. DARKEN ET J. L. SIBERT, **1996b**. «Wayfinding strategies and behaviors in large virtual environments». Dans «Proceedings of the Human Factors in Computing Systems», p. 142–149.
- [DAUDÉ ET NIGAY, 2004] S. DAUDÉ ET L. NIGAY, **June 2004**. «Objets physiques pour manipuler des sources sonores : Phicon + Earcon = Phearcon». Dans «Premières Journées Francophones Mobilité et Ubiquité», p. 166–173. Nice Sophia Antipolis, France.

- [DAVIDSON ET ABRAMOWITZ, 2004] M. W. DAVIDSON ET M. ABRAMOWITZ, **2004**. «Optical microscopy». Dans «Research Report, NHMFL», .
- [DERVEER, 1979] V. DERVEER, **1979**. «Ecological acoustics : human perception of environmental sounds». Dans «Dissertation Abstracts International, Vol. 40/09B», .
- [DESVIGNES, 2002] M. DESVIGNES, **2002**. *Mesures et modélisation de la variabilité en analyse d'images et reconnaissance des formes*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Electronique et Radioélectricité de Grenoble.
- [DEVERNAY, 2004] F. DEVERNAY, **2004**. «Détection de points d'intérêts». Dans «Technical report, UFRIMA», .
- [DEW ET HOLMLUND, 2000] G. DEW ET K. HOLMLUND, **March 2000**. «Investigations of cross-correlation and euclidean distance target matching techniques in the mpef environment». Dans «Proceedings of Fifth International Winds Workshop», p. 235–243. Lorne, Australia.
- [DIJKSTRA, 1959] E. W. DIJKSTRA, **1959**. «A note on two problems in connexion with graphs». Dans «Numerische Mathematik, Vol. 1», p. 269–271.
- [DONG ET AL., 2001] L. DONG, F. ARAI ET T. FUKUDA, **2001**. «Three-Dimensional nanoassembly of multi-walled carbon nanotubes through nanorobotic manipulations by using electron-beam-induced deposition». Dans «Proceedings of the 2001 1st IEEE Conference on Nanotechnology», p. 93–98. Maui, Hawaii.
- [DUMAS ET PLÉNACOSTE, 2000] C. DUMAS ET P. PLÉNACOSTE, **Octobre 2000**. «Les indices dynamiques dans les interfaces 3D : au-delà des ombres portées». Dans «Conférence ergonomie et informatique avancée, Interaction Homme-Machine», p. 64–68. Biarritz, France.
- [EME ET AL., 1999] T. EME, P. HAUERT, W. ZESCH ET R. SIEGWART, **August 1999**. «Micro-assembly using auditory display of force feedback». Dans «SPIE International Symposium on Intelligent Systems and Advanced Manufacturing», p. 203–210.
- [FATIKOW ET SHIRINOV, 2003] S. FATIKOW ET A. SHIRINOV, **June 2003**. «Multimodal control interface of a nanohandling robot in a Scanning Electron Microscope». Dans «10th International Conference on Human- Computer Interaction», p. 1382–1386. Crete, Greece.
- [FAUGERAS ET AL., 2001] O. D. FAUGERAS, Q. T. LUONG ET T. PAPADOPOULO, **2001**. *The geometry of multiple images : the laws that govern the formation of multiple images of a scene and some of their applications*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- [FEDDEMA ET AL., 1999] J. FEDDEMA, P. XAVIER ET R. BROWN, **1999**. «Micro-assembly planning with van der Waals force». Dans «Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning», p. 32–38. Porte, Portugal.
- [FERREIRA, 2003] A. FERREIRA, **2003**. «Strategies of human-robot interaction for automatic microassembly». Dans «IEEE International Conference on Robotics and Automation», p. 3076–3082. Taipei, Taiwan.
- [FERREIRA ET AL., 2004] A. FERREIRA, C. CASSIER ET S. HIRAI, **June 2004**. «Automated Microassembly System Assisted by Vision Servoing and Virtual Reality». Dans «IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 9, N°2», p. 321–333. Massachusetts, USA.
- [FERREIRA ET MAVROIDIS, 2006] A. FERREIRA ET C. MAVROIDIS, **February 2006**. «Virtual reality and haptics for nano-robotics». Dans «IEEE Robotics and Automation Magazine», .

- [FITCH ET KRAMER, 1994] W. T. FITCH ET G. KRAMER, **1994**. «the body electric : superiority of an auditory display over a visual display in a complex, multivariate system». Dans G. KRAMER, rédacteur, «Auditory display : Sonification, audification and auditory interfaces, Vol. 18», p. 307–326. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, USA.
- [FRANÇOIS, 1999] B. FRANÇOIS, **November 1999**. *Vision par ordinateur pour l'interaction homme-machine fortement couplée*. Thèse de doctorat, Université Joseph-Fourier-Grenoble I.
- [FREUND ET ROBMANN, 1999] E. FREUND ET J. ROBMANN, **June 1999**. «Projective virtual reality : bridging the gap between virtual reality and robotics». Dans «IEEE Transactions on Robotics and Automation ; Special Section on Virtual Reality in Robotics and Automation, Vol 15, N°. 3», p. 411–422.
- [FUCHS ET MOREAU, 2003] P. FUCHS ET G. MOREAU, **2003**. *Le traité de la réalité virtuelle, Volume 1 : Fondements et interfaces comportementales*. Presses de l'Ecole des Mines de Paris.
- [FUNG ET AL., 2002] C. K. M. FUNG, I. ELHAJJ ET W. J. L. N. XI, **11-15 Mai 2002**. «A 2-D PVDF force sensing system for micro-manipulation and micro-assembly». Dans «IEEE - International Conference on Robotics & Automation (ICRA)», p. 1489–1494. Washington, D.C., U.S.A.
- [GAUTHIER, 2002] M. GAUTHIER, **December 2002**. *Conception et commande d'un dispositif magnétique de micromanipulation par poussée : Application à la manipulation de micro-objets biologiques*. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté.
- [GAVER, 1989] W. W. GAVER, **1989**. «The sonicfinder : an interface that uses auditory icons». Dans «Proceedings of CHI'89 Conference on Human Factors in Computing Systems, Vol. 4», p. 67–94.
- [GLEASON ET AL., 1991] S. S. GLEASON, M. A. HUNT ET W. B. JATKO, **March 1991**. «Sub-pixel measurement of image features based on paraboloid surface fit». Dans «Machine Vision Systems Integration in Industry, Vol. 1386», p. 135–144.
- [GRAHAM, 1965] C. H. GRAHAM, **1965**. *Visual space perception*. Vision and Visual Perception, New York, USA.
- [GREENWALD, 2005] L. GREENWALD, **2005**. «Heuristic Search on Graphs». Dans «Course : Artificial Intelligence», Brown University, USA.
- [GREMINGER ET NELSON, 2004] M. A. GREMINGER ET B. J. NELSON, **March 2004**. «Vision-based force measurement». Dans «IEEE Transactions On Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 26, No. 3», p. 290–298.
- [GUERCHOUCHE, 2005] R. GUERCHOUCHE, **2005**. *Retour pseudo-haptique pour la télémicromanipulation biologique*. Rapport de stage, dea de réalité virtuelle et maîtrise des systèmes complexes, Ecole nationale supérieure d'ingénieurs de Bourges.
- [HAAKE, 2004] A. HAAKE, **August 2004**. *Micromanipulation of small particles with ultrasound*. Thèse de doctorat, ETH, Zurich, Switzerland.
- [HALIYO ET AL., 2002] D. S. HALIYO, Y. ROLLOT ET S. RÉGNIER, **11-15 Mai 2002**. «Manipulation of micro-objects using adhesion forces and dynamical effects». Dans «IEEE - International Conference on Robotics & Automation (ICRA)», p. 1949–1954. Washington, D.C., U.S.A.

- [HALIYO ET AL., 2005] D. S. HALIYO, G. VENTURE ET S. RÉGNIER, **2005**. «Telemanipulation by adhesion of micro objects». Dans «6th IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation», Finland.
- [HART ET AL., 1968] P. E. HART, N. J. NILSSON ET B. RAPHAEL, **1968**. «A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths». Dans «IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics», p. 100–107.
- [HATWELL ET AL., 2000] Y. HATWELL, A. STRERI ET E. GENTAZ, **2000**. *Toucher pour connaître : Psychologie cognitive de la peception tactile manuelle*. Presses Universitaires de France, Paris.
- [HERSHENSON, 1999] M. HERSHENSON, **1999**. *Visual space perception*. MIT Press, Massachusetts, USA.
- [HOCHBERG, 1978] J. E. HOCHBERG, **1978**. *Perception (2nd ed.)*. Prentice Hall, New Jersey, USA.
- [HODGES ET AL., 1998] L. F. HODGES, D. A. BOWMAN ET D. KOLLER, **1998**. «A methodology for the evaluation of travel techniques for immersive virtual environments». Dans «Virtual Reality : Research, Development, and Applications, Vol. 3, N°. 2», p. 120–131.
- [HORN, 2000] B. K. . P. HORN, **February 2000**. «Tsai’s camera calibration method revisited». Dans «Course, Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory, MIT», p. 1–13. Cambridge, USA.
- [HUANG ET AL., 2002] F. HUANG, R. B. GILLESPIE ET A. KUO, **March 2002**. «Haptic feedback and human performance in a dynamic task». Dans «IEEE Virtual Reality Conference», p. 24–31. Orlando, USA.
- [ISHII ET AL., 1998] H. ISHII, C. WISNESKI, S. BRAVE, A. DAHLEY, M. GORBET, B. ULLMER ET P. YARIN, **April 1998**. «ambientROOM : Integrating Ambient Media with Architectural Space». Dans «Conference on Human Factors in Computing systems», p. 173–174. California, USA.
- [JAIN ET AL., 1995] R. JAIN, R. KASTURI ET B. SCHUNCK, **1995**. *Machine vision*. MacGraw-Hill.
- [JEANNEROD, 1988] M. JEANNEROD, **1988**. *The neural and behavioral organization of goal directed movements*. Oxford University Press, Oxford.
- [JEBABLI, 2004] I. JEBABLI, **2004**. *Parallélisation d’un algorithme pour la génération du diagramme de Voronoï*. Rapport de stage, dea informatique fondamentale, Ecole nationale supérieure d’ingénieurs de Bourges.
- [JOLY ET ANDRIOT, 1995] L. D. JOLY ET C. ANDRIOT, **21-27 Mai 1995**. «Imposing motion constraints to a force reflecting telerobot through real-time simulation of a virtual mechanism». Dans «IEEE - International Conference on Robotics & Automation (ICRA)», p. 357–362. Nagoya, Aichi, Japon.
- [JOSEPH ET AL., 2000] A. JOSEPH, B. VIKRAMADITYA ET B. J. NELSON, **September 2000**. «A virtual reality teleoperator interface for assembly of hybrid MEMS prototypes». Dans «Proceedings of the 25th ASME Engineering Technical Conference», Atlanta, USA.
- [JULLIEN ET WARUSFEL, 1994] J. P. JULLIEN ET O. WARUSFEL, **March 1994**. «Technologies et perception auditive de l’espace». URL <http://mediatheque.ircam.fr/articles/textes/Jullien94a/>.

- [KALAWSKY, 1996] R. S. KALAWSKY, **1996**. «Exploiting virtual reality in education and training : technological issues». Dans «Report prepared for the Advisory Group on Computer Graphics», Loughborough University of Technology, UK.
- [KANATANI, 1998] K. KANATANI, **November 1998**. «Optimal homography computation with a reliability measure». Dans «Proceedings of the IAPR Workshop on Machine Vision Applications», p. 426–429. Makuhari, Japan.
- [KAPOOR ET AL., 2003] A. KAPOOR, R. KUMAR ET R. H. TAYLOR, **27-31 Octobre 2003**. «Preliminary experiments in robot-human cooperative microinjection». Dans «IEEE - International Conference on Robotics & Automation (ICRA)», p. 3186–3191. Las vegas, U.S.A.
- [KASAYA ET AL., 1999] T. KASAYA, H. MIYAZAKI, S. SAITO ET T. SATO, **10-15 Mai 1999**. «Micro object handling under sem by vision-based automatic control». Dans «IEEE - International Conference on Robotics & Automation (ICRA)», p. 2189–2196. Detroit, Michigan, U.S.A.
- [KASS ET AL., 1987] M. KASS, A. WITKIN ET D. TERZOPOULOS, **1987**. «Snakes : active contour models». Dans «Proceedings of the First International Conference on Computer Vision», p. 259–268. London, UK.
- [KAWAJI ET AL., 2001] A. KAWAJI, F. ARAI ET T. FUKUDA, **2001**. «3D attitude control system for bio-micromanipulation». Dans «2001 Internationals symposium on Micromechatronics and Human Science», p. 197–202. Nagoya, Japan.
- [KHATIB, 1986] O. KHATIB, **1986**. «Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots». Dans «The International Journal of Robotics Research, Vol. 5, N° 1», p. 90–98.
- [KHEDDAR, 1997] A. KHEDDAR, **1997**. *Téléopération basée sur le concept du robot caché*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie.
- [KHEDDAR, 2001] A. KHEDDAR, **January 2001**. «Teleoperation based on the hidden robot concept». Dans «IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, Vol. 31 , N° 1», p. 1–13.
- [KHEDDAR, 2004] A. KHEDDAR, **2004**. «Interface et information haptiques». URL <http://gsc11.cemif.univ-evry.fr/ashaptics/>.
- [KHEDDAR ET AL., 1995] A. KHEDDAR, R. CHELLALI ET P. COIFFET, **October 1995**. «Implementation of head-behavior based control for navigation within virtual reality applications». Dans «Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 5», p. 4644–4649. Vancouver, Canada.
- [KHEDDAR ET COIFFET, 2002] A. KHEDDAR ET P. COIFFET, **2002**. *Teleoperation et réalité virtuelle*.
- [KIM ET AL., 2001] D. KIM, K. KIM, K. KIM ET S. CHA, **September 2001**. «Dexterous teleoperation for micro parts handling based on haptic-visual interface». Dans «Proceedings of 2001 International Symposium on Micromechatronics and Human Science», p. 211–217. Nagoya, Japan.
- [KIM ET AL., 2002] L. KIM, A. KYRIKOU, M. DESBRUN ET G. SUKHATME, **April 2002**. «An implicit-based haptic rendering technique». Dans «IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems», p. 2943–2948. Lausanne, Switzerland.
- [KIM, 2000] M. K. KIM, **2000**. «Tomographic three-dimensional imaging of a biological specimen using wavelength-scanning digital interference holography». Dans «Optics Express, Vol. 7, N° 9», p. 305–310.

- [KORZH ET STRAHLE, 2002] V. KORZH ET U. STRAHLE, **August 2002**. «Marshall Barber and the century of microinjection : from cloning of bacteria to cloning of everything». Dans «Differentiation, Vol. 70, N° 6», p. 221–226.
- [KOSUGE ET AL., 1995] K. KOSUGE, T. ITOH, T. FUKUDA ET M. OTSUKA, **21-27 Mai 1995**. «Tele-manipulation system based on task-oriented virtual tool». Dans «IEEE - International Conference on Robotics & Automation (ICRA)», p. 351–356. Nagoya, Aichi, Japon.
- [KRUIJFF ET AL., 2000] E. KRUIJFF, D. BOWMAN, J. LAVIOLA, I. POUPYREV ET M. MINE, **July 2000**. «3D user interface design : fundamental techniques, theory and practice». Dans «SIGGRAPH 2000 Course Notes», p. 147–165.
- [LACASSAGNE, 2000] L. LACASSAGNE, **2000**. *Détection de mouvement et suivi d'objets en temps réel*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie.
- [LAURENTINI, 1990] A. LAURENTINI, **May 1990**. «Spatial filtering». Dans «Course of digital image processing and computer vision», .
- [LETIER ET AL., 2003] P. LETIER, T. SAIVE ET I. BURDA, **Mai 2003**. «Interface haptique pour nanomanipulateur AFM». Dans «6th National Congress on Theoretical and Applied Mechanics», Ghent, France.
- [LI ET AL., 2003] G. LI, N. XI, M. YU ET W. FUNG, **August 2003**. «Augmented reality system for real-time nanomanipulation». Dans «Proceeding of the 2003 IEEE Nanotechnology», San Francisco, USA.
- [LI ET AL., 2001] X. LI, G. ZANG ET S. BI, **May 2001**. «Development of global vision system for biological automatic micromanipulation system». Dans «IEEE International Conference on Robotics and Automation.», p. 127–132. Seoul, South Korea.
- [LINDSAY ET NORMAN, 1980] P. H. LINDSAY ET D. A. NORMAN, **1980**. *Traitement de l'information et comportement humain : une introduction à la psychologie*. Montréal, Canada, Études vivantes édition.
- [LLEWELLYN, 1952] F. B. LLEWELLYN, **1952**. «Some fundamental properties of transmission systems». Dans «Proceedings IRE, Vol. 40», p. 271–283.
- [LÉOT, 2005] G. LÉOT, **2005**. «Acoustique Musicale». Dans «Cours», .
- [LUO ET NELSON, 2001] Y. LUO ET B. J. NELSON, **November 2001**. «Fusing force and vision feedbacks for manipulating deformable objects». Dans «Journal of Robotic Systems, Vol. 18, N° 3», p. 103–117. California, USA.
- [MALLOT ET AL., 1998] H. A. MALLOT, S. GILLNER, H. A. VAN VEEN ET H. H. BULTHOFF, **1998**. «An interdisciplinary approach to representing and processing spatial knowledge». Dans «Spatial Cognition, Vol. 1404», p. 447–467.
- [MAMAN ET AL., 1998] D. MAMAN, F. NASHASHIBI, P. FUCHS ET J. C. BORDAS, **November 1998**. «Stereo vision based mixed reality : an assistance for teleoperation». Dans «SPIE International Symposium on Intelligent Systems and Advanced Manufacturing, Vol. 524», Massachussets, USA.
- [MARCHI ET AL., 2005] F. MARCHI, S. MARLIERE, D. URMA, J. L. FLORENS, J. CHEVRIER, C. CADOZ ET A. LUCIANI, **2005**. «Interactive learning of nanophysics phenomena». Dans «Proceedings of m-ICTE2005, Vol. 2», p. 510–515. Caceres, Spain.
- [MARR ET HILDRETH, 1980] D. MARR ET E. HILDRETH, **1980**. «Theory of edge detection». Dans «Proceedings of the Royal Society of London, Vol. B207», p. 187–217. London, UK.

- [MARTIN ET CROWLEY, 1995] J. MARTIN ET J. L. CROWLEY, **July 1995**. «Experimental comparison of correlation techniques». Dans «International Conference on Intelligent Autonomous Systems», p. 287–294. Pisa, Italy.
- [MARTIN, 1931] L. C. MARTIN, **Mars 1931**. «The theory of the microscope». Dans «Proceedings of the Physical Society, Vol. 43, N° 2», p. 186–211.
- [MASSIMO ET SHERIDAN, 1989] M. MASSIMO ET T. SHERIDAN, **1989**. «Variable force and visual feedback effects and teleoperator man/machine performance». Dans «Proceedings of Nasa Conference on Space Telerobotics», p. 31–01/31–02. Pasadena, USA.
- [McCULLAGH ET SHEVLIN, 2004] B. McCULLAGH ET F. SHEVLIN, **September 2004**. «Coplanar camera calibration with small depth of field lens». Dans «The Irish Machine Vision and Image Processing Conference», p. 129–134. Dublin, Ireland.
- [MEIER, 2004] M. MEIER, **September 2004**. «The optical microscope». Dans «Course : Introduction to the Optical Microscope», University of California.
- [MEILANY ET GARAVAGLIAZ, 1997] P. F. MEILANY ET M. GARAVAGLIAZ, **December 1997**. «Rayleigh resolution criterion for light sources of different spectral composition». Dans «Brazilian Journal of Physics, Vol. 27, N° 4», p. 638–643. Sao Paulo, Brazil.
- [MELZER, 1999] T. MELZER, **1999**. «Image acquisition tutorial». URL <http://www.prip.tuwien.ac.at/Research/3DVision/Cameras/tutorial.html>.
- [MENEGAZ, 2004] G. MENEGAZ, **2004**. *Advanced image processing*. University of Fribourg.
- [MILGRAM ET BALLANTYNE, 1997] P. MILGRAM ET J. BALLANTYNE, **December 1997**. «Real world teleoperation via virtual environment modelling». Dans «International Conference on Artificial Reality and Tele-existence», p. 1–9.
- [MILGRAM ET KISHINO, 1994] P. MILGRAM ET F. KISHINO, **December 1994**. «A taxonomy of mixed reality visual displays». Dans «Transactions on Information and Systems, Vol. E77-D, N° 12», p. 1321–1329.
- [MURAYAMA ET AL., 2004] Y. MURAYAMA, C. E. CONSTANTINOU ET S. OMATA, **2004**. «Intuitive micromanipulation with haptic audio feedback». Dans «Proceedings of 4th International Conference on Computer and Information Technology», p. 907–911. Wuhan, China.
- [NASCATEC, 2005] NASCATEC, **2005**. «Documentation Produit». URL <http://www.nascatec.com>.
- [NELSON ET AL., 1998] B. NELSON, Y. ZHOU ET B. VIKRAMADITYA, **1998**. «Sensor-based microassembly of hybrid mems devices». Dans «IEEE Journal of Control Systems, Vol. 18, N° 6», Tokyo, Japan.
- [NICOLAU ET AL., 2003] S. NICOLAU, A. GARCIA, X. PENNEC, L. SOLER ET N. AYACHE, **2003**. «Guidage de ponctions percutanées à l'aide d'un système de vision basé sur une méthode de recalage 3D-2D». Dans «Actes du colloque imagerie pour les sciences du vivant et de l'ingénieur», Strasbourg, France.
- [NILSSON, 1969] N. J. NILSSON, **March 1969**. «A mobile automaton : an application of artificial intelligence techniques». Dans «Proceedings of the 1st International Joint Conference on Artificial Intelligence», p. 509–520. Washington, USA.
- [O'DUNLAING ET YAP, 1982] C. O'DUNLAING ET C. YAP, **1982**. «A retraction method for planning the motion of a disc, Vol. 6, N° 1». Dans «Journal of Algorithms», p. 104–111.
- [OHBA ET AL., 2002] K. OHBA, J. C. P. ORTEGA, K. TANIE, G. RIN, R. DANGI, Y. TAKEI, T. KANEKO ET N. KAWAHARA, **February 2002**. «Micro-observation technique for tele-micro-operation». Dans «Advanced Robotics, Vol. 15, N° 8», p. 781–798.

- [ORLIAGUET ET COELLO, 1998] J. ORLIAGUET ET Y. COELLO, **1998**. «Geste d'homme, gestes de machine». Dans «Science et Vie, N° 204», p. 150–156.
- [OTMANE, 2000] S. OTMANE, **2000**. *Télétravail robotisé et réalité augmentée : application à la téléopération via internet*. Thèse de doctorat, Université D'Evry-Val d'Essone.
- [OUANEZAR, 2004] S. OUANEZAR, **2004**. *Traitement d'image et reconstruction 3d de cellules biologiques pour la télé-micromanipulation*. Rapport de stage, dea de réalité virtuelle et maîtrise des systèmes complexes, Ecole nationale supérieure d'ingénieurs de Bourges.
- [PAL ET BISWAS, 2000] S. PAL ET P. BISWAS, **December 2000**. «Modified hausdorff distance transform technique for video tracking». Dans «Proceedings Indian Conference on Computer Vision, Graphics and Image Processing», p. 145–149.
- [PEW, 1974] R. W. PEW, **1974**. «Human perceptual-motor performance». Dans «Human Information Processing : Tutorials in Performance and Cognition», p. 1–40. New York, USA.
- [POPA ET STEPHANOU, 2004] D. O. POPA ET H. E. STEPHANOU, **2004**. «Micro and meso scale assembly». Dans «SME Journal of Manufacturing Systems, Vol. 6, N° 1», p. 52–71.
- [RAMACHANDRAN ET AL., 1997] T. R. RAMACHANDRAN, C. BAUR, A. BUGACOV, A. MADHUKAR, B. E. KOEL, A. A. G. REQUICHA ET B. C. GAZEN, **November 1997**. «Direct and controlled manipulation of nanometer-sized particles using the non-contact atomic force microscope». Dans «Fifth Foresight Conference on Molecular Nanotechnology», p. 237–245. California, USA.
- [RAMACHANDRAN, 1988] V. S. RAMACHANDRAN, **1988**. *Perceiving shape from shading*. Scientific American.
- [RASTOGI, 1996] A. RASTOGI, **1996**. *Design of an interface for teleoperation in unstructured environments using augmented reality displays*. Thèse de doctorat, Department of Industrial Engineering at the University of Toronto, Toronto, Canada.
- [REINHARDT-RUTLAND, 1996] A. H. REINHARDT-RUTLAND, **1996**. «Remote operation : a selective review of research into visual depth perception». Dans «The Journal of General Psychology», p. 237–248.
- [RÉMOND, 2004] J. C. RÉMOND, **2004**. «Géométrie de représentation». Dans «Cours de perspective», Ecole d'Architecture de Marseille-Luminy, France.
- [ROCK, 2001] I. ROCK, **2001**. *La Perception*. Paris : DeBoeck.
- [ROGER, 2004] M. ROGER, **2004**. «Modélisation Polygonales». URL <http://mr2k.3dvmf.net>.
- [ROSENBERG, 1992] L. ROSENBERG, **1992**. «The use of virtual fixtures as perceptual overlays to enhance operator performance in remote environment». Dans «Technical Report No. AL-TR-1992-XXX, USAF, Amstrong Laboratory, WPAFB», Stanford University, USA.
- [ROSENBERG, 1993] L. ROSENBERG, **1993**. «The use of virtual fixtures as perceptual overlays to enhance operator performance in remote environment». Dans «Technical Report No. AL-TR-1993-XXX, USAF, Amstrong Laboratory, WPAFB», Stanford University, USA.
- [ROVERS, 2002] A. F. ROVERS, **September 2002**. *Haptic feedback : a literature study on the present-day use of tactile feedback in medical robotics*. Rapport technique 2002.57, Department of Mechanical Engineering, Eindhoven University of Technology, Belgium.
- [SAHAI ET AL., 2003] R. SAHAI, J. LEE ET R. S. FEARING, **2003**. «Semi-automated micro assembly for rapid prototyping of a one dof surgical wrist». Dans «International Conference on Intelligent Robots and Systems», p. 1882–1888. Las Vegas, USA.

- [SEKULER ET BLAKE, 1990] R. SEKULER ET R. BLAKE, **1990**. *Perception. (2nd ed.)*. New-York : McGraw-Hill.
- [SHACKLOCK, 2004] A. SHACKLOCK, **April 2004**. «Multiple-view multiple-scale navigation for micro-assembly». Dans «IEEE International Conference on Robotics and Automation», p. 902–907. New Orleans, USA.
- [SHALOM ET LI, 1998] Y. B. SHALOM ET X. R. LI, **1998**. *Estimation and tracking : principles, techniques and software*.
- [SHERIDAN, 1992] T. SHERIDAN, **1992**. *Telerobotics, automation, and human supervisory control*. MIT Press, Cambridge.
- [SHIRINOV ET AL., 2004] A. SHIRINOV, J. KAMENIK, ET S. FATIKOW, **March 2004**. «Haptic interface for a nanohandling robot, assembly automation». Dans «Emerald Publishing House, MCB University Press, Vol. 24, N° 1», p. 78–87. UK.
- [SITTI ET HASHIMOTO, 1999] M. SITTI ET H. HASHIMOTO, **November 1999**. «Micro-Nano manipulation using atomic force microscope». Dans «Journal of Industrial Science Research, Vol. 51, N° 8», p. 31–33. Tokyo, Japan.
- [SITTI ET HASHIMOTO, 2000] M. SITTI ET H. HASHIMOTO, **June 2000**. «Controlled pushing of nanoparticles : modeling and experiments». Dans «IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 5, N° 2», p. 199–211.
- [SITTI ET HASHIMOTO, 2003] M. SITTI ET H. HASHIMOTO, **March 2003**. «Teleoperated touch feedback from surfaces at the nanoscale : Modeling and experiments». Dans «IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 8, N° 2», p. 287–298.
- [SOBEL, 1970] I. SOBEL, **May 1970**. «Camera models and machine perception». Dans «Technical Report AIM-21», California, USA.
- [SONG ET AL., 2001] E. SONG, D. KIM, K. KIM ET J. LEE, **October 2001**. «Intelligent user interface for teleoperated microassembly». Dans «International Conference on Control, Automation and System», p. 784–788.
- [STARK ET AL., 2003] R. W. STARK, F.-J. RUBIO-SIERRA, S. THALHAMMER ET W. M. HECKL, **2003**. «Combined nanomanipulation by atomic force microscopy and UV-laser ablation for chromosomal dissection». Dans «European Biophysics Journal, Vol. 32, N° 1», p. 33–39.
- [STARK ET AL., 1998] R. W. STARK, S. THALHAMMER, J. WIENBERG ET W. M. HECKL, **1998**. «AFM as a tool for chromosomal dissection : the influence of physical parameters». Dans «Applied Physics A Materials Science and Processing, Vol.66, N° 1», p. 579–584.
- [STOAKLEY ET AL., 1995] R. STOAKLEY, M. J. CONWAY ET R. PAUSCH, **May 1995**. «Virtual reality on a WIM : Interactive worlds in miniature». Dans «Proceedings of the Conference on Human factors in computing systems», p. 265–272. Colorado, USA.
- [SULZMANN ET AL., 1995] A. SULZMANN, J. BREGUET ET J. JACOT, **October 1995**. «Microvision system (MVS) : a 3D computer graphic-based microrobot telemanipulation and position feedback by vision». Dans «Proceedings of SPIE on Microrobotics and Mechanical Systems, Vol. 2593», p. 38–49. Philadelphia, USA.
- [SUN ET AL., 2003] Y. SUN, K. WAN, K. P. ROBERTS, J. C. BISCHOF ET B. J. NELSON, **December 2003**. «Mechanical property characterization of mouse zona pellucida». Dans «IEEE Transactions On NanoBioscience, Vol. 2, No. 4», p. 279–286.
- [SURREL, 1999] J. SURREL, **1999**. «Les aberrations». Dans «Société française d’Optique, N° 4», .

- [TAKAGI ET SUGENO, 1985] T. TAKAGI ET M. SUGENO, **1985**. «Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control». Dans «IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, Vol. 15, N° 1», p. 116–132.
- [TANIKAWA ET ARAI, 1999] T. TANIKAWA ET T. ARAI, **February 1999**. «Development of micro-manipulation system having a two-fingered micro-hand». Dans «IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 15, N°. 1», p. 152–162.
- [TAYLOR ET AL., 1993] R. M. TAYLOR, W. ROBINETT, V. L. CHI, F. P. BROOKS, JR., W. V. WRIGHT, R. S. WILLIAMS ET E. J. SNYDER, **August 1993**. «The nanomanipulator : a virtual-reality interface for a scanning tunneling microscope». Dans «SIGGRAPH '93 : Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques», p. 127–134. New York, USA.
- [TENDICK ET CAVUSOGLU, 1997] F. TENDICK ET M. C. CAVUSOGLU, **1997**. «Human-machine interfaces for minimally invasive surgery». Dans «Proceedings of the 19th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society», p. 2771–2776. Chicago, USA.
- [TERDIMAN, 2002] P. TERDIMAN, **2002**. «OPCODE.» URL <http://www.codercorner.com>.
- [THACKER ET AL., 2005] N. A. THACKER, A. F. CLARK, J. BARRON, R. BEVERIDGE, C. CLARK, P. COURTNEY, W. CRUM ET V. RAMESH, **May 2005**. «Performance characterisation in computer vision : a guide to best practices». Dans «TINA Memos : Human and Machine Vision, No. 2005-009», Medical School, University of Manchester, UK.
- [THOMPSON ET FEARING, 2001] J. THOMPSON ET R. FEARING, **October 2001**. «Automating microassembly with ortho-tweezers and force sensing». Dans «International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol. 3», Atlanta, USA.
- [TOLMAN, 1948] E. C. TOLMAN, **1948**. «Cognitive maps in rats and men». Dans «Psychological Review, Vol. 55, N°.4», p. 189–208.
- [TRIGGS, 1997] B. TRIGGS, **1997**. «Autocalibration and the absolute quadric». Dans «Proceedings of the 1997 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition», p. 609–614. Washington, USA.
- [TSAI, 1987] R. Y. TSAI, **1987**. «A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses». Dans «IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 3, N° 4», p. 323–344.
- [TYNDIUK ET THOMAS, 2001] F. TYNDIUK ET G. THOMAS, **Novembre 2001**. «Modélisation de la navigation en environnement virtuel». Dans «Actes des 14 emes journées de l'Association Française d'Informatique Graphique», Limoges, France.
- [UDUPA, 1977] S. UDUPA, **1977**. *Collision detection and avoidance in computer controlled manipulators*. Thèse de doctorat, California Institute of Technology, Pasadena, USA.
- [USSON, 1999] Y. USSON, **Janvier 1999**. «Bases de la microscopie». Dans «Cours DESS : microscopie photonique», Université Joseph Fourier Grenoble.
- [VANONY, 2002] M. VANONY, **2002**. «l'acoustique». URL <http://www.phaz.mc/edu/cadres/titreslocalisation.html>.
- [WARE ET AL., 1993] C. WARE, K. ARTHUR ET K. S. BOOTH, **1993**. «Fish tank virtual reality». Dans «Conference on Human Factors in Computing Systems», p. 37–42. Massachusetts, USA.

- [WARE ET FLEET, 1997] C. WARE ET D. FLEET, **April 1997**. «Context sensitive flying interface». Dans «Proceedings of the 1997 Symposium on Interactive 3D Graphics», p. 127–130.
- [WARE ET OSBORNE, 1990] C. WARE ET S. OSBORNE, **March 1990**. «Exploration and virtual camera control in virtual three dimensional environments». Dans «Proceedings of 1990 Symposium on Interactive 3D Graphics, Vol. 24, N°2», p. 175–183. Utah, USA.
- [WESLEY, 1979] T. L.-P. M. A. WESLEY, **October 1979**. «An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles». Dans «Communications of the ACM, Vol. 22, N° 10», p. 560–570. NY, USA.
- [WILLIAMS ET SHAH, 1992] D. J. WILLIAMS ET M. SHAH, **1992**. «A Fast algorithm for active contours and curvature estimation». Dans «Computer Vision and Image Processing : Image Understanding, Vol. 55, N° 1», p. 14–26. Orlando, USA.
- [YU ET NELSON, 2001] S. YU ET B. NELSON, **May 2001**. «Microrobotic cell injection». Dans «IEEE International Conference on Robotics and Automation», p. 620–625. Seoul, South Korea.
- [ZESCH ET FEARING, 1998] W. ZESCH ET R. S. FEARING, **November 1998**. «Alignment of microparts using force controlled pushing». Dans «SPIE Conference on Microrobotics and Micromanipulation», Boston, USA.
- [ZHANG ET ZHOU, 2004] J. ZHANG ET X. ZHOU, **July 2004**. «Object recognition based on template correlation in remote sensing image». Dans «Proceedings of the 20th ISPRS Congress», p. 887–891. Istanbul, Turkey.
- [ZHANG, 1999] Z. Y. ZHANG, **Kerkyra, Greece 1999**. «Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations». Dans «IEEE International Conference on Computer Vision, Vol. 1», p. 666–673.
- [ZHOU ET AL., 2000a] Q. ZHOU, P. KALLIO ET H. N. KOIVO, **October 2000a**. «Model-based handling and planning in micro assembly». Dans «Proceedings of the 2nd International Workshop on Microfactories», p. 13–16. Fribourg, Switzerland.
- [ZHOU ET AL., 2000b] Q. ZHOU, P. KALLIO ET H. N. KOIVO, **November 2000b**. «Virtual environment for operations in the microworld». Dans B. J. NELSON ET J.-M. BREGUET, rédacteurs, «Microrobotics and Microassembly II, Vol. 4194», p. 56–64. Boston, USA.
- [ZHOU ET NELSON, 1999] Y. ZHOU ET B. NELSON, **1999**. «Calibration of a parametric model of an optical microscope». Dans «Journal of Optical Engineering, Vol. 38, N° 12», p. 1989–1995.

Références Personnelles

Journaux internationaux (avec comité de lecture)

- J.1 M. AMMI ET A. FERREIRA, **2006**. « Biological-cell injection assisted by virtual reality techniques ». Dans « Journal of Advanced Robotics, Vol. 20, N° 3 ».
- J.2 M. AMMI ET A. FERREIRA, **2006 (Révision)**. « Haptic-based telemicromanipulation using multisensoring rendering at micro/nano scale ». Dans « Virtual Reality (Springer) ».

Conférences internationales (avec comité de lecture)

- C.1 M. AMMI, A. FERREIRA ET J. G. FONTAINE, **2005**. « Application of virtualized reality techniques to tele-micromanipulation ». Dans « 7th Virtual Reality International Conference Laval (VRIC'05) », p. 179-185, Laval, France.
- C.2 M. AMMI ET V. FREMONT ET A. FERREIRA, **2005**. « Flexible microscope calibration using virtual pattern for 3D telemicromanipulation ». Dans « IEEE International Conference on Robotics and automation (ICRA'05) », p. 3855-3904, Barcelona, Spain.
- C.3 M. AMMI ET A. FERREIRA, **2005**. « Realistic visual and haptic rendering for biological-cell injection ». Dans « IEEE International Conference on Robotics and automation (ICRA'05) », p. 930-935, Barcelona, Spain.
- C.4 M. AMMI, A. FERREIRA ET J. G. FONTAINE, **2004**. « Virtualized reality interface for tele-micromanipulation ». Dans « IEEE International Conference on Robotics and automation (ICRA'04) », p. 2776-2781, New-Orleans, USA.
- C.5 M. AMMI ET A. FERREIRA, **2004**. « Vision-based extraction of micro object geometry for micro world observation ». Dans « IEEE International Conference on Instrumentation and Measurement Technology (IMT'04) », p. 762-772, Como, Italy.
- C.6 M. AMMI ET A. FERREIRA, **2004**. « Path planning of an AFM-based nanomanipulator using virtual force-reflection ». Dans « IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'04) », p. 224-229, Sendai, Japan.
- C.7 M. AMMI ET A. FERREIRA, **2004**. « Haptically generated paths of an AFM-based nanomanipulator using potential fields ». Dans « IEEE International Conference on Nanotechnology (NANO'04) », Munich, Germany.
- C.8 M. AMMI ET A. FERREIRA, **2003**. « Involving the operator in the control strategy for intelligent telemicromanipulation ». Dans « IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM'03) », p. 1315-1320, Kobe, Japan.

Prix

- P.1 M. AMMI, A. FERREIRA, J. G. FONTAINE, M. MAZA ET J. ORTIZ, **2005**. « TELE NANO DRIVE : from macro to micro teleoperation platforms for nano worlds exploration » « Prix Lava Virtual : Design Industriel et Simulation ».

TITRE : Interface Homme-Machine Multimodale pour la Télé-Micromanipulation

RESUME : Des études récentes sur les facteurs humains ont montré certaines limitations des téléopérateurs à appréhender et à maîtriser les interactions lors de la manipulation d'objets à l'échelle micrométrique et nanométrique. Le problème majeur provenant de la valeur importante des facteurs d'échelle reliant l'opérateur à son environnement (position : 10^{-9} m et force : 10^{-6} N), de l'inadéquation des moyens d'observation et d'interaction par rapport au contexte naturel d'action de l'opérateur, où encore, de la méconnaissance de l'opérateur des forces d'adhésion à l'échelle micrométrique. De ce fait, l'interfaçage homme-machine joue un rôle prépondérant dans les systèmes de télé-micromanipulation. Des interfaces et des dispositifs ergonomiques adaptés aux modalités sensorielles de l'opérateur humain doivent donc être recherchés.

Nos travaux de recherche se sont orientés vers l'amélioration du triptyque " Perception - Communication - Interaction " entre l'opérateur et le micromonde en incluant de nouveaux moyens d'interaction. Ces nouvelles interfaces homme-machine (IHM) ont pour rôle d'assister l'opérateur dans ses tâches de manipulation en lui fournissant une aide contextuelle et parfaitement bien adaptée aux contraintes du micromonde (effets d'échelle, environnement, tâches, etc.). Dans ce contexte, nous avons développé une interface homme-machine intuitive et multimodale, dédiée à la télé-micromanipulation d'objets de taille micrométrique et travaillant sous le champ de vue de plusieurs microscopes optiques.

MOTS CLEFS : Interface homme-machine, perception multimodale, interaction, représentation intermédiaire, micromanipulation.

TITLE : Multimodal Human-Machine Interface for Tele-Micromanipulation

ABSTRACT : Recent studies on the human factors have shown some limitations for teleoperators to perceive and control the interactions during the manipulation of objects at a micrometric and nanometric scale. The main problem results from the important value of the scale factors between the operator and the micro-environment (position : 10^{-9} m and force : 10^{-6} N), from the inadequacy of the interaction and the observation help in comparison with the operator's action context, and moreover, from the unfitness of the operator to understand the adhesion forces at a micrometric scale. So, the human-machine interface has a dominant role in the tele-micromanipulation systems. Ergonomic interfaces and devices which are adapted to the human operator's sensorial modality must also be researched.

The work presented in this thesis concerns the improvement of the " Perception – Communication - Interaction " triptych between the operator and the microworld by including new interaction techniques. These new human-machine interfaces (HMI) aim to assist the operator in his handling tasks by providing him a contextual help and perfectly well adapted to the constraints of the microworld (scaling effects, micro-environment, tasks, etc). In this context, we have developed an intuitive and multimodal human-machine interface, dedicated to tele-micromanipulation of micrometric objects and working under the field of view of several optical microscopes.

KEY WORDS : Human-machine interface, multimodal perception, interaction, intermediate representation, micromanipulation.

DISCIPLINE : Robotique

Laboratoire Vision et Robotique
Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Bourges
10 bld Lahitolle
18020 Bourges cedex