

**ÉCOLE DOCTORALE MATHÉMATIQUES, INFORMATIQUE, PHYSIQUE
THÉORIQUE ET INGÉNIERIE DES SYSTÈMES**

Laboratoire PRISME

THÈSE présentée par :

Nabil AMARI

Prévue le : **8 juillet 2016**

Pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université d'Orléans**

Discipline/ Spécialité : Robotique

**Développement et Commande d'une Plateforme
Microrobotique pour la Synchronisation d'un Faisceau de
Lumière**

THÈSE dirigée par :

Pr. Antoine Ferreira Professeur, INSA Centre Val de Loire Campus Bourges

RAPPORTEURS :

Pr. Philippe LUTZ Professeur, Université de Franche-Comté

Pr. Stéphane REGNIER Professeur, Université Pierre et Marie Curie

JURY

Pr. Philippe LUTZ Professeur, Université de Franche-Comté), *Rapporteur*

Pr. Stéphane REGNIER Professeur, Université Pierre et Marie Curie, *Rapporteur*

Pr. Gérard POISSON Professeur, Université d'Orléans, *Examineur*

Dr. Hamid LADJAL Maître de conférences, Université Claude Bernard Lyon 1,
Examineur

Pr. Antoine FERREIRA Professeur, INSA Centre val de Loire, *Directeur de thèse*

THÈSE

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ d'ORLÉANS

ÉCOLE DOCTORALE Mathématiques, Informatiques, Physiques Théoriques et Ingénierie des
Systèmes

DOMAINE DE RECHERCHE : Robotique

Présentée par

Nabil Amari

Développement et Commande d'une Plateforme Microrobotique pour la Synchronisation d'un Faisceau de Lumière

Directeur de thèse : **Pr. Antoine Ferreira**

Prévue le 15 Juin 2016
Devant la Commission de Jury

Rapporteur :

Pr. Philippe Lutz	Professeur, Université de Franche-Comté	Rapporteur
Pr. Stéphane Régnier	Professeur, Université Pierre et Marie Curie	Rapporteur

Jury :

Pr. Philippe Lutz	Professeur, Université de Franche-Comté	Rapporteur
Pr. Stéphane Régnier	Professeur, Université Pierre et Marie Curie	Rapporteur
Pr. Gérard Poisson	Professeur, Université d'Orléans	Examineur
Dr. Hamid Ladjal	Maître de Conférences, Université Claude Bernard Lyon 1	Examineur
Pr. Antoine Ferreira	Professeur, INSA Centre Val de Loire	Directeur de thèse

Remerciement

Ce travail de thèse est né dans le cadre du projet PIANHO (projet ANR-NANO-042, programme P3N2009, année 2009) de l'Agence Nationale de la Recherche. Il n'aurait pu avoir lieu sans le soutien de nombreuses personnes du laboratoire PRSIME de l'Université d'Orléans et de l'INSA Centre Val de Loire, et j'aimerais donc remercier tous ceux qui se sont impliqués à l'aboutissement de cette thèse. Ce travail a été présenté dans plusieurs conférences internationales avec le soutien du projet et le laboratoire.

J'adresse mes remerciements à Philippe LUTZ, professeur à l'université Franche-Comté et Stéphane REGNIER, Professeur à l'université Paris 6 Jussieu, d'avoir Accepté d'être les rapporteurs et membres de jury de ma thèse. Le manuscrit a bénéficié de votre lecture très attentive. Vos remarques précieuses lors de la soutenance, m'ont permis d'envisager mon travail sous un autre angle.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude et ma profonde reconnaissance au président du jury Girard POISSON Professeur à l'université d'Orléans et Sous directeur du laboratoire PRISME, de m'avoir fait l'honneur de présider le jury. Merci pour votre soutien et votre présence tout au long de ma thèse.

Je remercie Hamid Ladjal Maître de conférences à l'Université Claude Bernard Lyon 1 d'avoir aussi accepté de participer au jury, et d'avoir porté sur ce manuscrit un regard pertinent sur l'ensemble de mes travaux. Merci pour vos réflexions scientifiques lors de la soutenance.

Je remercie Antoine FERREIRA qui m'a proposé ce sujet de thèse et pour sa relecture et ses corrections.

Mes remerciements vont également à la directrice de l'école doctorale MEPTIS de l'Université d'Orléans, Mme Maitine Bergounioux qui a veillé à ce que cette thèse soit conduite à son terme.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance aux enseignants/chercheurs de l'INSA Centre Val de Loire et l'IUT de Bourges qui, de diverses manières, m'ont guidé, soutenu, aidé et inspiré. Sans pouvoir les citer tous, je tiens à mentionner Abderraouf Benali, Karim belharet, Driss boutat, Vincent Idasiak, Jean-Luc Hanus , Pierre Vieyres, Frédéric Kratz. Nacim ramdani.

Merci aux techniciens et informaticiens de l'INSA en particulier à Emmanuel Mennesson et Loïc Mollon, qui ont toujours assuré des interventions rapides tout au long de ma thèse.
sans oublié Jeannine Rebouleau et karine cottancin

Je remercie l'ENSAM Paris Tech Campus Cluny et l'Institut Image qui m'ont accueillie, au poste ATER, en particulier Frédéric Merienne, Jean-remy chardonnet, Frédéric Duband, Samir Garbaya, Lou Ruding.

Mes remerciements vont également aux collègues et amis thésards du laboratoire PRISME avec qui j'ai partagé des bons moments : Ramdane, Nabil, Lounis, Bastien, Asma, Xavier, Sara, Ludovic.

Enfin, je voudrais tout particulièrement adresser mes remerciements à ma famille pour leur énorme soutien, en particulier mon père et ma mère, mes frères et ma compagne.

Table des matières

Introduction générale	1
I Problématiques de Micromanipulation	5
1 Introduction	5
2 Spécificités de la Manipulation dans le Micromonde	7
2.1 Comportement dans le micromonde	8
2.1.1 Effets d'échelle	8
2.1.2 Les forces surfaciques	8
2.1.3 Problèmes d'adhésion	9
2.2 Perception du Micromonde	10
2.2.1 Microscopie à champ lointain	10
2.2.2 Microscopie à champ proche	11
2.2.3 Bilan	12
2.3 Les différents moyens de préhension	13
2.3.1 Interaction par contact	13
2.3.2 Interaction sans contact	13
2.3.3 Bilan	15
2.4 Les moyens de manipulation et d'actionnement	16
2.4.1 Les systèmes de micromanipulation	16
2.4.2 L'actionnement des micromanipulateurs	17
2.4.3 Choix de la structure de manipulation	18
3 Systèmes de Micromanipulation	19
3.1 Plateforme de micromanipulation	19
3.2 Les capteurs pour la micromanipulation	20
3.2.1 Mesure de position	20

Table des matières

3.2.2	Mesure des forces	21
3.3	Stratégies de commande pour la micromanipulation	21
3.3.1	Commande en boucle fermée	22
3.3.2	Commande par anticipation	24
4	Objectifs de la Thèse	25
4.1	Contexte d'étude	25
4.2	Le projet ANR PIANHO	27
4.3	Contribution au développement d'une plateforme microrobotique	28
II	Conception d'une Plateforme de Micromanipulation sous Faisceau de Lumière	31
1	Contexte Général de l'Environnement ESRF	31
2	Positionnement automatisé d'un échantillon sous un faisceau de rayons X	33
2.1	État de l'art des systèmes robotiques de positionnement	33
2.2	Contraintes du faisceau de rayonnement X	39
2.3	Contraintes liées à la micromanipulation sous faisceau	39
2.4	Contraintes liées au mode opératoire de micromanipulation sous rayons X	41
3	Conception et Réalisation de la Plateforme de Prototypage	43
3.1	Cahier des Charges de la Plateforme	43
3.1.1	Choix des effecteurs	43
3.1.2	Choix de la structure cinématique	45
3.2	Développement de la Plateforme de Prototypage	48
3.3	Architecture Système	51
3.3.1	Architecture Globale	52
3.3.2	Architecture Logicielle	53
3.3.3	Le Module de Perception	53
3.3.4	Traitement d'images	55
4	Conclusion	56
III	Commande Robuste en Position d'un Micromanipulateur à Double-Etage	57
1	Introduction	57
2	Modélisation et Identification des Axes x,y,z du Micromanipulateur à Double-Etage . .	57
2.1	Micromanipulateur à double-étage	57
2.2	Modélisation des fonctions de transfert G_m et G_n	59
2.3	Identification	59
2.4	Résultats Expérimentaux	60
3	Choix du contrôleur à structure découplée pour le micromanipulateur à double-étage .	63
3.1	Méthodologies de contrôle des systèmes à double-étage	63
3.2	Contrôleur double-étage à structure découplée	64

3.3	Sensibilité du micro-translateur magnétique en boucle-fermée	66
3.4	Sensibilité du nano-translateur piézoélectrique en boucle-fermée	68
4	Synthèse du Contrôleur K_N de type H_∞ avec Sensibilité Mixte	68
4.1	Formulation standard	68
4.2	Synthèse de contrôleur H_∞ pondéré	69
4.2.1	Mise sous forme pondérée	69
4.2.2	Mise sous forme standard	70
4.3	Problème de sensibilité mixte	72
4.4	Spécifications et choix des fonctions de pondérations	73
4.4.1	Choix de la pondération W_{1i}	73
4.4.2	Choix de la pondération W_{2i}	73
4.4.3	Choix de la pondération W_{3i}	73
4.5	Optimisation des fonctions de pondération à l'aide des algorithmes génétiques .	74
4.5.1	Principe de l'optimisation	74
4.5.2	Initialisation	76
4.5.3	Détermination des paramètres optimaux des fonctions W_{1x} , W_{2x} et W_{3x} . .	76
4.5.4	Analyse des performances en boucle fermée.	81
4.6	Synthèse du contrôleur H_∞	81
4.7	Résultats expérimentaux.	84
5	Sensibilité du micromanipulateur à double-étage en boucle fermée S_T	86
6	Conclusion	86

IV Synchronisation du Faisceau de Lumière à l'aide de Filtres de Kalman et Particulaire 89

1	Introduction	89
2	Modélisation du Faisceau de Lumière	90
2.1	Modélisation géométrique du déplacement du spot lumineux	91
2.2	Mesure et calibration	93
2.2.1	Calibration du photodétecteur 4-quadrants	93
2.2.2	Calibration du faisceau lumineux	94
2.3	Modélisation Dynamique du Faisceau Laser	97
3	Asservissement en position du faisceau lumineux	101
3.1	Stratégie de Contrôle de la Poursuite du Faisceau	101
3.2	Détection d'un Faisceau	102
3.2.1	Spécificités de la Détection du Faisceau Rayons X	102
3.2.2	Spécificités de la Détection du Faisceau Laser	102
3.2.3	Procédure de Détection du Faisceau	102
3.3	Estimation de la Position du Faisceau	103

Table des matières

	3.3.1	Filtre de Kalman	103
	3.3.2	Filtre Particulaire	105
4		Résultats Expérimentaux	111
	4.1	Contexte Expérimental	111
	4.2	Validation de la Détection	112
	4.3	Validation Expérimentale des Estimateurs	115
	4.4	Comparaison et Analyse des Performances des Estimateurs	116
5		Conclusion	119
V		Application à la Micromanipulation d'Objets sous Faisceau de Lumière	121
1		Introduction	121
2		Phase de Calibration de la Plateforme de Micromanipulation	121
	2.1	Localisation de la sonde AFM sous le faisceau lumineux	121
	2.2	Calibration en force des sondes AFM	124
3		Micromanipulation avec une sonde AFM sous faisceau de lumière.	126
	3.1	Méthodologie	126
	3.2	Phase (1) : Localisation automatisée du point focal par la procédure <i>Backtracking</i>	127
	3.3	Phase (2) : Préhension de l'objet.	133
	3.4	Phase (3) : Transport et maintien sous faisceau de lumière.	136
4		Micromanipulation avec deux sondes AFM sous faiceau de lumière.	136
	4.1	Méthodologie.	136
	4.2	Phase (1) : Localisation automatisée du point focal par la procédure <i>Backtracking</i>	137
	4.3	Phase (2) : Préhension de la microsphère	137
	4.3.1	Etape 1 : Positionnement grossier	137
	4.3.2	Etape 2 : Positionnement fin	137
	4.3.3	Etape 3 : Préhension	138
	4.4	Phase (3) : Transport et maintien sous faisceau de lumière.	145
5		Mise en oeuvre sous faisceau de lumière à rayons X.	146
6		Conclusion	149
VI		Conclusion générale et perspectives	151
1		Conclusion Générale	151
2		Perspectives	152
A			157
B			159
C			161

D	167
Références bibliographiques	171

Table des matières

Table des figures

I.1	Échelle des dimensions des objets et des techniques d'observation.	6
I.2	Exemple de caractérisation surfacique d'un nano-objet.	7
I.3	Différentes images du micromonde par microscopie à champ lointain.	10
I.4	Exemple de pince magnétique.	14
I.5	Manipulation de cellules avec des pinces optiques	15
I.6	Microrobots mobiles réalisant une tâche de micromanipulation	17
I.7	Comportement typique d'un nanopositionneur piézoélectrique	19
I.8	Un système de positionnement $G(s)$ contrôlé par un contrôleur intégral	22
I.9	Exemple des problèmes associés aux limitations de la bande passante de le cadre de l'imagerie AFM à haute vitesse	23
I.10	Schéma de contrôle par anticipation en boucle ouverte d'un nanopositionneur piézoélectrique	24
I.11	aractérisation par diffraction de rayon-X de particules polycrystalline Sm-Fe-N . . .	26
I.12	Schématisation du synchrotron de l'ESRF de Grenoble	27
II.1	Schéma de principe de la plateforme de manipulation à deux pointes du projet ANR PIANHO.	32
II.2	Schéma de principe d'un robot porte-échantillon pour positionner un échantillon sous la focale d'un faisceau de lumière à raysons X.	34
II.3	Station robotisée utilisé pour caractériser un monocritallin.	34
II.4	Robot manipulateur à 3 ddl de rotation utilisé pour la diffraction par rayons X d'un cristal.	35
II.5	Système robotisée développé par l'ESRF à Grenoble	36
II.6	Images montrant la carte du courant induit au travers de la pointe du diapason par photoémission	37

Table des figures

II.7	(a) Principe de nano-caractérisation par rayons X d'un échantillon soumis à une indentation appliquée par une sonde AFM. (b) Image du système expérimental au DESY Photon Science (d'après [106]).	37
II.8	Stabilité et réaligement du faisceau rayons X lors d'une perturbation externe sur une ligne de lumière. Images issues du photodétecteur 2D	40
II.9	Exemples de nanomanipulation à base de sondes AFM : (a) manipulation par poussée ; (b) manipulation par adhésion ; (c) manipulation "deux doigts" par prise et dépose. Les termes F_{ss} , F_{ts} représentent les forces d'interaction objet-substrat et pointe-objet, respectivement.	40
II.10	Micromanipulation d'un micro-objet par adhésion avec une sonde AFM : (1) la pointe AFM se déplace vers l'objet jusqu'à ce que la phase d'adhésion soit initiée, (2) la phase de retrait et transport de l'objet en direction du faisceau débute et (3) l'asservissement de position du point maximal d'intensité émise (point focal) est finalisé.	42
II.11	Micromanipulation d'un micro-objet par préhension avec deux sondes AFM : (1) Au repos le levier AFM #1 se déplace pour détecter la présence du faisceau et localiser la position du maximum d'intensité. (2) Déplacement de l'objet déposée sur le substrat sur cette position de référence en contrôlant les mouvements du porte-échantillon. Puis, initiation de la phase de détection de contact avec l'objet et micropréhension de l'objet par les deux micro-leviers AFM avec contrôle en force. (3) Transport de l'objet au coeur du micro-faisceau et asservissement de position au maximum d'intensité. .	42
II.13	Configuration des différentes sondes locales utilisées dans le projet ANR PIANHO. .	45
II.14	Image CAO d'une configuration cinématique du dispositif expérimental pour une manipulation avec des pointes protubérantes montées sur un LER.	46
II.15	Image CAO d'une configuration cinématique du dispositif expérimental pour une manipulation avec des pointes AFM avec capteur de force intégré.	47
II.16	Configuration cinématique choisie du dispositif expérimental.	48
II.18	(a) Préhenseur constitué d'une micro-poutre piézorésistive associé à un (b) pont de Wheatstone de type push-pull.	51
II.19	L'architecture fonctionnelle de la plateforme de prototype.	52
II.20	L'image (a) montre une vue du dessus obtenue avec le microscope optique, et (b) donne une vue latérale d'un microscope numérique.	54
III.1	(a) Schéma de principe du contrôle en position du micromanipulateur double-étage à 6 ddl. (b) Schéma bloc du micromanipulateur. Les paramètres G_m et G_n représentent respectivement les fonctions de transfert dynamiques des micro-translateurs magnétiques et du nano-translateur piézoélectrique.	58
III.2	Système d'identification de la fonction de transfert pour chaque axe de l'étage micro (G_m) et de l'étage nano (G_n).	60

III.3	Réponse fréquentielle de l'axe x pour différents points de fonctionnement (PF) : 20, 40, 60 , 80 et 100 μm	62
III.4	Résultats d'identification d'un nano-translateur piézoélectrique suivant l'axe x . (a) Signal d'entrée pour l'identification : signal binaire pseudo-aléatoire (SBPA) variant entre 30 μm et 40 μm . (b) Réponse expérimentale et réponse du modèle identifié. .	62
III.5	Résultats d'identification d'un micro-translateur magnétique suivant l'axe x . (a) Signal d'entrée pour l'identification : signal binaire pseudo-aléatoire (SBPA) variant entre 10 μm et 90 μm . (b) Réponse expérimentale et réponse du modèle identifié. .	63
III.6	Contrôleur double-étage à structure découplée.	65
III.7	Diagramme en bloc de la sensibilité globale S_T	66
III.8	Illustration du transfert de sensibilité globale S_T	67
III.9	Problème standard.	69
III.10	Mise en place des pondérations.	70
III.11	Forme standard de sensibilité mixte S/KS/T.	72
III.12	Evolution de la fonction de <i>fitness</i> pour une population d'individus comprise entre 0 et 20 et un nombre de générations de la population initiale augmentant de 0 à 30.	79
III.13	Valeur optimale de la fonction de <i>fitness</i> atteinte au bout de 13 générations avec $\ T(s)\ _\infty = 1.01$	79
III.14	Optimisation des paramètres de la fonction de pondération W_{3x} . Détermination (a) des paramètres b_{2x} et b_{3x} et (b) du paramètre a_{3x}	80
III.15	Optimisation des paramètres de la fonction de pondération W_{1x} : Détermination (a) des paramètres a_{1x} et a_{2x} et (b) du paramètre b_{1x}	80
III.16	Fonctions de sensibilité en boucle-fermée :(a) $K(s)S(s)$, (b) $T(s) = K(s)S(s)G(s)$ et (c) $S(s)$ avec les gabarits correspondants $\frac{1}{W_{1x}}$, $\frac{1}{W_{2x}}$ et $\frac{1}{W_{3x}}$ respectivement.	82
III.17	Correcteur initial K et correcteur réduit K_{red}	83
III.18	(a)	85
III.19	(b)	85
III.20	Réponse indicielle à un échelon de position : Comparaison du contrôleur H_∞ avec sensibilité mixte au (a) contrôleur PI du constructeur ; au (b) contrôleur PI constructeur renforcé par H_∞ loop-shaping.	85
III.21	Robustesse du contrôleur H_∞ vis-à-vis de diverses perturbations extérieures. Comparaison avec un contrôleur PI renforcé par H_∞ Loop Shaping.	85
III.22	Résultats expérimentaux réalisés sur le micromanipulateur à double-étage suivant l'axe x : (a-c-e) Diagramme de Bode en amplitude des sensibilités S_M , S_N et S_T . (b-d-f) Réponses à un échelon de position des différents étages.	87
IV.1	Configuration de la plateforme pour l'évaluation de la synchronisation du faisceau. .	90

Table des figures

IV.2	Configuration géométrique de la lentille de focalisation et le photodétecteur 4-quadrants.	90
IV.3	Modélisation des faisceaux gaussiens : (a) largeur du faisceau $r(z)$ le long de son axe axial z ; (b) le profil transverse gaussien en tout point z du faisceau.	91
IV.4	Schéma électrique du photodétecteur 4-quadrants, avec ces sorties de mesures des tensions V_1 , V_2 , V_3 , V_4 et V_s	94
IV.5	Evolution des mesures de tension lors d'un déplacement du spot laser le long de l'axe x du photodétecteur 4-quadrants : (a) Caractéristique expérimentale V_x et V_s ; et (b) zoom de la mesure de la tension V_x autour de la position centrale du photodétecteur.	95
IV.6	Intensité lumineuse générée par le faisceau laser obéissant à une distribution Gaussienne : (a) modèle théorique et (b) mesure expérimentale de l'intensité.	96
IV.7	Caractéristique V_d et V_g mesurée lorsque le spot lumineux se déplace suivant l'axe x sur la surface du photodétecteur 4-quadrants.	97
IV.8	Exemple de mouvement brownien généré à partir des paramètres d'un faisceau de rayon X	99
IV.9	Schéma de principe de la stratégie de poursuite du faisceau.	101
IV.10	Schématisation de la procédure de détection du faisceau laser par le PSD : (a) le faisceau laser est déplacé selon un déplacement uniforme jusqu'à ce que (b) le PSD détecte un signal de mesure ($V_s \neq 0$); puis (c) une procédure de centrage du faisceau est amorcé. Le faisceau est ici contrôlé par les deux étages du micromanipulateur. .	103
IV.11	Trajectoires 2D de la simulation de la poursuite du faisceau en utilisant un filtre de Kalman.	106
IV.12	Courbe de l'erreur de poursuite 2D du faisceau avec KF	107
IV.13	Simulations des trajectoires 2D de la poursuite du faisceau en utilisant un filtre de particulaire (SIR).	111
IV.14	Les courbes d'erreur de poursuite 2D du faisceau, en utilisant un filtre particulaire.	112
IV.15	La plateforme expérimentale pour l'évaluation de la synchronisation de faisceau de lumière : le photodétecteur et la diode laser sont placés sur les deux micromanipulateurs.	113
IV.16	Résultats de la détection du faisceau laser par le PSD.	114
IV.17	Résultats du centrage du faisceau laser en utilisant un filtre Kalman (KF).	114
IV.18	Courbe de l'erreur de poursuite 2D lors du centrage du faisceau. La ligne pointillée rouge correspond à l'erreur moyenne de 9.86 nm.	115
IV.19	Résultats expérimentaux de la poursuite du faisceau laser en utilisant : (a) un filtre Kalman (KF) et (b) un filtre particulaire (PF).	116
IV.20	Courbes de l'erreur de poursuite 2D du faisceau laser, en utilisant : (a) un filtre Kalman (KF) et (b) un filtre particulaire (PF).	117

IV.21	Comparaison des erreurs moyennes des estimations de la position du faisceau en utilisant le filtre de Kalman (KF) et le filtre particulaire (PF), en fonction de la vitesse moyenne du faisceau laser.	118
V.1	Localisation du point focal à $z = 0$ par détection du maximum d'intensité lumineuse	122
V.2	Distribution gaussienne de l'intensité lumineuse maximale sur la section transversale du faisceau à différents endroits	123
V.3	Tension de sortie maximale détectée sur le photodétecteur pour différentes positions de la micropoutre AFM le long de l'axe x	124
V.4	Calibration de la sonde AFM avec une micro-poutre calibrée avec une constante de raideur de $8.87\mu\text{N}/\mu\text{m}$	125
V.5	Résultats expérimentaux de calibration du levier AFM en interaction avec une micro-poutre calibrée bizautée à l'extrémité.	125
V.6	Micromanipulation d'un micro-objet par adhésion avec une sonde AFM : (1) le levier AFM se déplace vers l'objet jusqu'à ce que la phase d'adhésion soit initiée, (2) la phase de retrait et transport de l'objet en direction du faisceau débute et (3) l'asservissement de position du point maximal d'intensité émise (point focal) est finalisé.	126
V.7	Principe de la recherche du point focal d'un faisceau basé sur la procédure <i>backtracking</i> en utilisant une trajectoire en spirale associé à une descente de gradient.	127
V.8	Différentes formes de spirales d'Archimède : (a) une spirale avec $p = 50\mu\text{m}$, $\theta_{\text{max}} = 4\pi$ et $\theta_0 = 0$; (b) la spirale S_2 est définie avec $p = 75\mu\text{m}$, $\theta_{\text{max}} = 4\pi$ et $\theta_0 = \pi/4$ et la spirale S_3 avec $p = 25\mu\text{m}$, $\theta_{\text{max}} = 10\pi$ et $\theta_0 = 0$	129
V.9	Calibration expérimentale de la trajectoire en spirale. Identification des paramètres de la spirale dans les cas : (b) Sans occultation du spot lumineux par la sonde AFM ($p = 25\mu\text{m}$, $\theta_{\text{max}} = 9\pi$ et $\theta_0 = 0$) et (b) avec occultation du spot lumineux par l'extrémité de la sonde AFM ($p = 25\mu\text{m}$, $\theta_{\text{max}} = 12\pi$ et $\theta_0 = 0$).	130
V.10	Suivi de trajectoire en forme de spirale d'Archimède : (a) Identification expérimentale d'une spirale avec $p = 75\mu\text{m}$, $\theta_{\text{max}} = 12\pi$ et $\theta_0 = 0$; (b) Suivi expérimental du gabarit de la spirale identifiée.	132
V.11	Suivi d'une spirale d'Archimède : photos prises aux instants de démarrage lors de la détection du faisceau laser ($t = 0s$), sur un point courant à l'instant ($t = 0.7s$) et au point final lors de la convergence vers la focale du faisceau ($t = 1.2s$).	132
V.12	Signaux d'entrée appliqués aux axes x et y du micromanipulateur pour générer un suivi de trajectoire en forme de spirale d'Archimède (vitesse de balayage $v=1.1\text{mm/sec}$.	133
V.13	Zoom sur l'erreur maximale de suivi de la trajectoire sinusoidale et cosinusoidale. . .	134
V.14	Préhension et dépose d'un microsphère de $8.1\mu\text{m}$ de diamètre par adhésion à l'aide d'une sonde AFM :	134

Table des figures

V.15	Ré-alignement de l'extrémité de la sonde AFM avec l'objet sous le point focal du faisceau.	135
V.16	Photographie prise au début de l'expérience, les deux pointes AFM sont contrôlées en position près d'une sphère isolée en polystyrène de 8 μm de diamètre sur un substrat de silicium.	136
V.17	Déplacement grossier en mode automatique des sondes AFM le long d'une trajectoire prédéfinie par l'opérateur.	138
V.18	Déplacement fin et alignement des sondes AFM avec ajustement de la hauteur (<i>offset</i>) avant d'initier la tâche de préhension.	139
V.19	Illustration des trois stratégies de préhension d'une sphère à partir de deux sondes AFM : (a) micromanipulation par adhésion, (b) par contact longitudinal et (c) par contact frontal.	140
V.20	Procédure de micromanipulation expérimentale des trois stratégies : (a) micromanipulation par adhésion, (b) par contact longitudinal et (c) par contact frontal.	140
V.21	Préhension par adhésion : Evolution des forces d'interaction en fonction du temps. .	141
V.22	Préhension par contact latéral : Evolution des forces d'interaction en fonction du temps.	142
V.23	Préhension par contact longitudinal : Evolution des forces d'interaction en fonction du temps.	143
V.24		143
V.25	(a) Vue globale des sondes AFM en position verticale. (b) Image optique des deux leviers AFM proches du substrat en silicium sur lequel des sphères de polystyrène de 8.2 μm de diamètre sont dispersées. La préhension de l'objet se fait selon la direction y .	144
V.26	Préhension par contact avec sondes AFM verticales : Evolution des forces d'interaction en fonction du temps.	144
V.27	Positions suivant l'axe x des sondes AFM#1 et #2 lors d'un suivi du point focal soumis à une occlusion partielle et une déviation constante du faisceau.	145
V.28	Forces d'interaction pendant une phase de transport de la microsphère : (a)-(b) lorsque les deux manipulateurs ne sont pas synchronisés et (c)-(d) lorsque ceux-ci sont synchronisés.	146
V.29	Estimation du maximum d'intensité suite à une perturbation. (b) représente l'évolution de la distribution 3D de l'intensité lumineuse au cours de la perturbation et (b) le suivi 2D de l'intensité lumineuse. Les points rouges et bleus représentent les points de suivi du maximum d'intensité et de la spirale d'Archimède.	147
V.30	Zoom de l'estimation et du suivi réel de la position du maximum d'intensité lumineuse lorsqu'une perturbation extérieure fait dévier le faisceau de lumière.	147
V.31	(a) Vue globale du montage de la tête duale nanopince mécanique sur une ligne de lumière; (b) Zoom de la nanopince mécanique.	148

Liste des tableaux

I.1	Les effets d'échelle.	8
I.2	Principales caractéristiques des différents types de microscopes.	12
I.3	Évaluation des principales caractéristiques des différents formes d'interaction.	15
II.1	Synthèse des robots-porte échantillons.	38
II.2	Comparaison entre les différentes sondes locales.. . . .	46
II.3	Synthèse des besoins robotisés pour les tâches de micromanipulation	49
II.4	Caractéristiques des étages micro et nano-translateurs	49
II.5	Spécifications constructeurs des sondes AFM avec microcapteur de force piezorésistif de type FMT400	51
III.1	Identification des paramètres des fonctions de transfert dans le domaine discret des micro-translateurs (H_m) et du nano-translateur (H_n) pour chaque axe x , y , et z	61
III.2	Choix des paramètres de l'algorithme génétique.	78
III.3	Identification des différents paramètres de pondération W_{1i} , W_{2i} et W_{3i} avec $i = x, y, z$	81
IV.1	Caractéristiques browniennes d'un faisceau de rayon X.	98
IV.2	Statistiques de l'erreur d'estimation utilisant le filtre de Kalman	105
IV.3	Statistiques de l'erreur d'estimation utilisant le filtre particulaire	111
IV.4	Statistiques de l'erreur d'estimation de la poursuite 2D du faisceau laser.	116

Liste des tableaux

Introduction générale

L'étude de la matière par les rayons X joue un rôle majeur en science dans quasiment tous les domaines (médecine, sciences des matériaux, chimie, biologie). Récemment le besoin croissant de faisceaux de rayons X adaptés aux Nanosciences et Nanotechnologies est apparu. Pour y répondre, l'European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) a dédié quelques unes de ces lignes à cette demande. L'étude par faisceaux X de la matière offre de nombreuses possibilités mais présente quelques limitations : (1) les rayons X sont très sensibles à la composition chimique d'un échantillon mais pas à sa morphologie, (2) les rayons X sont puissants mais ne permettent pas d'exercer de manière contrôlée et quantifiable une contrainte mécanique sur les échantillons, (3) les rayons X de taille nanométrique sont instables spatialement rendant très délicats et longs l'alignement faisceau-micro/nano-échantillon. Ceci rend difficile le maintien de l'objet au coeur même du micro-faisceau (de quelques μm^2 de section). La plupart des tâches de micro/nano-positionnement des échantillons sont réalisées séquentiellement à partir de robots macroscopiques à multidegrés de liberté, à structure cinématique sérielle et/ou parallèle, qui sont poussés dans leurs performances ultimes en termes de précision de positionnement et de résolution de déplacement. De son côté, la microscopie à force atomique (AFM) est connue depuis plusieurs années à la fois pour sa capacité à caractériser la morphologie des nano-objets ainsi qu'à les manipuler spatialement et/ou les déformer mécaniquement. Plus récemment, l'utilisation de sondes AFM dans des systèmes microrobotiques de manipulation a permis d'imager et de manipuler des structures micromécaniques tridimensionnelles.

La conception d'un instrument microrobotique s'adaptant à un outil aussi puissant qu'un synchrotron présente des verrous scientifiques et technologiques importants. Le couplage du rayonnement synchrotron avec la technologie AFM a déjà montré sa complémentarité dans diverses applications. Durant la thèse de Mario S. Rodrigues (2004-2009), dans le cadre du projet européen X-TIP, un microscope à force atomique a été couplé avec succès à une ligne de lumière synchrotron permettant l'imagerie et l'indentation d'un micro-plot de Germanium pendant son analyse sous faisceau de Rayons-X pour mesurer son module d'Young [1]. Plus récemment, durant la thèse de Antoine Ni-

guès (2009-2012) dans le cadre du projet ANR PIANHO, des manipulations ont été réalisées avec une combinaison de deux sondes AFM basées sur des résonateurs à quartz (Diapason ou LER-Long Extended Resonator) [2]. Ces micromanipulations ont validé les capacités du nanomanipulateur, appelé *NanoWorker*, à effectuer une tâche de préhension de manière contrôlée et stable. Ces travaux pionniers ont permis à la technologie synchrotron d'ouvrir le champ des investigations possibles, notamment l'automatisation microrobotique des tâches de détection de faisceau, de prise, de transport et d'analyse de l'échantillon sous faisceau. Pour ce faire, le travail de thèse présenté dans cette étude concerne précisément l'automatisation de tâches microrobotiques en vue d'optimiser la procédure de recherche et de maintien d'un échantillon au coeur même d'un micro-faisceau de lumière.

Le chapitre 1 recense les différentes contraintes technologiques rencontrées par les systèmes de micro/nanomanipulation actuels pour une opérabilité en environnement synchrotron. En d'autres termes, quels sont les composants microrobotiques les plus adaptés aux expériences synchrotron ? Pour cela les spécificités de la micromanipulation, ainsi que les différentes solutions envisageables dans la conception d'un tel système sont présentées. Un état-de-l'art du domaine microrobotique permet d'analyser les avantages et inconvénients des solutions proposées en vue de leur intégration.

Le chapitre 2 présente la conception d'une plateforme microrobotique de manipulation duale parfaitement adaptable aux contraintes de l'analyse d'échantillons sous rayons-X. Au regard de ces diverses considérations, notre choix s'est orienté vers l'utilisation d'un microscope optique pour la perception du micromonde, pouvant être associé à l'imagerie par AFM pour une résolution plus importante. Notamment, les sondes AFM avec capteur de force piézorésistif intégré sont également utilisées pour manipuler les échantillons avec une force de préhension contrôlée. Le déplacement des pointes AFM est assuré quant à lui par deux micromanipulateurs à double-étage de positionnement synchrones : un étage assurant les grands déplacements avec une résolution grossière, et un second étage de nanopositionnement piézoélectrique pour les mouvements fins. Le positionnement des sondes AFM étant asservi par photodétection de la lumière diffractée par l'objet sous test.

Le chapitre 3 présente la synthèse d'une commande robuste pour chaque micromanipulateur à double étage. Afin de contrôler les deux étages simultanément, une loi de commande coordonnant les déplacements et les vitesses des deux étages est nécessaire. Nous présentons dans ce chapitre les boucles de contrôle de la plateforme : une partie sera dédiée au contrôle simultané haut-niveau des deux étages à partir d'une structure de commande découplée, l'autre partie à la synthèse des contrôleurs MIMO bas-niveau de type H_∞ . Enfin, des résultats expérimentaux permettront de valider la coordination des mouvements de chaque micromanipulateur autour des axes de déplacement du micro-effecteur terminal.

Le chapitre 4 traite des problèmes de synchronisation de l'échantillon avec le faisceau de lumière. L'une des spécificités de la problématique de nos travaux réside dans la manipulation de micro-objets dans le point focal du faisceau de lumière. Il s'agit donc de pouvoir maintenir efficacement l'échantillon dans le faisceau durant plusieurs minutes, malgré les perturbations externes ou des modifications des caractéristiques de l'objet. Aux échelles considérées, la dérive progressive du micro-faisceau de lumière

(dûe aux effets thermiques et aux erreurs d'hystérésis des positionneurs) et les phénomènes vibratoires (provenant du sol, des pompes, des générateurs rayons X) induisent une dynamique de mouvement à caractère Brownien. Il est alors nécessaire d'estimer la trajectoire du faisceau en vue de garantir la synchronisation entre l'échantillon et le faisceau de lumière.

Enfin, le chapitre 5 présente différents types d'expériences réalisées avec notre système de micro-manipulation en vue de son intégration sur la plateforme synchrotron de l'ESRF. Ces expériences ont eu pour but de tester et valider la capacité du montage proposé à manipuler et positionner sous le point focal d'un micro-faisceau lumineux des micro-objets dans les trois dimensions de l'espace. Trois phases caractéristiques sont testées : (i) la détection du point focal du faisceau lumineux par une procédure dite *backtracking* (ii) la préhension et le transport du micro-objet sous le faisceau et enfin (iii) la poursuite en temps-réel du point de focalisation du micro-faisceau pour la caractérisation de l'objet sous test. L'ensemble de ces résultats sont présentés et analysés.

Chapitre I

Problématiques de Micromanipulation pour les Applications Synchrotron

1 Introduction

Dans les domaines des nanosciences et des nanotechnologies, les frontières entre les disciplines deviennent floues. En effet, à l'échelle du nanomètre s'établit un lien entre la biologie, la physique, la chimie, la médecine ou les sciences de l'information [3]. La caractérisation multimodale des propriétés intrinsèques des nano-objets individuels devient donc possible. L'objectif est alors de pouvoir distinguer les propriétés de l'objet lui-même, et non plus uniquement ses caractéristiques de surface ou ses interactions avec son environnement. Notamment, avec la réduction d'échelle la plus infime quantité des composants de l'objet est impliquée, et les propriétés individuelles de chaque nano-objet ont une tendance à modifier les propriétés collectives de l'ensemble. Le point clé consiste alors à pouvoir étudier ces différences sur des objets allant de quelques micromètres à moins d'un nanomètre. Pour cela, le premier enjeu est de pouvoir pleinement appréhender et caractériser diverses informations (comme la position, l'état de surface, les forces, la masse, etc.) aux échelles du millionième de millimètre (10^{-9} m), comme illustré sur la Fig. I.1. En effet, il existe aujourd'hui une demande croissante d'information sur la composition des nanomatériaux inorganiques et organiques [4]. Cette quête de connaissance est convoitée dans de nombreuses études *in vitro* et *in vivo*. Pour y parvenir, il est nécessaire d'exploiter des techniques spectroscopiques ou chimiques, et aussi des méthodes physiques qui fournissent différents types d'informations sur les échantillons. En fonction de la technique utilisée, la région sondée peut être la couche la plus externe d'un groupe d'atomes, ou peut s'étendre à plusieurs microns en dessous de la surface de l'échantillon. L'analyse est ainsi faite pour fournir des informations sur des caractéristiques telles que la composition chimique, le niveau des traces d'impuretés, la structure physique ou l'apparence de la région échantillonnée. Ces informations sont d'une importance capitale pour les chercheurs ou fabricants, qui cherchent à appréhender la structure et le comportement de leurs composants afin de vérifier une théorie ou faire des meilleurs produits.

Ainsi, avec le développement des nanotechnologies, il apparaît important de pouvoir caractériser les propriétés des nano-objets de manière individualisée sans les altérer. Une solution pour y parvenir

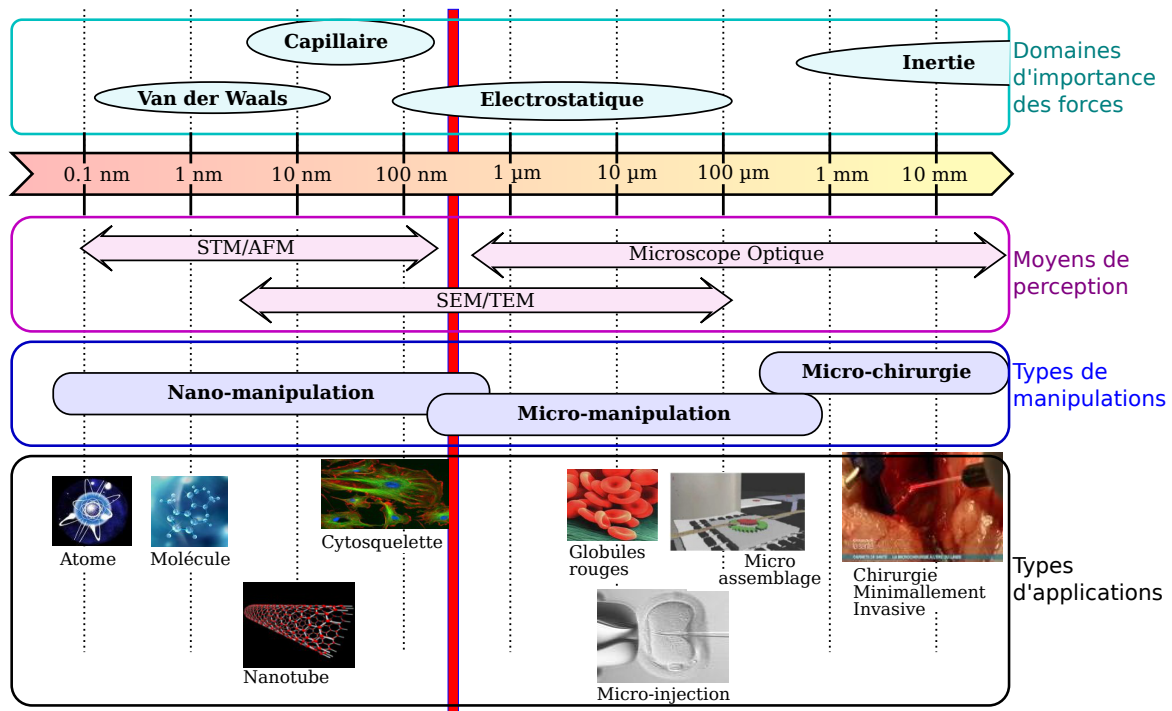


Figure I.1 – Échelle des dimensions des objets et des techniques d’observation concernée par la micromanipulation, ainsi que les domaines d’importances des différentes forces (surfaiques) rencontrées dans le micromonde. La barre rouge symbolise la limite associée au spectre visible.

consiste à exploiter la spectrométrie. Depuis la fin du XIX^{ème} siècle, plusieurs techniques spectroscopiques, comme les rayons X ou le rayonnement laser, ont été utilisées pour caractériser la structure et les propriétés électroniques des matériaux et objets. Notamment, la spectroscopie laser, comme la fluorescence ou Raman, ont aujourd’hui amélioré leur efficacité et leur coût pour une utilisation en laboratoire [5]. En parallèle, le développement de la spectrométrie par rayons X a permis l’augmentation de l’énergie du rayonnement pour une caractérisation plus fine des matériaux. En particulier, l’amélioration de la focalisation du faisceau de rayon X (actuellement moins de $100 \times 100 \text{ nm}^2$) permet d’analyser des échantillons de plus en plus petits : jusqu’à 10^8 atomes correspondant à un rayon de l’ordre 100 nm [6]. Sur la base de ces progrès, des lignes de lumières spécifiques dédiées aux nanosciences sont actuellement développées dans le cadre du programme de mise à niveau de l’*European Synchrotron Radiation Facility*¹ (ESRF), comme par exemple la ligne ID13 (*Microfocus beamline*) [7]. Toutefois, il reste à concevoir des plateformes instrumentales capables de manipuler des nano-objets afin de les positionner sous un faisceau de lumière (de rayon X ou un laser).

À cet effet, l’avancée de la robotique de manipulation aux échelles micro et nanométriques ont fait des contributions importantes permettant d’offrir des solutions aux besoins des nanosciences. [4, 8]. Ces dernières décennies ont vu ainsi apparaître des techniques de micromanipulation dans de nom-

1. L’ESRF (Installation européenne de rayonnement synchrotron) est une société civile de droit française créée le 12 janvier 1989. Ce synchrotron est l’un des trois plus importants actuellement en fonctionnement dans le monde.

breux domaines scientifiques allant du biomédical à la science des matériaux. Ainsi, l'exploitation de ces techniques a permis le développement de plateformes de micromanipulation comme outils pour :

- i) la caractérisation des propriétés locales des échantillons de dimensions micro ou nanométriques ;
- ii) la production d'images haute résolution du nanomonde par l'intermédiaire de la microscopie électronique à balayage (*Scanning Electron Microscope*, SEM), de la microscopie électronique à transmission (*Transmission Electron Microscopy*, TEM), ou encore de la microscopie à force atomique (*Atomic Force Microscope*, AFM) ;
- et iii) la réalisation d'opérations de manipulation et de micro-assemblage.

Un exemple d'étude de propriétés mécaniques réalisée sur une surface nanométrique par la micromanipulation est illustrée sur la Fig. I.2.

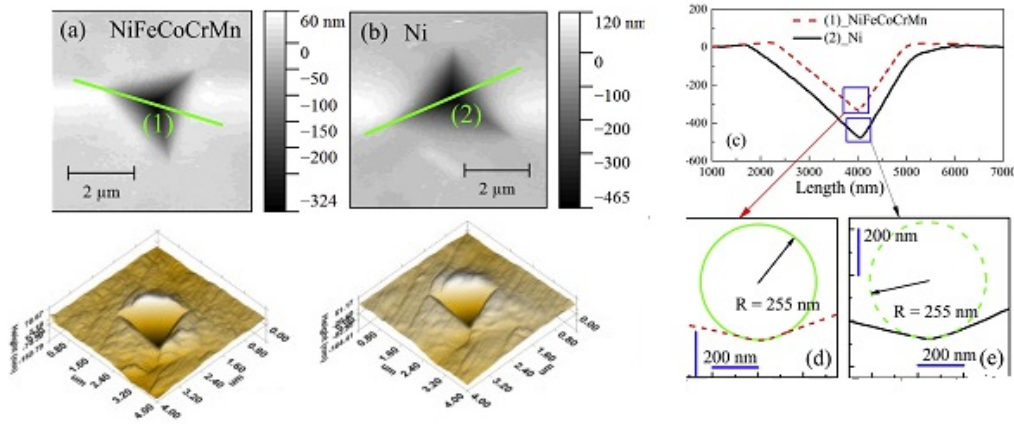


Figure I.2 – Exemple de caractérisation surfacique d'un nano-objet : image topographique AFM d'une particule (a) NiFeCoCrMn, et (b) monocristalline Ni en utilisant la pointe Berkovich ($R = 255$ nm) à une charge maximale de 10 mN ; et (c) la forme générale de la géométrie de la pointe, d'après [9].

2 Spécificités de la Manipulation dans le Micromonde

La micromanipulation consiste à pouvoir saisir, maintenir, transporter, positionner et déposer 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. Globalement, un micromanipulateur reste fonctionnellement comparable à un manipulateur traditionnel. Cependant, les principes physiques, de perception et d'actionnement considérés sont très différents. Les paragraphes suivants présentent les spécificités associées à la micromanipulation.

2.1 Comportement dans le micromonde

2.1.1 Effets d'échelle

Du fait du facteur d'échelle, la micromanipulation pose des problèmes spécifiques différents de ceux de la manipulation classique de dimensions plus traditionnelles. En effet, dès lors que les dimensions deviennent suffisamment petites, les grandeurs physiques ont des dépendances différentes par rapport aux variables spatiales (voir aussi la Fig. I.1). La conséquence majeure de ce phénomène est l'augmentation de l'importance des forces surfaciques à l'instar des forces volumiques du fait de la loi des carrés et des cubes. Plus précisément, quand on divise la dimension d'un corps d'un facteur k son aire est divisée k^2 , tandis que son volume est divisée par k^3 : le volume diminue k fois plus vite que la surface. Les forces d'inertie étant principalement reliées au volume du corps considéré, elles deviennent rapidement négligeables devant les forces surfaciques. Le Tableau I.1 présente quelques éléments de la physique et les effets d'échelle associés [4].

Tableau I.1 – Les effets d'échelle (d'après [4]).

Paramètres physique	Symbole	Caractéristique	Effet d'échelles
Longueur	L	L	L
Surface	S	$\propto L^2$	L^2
Volume	V	$\propto L^3$	L^3
Masse	m	ρV	L^3
Force d'inertie		$m \frac{d^2 x}{dt^2}$	L^4
Gravité		mg	L^3
Pression		SP	L^2
Force visqueuse		$\mu \frac{S}{L} \frac{dx}{dt}$	L^2
Force électrostatique		$\varepsilon SE^2/2$	L^2
Force de van der Waals		$\frac{A}{12z^2}$	L

ρ : densité ; g : gravité ; x : un déplacement ; P : pression ; μ : viscosité ; ε permittivité ; E : champ électrique ; A : constante de Hamaker ; z : distance entre objet.

2.1.2 Les forces surfaciques

Les forces de surface font intervenir deux types de forces interagissant à longue et à courte distance. En particulier, trois grandes classes de forces sont prépondérantes à longue portée à partir des échelles micrométriques :

1. La force capillaire dont l'existence est déterminée par les conditions d'humidité de l'environnement. À proximité de la surface, cette force est attractive et tend à retenir les objets en contact.

On peut limiter cette interaction en travaillant en atmosphère contrôlée sèche, ou sous vide, ou encore en solution aqueuse.

2. Les forces électrostatiques (forces de Coulomb) sont liées à l'apparition volontaire ou par triboélectrification de charges à la surface des objets. Elles peuvent être attractives ou répulsives selon la nature des charges en présence. Elles sont classiquement caractérisées par une loi du type $f \propto L^{-2}$, avec L représentant la distance entre les corps.
3. Les forces de van der Waals qui sont liées à l'interaction électrique de faible intensité entre les objets. Ces forces se caractérisent par une dépendance spatiale en $f \propto L^{-6}$.

En rapprochant deux objets, les nuages électroniques des ions se recouvrent et créent une force répulsive qui augmente rapidement si l'on continue à rapprocher les deux corps. Cette force, qui limite l'encastrement des objets, est une force de très courte portée qui peut être décrite par une loi du type $f \propto r^{-n}$, avec n généralement compris entre 10 et 16. Lorsque deux objets sont l'un contre l'autre, il faut aussi tenir compte de la mécanique du contact qui fait intervenir différents modèles, tel que ceux de Hertz ou de Voigt. Il s'opère alors des actions de déformation et de friction entre les différents corps.

Enfin, en descendant en-dessous des échelles nanométriques, les effets quantiques comme les forces à effet tunnel ou Casimir deviennent non négligeables. Ces effets quantiques augmentent la complexité de l'interrelation entre les objets et leur environnement. Pour toutes ces raisons, la micromanipulation d'objets est très différente de la manipulation conventionnelle, et de nouvelles stratégies doivent être élaborées.

2.1.3 Problèmes d'adhésion

Comme nous venons de le présenter, lorsqu'il s'agit de manipuler des objets de dimensions globalement inférieures à environ $100\ \mu\text{m}$, les forces surfaciques deviennent prépondérantes réduisant rapidement le caractère déterministe des opérations de micromanipulation. En effet, ces forces surfaciques induisent souvent des forces d'adhésion entre le préhenseur et l'objet manipulé [10, 11]. L'ensemble de ces forces d'adhésion ont des effets prépondérants en micromanipulation puisqu'elles perturbent les contacts entre un objet et son préhenseur, entre un objet et le substrat (site de prise ou de dépose) ou entre deux objets [12]. Divers travaux de recherche ont été conduits pour développer des modèles afin de prévoir et quantifier l'influence de ces divers efforts [11, 13]. Il apparaît donc que la micromanipulation d'un objet est généralement rendue difficile, et des contraintes spécifiques doivent être appréhendées. Notamment, l'opération de dépose de micro-objets est une tâche rendue plus délicate du fait des effets d'adhésion : l'objet adhérant généralement à son préhenseur.

Toutefois, pour réaliser des opérations de micromanipulation avec succès, de nombreuses solutions existent [10, 13]. Tout d'abord, le milieu (liquide, air ou le vide) joue un rôle prépondérant pour la définition des tâches de micromanipulation [14]. Par exemple, dans l'air, une atmosphère sèche diminue considérablement les forces de capillarité. Les forces électrostatiques, quant à elles, peuvent

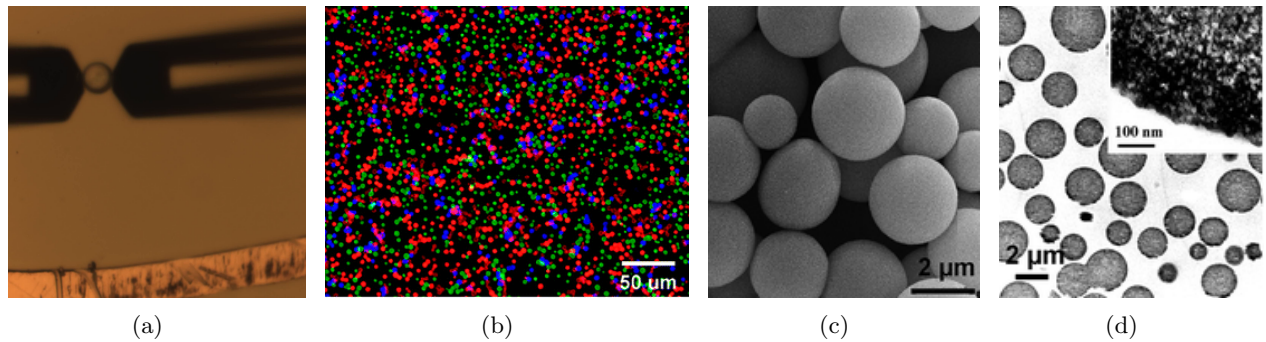


Figure I.3 – Différentes images du micromonde par microscopie à champ lointain, en utilisant : (a) un microscope optique classique, (b) un microscope à fluorescence, (c) un SEM et (d) un TEM.

être réduites en utilisant des matériaux conducteurs reliés à la masse (pour les effecteurs et le substrat). La surface de contact entre un objet et le préhenseur ou le substrat joue également un rôle important : plus elle est faible, plus les forces d'adhésion diminuent. Il est donc important de bien appréhender les diverses problématiques de la manipulation dans le micromonde afin de pouvoir développer une plateforme instrumentale adaptée.

2.2 Perception du Micromonde

La micromanipulation robotisée dépend grandement des moyens de perception des échelles nanométriques. En particulier, la taille de l'échantillon, sa conductivité et la compatibilité de l'environnement sont les aspects les plus importants à considérer dans le choix d'une modalité d'imagerie. Les outils d'imagerie couramment utilisés pour la micromanipulation peuvent se classer dans deux grands groupes : i) les microscopes à champ lointain qui utilisent le rayonnement réfléchi, réfracté ou diffracté par l'objet étudié ; et ii) les microscopes à champ proche dans lesquels une sonde est déplacée proche de la surface de l'objet étudié.

2.2.1 Microscopie à champ lointain

La classification des microscopes à champ lointain, assimilable à de la spectrométrie, repose sur la nature du rayonnement. La Fig. I.3 illustre des images issues de certaines des modalités de perception à champ lointain. Classiquement, nous pouvons distinguer i) la microscopie photonique qui utilise les radiations électromagnétiques du spectre visible, les radiations infrarouges, ultraviolettes et les rayons X ; ii) la microscopie électronique, utilise quant à elle, les propriétés ondulatoires de faisceaux d'électrons accélérés, auxquelles peuvent être associées une courte longueur d'onde ; et iii) la microscopie acoustique, qui repose sur l'utilisation d'ondes mécaniques.

Microscope optique La microscopie optique (*Optical Microscope*, OM) est la plus simple et la plus ancienne des techniques de perception microscopique, dans la mesure où elle se rapproche

des techniques classiques de vision (voir aussi Fig. I.3(a)). Le OM est constitué par une association adéquate de lentilles permettant de recueillir les rayons lumineux diffractés par l'objet observé. Il travaille généralement dans les longueurs d'ondes du spectre visible (eg. de 400 nm à 700 nm), ce qui limite aussi le pouvoir séparateur de ces microscopes à 200 nm. Compte tenu de cette limite de résolution, l'exploitation de la lumière évanescente ou fluorescente est nécessaire pour l'observation des nano-objets [4]. Ainsi, au microscope optique classique sont venus s'adjoindre plusieurs autres dispositifs :

- les **microscopes à contraste de phase** se basent sur le principe de l'holographie et permettent de relever la topographie tridimensionnelle de la surface de l'objet observé ;
- les **microscopes à fluorescence** dans lesquels l'échantillon est marqué avec un corps fluorescent procurant ainsi une image d'excellent contraste (voir Fig. I.3(b)) ;
- les **microscopes confocaux** qui consistent à pratiquer des " coupes optiques virtuelles " dans l'objet observé et de n'enregistrer que l'image de la fluorescence émise dans un plan.

Microscope électronique La microscopie électronique est une technique qui utilise les électrons pour imager. Elle peut être en transmission (TEM) ou en réflexion (SEM). Son principe repose sur l'interaction d'un faisceau d'électrons avec la matière. Suite à cette interaction, les émissions électroniques sont captées par des détecteurs puis traitées pour percevoir l'échantillon. En raison de leur fort pouvoir d'interaction avec la matière (molécule d'oxygène, particules de poussières, etc.), les microscopes électroniques nécessitent une enceinte sous vide (ou ultravide). De plus, pour éviter une accumulation d'électrons sur l'échantillon (empêchant l'observation), ce dernier ainsi que le substrat doivent être conducteurs. Il existe actuellement deux grandes familles de microscopes électroniques :

- Les **microscopes électroniques à balayage** (SEM) construisent une image 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 (voir Fig. I.3(c)).
- Les **microscopes électroniques à transmission** (TEM) permettent de voir le cœur de la matière. Le principe consiste à placer un échantillon très mince sous un faisceau fixe d'électrons, et de visualiser l'impact des électrons sur un écran fluorescent (voir Fig. I.3(d)). Cette modalité est principalement exploitée en biologie et en métallurgie.

2.2.2 Microscopie à champ proche

Le microscope à champ proche, aussi appelé à sonde locale, est un microscope utilisant une poutre afin d'imager un échantillon. L'objet est alors analysé point par point par balayage d'une sonde locale placée à proximité de sa surface. L'image obtenue est une cartographie du relief (nano-topographie) ou une autre grandeur physique caractéristique de l'objet sondé. La résolution de cet instrument dépend de la taille de la pointe. L'un des avantages de ce type de microscope est qu'il peut être également

utilisé pour manipuler des échantillons et pour mesurer des efforts sur la pointe [15]. Il existe différents types de microscopes à sonde locale, dont les plus répandus sont :

- Le **microscope à effet tunnel** (*Scanning Tunneling Microscope*, STM) dans lequel la pointe est maintenue très proche de l'échantillon et le système mesure le courant électrique dû à l'effet tunnel pour obtenir une image de la surface de l'échantillon. L'objet observé doit cependant être conducteur.
- Le **microscope à force atomique** (AFM) qui exploite l'interaction (attraction/répulsion) entre les atomes de l'apex nanométrique d'une pointe et les atomes surfaciques de l'échantillon. L'AFM se décline sous trois modes principaux : i) le mode contact, ii) le mode contact intermittent (ou *Tapping*) et iii) le mode non contact. L'interaction de la pointe avec la surface est mesurée via les contraintes induites sur le microlevier supportant la pointe. Le microlevier peut être défléchi sous l'action de différentes forces d'interaction (Van der Waals, électrostatique, magnétique, etc.), l'AFM est ainsi un instrument versatile exploitable sur pratiquement n'importe quel type d'échantillon. Enfin, l'AFM est un outil souvent exploité d'une part pour la caractérisation mais également pour la manipulation d'objets micro ou nanoscopiques [16].

Cependant, la principale limite de la microscopie à champ proche réside dans la phase de balayage qui induit des temps d'acquisition d'une image complète assez important.

2.2.3 Bilan

Le Tableau I.2 résume les caractéristiques des principales modalités d'observation généralement proposées.

Tableau I.2 – Principales caractéristiques des différents types de microscopes.

	Champ lointain		Champ proche
	Microscope optique	SEM/TEM	SPM/AFM
Milieu	air, liquide, vide	vide	air, liquide, vide
Profondeur de champ	faible	large	moyen/ faible
Résolution plane	200 nm	1-5 nm / 0.1 nm	0.1 nm / 2-10 nm
Résolution hors plan	—	—	0.01 nm / 0.1 nm
Grandissement	$1\times - 10^3\times$	$10\times - 10^6\times$	$10^2\times - 10^8\times$
Temps d'acquisition	< 10 ms	0.1-1 min	1-5 min
Échantillon	pas trop transparent	conducteur non-chargé, compatible avec le vide	hauteur < 10 mm

SEM (*Scanning Electron Microscope*) : microscope électronique à balayage ;

TEM (*Transmission Electron Microscopy*) : microscope électronique à transmission ;

SPM (*Scanning Probe Microscopy*) : microscopie locale ; AFM (*Atomic Force Microscope*) : microscopie à force atomique.

Parmi les moyens de perception, la microscopie électronique nécessite généralement un équipement lourd avec une enceinte sous vide. La microscopie locale (SPM) permet aussi bien de percevoir et de manipuler des micro-objets, au détriment d'un temps d'acquisition de l'image très important. Les microscopes permettent d'allier les techniques de traitement visuel classiques, mais n'offrent qu'une résolution limitée. Pour ces diverses raisons, dans le cadre de nos travaux de recherches, nous privilégions l'utilisation du microscope optique associé à l'emploi d'une pointe AFM.

2.3 Les différents moyens de préhension

La micromanipulation concerne de nombreux secteurs, que ce soit l'assemblage de pièces rigides (microroues 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 moyens d'interaction dépendant du domaine d'application. Deux catégories de préhension se distinguent : les interactions avec contact et sans contact.

2.3.1 Interaction par contact

Dans cette catégorie d'interaction, chacune des solutions exploite un préhenseur dont un ou plusieurs points de contacts sont nécessaires pour manipuler un micro-objet. Il existe divers types de préhenseurs basés sur différents principes de fonctionnement [4, 8]. Les outils les plus répandus utilisent :

- Des **pointes AFM** : en complément de ces différents modes de fonctionnement, l'AFM peut être utilisé comme un outil de manipulation de micro et nano-objets [16–18]. Les pointes AFM offrent ainsi une grande versatilité pour divers types d'applications.
- Des **micropipettes** : les instruments les mieux adaptés à la manipulation cellulaire sont les micropipettes et les micro-aiguilles [19, 20], qui permettent de maintenir et d'injecter des substances à l'intérieur d'une cellule biologique. Cependant, leurs applications restent limitées au domaine de la micro-injection et de la biomicromanipulation de cellules.
- Des **micropinces** : des micropinces sont des outils intuitifs pour l'utilisateur, et tiennent une part importante dans la résolution des problèmes de manipulation. Il existe différentes réalisations de micropinces qui peuvent s'adapter à la préhension de bon nombre de micro-objets [21]. Le mécanisme de serrage peut être basé sur des effets physiques de divers types, tels que la piézoélectricité [22], l'électrostatique [23], l'électrothermie [24], ou l'effet mémoire [25]. Toutefois, les formes de la micropince et de l'objet à manipuler doivent être adaptées selon les applications considérées. Elles sont généralement privilégiées dans les opérations de microassemblage.

2.3.2 Interaction sans contact

La manipulation sans contact regroupe les techniques dont les effets à distance permettent la maîtrise des mouvements des micro-objets. Parmi les nombreux principes qui existent nous pouvons

citer :

- **l'interaction diélectrophorétique** : Lorsqu'une particule est plongée dans un champ électrique non constant, elle est soumise à une force diélectrophorétique [26]. 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. La diélectrophorèse est néanmoins caractérisée par une faible portée du champ électrique créé par les électrodes (typiquement inférieures à $< 100 \mu\text{m}$), limitant l'espace de travail disponible.
- **l'interaction magnétique** : Cette catégorie d'interaction repose sur l'exploitation de l'énergie magnétique créée par un aimant [27, 28], comme représenté sur la Fig. I.4. De manière analogue à la diélectrophorèse, le mouvement des particules peut prendre deux formes selon la différence entre la susceptibilité magnétique de la particule et celle du milieu. L'actionnement magnétique ne peut se réaliser que sur des objets magnétisables (eg. matériaux ferromagnétiques).

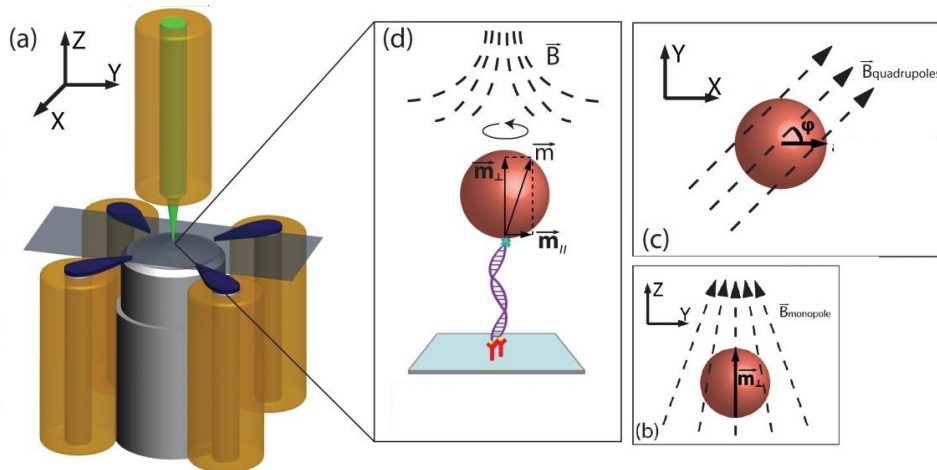


Figure I.4 – Exemple de pince magnétique constituée d'une antenne unipolaire placée étroitement au-dessus de l'échantillon afin de générer une force de traction vers le haut sur la microsphère superparamagnétique.

- **l'interaction acoustique** (ultrasonore) : Le principe physique utilisé est la pression exercée par une onde acoustique lorsqu'elle est stoppée par un objet [29, 30]. Cette pression va exercer une force pour déplacer l'objet vers les nœuds ou les ventres de pression. Cependant, les forces appliquées sur les objets sont faibles.
- **l'interaction optique** : Les pinces optiques utilisent un faisceau laser pour manipuler des micro-objets en utilisant la pression de radiation [31, 32], comme illustré sur la Fig. I.5. Cette force est due à la pression exercée par la réflexion d'un rayon lumineux sur la surface d'un objet. Une limitation de ce procédé réside dans le type d'objet pouvant être déplacé : ils doivent être transparents, de forme sphérique et posséder un indice de réfraction supérieur au milieu ambiant (eg. liquide pour minimiser les frottements). D'autre part, l'irradiation directe de forte puissance laser peut causer des dommages aux échantillons [33, 34].

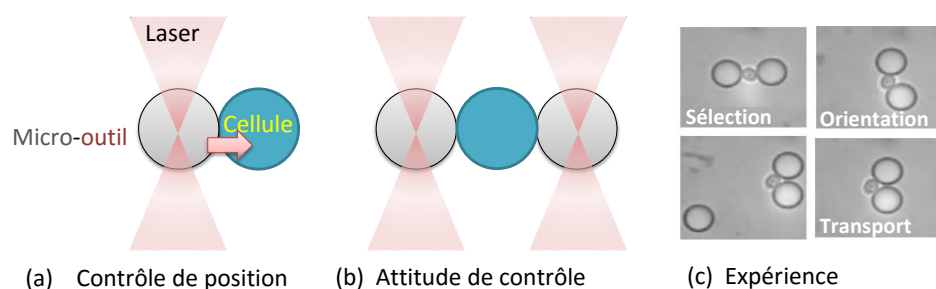


Figure I.5 – Manipulation d’une cellule avec des pinces optiques : (a-b) formation d’une pince optique pour la prise ; et (c) réalisation de diverses tâches de manipulation.

2.3.3 Bilan

Le Tableau I.3 résume les caractéristiques des principales formes d’interaction des micro-objets.

Tableau I.3 – Évaluation des principales caractéristiques des différents formes d’interaction.

	Précision	Espace de travail	Environnement
Pointe AFM	+++	++	air, liquide, vide
Micropipette	+	+++	liquide
Micropince	+++	++	air, liquide, vide
Optique	+++	+	air, liquide, vide
Diélectrophorèse	++	- -	air, liquide, vide
Magnétique	++	++	air, liquide, vide

L’interaction sans contact présente l’avantage de ne jamais toucher le micro-objet, annulant ainsi les effets d’adhésion, parfois indésirables. Par exemple, la pince optique permet de manipuler des particules de l’ordre 25 nm de taille, et d’appliquer des forces de l’ordre du pico-newton pour mesurer leurs propriétés chimiomécaniques [35]. La manipulation magnétique représente une bonne alternative pour la manipulation sans contact d’objet unique. Mais, elle n’est pas en mesure de délivrer une force magnétique suffisante lorsque il s’agit de contrôler ou manipuler des objets non ferromagnétiques. En outre, pour les différentes interactions sans contact les forces de serrage sur les micro-objets sont faibles, et ces procédés sont généralement limités à une classe restreinte de matériau en termes de forme et de propriétés physiques.

A contrario, du fait des forces d’adhésion, les interactions avec contact impliquent l’utilisation de techniques spécifiques pour décoller l’objet du préhenseur. De plus, le préhenseur doit être déplacé au moyen d’un micromanipulateur. Toutefois, les solutions de préhension par contact permettent la manipulation d’une grande variété d’objets (matériaux, formes) et évoluant dans différents milieux (liquide, air, atmosphère contrôlée). Les préhenseurs sont de plus capables de générer des forces d’interaction suffisamment importantes pour le maintien de l’objet, même en présence de perturbations

extérieures. Au regard de ces arguments, les contributions de ce manuscrit se situent dans le cadre de cette seconde stratégie de micromanipulation : la manipulation robotique avec contact. Cette approche consiste en la prise, le déplacement et la dépose d'objets au moyen d'un préhenseur. Il reste alors à considérer le système de manipulation robotisé pilotant les mouvements du préhenseur (cf. Section 3).

2.4 Les moyens de manipulation et d'actionnement

2.4.1 Les systèmes de micromanipulation

Comme dans la robotique conventionnelle, dans une tâche de micromanipulation, le choix du manipulateur et la stratégie de préhension sont directement liés à la nature de la tâche à réaliser. Dans le micromonde, les forces d'adhésion ou les forces surfaciques perturbent de manière importante la fonction de préhension. La répétabilité des tâches de manipulation des micro-objets est donc fonction du micromanipulateur. Ainsi, le micromanipulateur doit être un système capable de générer des mouvements entre un effecteur et les objets manipulés avec un niveau de précision compatible avec les échelles microscopiques [36, 37]. À cet effet, divers dispositifs commerciaux (comme ceux de Zyvex², Kleindiek³, SmarAct⁴, ou Attocube⁵) ou fabriqués en laboratoire peuvent être employés [8, 38, 39]. Par exemple, Peng *et al.* [40] ont réalisé un micromanipulateur pour la préhension de nano-objets en utilisant un système de manipulation comprenant quatre nanosondes Kleindiek³ installées dans un SEM. Yu *et al.* [41] ont quant à eux développé un piézomanipulateur doté de 3 degrés de liberté (ddl) de translation et d'un mouvement de rotation. Plus récemment, l'équipe de Toshio Fukuda [4] a construit un manipulateur nanorobotique possédant 16 degrés de liberté. La majorité des réalisations effectuées exploitent des structures sérielles ou distribuées [8, 36, 42], et peuvent être classées selon trois grandes catégories :

- i) Les **systèmes de microrobots mobiles** : Il est possible d'utiliser des microrobots compacts et autonomes, chacun pouvant être dédié à la réalisation d'une opération (eg. manipulation, visualisation, contrôle, fixation, transport, etc.) [43–45]. La Fig. I.6 présente un exemple de manipulation au moyen d'un microrobot mobile magnétique (Mag- μ Bot) développé par l'équipe du professeur Metin Sitti (Carnegie Mellon University, Pennsylvanie, États-Unis). Les limitations rencontrées encore aujourd'hui par l'utilisation de microrobots mobiles à des fins de micromanipulation concernent principalement leur autonomie énergétique et l'intégration des divers composants mécatroniques qui doivent pouvoir être miniaturisés.
- ii) Les **plateformes de manipulation** : Des robots manipulateurs conventionnels ont été exploités pour la micromanipulation [46, 47]. Dans la plupart des cas, des robots manipulateurs sériels possédant plusieurs degrés de liberté (eg. de type SCARA) sont utilisés pour le positionnement sur de

2. Zyvex : <http://www.zyvex.com/>

3. Kleindiek nanotechnik : <http://www.nanotechnik.com/>

4. SmarAct : <http://www.smaract.de/>

5. Attocube : <http://www.attocube.com/>

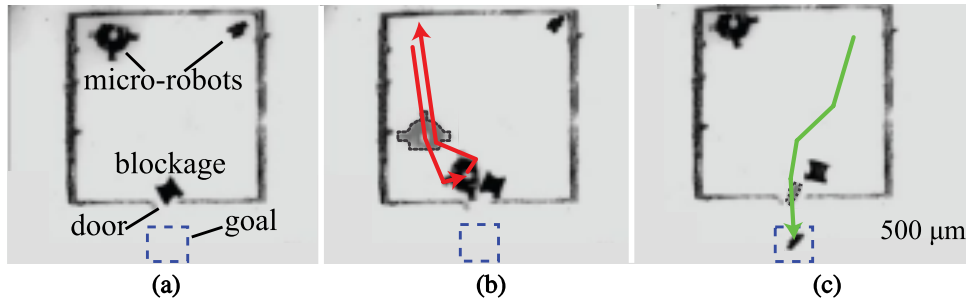


Figure I.6 – Microrobots mobiles réalisant une tâche de micromanipulation (d’après [45]).

longues distances avec une résolution grossière (jusqu’à une dizaine de micromètres). Cependant, les inconvénients liés à ce type de plateformes résident principalement dans un amortissement trop faible, les sources d’imprécision de positionnement, l’encombrement important limitant l’accès aux objets à manipuler. En outre, afin de pouvoir assurer des mouvements fins compatibles avec une résolution nanométrique, il est nécessaire d’ajouter un micropositionneur doté d’une résolution importante. Certains exemples de ce type de plateformes sont présentés au Chapitre 2.

- iii) Les **plateformes de micromanipulation** : Compte tenu des inconvénients associés aux manipulateurs conventionnels, des systèmes compacts dont les technologies d’actionnement permettent la réalisation des opérations de micromanipulation ont été développés [8, 42, 48]. Ces systèmes sont constitués de structures sérielles résultant d’un assemblage de modules élémentaires : chaque module réalisant un mouvement (ou ddl) particulier. Dans tous les cas, l’élément clé du micromanipulateur est l’actionneur qui doit être capable de déplacer le préhenseur avec une (très) grande précision.

2.4.2 L’actionnement des micromanipulateurs

Le choix du mode d’actionnement est généralement grandement dépendant de la taille caractéristique du micromanipulateur et des performances souhaitées. Ainsi, les actionneurs utilisant des matériaux déformables (bilames thermiques, structures en alliages à mémoire de forme, poutres piézoélectriques, etc.) sont particulièrement adaptés aux échelles micro et nanoscopiques puisque non perturbés par des frottements mécaniques comme dans les systèmes conventionnels [37, 49]. Les principaux types d’actionneurs utilisables en microrobotique exploitent [48] :

- Des actionneurs thermiques : Ces actionneurs permettent d’obtenir de l’énergie mécanique à partir d’une énergie thermique. L’énergie thermique peut être produite par différents moyens (effet Joule, réaction chimique, rayonnement, etc.). Le principal inconvénient de ce type d’actionneur est sa lenteur. Les actionneurs thermiques semblent bien adaptés à la miniaturisation dans la mesure où plus les éléments constituant l’actionneur sont petits, plus les échanges thermiques sont rapides.

- Des actionneurs magnétiques : Une force magnétique est appliquée à une poutre déformable en utilisant des matériaux ferromagnétiques soumise à un champ magnétique. Les actionneurs magnétiques sont réputés pour leur aptitude à exercer des forces extrêmement importantes. Les forces magnétiques ont des effets qui dépendent du volume de l'actionneur, rendant peu aisé leur miniaturisation. Pour réaliser un micro-actionneur électromagnétique, il est nécessaire d'intégrer dans un faible volume, une structure tridimensionnelle comportant au moins une bobine et un noyau en matériau ferromagnétique.
- Des moteurs : La méthode la plus simple d'utilisation est probablement le moteur (eg. électrostatique ou électromagnétique). Ils peuvent être utilisés pour réaliser des déplacements sur des distances de quelques centimètres avec des résolutions pouvant atteindre quelques dizaines de nanomètres. Cependant, il reste difficile de pouvoir miniaturiser ce type d'actionneur.
- Des actionneurs électriques : Les actionneurs électriques utilisent la conversion d'une énergie électrique en énergie mécanique. Pour assurer un positionnement avec une précision nanométrique, les micromanipulateurs exploitent principalement des poutres piézoélectriques [37]. En effet, en raison de leur grande rigidité, de leurs dimensions compactes, et leur résolution de positionnement extrêmement élevée, les actionneurs piézoélectriques sont utilisés dans la grande majorité des systèmes de nanositionnement [8, 42, 48]. Cependant, leur plage de fonctionnement reste généralement très limitée, étant classiquement de l'ordre de quelques centaines de micromètres. De plus, les actionneurs piézoélectriques sont sujets à des comportements hystériques pour des déplacements importants, à une dérive thermique et présentent une résonance mécanique légèrement amortie. Ces aspects impliquent de fortes non-linéarités dans le comportement des micromanipulateurs, et peuvent entraîner d'importantes oscillations aux hautes fréquences. La Fig. I.7 décrit le comportement classique d'un nanositionneur, correspondant ici au P-733 (Physik Instrumente⁶).

2.4.3 Choix de la structure de manipulation

Le micromanipulateur considéré dans le cadre de nos travaux de recherche est constitué : i) d'un étage de micropositionnement qui assure les grands déplacements, mais avec une résolution grossière ; et ii) d'un étage de nanositionnement piézoélectrique permettant une résolution plus fine, sur une course plus réduite. Cette organisation nécessite une coordination entre les deux étages afin de réaliser les opérations de micromanipulation. En effet, chaque étage est doté de sa propre caractéristique (eg. temps de réponse, période d'échantillonnage, bande passante, etc.).

D'autre part, l'actionnement piézoélectrique souffre d'un effet d'hystérésis, de dérive thermique, et d'une dérive lente de la déformation en fonction du temps. Ces aspects induisent des comportements fortement non-linéaires entre le champ électrique appliqué et le déplacement mécanique. En particulier, ces non-linéarités sont d'autant plus importantes lorsque les déplacements sont grands. De ce fait, il

6. Physik Instrumente (PI) : <http://www.physikinstrumente.com>

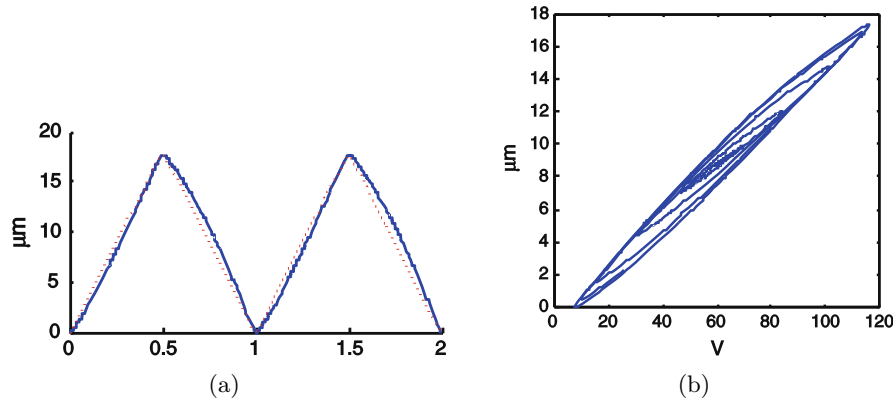


Figure I.7 – Comportement typique d'un nanositionneur piézoélectrique (ici le P-733, de Physik Instrumente) : (a) une entrée de commande en triangle et (b) courbe XY en fonction de la tension appliquée (d'après [37]).

apparaît intéressant de pouvoir tirer profit de l'étage de micropositionnement afin de limiter les grands déplacements du nanositionneur.

3 Systèmes de Micromanipulation

Dans la partie précédente, nous avons évoqué les différentes spécificités associées à la manipulation dans le micromonde. Classiquement, l'utilisation de micro-actionneurs seuls ne permet pas de remplir l'ensemble des tâches. C'est pourquoi le concept de micromanipulateur englobe, outre les micro-actionneurs, d'autres éléments tels que le préhenseur adapté au contact avec les micro-objets, ou encore les modalités de perception (eg. de vision et de force). Afin d'assurer un minimum d'autonomie, il est nécessaire de développer des stratégies de commande pour la micromanipulation dans le micromonde. Plus précisément, il s'agit de pouvoir étudier les lois de commande permettant de piloter les déplacements, mais aussi les forces d'interaction. Il est donc dans la plupart des cas extrêmement important de pouvoir contrôler précisément, non seulement la position du préhenseur, mais également les forces exercées sur les objets manipulés. Ces différents aspects sont traités dans les paragraphes suivants.

3.1 Plateforme de micromanipulation

De très divers et nombreux prototypes de micromanipulateurs ont été proposés dans la littérature [4, 8, 36]. Si on cherche à définir un micromanipulateur idéal et multi-usage, il devrait posséder les propriétés, non exhaustives, suivantes [50] :

- haute précision et résolution,
- temps de réponse court,
- plusieurs degrés de liberté (ddl),

- bon rapport signal-sur-bruit,
- aptitude à exercer de grandes forces ;
- possibilité de manipuler des micro-objets de tailles et de formes diverses,
- possibilité de travailler dans différents milieux (eg. air, liquide, vide),
- le volume de travail important pour un encombrement minimal, etc.

En pratique, il est très difficile de réunir toutes ces caractéristiques dans un seul et même manipulateur, et donc d'obtenir la plateforme de micromanipulation optimale. Notamment, la définition de critères pour évaluer la qualité ou les performances d'un micromanipulateur est étroitement liée à l'application visée. Ainsi, la précision du positionnement est souvent favorisée pour les opérations de micro-assemblage, tandis que pour la biomicromanipulation de cellules, les efforts d'interaction sont privilégiés.

Pour concevoir une plateforme de micromanipulation versatile, la voie la plus appropriée consiste à utiliser des principes d'actionnement simples afin d'éviter l'emploi de structures mécaniques complexes, difficiles à fabriquer et à contrôler. De même, il est important de doter la plateforme d'information sensorielles fiables et précises permettant de réaliser les tâches de manipulation de manière adéquate. Ainsi les composants essentiels pour une plateforme de micromanipulation sont :

- un ou plusieurs moyens d'actionnement pour générer les déplacements du manipulateur ou de l'espace de travail (cf. paragraphe 2.4) ;
- des dispositifs de mesure, généralement de vision (cf. paragraphe 2.2), mais aussi des capteurs de position et de force ;
- un ou plusieurs contrôleurs dont la fonction est l'asservissement du vecteur d'état du système (position, vitesse, force, etc.).

Ces deux derniers points sont présentés dans les paragraphes suivants.

3.2 Les capteurs pour la micromanipulation

Une plateforme de micromanipulation nécessite une grande précision. Celle-ci est non seulement requise au niveau du micromanipulateur mais également au niveau de ses capteurs. Nous présentons ci-après les informations sensorielles couramment rencontrées en micromanipulation.

3.2.1 Mesure de position

Un micromanipulateur est un dispositif qui doit être capable de manipuler des objets de dimensions micrométriques, avec une résolution au moins nanométrique. Des capteurs de position et d'orientation de très haute précision sont donc nécessaires. Il s'agit de mesurer soit les déplacements des micro-objets soit la position des micropositionneurs. Une première solution consiste à exploiter les différentes modalités de vision du micromonde, introduites au paragraphe 2.2. Il existe également des capteurs spécifiques pour la mesure des déplacements linéaires, tels que les capteurs optiques et capacimétriques [8, 36]. Les interféromètres sont les plus précis, mais aussi les plus onéreux. Les capteurs de type

jauges extensométriques sont parfois employés, mais restent très fragiles. Les capteurs d'orientation sont généralement plus rares que ceux mesurant les déplacements linéaires.

D'autre part, les micro et nano-positionneurs commercialisés embarquent généralement leur(s) propre(s) capteur(s) de position et/ou d'orientation. Par exemple, le nano-translateur P-611.3S Nano-Cube de Physics Instrumente (voir l'annexe D) utilise un capteur à base de jauges de contrainte pour mesurer la position de l'effecteur.

3.2.2 Mesure des forces

Dans le domaine de la manipulation conventionnelle, en dehors des moyens de vision, la possibilité de connaître à chaque instant la force exercée sur les objets manipulés permet généralement de réaliser des opérations plus délicates. Du fait des spécificités du micromonde, l'exploitation de la connaissance des forces d'interaction prend d'avantage d'importance dans le cadre de la manipulation de micro-objets. En effet, la micromanipulation des composants est conditionnée par les différentes forces d'adhésion précédemment introduites au paragraphe 2.1. Plus précisément, la réussite de la prise ou de la dépose dépend du déséquilibre des forces agissant aux interfaces préhenseur/objet et objet/substrat [51, 52]. En outre, si les caractéristiques des objets manipulés sont connues, il est possible d'évaluer la force minimale à partir de laquelle on considère que le micro-objet est convenablement maintenu [53–55]. Dans le cas où ces objets sont très fragiles, on pourra également asservir la force de maintien plutôt que la position des préhenseurs.

Il s'agit ainsi de doter la plateforme de micromanipulation d'une mesure de force qui peut être ensuite exploitée pour le contrôle de la manipulation. Cependant, les forces généralement mises en œuvre sont de l'ordre de quelques mN à moins de 1 nN [36]. Il est donc délicat de concevoir des capteurs pouvant mesurer de très faibles forces avec une bonne précision. Les solutions proposées utilisent classiquement les effets capacitifs [56, 57], des structures résonantes [58], la piézoélectricité [59] ou encore la piézorésistivité [60]. En particulier, les capteurs piézorésistifs sont largement utilisés dans de nombreuses applications en raison de leurs petites dimensions, leur facilité d'intégration, et de leur dynamique de mesure importante [61–63]. En particulier, des poutres piézorésistives sont embarquées sur certains préhenseurs comme la micropoutre PRC-400 de Kleindiek⁷. Pour observer une force, la piézorésistivité exploite la variation de la résistivité du matériau en fonction de la déformation de la structure.

3.3 Stratégies de commande pour la micromanipulation

Dans le cadre du contrôle des micromanipulateurs la littérature propose différents schémas de commande [37]. Parmi ceux-ci, deux grandes familles de synthèse sont répertoriées : i) la commande classique où le contrôleur est intégré dans une boucle fermée ; et ii) la commande par anticipation

7. Kleindiek nanotechnik : <http://www.nanotechnik.com/>

qui exploite une modélisation des composants du micromanipulateur. Ces deux familles de commande sont présentées ci-après.

3.3.1 Commande en boucle fermée

La technique la plus populaire pour la commande des systèmes de positionnement est la stratégie de commande en boucle fermée. Dans les applications où il existe des changements rapides du signal de référence, r , des erreurs de positionnement importantes se produisent si les fréquences d'excitation du signal r sont proches des premiers modes de résonances du système. Dans la mesure où le premier mode de résonance domine généralement la réponse du système, la dynamique d'un nanopositionneur peut être approchée par un filtre passe-bas du deuxième ordre [37] :

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\omega_n\zeta s + \omega_n^2} \quad (\text{I.1})$$

avec ω_n la pulsation propre, et ζ l'amortissement du système. Bien qu'un système de second ordre est un modèle très simplifié, il est suffisant pour démontrer les limites rencontrées par certains contrôleurs. La Fig. I.8 illustre un exemple de régulation d'un positionneur, $G(s)$, utilisant une mesure de position, d , afin de minimiser l'erreur de position au moyen d'un correcteur $C(s)$.

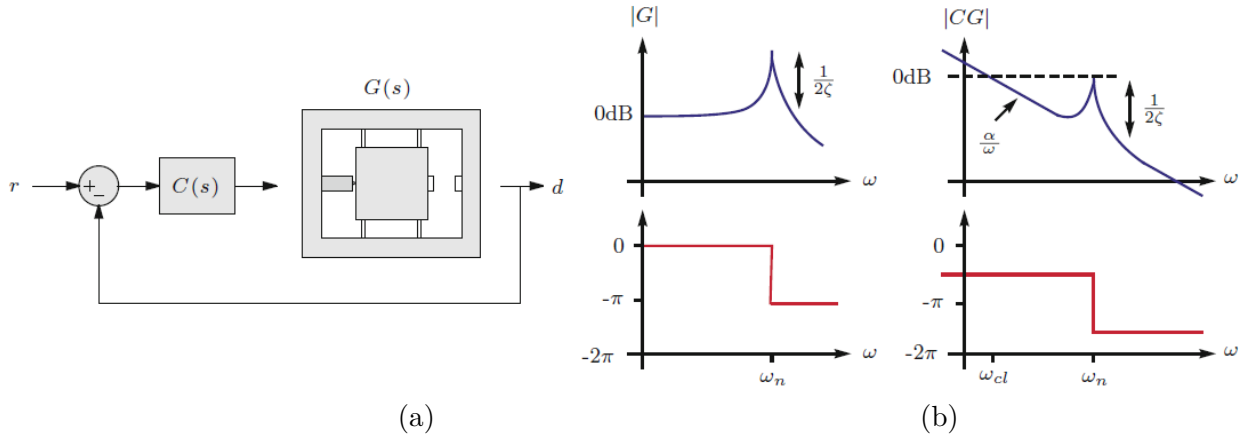


Figure I.8 – (a) Système de positionnement $G(s)$ contrôlé par un contrôleur intégral $C(s) = K_i/s$. (b) Réponses fréquentielles du positionneur, $G(s)$, et de la boucle ouverte $C(s)G(s)$ du système.

En raison de leur simplicité et de leur capacité à compenser un large éventail d'erreurs, la commande en boucle fermée utilisant des correcteurs de type proportionnel-intégral-dérivé (PID) sont couramment utilisés dans les systèmes de positionnement, notamment commerciaux [64]. Les contrôleurs de types PID sont simples, relativement robustes aux erreurs de modélisation, et permettent de réduire sensiblement les non-linéarités des actionneurs piézoélectriques aux basses fréquences. Cependant, la bande passante du système est généralement fortement limitée par la présence de modes de résonances importants. La cause de la limitation de la bande passante se justifie en analysant le

gain de boucle fermée, $|C(s)G(s)|$ (cf. Fig. I.8). Dans l'exemple de la Fig. I.8, le positionneur $G(s)$ est commandé par un contrôleur intégral de gain K_i . Ce qui limite alors la bande passante de la boucle fermée et la marge de gain. Plus précisément, au delà de la fréquence de résonance, ω_r , le retard de phase φ dépasse $-\pi$, le gain de la boucle devrait être moins de 1 (ou 0 dB) pour permettre la stabilité de la boucle fermée. La condition de stabilité en boucle fermée est alors :

$$K_i < 2\omega_r\zeta \quad (\text{I.2})$$

Comme le système (I.1) possède un gain unitaire, le maximum de la bande passante en boucle fermée est proportionnel au produit du facteur d'amortissement ζ et de la fréquence de résonance ω_r . L'amortissement des positionneurs étant généralement de l'ordre de $\zeta \approx 0.01$, de ce fait la bande passante reste inférieure de 2% par rapport à la fréquence de résonance [65]. Cet effet est d'autant plus accentué si une marge de gain est requise. Ceci est une limitation sévère de l'utilisation de ce type de schéma de commande. En particulier, dans les applications nécessitant des fréquences importantes, comme par exemple pour effectuer de l'imagerie AFM à haute vitesse [66, 67]. L'impact de cette limitation de la bande passante est illustrée sur la Fig. I.9.

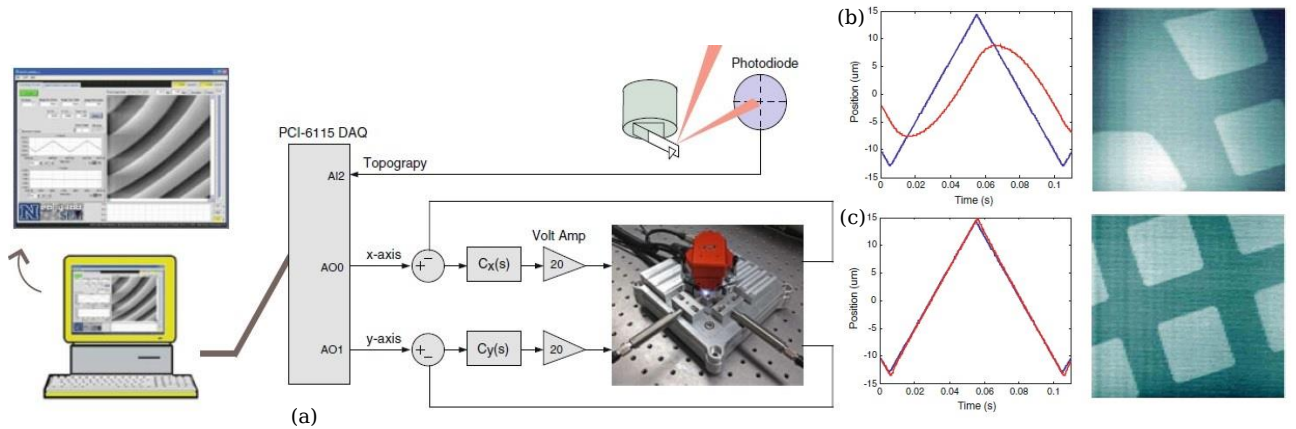


Figure I.9 – Exemple des problèmes associés aux limitations de la bande passante de le cadre de l'imagerie AFM à haute vitesse : (a) Système d'imagerie AFM. Déplacements selon l'axe x et image résultante pour (b) un contrôleur de type PI et (c) un contrôleur d'amortissement de type IRC (d'après [68]).

Différentes approches ont été proposées visant à améliorer la bande passante en boucle fermée des positionneurs, basées par exemple sur l'inversion de la résonance au moyen d'un filtre coupe-bande (*notch filter*) [69], ou en utilisant un contrôleur d'amortissement (*Integral Resonance Control*, IRC) [68, 70]. La Fig. I.9 illustre l'intérêt d'utiliser un schéma IRC d'amortissement pour améliorer le suivi de position à haute vitesse. D'autres schémas de commande en boucle fermée ont été développés en considérant les retours d'état [71], la programmation de gain [72], la commande robuste [73, 74], la commande par inégalités matricielles linéaires (*Linear Matrix Inequality*, LMI) [75], ou encore le contrôle répétitif [76–78]. Ces techniques peuvent réussir à amortir le système de positionnement avec

une sensibilité relativement modérée aux variations de fréquence de résonance. Cependant, comme tous les systèmes de contrôle en boucle fermée, le gain de l'asservissement reste limité par de faibles marges de stabilité. De plus, la précision du positionnement est toujours dominée par le bruit de mesure.

3.3.2 Commande par anticipation

La commande par anticipation (ou *feedforward control*) est couramment appliquée dans les systèmes de positionnement qui nécessitent une amélioration de leurs performances [79–81]. De bonnes performances de suivi de position peuvent être obtenues si le modèle du système ou sa réponse fréquentielle sont connues avec une grande précision. Un des autres avantages de cette approche basée sur le modèle inverse réside dans sa robustesse vis-à-vis des bruits de mesure et de sa facilité de mise œuvre. Par exemple, la commande par anticipation a été intégrée en boucle ouverte pour réduire les vibrations induites par mouvement de balayage pour la SPM [82–88] ou de linéariser les effets hystérétiques [89, 90]. Bien que la commande par anticipation des systèmes de positionnement se réalise principalement en boucle ouverte, des schémas en boucle fermée peuvent être employés pour améliorer les performances du système contrôlé [37, 79, 80].

Classiquement, la commande par anticipation des positionneurs est basée sur les modèles inverses de leurs comportements. Par exemple, pour piloter des nanopositionneurs piézoélectriques les non-linéarités (eg. hystérésis, déformation, dérive thermique) sont dissociées de la dynamique linéaire. Dans ce cadre, un modèle en cascade est souvent privilégié [82, 85, 87]. La Fig. I.10 décrit ce principe de commande par anticipation en boucle ouverte appliqué à un nanopositionneur piézoélectrique. La stratégie consiste dans un premier temps à développer le modèle du nanopositionneur (dynamique linéaire $G(s)$ associé au modèle hystérétique $\mathcal{H}$), et ensuite d'inverser ce modèle pour déterminer l'entrée de pré-compensation pour réaliser le suivi de position.

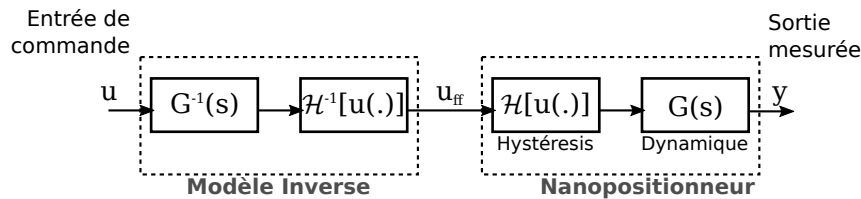


Figure I.10 – Schéma de contrôle par anticipation en boucle ouverte d'un nanopositionneur piézoélectrique caractérisé par son cycle d'hystérésis, $\mathcal{H}$, associé à un modèle dynamique $G(s)$.

Toutefois, les contrôleurs par anticipation manquent de robustesse lorsqu'il existe des non-linéarités et que le modèle du système est mal connu, ce qui est généralement le cas pour les nanopositionneurs piézoélectriques [65, 81, 91]. En outre, si un changement significatif du pic de résonance se produit, le contrôle par anticipation devient difficile [65]. L'existence de zéros de phase (déphasage non minimal) représente également une autre limite pour la mise en œuvre de la commande par anticipation. Les contrôleurs d'anticipation peuvent être considérés uniquement lorsque les fréquences de résonance sont

stables et que le contrôleur peut être re-calibré hors-ligne [83, 92]. Pour améliorer les performances de suivi, la combinaison d’une commande par anticipation avec une commande en boucle fermée permet d’augmenter la bande passante sans pour autant compromettre la robustesse du système [93–97]. En effet, il s’agit alors d’un schéma de commande doté de deux degrés de liberté. Celui-ci est composé d’un filtre de correction aval (*Feedforward filter*, FFF), utilisé pour la mise en forme des entrées et la compensation des modes résonants, tandis que la commande en boucle fermée assure la robustesse vis-à-vis des perturbations extérieures et des incertitudes de modélisation [81]. Néanmoins, ces schémas de commande héritent des défauts de la commande par anticipation pour les systèmes à non minimum de phase, où l’inversion conduit à des instabilités. [65, 81].

4 Objectifs de la Thèse

La micromanipulation est un domaine de recherche à part entière dont les champs applicatifs couvrent en particulier les domaines du biomédical, du microassemblage/usinage, de la microélectronique, etc. Concevoir une plateforme permettant de satisfaire tous les critères, les contraintes et les enjeux de chaque discipline reste encore utopique. Il convient donc de définir le cadre applicatif considéré.

4.1 Contexte d’étude

C’est en partie grâce à la microscopie à sonde locale (SPM) que les nanosciences ont connu un développement très rapide ces trois dernières décennies après l’introduction de la STM. Les applications associant la SPM et la recherche fondamentale couvrent une grande quantité de domaines. La SPM est une des techniques les plus utilisées pour caractériser les objets en vue i) de mesurer des grandeurs physiques, ii) de fabriquer des nanostructures, et iii) de les manipuler. En parallèle, le rayonnement X d’un synchrotron est un outil remarquable pour la caractérisation des matériaux à l’échelle nanométrique [6, 98, 99]. La Fig. I.11 présente un exemple de caractérisation de particules polycrystallines, SmFeN, en utilisant la spectrométrie par diffraction de rayons X obtenue grâce à une plateforme de micromanipulation [99]. L’analyse des résultats de diffraction permet de caractériser l’homogénéité cristallographique de la particule mesurée. Dans ce cadre, l’ESRF (*European Synchrotron Radiation Facility*) améliore en permanence les performances du synchrotron de Grenoble, présenté sur la Fig. I.12. En particulier, ces améliorations concernent, la focalisation du faisceau de rayons X permettant la caractérisation de zones toujours plus petites [7]. Ainsi, concevoir un instrument s’adaptant à un outil aussi puissant qu’un synchrotron est un défi majeur pour le développement des nanosciences.

Le couplage du rayonnement synchrotron avec la technologie SPM a déjà montré la complémentarité de ces deux outils. Durant le projet européen X-TIP, un microscope à force atomique (AFM) a été couplé avec succès à une ligne de lumière synchrotron permettant l’imagerie et l’indentation

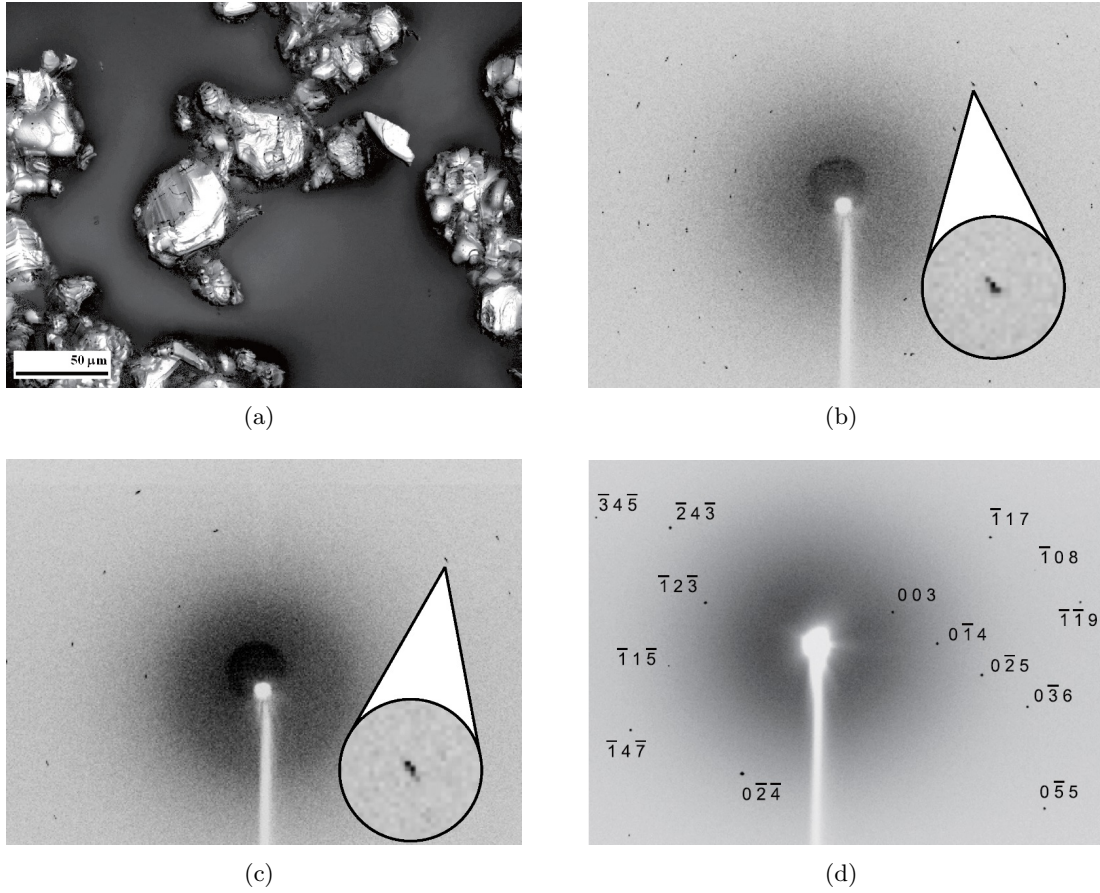


Figure I.11 – Caractérisation par diffraction de rayon-X de particules polycrystallines SmFeN [99] : (a) Morphologie des particules polycrystallines vue par un microscope optique. (b-d) Diffraction par rayons X des particules.

d'un micro-plot de Germanium pendant son analyse sous faisceau de rayons X pour mesurer son module d'Young [101]. Ce couplage innovant permet à la technologie synchrotron d'ouvrir de nouveaux champs d'investigation. Cependant, l'association des outils de micromanipulation sur une ligne de lumière présente des contraintes qui ne doivent pas être négligées. Les temps d'accès aux lignes de lumières disponibles sont rare et chers, et la mise en place du micromanipulateur ne doit pas empiéter sur le temps d'analyse effective de l'échantillon considéré. L'espace réduit disponible sur le porte échantillon d'une ligne de lumière synchrotron impose une certaine compacité du micromanipulateur. Aussi, le micromanipulateur installé sur un diffractomètre doit être opérationnel dans n'importe quelle orientation de l'espace. De plus, lorsque le faisceau d'analyse atteint des tailles nanométriques, le dernier élément optique se place à quelques centimètres, voire millimètres de l'échantillon. D'autre part, au delà d'un problème de compacité, tout ce qui n'a pas une structure suffisamment ouverte doit être écarté car cela masquerait les faisceaux de rayons X en sortie de l'échantillon (diffractés ou émis par fluorescence) et le rendrait inutile sur une ligne de lumière synchrotron. Il faut donc concevoir



Des électrons sont émis au départ du LINAC regroupés sous forme de paquets puis accélérés progressivement par des ondes électromagnétiques jusqu'à une vitesse très proche de celle de la lumière. La lumière synchrotron est alors produite lorsque des électrons de haute énergie, circulant dans un anneau de stockage, sont déviés par des champs magnétiques [100].

Figure I.12 – Schématisation du synchrotron de l'ESRF de Grenoble (d'après [100])

la plateforme instrumentale en conséquence. C'est notamment dans ce contexte que se positionne le projet PIANHO⁸

4.2 Le projet ANR PIANHO

L'objectif du projet PIANHO⁹ consiste à développer une plateforme instrumentale pour manipuler des objets individuels d'un diamètre de quelques micromètres à une dizaine de nanomètres. Puis, il s'agit de mesurer et caractériser les propriétés intrinsèques de l'objet en le positionnant sous un faisceau de lumière (rayon X ou laser) pendant plusieurs minutes, sans lui causer de dommages. À terme, la plateforme à développer devra pouvoir s'intégrer sur une ligne de lumière de l'ESRF (voir aussi la Fig. I.12). En particulier, la plateforme instrumentale aura à manipuler divers objets, tels que des cellules, protéines ou des micro-cristaux, et ceci dans différents milieux (air ou liquide). Les principaux défis à relever par le projet PIANHO pour atteindre ces objectifs peuvent s'exprimer à travers les questions suivantes :

- Comment localiser et manipuler un objet aux échelles nanométriques sans l'endommager ?
- Comment placer précisément un objet dans la focus d'un faisceau avec une résolution nanométrique ?
- Comment maintenir l'objet dans le faisceau pendant plusieurs minutes tout en minimisant les risques de modification de l'objet ?

8. PIANHO, 2009–2014, (Plateforme Instrumentale Avancée dédiées à la Nanomanipulation 3D d'Objets) est un projet financé par l'Agence National de la Recherche (ANR).

- Comment adapter en temps réel le maintien de l'objet dans la même position malgré les perturbations externes (eg. la pression de radiation) ou des modifications des propriétés de l'objet (eg. variation la charge liée au rayonnement X) ?

Pour faire face à ces défis il apparaît important de concevoir une plateforme instrumentale microrobotique polyvalente adaptée et adaptable à diverses tâches de manipulation. Toute la nouveauté et l'originalité du projet PIANHO réside dans cette proposition de plateforme instrumentale versatile. Pour cela, il est nécessaire de recourir à l'expertise de différentes disciplines de recherche comme la nano-physique, la nano-ingénierie, et la micro et nano-robotique associé à l'exploitation d'un synchrotron.

4.3 Contribution au développement d'une plateforme microrobotique

Les contributions de cette thèse s'intègrent pleinement dans les problématiques du projet PIANHO. Plus spécifiquement, il s'agit de développer une plateforme instrumentale microrobotique ayant pour rôle : i) la micromanipulation d'objets individuels, ii) son maintien dans le faisceau d'analyse (rayons X ou laser) pendant plusieurs minutes, et iii) de déposer l'objet sans l'endommager. Pour atteindre ces objectifs, les points clés suivants ont été identifiés :

- **Concevoir une plateforme de micromanipulation** : Dans le présent chapitre nous avons présenté les spécificités de la micromanipulation, ainsi que les différentes solutions envisageables dans la conception d'un tel système. Au regard de ces diverses considérations, notre choix s'est orienté vers l'utilisation d'un microscope optique pour la perception du micromonde, pouvant être associé à l'imagerie par AFM pour une résolution plus importante. Notamment, les sondes AFM sont également utilisées pour manipuler les échantillons. Le déplacement des pointes AFM est assuré par un ensemble de micromanipulateurs à double-étage de positionnement : un étage assurant les grands déplacements avec une résolution grossière, et un second étage de nanopositionnement piézoélectrique pour les mouvements fins. Ces aspects sont développés dans le Chapitre 2.
- **Commande robuste des micromanipulateurs** : Le nanopositionnement piézoélectrique possède un comportement fortement non-linéaire. De plus, il est nécessaire de pouvoir coordonner les deux étages de positionnement. Ces problématiques de commande spécifiques à notre plateforme sont présentées dans le Chapitre 3.
- **Synchronisation de l'échantillon avec le faisceau de lumière** : L'une des spécificités de la problématique de nos travaux résident dans la manipulation d'un micro-objet dans le point focal d'un faisceau de lumière. Il s'agit donc de pouvoir maintenir efficacement l'échantillon dans le faisceau durant plusieurs minutes, malgré les perturbations externes ou des modifications des caractéristiques de l'objet. En particulier, à l'échelle du faisceau considéré, la dérive progressive de celui-ci (dû aux effets thermiques, aux erreurs d'hystérésis des positionneurs) et les phénomène vibratoires (provenant du sol, des pompes, des générateurs rayons X) induisent

une dynamique de mouvement à caractère brownien. Il est alors nécessaire d'estimer la trajectoire du faisceau en vue de garantir la synchronisation entre l'échantillon et le faisceau de lumière. Ces contributions sont développées dans le Chapitre 4.

Enfin, dans le Chapitre 5 différents résultats expérimentaux valident le choix de la plateforme, ainsi que les différentes solutions proposées.

Chapitre II

Conception d'une Plateforme de Micromanipulation sous Faisceau de Lumière

Ce chapitre traite de la conception et de la description instrumentale d'une plateforme de micromanipulation et de caractérisation sous microscope optique. La station de micromanipulation développée possède deux pointes à force atomique jouant le rôle de micro-effecteurs de préhension. Ces préhenseurs sont capables de manipuler des micro-objets sous microscopie optique intégrant des capteurs piézorésistifs pour la mesure et le contrôle des forces de préhension. À terme ce montage devra être intégré sur une ligne de lumière sous rayonnement X pour l'analyse d'un micro-échantillon sous test à l'*European Synchrotron Radiation Facility* (ESRF) situé à Grenoble. Pour cela, le système microrobotique doit être compatible avec l'environnement d'une ligne de lumière du synchrotron disponible à l'ESRF (voir aussi la Fig. I.12). Pour les expériences au laboratoire, la ligne de lumière sera simulée par un rayonnement laser sur la plateforme microrobotique. La conception de la plateforme nécessite une optimisation en termes d'encombrement spatial, de degrés de liberté (ddl) des micromanipulateurs, de précision de positionnement et enfin, du choix de l'architecture de commande. Nous présentons dans ce chapitre le détail de l'architecture matérielle et logicielle développée sur la version de la plateforme actuelle.

1 Contexte Général de l'Environnement ESRF

L'*European Synchrotron Radiation Facility* (ESRF), situé à Grenoble, est un institut de recherche international financé par 21 pays. Depuis son ouverture en 1994, l'ESRF offre aux scientifiques les faisceaux de rayons X les plus puissants d'Europe, ce qui en fait l'une des plus puissantes sources de rayonnement synchrotron au monde. Doté de 43 stations expérimentales spécialisées, appelées "lignes de lumière" (voir aussi la Fig. I.12), toutes équipées de technologies à la pointe de l'innovation, l'ESRF offre aux scientifiques un outil extrêmement performant, en constante évolution [7]. L'ESRF permet ainsi de couvrir des domaines très variés allant de la chimie et de la physique des matériaux, à l'archéologie et au patrimoine culturel, en passant par la biologie structurale, la santé et les sciences de la vie, les sciences de l'environnement, de l'information et les nanotechnologies. En particulier, la ligne

de lumière ID13 "*Microfocus Beamline*"¹, s'intéresse à la caractérisation des propriétés structurales et électroniques intrinsèques de micro/nano-objets avec une approche individualisée. L'outil sur lequel s'appuie l'ESRF est le générateur de rayonnements X, afin de caractériser la structure électronique et les propriétés des matériaux. L'ESRF dédie depuis un ou deux ans certaines lignes de lumière à des expériences qui requièrent des faisceaux de rayons X très focalisés (submicronique). À l'heure actuelle, la micro-focalisation du faisceau de rayons X possède une section de l'ordre de $100 \times 100 \text{ nm}^2$ rendant ainsi possible l'analyse d'échantillons possédant un diamètre de l'ordre de 100 nm. Les plateformes instrumentales conventionnelles ne permettent pas de maintenir et placer un micro/nano-objet sous le faisceau de rayons X avec des forces définies et contrôlables.

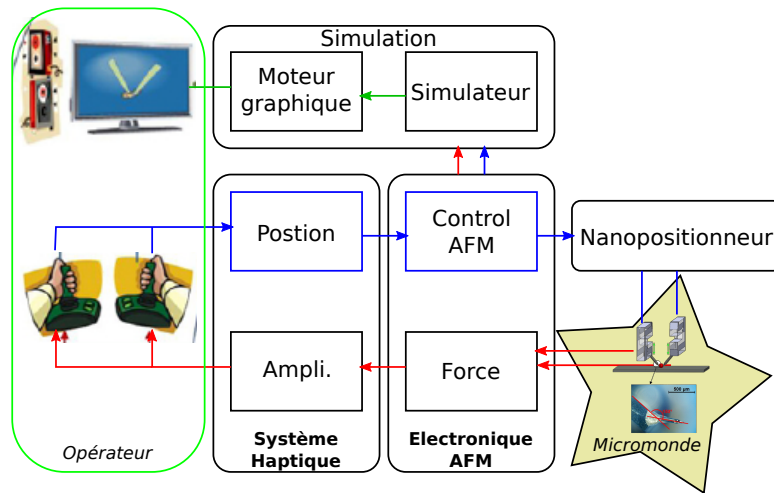


Figure II.1 – Schéma de principe de la plateforme de manipulation à deux pointes du projet ANR PIANHO.

Pour obtenir un instrument versatile capable de caractériser un échantillon par imagerie par microscopie à force atomique (AFM) et de le manipuler en 3D, les partenaires du projet ANR PIANHO ont développé une tête AFM à deux sondes indépendantes, comme illustré sur la Fig. II.1. Ainsi, il est possible : i) de cartographier des zones très distantes sur un échantillon afin de localiser rapidement une zone d'intérêt, ii) de positionner de manière très précise les deux sondes au voisinage d'un objet à manipuler, iii) de saisir un micro/nano-objet à l'air ou en milieu liquide tout en contrôlant et mesurant la force de préhension. Afin de rendre l'usage de cet instrument plus intuitif, une interface haptique lui a été couplée permettant ainsi un pilotage interactif "à la main". Ce couplage a permis d'effectuer des tâches complexes (reconnaissance de forme, manipulation) à l'échelle micro/nanoscopique en mettant à profit la dextérité humaine. Cependant comme les phénomènes physiques à cette échelle diffèrent fortement de ceux régissant le macromonde, une station "miroir" virtuelle à retour d'effort a été développée afin que l'humain puisse s'y entraîner. De plus, afin de sécuriser et augmenter la reproductibilité de certaines tâches microrobotiques, des asservissements en force/position des micropréhenseurs sont

1. ESRF ID13 : <http://www.esrf.eu/UsersAndScience/Experiments/XNP/ID13>

indispensables. Dans le cadre de ce projet, le laboratoire PRISME s'est plus particulièrement intéressé à l'automatisation des tâches microrobotiques d'alignement et de préhension d'un objet sous faisceau lumière.

2 Positionnement automatisé d'un échantillon sous un faisceau de rayons X

2.1 État de l'art des systèmes robotiques de positionnement

L'obtention d'une image de bonne qualité sous un faisceau de rayons X incident suppose l'alignement parfait du tube émetteur de rayons X avec l'amplificateur ainsi qu'une grande stabilité et rigidité du positionneur (appelé *porte-échantillon*). Le porte-échantillon doit fournir une amplitude de translation et d'inclinaison suffisante pour permettre l'orientation de l'échantillon selon les différentes composantes du tenseur des contraintes et la géométrie de la diffraction. Cette tâche de réajustement est conventionnellement réalisée sous microscope optique avec des positionneurs micrométriques manuels. Pour être précise cette procédure demande un temps de réajustement important et est fortement sensible aux erreurs humaines compte tenu du faible espace de travail. La taille des zones de test étant typiquement de l'ordre $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$. La robotisation des tâches est souvent vue comme l'unique solution au problème. La Fig. II.2 présente le schéma de principe d'un robot porte-échantillon actuellement utilisé dans les lignes de lumière des synchrotrons. Dans cette structure le robot manipulateur est dissocié de la plateforme porte-échantillon. Celui-ci n'est utilisé que pour remplacer les échantillons sous test. Le porte-échantillon est quant à lui souvent composé d'un goniomètre capable d'orienter l'échantillon dans toutes les directions de l'espace, ce qui suppose trois axes de rotation, auquel s'ajoute le positionnement du détecteur. Au total on a donc quatre axes motorisés : le dispositif est dit à *quatre cercles*.

Citons par exemple les lignes de lumière pour la tomographie du *Advanced Photon Source* [102], les lignes de lumière pour la cristallographie macromoléculaire au *Swiss Light Source* [103] ou encore celle du SOLEIL SWING beamline [104] capable de manipuler des échantillons refroidis en cryogénie. Dans la plupart des cas, des robots manipulateurs de type série sont utilisés (type Agilent HPLC series 1200; type NewPort 6-Circle Kappa Diffractometer). Ceux-ci possèdent plusieurs degrés de liberté avec des résolutions de positionnement inférieures à $1\ \mu\text{m}$ en translation et à $0.001\ \text{deg}$ en rotation.

La Fig. II.3(a) illustre un système robotisé permettant le remplacement automatisé de 60 échantillons placés sous la projection de rayons X développé au Swiss Light Source (voir [47]). Généralement le système optique implémenté sur la ligne de lumière permet d'accéder à une large gamme de focalisations du faisceau pouvant être ainsi facilement adaptable à l'échantillon étudié. L'échantillon quant à lui est disposé sur un goniomètre à géométrie 3-cercles dite structure de 'Kappa' (Fig. II.3(b)) utilisé de façon systématique pour réaliser les rotations du cristal sous test. Les mouvements d'alignement du cristal par rapport au faisceau lumineux sont réalisés par des étages de micro/nanopositionnement

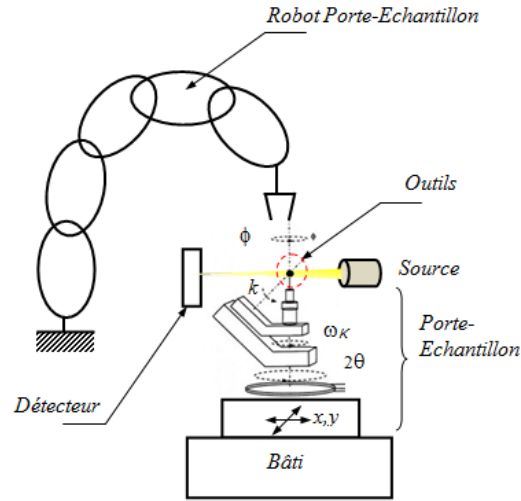


Figure II.2 – Schéma de principe d'un robot porte-échantillon pour positionner un échantillon sous la focale d'un faisceau de lumière à rayons X.

suivant les axes x, y, z . Les différentes étapes sont les suivantes : (i) Les échantillons sont prélevés à partir d'un réservoir d'échantillons (*tray*) par le robot manipulateur avec sa pince de préhension. (ii) L'échantillon est ensuite mis en place à une certaine distance de sécurité des composants optiques. (iii) Finalement, la caractérisation par rayons X du cristal est réalisée par un goniomètre à 3 degrés de liberté (ddl) de rotation qui va orienter l'échantillon selon les différentes composantes du tenseur des contraintes.

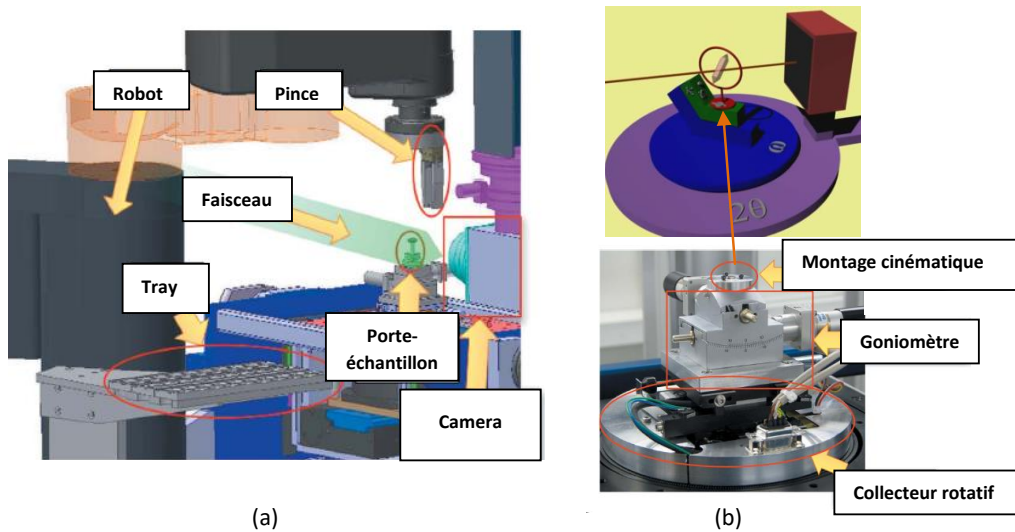


Figure II.3 – (a) Image CAO présentant la station robotisée terminale de la ligne de lumière (robot, positionneurs, rayon X et camera) pour caractériser un monocristallin, (b) Structure cinématique du porte-échantillon (diffractomètre à géométrie Kappa) à 3 ddl de rotation (d'après [47]).

Au lieu d'utiliser un goniomètre à géométrie 'Kappa', la plateforme proposée par l'Institut de Biologie Structurale de Grenoble [105] utilise un robot manipulateur sériel entraînant directement en rotation une structure cristalline (Fig. II.4(a)). L'axe goniométrique est perpendiculaire à l'axe du faisceau et les deux axes se croisent au centre de l'échantillon qui est le point de référence (Fig. II.4(b)). Le centrage du cristal par rapport à ce point d'intersection est déterminant lors de la rotation du bras robotique. Une erreur de centrage maintiendra l'échantillon hors du faisceau lumineux. Cette configuration goniométrique requiert donc 3 ddl de rotation ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) possédant une résolution angulaire de l'ordre de 0.1 à 1.0 deg. Cette solution technologique est actuellement utilisée par la société *NatX-rayTM* qui industrialise un système robotisé appelé "G-Rob" (pour Goniomètre-Robot) permettant d'automatiser la caractérisation structurale de protéines.

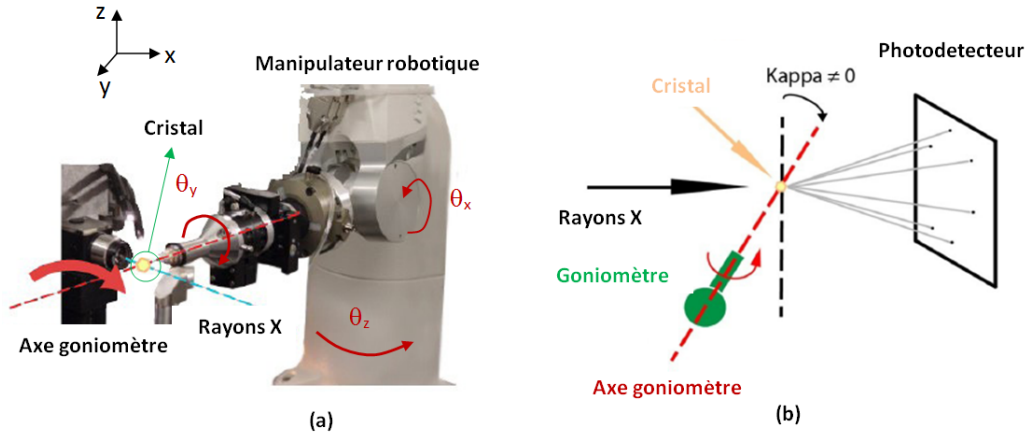


Figure II.4 – Robot manipulateur à 3 ddl de rotation utilisé pour la diffraction par rayons X d'un cristal. (a) Plateforme expérimentale et (b) représentation géométrique des axes de la configuration du goniomètre $\text{Kappa} \neq 0$ pour une mesure par diffraction (d'après [105]).

Cependant, les dispositifs robotiques étudiés présentent quelques limitations : (1) ceux-ci ne permettent pas d'exercer de manière contrôlée et quantifiable une contrainte mécanique sur les échantillons ; (2) les rayons X de taille micrométrique sont instables spatialement rendant très délicats et longs l'alignement faisceau/échantillon ainsi que leur maintien au cœur du micro-faisceau.

L'idée d'utiliser des sondes locales dédiées à la microscopie à force atomique (AFM) au coeur même du micro-faisceau pour caractériser *in-situ* la morphologie des nano-objets a été initiée dans le projet européen X-Tip coordonné par l'ESRF à Grenoble [101]. Comme le montre la Fig. II.5, la structure cinématique d'un robot porteur à 6 ddl est utilisé pour transporter et aligner le porte-échantillon. Ce concept "micro-macro" consiste à marier les avantages d'un bras conventionnel possédant un large domaine de travail avec ceux d'un nanopositionneur piézoélectrique à 3 ddl ($x - y - z$) ayant une grande précision. Une pointe métallisée de 50 nm de diamètre est collée à l'extrémité d'un doigt du diapason pour jouer le rôle de nano-indenteur. Le faisceau X diffracté va être alors enregistré par un photodétecteur 2D (Fig. II.5(b)). Le positionnement de la sonde AFM au niveau du foyer du faisceau

de rayons X se fait en enregistrant le courant induit au travers de la pointe par photoémission. On peut remarquer sur la Fig. II.6 que l'enregistrement des images issues de l'acquisition des signaux de sortie du photodétecteur et l'image du courant induit mesuré par la sonde sont identiques. Les auteurs ont montré qu'une fois le nano-objet imagé, il était ainsi possible d'aligner le faisceau avec précision par rapport au nano-objet caractérisé.

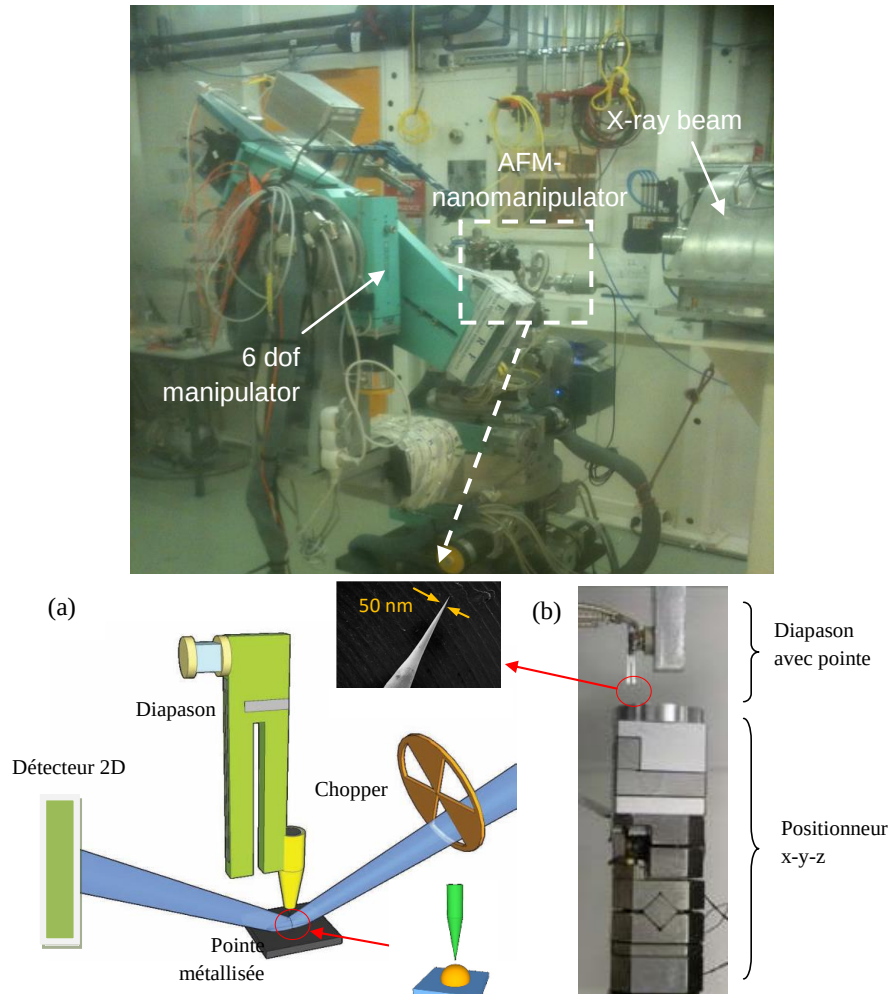


Figure II.5 – Système robotisée développé par l'ESRF à Grenoble : (a) Principe de nano-caractérisation par rayons X d'un échantillon soumis à une indentation appliquée par un diapason muni d'une nano-pointe. (b) image du système expérimental de l'ESRF (d'après [101]).

Suivant le même principe, une autre solution technologique a été implémentée sur la ligne de lumière P10 du synchrotron PETRA III au DESY Photon Science à Hambourg (Allemagne). Celle-ci comprend une tête AFM standard montée sur un goniomètre à géométrie 6-cercles 'Kappa' (cf. Fig. II.7(a)). L'ensemble mécanique illustré à la Fig. II.7(b) est solidaire de la table du diffractomètre à rayons X. La sonde AFM mobile est alors utilisée pour scanner la surface du substrat pour déterminer la position de l'échantillon. Une fois la sonde AFM positionnée, la table du diffractomètre est alors

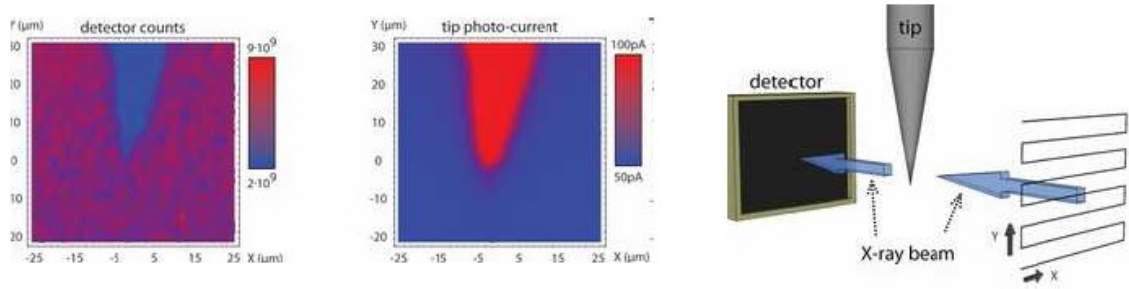


Figure II.6 – Les images montrent la carte du courant induit au travers de la pointe du diapason par photoémission et celle visualisée sur le photodétecteur. La couleur rouge indique le maximum de courant et la couleur bleue le minimum de courant. Ces deux images offrent la possibilité de détecter le faisceau diffracté pour la caractérisation de l'échantillon et également d'aligner avec précision le faisceau par rapport à l'échantillon pour la nano-indentation.

asservie en position pour garder l'objet au coeur du nano-faisceau [106]. La distance entre l'apex de la sonde AFM et le nano-faisceau est gardée constante en compensant les erreurs de position à l'aide des moteurs de position du diffractomètre. Cependant, lors d'une phase d'imagerie en mode de contact, les vibrations induites par les moteurs pas-à-pas contrôlant les mouvements du diffractomètre vont se répercuter sur la structure mécanique. Ceci va générer un bruit de mesure pendant l'acquisition de l'image qui va fortement fausser la localisation et l'alignement du micro-faisceau.

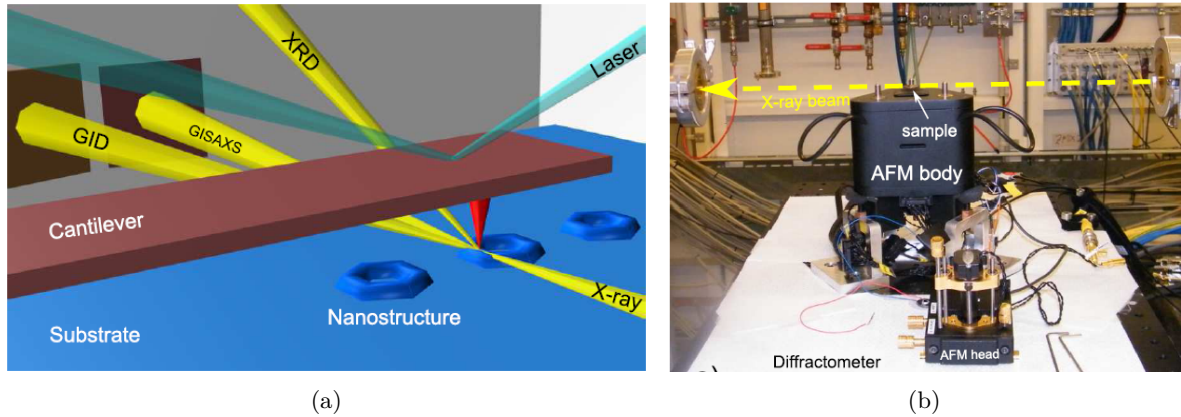


Figure II.7 – (a) Principe de nano-caractérisation par rayons X d'un échantillon soumis à une indentation appliquée par une sonde AFM. (b) Image du système expérimental au DESY Photon Science (d'après [106]).

Le Tableau II.1 présente une comparaison des caractéristiques cinématiques des systèmes mentionnés ci-dessus. Cette analyse montre que dans la plupart des cas, les robots porte-échantillons possèdent une chaîne cinématique ouverte composée d'éléments cinématiques (rotatifs ou linéaires) à 1 ddl montés en série. Quelques versions de robots parallèles ont été également utilisées et notamment le robot Delta à 4 ddl souvent utilisé pour l'alignement rapide d'échantillons : résolution de $1\mu\text{m}$ et une

Tableau II.1 – Synthèse des robots-porte échantillons.

	Eléments plateforme (actionneurs)	Degrés de Liberté	Résolution	Course
SLS [105]	Porte-outil (goniomètre)	2 ddl (θ_x, θ_y) fins	0.1 deg	10 deg
		1 ddl (θ_z) grossier	1 deg	360 deg
		2 ddl (x, y) fins	0.38 μm	15 mm
	Robot (Staubli)	4 ddl grossiers	(x, y, z, θ_z)	-
	Outil	0 ddl	-	-
DESY [47]	Porte-outil	3 ddl (x, y, z)	150 μm	0.1 μm
	Robot	3 ddl (x, y, z)	30mm	-
	Outil (sonde AFM)	1 ddl (z)	0.19 nm	
ESRF [101]	Porte-Outil	2 ddl (y, z)	1nm	0.1 μm
	Robot (Puma)	6 ddl $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ grossiers	0.5 deg	-
		3 ddl (x, y, z) grossiers	1 mm	-
	Outil (tuning fork)	1 ddl (z)	1nm	-
SOLEIL [106]	Porte-outil	1 ddl (x)	10 nm	15mm
	Robot (Agilent)	3 ddl ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) fins	0.1 deg	180 deg
	Outil (micropince)	1 ddl fin	25 μm	-

répétabilité de l'ordre de 10 μm . Cependant, la commande axe par axe d'un robot parallèle rapide est délicate de mise au point. La commande dynamique repose sur l'établissement de modèles précis pour les chaines fermées réputées difficiles à modéliser. Dans la plupart des robots série utilisés, un porte-échantillon terminal compense les erreurs des actionneurs qui réduisent la stabilité et la précision du robot porteur. Le porte-échantillon terminal nécessite des déplacements utiles de l'ordre de quelques centaines de micromètres avec des résolutions de l'ordre du nanomètre. Des actionneurs linéaires à base de technologie piézoélectrique dite "stick-slip" sont généralement préférés. Ce type d'actionneur présente une cinématique plus simple qui simplifie l'implémentation de la commande et améliore sa précision. De manière générale, le robot porte-échantillons est positionné grossièrement près du micro-faisceau à rayons X puis un micro/nano-positionneur affine le mouvement de l'échantillon pour le placer au point focal du micro-faisceau.

Dans le cadre de notre application, il est nécessaire de repenser la structure cinématique de la plateforme porte-échantillons en prenant en compte les contraintes liées à la ligne de lumière, à l'encombrement de la structure mécanique ainsi qu'à la stratégie de manipulation adoptée. Ces différents aspects sont traités dans les sections suivantes.

2.2 Contraintes du faisceau de rayonnement X

L'étude bibliographique précédente a montré que l'utilisation du rayonnement synchrotron couplé à la microscopie à sondes locales permet d'étudier les propriétés chimiques et physiques des nanomatériaux. Cependant, certaines contraintes sont à considérer : (1) les rayons X sont très sensibles à la composition chimique d'un échantillon mais pas à sa morphologie ; (2) les rayons X sont puissants mais ne permettent pas d'exercer de manière contrôlée et quantifiable une contrainte mécanique sur les échantillons ; (3) les rayons X de taille nanométrique sont instables spatialement rendant très délicats et longs l'alignement faisceau-échantillon.

Cette tâche de réalignement du faisceau par rapport à l'objet est nécessaire pour compenser les diverses perturbations extérieures. Celles-ci peuvent être liées à la dérive progressive du faisceau (effets thermiques, erreurs d'hystérésis des positionneurs), vibratoires (sol, pompes, générateurs rayons X) ou stochastiques (mouvement brownien du faisceau). A titre d'exemple, la Fig. II.8 illustre la problématique de réalignement lors d'une perturbation extérieure et son influence sur l'acquisition de l'image 2D issue du photodétecteur. On constate que les fluctuations de l'amplitude du signal mesuré sur le photodétecteur sont importantes (écart-type = $1.2\mu\text{m}$) et que les sauts de déviation du faisceau de lumière peuvent dans certains cas avoir des amplitudes supérieures à $30\mu\text{m}$. Ces bruits de mesure sont encore plus notables lorsque des sources synchrotron de troisième génération sont utilisées. Le faisceau de forme circulaire obtenu en bout de ligne aura par conséquent une taille comprise entre 0.5 et $50\mu\text{m}$ dans le plan focal. Un recentrage du faisceau est alors nécessaire. Pour simplifier cette tâche répétitive, une procédure de poursuite automatique du plan focal du micro-faisceau doit être mise en œuvre.

D'un point de vue cinématique, le positionnement de l'objet dans le plan focal de la ligne de lumière va nécessiter 3 ddl de translation : deux dans le plan de l'image et un pour le réglage du point focal.

2.3 Contraintes liées à la micromanipulation sous faisceau

La microscopie à force atomique est connue depuis plusieurs années à la fois pour sa capacité à caractériser la morphologie des nano-objets ainsi qu'à les manipuler spatialement et/ou les déformer mécaniquement. De plus, leur capacité à fonctionner dans tout type de milieu (air, gaz, liquide) les rend versatile. L'utilisation de sondes locales pour la réalisation de tâches complexes de manipulation/caractérisation a très peu été utilisée sous faisceau synchrotron [106], [101]. Cela est essentiellement dû aux difficultés rencontrées lors de la mise en œuvre de ces techniques de nanomanipulation à sonde locale.

- **Manipulation 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 un microlevier AFM unique en mode contact (Fig. II.9(a)). Cette technique peut être ainsi utilisée pour faire rouler des nanotubes cylindriques [107], déformer [108] ou sectionner des nanostructures [109]. Ce schéma de manipulation ne requiert aucune contrainte pour la localisation des objets, celles-ci n'étant jamais cachées par l'effecteur

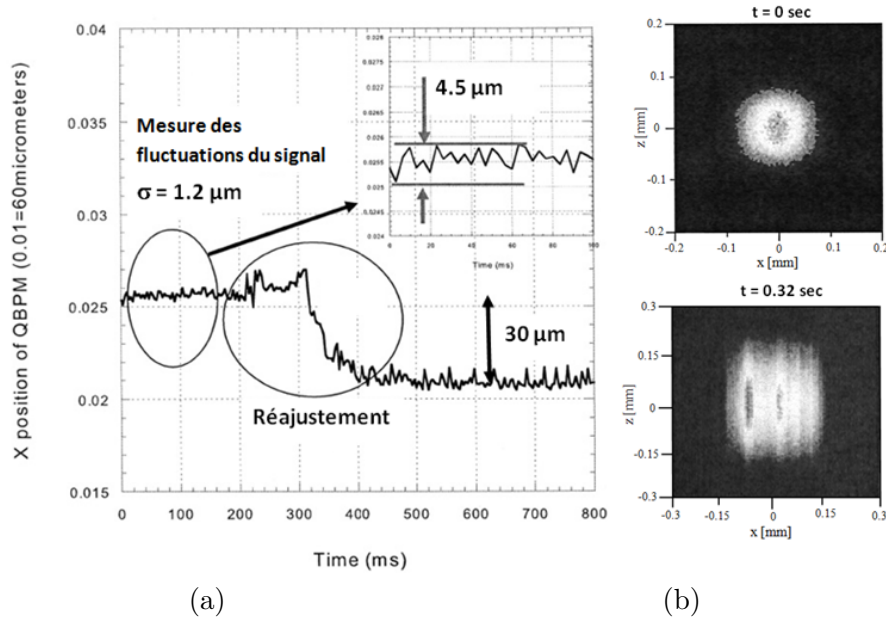


Figure II.8 – Stabilité et réalignement du faisceau rayons X lors d’une perturbation externe sur une ligne de lumière. Images issues du photodétecteur 2D : (a) avant la perturbation à $t = 0$ sec et (b) après la perturbation à $t = 0.32$ sec.

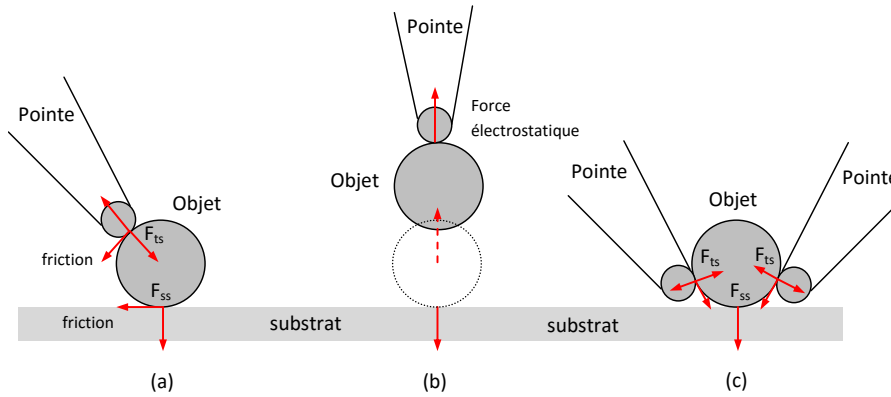


Figure II.9 – Exemples de nanomanipulation à base de sondes AFM : (a) manipulation par poussée ; (b) manipulation par adhésion ; (c) manipulation "deux doigts" par prise et dépose. Les termes F_{ss} , F_{ts} représentent les forces d’interaction objet-substrat et pointe-objet, respectivement.

terminal et toujours situées dans le plan focal de l’objectif du microscope optique. Cependant, cette stratégie est restreinte à une manipulation dans le plan.

- **Manipulation par adhésion** : Afin de permettre une manipulation en trois dimensions à partir d’un seul microlevier AFM, la stratégie (Fig. II.9(b)) consiste à utiliser les forces d’adhésion (essentiellement des forces de capillarité et/ou électrostatiques) 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 particule ainsi "collée" à la pointe peut alors être soulevée pour former des assemblages en trois dimensions. Il est cependant très difficile de contrôler la dépose et le lâcher de l'objet sur le substrat [108].

- **Manipulation par préhension à l'aide de deux sondes** : Une autre stratégie consiste à utiliser simultanément deux sondes AFM protubérantes afin de saisir l'objet. Cette technique s'apparente à une micropince à "deux doigts" (Fig. II.9(c)). Le grand avantage de cette technique de manipulation repose sur le fait que les tâches de prise et dépose sur un substrat peuvent être contrôlées en force. Comme l'ont montré les chercheurs de l'Université Pierre et Marie Curie de Paris, l'assemblage automatisé de deux nanotubes de carbone déposés sur un substrat a pu être ainsi réalisé [16]. Cette stratégie nécessite la coordination, le positionnement et le contrôle en mouvement des deux sondes locales en temps-réel.

Pour obtenir un instrument versatile capable de caractériser un échantillon par imagerie AFM et de manipuler dans les trois dimensions de l'espace, une plateforme de micromanipulation à "deux doigts" a été choisie. L'utilisation de deux sondes AFM indépendantes pour réaliser des tâches de micromanipulation apporte un certain nombre d'avantages : cela permet (1) de cartographier des zones très distantes sur un échantillon afin de localiser rapidement une zone d'intérêt, (2) de positionner de manière très précise les deux sondes au voisinage d'un objet à manipuler et (3) de saisir un micro/nano-objet à l'air ou en milieu liquide tout en contrôlant et mesurant la force de préhension.

2.4 Contraintes liées au mode opératoire de micromanipulation sous rayons X

Nous présentons dans cette section les différentes phases décrivant une séquence de *prise / caractérisation* d'un échantillon sous le champ focal d'un micro-faisceau. Deux stratégies sont possibles : utiliser une sonde pour réaliser une préhension par adhésion (Fig. II.10), ou utiliser deux sondes indépendantes pour réaliser une préhension par contact (Fig. II.11). Dans les deux cas concernés, trois phases caractéristiques sont répertoriées :

- Phase (1) : **Localisation du faisceau par la procédure *Backtracking*.**

La micromanipulation automatisée d'objet sous ligne de lumière passe d'abord par une phase préliminaire de détection/localisation du faisceau et de l'objet à manipuler. L'échantillon déposé sur le substrat est localisé soit par microscopie optique, soit par imagerie à force atomique. Ensuite, une autre phase de localisation de la focale du micro-faisceau de lumière est réalisée. Pour cela, un micro-levier AFM se déplace pour détecter la présence du faisceau. Une fois détecté, la position du maximum d'intensité est déterminée à partir d'un algorithme d'optimisation (dit de *backtracking*). Cette localisation permet une fois l'objet saisi par le micropréhenseur de le positionner au point maximal d'intensité lumineuse.

- Phase (2) : **Prise et maintien de l'objet.**

Lorsque l'outil est dans la zone de manipulation, l'échantillon sous test est asservi en position par la platine de support jusqu'au point de contact entre l'effecteur et l'objet. Ce point de

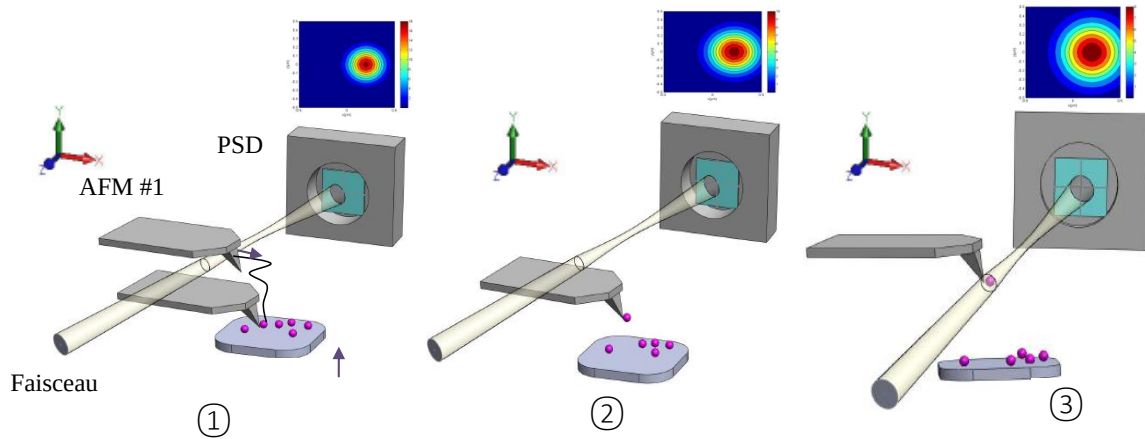


Figure II.10 – Micromanipulation d'un micro-objet par adhésion avec une sonde AFM : (1) la pointe AFM se déplace vers l'objet jusqu'à ce que la phase d'adhésion soit initiée, (2) la phase de retrait et transport de l'objet en direction du faisceau débute et (3) l'asservissement de position du point maximal d'intensité émise (point focal) est finalisé.

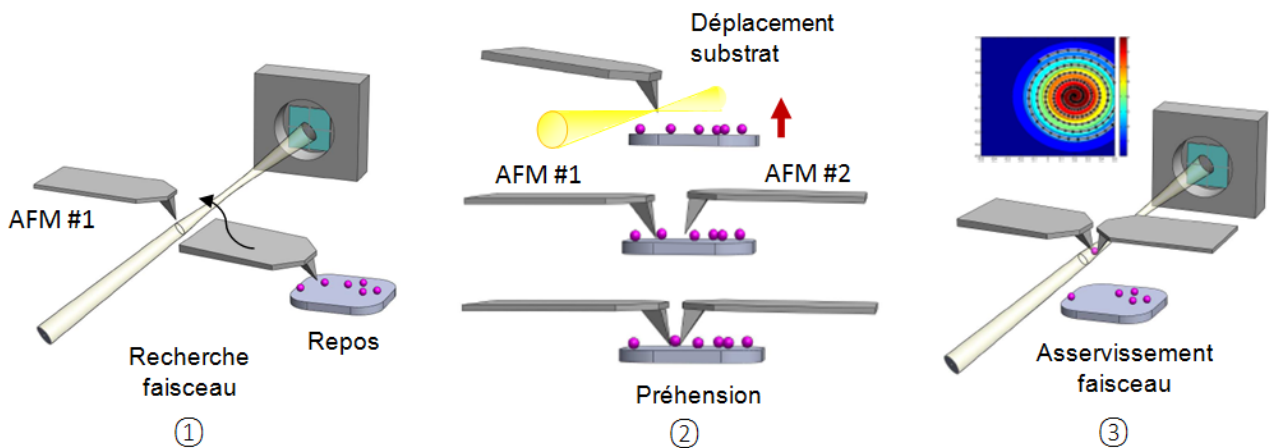


Figure II.11 – Micromanipulation d'un micro-objet par préhension avec deux sondes AFM : (1) Au repos le levier AFM #1 se déplace pour détecter la présence du faisceau et localiser la position du maximum d'intensité. (2) Déplacement de l'objet déposée sur le substrat sur cette position de référence en contrôlant les mouvements du porte-échantillon. Puis, initiation de la phase de détection de contact avec l'objet et micropréhension de l'objet par les deux micro-levers AFM avec contrôle en force. (3) Transport de l'objet au coeur du micro-faisceau et asservissement de position au maximum d'intensité.

contact doit être alors détecté. A cet effet, la mesure et le contrôle de force est nécessaire avec une résolution suffisante (de l'ordre du μN) pour ne pas endommager l'échantillon à manipuler. Dans cette phase, le contact se produit entre la (les) pointe(s) AFM et l'objet à saisir. Compte tenu des interactions surfaciques complexes qui peuvent apparaître en raison des forces de Van der Waals, électrostatique ou de capillarité, la stabilité mécanique de la préhension peut être perdue. Pour cela, un contrôle en force/position des deux sondes de préhension est alors

nécessaire afin d'éviter la perte de contact ou la destruction de l'échantillon.

— Phase (3) : **Transport sous faisceau de lumière.**

Une fois la saisie de l'objet réalisée, ce dernier doit être transporté jusqu'à la position du maximum d'intensité lumineuse traité dans la Phase 1. Etant donné que le transport de l'objet peut se faire sur une course utile de plusieurs millimètres, l'objet doit être contrôlé en force de manière stable jusqu'au point focal du micro-faisceau.

3 Conception et Réalisation de la Plateforme de Prototypage

3.1 Cahier des Charges de la Plateforme

3.1.1 Choix des effecteurs

Le montage expérimental du porte-échantillons nécessite deux sondes indépendantes qui doivent pouvoir interagir dans un encombrement limité (qqs $100 \mu\text{m}^2$). Comme illustré sur la Fig. II.12 plusieurs configurations mécaniques sont possibles.

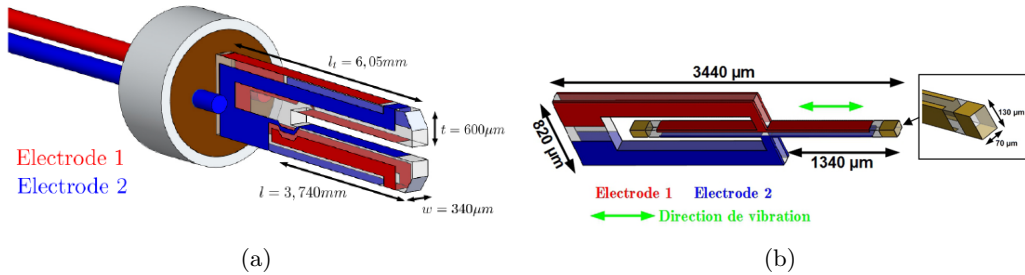


Figure II.12 – Les effecteurs considérés : (a) diapason et (b) LER. Dans les deux cas les deux électrodes sont représentées en rouge et en bleu.

- Une première solution consiste à utiliser des diapasons à quartz. A l'origine, le diapason à quartz a été introduit dans le contexte de la microscopie à sonde locale par Karrai [110], plus particulièrement pour la microscopie en champ proche optique (Scanning Near Field Optical Microscopy, SNOM). Depuis le diapason à quartz a été largement utilisé dans la conception de microscopes à force atomique [111],[112],[113]. Ces oscillateurs possèdent un très grand facteur de qualité lorsqu'ils vibrent à leur fréquence de résonance ce qui les rend très sensibles en tant que capteur de force aux perturbations mécaniques (voir Fig. II.12). L'information clé devient alors le gradient de force ∇F , relié au décalage de la fréquence de résonance df et à la largeur de la résonance dépendant de l'amortissement γ [110]. Cependant, il est nécessaire de coller une pointe sur le diapason ce qui introduit un amortissement. Une solution consiste à incliner la pointe sur le diapason pour que la direction de vibration soit parallèle à la direction dans laquelle l'interaction est régulée et ainsi conserver toute sa sensibilité. Le meilleur choix est de

faire vibrer le diapason dans son mode parallèle avec un angle identique sur le bras du diapason (voir Fig. II.12(a)). La raideur effective de ces pointes est également faible puisque pour une pointe de $10\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre et de $300\mu\text{m}$ de long, la raideur est de 22N/m . Cela peut entraîner des déflections latérales qui peuvent perturber la mesure.

- Une autre solution consiste à utiliser un oscillateur à quartz à longueur étendue (LER). Cette structure en quartz est recouverte de deux électrodes faites par un dépôt d'or et reliées à un bras central (voir Fig. II.5(b)). Lorsqu'une différence de potentiel est appliquée entre les électrodes, le bras central se contracte/dilate dans le sens de sa longueur. De ce fait le LER sera configuré de telle manière pour avoir son mode de vibration parallèle à la surface. Deux pointes protubérantes collées sur les extrémités des LERs permettent d'imager un échantillon sous test (voir Fig. II.13(b)). L'imagerie se fait alors dans un mode hybride "shear-force" $\longleftrightarrow$ "tapping mode". On va donc être capable d'effectuer simultanément une image de la surface et une micro/nano-préhension de l'objet mais dans un espace de travail restreint. Finalement, cette configuration va permettre d'accéder non plus seulement au gradient de la force comme avec le diapason mais également à la force appliquée à l'objet.
- Une dernière solution consiste à positionner deux leviers AFM dont les pointes protubérantes sont directement fixées sur deux porte-outils parallèles au substrat de travail (voir Fig. II.13(c)). Cette configuration développée initialement par l'équipe de l'ISIR de l'Université Pierre et Marie Curie [16] s'avère être la plus facile à implémenter. Cependant la mesure des forces de préhension est indirecte puisque celle-ci est estimée à partir de la mesure de la déflexion des poutres AFM au travers de deux faisceaux laser. Des poutres AFM intégrant des microcapteurs piézorésistifs de force seront préférées dans le cadre de cette étude.

Une étude approfondie de ces caractéristiques a été menée par Antoine Niguès dans le cadre de sa thèse [114]. Ce dernier a montré à partir d'une étude expérimentale sur différents types de sondes locale (leviers classiques, résonateur à quartz et LER) que celles-ci pouvaient sonder des interactions similaires malgré leur grande constante de raideur. A titre d'illustration, le Tableau II.2 résume les caractéristiques entre les différents leviers de détection utilisés dans le projet PIANHO. Compte tenu des contraintes d'encombrement (Fig. II.3(d)), les sondes locales de type LER et AFM s'avèrent être les mieux adaptées. Cependant, le LER est par définition un oscillateur dépourvu de senseur d'interaction. Il faut pour cela coller une pointe nanométrique sur ce type de résonateur. La configuration à donner au résonateur et sa pointe associée pour mener à la fois l'imagerie AFM et la préhension nécessite un choix adéquate de la structure cinématique de la plateforme.

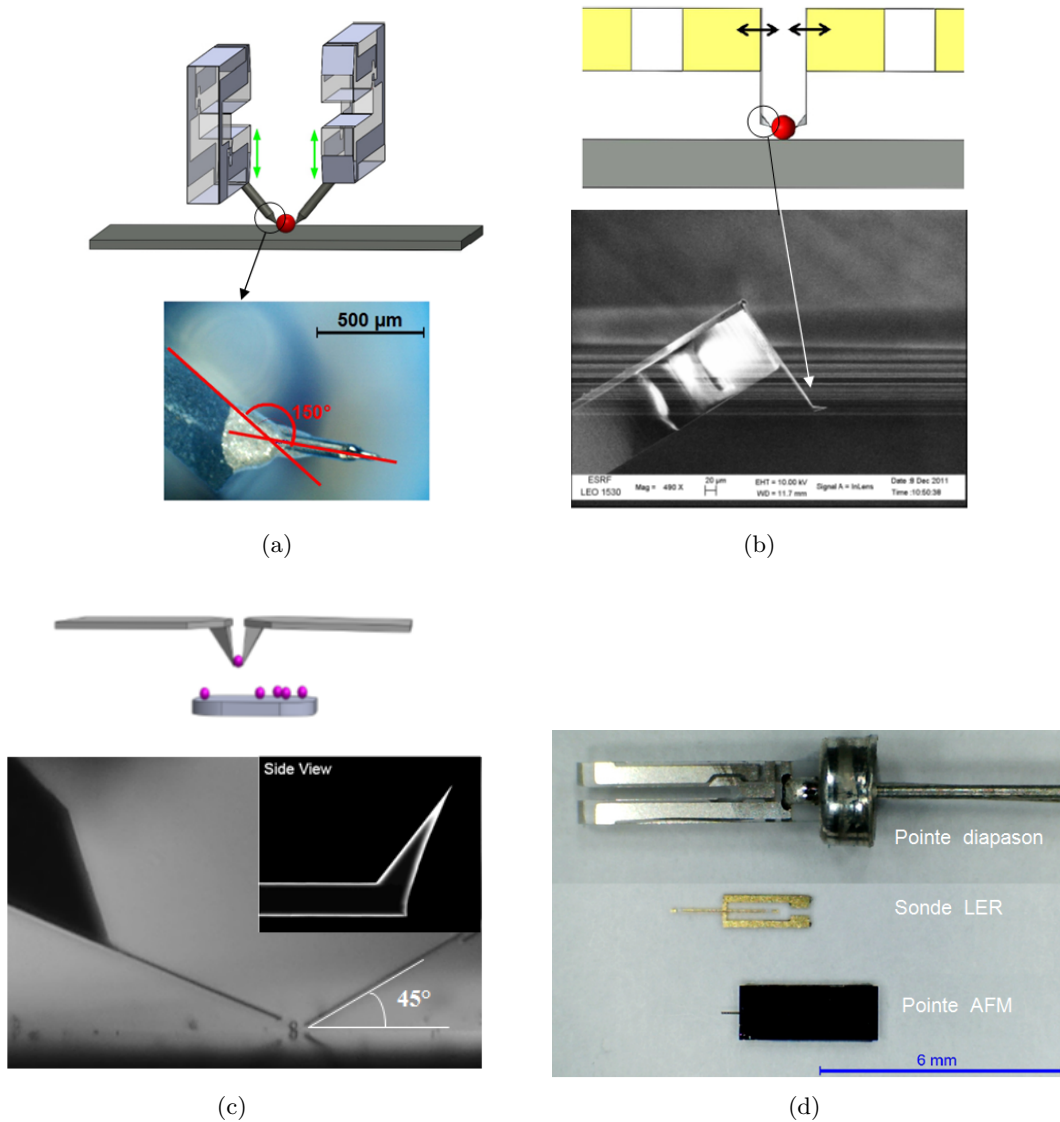


Figure II.13 – Configuration des différentes sondes locales utilisées dans le projet ANR PIANHO. (a) Pointe en tungstène collée sur un des bras du diapason à quartz, l’angle entre la pointe et le bras du diapason est proche de 150°. La pointe est collée sur le diapason de manière à ce que le mode de vibration du diapason soit parallèle à l’interaction avec la surface. (b) Image MEB du levier avec la pointe protubérante collée sur le LER. La direction de vibration des LER (flèches noires) est perpendiculaire à la surface. (c) Image en microscopie optique d’une pointe protubérante montée sur un porte-outil orienté à 45° par rapport au substrat. (d) Dimensions d’un diapason à quartz, d’un LER et d’un levier AFM classique avec connectique associée.

3.1.2 Choix de la structure cinématique

L’examen des caractéristiques des différentes opérations de micromanipulation sous rayon X montre une forte disparité dans les exigences de chaque tâche microrobotique. Les contraintes que notre station

Tableau II.2 – Comparaison entre les différentes sondes locales..

	Levier AFM	Oscillateur à quartz	LER
Fréquence	$30\text{kHz} < f < 400\text{kHz}$	33kHz	1MHz
Facteur Q	$50 < Q < 1000$	$1000 < Q < 15000$	$1000 < Q < 15000$
Raideur	$0.01\text{N/m} < k < 100\text{N/m}$	$5\text{kN/m} < k < 200\text{kN/m}$	$500\text{kN/m} < k < 1000\text{kN/m}$
Longueur	$\sim \text{qques } 100^2 \mu\text{m}$	$\sim \text{qques } 10^2 \text{ mm}$	$\sim \text{qques mm}$
Détection force	piézorésistif, optique piézoélectrique	piézoélectrique	piézoélectrique

de micromanipulation doit surmonter sont diverses : couplage avec une ligne de lumière synchrotron restreignant drastiquement l'espace disponible ; travail dans divers types d'environnements (air, liquide, gaz) ; nécessité d'un contrôle de la force de préhension sur chacune des sondes de préhension. De plus, compte tenu des stratégies de saisie et de dépose mises en place par adhésion (Fig. II.10) ou par préhension deux doigts (Fig. II.11), les actionneurs doivent garantir une large gamme de déplacements, allant du centimètre au nanomètre. La solution choisie utilise des actionneurs de nature différentes montés en série. Deux cinématiques sont proposées par les Figures II.14 et II.15.

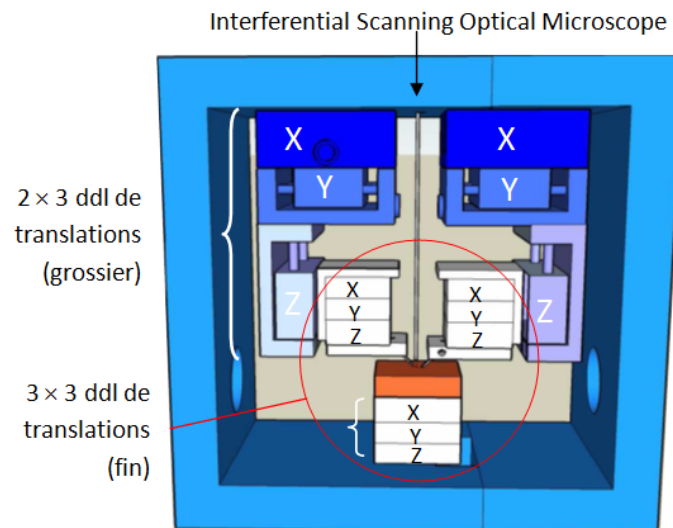


Figure II.14 – Image CAO d'une configuration cinématique du dispositif expérimental pour une manipulation avec des pointes protubérantes montées sur un LER.

Dans chacun des cas, deux micromanipulateurs à 6 degrés de liberté sont proposés. Il sont composés d'un assemblage sériel de :

- trois micro-translateurs magnétiques à trois ddl (x, y, z) ;
- un nano-translateur piézoélectrique à trois ddl (x, y, z) ;

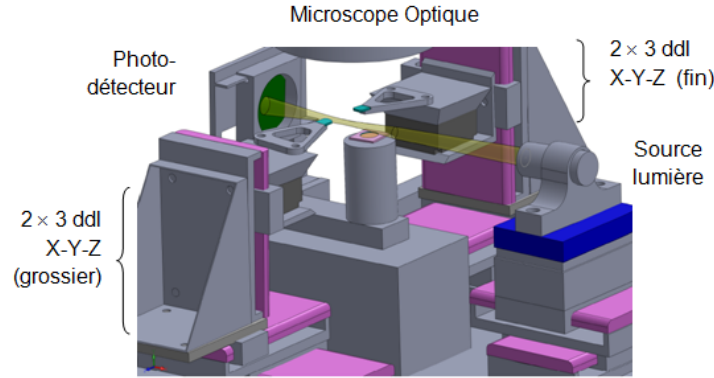


Figure II.15 – Image CAO d’une configuration cinématique du dispositif expérimental pour une manipulation avec des pointes AFM avec capteur de force intégré.

Les micro-translateurs permettent de larges déplacements pour l’échelle considérée dans tout l’espace de travail. Il s’agit d’actionneurs magnétiques dotés d’une course de 150mm pour une résolution de 15 nm et disposés en série de manière à permettre un déplacement cartésien dans le plan absolu R_0 . Le nano-translateur est placé en série avec l’axe de translation vertical du micro-translateur. Une platine de translation piézoélectrique permet un positionnement dans les trois directions de l’espace (x, y, z) avec une résolution de 1 nm, sur une course limitée de 100 μm . Les deux sondes locales peuvent ainsi évoluer dans un espace de travail étendu, avec une bonne précision locale et une grande dynamique. La dynamique nécessaire pour le suivi du faisceau lumineux requiert une bande passante de plusieurs centaines de Hz. Les dynamiques des actionneurs magnétiques et piézoélectrique étant différentes cela nous impose une architecture de commande "micro-nano" adaptée. La cinématique de l’alignement du faisceau lumineux avec l’objet requiert plusieurs degrés de liberté dans le réglage de la source lumineuse par rapport au repère de la platine de support R_s .

Dans les deux configurations cinématiques proposées (Fig. II.14 et II.15), on peut commander le système de manière totalement découplée en alignant les axes de translation avec les axes du repère R_p lié au micro-préhenseur. La différence essentielle entre les deux structures réside dans le type de préhenseur utilisé : pointes protubérantes montées sur un LER ou pointes AFM avec capteur de force intégré. Dans la première version de la plateforme (Fig. II.14), la configuration cinématique de la tâche de préhension impose d’avoir les pointes perpendiculaires au substrat. L’utilisation des résonateurs piézoélectriques de type LER conduit à ce que la direction de vibration soit parallèle à la direction dans laquelle l’interaction est régulée imposant de ce fait des contraintes fortes en termes d’encombrement des actionneurs. Pour cela, une configuration où les micro/nanomanipulateurs à 6 ddl sont suspendus (fixés) sur la partie supérieure du bâti est choisie pour augmenter la zone atteignable de l’espace de travail. Cependant l’intégration d’un microscope optique classique pose un problème

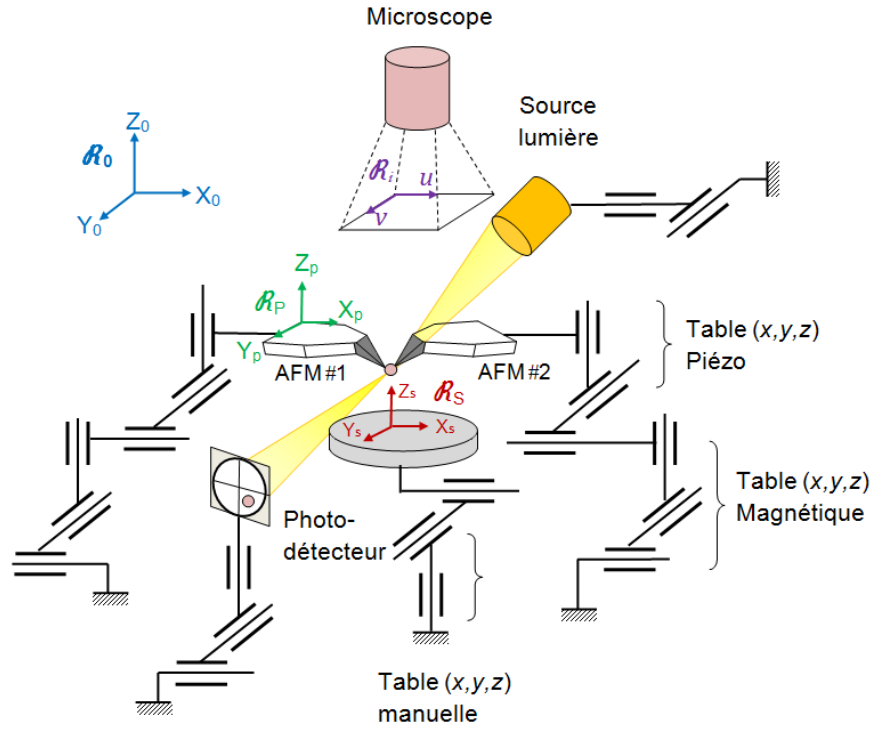


Figure II.16 – Configuration cinématique choisie du dispositif expérimental.

d'encombrement compte tenu de la configuration restreinte de la zone de travail. De ce fait, l'intégration d'un microscope optique à fibre haute-résolution de type Interference Scanning Optical Microscope (ISOM) est préconisé afin d'obtenir une vue très proche de l'espace de travail (résolution de 200 nm). Ce choix de cinématique a été choisi par les partenaires du projet PIANHO pour être développée au sein du Surface Science Laboratory de l'ESRF et de l'Institut Néel.

Dans la seconde configuration de la plateforme (Fig. II.15), l'utilisation de sondes AFM intégrant des micro-capteurs piézorésistifs de force nous permet d'avoir une structure beaucoup plus classique comme celle développée par l'équipe de l'ISIR de l'Université Pierre et Marie Curie [16]. Les micro/nanomanipulateurs sont fixés au bâti inférieur pour limiter les vibrations mécaniques, conserver un espace atteignable allant jusqu'à 250mm pour une résolution de 1nm et disposer d'un champ de vue adaptable suivant la tâche robotique. Ce choix cinématique a été choisi par le laboratoire PRISME comme *plateforme de prototypage*. Une fois les algorithmes d'alignement et d'asservissement du micro-objet sous faisceau de lumière validés, ceux-ci seront portés sur la plateforme finale choisie par le Surface Science Laboratory de l'ESRF en vue de leur implémentation sur le faisceau de lumière.

3.2 Développement de la Plateforme de Prototypage

La structure cinématique choisie répondant aux contraintes décrites précédemment est composée de deux micromanipulateurs à double-étage, deux porte-outils fixes, d'un porte-échantillon mobile, d'une

Tableau II.3 – Synthèse des besoins robotisés pour les tâches de micromanipulation

Eléments de la plateforme		Besoins robotisés
Porte-outil	Outil fixe	1 ddl (θ_x) manuel
	Outil mobile	-
Porte-échantillon		3 ddl (x,y,z)
Porte-détecteur	Détecteur fixe	3 ddl (x,y,z) manuel
	Détecteur mobile	-
Porte-source		2 ddl (x,y)
Micromanipulateur		2×3 ddl (x,y,z) grossier
		2×3 ddl (x,y,z) fin
Détecteur lumineux		Photodétecteur 2D
Source lumineuse		Diode Laser

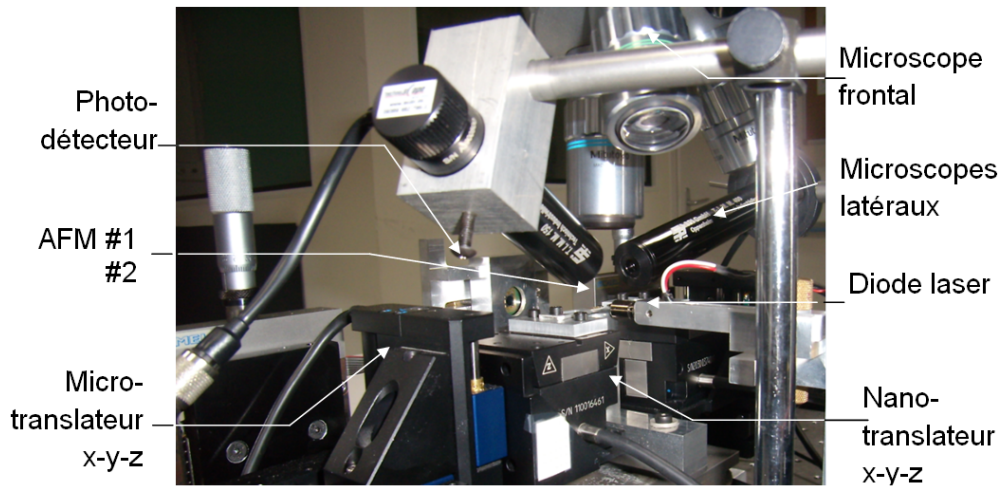
source lumineuse et d'un détecteur de lumière mobile. La configuration cinématique de la plateforme microrobotique expérimentale est représentée à la Fig. II.16. Les micromanipulateurs sont composés de trois étages de micro-translateurs magnétiques (x - y - z) avec leur contrôleur d'asservissement de position (M-111.1DG de Physics Instrumente) et d'un nano-translateur piézoélectrique (x - y - z) avec son contrôleur de position (P-611.3S NanoCube de Physics Instrumente). Le tableau II.4 résume les caractéristiques techniques principales des micro et nano-translateurs (voir l'annexe D).

Tableau II.4 – Caractéristiques des étages micro et nano-translateurs

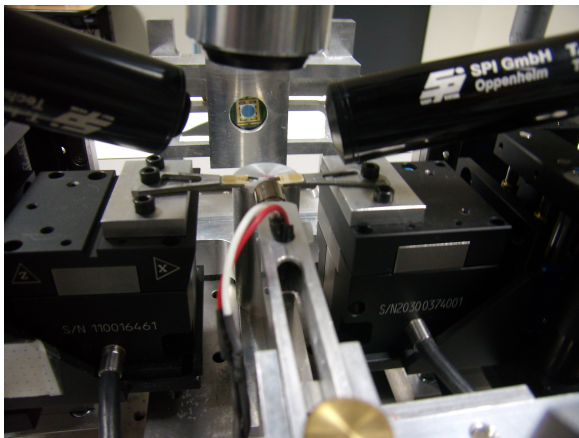
Étage	Course/axes	Résolution	Vitesse max.
Micro (M-111.1DG)	15 mm	50 nm	1.5mm/s
Nano (P-611.3S)	100 μ m	1 nm	–

La Figure II.17 illustre la plateforme de prototypage développé. Les micro-effecteurs utilisés sont des sondes utilisées par la technologie des microscopes à force atomique. Deux géométries de micro-poutres AFM sont utilisées : une poutre avec pointe protubérante en platine iridié sans capteur de force (AdvancedTEC AFM Probe de chez Nanosensors), et une poutre piézorésistive en silicium monocristallin avec une pointe parallélépipède rectangle, biseauté à son extrémité libre (self-sensing micro-cantilever PRC-400 de chez Kleindiek Nanotechnik, GmbH, Allemagne), d'une longueur de 400 μ m. Le signal de mesure issu du capteur de force alimente un pont de mesure de type Wheatstone externe et est ensuite amplifié au travers de son électronique de conditionnement. La Figure II.18 présente une vue détaillée de la poutre piézorésistive et de son circuit de mesure.

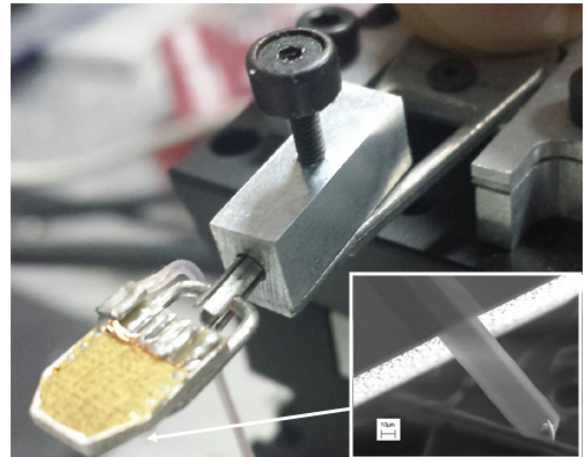
L'accès à une source de lumière à rayons X étant réglementé au niveau de son utilisation, nous avons choisi d'utiliser un faisceau laser émis par une diode laser rouge. Les caractéristiques sont les suivantes : longueur d'onde 830 nm ; objectif avec une longueur de focale de 45mm ; section du faisceau à la focale de l'ordre de 6.2 μ m ; puissance du laser de 50mW. Afin de simuler les instabilités de faisceau



(a)



(b)



(c)

Figure II.17 – (a) Architecture matérielle de la plateforme. (b) Vue du détecteur photoélectrique et de la source lumineuse (diode laser). (c) Vue locale d'une pointe AFM avec microcapteur de force intégré.

liées à la présence de dérives (effets thermiques, réglage des Benders), mouvements stochastiques du faisceau et/ou vibrations mécaniques (sol, pompes, mouvements robot porte-échantillon), la diode laser est montée sur un support motorisé qui permet de déplacer le laser à une vitesse de l'ordre de $25\mu m/s$ avec une bande passante de 300 Hz. Un photodétecteur bidimensionnel composé de 4 cellules photovoltaïques (cellule 4-quadrants) de rayon 4 mm est utilisé pour mesurer la quantité de photons réfractés par l'échantillon sous test. L'intensité lumineuse du faisceau laser recueilli par le photodétecteur est ensuite converti en une tension proportionnelle à la position du faisceau en 2D. Ce signal sera ensuite utilisé pour réaliser l'asservissement de la position du micro-objet par rapport à la focale du faisceau laser. La visualisation de la scène est réalisée à partir de plusieurs microscopes optiques. Un microscope

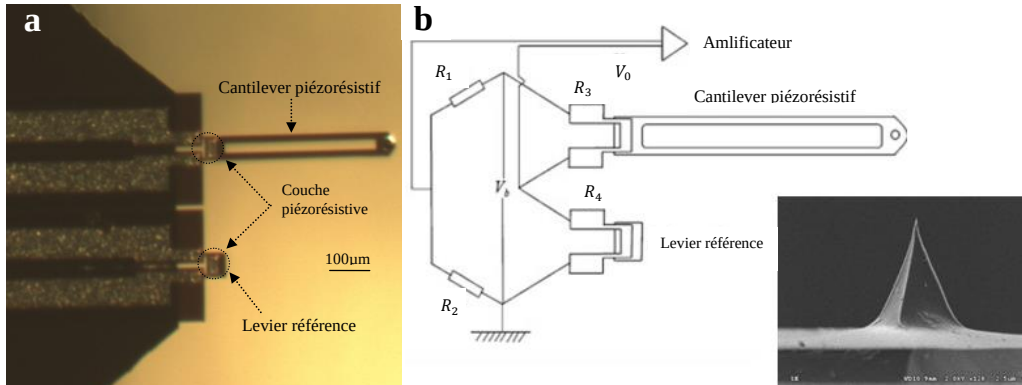


Figure II.18 – (a) Préhenseur constitué d'une micro-poutre piézorésistive associé à un (b) pont de Wheatstone de type push-pull.

Tableau II.5 – Spécifications constructeurs des sondes AFM avec microcapteur de force piezorésistif de type FMT400

	Résolution force	Force max.	Dimension ($l \times w \times h$)	Hauteur apex	Rayon apex
FMT 400	1 mN	80 μ N	$400 \times 50 \times 5 \mu\text{m}^3$	$> 5 \mu\text{m}$	

frontal (microscope optique : Mituyo $\times 50$) permet d'obtenir une vue globale de l'objet, des préhenseurs ainsi que du faisceau laser. Deux autres microscopes optiques latéraux (microscope numérique : TIMM $\times 150$) permettent d'obtenir une vue locale de la zone de micromanipulation interagissant avec le faisceau laser (voir la Figure II.17). Ainsi les tâches de manipulation sont observables latéralement sans modifier les références des translateurs les uns par rapport aux autres. Ces vues latérales ne sont ajoutées que sur la plateforme de prototypage afin de pouvoir évaluer et valider les différentes approches proposées. En effet, ces vues ne sont pas disponibles sur la plateforme présentes à l'ESRF.

En synthèse, cette plateforme de prototypage répond au cahier des charges imposé pour la micromanipulation d'échantillons micrométriques sous faisceau de lumière, à savoir :

- une résolution nanométrique avec une course utile de déplacement de plusieurs centimètres contrôlé en boucle fermée dans le repère cartésien de l'objet ;
- un dispositif optique d'émission de lumière et de photodétection simulant les défauts d'alignement du faisceau avec une large dynamique fréquentielle ;
- un dispositif de micro-préhension à deux doigts avec retour de force.

3.3 Architecture Système

Une fois le choix de la structure de la plateforme de micromanipulation défini et développé, il convient de lui associer une architecture logicielle adéquate. L'architecture proposée est présentée sur la Figure II.19. Notamment, cette architecture est adaptée aussi bien à la plateforme microbotique de prototypage développée au sein du Laboratoire PRISME (voir les Figures II.15) qu'à celle disponible

à l'ESRF (cf. Figure II.14). Plus précisément, l'architecture repose sur une organisation hiérarchisée des différents modules.

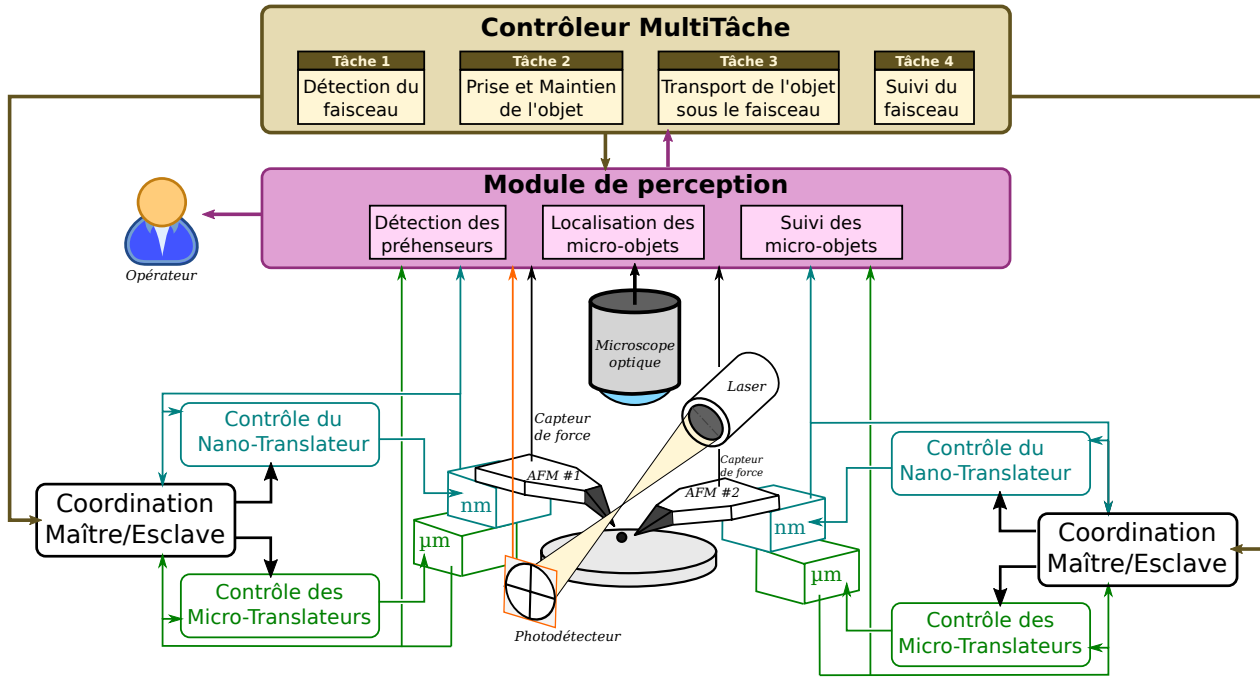


Figure II.19 – L'architecture fonctionnelle de la plateforme de prototypage.

3.3.1 Architecture Globale

Sur l'architecture hiérarchisée retenue et illustrée sur la Figure II.19 on peut ainsi distinguer :

- Une boucle bas-niveau qui assure le pilotage réactif des différents étages du micromanipulateur, à savoir les étages micro-translateurs et l'étage nano-translateur piézoélectrique. En effet, chaque étage présente ses spécificités propres. Notamment, le nano-translateur exploite des actionneurs piézoélectriques qui sont caractérisés par un cycle d'hystérésis induisant de fortes non-linéarités sur le positionnement des effecteurs. Pour compenser ces non-linéarités, un contrôleur robuste H_∞ a été développé. D'autre part, les éléments de l'étage micro-translateur sont actionnés par des moteurs à courant continu, et de ce fait un régulateur simple comme le proportionnel-intégral-dérivé (PID) peut convenir. Ces boucles sont alors régulées sur la base des informations capteurs de type codeur rotatif pour les micro-translateurs, et de jauge de contrainte pour le nano-translateur. Le détail de la synthèse de ces différents contrôleurs sera présentée dans le chapitre 3.
- Une boucle intermédiaire qui est introduite afin de coordonner les deux étages du micromanipulateur. Plus précisément, une organisation de type "maître/esclave" est définie entre l'ensemble micro-translateurs (partie maître) et la partie nano-translateur (partie esclave). Cette organisation permet ainsi à la partie micro-translateur d'assurer les grands déplacements avec une

résolution grossière de 15 nm, tandis que le nano-translateur garantira les mouvements plus fins avec une résolution de 1 nm.

- Une boucle de haut-niveau qui permet la supervision et l'organisation des différentes tâches. En effet, la plateforme de nanomanipulation doit pouvoir assurer les tâches de détection du faisceau, puis de prise et de transport de l'échantillon sous le point focal du faisceau. Ces diverses tâches requièrent différents types de contrôles tels que la commande en position pour la détection du faisceau, et la commande en force/position pour la prise et le transport de l'échantillon. Ainsi, le contrôleur multitâche va permettre d'adapter et de sélectionner la stratégie à mettre en œuvre au niveau de la boucle intermédiaire.

En outre, la structure cinématique de la plateforme de micromanipulation contrôlant les deux sondes #1 et #2 sont complètement symétriques, leurs contrôleurs seront implémentés de manière similaire. Les rétroactions provenant des boucles intermédiaire et de haut-niveau sont extraites à partir des différents capteurs de perception présents sur la plateforme robotique. À ce titre un module de perception a pour fonction de réceptionner les différentes mesures disponibles et de les traiter. Selon la tâche considérée, le module de perception communique ensuite les différentes données au contrôleur multitâche ainsi qu'à l'opérateur.

3.3.2 Architecture Logicielle

Le module d'ordonnancement multitâche a pour rôle de superviser les différentes tâches de micromanipulation considérées. Notamment, il doit pouvoir coordonner les actions réalisées par les deux porte-échantillons mobiles. En effet, il est nécessaire d'une part d'éviter les collisions entre les deux préhenseurs, et d'autre part, de pouvoir réaliser les opérations de prise et de transport des échantillons sous le faisceau. De ce fait, ce contrôleur multitâche doit pouvoir réagir rapidement afin de prévenir tout risque de dégradation des sondes AFM ou de l'échantillon. À cet effet, l'ensemble des modules de l'architecture ont été développés sur une station de travail dotée de deux processeurs Intel® Xeon 1.5Ghz. Les différents algorithmes de commande ont été implémentés sous Matlab (Mathworks, Natick, MA, USA) en exploitant les capacités temps-réel disponibles à travers le composant xPC Target (Simulink® Real-Time™). Grâce à ce développement temps-réel, la période d'échantillonnage du système est de 20ms. En outre, la structure bi-processeur de la station de travail est exploitée de manière à piloter les deux porte-échantillons simultanément. Plus précisément, les boucles de commande, de chaque ensemble de micromanipulation, sont exécutées séparément sur un seul processeur. Le module d'ordonnancement multitâche assure alors la coordination de l'ensemble de la plateforme de prototypage.

3.3.3 Le Module de Perception

Aux échelles microscopiques considérées, il est difficile de percevoir directement les objets et effecteurs utilisés, ou encore de voir le faisceau. Ainsi, 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 de micromanipulation qu'il pilote, de lui fournir dans les meilleures conditions ergonomiques et de précision possibles les informations sensorielles, principalement visuelles, de ce qui se passe dans le micromonde. Le module de perception a ainsi pour rôle de collecter toutes les mesures provenant des différents capteurs disponibles sur la plateforme de prototypage, puis de les transmettre au contrôleur multitâche (voir la figure II.19) et à l'opérateur. Les mesures disponibles sur la plateforme sont :

- les données de position des jauges de contraintes des nano-translateurs ;
- les données de positions des codeurs rotatifs des micro-translateurs ;
- les mesures de force issues des sondes AFM dotées d'une poutre piézorésistive en silicium monocristallin (self-sensing microcantilever PRC-400 de chez Bruker) ;
- les mesures du photodétecteur ;
- et les différentes images acquises à travers le microscope optique (Mituyo, $\times 50$).

D'autre part, pour pouvoir manipuler et placer un objet sous le faisceau de rayon X ou laser, il est nécessaire : (1) de connaître l'emplacement relatif des deux sondes ; (2) de savoir où se trouve l'objet à caractériser ; et (3) de déterminer le point focal du faisceau. Il nous faut ainsi développer des stratégies de perception spécifiques à notre plateforme de nanomanipulation à deux préhenseurs, avec des contraintes de précision et de temps de calcul. Pour cela, la plateforme de prototypage est dotée d'un microscope optique (Mituyo, $\times 50$) donnant une vue frontale de l'espace de travail, et de deux microscopes numériques (TIMM, $\times 400$ et $\times 150$) observant latéralement la scène constituée par les sondes AFM et le miro-objet à manipuler. La figure II.17(a) illustre ces moyens de perception, et la Figure II.20 montre un exemple de vues acquises par ces microscopes.

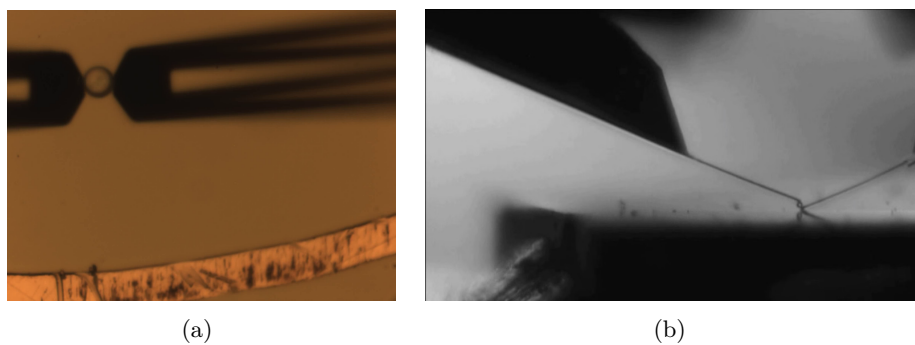


Figure II.20 – L'image (a) montre une vue du dessus obtenue avec le microscope optique, et (b) donne une vue latérale d'un microscope numérique.

Comme mentionné précédemment, la localisation du faisceau s'effectue par une procédure de "back tracking" qui sera décrite dans le Chapitre 5. Il nous reste à présenter ci-après les différents aspects permettant de percevoir et reconstruire les préhenseurs et les objets manipulés.

3.3.4 Traitement d'images

Positionnement des sondes AFM. Sujet à peu de modifications, les préhenseurs sont facilement identifiables et détectables au moyen des différents microscopes, comme l'illustre les figures II.20(a) et II.20(b). À ce titre, des techniques de traitement d'images classiques peuvent être employées pour les localiser efficacement dans les images fournies par les microscopes. Par exemple, des approches basées sur la détection de contour ou l'extraction de ligne à partir de la transformée de Hough peuvent être envisagées. Une procédure d'extraction de ligne a été plus particulièrement considérée, car elle permet également de déterminer l'orientation des sondes. Ces informations sont ensuite traduites à l'opérateur sous la forme d'annotations superposées à l'image.

Localisation des micro-objets. L'identification, la localisation et le suivi des micro-objets à manipuler dépendent de leur nature. En effet, différents objets peuvent être considérés, tels que des cellules, des microbilles métalliques, en polystyrène ou en verre. En outre, le choix de l'algorithme de localisation est guidé par les besoins de l'application. Dans le cas de notre dispositif de micromanipulation, la contrainte principale réside dans le recouvrement partiel (occultation) des micro-objets par l'effecteur durant certaines phases de manipulation.

Les méthodes classiques de localisation, généralement basées sur la segmentation, n'étant pas adaptées aux contraintes du système de micromanipulation, notre choix s'est orienté vers l'appariement de gabarits (template matching). Cette approche permet ainsi à la fois d'identifier l'objet sur la base du choix du gabarit, et aussi de connaître son positionnement dans l'image. Pour cela, cette technique consiste à comparer l'intensité des pixels entre le 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 [115, 116]. La mesure de corrélation repose classiquement sur un produit de corrélation croisé entre le motif de référence I_0 et la zone de l'image I à traiter. Dans [117], les auteurs ont proposé une étude comparative des mesures de similarité. De leurs études, il ressort que globalement 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. En particulier dans le cas de variations lumineuses, la mesure de corrélation permet de maintenir 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 aux autres mesures [118]. Pour toutes ces raisons, nous avons retenu la corrélation normalisée (NCC) pour la reconnaissance et la localisation des micro-objets.

Le temps de calcul de la mesure NCC étant proportionnel au carré de la taille du gabarit et de la taille de l'image à analyser ($(m \times n)^2$), il est difficile de localiser les micro-objets en temps réel (ici inférieur à < 50 Hz). Une solution pour obtenir des temps de calcul convenables est de réduire le

nombre de positions à tester, c'est-à-dire des zones de l'image à traiter. Pour cela, une solution consiste à exploiter les caractéristiques du micro-objet. Dans ce chapitre, nous nous limitons à des microbilles en polystyrène qui sont transparentes et possèdent une surface moyennement réfléchissante. Observé avec le microscope optique avec un éclairage approprié, il apparaît une tâche spéculaire à la surface des microbilles (cf. figure II.20(a)). Ces tâches spéculaires représentent une fréquence spatiale propre aux microbilles. Elles vont de ce fait nous permettre de les localiser grossièrement dans la scène, et ainsi limiter la fenêtre de recherche dans un voisinage très proche des positions effectives des microbilles.

4 Conclusion

Le chapitre 2 a présenté la conception d'une plateforme microrobotique de manipulation duale parfaitement adaptable aux contraintes de l'analyse d'échantillons sous rayons-X. Notre choix s'est orienté vers l'utilisation d'un microscope optique pour la perception de la scène, de deux microscopes latéraux pouvant être associés à l'imagerie AFM pour une résolution plus importante. Notamment, les sondes AFM avec capteur de force piézorésistif sont utilisées pour manipuler les échantillons avec une force de préhension contrôlée. Le déplacement des pointes AFM est assuré quant à lui par deux micromanipulateurs à double-étage de positionnement synchrones : un étage assurant les grands déplacements avec une résolution grossière, et un second étage de nanopositionnement piézoélectrique pour les mouvements fins. Il reste alors à définir au Chapitre 3 les différentes stratégies de commande des micromanipulateurs à double étage pour assurer l'asservissement de position des sondes AFM lors de tâches de préhension.

Chapitre III

Commande Robuste en Position d'un Micromanipulateur à Double-Etage

1 Introduction

Chaque micromanipulateur ayant la même structure d'actionnement, nous nous intéresserons dans ce chapitre à décrire les méthodologies d'asservissement et de contrôle d'un micromanipulateur à double-étage. Afin de contrôler les deux étages simultanément, une loi de commande coordonnant les déplacements et les vitesses des deux étages est nécessaire. Cette loi a comme tâche de contrôler les déplacements de l'étage longue-course (actionneurs magnétiques), et les erreurs résiduelles sont corrigées par l'étage de précision (actionneur piézoélectrique). Nous présentons dans ce chapitre les boucles de contrôle de la plateforme double-étage : une partie sera dédiée au contrôle simultané haut-niveau des deux étages à partir d'une structure de commande découplée, l'autre partie, à la synthèse des contrôleurs MIMO bas-niveau des actionneurs à partir de correcteurs robustes de type H_∞ . Enfin, une partie expérimentale permettra de valider la coordination des mouvements du micromanipulateur autour des axes de déplacement du micro-effecteur terminal.

2 Modélisation et Identification des Axes x,y,z du Micromanipulateur à Double-Etage

Nous décrivons dans ce paragraphe la modélisation et l'identification des fonctions de transfert discrètes et continues des étages magnétique et piézoélectrique du micromanipulateur à 6 ddl en vue de sa commande.

2.1 Micromanipulateur à double-étage

Chaque micromanipulateur élémentaire est composé de deux types d'actionneurs à 3 ddl pour former un système à double-étage de positionnement. Cette structure permet d'augmenter considérablement la course de déplacement du micro-effecteur à sonde AFM sur tout l'espace de manipulation

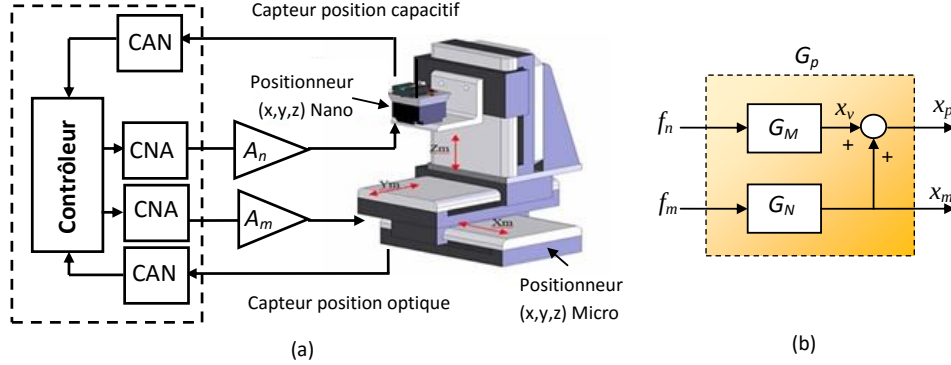


Figure III.1 – (a) Schéma de principe du contrôle en position du micromanipulateur double-étage à 6 ddl. (b) Schéma bloc du micromanipulateur. Les paramètres G_m et G_n représentent respectivement les fonctions de transfert dynamiques des micro-translateurs magnétiques et du nano-translateur piézoélectrique.

(plusieurs cm^2) tout en conservant une résolution de positionnement nanométrique. Comme le montre la Fig. III.1(a), les trois micro-translateurs magnétiques (M111.1 DG de Physik Instrumente) sont montés en série pour offrir un espace de déplacement important de $15 \times 15 \times 15 \text{ mm}^3$ dans les directions $(x-y-z)$. Sur sa plateforme repose un nano-translateur piézoélectrique (P-611.3S NanoCube de Physik Instrumente) à 3 ddl permettant une course utile de $100 \times 100 \times 100 \mu\text{m}^3$ dans les trois directions $(x-y-z)$ avec une résolution de 1 nm. Le système est muni de convertisseurs numérique/analogique (CNA) et analogique/numérique (CAN) permettant d'effectuer des conversions du domaine discret vers le domaine continu et vice-versa (carte NI 6289 de chez National instruments). Les signaux de commande sont envoyés aux actionneurs au travers des cartes d'amplification (A_m et A_n) et les positions sont mesurées à partir d'encodeurs optiques et des jauges de contrainte piézorésistives fournis par le constructeur. Par conséquent, en contrôlant de manière coopérative les deux étages micro et nano, des opérations de positionnement rapides et précises sur un espace de travail important sont rendues possibles. Bien que les deux étages de positionnement possèdent leurs propres capteurs de position, les imprécisions mécaniques de montage introduisent des erreurs de position qu'il faudra calibrer et compenser pour obtenir un positionnement submicronique dans le repère cartésien absolu. Un capteur externe de positionnement (photodiode à 4-quadrants) sera introduit dans les chapitre 4 et 5 pour améliorer le positionnement absolu du(des) micro-effecteur(s) de manipulation. L'objectif du contrôleur global est de gérer les mouvements 3D du micro-effecteur de manière dynamique avec une erreur de position la plus faible possible par rapport à la position désirée de l'outil.

Les fonctions $G_m(s)$ et $G_n(s)$ représentent les fonctions de transfert des micro- et nano-translateurs comme on peut le voir sur la Fig. III.1(b). Les paramètres de sortie x_p , x_v et x_m représentent respectivement la position absolue du micro-effecteur, la position absolue de la plateforme du micro-translateur magnétique et la position relative du nano-translateur piézoélectrique. On constate que x_p résulte de la somme $x_p = x_v + x_m$. Les termes f_m et f_n représentent les forces motrices délivrées par les actionneurs magnétiques et piézoélectriques.

2.2 Modélisation des fonctions de transfert G_m et G_n

En vue de synthétiser le correcteur du couple "actionneur+correcteur" pour chaque axe de déplacement, nous nous proposons de modéliser et d'identifier son comportement. Comme aucune information paramétrique n'est fournie par le constructeur, une phase d'identification est nécessaire afin d'établir les modèles dynamiques, en boucle ouverte, pour chaque micromanipulateur. Les systèmes constitués par les micro-translateurs magnétiques à 3ddl et le nano-translateur piézoélectrique à 3 ddl seront considérés comme deux systèmes MIMO à 3 entrées et 3 sorties. Afin de simplifier l'étude, nous considérons un modèle linéaire autour des points de fonctionnement du système. Le concept de modèle mathématique d'un processus est vital dans le domaine de l'automatique avancée. Afin d'identifier le couple "actionneur+correcteur" pour chaque degré de liberté du micromanipulateur, nous avons opté pour un modèle de représentation paramétrique. Le modèle linéaire proposé est caractérisé par un ensemble fini de coefficients des polynômes au dénominateur et au numérateur de la fonction de transfert. La forme classique du modèle est alors la suivante :

$$H(z) = \frac{b_0 z^m + b_1 z^{m-1} + \dots + b_{m-1} z + b_m}{a_0 z^n + a_1 z^{n-1} + \dots + a_{n-1} z + a_n} \quad (\text{III.1})$$

2.3 Identification

Le système à identifier est constitué d'un actionneur connecté à une carte d'acquisition suivant chaque axe (Fig. III.2). La méthode des moindres carrés simple a été retenue pour l'identification du système. Ce choix est motivé par la simplicité qu'elle offre et du fait que dans de nombreux cas pratiques cette méthode suffit à elle seule pour faire une identification satisfaisante. De plus, étant donné que d'une part on considère le modèle linéaire au voisinage du point de fonctionnement, et que d'autre part, le modèle identifié ne sera pas mis à jour en temps réel, l'utilisation de cette méthode d'identification est suffisante [119]. La technique des moindres carrés (voir l'Annexe A) se résume à déterminer un vecteur de paramètres ϑ minimisant le vecteur d'erreur entre la mesure et le modèle, soit :

$$\varepsilon(t_k) = y(t_k) - \phi(t_k)\vartheta = y_k - \phi_k\vartheta = \varepsilon_k. \quad (\text{III.2})$$

La fonction $J(\vartheta) : \mathbf{R}^p \rightarrow \mathbf{R}$ à minimiser est définie par :

$$J(\vartheta) = \|\varepsilon_k\|^2 = \varepsilon_k^T \varepsilon_k = (y_k - \phi_k\vartheta)^T (y_k - \phi_k\vartheta) \quad (\text{III.3})$$

Le vecteur de paramètres qui minimise le critère $J(\vartheta)$, noté $\widehat{\vartheta}_k$, est appelé vecteur de paramètres estimés. En supposant que la matrice d'observation φ_k est de rang plein p , le vecteur de paramètres estimé est unique et est donné par :

$$\widehat{\vartheta}_k = \left(\phi_k^T \phi_k \right)^{-1} \phi_k^T y_k \quad (\text{III.4})$$

Différents types de signaux peuvent être utilisés pour identifier le système donné à savoir un signal carré, triangulaire ou encore sinusoïdal. Cependant, nous avons préféré un Signal Binaire Pseudo Aléatoire (SBPA) plus représentatif du système réel car il possède l'avantage d'avoir à lui seul plusieurs harmoniques d'excitation correspondant au spectre fréquentiel des signaux d'entrée (entre $0 < f < 3$ kHz).

2.4 Résultats Expérimentaux

Le système d'identification du processus est résumé par le montage présenté à la Fig. III.2 pour chaque degré de liberté du micromanipulateur. Dans le cadre de notre étude, les fonctions de transfert dans le domaine discret se réduisent donc à des fonctions de transfert du troisième ordre tant pour les micro-translateurs magnétiques (G_m) que pour le nano-translateur piézoélectrique (G_n) :

$$H_{m(x,y,z)}(z) = \frac{b_0 + b_1 z^1 + b_2 z^2 + b_3 z^3}{1 + a_1 z^1 + a_2 z^2 + a_3 z^3} \quad (\text{III.5})$$

$$H_{n(x,y,z)}(z) = \frac{b_1 z^1 + b_2 z^2 + b_3 z^3}{1 + a_1 z^1 + a_2 z^2 + a_3 z^3} \quad (\text{III.6})$$

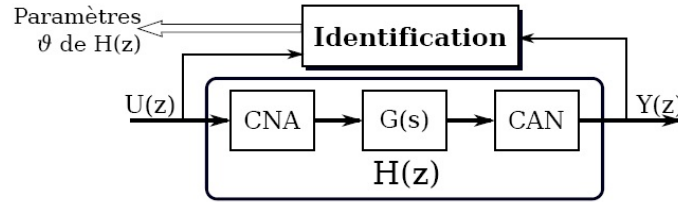


Figure III.2 – Système d'identification de la fonction de transfert pour chaque axe de l'étage micro (G_m) et de l'étage nano (G_n).

Ainsi, les paramètres fournis par l'identification sont définis par les paramètres a_i et b_j des fonctions de transfert. Les termes $U(z)$ et $Y(z)$ représentent les transformées en z de l'entrée du signal numérique (SBPA) et la sortie numérique du système. Le système est muni de convertisseurs numérique/analogique (CNA) et analogique/numérique (CAN) permettant d'effectuer des conversions du domaine discret vers le domaine continu et vice-versa. Les fonctions $G_m(s)$ et $G_n(s)$ représentent les fonctions de transfert des micro- et nano-translateurs en continu.

Notons que l'identification des trois axes des micro-translateurs magnétiques a été faite en boucle fermée. Chaque axe est composé du micro-translateur M111.1 DG et d'un régulateur PID dont les paramètres sont choisis par l'utilisateur. La carte d'alimentation fournie par le constructeur ne permettant pas d'avoir accès directement à la fonction de transfert en boucle ouverte, la fonction de transfert $G_{m(x,y,z)}(z)$ a été identifiée à partir de la connaissance des paramètres du contrôleur PID. L'identification de la fonction de transfert du nano-translateur piézoélectrique $G_{n(x,y,z)}(z)$ a été réalisée quant à elle directement en boucle ouverte sans son contrôleur à partir de sa carte d'interfa.

L'identification a été effectuée pour plusieurs points de fonctionnement avec des incréments successifs de $10\mu\text{m}$ pour une étendue de mesure comprise entre $0\mu\text{m}$ et $60\mu\text{m}$. Les fréquences de fonctionnement sont inférieures aux fréquences de resonance du système ($f_{x0} = 350\text{ Hz}$; $f_{y0} = 220\text{ Hz}$; $f_{z0} = 250\text{ Hz}$). La moyenne de l'ensemble de ces paramètres (pour une plage spécifique) a permis l'identification des modèles définis pour les axes x , y et z respectivement. Les paramètres identifiés sont reportés dans le Tableau III.1. Les fonctions de transfert discrètes sont données par :

$$\begin{cases} H_{m(x)}(z) = \frac{0.9755 + 0.4769z^1 - 0.3779z^2 - 0.168z^3}{1 + 0.4336z^1 - 0.36z^2 - 0.162z^3} \\ H_{m(y)}(z) = \frac{0.9755 + 0.48z^1 - 0.3559z^2 - 0.201z^3}{1 + 0.4363z^1 - 0.3599z^2 - 0.158z^3} \\ H_{m(z)}(z) = \frac{0.9755 + 0.46z^1 - 0.389z^2 - 0.389z^3}{1 + 0.4335z^1 - 0.36z^2 - 0.171z^3} \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

pour chaque micro-translateur magnétique, et par

$$\begin{cases} H_{n(x)}(z) = \frac{0.00535z^1 + 0.0271z^2 + 0.0507z^3}{1 - 0.00557z^1 + 0.0196z^2 - 0.93z^3} \\ H_{n(y)}(z) = \frac{0.003z^1 + 0.00741z^2 + 0.0117z^3}{1 - 0.00579z^1 + 0.025z^2 - 0.997z^3} \\ H_{n(z)}(z) = \frac{0.000556z^1 + 0.00535z^2 + 0.00761z^3}{1 - 0.000556z^1 + 0.0222z^2 - 0.999z^3} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

pour le nano-translateur piézoélectrique.

Tableau III.1 – Identification des paramètres des fonctions de transfert dans le domaine discret des micro-translateurs (H_m) et du nano-translateur (H_n) pour chaque axe x , y , et z

Paramètres	H_{mx}	H_{my}	H_{mz}	H_{nx}	H_{ny}	H_{nz}
a_1	0.4336	0.4363	0.4335	-0.00557	-0.00579	-0.000556
a_2	-0.36	-0.3599	-0.36	0.0196	0.025	0.0222
a_3	-0.162	-0.158	-0.171	-0.93	-0.997	-0.99999
b_0	0.9755	0.9755	0.9755	0	0	0
b_1	0.4769	0.48	0.46	0.00535	0.003	0.000556
b_2	-0.3779	-0.3559	-0.389	0.0271	0.00741	0.00535
b_3	-0.168	-0.201	-0.156	0.0507	0.0117	0.00761

La dernière étape de la synthèse consiste à passer du domaine discret vers le domaine continu en utilisant une méthode d'approximation bilinéaire. La fonction `bilinear` sous Matlab a été utilisée pour interpoler les fonctions $G_{m(x,y,z)}$ et $G_{n(x,y,z)}$ avec des fonctions du 3^{ème} ordre au numérateur et

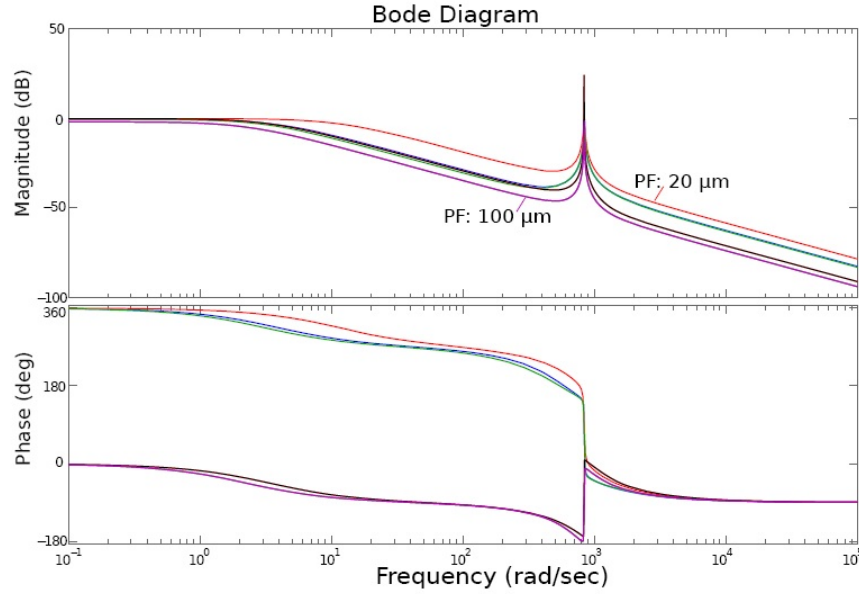


Figure III.3 – Réponse fréquentielle de l'axe x pour différents points de fonctionnement (PF) : 20, 40, 60, 80 et 100 μm .

au dénominateur (voir l'Annexe B).

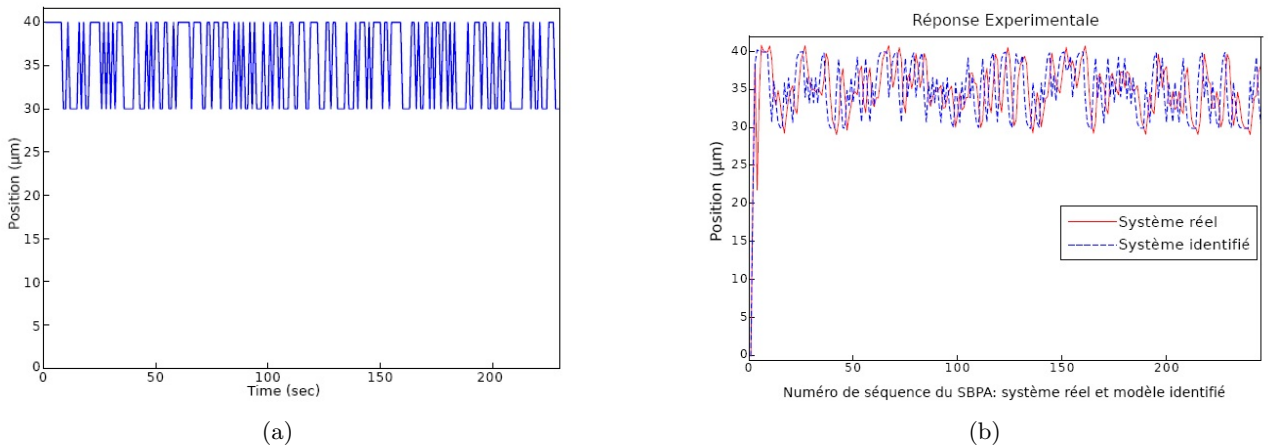


Figure III.4 – Résultats d'identification d'un nano-translateur piézoélectrique suivant l'axe x . (a) Signal d'entrée pour l'identification : signal binaire pseudo-aléatoire (SBPA) variant entre 30 μm et 40 μm . (b) Réponse expérimentale et réponse du modèle identifié.

La Fig. III.4 décrit les résultats expérimentaux d'identification obtenus sur le nano-translateur piézoélectrique en termes de réponse dynamique et modèle identifié lorsqu'un signal binaire pseudo-aléatoire est appliqué suivant l'axe x . L'analyse des zéros et des pôles de $G_x(s)$ montre que l'axe x du système identifié reste stable car les pôles sont tous à partie réelle négative alors que les zéros sont à partie réelle positive ce qui en fait un système à non minimum de phase. La Fig. III.5 décrit également

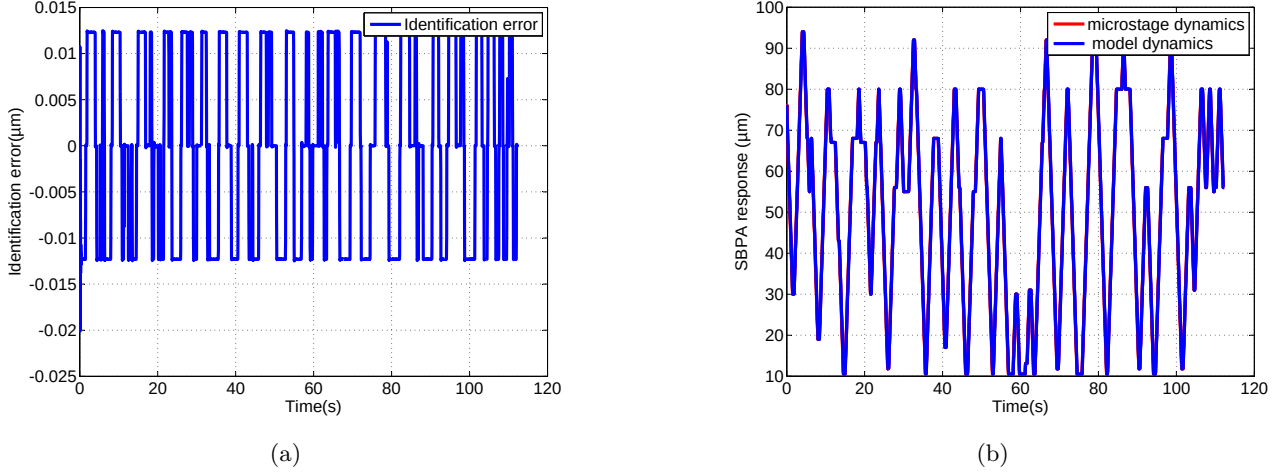


Figure III.5 – Résultats d'identification d'un micro-translateur magnétique suivant l'axe x . (a) Signal d'entrée pour l'identification : signal binaire pseudo-aléatoire (SBPA) variant entre 10 μm et 90 μm . (b) Réponse expérimentale et réponse du modèle identifié.

les résultats expérimentaux d'identification mais cette fois-ci obtenus sur le micro-translateur magnétique en termes de réponse dynamique et modèle identifié lorsqu'un signal binaire pseudo-aléatoire est appliqué suivant l'axe x . On constate la très bonne corrélation des résultats entre les modèles identifiés et les résultats expérimentaux.

Couplée avec un filtrage spatial, ce contrôleur a été également implémentée avec succès en microscopie à effet tunnel [120].

3 Choix du contrôleur à structure découplée pour le micromanipulateur à double-étage

3.1 Méthodologies de contrôle des systèmes à double-étage

Plusieurs méthodologies ont été développées dans la littérature pour réaliser une architecture de contrôle en boucle fermée de systèmes mécatroniques à double-étage. Ces architectures peuvent être répertoriées dans deux catégories : celles basées sur des architectures séquentielles ou découplées de type entrée-duale simple-sortie (DISO) où les contrôleurs sont synthétisés séparément, et celles basées sur des architectures multi-entrées multi-sorties (MIMO) plus complexes issues de l'automatique avancée.

Le système de contrôle à double-étage est par essence un système à plusieurs entrées et plusieurs sorties (MIMO pour *Multiple Input Multiple Output*) puisque le système mécatronique possède plusieurs degrés de liberté. Dans ce cas, il est possible d'utiliser des méthodologies de contrôle optimales telles que les commandes LQG, LQG/LTR, robustes telles que H_∞ , μ -synthèse, à modes glissants ou

encore à temps-fini. De manière générale, la structure de contrôle MIMO optimale est similaire à celle d'un contrôleur parallèle direct mais avec, en plus, des modèles externes liés aux perturbations, aux bruits de mesure, aux saturations des actionneurs, ou encore, avec des observateurs d'état en vue d'accéder à des variables d'état non mesurables. Divers contrôleurs à double-étage ont été développés pour des applications mécatroniques nécessitant un degré de robustesse important en utilisant des méthodes de type H_∞/H_2 [121], H_∞ loop-shaping [122] ou encore par H_∞ et μ -synthèse [123]. Ces contrôleurs sont appréciés pour leur robustesse vis-à-vis des nonlinéarités (hystérésis des actionneurs, creeping, drift) où encore des incertitudes de modélisation des actionneurs. Des contrôleurs robustes à modes glissants [124] ont été également implémentés avec succès pour pallier ces nonlinéarités en boucle-ouverte. Des techniques de commande optimale telles que la commande LQG combinant un filtre de Kalman et un asservissement optimal basé sur le principe de séparation ont été utilisés dans [125]. Les auteurs ont montré que l'utilisation du filtre de Kalman provoque une diminution du degré de robustesse de la commande optimale. Pour cela, une commande mixte LQG/LTR intégrant un filtre de Kalman amélioré est préférée [124]. Des contrôleurs non-linéaires ont également été développés à base de réseaux de neurones [126] ou encore à base d'approches non-linéaires composites [127].

Plusieurs spécifications sont à prendre en considération dans la synthèse du contrôleur à double-étage :

- Le problème considéré ici est de suivre les variations de position d'un faisceau de lumière illuminant l'objet à caractériser en contrôlant les 6 ddl du (ou des) micromanipulateur(s). Les caractéristiques de la ligne de lumière vont imposer des contraintes fortes sur la dynamique des micromanipulateurs lors de la poursuite en position du faisceau. Comme on peut le voir sur la Fig. II.8, on relève un écart-type de $\sigma = 0.5\mu\text{m}$ et une vitesse de $\langle v \rangle = 1.66\mu\text{m/s}$. Ce contrôleur de poursuite en position du faisceau sera développé en détail au Chapitre 4.
- De plus, les différentes dynamiques des actionneurs composant le(s) manipulateur(s) doivent être prises en considération. Le premier étage d'actionnement étant composé de micro-translateurs magnétiques, celui-ci va disposer d'une grande plage de déplacement ($15 \times 15 \times 15 \text{ mm}^3$) mais d'une faible bande passante (150 Hz pour chaque axe). Le deuxième étage d'actionnement quant à lui, va être constitué par un nano-translateur piézoélectrique à 3 ddl possédant une bande passante supérieure ($f_{x0}=350\text{Hz}$; $f_{y0}=220\text{Hz}$; $f_{z0}=250\text{Hz}$) mais limité en course utile ($100 \times 100 \times 100\mu\text{m}^3$).

Le double problème considéré ici est de savoir comment coordonner le système à double-étage pour suivre les mouvements dynamiques du faisceau laser tout en conservant une résolution en position nanométrique. Nous avons adopté une architecture de commande maître-esclave à structure découplée.

3.2 Contrôleur double-étage à structure découplée

Dans une structure maître-esclave traditionnelle [128], l'erreur de position absolue est envoyée à l'actionneur du 2^{ème} étage, et la sortie du 2^{ème} actionneur est renvoyée à l'actionneur du 1^{er} étage.

L'erreur de position étant compensée par la grande bande passante du 2^{ème} actionneur. L'actionneur longue-course va suivre l'actionneur du second étage afin d'éviter la saturation de la commande.

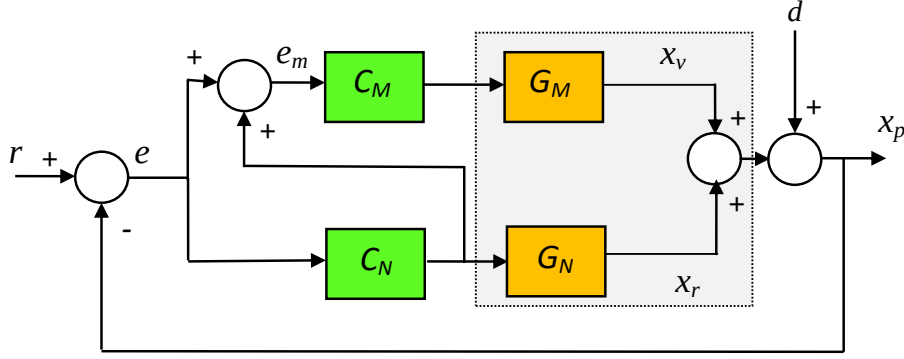


Figure III.6 – Contrôleur double-étage à structure découplée.

La structure du contrôleur double-étage à structure découplée est une structure similaire à la structure maître-esclave (Fig. III.6). Celle-ci utilise également la position relative de l'actionneur à course limitée mais cependant la valeur de la position relative x_r est inaccessible. La valeur de x_r peut être alors estimé en utilisant un modèle de l'actionneur à course-limitée. D'un point de vue structurel, le système de contrôle est découplé en deux boucles de contrôle indépendantes. La conception d'un contrôleur double étage revient donc à un problème de synthèse de deux contrôleurs indépendants. Afin de définir les performances en boucle fermée, on utilise une fonction de sensibilité S globale qui résulte du produit des fonctions de sensibilité relatives au micro-translateur (grande course) et du nano-translateur (course limitée). Dans le schéma bloc de la Fig. III.7 x_r est la position relative de l'étage grande-course, r la consigne et e l'erreur relative au double-étage. La commande découplée utilise les signaux e et x_r pour générer l'erreur relative entre les deux étages :

$$e + e_m = r - x_p \quad (\text{III.9})$$

La fonction de transfert totale G_T en boucle ouverte de r à x_p s'écrit :

$$G_T = K_M G_M + K_N G_N + K_M G_M K_N G_M \quad (\text{III.10})$$

Horowitz *et al.* [126] ont montré que la fonction de sensibilité S_T de r à e est égale au produit de la fonction de sensibilité S_M en boucle fermée de l'étage à longue course (micro-translateur) et la fonction de sensibilité S_N en boucle fermée de l'étage à course limitée (nano-translateur).

$$S_T = \frac{1}{1 + G_T} = S_M \cdot S_N \quad (\text{III.11})$$

où

$$S_M = \frac{1}{1 + K_M G_M} \quad \text{et} \quad S_N = \frac{1}{1 + K_N G_N} \quad (\text{III.12})$$

En résumé, la conception du contrôleur MIMO à double-étage consiste à combiner les performances de chaque étage définies par leur fonction de sensibilité propre : la boucle de contrôle du micro-translateur magnétique définie par sa sensibilité en boucle-fermée S_M et celle du nano-translateur piézoélectrique définie par sa sensibilité en boucle-fermée S_N . La Fig. III.8 illustre l'augmentation de la bande passante du système à double-étage au travers de la composition des sensibilités respectives des actionneurs magnétique S_M et piézoélectrique S_N . La synthèse se décompose en trois étapes :

1. Premièrement, le contrôleur du micro-translateur est conçu de telle manière à atteindre la sensibilité S_M de l'actionneur en boucle-fermée. Pour ce type d'actionneur magnétique, la bande passante en boucle fermée du contrôleur est limitée à ω_{MC} compte tenu de l'apparition d'un 1^{er} mode de résonance à faible fréquence (~ 200 Hz).
2. Deuxièmement, le contrôleur du nano-translateur est conçu de telle manière à fournir un gain d'amplitude additionnel, A_s , capable d'atteindre une sensibilité S_N . La bande passante en boucle-fermée du contrôleur de l'actionneur piézoélectrique étant limitée à 500 Hz. La pulsation ω_{NC} est limitée par la fréquence d'échantillonnage de la carte d'alimentation du constructeur (20 kHz).
3. Finalement, la sensibilité S_T du double-étage est représentée par la dernière courbe de la Fig. III.8. Celle-ci résulte de la combinaison des sensibilités des deux étages micro-nano. On constate que le choix optimal de la sensibilité est réalisé pour la condition $\omega_{MC} \simeq \omega_{NR}$ pour une bande passante ω_{NC} fixée.

Ces différentes étapes de synthèse du contrôleur à double-étage, détermination de K_M et K_N , sont décrites dans les sections suivantes.

3.3 Sensibilité du micro-translateur magnétique en boucle-fermée

Le contrôleur K_M de la boucle du micro-translateur est conçu pour atteindre une sensibilité en boucle-fermée S_M désirée. Généralement sa bande passante est limitée par sa structure mécanique conduisant à des modes propres de résonance basse fréquence. La synthèse du contrôleur est réalisée à partir d'un contrôleur Proportionnel-Dérivé-Intégral (PID) fourni par le constructeur (Physics Instru-

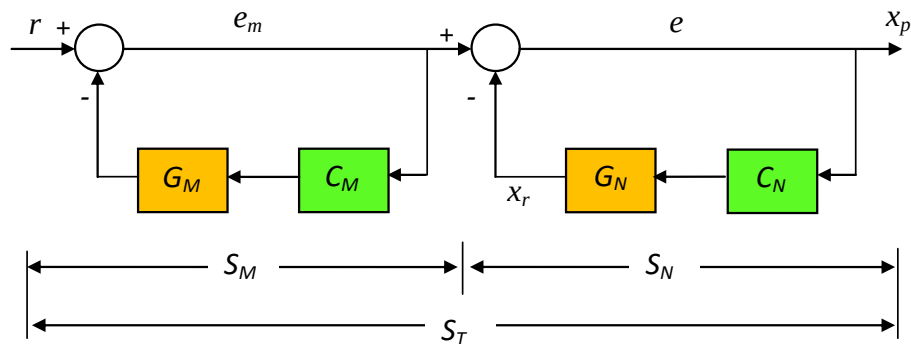


Figure III.7 – Diagramme en bloc de la sensibilité globale S_T .

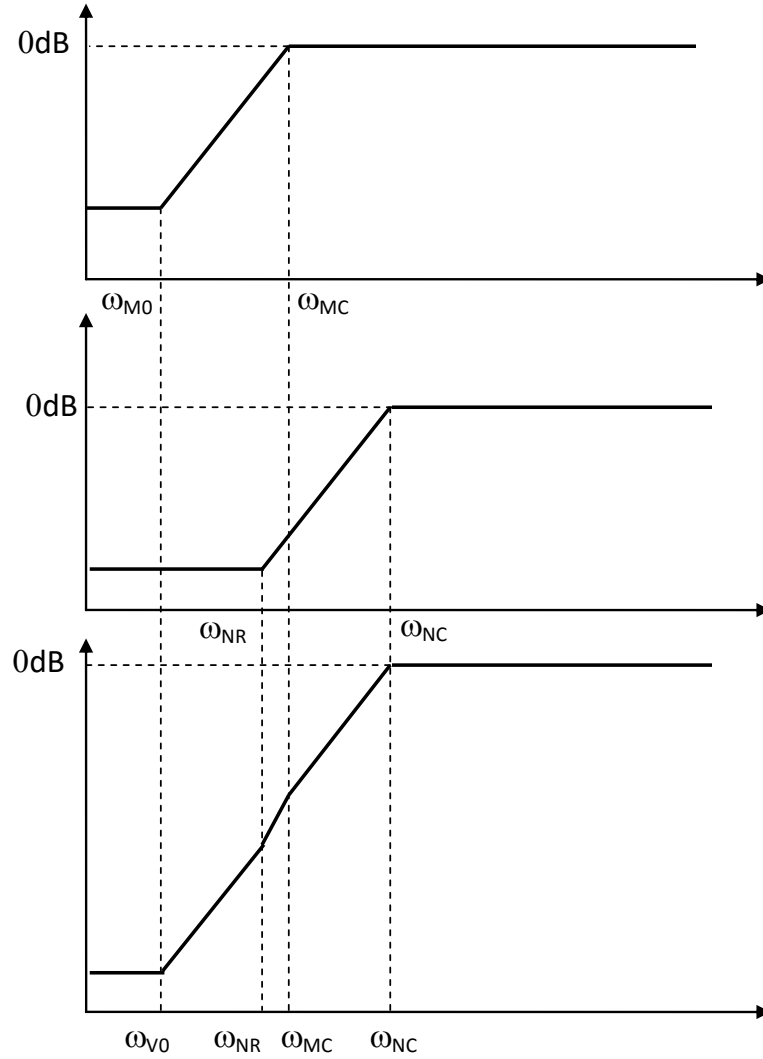


Figure III.8 – Illustration du transfert de sensibilité globale S_T .

ments) pour chaque axe de déplacement. Les trois axes motorisés étant indépendants l'un de l'autre, nous pouvons écrire :

$$K_M = \begin{pmatrix} K_{Mx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{My} & 0 \\ 0 & 0 & K_{Mz} \end{pmatrix} \quad (\text{III.13})$$

avec

$$K_{Mx} = K_{My} = K_{Mz} = K_p \frac{\tau_I s + 1}{\tau_I s} (\tau_D s + 1) \quad (\text{III.14})$$

Les paramètres du contrôleur sont réglés par l'utilisateur à $P = 140$; $I = 180$ et $D = 120$.

3.4 Sensibilité du nano-translateur piézoélectrique en boucle-fermée

Le contrôleur K_N doit être conçu de manière à compenser les nonlinéarités du nano-translateur piézoélectrique (hystérésis, dérive des caractéristiques nominales, bruit de mesure) ainsi que de la dépendance de sa dynamique vis-à-vis des mouvements du micro-translateur support. Le simple correcteur industriel PID fourni par le constructeur ne permet pas de satisfaire ces exigences. Pour cela, il devient primordial de synthétiser un correcteur robuste qui pourra dans une certaine limite assurer de bonnes performances en cas de variation des paramètres. De nombreux correcteurs robustes ont déjà été appliqués aux actionneurs piézoélectriques : régulateurs RST, commande par modes glissants [124], commande adaptative ou commande H_∞ [129]. Ces commandes permettent d'avoir un bon compromis performance-robustesse vis-à-vis de perturbations externes et d'incertitudes de modélisation. Parmi les correcteurs précités, la commande H_∞ semble la mieux adaptée au cas des systèmes MIMO [130], et en particulier le type H_∞ avec sensibilité mixte. Pour le cas considéré, nous savons que le nombre d'entrées est égal à 3 et que le nombre de sorties est aussi égal à 3 pour le correcteur H_∞ . Le correcteur H_∞ est décrit par une matrice de transfert de 9 fonctions de transfert, chaque fonction de transfert relie une entrée i à une sortie j .

$$K_N = \begin{pmatrix} K_x & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_y & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_z \end{pmatrix} \quad (\text{III.15})$$

Nous nous intéresserons dans la suite de l'étude qu'aux termes diagonaux de la matrice de commande, c'est-à-dire que l'on considérera le découplage parfait entre les axes x, y, z du nano-translateur piézoélectrique. La synthèse du correcteur H_∞ sera donc composée de 3 correcteurs K_x , K_y et K_z .

4 Synthèse du Contrôleur K_N de type H_∞ avec Sensibilité Mixte

4.1 Formulation standard

Le principe de la commande H_∞ est de spécifier des performances en boucle fermée grâce à des gabarits fréquentiels, placés à des endroits spécifiques dans la boucle de commande (suivant la fonction de sensibilité). La synthèse H_∞ est née de la recherche d'un outil qui, à partir des contraintes sur les fonctions de transfert en boucle fermée, recherche directement s'il existe un correcteur K_p tel que les fonctions en boucle fermée satisfassent les contraintes sur leur module. Le problème final doit être reformulé sous la forme d'un problème standard qui est présenté sur la Fig. III.9.

En considérant y comme les sorties mesurées et u les entrées contrôlées, l'objectif de cette formulation est d'étudier le transfert entre w (les entrées exogènes) et z (les sorties à contrôler). On appelle $P(s)$ le modèle augmenté car il contient le modèle, les poids ou pondérations W_i et les incertitudes

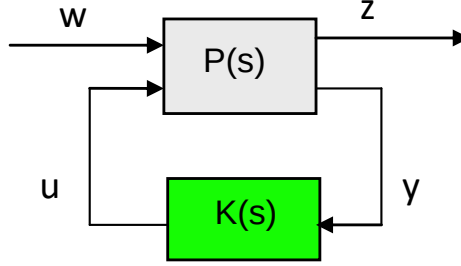


Figure III.9 – Problème standard.

s'il y en a. On cherche alors à déterminer le contrôleur $K(s)$ tel que :

$$\|T(s)\|_\infty \leq \gamma \quad (\text{III.16})$$

avec $T(s)$ la fonction de transfert en boucle fermée du système mis sous forme standard.

4.2 Synthèse de contrôleur H_∞ pondéré

La synthèse effectuée en utilisant ce critère, ne permet pas d'atteindre des performances acceptables, en suivi de consigne, rejet de perturbations et en robustesse vis-à-vis d'incertitudes du modèle. Pour contourner cet obstacle, généralement, dans le cadre de la synthèse H_∞ les fonctions de transfert sont pondérées par des filtres. Un contrôleur MIMO standard H_∞ est adopté ici afin de fournir des performances en robustesse vis-à-vis des incertitudes des modèles (erreurs de modélisation, saturation des actionneurs, signaux bruités de mesure, nonlinéarités : hystérésis, drift...). Il est important de souligner dans ce contexte que les fonctions de pondération peuvent être placées à différents endroits à l'intérieur du système augmenté, de manière à avoir une matrice de transfert pondérée entre les entrées exogènes $w(s)$ et les sorties $z(s)$ à minimiser.

4.2.1 Mise sous forme pondérée

Considérons à cette fin le schéma de la Fig. III.10, dans lequel l'erreur ε est pondérée par le filtre $W_1(s)$, la commande u par $W_2(s)$, et l'entrée de perturbation d est la sortie d'un filtre par $W_3(s)$. En se référant au problème représenté par le schéma ci-dessus, où r et d comme signaux d'entrées, e_1 et e_2 comme signaux à surveiller, on peut calculer la matrice de transfert du système interconnecté :

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} = M(s) \begin{pmatrix} R(s) \\ D(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_1(s)S(s) & W_1(s)S(s)G(s)W_3(s) \\ W_2(s)K(s)S(s) & W_2(s)T(s)W_3(s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r(s) \\ d(s) \end{pmatrix} \quad (\text{III.17})$$

Comme pour le cas sans pondérations, le problème H_∞ correspondant consiste à la détermination d'une valeur γ positive et d'un contrôleur $K(s)$ qui stabilise le système et qui soit capable de satisfaire

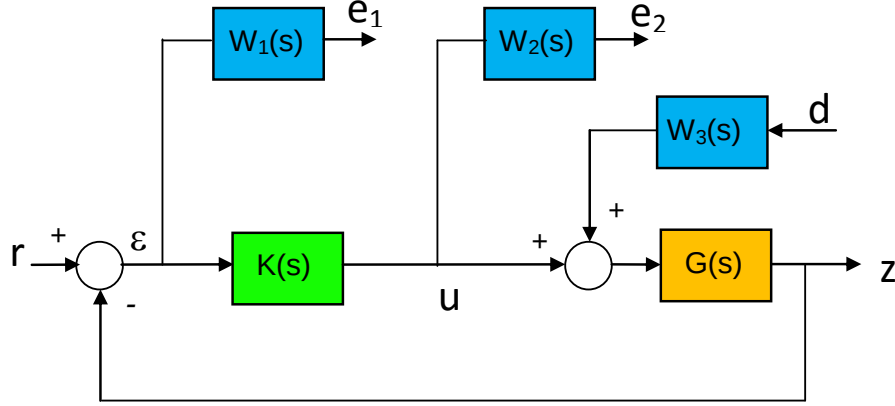


Figure III.10 – Mise en place des pondérations.

la condition suivante :

$$\left\| \begin{pmatrix} W_1(s)S(s) & W_1(s)S(s)G(s)W_3(s) \\ W_2(s)K(s)S(s) & W_2(s)T(s)W_3(s) \end{pmatrix} \right\|_{\infty} \leq \gamma \quad (\text{III.18})$$

Résoudre ce système permet de modeler plus facilement les fonctions de transfert $S(s)$, $K(s)S(s)$, $S(s)G(s)$ et $T(s)$. D'après les propriétés de la norme H_{∞} , l'équation (III.18) peut être décomposée dans ses parties élémentaires si les 4 conditions suivantes sont vérifiées :

$$\|W_1(s)S(s)\|_{\infty} < \gamma \Leftrightarrow \forall \omega \in \mathbb{R} \quad |S(j\omega)| < \frac{\gamma}{|W_1(j\omega)|} \leq \gamma \quad (\text{III.19})$$

$$\|W_2(s)K(s)S(s)\|_{\infty} < \gamma \Leftrightarrow \forall \omega \in \mathbb{R} \quad |K(j\omega)S(j\omega)| < \frac{\gamma}{|W_2(j\omega)|} \leq \gamma \quad (\text{III.20})$$

$$\|W_1(s)S(s)G(s)W_3(s)\|_{\infty} < \gamma \Leftrightarrow \forall \omega \in \mathbb{R} \quad |S(j\omega)G(j\omega)| < \frac{\gamma}{|W_1(j\omega)W_3(j\omega)|} \leq \gamma \quad (\text{III.21})$$

$$\|W_2(s)T(s)W_3(s)\|_{\infty} < \gamma \Leftrightarrow \forall \omega \in \mathbb{R} \quad |T(j\omega)| < \frac{\gamma}{|W_2(j\omega)W_3(j\omega)|} \leq \gamma \quad (\text{III.22})$$

On voit donc que la réponse fréquentielle de chacune des fonctions $S(s)$, $K(s)S(s)$, $S(s)G(s)$ et $T(s)$ est contrainte par un gabarit qui dépend des filtres choisis. Ces filtres $W_i(s)$ étant imposés par le cahier des charges, ils sont dans la plupart des cas soit des filtres passe-bas soit des filtres passe-haut.

4.2.2 Mise sous forme standard

Les filtres $W_1(s)$, $W_2(s)$ et $W_3(s)$ étant choisis, nous pouvons mettre le problème ainsi défini sous une forme standard, c'est-à-dire identifier les schémas-blocs des Fig. III.9 et Fig. III.10. La représen-

tation d'état pour chaque fonction de transfert de $G(s)$, $W_1(s)$, $W_2(s)$ et $W_3(s)$ sont données par :

$$G(s) : (\text{entrée } u - b, \text{sortie } z) : \begin{cases} \dot{x} = Ax + B(u - d) \\ y = Cx \end{cases} \quad (\text{III.23})$$

$$W_1(s) : (\text{entrée } \varepsilon, \text{sortie } e_1) : \begin{cases} \dot{x}_1 = A_1x_1 + B_1(r - y) \\ e_1 = C_1x_1 + D_1(r - y) \end{cases} \quad (\text{III.24})$$

$$W_2(s) : (\text{entrée } \varepsilon, \text{sortie } e_2) : \begin{cases} \dot{x}_2 = A_2x_2 + B_2u \\ e_2 = C_2x_2 + D_2u \end{cases} \quad (\text{III.25})$$

$$W_3(s) : (\text{entrée } d, \text{sortie } b) : \begin{cases} \dot{x}_3 = A_3x_3 + B_3d \\ b = C_3x_3 + D_3d \end{cases} \quad (\text{III.26})$$

Soit finalement :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & 0 & 0 & -BC_3 \\ -B_1C & A_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -BD_3 \\ B_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & B_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B \\ 0 \\ B_2 \\ 0 \end{pmatrix} u$$

$$\begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -DC_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ D_2 \end{pmatrix} u$$

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} -C & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \end{pmatrix} u \quad (\text{III.27})$$

Si les paires sont (A, B) commandable et (C, A) observable (ce que nous supposons par la suite), la partie non commandable par u du système (III.27) est constituée par le filtre W_3 , et la partie non observable par ε par les filtres W_1 et W_2 . Cette représentation sous forme standard sera utilisée par la suite pour effectuer l'implémentation matérielle du contrôleur sous forme discrète.

4.3 Problème de sensibilité mixte

Une des méthodes de pondération les plus connues est la méthode des sensibilités mixtes, appelée $S/KS/T$. Celle-ci est représentée par la Fig. III.11. Cette méthode permet de pondérer la sensibilité S , la sensibilité complémentaire T et la fonction de transfert KS , par les filtres de pondération W_1 , W_2 et W_3 .

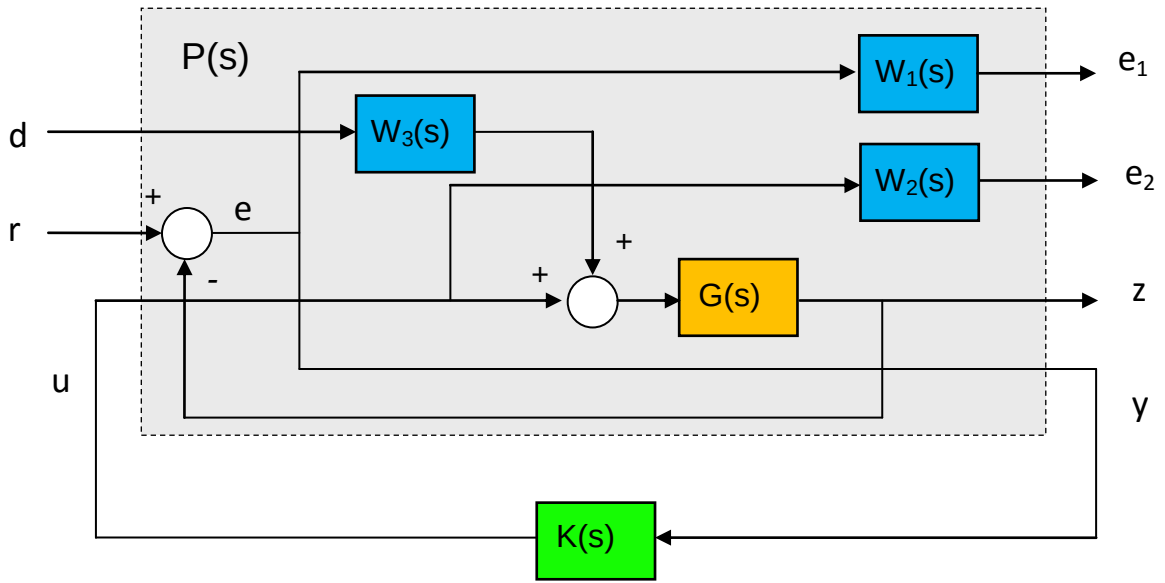


Figure III.11 – Forme standard de sensibilité mixte $S/KS/T$.

Le problème de sensibilité mixte consiste donc à trouver un compensateur $K(s)$ qui assure la stabilité interne de la boucle en minimisant le critère :

$$\|T(s)\|_{\infty} < \gamma \quad (\gamma \geq \gamma_0) \quad (\text{III.28})$$

où $T(s)$ représente la fonction de transfert en boucle fermée du système représenté par la Fig. III.11, donnée par :

$$\|T_{zw}\|_{\infty} = \left\| \begin{pmatrix} W_1 S & W_1 S G W_3 \\ W_2 K S & W_2 K S G W_3 \end{pmatrix} \right\|_{\infty} < \gamma \quad (\text{III.29})$$

$S = (\mathbb{I} + \mathbf{G}(s)\mathbf{K}(s))^{-1}$ est la fonction de sensibilité. Pour résoudre le problème standard H_{∞} , nous avons besoin du choix approprié des fonctions de pondération de la structure avec des paramètres optimaux qui reflètent les exigences de stabilité et de performances robustes.

4.4 Spécifications et choix des fonctions de pondérations

Une étape importante dans la synthèse du correcteur H_∞ réside dans la détermination des gabarits des fonctions de pondération qui permettent de définir des spécifications. A partir de la phase d'identification des fonctions de transfert, nous pouvons spécifier les performances de poursuite désirées en boucle fermée, la modération de la commande ainsi que le rejet des perturbations extérieures pour chaque axe de mouvement. Les fonctions de transfert du nano-translateur piézoélectrique $G_n(x,y,z)$ n'ayant pas la même dynamique sur chaque axe, nous introduisons systématiquement trois fonctions de pondération :

$$W_i = \text{diag}(w_{1i}, w_{2i}, w_{3i}) \quad , \quad \text{avec } i = x, y, z \quad (\text{III.30})$$

4.4.1 Choix de la pondération W_{1i}

Le choix de la fonction de pondération W_{1i} permet de fixer les performances de poursuite du système en boucle fermée de manière à minimiser l'effet des perturbations sur la position du nano-translateur ainsi que de l'erreur de poursuite ε représentant l'écart entre la grandeur de consigne r et z . Ce filtre impose les spécifications sur les performances désirées et sur la fonction de sensibilité en boucle fermée S . La forme classique utilisée est définie comme une fonction passe-bas donnée par :

$$W_{1i} = \frac{a_{1i}s + a_{2i}}{s + b_{1i}} \quad (\text{III.31})$$

Nous imposons un temps de réponse inférieur à $100ms$ pour les axes (x, y, z) ; une erreur statique inférieure à $10nm$; et finalement aucun dépassement de la consigne pour les trois axes.

4.4.2 Choix de la pondération W_{2i}

L'objectif de la modération de commande est de limiter les tensions d'entrée U_i à appliquer aux actionneurs piézoélectriques afin d'éviter de saturer les actionneurs et provoquer leur destruction. Nous nous imposons une tension maximale d'entrée $U_x^{\max}, U_y^{\max}, U_z^{\max}$ soit égale à $\pm 100V$ pour que l'échelle des déplacements du nanomanipulateur r_x, r_y, r_z atteigne les valeurs limites $\pm 100\mu m$. Le filtre W_{2i} est choisit généralement comme une constante :

$$w_{2i} = C_i \quad (\text{III.32})$$

Le gain peut être choisit comme étant égal à $w_{2i} = \frac{r_i^{\max}}{U_i^{\max}}$ afin de ne pas saturer les actionneurs.

4.4.3 Choix de la pondération W_{3i}

Cette fonction de pondération W_{3i} permet de rejeter les perturbations $d_i = (d_x, d_y, d_z)$ vis-à-vis des spécifications de performance voulues. Pour cela, on va imposer des limitations sur la fonction

complémentaire de sensibilité T qui est donnée par :

$$W_{3i} = \frac{p + a_{3i}}{b_{2i}p + b_{3i}} \quad (\text{III.33})$$

De plus, le temps de rejet de la perturbation maximal d_i a été fixé $< 100\text{ms}$ pour les trois axes (x, y, z) . Les perturbations maximales admises $d_i^{\max}$ correspondant à la sortie z_i ont été limitées à des valeurs $|r_i - z_i| < 10\mu\text{m}$ pour chaque axe.

Il est à noter que les inverses des fonctions de pondération W_{1i} et W_{3i} (appelé gabarits $\frac{1}{W_{1i}}$ et $\frac{1}{W_{3i}}$) traduisent les fonctions de sensibilité (S/KS/T) liées à la forme de la sensibilité désirée en boucle fermée $T(s)$ et l'inverse de la fonction de pondération W_{2i} (appelé gabarit $\frac{1}{W_{2i}}$) agit sur la limite du contrôleur $\mathbf{u}$. L'identification exacte des différents paramètres a_{1i} , a_{2i} , a_{3i} , b_{1i} , b_{2i} , b_{3i} et C_i est rendue difficile par des méthodes standards récursives compte tenu de la grande variabilité du micro-environnement, de la dépendance de la dynamique du micromanipulateur à double-étage pendant la poursuite du faisceau et des imperfections des actionneurs (dérives, hystérésis). L'intérêt d'utiliser des algorithmes génétiques pour l'optimisation des fonctions de pondération est justifié.

4.5 Optimisation des fonctions de pondération à l'aide des algorithmes génétiques

4.5.1 Principe de l'optimisation

L'application des algorithmes génétiques (AG) à la commande robuste H_∞ est introduite dans ce paragraphe. Plus particulièrement, les algorithmes génétiques (GA) [18] sont utilisés pour calculer les fonctions des paramètres de pondération à savoir : a_{1i} , a_{2i} , a_{3i} , b_{1i} , b_{2i} , b_{3i} et C_i , et d'aboutir à un contrôleur H_∞ optimal respectant le cahier des charges. L'approche consiste à générer une population de chromosomes représentant les paramètres à optimiser, et vérifier si cette dernière satisfait un indice de performance, appelé encore *fitness*. Les principales étapes sont les suivantes :

1. **Codage et initialisation** : La première étape dans la procédure d'un algorithme génétique est le codage des paramètres du problème afin de constituer les chromosomes X_k . Le type de codage utilisé dans notre algorithme est le codage binaire. Chaque paramètre est codé en binaire utilisant N_b bits. Tous les bits de ces paramètres sont cascades afin de former un chromosome binaire de longueur $N \times N_b$, où N représente le nombre de paramètres cibles considérés pour l'optimisation et N_b le nombre de bits nécessaire pour le codage binaire d'un paramètre. Une population de N_p chromosomes peut être représentée par :

$$X_k = [x_0^k x_1^k \dots x_j^k] \text{ , pour } 0 \leq k \leq N_p - 1, 0 \leq j \leq N - 1 \quad (\text{III.34})$$

Le paramètre x_j^k représente le j^{eme} paramètre codé du k^{ieme} chromosome. Chaque chromosome sera constitué par une chaîne de paramètres a_{1i} , a_{2i} , a_{3i} , b_{1i} , b_{2i} , b_{3i} et C_i issue des fonctions de pondération W_{1i} , W_{2i} et W_{3i} pour chaque axe $i \in (x, y, z)$ du nano-translateur piézoélectrique.

2. **Evaluation** : L'évaluation consiste à mesurer la performance de chaque individu de la population. On utilise pour cela une fonction directement liée à la fonction de sélectivité appelée fonction de *fitness*. La fonction de *fitness* rend compte de la pertinence des solutions potentielles à partir des grandeurs à optimiser. Dans le cas considéré, la fonction à optimiser est la norme H_∞ de la fonction de transfert T_{zw} :

$$f_i = \min(\|T(s)\|_\infty) \quad \text{avec} \quad \|T(s)\|_\infty \leq 1 \quad (\text{III.35})$$

Un individu ayant une grande valeur de *fitness* représente une bonne solution au problème, alors qu'un individu ayant une faible valeur de *fitness* représente une solution médiocre.

3. **Sélection** : La sélection dans les algorithmes génétiques joue le même rôle que la sélection naturelle. Elle suit le principe Darwinien sur la survie des individus les plus adaptés. Elle décide, en quelque sorte, quels sont ceux qui survivent et quels sont ceux qui disparaissent en se basant sur leurs fonctions *fitness*. Une population dite intermédiaire est alors formée par les individus sélectionnés. Nous utilisons la méthode d'élitisme pour sélectionner les meilleurs chromosomes dans la nouvelle génération pour la reproduction.
4. **Croisement** : Le croisement permet à un couple d'individus, parmi ceux qui sont sélectionnés, d'échanger leurs informations génétiques. Son principe est simple : deux individus sont pris au hasard et sont appelés parents, ensuite, on tire aléatoirement un nombre P dans l'intervalle $[0, 1]$ que l'on compare à une certaine probabilité de croisement P_c . Si cette probabilité est vérifiée ($P \leq P_c$), le croisement se produit et les chromosomes des parents sont croisés pour donner deux enfants qui remplaceront leurs parents dans la nouvelle génération. Nous utilisons un croisement uniforme.
5. **Mutation** : L'opérateur de mutation permet d'explorer de nouveaux points dans l'espace de recherche et il assure la possibilité de quitter les optimaux locaux. La mutation s'applique sur chaque gène de chaque individu avec une probabilité de mutation P_m en suivant le même principe que pour le croisement. Si $P \leq P_m$ la mutation se produit, et le gène sera remplacé par un autre gène tiré aléatoirement parmi les différentes valeurs possibles. Dans le cas du codage binaire que nous utilisons, cela revient tout simplement à remplacer un 0 par un 1 et vice-versa.
6. **Critère d'arrêt** : Comme dans tout algorithme itératif, il faut définir un critère d'arrêt. Le critère d'arrêt a pour but de nous assurer une bonne solution finale obtenue par l'algorithme génétique et associé à l'individu de meilleure qualité dans la dernière génération. Le critère d'arrêt peut prendre la forme suivante :
- Le nombre limite de générations autorisées a été atteint.
 - Une stabilité de la population a été atteinte (la population cesse d'évoluer ou n'évolue plus suffisamment) du point de vue de la fonction de *fitness*.
 - Le meilleur compromis.

Dans notre cas, il y a arrêt de l'algorithme lorsque le résultat atteint le critère de stabilité

$$|T(s)|_{\infty} \leq 1 \text{ à } 0.1\% \text{ près.}$$

4.5.2 Initialisation

Les algorithmes génétiques sont des procédures assez robustes pour résoudre le problème d'optimisation de la fonction de transfert T_{zw} selon la norme H_{∞} . Néanmoins, elles présentent certaines limites et difficultés. Ces difficultés reposent sur le choix des bons paramètres tels que : la taille de la population, le nombre de générations, l'espace de recherche de solutions, les probabilités de croisement et de mutation et les méthodes des opérateurs de reproduction. Nous avons observé que certains résultats obtenus sont mauvais lorsque la convergence tend vers un optimum local. L'origine de ce type de phénomène est causée par une mauvaise initialisation du domaine de recherche ou par un mauvais choix des paramètres. Les probabilités de croisement les plus couramment utilisées appartiennent à l'intervalle $[0.6; 0.95]$.

Dans notre cas, les spécifications des fonctions de pondération W_{1i} , W_{2i} et W_{3i} nous donnent d'ores et déjà des informations sur le problème. Il paraît bien évidemment naturel de générer les individus dans un sous-domaine particulier afin d'accélérer la convergence. Les sous-domaines nous sont directement renseignés par les équations (III.31) et (III.33) qui définissent respectivement un filtre passe-bas et un filtre passe-haut. Compte tenu du faible nombre de paramètres à optimiser (7 paramètres), une population de 20 individus nous est apparue suffisante. De plus, les paramètres d'optimisation vont être bornés par les intervalles suivantes :

$$\begin{aligned} x_{0,7,14}^k &\in [a_{1i}^{\min} ; a_{1i}^{\max}] = [0 ; 1] & ; & \quad x_{1,8,15}^k \in [a_{2i}^{\min} ; a_{2i}^{\max}] = [10 ; 100]; \\ x_{2,9,16}^k &\in [a_{3i}^{\min} ; a_{3i}^{\max}] = [0 ; 1] & ; & \quad x_{3,10,17}^k \in [b_{1i}^{\min} ; a_{1i}^{\max}] = [0.001 ; 0.01]; \\ x_{4,11,18}^k &\in [b_{2i}^{\min} ; b_{2i}^{\max}] = [0 ; 1] & ; & \quad x_{5,12,19}^k \in [b_{3i}^{\min} ; b_{3i}^{\max}] = [0 ; 1] \\ x_{6,13,20}^k &\in [C_i^{\min} ; C_i^{\max}] = [0.01 ; 1]; \end{aligned} \tag{III.36}$$

Les autres paramètres d'initialisation de l'algorithme sont résumés dans le Tableau III.2.

Afin d'illustrer le choix optimal des paramètres des filtres de pondération W_{1i} , W_{2i} et W_{3i} , nous présentons dans ce qui suit les résultats de simulation pour une optimisation suivant l'axe x du nano-translateur piézoélectrique (la même méthodologie sera alors adoptée pour les axes y et z). L'Algorithme III.2 présente la méthodologie suivie pour l'optimisation des fonctions de pondération afin d'aboutir à un contrôleur H_{∞} respectant le cahier des charges.

4.5.3 Détermination des paramètres optimaux des fonctions W_{1x} , W_{2x} et W_{3x} .

La Fig. III.12 donne une représentation tridimensionnelle de l'évolution de la fonction d'adaptation (*fitness*) en fonction du nombre d'individus composant la population ainsi que du nombre de générations impliqués dans la sélection. Pour une population donnée, nous observons que la fonction d'adaptation diminue au fur et à mesure que les générations progressent pour arriver à une forme

Algorithm 1 Algorithme de la fonction de *fitness* de l'algorithme génétique.

Initialisation des paramètres :

$a_{1i} \in [0 \ 1]$, $a_{2i} \in [10 \ 100]$, $a_{3i} \in [0 \ 1]$,

$b_{1i} \in [0.001 \ 0.01]$, $b_{2i} \in [0 \ 1]$, $b_{3i} \in [0 \ 1]$,

$\text{const}_i \in [0.01 \ 1]$

Nombre de paramètres et de générations $N = 21$ $G_n = 100$.

Nombre de bits et de chromosomes $N_b = 5$ $N_p = 7$.

Taille de la population $P_z = (N_p, N \cdot N_b)$.

Taux de croisement=0.75 et taux de mutation=0.3.

1) Génération aléatoire d'une population binaire initiale de paramètres de pondération.

repeat

2) Pour chaque génération répéter la boucle suivante :

2.1) **Codage** : Conversion d'une population binaire en une population décimale :

$$q(r) = [\max(r) - \min(r)] / 2^{N-1}, \quad 1 \leq r \leq N$$

2.2) **Evaluation** de la fonction d'évaluation individuelle pour tous les individus :

for $i \leftarrow 1, N_p$

do Calcul de la fonction objectif (*fitness*) $f_i = \min(\|T(s)\|_\infty)$ avec $\|T(s)\|_\infty \leq 1$

end for

2.3) **Sélection** : Application de la méthode d'élitisme pour sélectionner les meilleurs chromosomes dans la nouvelle génération pour la reproduction :

Calcul de la fonction *fitness* totale : $F = \sum_{i=1}^{N_p} f_i$.

Calcul de la fonction *fitness* moyenne : $F_m = \frac{F}{N_p}$.

Pour chaque chromosome, calculer :

for $j \leftarrow 1, N_p$

do $e_j = \frac{f_j}{F_m}$ (ou f_i =tableau des fonctions *fitness* des chromosomes)

end for

2.4) **Reproduction** : Création de nouveaux individus à partir d'opérateurs de croisement et de mutation pour obtenir de nouveaux chromosomes.

2.5) Remplacement de la population avec les nouveaux individus.

until Dernière génération

3) Représentation graphique des valeurs singulières de $T(s)$

4) Vérification des robustesses en stabilité et en performance

5) A partir des fonctions de pondération optimales faire :

5.1) **Synthèse** du contrôleur K_N à partir des équations de Riccati.

5.2) **Réduction** de l'ordre du contrôleur par la méthode des valeurs singulières.

Tableau III.2 – Choix des paramètres de l'algorithme génétique.

Paramètres	Valeurs
Codage du chromosome :	Binaire, $N_b = 5$ bits
Technique de sélection :	Roulette (Wheel)
Elitisme :	Vrai
Nombre de paramètres :	$N=21$
Taille de la population :	$P_z = (N_p, N * N_b).N_p=20$
Nombre de générations :	$G_n=100$
Fonction d'adaptation	Minimiser le nombre de bits dans le chromosome de taille N_p
Taille du chromosome :	$N_p = 7 \rightarrow (a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, C)$
Méthode de croisement :	Croisement uniforme, Taux de croisement : $P_c = 0.75$
Initialisation de la population :	Aléatoire
Méthode de mutation :	Aléatoire, Taux de mutation : $P_m=0.3$

de plateau où la fonction d'adaptation n'évolue plus. De plus, ce seuil de saturation est atteint plus ou moins rapidement en fonction de l'augmentation du nombre de populations. On constate sur la Fig. III.12 que pour une plage de population de chromosomes comprise entre 15 et 20, la limite du plateau est rapidement atteinte pour un faible nombre de générations. Nous avons représenté sur cette même figure la localisation des valeurs de *fitness* optimaux pour chaque génération d'individus (marqués par des points jaunes). Plusieurs solutions existent à ce problème d'optimisation. La Fig. III.13 représente la solution que nous avons choisi pour l'identification des fonctions de pondération W_{1x}, W_{2x} et W_{3x} . On constate que la fonction d'adaptation converge au bout de 13 générations vers sa valeur optimale $\gamma_{opt} = 1.01$.

Les figures III.14(a-b) présentent l'évolution des paramètres a_{3x}, b_{2x} et b_{3x} correspondant à la fonction de pondération W_{3x} . Nous avons adopté la même méthodologie pour déterminer les paramètres optimaux a_{1x}, a_{2x} et b_{1x} de la fonction de pondération W_{1x} (Figures III.15(a-b)) ainsi que le gain statique C_{1x} de la fonction W_{2x} . Ces différents résultats montrent qu'au bout de 500 générations, l'ensemble des paramètres ont convergé vers une valeur finale. Le temps de calcul pour optimiser les paramètres d'une fonction de pondération est de l'ordre de 3 heures. Après identification des paramètres, nous pouvons finalement écrire les différentes fonctions de pondération :

$$W_1 = \frac{s + 1}{s + 0.9258} \quad W_3 = \frac{s + 0.005935}{0.913s + 0.9032} \quad W_2 = 0.7097 \quad (\text{III.37})$$

D'autres simulations ont également été menées pour déterminer les paramètres de pondération pour le filtre (W_{1y}, W_{2y}, W_{3y}) du contrôleur K_{Ny} et (W_{1z}, W_{2z}, W_{3z}) du contrôleur K_{Nz} pour les axes y et z du nano-translateur piézoélectrique. L'ensemble de ces paramètres sont résumés dans le Tableau III.3 :

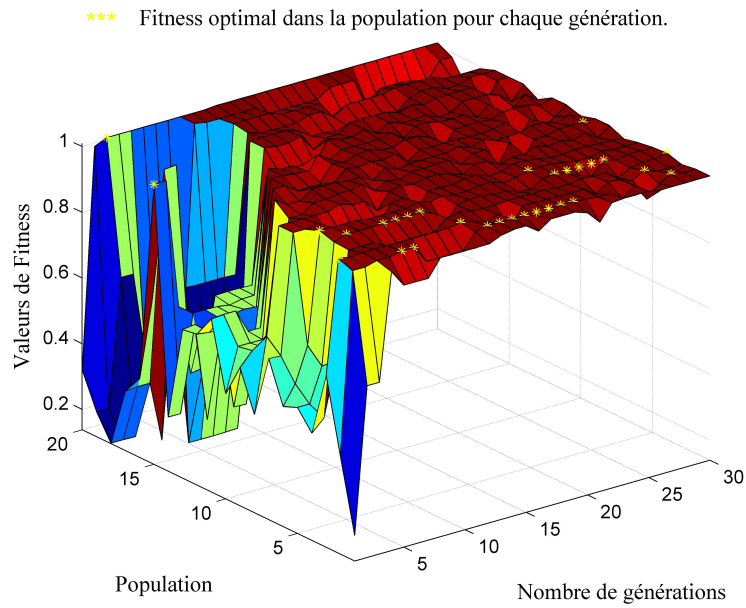


Figure III.12 – Evolution de la fonction de *fitness* pour une population d'individus comprise entre 0 et 20 et un nombre de générations de la population initiale augmentant de 0 à 30.

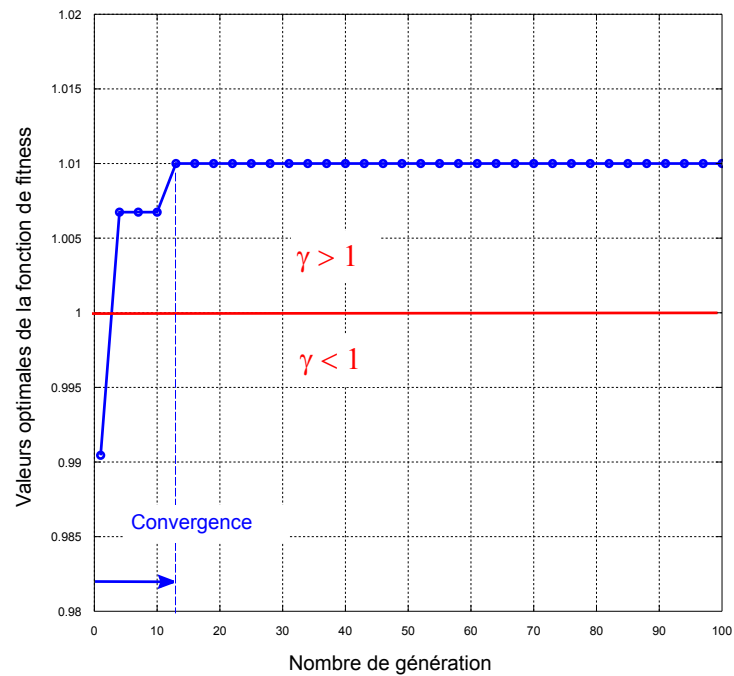
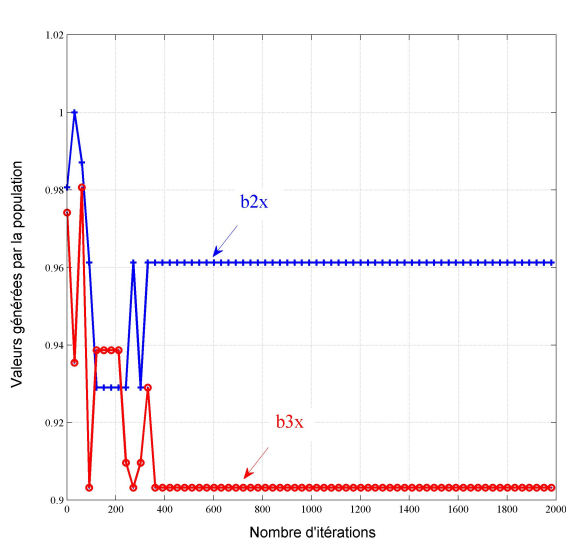
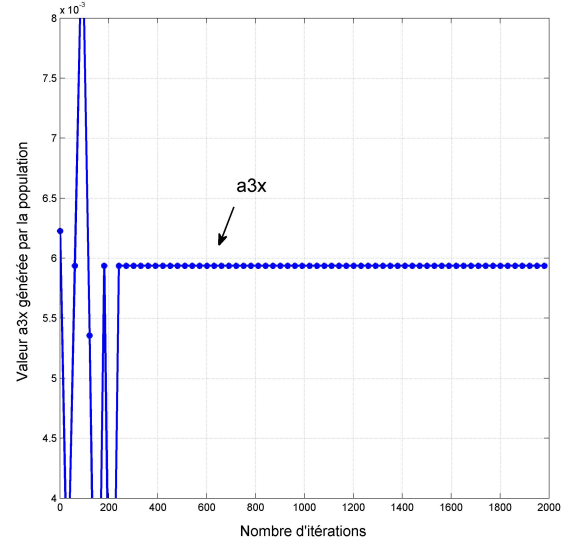


Figure III.13 – Valeur optimale de la fonction de *fitness* atteinte au bout de 13 générations avec $\|T(s)\|_\infty = 1.01$.

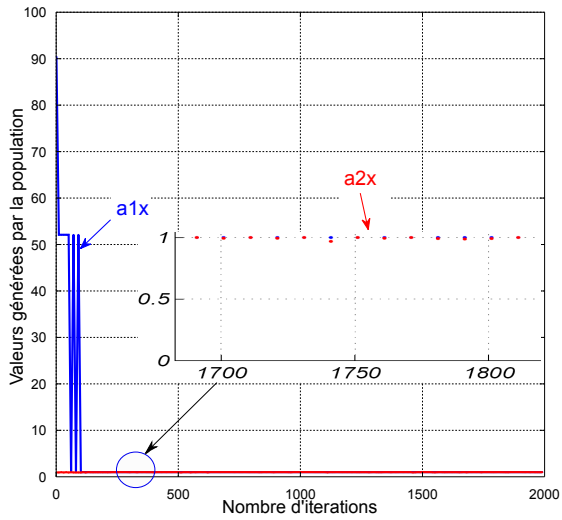


(a)

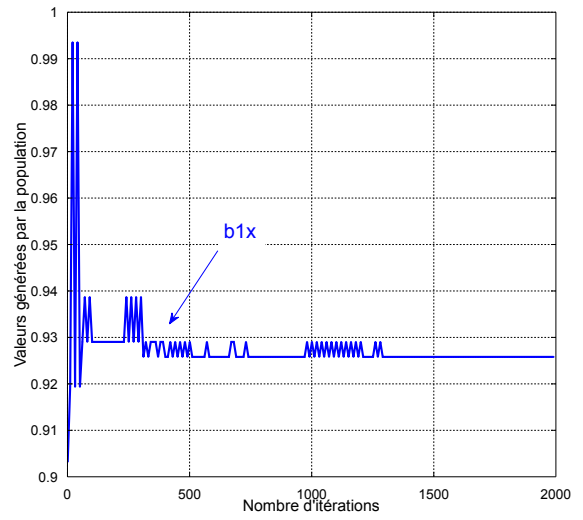


(b)

Figure III.14 – Optimisation des paramètres de la fonction de pondération W_{3x} . Détermination (a) des paramètres b_{2x} et b_{3x} et (b) du paramètre a_{3x} .



(a)



(b)

Figure III.15 – Optimisation des paramètres de la fonction de pondération W_{1x} : Détermination (a) des paramètres a_{1x} et a_{2x} et (b) du paramètre b_{1x} .

Tableau III.3 – Identification des différents paramètres de pondération W_{1i} , W_{2i} et W_{3i} avec $i = x, y, z$.

Paramètres	a_{1i}	a_{2i}	b_{1i}	C_i	a_{3i}	b_{2i}	b_{3i}
G_{nx}	1	1	0.9258	0.7097	0.005935	0.913	0.9032
G_{ny}	0.9838	4.1935	0.9935	0.970	0.00680	0.9161	0.9709
G_{nz}	1	1	0.9161	1	0.006516	0.9	0.9774

4.5.4 Analyse des performances en boucle fermée.

Dans notre cas, γ_{opt} est très proche de 1 ($\gamma_{opt}=1.01$) ce qui pourrait indiquer de très bonnes performances en boucle fermée. Afin de vérifier que les filtres W_{1x} , W_{2x} , W_{3x} permettent bien de modeler les différentes fonctions de transfert définies par les équations (III.19)-(III.22), nous avons tracé les fonctions de sensibilité $S(s)$, $K(s)S(s)$ et T aux figures III.16(a)-(c) avec les gabarits correspondants. Ces fonctions doivent remplir les spécifications de performance en positionnement ($\pm 1.0 \times 10^{-9}$ m) avec une bande passante importante tout en conservant un degré de robustesse vis-à-vis des perturbations extérieures et nonlinéarités des actionneurs. On remarque que l'ensemble des gabarits sont respectés : la fonction de sensibilité KS avec son gabarit $\frac{1}{W_{1x}}$ (Fig. III.16(a)), la fonction de sensibilité complémentaire $T = KSG$ avec son gabarit $\frac{1}{W_{3x}}$ (Fig. III.16(b)) et la fonction de sensibilité de sortie S avec son gabarit $\frac{1}{W_{1x}}$ (Fig. III.16(c)). Les marges de gain $\|S\|_\infty = 2.5\text{dB}$ et $\|T\|_\infty = 0.05\text{dB}$ restent acceptables.

4.6 Synthèse du contrôleur H_∞

Le correcteur final en boucle fermée, que l'on nommera $K(s)$, est synthétisé à partir de la toolbox μ -analysis and synthesis et la commande `ncfsyn` qui utilise une combinaison de modelage ouvert et la stabilité robuste. Cette méthode génère un correcteur dont le degré minimal sera la somme des degrés du système étudié et les degrés des fonctions de pondération. Le correcteur $K(s)$ final obtenu à l'issue de cette synthèse est d'ordre 5, et a pour fonction de transfert :

$$K(s) = \frac{3.47e5s^4 + 1.02e7s^3 + 2.42e11s^2 + 2.94e12s + 1.41e12}{s^5 + 2.75e5s^4 + 3.46e7s^3 + 2.26e11s^2 + 3.98e11s + 1.57e11} \quad (\text{III.38})$$

Le degré du correcteur étant assez élevé (degré 5), nous chercherons à réduire la difficulté d'implémentation numérique. Pour cela, nous avons réduit la complexité du contrôleur à l'ordre 4 en utilisant une méthodologie basée sur la notion de valeurs singulières de Hankel en boucle fermée. Les résultats de la réduction donnent le correcteur réduit suivant :

$$K_{\text{red}_x} = \frac{1.262s^4 + 38.62s^3 + 8.86e5s^2 + 1.078e7s + 5.167e6}{s^4 + 120.8s^3 + 8.292e5s^2 + 1.458e6s + 5.763e5} \quad (\text{III.39})$$

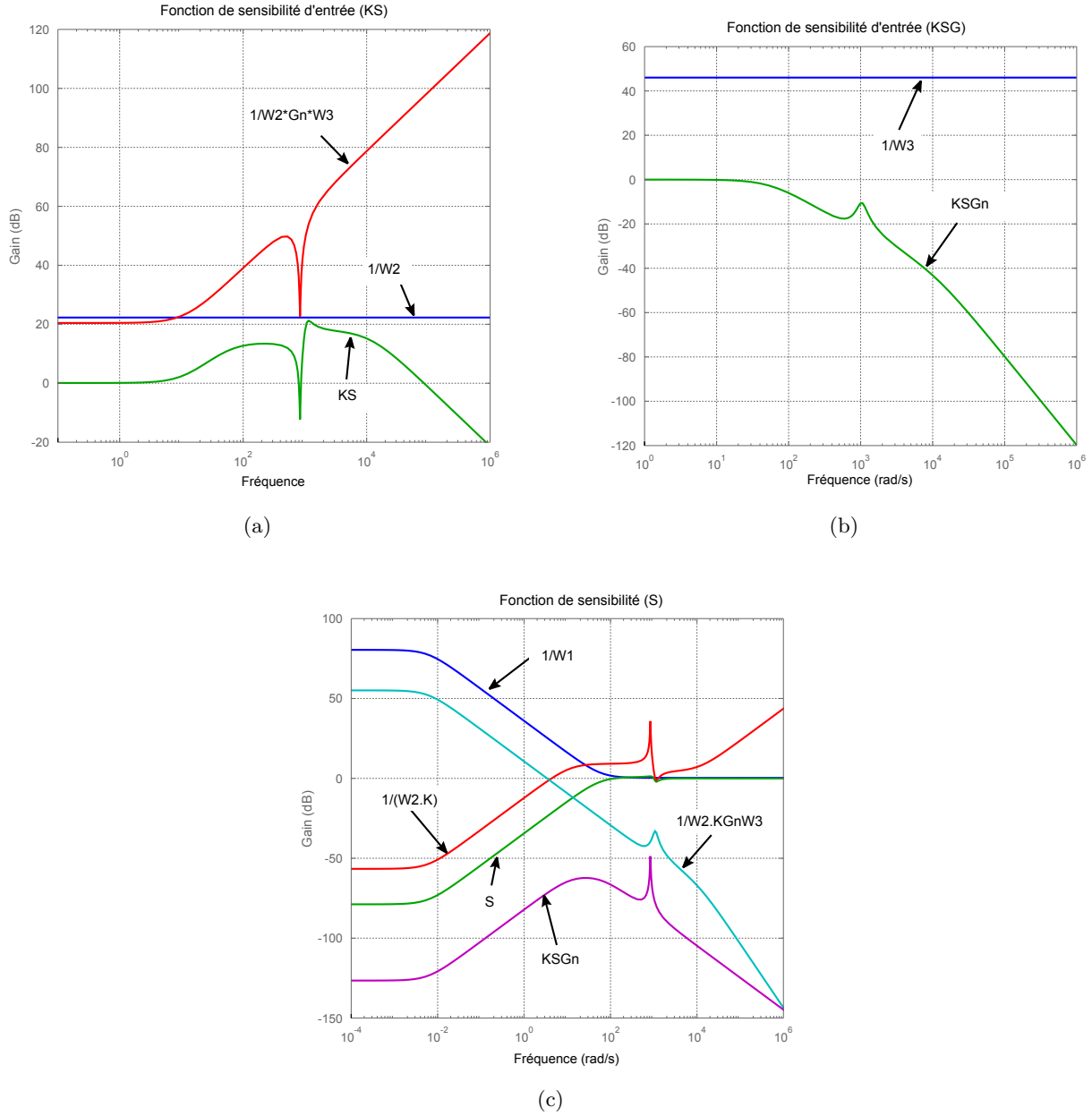


Figure III.16 – Fonctions de sensibilité en boucle-fermée : (a) $K(s)S(s)$, (b) $T(s) = K(s)S(s)G(s)$ et (c) $S(s)$ avec les gabarits correspondants $\frac{1}{W_{1x}}$, $\frac{1}{W_{2x}}$ et $\frac{1}{W_{3x}}$ respectivement.

Les réponses fréquentielles du contrôleur initial K et réduit K_{red} sont représentées à la Fig. III.17. On peut constater que les performances sont similaires pour une large bande fréquentielle correspondant à la zone de fonctionnement nominal des actionneurs magnétiques et piézoélectriques. La même

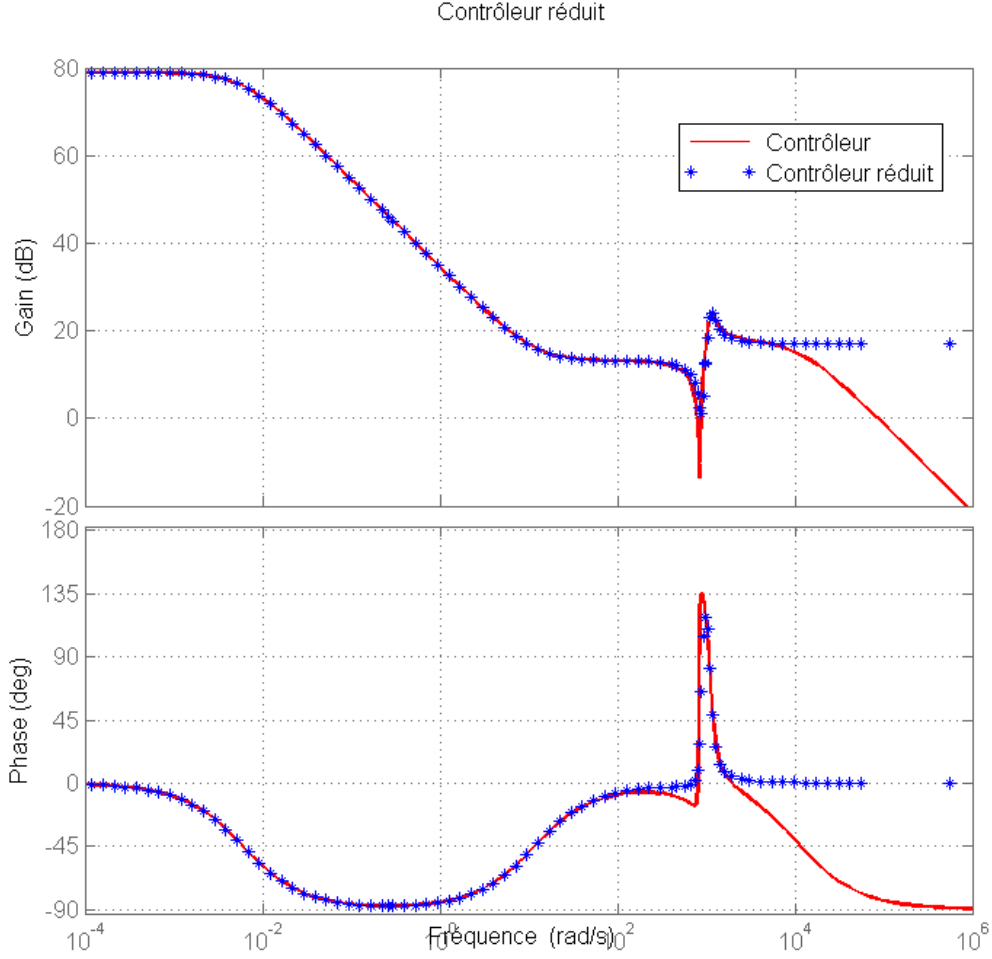


Figure III.17 – Correcteur initial K et correcteur réduit K_{red} .

méthodologie de synthèse est alors réalisée pour les contrôleurs $K_y(s)$ et $K_z(s)$

$$K_{red_y} = \frac{-7.348e-05s^4 + 0.1109s^3 + 1.662e04s^2 + 2.115e05s + 2.055e05}{s^4 + 6.837e04s^3 + 1.295e06s^2 + 1.292e06s + 2.344e05} \quad (\text{III.40})$$

$$K_{red_z} = \frac{6.378e-4s^4 - 0.1802s^3 + 6469s^2 + 8.253e04s + 8.2e04}{s^4 + 9345s^3 + 8.857e05s^2 + 1.761e06s + 8.768e05} \quad (\text{III.41})$$

Finalement, en appliquant une transformation bilinéaire de Tustin, la fonction du contrôleur réduit final à implémenter numériquement est défini par la fonction de transfert discrète $K_x(z)$ suivant l'axe

$x :$

$$K_N = \begin{pmatrix} K_x(z) & 0 & 0 \\ 0 & K_y(z) & 0 \\ 0 & 0 & K_z(z) \end{pmatrix} \quad (\text{III.42})$$

avec

$$\begin{cases} K_x(z) = \frac{1.186z^4 - 4.01z^3 + 5.623z^2 + -3.953z + 1.154}{z^4 - 3.25z^3 + 4.405z^2 - 3.06z + 0.9044} \\ K_y(z) = \frac{0.0005255z^4 + 2.745e-05z^3 - 0.001023z^2 - 2.348e-05z + 0.0004938}{z^4 - 1.933z^3 - 0.04144z^2 + 1.882z - 0.9078} \\ K_z(z) = \frac{0.005855z^4 + 0.002476z^3 - 0.009153z^2 - 0.002296z + 0.003495}{z^4 - 0.6274z^3 - 1.261z^2 + 0.615z + 0.2776} \end{cases} \quad (\text{III.43})$$

Le tracé de leurs diagrammes de Bode fait ressortir une grande similarité entre les différents axes.

4.7 Résultats expérimentaux.

Afin d'évaluer les performances en termes de stabilité et de robustesse vis-à-vis de perturbations externes, nous avons comparé notre contrôleur H_∞ synthétisé à partir des techniques de sensibilité mixte avec celui (a) du PI constructeur et (b) du PI constructeur renforcé par un contrôleur loop shaping [131]. La synthèse de ce correcteur est donnée dans l'Annexe C. Les Figures III.20(a)-(b) représentent les réponses indicielles du contrôleur PI constructeur, du contrôleur PI constructeur renforcé et du contrôleur H_∞ avec sensibilité mixte. On relève les erreurs quadratiques moyennes suivantes : $e_{PI} = 0.0070$ pour le PI constructeur, $e_{PIrenf} = 0.0013$ pour le PI constructeur renforcé et $e_{H_\infty} = 0.0005$ pour l' H_∞ avec sensibilité mixte. De meilleures performances de positionnement sont obtenues avec la version du contrôleur H_∞ avec sensibilité mixte. La Fig. III.20(a) montre également que l'injection d'un bruit de mesure haute fréquence n'influe pas sur la robustesse, ni sur la dynamique de la position comparée au contrôleur PI constructeur. Bien que le contrôleur PI constructeur renforcé possède des performances de robustesse vis-à-vis des bruits de mesure similaires au contrôleur H_∞ avec sensibilité mixte, on constate sur la Fig. III.20(b) que ses performances dynamiques sont beaucoup plus lentes. Pour compléter cette comparaison, nous avons testé à la Fig. III.21 les performances des deux contrôleurs de position H_∞ . Pour cela nous avons effectué une variation simultanée de plusieurs paramètres (perturbations, bruits de mesure). Pour les deux types de contrôleurs, les performances en termes de robustesse vis-à-vis des variations paramétriques de l'actionneur et de réjection des perturbations dynamiques sont conservées. Cependant, des différences apparaissent au niveau de leurs performances dynamiques de suivi de trajectoire et de précision de positionnement (Erreur statique : PI renforcé avec loop-shaping $e_{PIrenf} = 0.32 \mu\text{m}$ et H_∞ sensibilité mixte $e_{H_\infty} = 0.005 \mu\text{m}$).

Le phénomène d'hystérésis est un problème récurrent dans les matériaux piézoélectriques. Ce phénomène a une grande influence sur les performances du système en introduisant de fortes non-

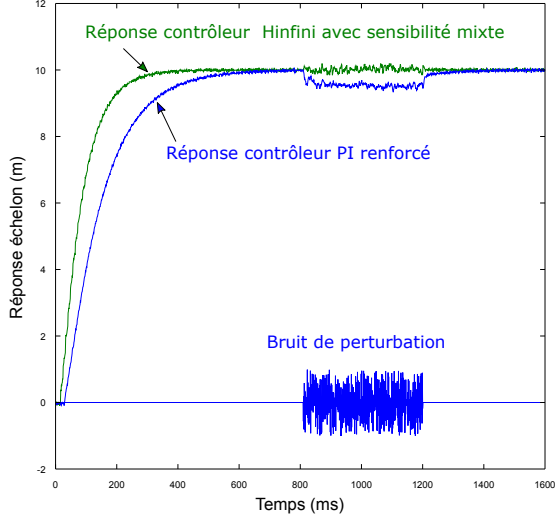


Figure III.18 – (a)

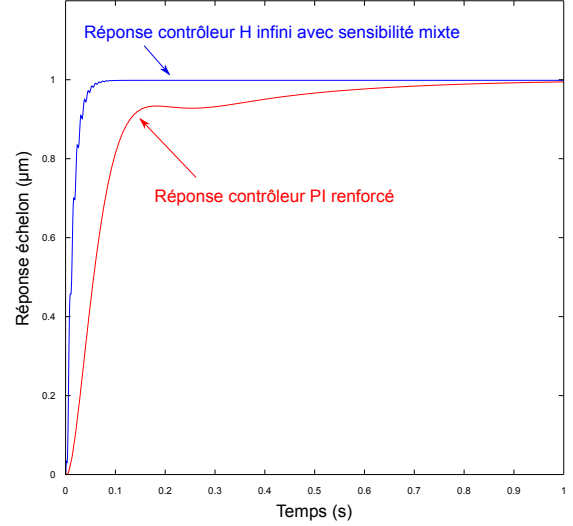


Figure III.19 – (b)

Figure III.20 – Réponse indicielle à un échelon de position : Comparaison du contrôleur H_∞ avec sensibilité mixte au (a) contrôleur PI du constructeur ; au (b) contrôleur PI constructeur renforcé par H_∞ loop-shaping.

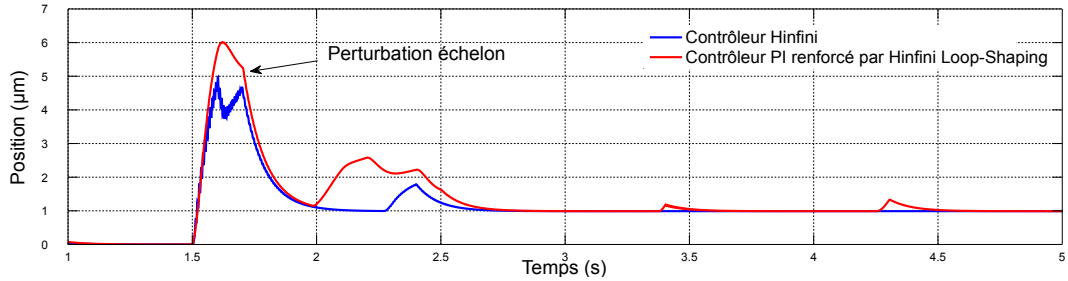


Figure III.21 – Robustesse du contrôleur H_∞ vis-à-vis de diverses perturbations extérieures. Comparaison avec un contrôleur PI renforcé par H_∞ Loop Shaping.

linéarités. De ce fait, le contrôleur synthétisé doit être capable de diminuer suffisamment l'hystérésis. L'erreur d'hystérésis avec le contrôleur H_∞ sensibilité mixte et le contrôleur PI constructeur renforcé est très faible puisqu'elle est inférieure à 1%. La différence de performances entre ces deux contrôleurs robustes provient du fait que le contrôleur H_∞ loop-shaping est synthétisé avec des fonctions de pondération W_{1x} et W_{2x} (voir l'Annexe C). Celles-ci sont choisies en fonction de spécifications telle que la bande passante ou l'erreur de position statique. Cependant, cette synthèse du contrôleur ne permet pas de pré-spécifier le type et l'amplitude des nonlinéarités, les perturbations externes et ne permet pas de capturer la dépendance de l'incertitude de l'estimation des paramètres de pondération W_{1x} et W_{2x} vis-à-vis de la variabilité de l'environnement. La version H_∞ à sensibilité mixte permet de prendre

en compte cette variabilité au travers de l'algorithme génétique d'optimisation. Les nonlinéarités et les perturbations peuvent être pré-spécifiées par l'analyse adéquate des fonctions de sensibilité présentées à la Fig. III.16.

5 Sensibilité du micromanipulateur à double-étage en boucle fermée

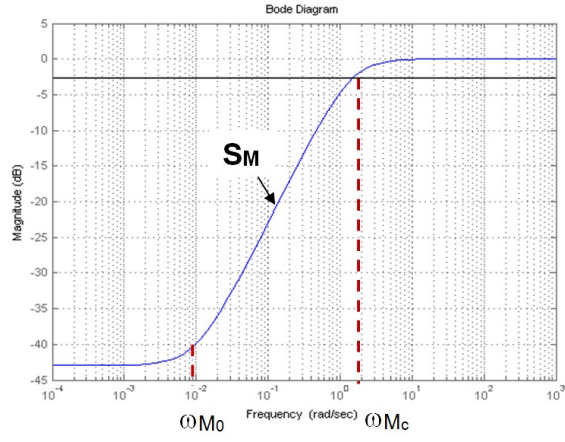
S_T

Une fois les contrôleurs K_M (III.13) et K_N (III.42) déterminés, nous pouvons tracer les fonctions de sensibilité S_M , S_N et S_T définies par les équations (III.11)-(III.12). Les Fig. III.22(a-c-e) montrent l'évolution fréquentielle de ces sensibilités. Comme on peut le constater, les deux étages d'actionnement possèdent des sensibilités différentes, S_M et S_N , avec des bandes passantes délimitées par les pulsations $(\omega_{M0}, \omega_{Mc})$ et $(\omega_{N0}, \omega_{Nc})$ respectivement. Compte tenu des fréquences d'échantillonnage imposées par les cartes d'alimentation constructeur, la condition sur l'égalité des pulsations ω_{Mc} et ω_{N0} n'est pas respectée mais toutefois celles-ci sont très proches l'une de l'autre. L'atténuation d'amplitude introduite n'est pas visible sur la sensibilité totale S_T du micromanipulateur à double-étage. La bande passante totale $(\omega_{M0}, \omega_{Nc})$ est de l'ordre de 2.7 kHz. Comme on pourra le constater expérimentalement au Chapitre 4, cette bande passante est tout à fait bien adaptée à la dynamique de poursuite d'un faisceau lumineux soumis à des variations aléatoires. Les réponses indicielles à une consigne en échelon $r = 100\mu\text{m}$ sont illustrées par les Fig. III.22(b-d-f). A titre de comparaison, nous avons tracé les réponses des différents étages d'actionnement. Comme on peut le voir, le contrôleur à double-étage à structure découplée permet de faire converger la position du micro-effecteur terminal de manière stable avec une erreur statique de l'ordre de $0.1\mu\text{m}$.

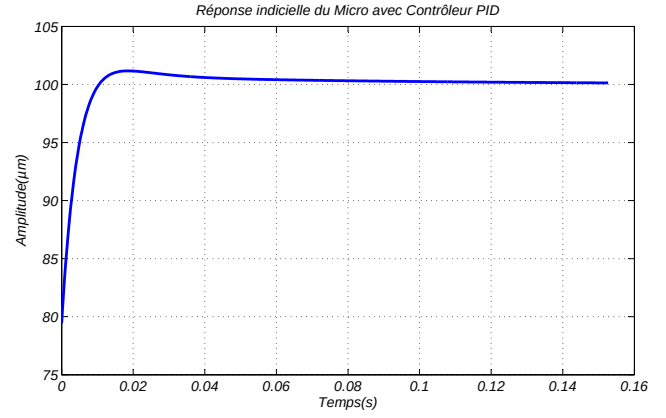
6 Conclusion

L'approche adoptée dans ce chapitre a consisté à tirer partie de l'électronique de contrôle du micromanipulateur pour réaliser une structure de contrôle robuste. Une structure découplée de contrôle de type MIMO à double-étage a été choisie pour sa simplicité de mise en oeuvre. Ce choix implique de connaître précisément les fonctions de transfert des actionneurs G_M , G_N suivant les trois axes (x, y, z) ainsi que leurs contrôleurs MIMO associés K_M et K_N . Une identification expérimentale a permis de modéliser les fonctions de transfert de chaque étage d'actionnement G_M, G_N . Notre choix s'est orienté vers la synthèse d'un contrôleur PID pour K_M et d'un contrôleur H_∞ à sensibilité mixte pour K_N . L'objectif principal de la commande robuste que nous avons synthétisée était de faire face à différents types de phénomènes non-linéaires : perturbations, erreurs de modélisation et variabilité de la dynamique du système.

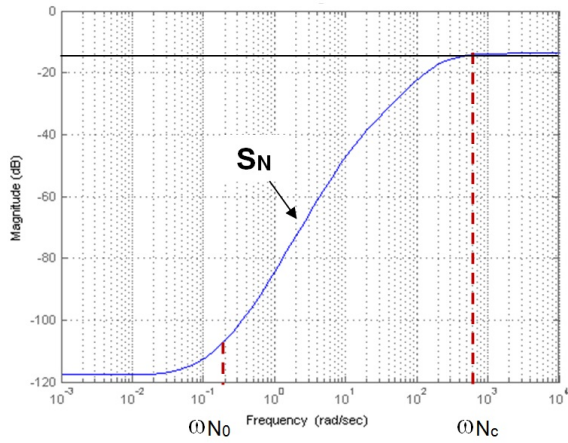
Pour cela, nous avons introduit un algorithme génétique dans le choix des paramètres des fonctions de pondération des différents filtres passe-bas et passe-haut de la commande. A ce titre, une comparaison avec les performances du correcteur PI du constructeur et d'un correcteur PI renforcé par un



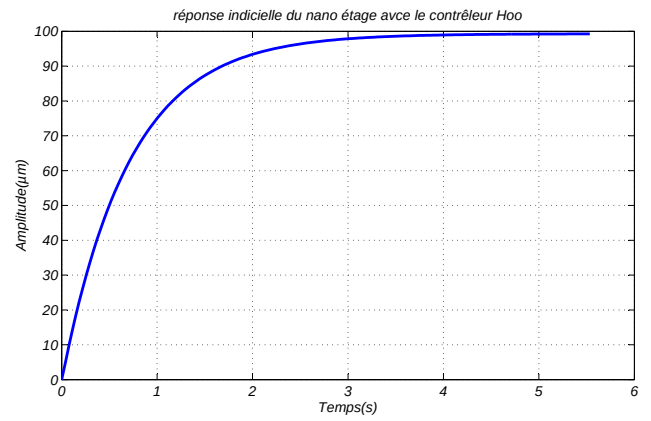
(a)



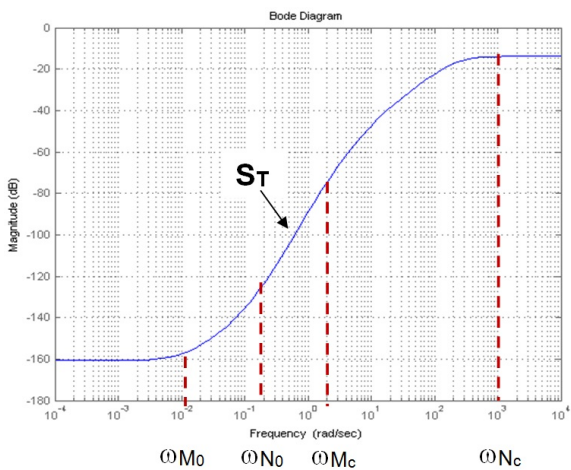
(b)



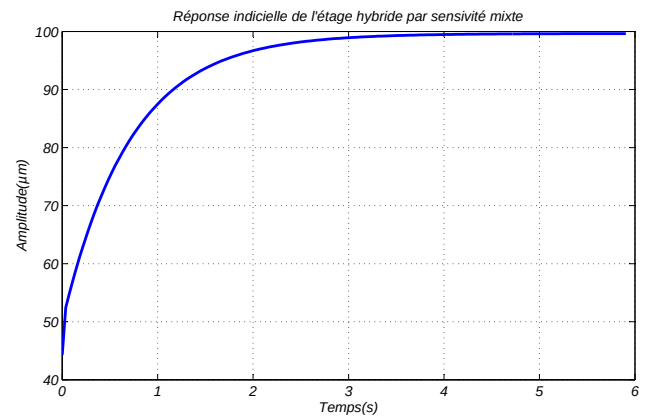
(c)



(d)



(e)



(f)

Figure III.22 – Résultats expérimentaux réalisés sur le micromanipulateur à double-étage suivant l'axe x : (a-c-e) Diagramme de Bode en amplitude des sensibilités S_M , S_N et S_T . (b-d-f) Réponses à un échelon de position des différents étages.

contrôleur H_∞ à modelage ouvert (loop-shaping) a permis de valider cette approche. Des résultats intéressants ont été obtenus en termes de stabilité et de performances ainsi qu'au niveau du rejet des perturbations dynamiques. Ces performances de positionnement statiques et dynamiques vont être évaluées expérimentalement au Chapitre 4 au travers d'une tâche microrobotique de suivi d'un faisceau lumineux, en boucle-fermée, soumis à des mouvements dynamiques aléatoires 2D.

Chapitre IV

Synchronisation du Faisceau de Lumière à l'aide de Filtres de Kalman et Particulaire

1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les algorithmes de synchronisation du faisceau de lumière émis par la source laser avec le photodétecteur 4-quadrants lorsque le faisceau est soumis à des dérives d'alignement ainsi qu'à des fluctuations dynamiques aléatoires. Pour les besoins de l'expérience la source à rayons X a été remplacée par une source laser et le photodétecteur 2D à rayons X (512×512 pixels) a été remplacée par une photodiode avalanche à 4-quadrants (4 pixels). Toutefois, au vu des courtes distances parcourues par le faisceau, ce dernier ne souffre que d'une très faible dynamique. L'objectif est alors de permettre au faisceau laser d'avoir la même dynamique que celle d'un faisceau de rayons X. D'autre part, afin de pouvoir évaluer les performances de la synchronisation d'un faisceau de lumière, le photodétecteur doit être asservi en position. Ainsi, le banc expérimental va comprendre deux micromanipulateurs à double-étage, un micromanipulateur simulant les différents mouvements aléatoires du faisceau lumineux (générateur de trajectoires) et l'autre micromanipulateur réalisant le suivi de trajectoire à partir de la lumière reçue par le photodétecteur (suivi de trajectoire), comme représenté sur la Fig. [IV.1](#).

Le problème considéré ici est de valider théoriquement et expérimentalement la commande robuste des micromanipulateurs à double-étage développée dans le Chapitre 3. Pour cela nous considérons un suivi de position d'un faisceau lumineux animé d'un mouvement brownien dans le plan $x - y$ du photodétecteur. Nous présentons dans un premier temps, la méthodologie théorique de mesure de la position du faisceau laser ainsi que les différentes phases expérimentales qui ont été menées en vue de leur calibration. À partir de cette modélisation, nous abordons les aspects algorithmiques réalisant la localisation et la synchronisation du faisceau laser avec le photodétecteur. Pour cela deux estimateurs à base de filtres de Kalman et particulaire sont développés, implémentés et testés dans des conditions expérimentales proches de celles rencontrées sur un faisceau de lumière synchrotron.

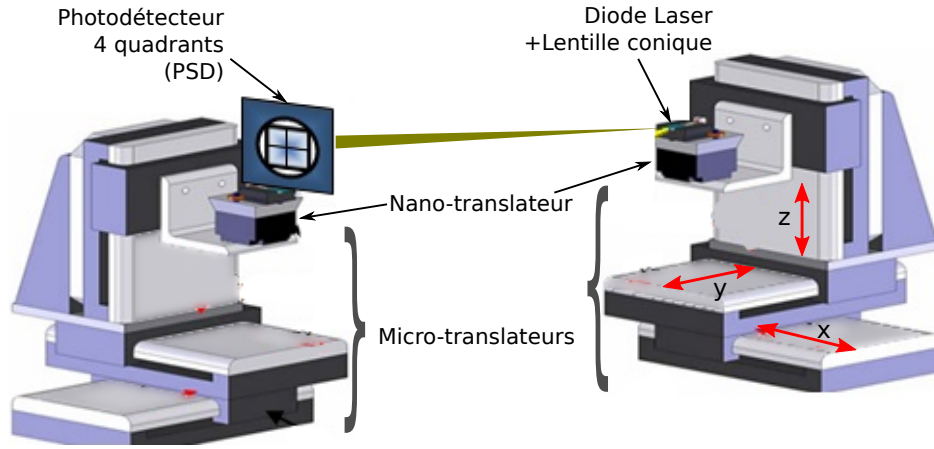


Figure IV.1 – Configuration de la plateforme pour l'évaluation de la synchronisation du faisceau.

2 Modélisation du Faisceau de Lumière

Pour détecter et localiser le faisceau laser nous utilisons un photodétecteur de position (PSD) constitué d'une photodiode permettant de détecter un rayonnement optique et de le transformer en une tension électrique. Celui considéré dans le cadre de nos travaux est constitué d'un récepteur 4-quadrants mesurant la focalisation du spot laser sur la surface réfléchissante, comme représenté sur la Fig. IV.2. La surface active de la photodiode est de 50 mm^2 et la séparation entre les quadrants est de $150 \text{ }\mu\text{m}$. En particulier, les photodiodes à 4-quadrants ont démontré être des capteurs efficaces, bas-coût et robustes pour réaliser le suivi d'un faisceau laser dans de nombreux systèmes tels que la microscopie à force atomique [132], le suivi de particules microscopiques [133] ou encore dans la mesure de diffusion photo-thermique [134]. Nous décrivons ici le principe de mesure ainsi que la calibration de la photodiode 4-quadrants utilisée pour réaliser le suivi de faisceau laser.

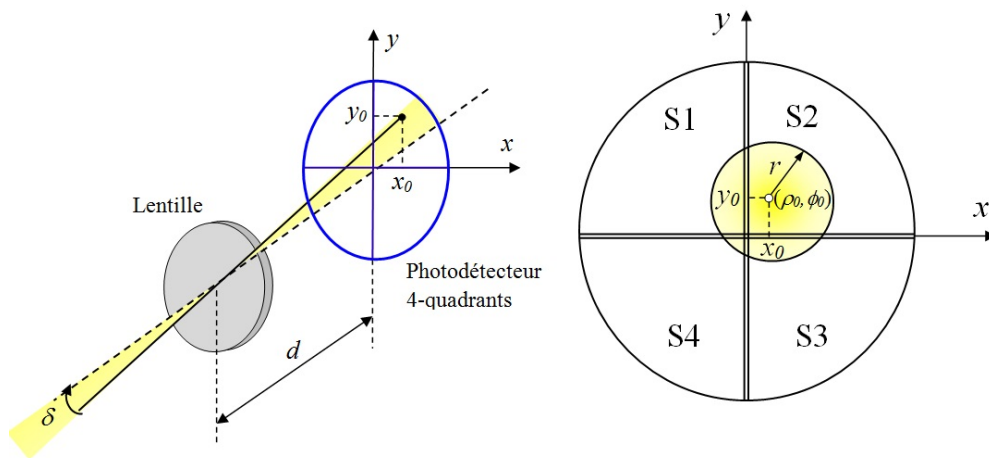


Figure IV.2 – Configuration géométrique de la lentille de focalisation et le photodétecteur 4-quadrants.

2.1 Modélisation géométrique du déplacement du spot lumineux

Le photodétecteur PSD est constitué d'un récepteur 4-quadrants mesurant la focalisation d'un spot lumineux de centre $C(x_0, y_0)$ sur la surface réfléchissante comme représenté sur la Fig. IV.2. Le faisceau laser est focalisé au travers d'une lentille conique distante d'une distance d du photodétecteur. Le centre du spot laser $C(x_0, y_0)$ dépend de l'angle d'incidence du rayon δ , soit $\tan(\delta_x) = x_0/d$ suivant l'axe x , et $\tan(\delta_y) = y_0/d$ pour l'axe y . Il n'est pas possible de mesurer directement les déplacements x_0 et y_0 à partir des signaux de sortie du photodétecteur. Il est par contre possible d'estimer les rapports des déplacements sur le rayon du spot lumineux, x_0/R et y_0/R . La largeur d'un faisceau gaussien pour une position donnée suivant son axe axial z s'exprime par :

$$r(z) = r_0 \sqrt{1 + \left(\frac{(z - d)\lambda}{\pi r_0^2} \right)^2} \quad (\text{IV.1})$$

où r_0 représente la largeur au niveau du "waist"¹ du faisceau, d la position du waist par rapport à la lentille (voir la Fig. IV.2), et λ la longueur d'onde du faisceau. La Fig. IV.3(a) illustre le comportement d'un faisceau gaussien le long de son axe axial z .

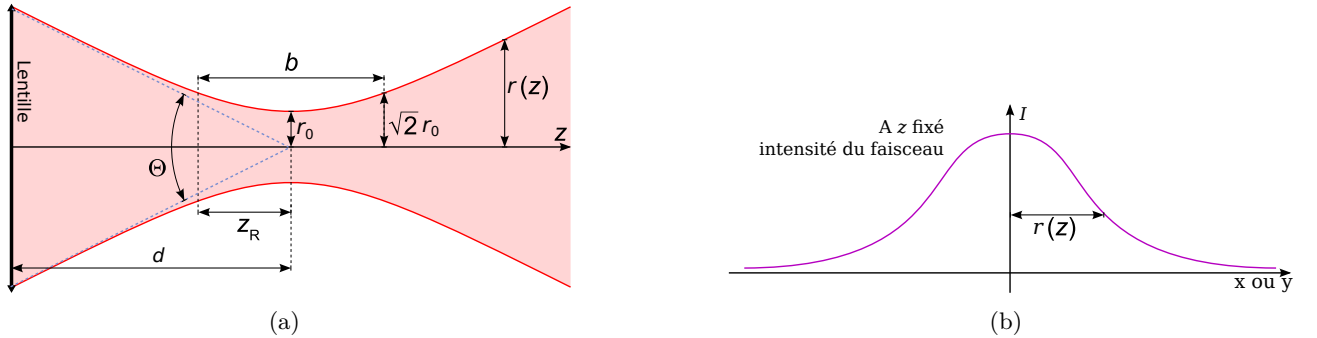


Figure IV.3 – Modélisation des faisceaux gaussiens : (a) largeur du faisceau $r(z)$ le long de son axe axial z ; (b) le profil transverse gaussien en tout point z du faisceau.

De manière générale, si l'on considère un spot laser circulaire de rayon R , la surface du spot dans un repère cartésien $x - y$ est délimité par un cercle d'équation :

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2 \quad (\text{IV.2})$$

En substituant $x = \rho \cos(\phi)$, $x_0 = \rho_0 \cos(\phi_0)$ et $y = \rho \sin(\phi)$, $y_0 = \rho_0 \sin(\phi_0)$, cette même équation peut se ré-écrire en coordonnées polaires sous la forme :

$$\rho^2 + \rho_0^2 - 2\rho\rho_0 \cos(\phi - \phi_0) = R^2 \quad (\text{IV.3})$$

1. Le waist d'un faisceau, aussi parfois appelé le col, correspond à la valeur minimale de r_0 à son origine.

On fait l'hypothèse que l'intensité du courant photoélectrique (photocourant), I , produit par la source laser obéit à une distribution Gaussienne. Dans ce cas, le courant électrique généré par chaque quadrant photoélectrique peut être décrit par [135] :

$$I = \frac{k_1}{k_2} \iint \frac{2P}{\pi R^2} \cdot e^{-\frac{2(x_0^2+y_0^2)}{R^2}} \cdot dx_0 dy_0 \quad (\text{IV.4})$$

où I est l'intensité du photocourant, R est le rayon du faisceau laser, P est la puissance du faisceau laser, (x, y) sont les coordonnées du centre du spot lumineux. Les termes k_1 et k_2 sont des coefficients. La Fig. IV.3(b) illustre le profil d'intensité d'un faisceau gaussien. En particulier, l'une des propriétés des faisceaux gaussiens réside dans le fait que s'il est gaussien en un point, il reste gaussien en tout point (cohérence spatiale).

Si l'on considère que les valeurs I_1 , I_2 , I_3 et I_4 résultent de l'intégration de l'intensité lumineuse sur chaque quadrant S_k , nous pouvons estimer les rapports x_0/R et y_0/R :

$$\begin{aligned} \widehat{x}_r &= \frac{(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)}{(I_2 + I_3) + (I_1 + I_4)} \\ \widehat{y}_r &= \frac{(I_1 + I_2) - (I_3 + I_4)}{(I_1 + I_2) + (I_3 + I_4)} \end{aligned} \quad (\text{IV.5})$$

où $\widehat{x}_r$ et $\widehat{y}_r$ représentent les valeurs estimées de x_0/R et y_0/R , respectivement. Les termes I_1 , I_2 , I_3 et I_4 représentent les amplitudes des courants. Chaque courant peut être exprimé par $I_k = \Re E_0 A_k$, où E_0 est l'irradiation maximale à la surface de la photodiode, $\Re$ est le facteur de conversion de la photodiode avalanche, et A_k représente l'aire de la partie illuminée du k ème secteur angulaire de la photodiode. En considérant cela, on peut réécrire l'équation (IV.5) en fonction des surfaces illuminées par le spot laser :

$$\begin{aligned} \widehat{x}_r &= \frac{(A_2 + A_3) - (A_1 + A_4)}{(A_2 + A_3) + (A_1 + A_4)} \\ \widehat{y}_r &= \frac{(A_1 + A_2) - (A_3 + A_4)}{(A_1 + A_2) + (A_3 + A_4)} \end{aligned} \quad (\text{IV.6})$$

Chaque aire élémentaire du spot lumineux qui recouvre les 4-quadrants, A_k , peut être calculé en fonction d'une intégration double [136]. Par exemple :

$$A_1 = \int_0^{\pi/2} \int_0^{\rho(\phi)} \rho d\rho d\phi = \int_0^{\pi/2} \frac{(\rho(\phi))^2}{2} d\phi \quad (\text{IV.7})$$

où A_1 représente l'aire du spot illuminant le secteur S_1 .

Le rayon ρ , en coordonnées polaires, est obtenu à partir de l'équation (IV.3) sous la forme :

$$\rho(\phi) = \rho_0 \cos(\phi - \phi_0) + \sqrt{(\rho_0 \cos(\phi - \phi_0))^2 - \rho_0^2 + R^2} \quad (\text{IV.8})$$

Pour les secteurs S_2, S_3 et S_4 , les angles ϕ limites sont respectivement $[\pi/2; \pi], [\pi; 3\pi/2]$ et $[3\pi/2; \pi]$. La forme normalisée des signaux de déplacement peut s'écrire d'après (IV.6) et (IV.7) :

$$\begin{aligned}\widehat{x}_r &= \frac{2}{\pi} \left(\frac{\rho_0}{R} \cos(\phi_0) \sqrt{1 - \left(\frac{\rho_0}{R} \cos(\phi_0)\right)^2} + \arcsin\left(\frac{\rho_0}{R} \cos(\phi_0)\right) \right) \\ \widehat{y}_r &= \frac{2}{\pi} \left(\frac{\rho_0}{R} \sin(\phi_0) \sqrt{1 - \left(\frac{\rho_0}{R} \sin(\phi_0)\right)^2} + \arcsin\left(\frac{\rho_0}{R} \sin(\phi_0)\right) \right)\end{aligned}\tag{IV.9}$$

D'après les équations (IV.9), on peut remarquer que la sensibilité incrémentale est inversement proportionnelle au rayon du spot lumineux, autrement dit pour obtenir une sensibilité maximale il faut un rayon du spot minimal.

2.2 Mesure et calibration

2.2.1 Calibration du photodétecteur 4-quadrants

La mesure du déplacement du spot lumineux est réalisé à partir de la mesure du photo-courant généré par chaque photodétecteur. Ce courant est ensuite converti en une tension proportionnelle à l'intensité reçue telle que $V_k = G I_k$ où G représente le gain des étages amplificateurs opérationnels (voir Fig. IV.4). Ainsi, il est facile de visualiser des déplacements d'un faisceau sur le capteur en analysant les signaux V_1 donnant le déplacement selon l'axe vertical y et V_2 donnant le déplacement selon l'axe horizontal x .

$$\begin{aligned}V_x &= (V_1 + V_4) - (V_2 + V_3) \\ V_y &= (V_1 + V_2) - (V_3 + V_4) \\ V_s &= V_1 + V_2 + V_3 + V_4.\end{aligned}\tag{IV.10}$$

Les tensions des canaux de sortie V_x et V_y sont directement liés à l'énergie du faisceau laser recueilli sur chaque quadrant alors que V_s résulte de la somme des tensions individuelles de chaque quadrant. La calibration de la photodiode 4-quadrants est réalisée en faisant déplacer le faisceau lumineux suivant la direction de l'axe x . La Fig. IV.5 représente l'évolution de la tension de sortie V_x mesurée par le photodétecteur lorsque le faisceau laser se déplace suivant l'axe x . On peut constater que sa caractéristique est fortement non-linéaire, mais possède une très bonne linéarité autour du point central de la photodiode. À titre d'illustration, la Fig. IV.5(b) présente un zoom autour de la position autour de $x = 0$. La caractéristique a été mesurée avec des incréments de position de $10 \mu\text{m}$. Comme on peut le constater, il existe un changement de pente au voisinage des tensions nulles ($V_x \neq 0, V_y \neq 0$ pour $V_x = 0, V_y = 0$). Ce phénomène est observé en raison de la zone centrale de la photodiode qui n'est pas sensible à la lumière. Cette zone de mesure est de l'ordre de $150 \pm 20 \mu\text{m}$ de large. Ceci implique que si le "waist" du faisceau laser est plus petit que cette zone d'ombre, lors de son passage à l'intérieur de celle-ci la tension de la photodiode diminue et donc un changement de pente apparait comme on peut le voir sur la Fig. IV.5(b) où la tension V_x est approximativement

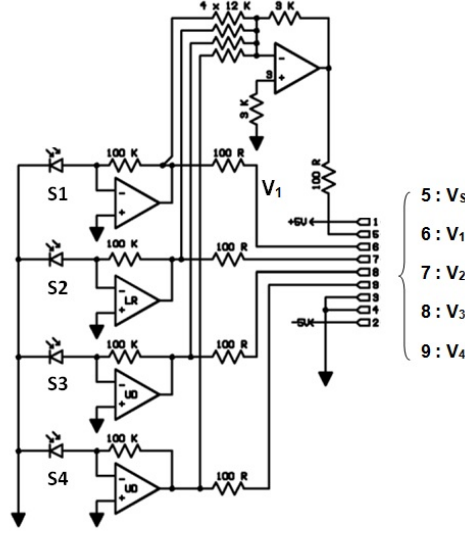


Figure IV.4 – Schéma électrique du photodétecteur 4-quadrants, avec ces sorties de mesures des tensions V_1 , V_2 , V_3 , V_4 et V_s .

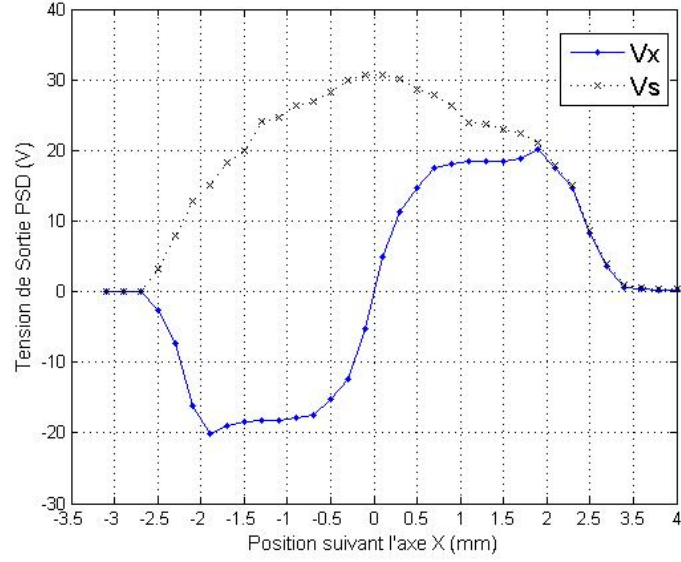
linéaire. On peut cependant noter qu'une tension de seuil est visible sur la courbe à $x = 0$ (où $y = 0$) due à l'amplification du bruit de mesure fournit par le photodétecteur. Ce biais de mesure sera par la suite filtrée à travers un filtre de Kalman ou particulière. Les caractéristiques suivant l'axe y étant très similaires, celles-ci n'ont pas été reportées.

2.2.2 Calibration du faisceau lumineux

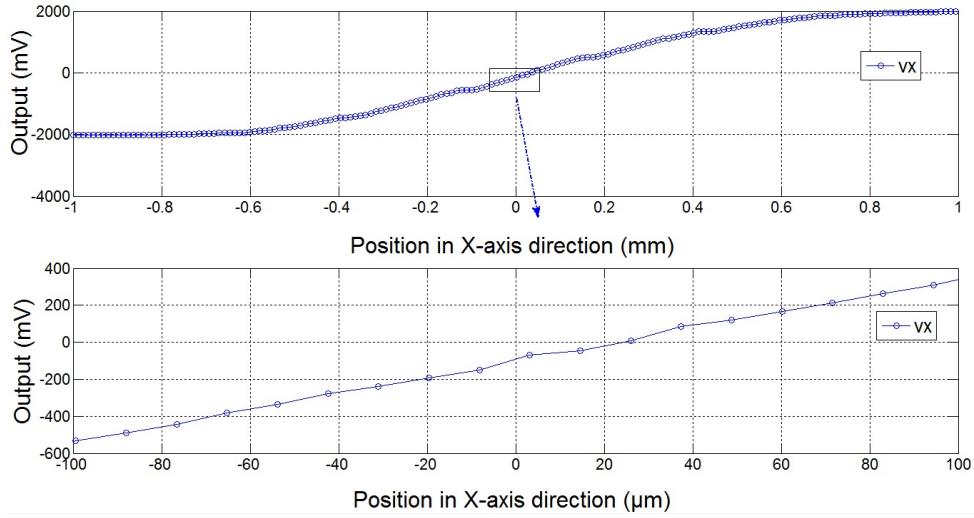
Nous décrivons ici la méthodologie expérimentale retenue pour réaliser la mesure du diamètre du faisceau laser réfléchi sur la photodiode. Tout d'abord, comme on peut le constater sur la Fig. IV.6, l'intensité lumineuse mesurée par le photodétecteur peut être interpolée par une distribution Gaussienne théorique calculée par l'équation (IV.4). Nous pouvons de ce fait mesurer le diamètre du faisceau à partir de la mesure des tensions d'une paire de cellules photo-électriques de la manière suivante [137] :

$$\begin{aligned}
 V_g &= (V_1 + V_4) \\
 V_d &= (V_2 + V_3) \\
 V_h &= (V_1 + V_2) \\
 V_b &= (V_3 + V_4)
 \end{aligned}
 \tag{IV.11}$$

où V_g , V_d , V_h et V_b représentent la somme de tensions de deux cellules photo-électriques localisées à gauche, à droite, en haut et en bas du photodétecteur à 4-quadrants. Les tensions V_g et V_d seront utilisées pour déterminer le diamètre du faisceau suivant l'axe x alors que les tensions V_h et V_b per-



(a)



(b)

Figure IV.5 – Evolution des mesures de tension lors d'un déplacement du spot laser le long de l'axe x du photodétecteur 4-quadrants : (a) Caractéristique expérimentale V_x et V_s ; et (b) zoom de la mesure de la tension V_x autour de la position centrale du photodétecteur.

mettront de mesurer le diamètre du faisceau suivant l'axe y . Si l'on considère que le faisceau laser se déplace suivant l'axe x , la puissance lumineuse correspondant à V_g et V_d en un point x se détermine par [137] :

$$P(x) = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{P}{R} \int_x^{\infty} \exp\left(\frac{-2x^2}{R^2}\right) dx \quad (\text{IV.12})$$

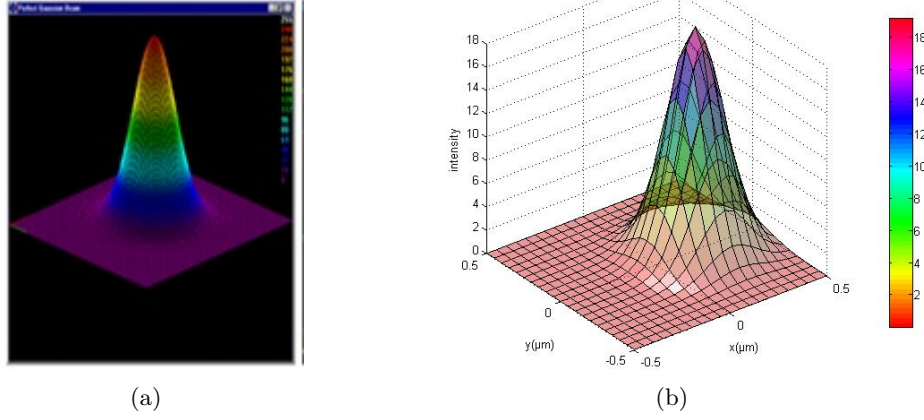


Figure IV.6 – Intensité lumineuse générée par le faisceau laser obéissant à une distribution Gaussienne : (a) modèle théorique et (b) mesure expérimentale de l'intensité.

En effectuant un changement de variable $\chi = x\sqrt{2}/R$, l'expression (IV.12) se réduit à :

$$\frac{P(x)}{P} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\chi) \quad (\text{IV.13})$$

où $\operatorname{erfc}(\cdot)$ correspond à la fonction d'erreur complémentaire définie par :

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt. \quad (\text{IV.14})$$

Les valeurs de $P(x)/P$ comprises entre 0.1 et 0.9 correspondent à des valeurs de β de 0.9062 et -0.9062, respectivement. Finalement, le rayon du faisceau laser peut être estimé à partir de la relation :

$$R = 0.7803(x_2 - x_1) \quad (\text{IV.15})$$

où $(x_2 - x_1)$ représente le décalage spatial entre les points 0.9 et 0.1.

La Fig. IV.7 illustre les mesures effectuées sur les deux tensions V_d et V_g lorsque le faisceau lumineux se déplace suivant l'axe x (avec $y=0$) le long de la surface active du photodétecteur 4-quadrants. On peut constater que les deux tensions sont symétriques. En identifiant les valeurs du rapport $P(x)/P$ égales à 0.1 et 0.9, le diamètre du faisceau suivant l'axe x peut être calculé à partir de l'équation (IV.15). Une valeur de diamètre de l'ordre de $950\mu\text{m}$ est déterminée pour l'expérience de la Fig. IV.7. Des résultats similaires sont obtenus en estimant le diamètre à partir de la formule (IV.1). Une approche similaire peut être retenue pour déterminer le rayon du faisceau suivant l'axe y en considérant les tensions V_h et V_b .

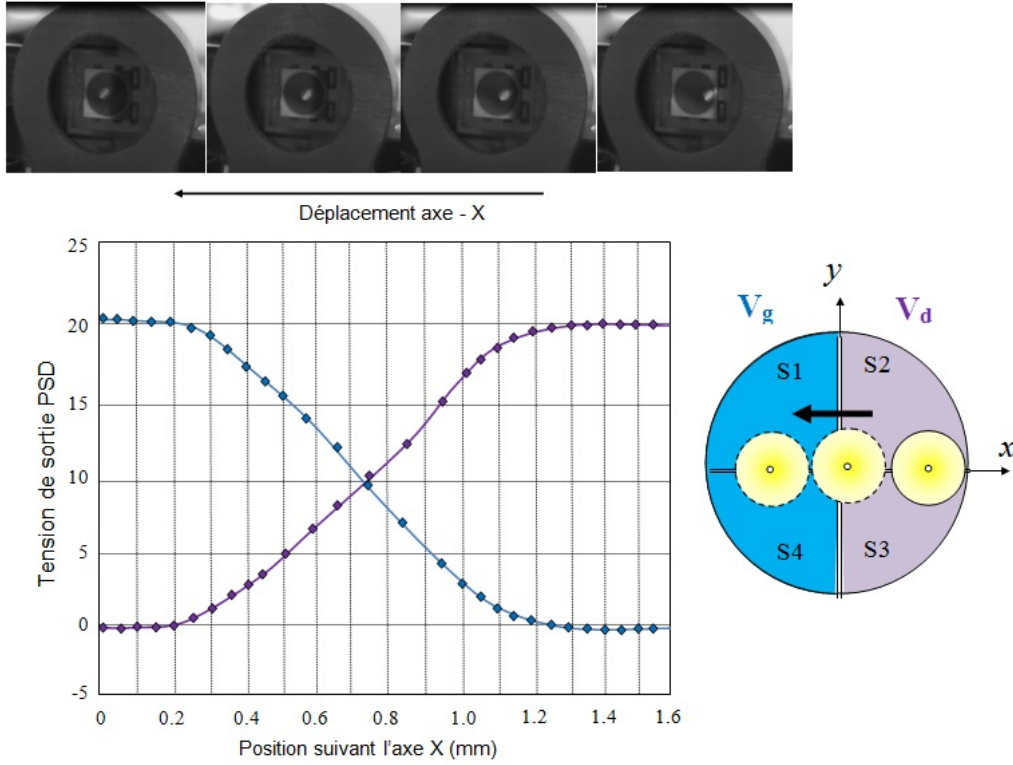


Figure IV.7 – Caractéristique V_d et V_g mesurée lorsque le spot lumineux se déplace suivant l'axe x sur la surface du photodétecteur 4-quadrants.

2.3 Modélisation Dynamique du Faisceau Laser

Les expériences décrites dans le Chapitre 2 sous faisceau X ont montré clairement l'intérêt d'illuminer l'échantillon sous test au point maximal d'intensité lumineuse. Cependant, la stabilité du faisceau est fortement affectée par des variations dynamiques liées à un mouvement stochastique ainsi qu'à une dérive continue d'origine thermique. Nous supposons dans ce qui suit que les perturbations dynamiques affectant les variations de mouvement du faisceau laser peuvent être modélisées par un mouvement brownien. La littérature propose différentes manières de modéliser les dynamiques de type browniennes, et cela repose généralement par la définition d'une équation différentielle stochastique (EDS) [138]. Les EDS permettent de modéliser des trajectoires aléatoires, telles que les évolutions financières de la bourse ou encore les mouvements de particules. Elles décrivent ainsi la dynamique d'un processus stochastique à temps continu ayant les propriétés suivantes :

1. si l'on connaît la position $x(t)$ à un instant t , alors la position à un instant ultérieur $t + \Delta T$ ne dépend que de la position à cet instant t (ie., la propriété de Markov) ;
2. les positions évoluent continûment dans l'espace ;
3. la loi gouvernant la position entre deux instants t et $t + \Delta T$ ne dépend que de ΔT , et dans le cas d'un mouvement brownien, l'accroissement est stationnaire et gaussien ;

4. $x(t)$ suit une loi normale de moyenne nulle et de variance σ_x^2 , notée $\mathcal{N}(0, \sigma_x^2)$.

Ces différentes propriétés impliquent que la dynamique d'un faisceau est la même quelle que soit sa position dans l'espace, et même si l'on tourne les coordonnées de l'espace à l'aide d'une rotation. En d'autres termes, un mouvement brownien reste un mouvement brownien : le faisceau évolue dans un environnement homogène et isotrope. Pour modéliser la dynamique des faisceaux à partir d'une EDS, nous nous basons sur la théorie de Langevin du mouvement brownien. Dans cette approche, le faisceau est supposé être animée à l'instant t d'une vitesse $\dot{x}(t)$ soumise à deux forces distinctes :

1. une force de frottement fluide du type : $f = -\beta_x \dot{x}$, où $\beta_x \in \mathbb{R}^+$ est une constante correspondant à un coefficient de frottement ;
2. une force d'excitation complémentaire, notée ici $f_x(t)$, qui synthétise la résultante des mouvements aléatoires subit par le faisceau. Notamment, la force $f_x(t)$ est une variable aléatoire indépendante et identiquement distribuée selon une gaussienne de moyenne nulle et de variance σ_x^2 , soit $f_{x_k} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_x^2)$.

En appliquant le principe fondamental de la dynamique de Newton, on obtient l'EDS de Langevin suivante pour la description du mouvement brownien 2D d'un faisceau de lumière :

$$\begin{aligned} \frac{d^2x(t)}{dt^2} + \beta_x \frac{dx(t)}{dt} &= f_x(t) \\ \frac{d^2y(t)}{dt^2} + \beta_y \frac{dy(t)}{dt} &= f_y(t) \end{aligned} \quad (\text{IV.16})$$

La Fig. IV.8 donne un exemple de mouvement brownien basé sur les caractéristiques d'un faisceau de rayons X. En effet, une analyse préliminaire de la dynamique du faisceau de rayons X à l'ESRF a permis de déterminer que la fluctuation du signal présente un écart-type de l'ordre de $\sigma_x = 1.2\mu\text{m/s}^2$ et $\sigma_y = 0.8\mu\text{m/s}^2$. De même, les constantes de coefficient de frottement ont pu être également évaluées. Ces paramètres du mouvement brownien sont résumés dans le Tableau IV.1.

Tableau IV.1 – Caractéristiques browniennes d'un faisceau de rayon X.

		Vitesse moyenne	Écart-type
Axe x	$\beta_x = 30.34 \text{ s}^{-1}$ $\sigma_x = 1.2\mu\text{m/s}^2$	$\langle \dot{x} \rangle = -68.95\text{nm/s}$	$\sigma_{\dot{x}} = 1.75\mu\text{m/s}$
Axe y	$\beta_y = 15.66 \text{ s}^{-1}$ $\sigma_y = 0.8\mu\text{m/s}^2$	$\langle \dot{y} \rangle = -33.36\text{nm/s}$	$\sigma_{\dot{y}} = 0.83\mu\text{m/s}$
Norme		$\langle v \rangle = 1.66\mu\text{m/s}$	$\sigma_v = 1.08\mu\text{m/s}$

La dynamique brownienne (IV.16) peut être ensuite discrétisée selon un pas de temps de discrétisation, ΔT , afin d'établir un modèle discret du comportement du faisceau. Les équations discrètes du

2. On note $x \sim \mathcal{N}(0, \sigma_x^2)$ le fait que la variable aléatoire x suit la loi normale $\mathcal{N}(0, \sigma_x^2)$, ici de valeur moyenne nulle et d'écart-type σ_x .

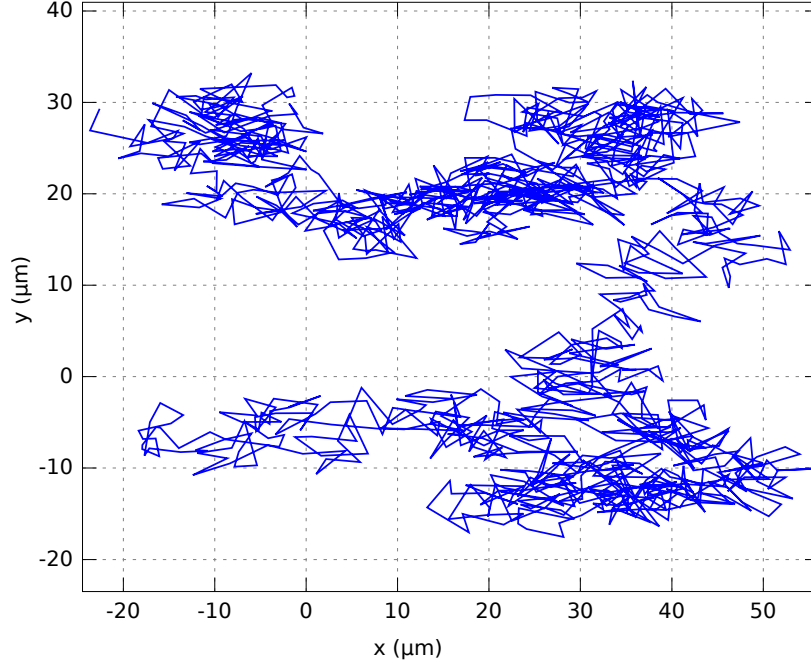


Figure IV.8 – Exemple de mouvement brownien généré à partir des paramètres d'un faisceau de rayon X.

mouvement suivant x du faisceau laser en utilisant un bloqueur d'ordre zéro (ZOH) sont simplement exprimées par :

$$\begin{aligned}\dot{x}_k &= \frac{x_k - x_{k-1}}{\Delta T} \\ \ddot{x}_k &= \frac{\dot{x}_k - \dot{x}_{k-1}}{\Delta T}\end{aligned}\tag{IV.17}$$

À partir des équations (IV.16) et (IV.17), le modèle dynamique brownien discrétisé d'un faisceau de lumière est défini ici par :

$$\begin{aligned}x_k &= x_{k-1} + \Delta T \dot{x}_k \\ \dot{x}_k &= a_x \dot{x}_{k-1} + b_x f_{x_k}\end{aligned}\tag{IV.18}$$

avec

$$a_x = \frac{1}{1 + \beta_x \Delta T} ; b_x = \frac{\Delta T}{1 + \beta_x \Delta T} ;\tag{IV.19}$$

et f_{x_k} représentant les propriétés statistiques de la force d'excitation f_x . En particulier, cette variable aléatoire f_{x_k} est indépendante et identiquement distribuée. Dans la mesure où la dynamique de l'axe y est complètement découplée de celle de l'axe x , l'équation du mouvement suivant l'axe y peut être décrit de la même manière, mais en considérant des paramètres dynamiques, β_y et f_{y_k} différents (voir le Tableau IV.1).

Pour établir la représentation d'état de la dynamique du faisceau discrétisé, nous posons la variable d'état en temps discret k comme étant :

$$\mathbf{x}_k = (x_k \ y_k \ \dot{x}_k \ \dot{y}_k)^T \quad (\text{IV.20})$$

où les paramètres (x_k, y_k) et $(\dot{x}_k, \dot{y}_k)$ représentent respectivement la position et la vitesse de la source lumineuse dans le plan x - y du photodétecteur. D'autre part, le photodétecteur permet de déterminer la mesure $\mathbf{y}_k = (x_k, y_k)$ de la position du faisceau. Ainsi, à partir du modèle dynamique (IV.18), la représentation d'état dans le domaine discret du faisceau animé d'un mouvement brownien est finalement caractérisé par :

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_k &= \mathbf{A} \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B} \mathbf{f}_k \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{C} \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{v}_k \end{aligned} \quad (\text{IV.21})$$

avec

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta T \\ 0 & 0 & a_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_y \end{pmatrix}, \quad (\text{IV.22})$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & b_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_y \end{pmatrix}^T \quad (\text{IV.23})$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{IV.24})$$

Les matrices de la représentation d'état $\{\mathbf{A}; \mathbf{B}\}$ sont les dérivées de la dynamique des particules définies dans les équations (IV.17), et $\mathbf{f}_k = (f_{x_k}, f_{y_k})^T$ est une variable aléatoire indépendante et uniformément distribuée ayant pour matrice de covariance Σ_k . Enfin, la mesure de la position $\mathbf{y}_k$ prend également en compte le bruit blanc gaussien $\mathbf{v}_k \sim \mathcal{N}(0, \mathbf{R}_k)$ de moyenne nulle et de matrice de covariance $\Theta_k \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ introduite par la mesure du photodétecteur 2D.

D'autre part, il provient de (IV.21) que :

$$\mathbf{x}_k = \sum_{i=1}^k \mathbf{A}^{k-i} \mathbf{B} \mathbf{f}_i + \mathbf{A}^k \mathbf{x}_0 \quad (\text{IV.25})$$

Compte tenu que les variables aléatoires successives $\mathbf{f}_i$ forment *a priori* un processus discret gaussien blanc de moyenne nulle, la forme de $\mathbf{x}_k$ (IV.25) est elle aussi gaussienne si les connaissances sur $\mathbf{x}_0$ sont gaussiennes ou égales à une valeur fixe. La covariance à chaque étape k peut être alors déterminée *a priori* grâce à :

$$\Sigma^2(\mathbf{x}_k) = \sum_{i=1}^k \mathbf{A}^{k-i} \mathbf{B} \Sigma^2(\mathbf{f}_i) + \mathbf{A}^k \Sigma^2(\mathbf{x}_0) \quad (\text{IV.26})$$

Cette équation (IV.26) montre qu'il est nécessaire de bien déterminer la variable aléatoire $\mathbf{f}_k$ correspondant à la force d'excitation. En effet, la variable aléatoire $\mathbf{f}_k$ possède une grande influence dans l'incertitude de la trajectoire du faisceau, et donc sur sa position à l'instant k .

3 Asservissement en position du faisceau lumineux

3.1 Stratégie de Contrôle de la Poursuite du Faisceau

Une fois le point focal du faisceau localisé, il est nécessaire de maintenir l'échantillon en ce point. Cependant, comme mentionné précédemment, les rayons X de taille micrométrique sont instables spatialement. Une stratégie de commande du suivi du maximum d'intensité doit être développée. Pour cela, il convient d'intégrer un modèle de prédiction qui permet l'anticipation des mouvements aléatoires du faisceau, tout en tenant compte de la dynamique des micromanipulateurs. En effet, l'étage du micro-translateur dispose d'une grande plage de déplacement (quelques centimètres avec une résolution de 50nm), mais d'une faible bande passante. En revanche, l'étage du nano-translateur possède une bande passante bien plus élevée, mais n'offre qu'une petite plage de déplacement (100 μm avec résolution de 1 nm). Pour cela, comme présenté précédemment au chapitre 3, une architecture maître/esclave à structure découplée a été implémentée.

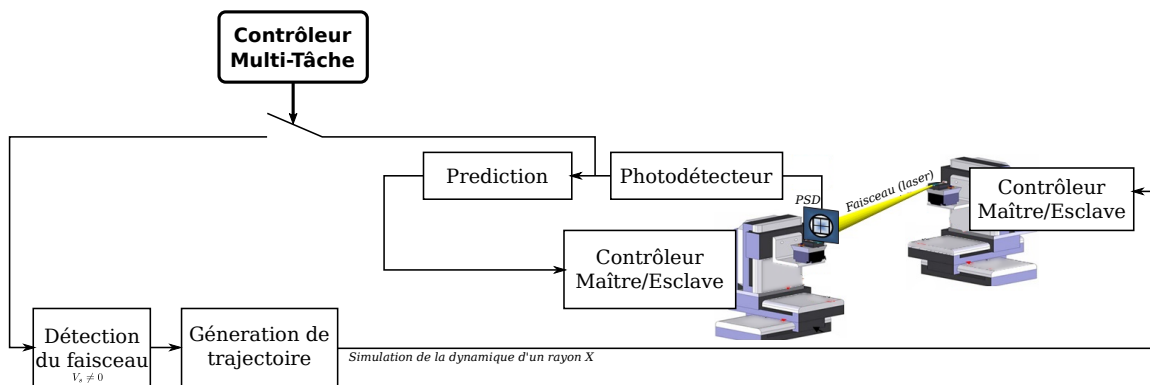


Figure IV.9 – Schéma de principe de la stratégie de poursuite du faisceau.

La figure IV.9 décrit la stratégie mise œuvre pour évaluer la poursuite du faisceau. En premier lieu, le contrôleur multi-tâche initie une première phase de détection du faisceau. Puis, sur la base des consignes du générateur de trajectoire et de la prédiction du mouvement du faisceau, les références

aux contrôleurs maîtres/esclaves sont déterminées. Cette approche permet de réaliser l'alignement synchronisé du photodétecteur avec le faisceau de manière autonome, malgré les perturbations subies par le faisceau. Il sera ainsi possible de maintenir l'échantillon illuminé par le faisceau durant plusieurs minutes, améliorant ainsi la précision et l'efficacité de sa caractérisation. D'autre part, afin d'évaluer les performances de la méthodologie de synchronisation du photodétecteur et du faisceau, la dynamique de ce dernier simule le mouvement à caractère brownien d'une ligne de lumière.

Dans les paragraphes suivants les procédures de détection et d'estimation de la position du faisceau lumineux sont présentées.

3.2 Détection d'un Faisceau

Dans le cadre de notre étude, deux types de faisceaux sont considérés. En effet, à terme, la méthodologie développée dans le cadre de nos travaux de recherche devra être intégrée sur une ligne de lumière sous rayonnement X à l'ESRF. L'accès à une source de lumière à rayons X étant réglementé, notre plateforme de prototypage est, quant à elle, dotée d'une diode laser. Il est donc nécessaire de considérer deux types de détection de faisceau.

3.2.1 Spécificités de la Détection du Faisceau Rayons X

La plateforme finale choisie par le Surface Science Laboratory de l'ESRF utilise un photodétecteur 2D pour acquérir une image des courants induits par les rayons X (voir la Fig. II.6). Ce photodétecteur offre une image de 512×512 pixels, avec une résolution de 16 bits. Dans ce contexte, la stratégie de localisation du faisceau consiste à effectuer un balayage à trame linéaire. Le faisceau est ainsi détecté avec une haute résolution en utilisant des trames inférieures à $1\mu\text{m}$. Ceci permet alors de détecter le faisceau à travers l'image du courant induit par les rayons X incidents.

3.2.2 Spécificités de la Détection du Faisceau Laser

Notre plateforme de prototypage est munie d'un photodétecteur sensible à la position (PSD) de la lumière incidente pour la détection du faisceau laser. Plus précisément, il s'agit d'un PSD à quatre quadrants qui lorsque les différents quadrants sont éclairés, vont générer des courants selon l'intensité lumineuse per. Ces courants sont ensuite amplifiés et convertis en tension V_i , avec $i = 1$ à 4. Il est alors possible de déterminer la position d'un faisceau laser sur le PSD, comme présenté dans le paragraphe 2.1.

3.2.3 Procédure de Détection du Faisceau

Pour une utilisation optimale de la plateforme de micromanipulation, une procédure automatisée de détection du faisceau est développée. Cette procédure consiste, tout d'abord, à déplacer linéairement le faisceau de lumière jusqu'à ce que le photodétecteur per un signal de mesure, comme schématisé sur

la Fig. IV.10. Durant cette phase, le faisceau laser est piloté par les deux étages du micromanipulateur. Une fois détecté, la stratégie consiste à positionner le maximum d'intensité au plus près du centre du photodétecteur, toujours au moyen des deux étages du micromanipulateur. En d'autres termes, il s'agit de faire en sorte que tous les quadrants reçoivent à peu près la même puissance lumineuse, soit : $V_1 \approx V_2 \approx V_3 \approx V_4$. Une fois cette procédure de centrage établie, le nano-translateur exécute alors la procédure de poursuite de faisceau sur la base des prédictions des estimateurs.

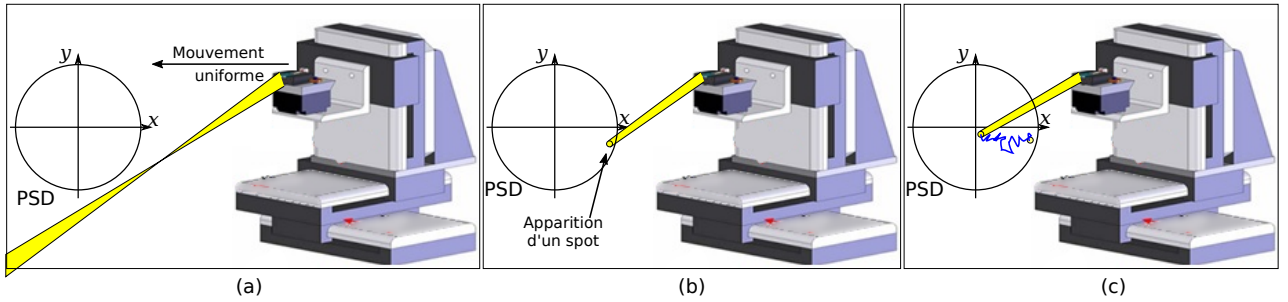


Figure IV.10 – Schématisation de la procédure de détection du faisceau laser par le PSD : (a) le faisceau laser est déplacé selon un déplacement uniforme jusqu'à ce que (b) le PSD détecte un signal de mesure ($V_s \neq 0$); puis (c) une procédure de centrage du faisceau est amorcée. Le faisceau est ici contrôlé par les deux étages du micromanipulateur.

3.3 Estimation de la Position du Faisceau

L'un des éléments clés de la stratégie de poursuite proposée réside dans la phase de prédiction de la position du faisceau sur le photodétecteur. Notamment, un second aspect important de cette phase de prédiction est qu'elle permet de fournir une estimation de la position même en cas de perte du signal de mesure ou d'occultation du faisceau. La littérature propose différentes méthodes de prédiction ou d'estimation [139]. Classiquement, les deux techniques principalement utilisées reposent sur les filtres de Kalman (KF) et particulièrement (PF). Les paragraphes suivants présentent ces deux approches.

3.3.1 Filtre de Kalman

Le filtre de Kalman [140] permet de résoudre de façon optimale le problème du filtrage linéaire, quand les bruits du système sont additifs et gaussiens. Le filtre de Kalman (KF) a été intensivement utilisé avec succès dans des applications très diverses [141]. Notamment, dans le domaine de la robotique, le filtre de Kalman offre des solutions efficaces pour des problèmes de suivi, de localisation, de navigation, et, dans une moindre mesure, de la cartographie et de localisation simultanées (SLAM). Dans ce paragraphe, le principe général du filtre de Kalman est expliqué.

Le but du filtrage KF est de suivre un état $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, connaissant des observations de cet état $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^p$.

Pour cela, on considère un système linéaire défini par sa représentation d'état discrète :

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_k \quad (\text{IV.27})$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{v}_k \quad (\text{IV.28})$$

avec $\mathbf{A}$ la matrice d'état, $\mathbf{C}$ la matrice d'observation, $\mathbf{w}_k$ et $\mathbf{v}_k$ des bruits additifs. Classiquement, pour le KF, les bruits $\mathbf{w}_k$ et $\mathbf{v}_k$ sont considérés blancs gaussiens, de covariance $\mathbf{Q}_k$ et $\mathbf{R}_k$ respectivement. Avant de commencer l'estimation, le KF doit être initialisé, on pose alors :

$$\hat{\mathbf{x}}_0 = \mathbf{x}_0 \quad (\text{IV.29})$$

$$\mathbf{P}_0 = \mathbf{Q}_0 \quad (\text{IV.30})$$

où $\mathbf{P}$ est la matrice de covariance de l'erreur correspondant à une mesure de la précision de l'état estimé. Pour résoudre le problème du filtrage, le KF exploite alors deux phases distinctes : une de prédiction et une de mise à jour.

La Phase de Prédiction. Cette phase utilise l'état estimé de l'instant précédent, $\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}$, et la covariance d'erreur, $\mathbf{P}_{k|k-1}$, pour produire une estimation *a priori* de l'état courant, $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$, et de la covariance d'erreur $\mathbf{P}_{k|k-1}$, toutes deux obtenues par :

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} \quad (\text{IV.31})$$

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{A} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{A}^T + \mathbf{Q}_k \quad (\text{IV.32})$$

La Phase de Mise à jour. Dans cette étape, les observations de l'instant courant, $\mathbf{y}_k$, sont utilisées pour corriger l'état prédit dans le but d'obtenir une estimation plus précise de l'état, $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$. Les innovations des estimations *a posteriori* de l'état et de la matrice de covariance peuvent alors être déterminées :

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k \left(\mathbf{y}_k - \mathbf{C} \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} \right) \quad (\text{IV.33})$$

$$\mathbf{P}_{k|k} = \mathbf{P}_{k|k-1} - \mathbf{K}_k \mathbf{C} \mathbf{P}_{k|k-1} \quad (\text{IV.34})$$

où $\mathbf{K}_k$ est le gain de Kalman optimal, défini par :

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{C}^T \left(\mathbf{C} \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{C}^T + \mathbf{R}_k \right)^{-1} \quad (\text{IV.35})$$

Application. Dans le cadre de la poursuite du faisceau, l'état du système linéaire correspond à la position et à la vitesse du faisceau dans le repère x - y du photodétecteur, soit : $\mathbf{x} = (x, y, \dot{x}, \dot{y})^T$. De même, une mesure de la position est fournie par le photodétecteur (voir aussi la Fig. IV.9), soit : $\mathbf{y} = (x, y)^T$. À partir du modèle dynamique du faisceau présenté au paragraphe 2.3 et des paramètres

indiqués dans le Tableau IV.1, la représentation d'état discrète du système linéaire d'expression générale (IV.27)-(IV.28), est alors donnée à partir du système d'équation (IV.21). Les matrices d'état $\mathbf{A}$ et d'observation $\mathbf{C}$ sont ensuite obtenues respectivement à partir des équations (IV.22) et (IV.24). Le bruit d'état est déterminé à partir de la variable aléatoire $\mathbf{w}_k = \mathbf{B}\mathbf{f}_k$, et sa matrice de covariance déterminée à partir de :

$$\mathbf{Q}_k = \begin{pmatrix} \sigma_x & 2b_x^2 & b_x & b_x \\ 2b_y^2 & \sigma_y & b_y^2 & b_y^2 \\ b_x & b_x & \sigma_x & 2b_x^3 \\ b_y & b_y^2 & 2b_y^3 & \sigma_y \end{pmatrix} \quad (\text{IV.36})$$

La matrice de covariance $\mathbf{R}_k$ associée au bruit de mesure $\mathbf{v}_k$, est quant à elle déterminée de manière empirique. Afin de refléter au mieux l'incertitude sur la position du centre du faisceau obtenu par le photodétecteur, cette matrice de covariance s'exprime ici par :

$$\mathbf{R}_k = \sigma_{\text{PSD}} \mathbb{I}_{2 \times 2} \quad (\text{IV.37})$$

avec $\sigma_{\text{PSD}} = 10^{-4} \mu\text{m}$ l'écart-type des mesures du photodétecteur, et $\mathbb{I}_{2 \times 2}$ la matrice identité de dimension 2.

La Fig. IV.11 illustre un exemple de résultat de simulation de la poursuite d'un faisceau exploitant le KF développé. Le faisceau considéré simule la dynamique d'un faisceau de rayons X animé d'un mouvement de type brownien. Ce résultat montre que le KF est en mesure de suivre parfaitement les mouvements du faisceau. Les courbes de la Fig. IV.12 montrent que l'erreur de poursuite 2D, soit $\varepsilon = \sqrt{(x - \hat{x}_{KF})^2 + (y - \hat{y}_{KF})^2}$, n'excède pas 9 nm. Le tableau IV.2 résume les statistiques de l'erreur de l'estimation de la position du faisceau. Le filtre de Kalman semble donc être adapté à notre problématique de poursuite de faisceau de lumière.

Tableau IV.2 – Statistiques de l'erreur d'estimation utilisant le filtre de Kalman

Erreur Moyenne	Écart-type	RMSE [†]
2.56 nm	1.41 nm	2.99 nm

[†]RMS ("root-mean-square"), correspond à l'erreur quadratique moyenne.

3.3.2 Filtre Particulaire

Le filtre de Kalman est optimal lorsque la dynamique du système est linéarisable (ou faiblement non linéaire dans le cas du filtre de Kalman étendu), et que le bruit est de nature blanc gaussien. Ces hypothèses sont cependant pas toujours pleinement satisfaites dans des contextes pratiques. En particulier, dans le cadre de notre étude, le faisceau suit un mouvement de type brownien, impliquant

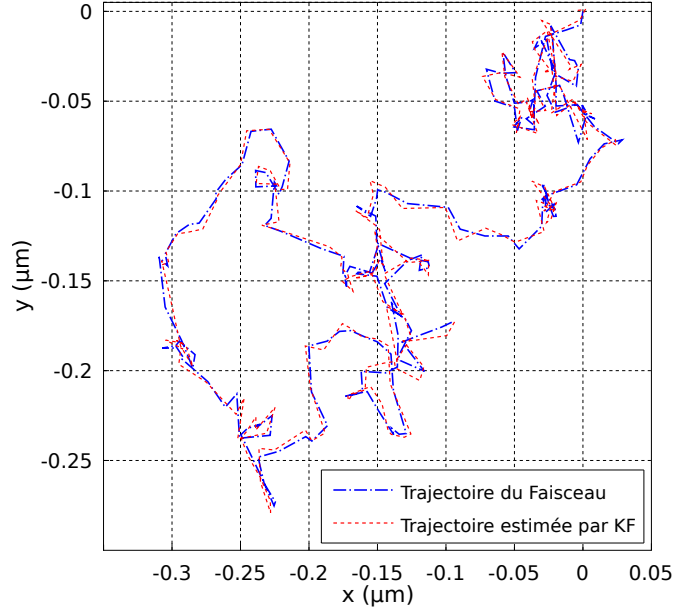


Figure IV.11 – Trajectoires 2D de la simulation de la poursuite du faisceau en utilisant un filtre de Kalman.

que le faisceau peut potentiellement à chaque instant partir dans une direction quelconque. Pour capturer ce type de mouvement, des méthodes basées sur un échantillonnage de Monte Carlo ont été proposées [142]. Pour cela, un ensemble d'échantillons d'états possibles représente alors la distribution de probabilités empirique de l'état du système. Chaque membre de l'ensemble est propagé jusqu'à l'instant suivant à l'aide du modèle dynamique, puis déplacé de nouveau en fonction de l'observation à ce nouvel instant. C'est dans ce contexte que le filtre particulaire (PF) a été développé [143]. La loi de filtrage est alors échantillonnée à l'aide de particules (équivalentes aux membres d'ensemble) qui sont déplacées lors de la phase de prédiction, et affectées d'un poids pendant la phase de correction.

Principes Généraux. Les filtres particulaires (PF) font l'hypothèse que les états $\mathbf{x}_k$ forment un processus de Markov (caché) avec une distribution initiale $p(\mathbf{x}_0)$, et une distribution de transition $p(\mathbf{x}_k|\mathbf{x}_{k-1})$. Les observations $\mathbf{y}_k$ sont indépendantes conditionnellement connaissant le processus $\mathbf{x}_k$, et ont une distribution $p(\mathbf{y}_k|\mathbf{x}_k)$. Le système est ainsi modélisé par une chaîne de Markov décrit³ par :

$$\mathbf{x}_k|\mathbf{x}_{k-1} \stackrel{\text{iid}}{\sim} p(\mathbf{x}_k|\mathbf{x}_{k-1}) \quad (\text{IV.38})$$

$$\mathbf{y}_k|\mathbf{x}_k \stackrel{\text{iid}}{\sim} p(\mathbf{y}_k|\mathbf{x}_k) \quad (\text{IV.39})$$

Pour évaluer la loi complète du filtrage on établit une formule récursive issue de la loi de Bayes,

3. On note $\mathbf{x} \sim p(\mathbf{x})$ le fait que la variable aléatoire $\mathbf{x}$ suit la loi de densité de probabilité $p(\mathbf{x})$, ainsi que le fait que le nombre $\mathbf{x}$ est simulé selon la loi de densité de probabilité $p(\mathbf{x})$. Donc $\mathbf{x} \stackrel{\text{iid}}{\sim} p(\mathbf{x})$ signifie également que la variable aléatoire $\mathbf{x}$ correspond à un nombre indépendamment simulé selon la loi de densité de probabilité $p(\mathbf{x})$.

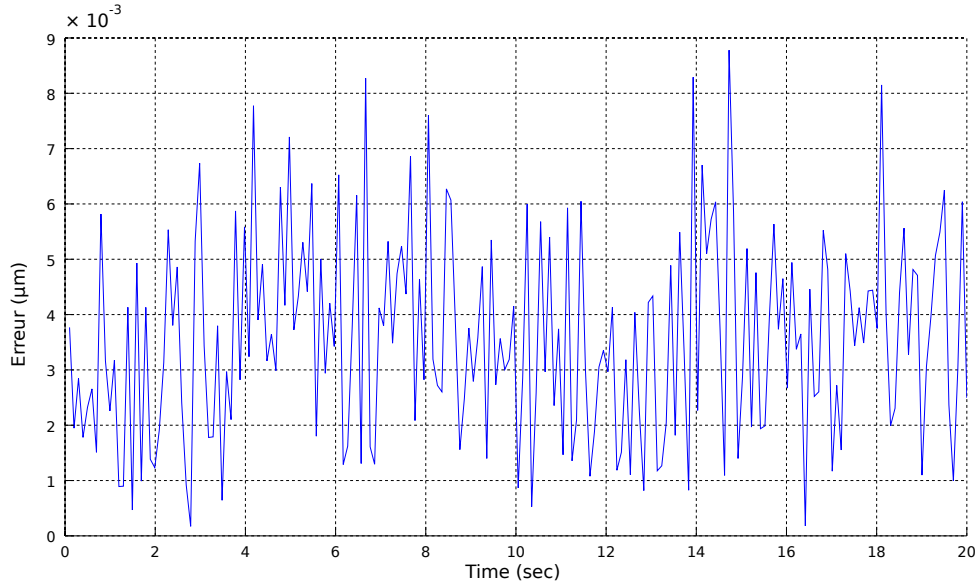


Figure IV.12 – Courbe de l'erreur de poursuite 2D du faisceau : $\varepsilon = \sqrt{(x - \hat{x}_{KF})^2 + (y - \hat{y}_{KF})^2}$, en utilisant un filtre de Kalman.

soit :

$$p(\hat{\mathbf{x}}_{0:k} | \mathbf{y}_{1:k}) = \frac{p(\mathbf{y}_k | \hat{\mathbf{x}}_k, \mathbf{y}_{1:k-1}) p(\hat{\mathbf{x}}_{0:k} | \mathbf{y}_{1:k-1})}{p(\mathbf{y}_k | \mathbf{y}_{1:k-1})} \quad (\text{IV.40})$$

$$= p(\hat{\mathbf{x}}_{0:k-1} | \mathbf{y}_{1:k-1}) \frac{p(\mathbf{y}_k | \hat{\mathbf{x}}_k) p(\hat{\mathbf{x}}_k | \hat{\mathbf{x}}_{k-1})}{p(\mathbf{y}_k | \mathbf{y}_{1:k-1})} \quad (\text{IV.41})$$

$$\propto p(\hat{\mathbf{x}}_{0:k-1} | \mathbf{y}_{1:k-1}) p(\mathbf{y}_k | \hat{\mathbf{x}}_k) p(\hat{\mathbf{x}}_k | \hat{\mathbf{x}}_{k-1}) \quad (\text{IV.42})$$

Pour obtenir une estimation, comme pour le KF, on considère généralement deux étapes :

1. de **prédiction** :

$$p(\hat{\mathbf{x}}_k | \mathbf{y}_{1:k-1}) = \int p(\hat{\mathbf{x}}_{k-1} | \mathbf{y}_{1:k-1}) p(\hat{\mathbf{x}}_k | \hat{\mathbf{x}}_{k-1}) d\mathbf{x} \quad (\text{IV.43})$$

2. et de **mise à jour** :

$$p(\hat{\mathbf{x}}_k | \mathbf{y}_{1:k}) = \frac{p(\mathbf{y}_k | \hat{\mathbf{x}}_k) p(\hat{\mathbf{x}}_k | \mathbf{y}_{1:k-1})}{p(\mathbf{y}_k | \mathbf{y}_{1:k-1})} \quad (\text{IV.44})$$

L'approche Monte-Carlo pour évaluer la phase de prédiction consiste à utiliser des réalisations d'une variable aléatoire distribuée suivant la loi *à posteriori* pour calculer des moyennes empiriques. L'évaluation de la loi⁴ de filtrage complète (IV.40) s'obtient alors suivant le principe de l'échantillonnage préférentiel. En effet, il n'est généralement pas possible de simuler la direction des échantillons suivant la loi (IV.41). Pour cela, n échantillons, ou particules, sont tirés selon une loi proche, appelée loi d'importance, notée $\pi(\hat{\mathbf{x}}_{0:k} | \mathbf{y}_{1:k})$. Afin d'obtenir une formulation séquentielle de l'échantillonnage,

4. Il est à noter que la solution analytique en considérant un modèle linéaire et des bruits blancs gaussiens conduirait au filtre de Kalman.

la loi d'importance est généralement définie selon la forme récursive suivante :

$$\pi(\hat{\mathbf{x}}_{0:k}|\mathbf{y}_{1:k}) = \pi(\hat{\mathbf{x}}_{0:k-1}|\mathbf{y}_{1:k-1}) \pi(\hat{\mathbf{x}}_k|\mathbf{y}_{1:k}, \hat{\mathbf{x}}_{0:k-1}) \quad (\text{IV.45})$$

À chaque particule $\hat{\mathbf{x}}_k^{(i)} \sim \pi(\hat{\mathbf{x}}_k^{(i)}|\mathbf{y}_{1:k})$, avec $i = 1..n$, est alors affectée un poids $w_k^{(i)}$ proportionnel à la vraisemblance, défini par :

$$w_k^{(i)} = \frac{p(\hat{\mathbf{x}}_k^{(i)}|\mathbf{y}_{1:k})}{\pi(\hat{\mathbf{x}}_k^{(i)}|\mathbf{y}_{1:k})} = \frac{p(\hat{\mathbf{x}}_k^{(i)}) p(\mathbf{y}_{1:k}|\hat{\mathbf{x}}_k^{(i)})}{\pi(\hat{\mathbf{x}}_k^{(i)}|\mathbf{y}_{1:k})} \quad (\text{IV.46})$$

En substituant (IV.42) et (IV.45) dans (IV.46), il est alors possible d'exprimer une relation de récurrence sur les poids d'importance, à savoir :

$$w_k^{(i)} = w_{k-1}^{(i)} \frac{p(\mathbf{y}_k|\hat{\mathbf{x}}_k^{(i)}) p(\hat{\mathbf{x}}_k|\hat{\mathbf{x}}_{k-1}^{(i)})}{\pi(\hat{\mathbf{x}}_k^{(i)}|\hat{\mathbf{x}}_{0:k-1}^{(i)}, \mathbf{y}_{1:k})} \quad (\text{IV.47})$$

Généralement, le poids d'une particule est ensuite normalisé, soit :

$$\varpi_k^{(i)} = \frac{w_k^{(i)}}{\sum_j^N w_k^{(j)}} \quad (\text{IV.48})$$

Cette approche, dans laquelle les poids sont accumulés au cours du temps, correspond à l'algorithme d'échantillonnage d'importance séquentiel, ou "sequential importance sampling" (SIS). Toutefois, cette méthode souffre d'un problème de dégénérescence. En effet, seules quelques particules conservent un poids significatif et contribuent utilement à l'estimation [144]. Une première amélioration de la méthode consiste à éliminer ou dupliquer les particules selon la valeur de leur poids d'importance, c'est-à-dire de faire une sélection parmi les particules. Gordon *et al.* [145] ont, les premiers, introduit une étape de ré-échantillonnage dans l'algorithme du SIS, où à chaque particule $\mathbf{x}_k^{(i)}$ un nombre de particules filles $n^{(j)}$ leur sont associés. Plus précisément, les particules corrigées sont calculées en simulant $n^{(j)}$ nouvelles particules selon une loi de mélange de variables indépendantes et identiquement distribuées. Différentes stratégies de mélange et de sélection sont proposées [141, 143]. Classiquement, la loi conjointe suivante est généralement privilégiée :

$$p(\hat{\mathbf{x}}_k|\mathbf{y}_{1:k-1}) \approx \sum_{i=1}^n \varpi_k^{(i)} \delta(\hat{\mathbf{x}}_k - \hat{\mathbf{x}}_k^{(i)}) \quad (\text{IV.49})$$

où δ est la distribution de Dirac. Cette phase de sélection des particules correspond à l'algorithme "bootstrap" [143, 146]. Néanmoins, malgré la phase de sélection des particules, ils arrivent que la plupart des particules reçoivent un poids trop faible, et que le ré-échantillonnage ne concerne qu'un faible nombre de particules.

Filtrage avec Ré-échantillonnage par Importance (SIR). Pour remédier aux défauts de dégénérescences des approches précédentes ; différentes solutions sont proposées dans la littérature [141, 143]. Notamment, le ré-échantillonnage des particules permet de limiter l'impact de ces dégénérescences. D'autre part, Doucet *et al.* ont montré que le choix optimal de la densité d'importance est la distribution de probabilité suivante [144] :

$$\pi(\hat{\mathbf{x}}_k | \hat{\mathbf{x}}_{0:k-1}, \mathbf{y}_{1:k}) = p(\hat{\mathbf{x}}_k | \hat{\mathbf{x}}_{0:k-1}, \mathbf{y}_{1:k}) \quad (\text{IV.50})$$

Ce choix de fonction d'importance minimise alors la variance des poids d'importance. Le filtre particulaire avec ré-échantillonnage par importance, ou "sequential importance resampling" (SIR), répond pleinement à ces propositions [141, 144]. C'est pour ces raisons que le filtre particulaire SIR est plus particulièrement considéré dans nos travaux de recherche (voir aussi l'Algorithme 2).

Dans l'algorithme du filtre particulaire SIR, l'étape de prédiction consiste à générer un ensemble de particules selon la densité d'importance (IV.50). Lors de l'étape de correction les particules de poids faible sont éliminées, tandis que celles de poids fort sont dupliquées. Cette procédure de redistribution des particules s'effectue à travers un ré-échantillonnage multinomial. Plus précisément, une estimation du nombre effectif de particules n_{eff} est établie, selon :

$$n_{eff} = \frac{n}{1 + \text{Var}(\varpi_k^{(i)})} \quad (\text{IV.51})$$

$$\approx \frac{1}{\sum_i^n (\varpi_k^{(i)})^2} \quad (\text{IV.52})$$

Dans la mesure où le nombre exact (IV.51) ne peut être déterminé, son approximation (IV.52) est généralement considérée [144]. Puis, si ce nombre effectif de particules est plus petit qu'un seuil donné : $n_{eff} < n_T$, alors on effectue le ré-échantillonnage de manière à répartir les particules de sorte qu'elles soient équiréparties. Ces différentes étapes sont présentées dans l'Algorithme 2. Notons enfin, que ce genre d'approche est proche des algorithmes de type génétique : une population de particules est soumise à un mécanisme de mutation, correspondant à l'étape de prédiction, puis à un mécanisme de sélection, correspondant à l'étape de correction avec ré-échantillonnage.

Application. Comme précédemment, l'état du système linéaire correspond à la position et à la vitesse du faisceau dans le repère x - y du photodétecteur, soit : $\mathbf{x} = (x, y, \dot{x}, \dot{y})^T$. Les matrices d'état (IV.22), d'observation (IV.24), de covariance $\mathbf{f}_k \sim \mathcal{N}(0, \mathbf{\Sigma}_k)$ et $\mathbf{v}_k \sim \mathcal{N}(0, \mathbf{R}_k)$ correspondent à celles issues de la modélisation dynamique du faisceau (IV.21). De plus, la loi d'importance optimale est définie par la loi normale suivante [144] :

$$\pi(\hat{\mathbf{x}}_k | \hat{\mathbf{x}}_{k-1}, \mathbf{y}_k) = \mathcal{N}(\mathbf{m}_k, \mathbf{\Upsilon}_k) \quad (\text{IV.53})$$

Algorithm 2 Le Filtre Particulaire avec ré-échantillonnage par importance (SIR)

Initialisation : ▷ Pour $k = 0$, indépendamment pour tout $i = 1 : n$
 $\hat{\mathbf{x}}_0^{(i=1:n)} \stackrel{\text{iid}}{\sim} p(\mathbf{x}_0)$
 $w_0^{(i=1:n)} \leftarrow 1/n$
Récursion : ▷ Pour tout $k \geq 1$
Prédiction :
 for $i = 1 : n$ **do**
 Tirer $\mathbf{x}_k^{(i)} \sim \pi(\hat{\mathbf{x}}_k | \hat{\mathbf{x}}_{0:k-1}^{(i)}, \mathbf{y}_{1:k})$ ▷ Mutation
 Calculer les poids d'importance $w_k^{(i)}$ selon (IV.47) ▷ Vraisemblance
 end for
Correction :
 for $i = 1..n$ **do**
 Normaliser les poids $\varpi_k^{(i)}$ selon (IV.48)
 end for
 Calculer le nombre effectif de particules n_{eff} selon (IV.52)
 if $n_{eff} < n_T$ **then** ▷ Ré-échantillonnage (sélection)
 for $i = 1..n$ **do**
 $u \leftarrow [0; 1]$
 $j \leftarrow 1$
 while $w_k^{(j)} + \dots + w_k^{(j)} < u$ **do**
 $j \leftarrow j + 1$
 end while
 Tirer un nouvel échantillon $\tilde{\mathbf{x}}_k^{(j)}$ selon (IV.49)
 $w_k^{(j)} \leftarrow 1/n$
 end for
 $\mathbf{x}_k^{(i=1:n)} \leftarrow \tilde{\mathbf{x}}_k^{(j=1:n)}$
 else
 Les particules $\mathbf{x}_k^{(i=1:n)}$ et poids d'importances restent inchangés
 end if
 $\hat{\mathbf{x}}_k \leftarrow \sum_i^n w_k^{(i)} \mathbf{x}_k^{(i)}$ ▷ Estimation de l'état

où

$$\mathbf{\Upsilon}_k^{-1} = \Sigma_k^{-1} + \mathbf{C}^T \mathbf{R}_k^{-1} \mathbf{C} \quad (\text{IV.54})$$

$$\mathbf{m}_k = \mathbf{\Upsilon}_k \left(\Sigma_k^{-1} \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{C}^T \mathbf{R}_k^{-1} \mathbf{y}_k \right) \quad (\text{IV.55})$$

Ainsi, les filtres particuliers, ici SIR, sont simples de mise en œuvre et ils convergent vers le filtre bayésien optimal lorsque le nombre de particules n tend vers l'infini [147]. Le choix du nombre n de particules a donc un fort impact sur la précision de l'estimation. Cependant, un trop grand nombre de particules va impacter également les temps de calcul.

Pour étudier les performances du PF, et de permettre de le comparer au filtre de Kalman, la même trajectoire brownienne précédente est considérée (voir le paragraphe 3.3.1 et la Fig. IV.11). La

Fig. IV.13 présente un résultat de simulation de poursuite de trajectoire 2D avec un PF comportant $n = 80$ particules. Comme pour le KF, le PF est en mesure de suivre parfaitement le mouvement brownien d'un faisceau de lumière. La figure IV.14 montre la courbe de l'erreur de poursuite 2D. Le tableau IV.3 résume les statistiques de l'erreur de l'estimation de la position du faisceau.

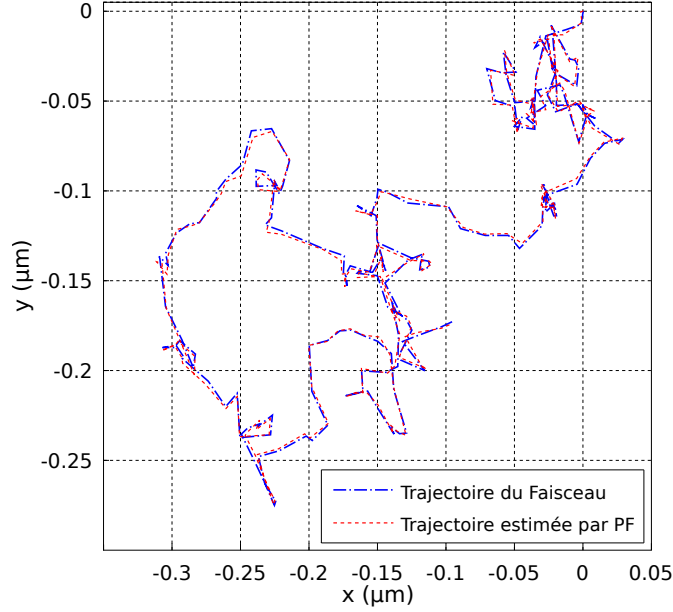


Figure IV.13 – Simulations des trajectoires 2D de la poursuite du faisceau en utilisant un filtre de particulaire (SIR).

Tableau IV.3 – Statistiques de l'erreur d'estimation utilisant le filtre particulaire

Erreur Moyenne	Écart-type	RMSE
1.94nm	1.08nm	2.22nm

4 Résultats Expérimentaux

Nous présentons dans cette section la validation expérimentale de la stratégie de synchronisation du faisceau que nous venons de décrire. L'architecture adoptée pour évaluer cette stratégie est présentée sur la Fig. IV.9. Avant de valider et évaluer les performances des approches proposées, nous présentons dans le paragraphe suivant le contexte dans lequel les expérimentations ont été conduites.

4.1 Contexte Expérimental

Pour évaluer expérimentalement les performances des différents méthodes considérées d'estimation du mouvement du faisceau de lumière, celui-ci doit avoir la même dynamique que celle d'un faisceau de rayons X. De même, afin de pouvoir évaluer les performances de la synchronisation d'un faisceau

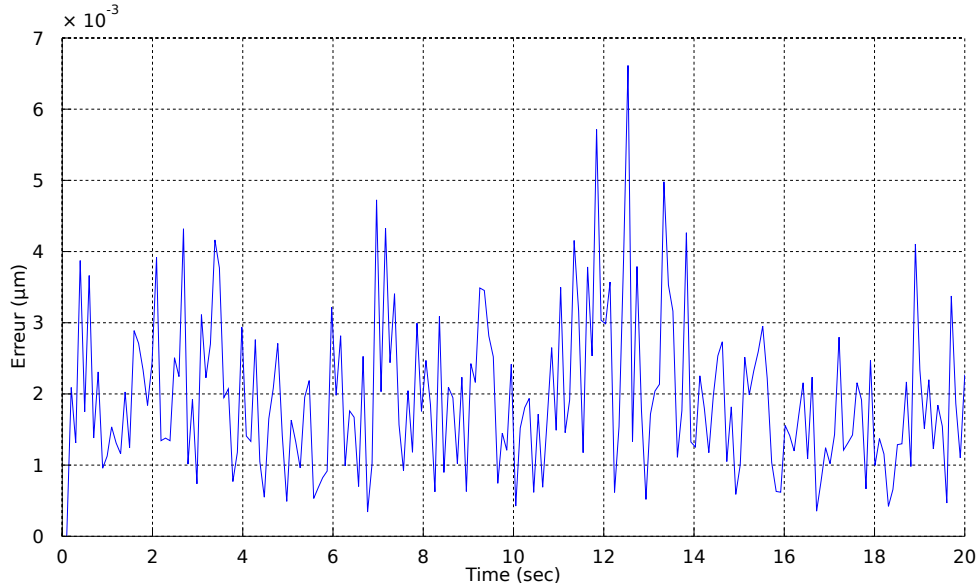


Figure IV.14 – Les courbes d’erreur de poursuite 2D du faisceau, en utilisant un filtre particulaire.

de lumière, le photodétecteur doit être asservi. Ainsi, le banc expérimental comprend les deux micromanipulateurs à double-étage : un micromanipulateur simulant les différents mouvements aléatoires du faisceau lumineux (générateur de trajectoire) et l’autre micromanipulateur réalisant le suivi de trajectoire à partir de la lumière repart le photodétecteur (suivi de trajectoire), comme schématisé sur la Fig. IV.1. La Fig. IV.15 décrit la plateforme expérimentale considérée. Sur cette plateforme de prototypage, le faisceau lumineux est généré à partir d’une diode laser d’une longueur d’onde de 635nm (rouge), et le photodétecteur est un PSD à quatre quadrants. Un microscope optique (Mituyo, $\times 50$) permet d’observer la vue de dessus des expérimentations, et un microscope numérique (TIMM, $\times 150$) permet de voir le déplacement du spot lumineux sur le PSD. Enfin, l’ensemble des manipulations expérimentales sont réalisées dans une "salle grise" où la température est conditionnée à $T = 20^\circ\text{C}$.

4.2 Validation de la Détection

Afin d’évaluer la stratégie de poursuite de manière optimale, dans un premier temps, le faisceau laser est déplacé à travers une procédure de positionnement automatisée, comme indiqué au paragraphe 3.2. En vue de se rapprocher des conditions de détection d’un faisceau de rayons X, le micromanipulateur, auquel est fixé la diode laser, est déplacé selon un mouvement constitué d’une composition d’un déplacement linéaire, c’est-à-dire un déplacement constant dans une direction donnée, auquel est ajouté une perturbation brownienne. Puis, une fois que le PSD perçoit un signal (ie., $V_s \neq 0$), le contrôleur maître/esclave positionne le faisceau au plus près du centre du photodétecteur. Enfin, la procédure de poursuite du faisceau est activée en utilisant l’estimation de sa position, comme indiquée sur la Fig. IV.9. La Fig. IV.16 illustre les mesures de tension repart le PSD lors de la phase d’approche du faisceau laser vers le PSD.

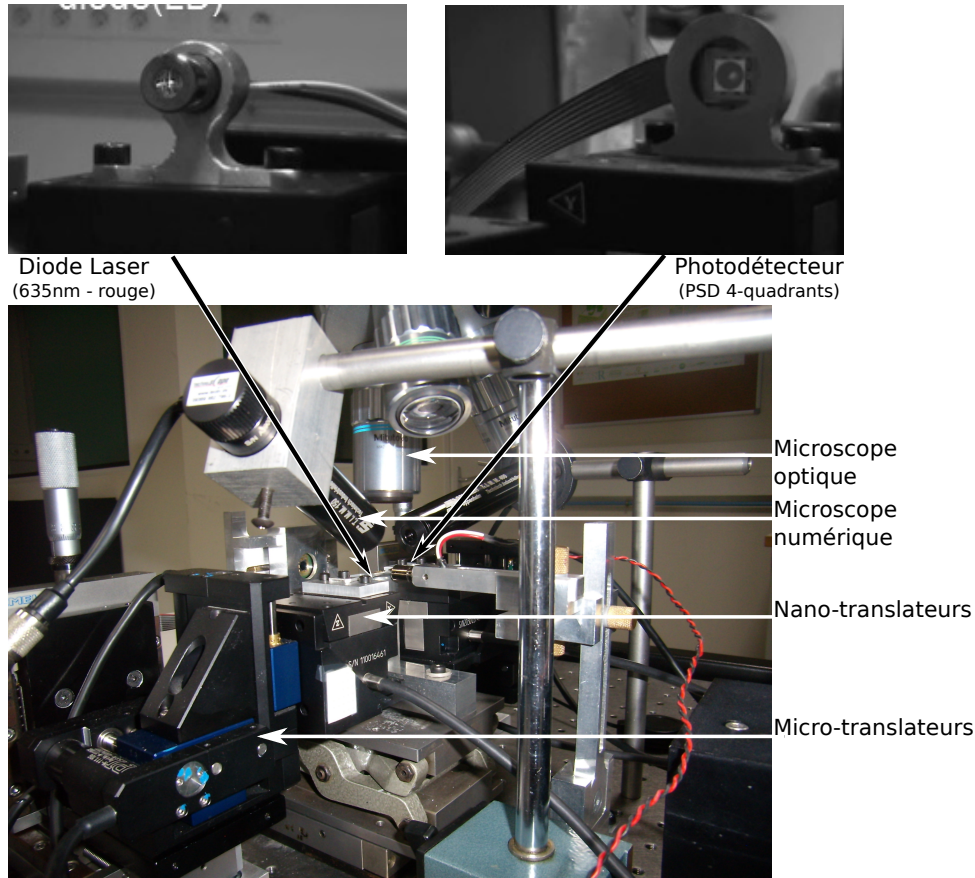


Figure IV.15 – La plateforme expérimentale pour l'évaluation de la synchronisation de faisceau de lumière : le photodétecteur et la diode laser sont placés sur les deux micromanipulateurs.

La Fig. IV.17 présente un exemple de résultat de cette procédure de centrage. Elle fait apparaître la trajectoire 2D du faisceau laser, ici perturbée par un bruit brownien, ainsi que la poursuite de ce faisceau dans le plan $x-y$ du PSD. Ce résultat démontre que le micromanipulateur à double étage est à même de centrer le faisceau laser proche du centre du PSD, malgré la présence d'une perturbation brownienne. Plus précisément, l'estimation du déplacement du faisceau, ici basé sur un filtre de Kalman, est exploité par le contrôleur maître/esclave lors de la phase de poursuite. Les performances de l'estimateur seront évaluées plus en détail dans les paragraphes suivants. Enfin, la Fig. IV.18 montre l'évolution de l'erreur de poursuite 2D du faisceau laser. On peut voir une première phase de convergence où l'estimation est initialisée avec une valeur assez éloignée de la position réelle du faisceau. Rapidement (ici en moins de 1s), le contrôleur maître/esclave, parvient à se stabiliser sur le faisceau, et à suivre ses mouvements avec une erreur moyenne de 9.86 nm ; un écart-type de 6.79 nm, respectant ainsi les spécifications de notre cahier des charges.

Une fois centré sur le PSD, les performances des estimateurs considérés sont évaluées. Afin de tester l'efficacité de la poursuite du faisceau laser aux échelles nanométriques, seuls les nano-translators sont alors utilisés. Les paragraphes suivants présentent les résultats de la synchronisation du PSD

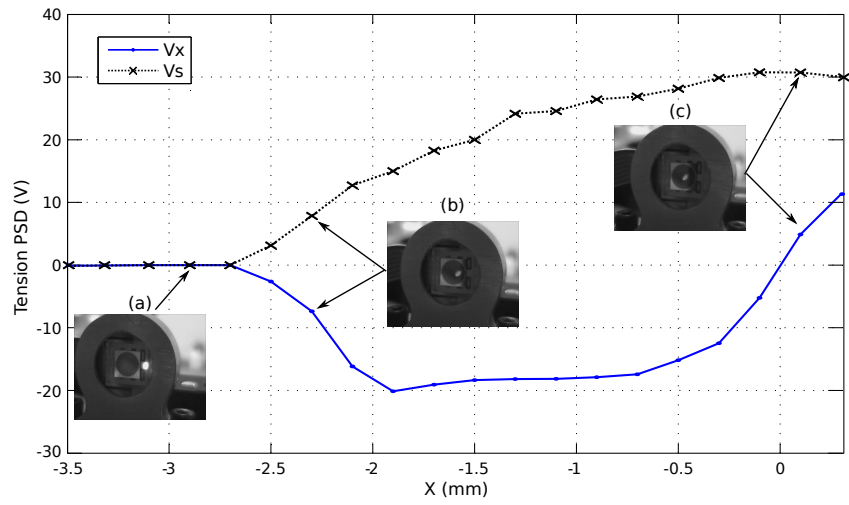


Figure IV.16 – Résultats de la détection du faisceau laser par le PSD.

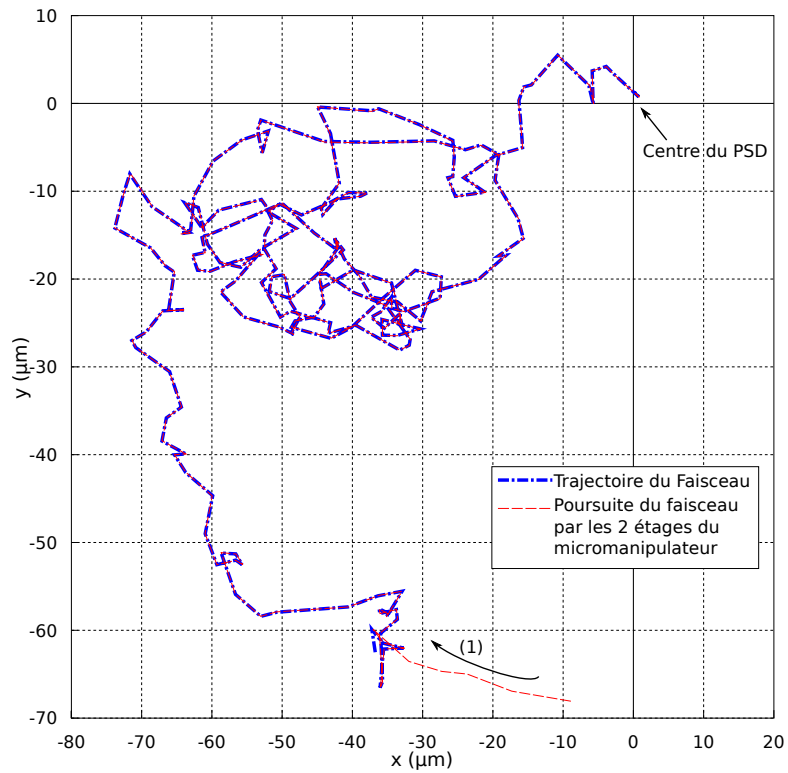


Figure IV.17 – Résultats du centrage du faisceau laser en utilisant un filtre Kalman (KF).

avec le faisceau en utilisant les filtres de Kalman et particulaire.

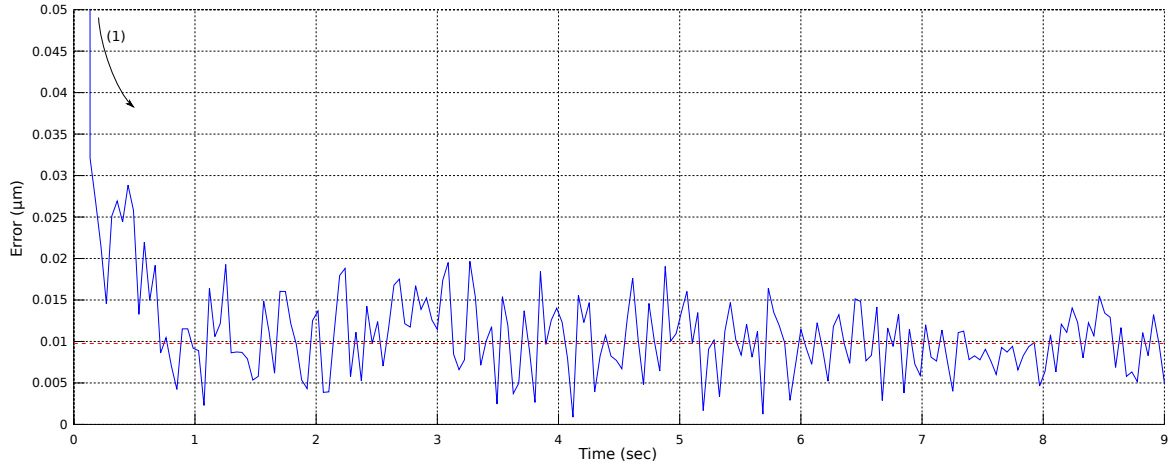


Figure IV.18 – Courbe de l’erreur de poursuite 2D lors du centrage du faisceau. La ligne pointillé rouge correspond à l’erreur moyenne de 9.86 nm.

4.3 Validation Expérimentale des Estimateurs

Nous comparons ici les performances des deux estimateurs. Lors du démarrage de la poursuite, le faisceau laser est animé d’un même mouvement brownien dans les deux cas. La Fig. IV.19 montre des résultats expérimentaux obtenus pour la synchronisation du PSD avec le faisceau laser en utilisant un filtre Kalman (la courbe IV.19(a)) et un filtre particulaire (la courbe IV.19(b)). Les tracés bleus correspondent à la trajectoire brownienne envoyée au micromanipulateur supportant la diode laser. On constate d’une part que les deux micromanipulateurs parviennent à suivre efficacement les consignes de position issues du générateur de trajectoire ou encore des estimateurs.

Et d’autre part, ces résultats démontrent également que les deux estimateurs parviennent à suivre parfaitement la position du faisceau laser. Toutefois, il apparaît que, de prime abord, le PF parvient à suivre plus fidèlement la trajectoire du faisceau laser. En effet, la Fig. IV.20 présente les courbes des erreurs de poursuite, soit $\varepsilon = \sqrt{(x - \hat{x})^2 + (y - \hat{y})^2}$, pour les deux estimateurs. Ces courbes d’erreur présentent une première phase où les estimateurs convergent vers la prédiction optimale. L’importance de cette phase de convergence dépend principalement des conditions initiales de l’état, $\mathbf{x}_0$, mais aussi de la matrice de covariance Σ_0 de la perturbation brownienne : plus ces conditions initiales sont proches de la dynamique du faisceau, plus vite les estimateurs parviennent à le suivre.

Une fois cette phase de convergence réalisée, les estimateurs ont une dynamique d’erreur relativement stable. Le Tableau IV.4 résume les statistiques des erreurs de poursuite. En premier lieu, il s’avère que les performances expérimentales des estimateurs sont légèrement moins bonnes que celles obtenues en simulation. Cette différence provient de deux principaux facteurs :

1. Bien que les dynamiques des micromanipulateurs à double étage aient été identifiées, et qu’un contrôleur robuste soit employé pour compenser les non-linéarités, il subsiste des incertitudes qu’il faudrait intégrer dans le modèle dynamique des estimateurs.

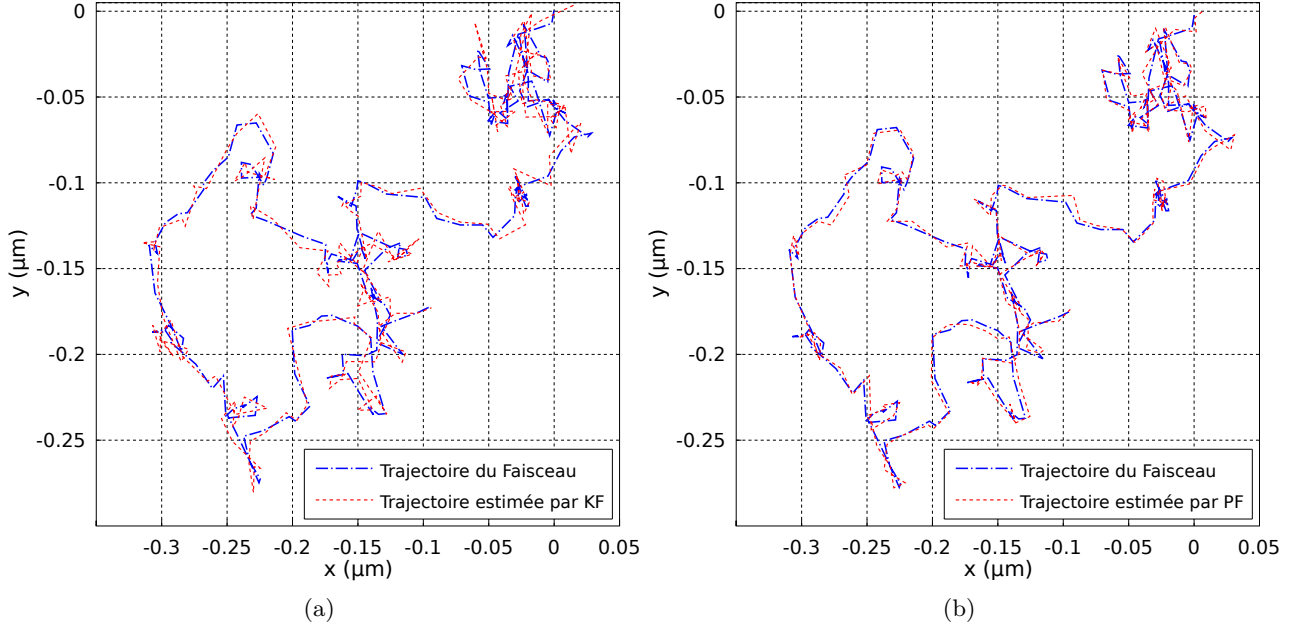


Figure IV.19 – Résultats expérimentaux de la poursuite du faisceau laser en utilisant : (a) un filtre Kalman (KF) et (b) un filtre particulaire (PF).

2. La dynamique propre du faisceau laser n'est pas prise en compte, et elle s'ajoute donc à la dynamique brownienne simulant le faisceau de rayons X. Ainsi, il faudrait identifier la dynamique du faisceau laser, et l'intégrer à la trajectoire brownienne générée.

Tableau IV.4 – Statistiques de l'erreur d'estimation de la poursuite 2D du faisceau laser.

	Erreur Moyenne	Écart-type	RMSE
KF	6.92nm	3.79nm	7.88nm
PF	3.25nm	1.76nm	3.70nm

4.4 Comparaison et Analyse des Performances des Estimateurs

En vue d'analyser les différences entre le filtre de Kalman et le filtre particulaire, des expérimentations complémentaires ont été réalisées. La Fig. IV.21 présente l'évolution des erreurs moyennes lorsque la vitesse moyenne à l'équilibre du faisceau laser varie entre $1 \mu\text{m/s}$ et $4 \mu\text{m/s}$. Tout d'abord, malgré l'augmentation de la dynamique du faisceau laser, les deux estimateurs parviennent à le suivre efficacement avec une erreur $< 90 \text{ nm}$. Il est donc possible de positionner de manière très précise un objet submicrométrique sous un faisceau de lumière.

D'autre part, ces résultats prouvent encore une fois que le filtre particulaire fournit une meilleure estimation sur la position du faisceau. L'origine de ces différentes performances vient du fait que le bruit d'état, $\mathbf{f}_k$, et le bruit d'observation, $\mathbf{v}_k$ du modèle dynamique du faisceau (IV.21) déterminent

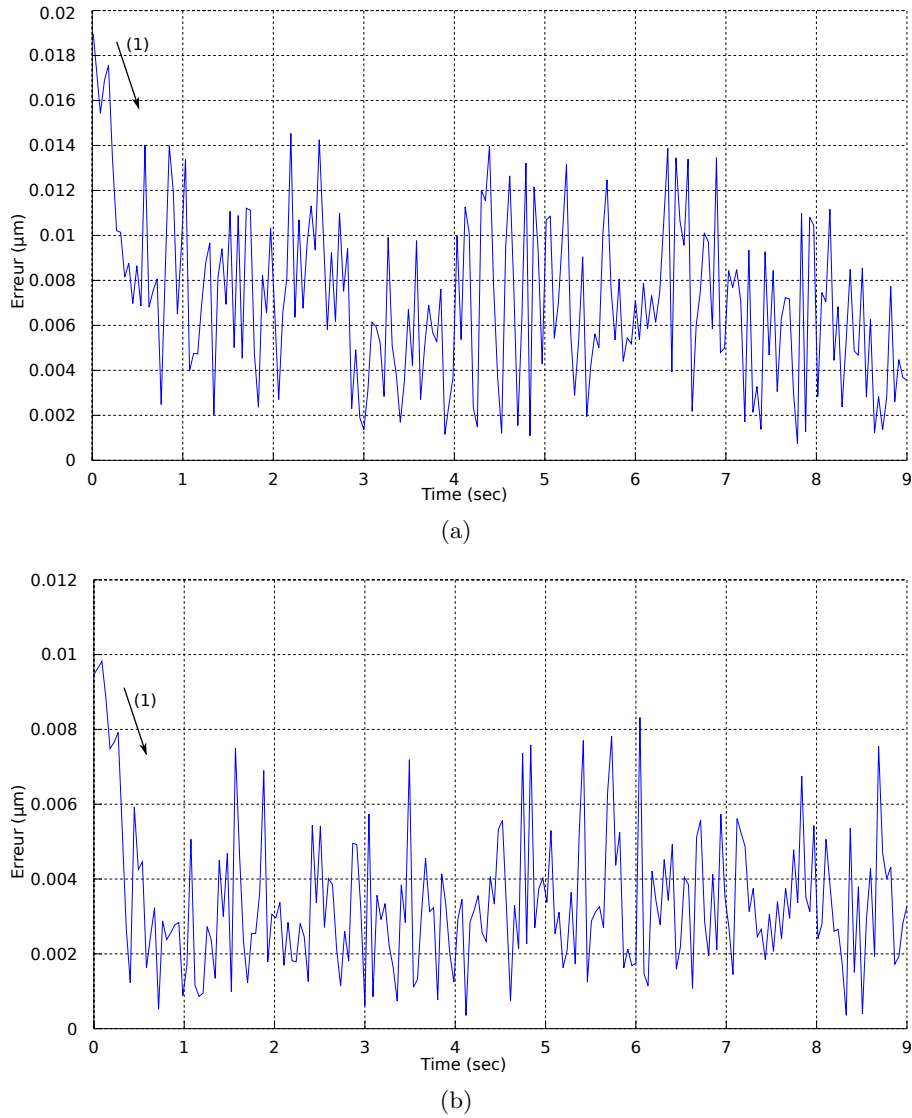


Figure IV.20 – Courbes de l’erreur de poursuite 2D du faisceau laser, en utilisant : (a) un filtre Kalman (KF) et (b) un filtre particulaire (PF).

la fiabilité de la poursuite des estimateurs. Classiquement, pour de faibles perturbations le KF offre des performances supérieures au PF, qui dans ce cas trouve généralement des difficultés à suivre la trajectoire de référence. Inversement, pour des perturbations importantes, le KF tend à suivre le faisceau selon sa vitesse moyenne et sa variance. Or, dans le cas d’un mouvement brownien la vitesse, $\left(\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}\right)^T$, subit des changements d’accélération liés à la force d’excitation $(f_x(t), f_y(t))^T$, et c’est elle qui possède un caractère gaussien (voir aussi l’équation (IV.16)). Lors de l’établissement du modèle d’état discret de la dynamique du faisceau (IV.21), c’est sa vitesse $(\dot{x}_k, \dot{y}_k)$ qui est considérée suivre une distribution gaussienne. Le KF est l’estimateur optimal que lorsque la dynamique du système est linéarisable, et que le bruit d’état est effectivement de moyenne nulle et de variance bien déterminée. Le

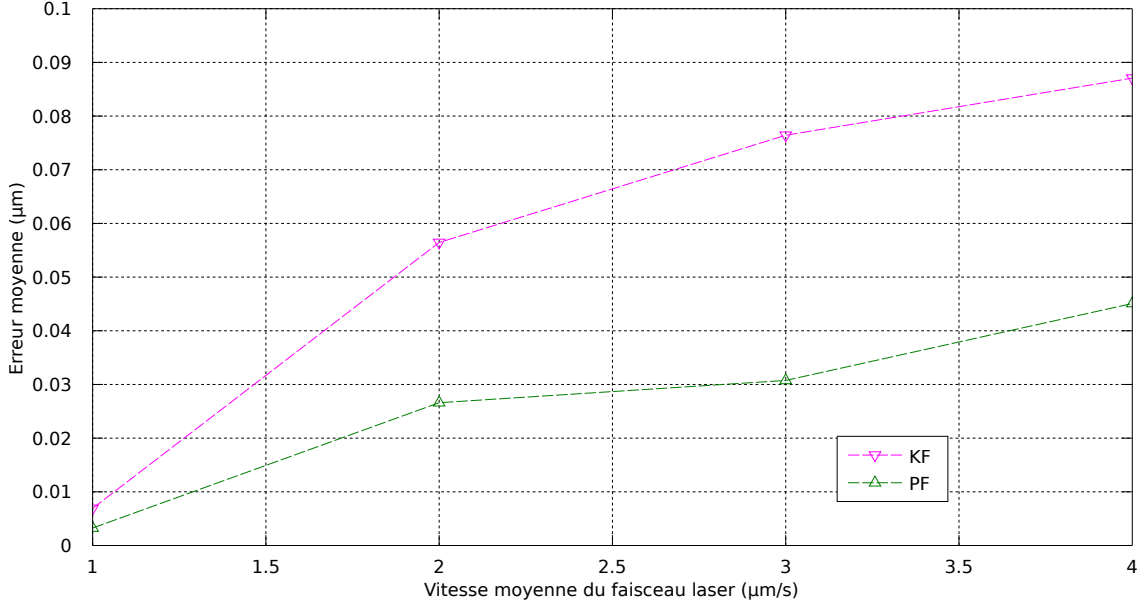


Figure IV.21 – Comparaison des erreurs moyennes des estimations de la position du faisceau en utilisant le filtre de Kalman (KF) et le filtre particulaire (PF), en fonction de la vitesse moyenne du faisceau laser.

PF quant à lui parvient à compenser cet aspect, même pour d'importantes perturbations dynamiques sur le faisceau de lumière. Plus précisément, lors du tirage aléatoire des particules, certaines d'entre elles vont dans le même sens que le faisceau laser et donc guider l'estimateur vers celui-ci.

D'autre part, l'erreur dans la poursuite du faisceau est liée à la discrétisation de la dynamique brownienne (IV.16) qui correspond à une équation différentielle stochastique, c'est-à-dire à un processus stochastique de Wiener. Dans ce contexte, le bruit blanc gaussien de l'accélération n'est pas directement intégrable au sens des intégrales de Riemann. Plus précisément, il faudrait considérer l'intégrale d'Itô appliquée au processus stochastique [148], et l'équation (IV.18) se ré-écrivait alors comme suit :

$$\dot{x}_k = a_x \dot{x}_{k-1} + b_x (f_{x_k} - f_{x_{k-1}}) \quad (\text{IV.56})$$

En outre, dans le cas d'une dynamique importante, la discrétisation selon le simple schéma d'Euler peut s'avérer grossière. Pour remédier à cela, une solution consisterait à utiliser un développement en série de Taylor comme dans le schéma de Milstein [148]. Ces différentes considérations permettraient d'améliorer les performances du PF dans la synchronisation du faisceau. Toutefois, le modèle dynamique du faisceau de lumière deviendrait non-linéaire, et le filtre de Kalman classique ne serait plus adapté. D'autres formes de KF devraient alors être considérées, comme les filtres de Kalman étendu (EKF), inodore (UKF), ou d'ensembles (EnKF). Cependant, dans le cadre de notre étude, le modèle dynamique considéré (IV.18) reste pleinement satisfaisant pour réaliser la synchronisation de faisceau laser.

5 Conclusion

Nous avons développé dans ce chapitre des algorithmes permettant la synchronisation entre le faisceau de lumière émis par la source laser et le photodétecteur quatre-quadrants permettant la réception de ce signal. Ce problème a montré toute sa complexité lorsque l'on considère que le faisceau est soumis à des dérives d'alignement continues importantes ainsi qu'à des fluctuations dynamiques aléatoires. Pour traiter ce problème, nous avons proposé dans un premier temps une modélisation géométrique et dynamique du faisceau gaussien (laser ou rayons X) pour aborder le problème de l'asservissement en position du faisceau de lumière. L'un des éléments clés de la stratégie de synchronisation proposée réside dans la phase de prédiction de la position du faisceau sur le photodétecteur. Deux algorithmes d'estimation basés sur les filtres de Kalman et particulaire ont été simulés, testés et évalués expérimentalement. Une étude comparative a montré que leur utilisation dépendait fortement du type de perturbation, de la dynamique de poursuite et du caractère nonlinéaire des perturbations. Nous concluons sur le fait que compte tenu de sa facilité de mise et de ses performances dans la poursuite du faisceau laser, le filtre particulaire sera retenu comme estimateur dans la suite de l'étude. Après avoir validé expérimentalement la stratégie de commande des micromanipulateurs (Chapitre 3) ainsi que l'algorithme de suivi du faisceau de lumière (Chapitre 4), nous pouvons maintenant aborder le problème de la micromanipulation de micro-objets placés sous faisceau de lumière dans le Chapitre 5.

Chapitre V

Application à la Micromanipulation d'Objets sous Faisceau de Lumière

1 Introduction

Ce chapitre présente différents types d'expériences réalisées avec notre système de micromanipulation en vue de son intégration sur la plateforme synchrotron de l'ESRF. Ces expériences ont eu pour but de tester et valider la capacité du montage proposé à manipuler et positionner sous le point focal d'un micro-faisceau lumineux des micro-objets dans les trois dimensions de l'espace. Pour cela, nous proposons dans ce chapitre deux stratégies possibles. La première consiste à utiliser une sonde AFM pour réaliser une préhension par adhésion pour transporter l'objet sous le faisceau. La deuxième consiste à utiliser les deux sondes AFM de manière indépendante pour réaliser une préhension par contact de type deux doigts. Dans les deux cas concernés, trois phases caractéristiques sont testées : (i) détection du point focal du faisceau lumineux par une procédure *backtracking*, (ii) préhension et transport du micro-objet sous le faisceau et (iii) poursuite en temps réel du point de focalisation du micro-faisceau pour la caractérisation de l'objet sous test. Des premières expériences ont été menées en vue de valider expérimentalement les stratégies adoptées.

2 Phase de Calibration de la Plateforme de Micromanipulation

Nous décrivons dans ce paragraphe les phases préliminaires de calibration pour la recherche du faisceau laser (point focal, diamètre faisceau, limites de l'intensité lumineuse) ainsi que la calibration des micro-capteurs piézorésistifs des micropoutres AFM.

2.1 Localisation de la sonde AFM sous le faisceau lumineux

Une première étape de calibration consiste à mesurer le diamètre du faisceau laser au point focal, appelé plus communément, rayon de pincement r ou "waist". La Fig.V.1.(a) illustre la propagation suivant z de l'onde électromagnétique. Généralement l'échantillon sera placé au plus près de ce point

maximal de rayonnement lumineux pour y être caractérisé. Pour cela, nous avons déplacé le long de l'axe optique du laser un micromanipulateur muni d'une sonde AFM dont l'extrémité de la micropoutre est illuminée par le faisceau laser. Au fur et à mesure que la micropoutre AFM se déplace, le signal lumineux recueilli sur le photodétecteur 4-quadrants augmente jusqu'à atteindre son point maximal en $z = 0$. Comme on peut le constater sur la Fig.V.1.(b), le signal recueilli par la photodiode suit une loi de distribution gaussienne. On remarque un écart de centrage entre le faisceau gaussien et le centre du photodétecteur 4-quadrants lors de l'expérimentation.

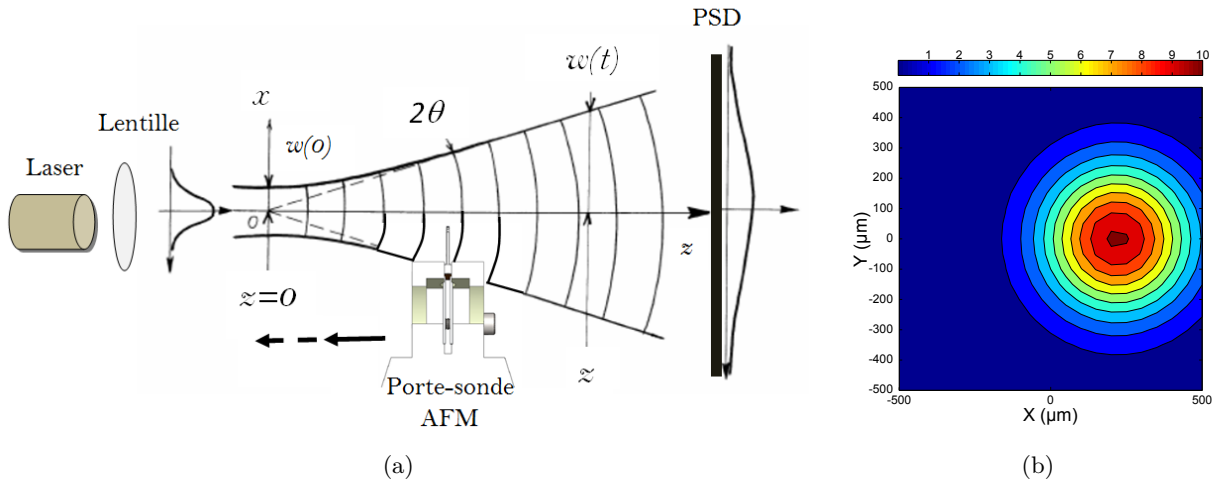


Figure V.1 – (a) Localisation du point focal à $z = 0$ par détection du maximum d'intensité lumineuse w_0 sur le photodétecteur PSD par incréments de déplacement de la micropoutre AFM le long de l'axe z . (b) Tension recueillie sur le photodétecteur PSD lorsque la sonde AFM est au point maximal $z=0$ d'intensité lumineuse.

Une fois le point focal déterminé, il nous reste à déterminer la sensibilité du spot optique recueilli sur le photodétecteur en présence de la micropoutre AFM. Pour cela il faut mesurer le profil du faisceau laser dans le plan transverse à l'axe de propagation, en différents points de l'espace. En $z=0$, nous faisons déplacer la micropoutre le long de l'axe x jusqu'à immerger entièrement le levier AFM au coeur du faisceau lumineux. La Fig.V.2 illustre ces expériences pour différentes positions de la micropoutre AFM. Ces résultats nous permettent de mesurer la variation globale ΔE du maximum d'intensité : pour $x=0$ on a $E_{\max} = 18$ V et $x = 530 \mu\text{m}$ on a $E_{\min} = 4$ V.

On constate sur la courbe de la fig. V.3 que la sensibilité de détection de la position du spot lumineux le long de l'axe x ($\frac{\Delta E_{\max}}{\Delta x}$) décroît très rapidement mais atteint un seuil de saturation stable. Nous prendrons en compte ces seuils maxi et mini de sensibilité lors de la procédure automatisée de recherche du point focal par la méthode backtracking présentée au paragraphe V.3.2

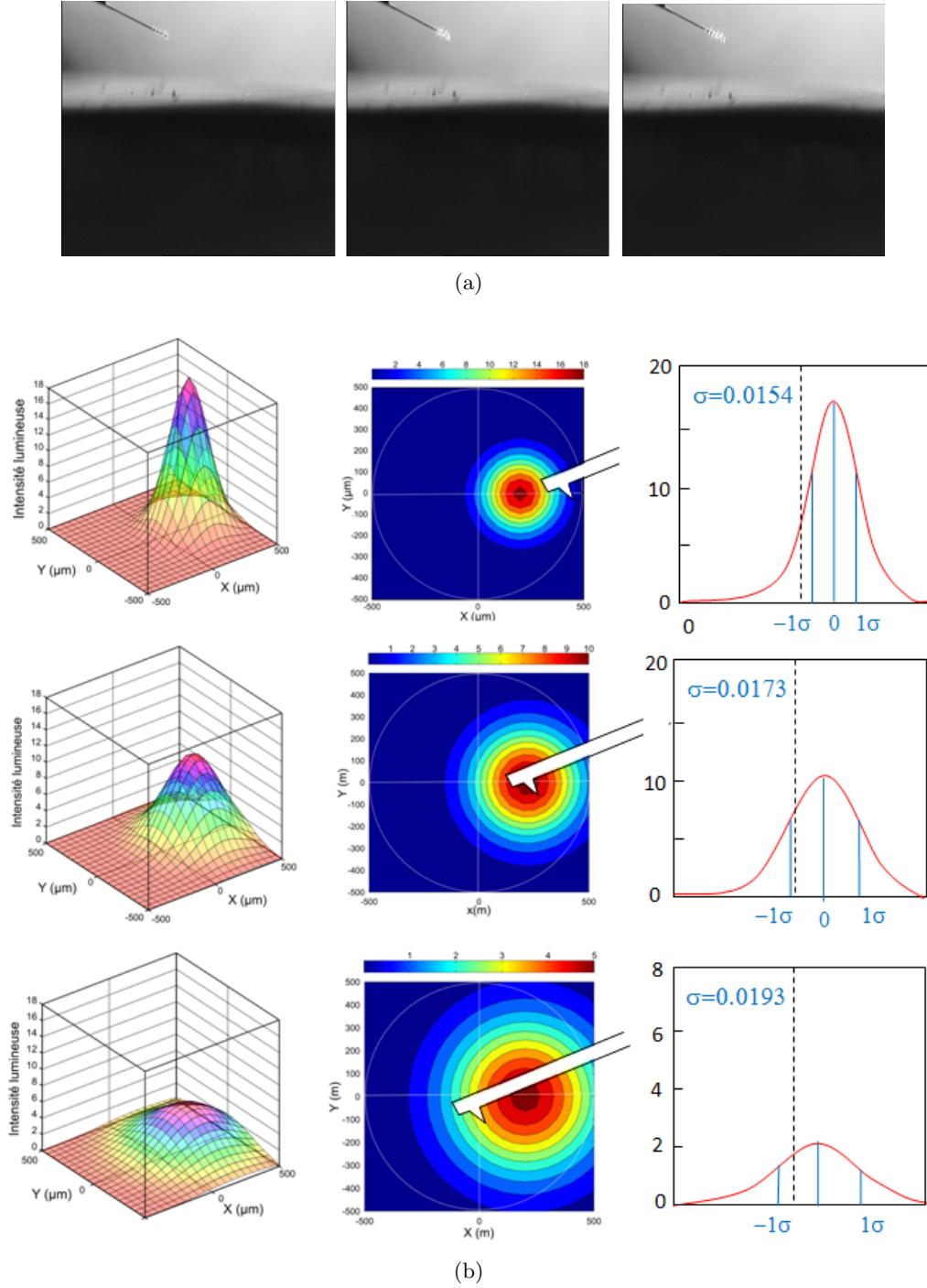


Figure V.2 – (a) Distribution gaussienne de l'intensité lumineuse maximale sur la section transversale du faisceau à différents endroits. (b) Position de la micropoutre AFM sous le faisceau laser. (c) Valeurs de l'écart type et de l'intensité lumineuse maximale.

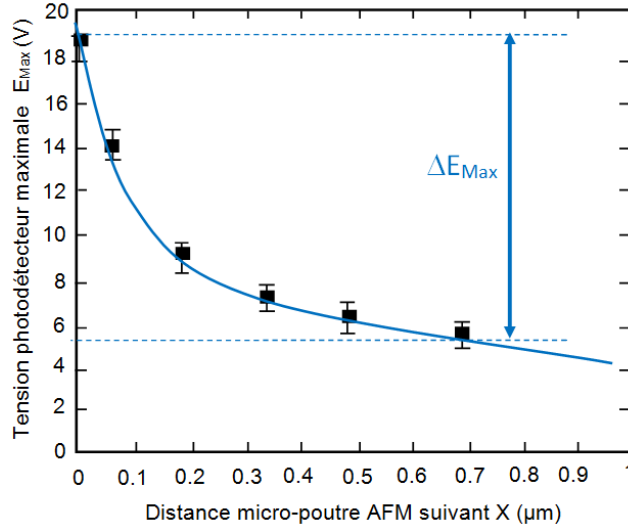


Figure V.3 – Tension de sortie maximale détectée sur le photodétecteur pour différentes positions de la micropoutre AFM le long de l’axe x .

2.2 Calibration en force des sondes AFM

En pratique, la force appliquée sur la sonde AFM est obtenue à partir de la mesure de la déflexion du levier, en la multipliant par sa raideur. Il est donc indispensable de calibrer avec soin la raideur des leviers AFM pour pouvoir réaliser des mesures de force avec une bonne précision. Différentes méthodes de calibration de la raideur des leviers existent dans la littérature. Au delà de la simple estimation géométrique, on peut citer la méthode de calibration par masses ajoutées (méthode de Cleveland), la méthode hydrodynamique de Sader, celle du bruit thermique, ou encore la méthode cantilever contre cantilever. C’est cette dernière méthode que l’on va utiliser pour calibrer les micro-poutres PRC-400 (de chez Kleindiek Nanotechnik, GmbH, Allemagne) avec micro-capteur de force piézorésistif intégré. Un demi-pont de Wheatstone avec une jauge piézorésistive de compensation des perturbations (température, bruit de mesure) est également intégré sur la base de la sonde AFM.

En utilisant un conditionneur de mesure de type FMS-EM (Kleindiek Nanotechnik, GmbH, Allemagne), les déflexions des micro-poutres AFM seront converties en une tension analogique envoyée à la carte d’acquisition de données. Pour chaque sonde AFM nous utilisons un conditionneur FMS-EM indépendant capable de mesurer des microforces de l’ordre du μN . La sensibilité de mesure en sortie du conditionneur est de l’ordre de $3.1 \times 10^{-3} \text{ mV/nN}$. La constante de raideur k de la micropoutre est estimée à $k = 3.4 \text{ N/m}$.

Pour mesurer la force d’interaction, une calibration de l’étage d’amplification du conditionneur est nécessaire. Pour cela, une micro-poutre encastrée-libre avec une constante de raideur calibrée à $8.87 \mu\text{N}/\mu\text{m}$ est utilisée. Sur l’extrémité de cette poutre bizautée nous venons appliquer une force d’interaction en déplaçant la sonde AFM. Lors du déplacement de la sonde AFM, les tensions issues du conditionneur sont mémorisées. Pour chaque incrément de déplacement, δ , et en prenant en compte

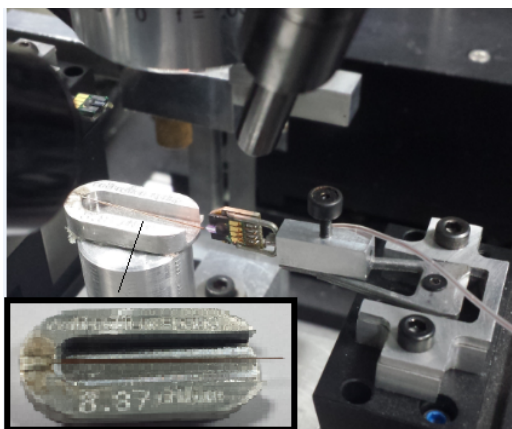
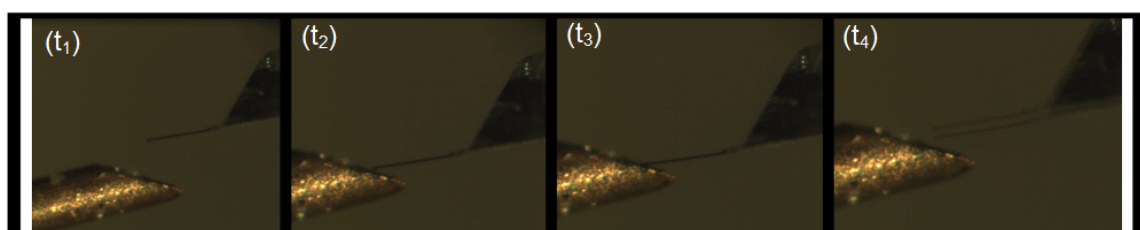
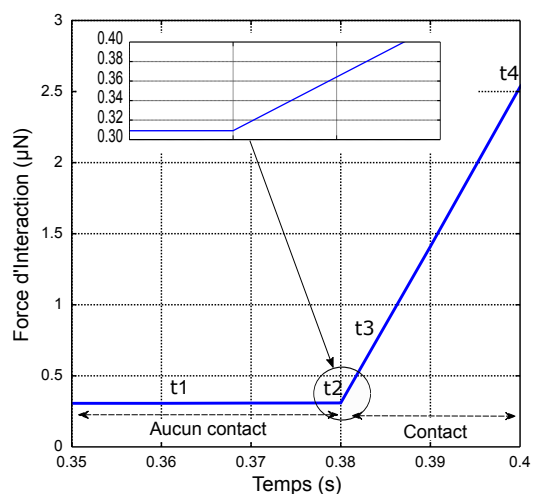


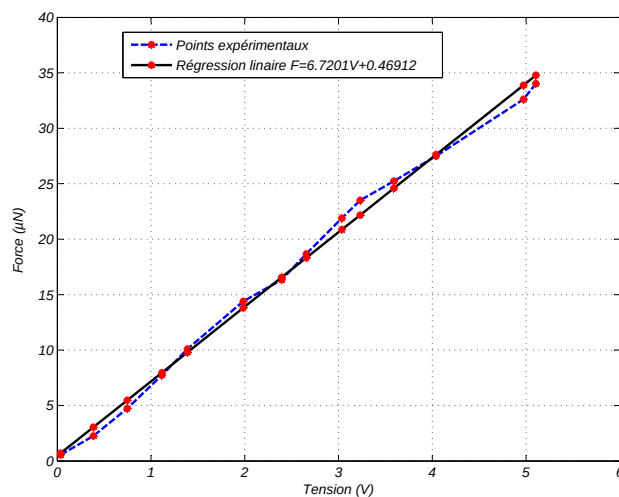
Figure V.4 – Calibration de la sonde AFM avec une micro-poutre calibrée avec une constante de raideur de $8.87\mu\text{N}/\mu\text{m}$.



(a)



(b)



(c)

Figure V.5 – Résultats expérimentaux de calibration du levier AFM en interaction avec une micro-poutre calibrée et bizautée à l'extrémité. (b) Caractéristique de la force d'interaction au cours du temps et (c) courbe de linéarisation tension-force avec la méthode des moindres carrés.

la raideur de la micro-poutre sous test, K , la force d'interaction peut être estimée à partir de la relation $F = K \times \delta$. Nous mesurons le déplacement élémentaire, δ en μm , à l'aide d'un microscope latéral TIMM $\times 400$. Les déplacements δ sont mesurés avec précision (image par image) à partir d'algorithmes de traitement d'images. La Fig.V.5(a) présente l'évolution de la force d'interaction en fonction du temps et la Fig.V.5(b) présente la courbe de calibration finale d'une micro-poutre AFM PRC-400. Une droite de régression linéaire passant par les points de mesure est donnée par :

$$F = 6.7201 + 0.46912 \quad (\text{V.1})$$

avec V_0 la tension délivrée par le capteur de force (volts) et F la force de contact (μm). Le même processus de calibration est réalisée pour les deux sondes AFM PRC-400.

Afin de valider les résultats des chapitres 2, 3 et 4, nous allons nous intéresser au positionnement d'un micro-objet sous faisceau lumineux : (i) micromanipulation d'un objet par adhésion à partir d'une sonde AFM à retour de force et (ii) micromanipulation par contact à l'aide deux sondes AFM avec retour de force.

3 Micromanipulation avec une sonde AFM sous faisceau de lumière.

3.1 Méthodologie

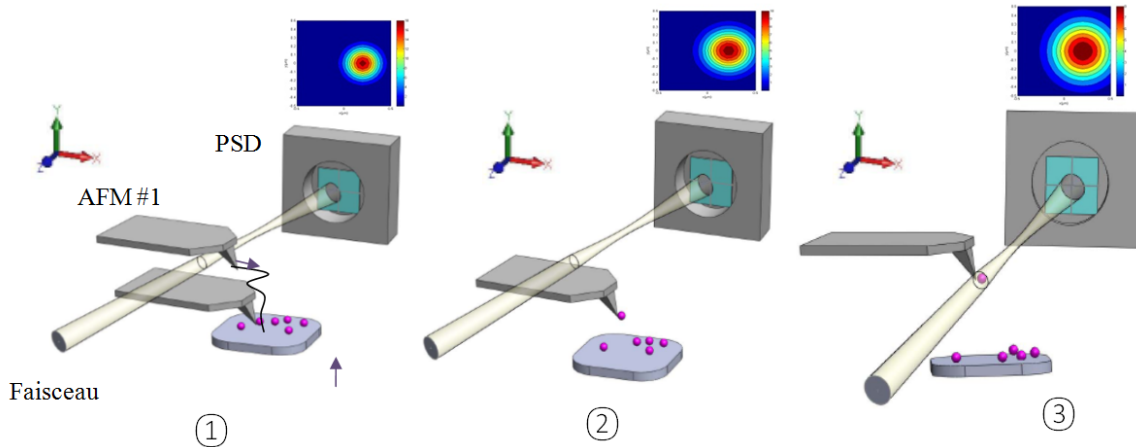


Figure V.6 – Micromanipulation d'un micro-objet par adhésion avec une sonde AFM : (1) le levier AFM se déplace vers l'objet jusqu'à ce que la phase d'adhésion soit initiée, (2) la phase de retrait et transport de l'objet en direction du faisceau débute et (3) l'asservissement de position du point maximal d'intensité émise (point focal) est finalisé.

La micromanipulation automatisée d'objets sous ligne de lumière passe d'abord par une phase préliminaire de détection/localisation du faisceau et de l'objet à manipuler. L'échantillon déposé sur le substrat est localisé soit par microscopie optique, soit par imagerie à force atomique. Ensuite, une autre phase de localisation automatisée de la focale du micro-faisceau de lumière est réalisée à l'aide d'une

sonde AFM. Cette dernière est déplacée suivant une procédure de recherche, dite *Backtracking*, pour détecter la présence du faisceau. Un algorithme d'optimisation permet alors de détecter le maximum d'intensité lumineuse ainsi que son point focal. Cette localisation permet une fois l'objet saisi par le micropréhenseur, d'orienter le transport et le positionnement de l'objet en 3D au point maximal d'intensité lumineuse. Compte tenu de la forte dynamique et des vibrations aléatoires du faisceau, les algorithmes d'estimation de la position du micro-objet sous le faisceau de lumière développés au Chapitre 4 sont alors nécessaires. Une première méthode de positionnement d'une microsphère en polystyrène de $8.1 \mu\text{m}$ de diamètre sous le point focal d'un faisceau laser est expérimentée (Fig.V.6). Nous développons dans ce qui suit ces différentes phases.

3.2 Phase (1) : Localisation automatisée du point focal par la procédure *Backtracking*

Afin de pouvoir exploiter efficacement le faisceau de caractérisation des échantillons, il est nécessaire de trouver son point focal. Spécifiquement, le maximum d'intensité du faisceau doit être recherché. Il s'agit alors à partir des informations 2D fournies par le photodétecteur de déterminer une position se trouvant en dehors de ce plan. À cet effet, une procédure de type "*backtracking*" avec une trajectoire de recherche en spirale associé à une descente de gradient est développée.

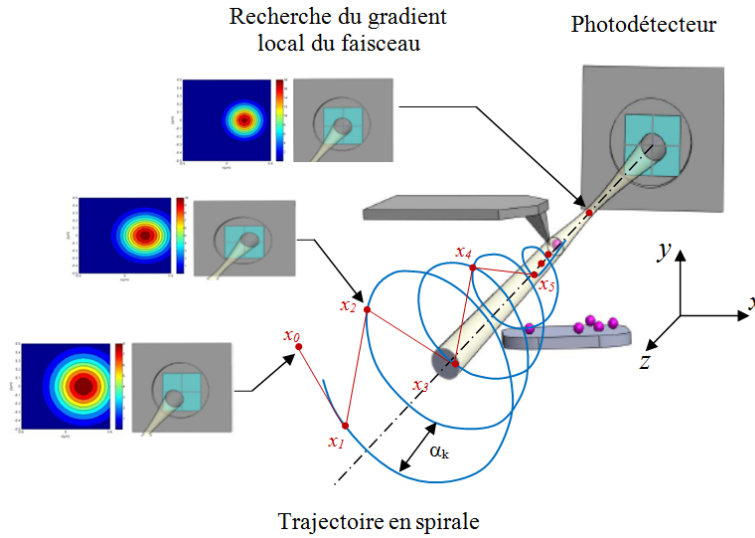


Figure V.7 – Principe de la recherche du point focal d'un faisceau basé sur la procédure *backtracking* en utilisant une trajectoire en spirale associé à une descente de gradient.

Génération de la Trajectoire en Spirale dans le plan (x, y) : Il existe différentes formes de trajectoires en spirale, telles que les spirales hyperbolique, logarithmique, de Fermat, de Galilée, etc. Dans le cadre de notre étude, la spirale d'Archimède est plus particulièrement considérée. La spirale d'Archimède est une courbe qui est décrite par un point qui se déplace à une vitesse v uniforme sur une

droite qui tourne à une vitesse ω uniforme autour d'un centre fixe. La distance de ce point au centre de rotation est proportionnelle à l'angle dont la droite a tournée. Ainsi, une propriété de cette spirale est que son pas¹, p , est constant. La spirale d'Archimède correspond alors à une courbe paramétrique, d'équation générale en coordonnées polaires (r, θ) :

$$r = a\theta + b \quad (\text{V.2})$$

avec $a = \frac{p}{2\pi}$ la raideur de l'enroulement de la spirale, b la position initiale, sachant que $\theta_0 = -b/a$ définit la rotation initiale de la spirale. De plus, en faisant varier $\theta \in [0; \theta_{\max}]$, la taille de la spirale peut être adaptée. Par exemple, pour $\theta_{\max} = 2k\pi$, la taille de spirale sera kp (voir la Figure V.8(a)) correspondant à la rotation initiale de la spirale permettant de déterminer le rayon intérieur.

Pour générer une telle spirale, il s'agit de résoudre l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dr}{dt} = p \frac{\omega}{2\pi} \quad (\text{V.3})$$

avec $\frac{dr}{dt} = v$ la vitesse de déplacement du point, $\frac{d\theta}{dt} = \omega$ la vitesse de rotation de la droite, et le pas $p = 2\pi a$.

L'équation décrivant le temps total de balayage de la spirale t_{total} peut être déduite en intégrant les deux parties de l'équation (V.3) telle que :

$$\int_{r_{début}}^{r_{fin}} dr = p \frac{\omega}{2\pi} \int_{t_{début}}^{t_{fin}} dt \quad (\text{V.4})$$

avec $r_{début}$ et r_{fin} représentant les valeurs initiales du rayon de la spirale ; $t_{début}$ et t_{fin} représentant les valeurs de temps nécessaires au balayage de la spirale. A partir de (V.5), si $r_{début} = 0$ à $t_{début} = 0$ et $t_{total} = t_{fin} - t_{début}$, nous obtenons :

$$t_{total} = \frac{2\pi r_{fin}}{p\omega}. \quad (\text{V.5})$$

D'autre part, dans la mesure où les consignes en position des micromanipulateurs sont exprimées en coordonnées cartésiennes, la spirale est convertie comme suit :

$$x_s = r \cos \theta + x_{s0} \quad (\text{V.6})$$

$$y_s = r \sin \theta + y_{s0} \quad (\text{V.7})$$

avec (x_{s0}, y_{s0}) les coordonnées du centre de la spirale. Les variables x_s et y_s représentent les signaux de consigne appliqués au micromanipulateur cartésien suivant les axes (x, y) . La Figure V.10 illustre des exemples de spirales pouvant être générées.

A partir de l'équation (V.7), la génération d'une spirale d'Archimède ne nécessite que deux signaux en quadrature (sinus et cosinus) de fréquence unique et une amplitude variable. La vitesse linéaire de

1. Le pas d'une spirale correspond à la distance entre deux intersections successives (voir aussi la Figure V.8(a)).

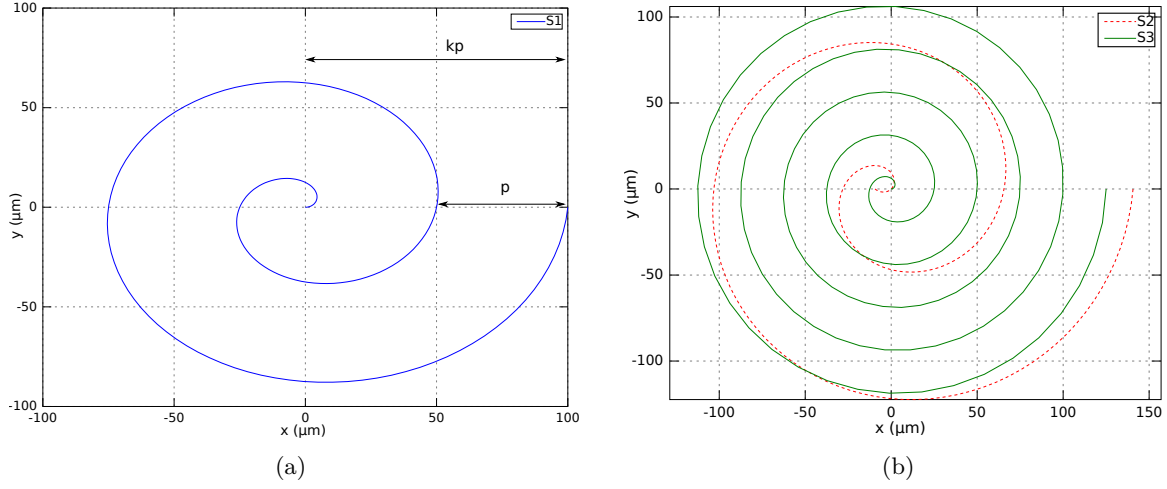


Figure V.8 – Différentes formes de spirales d'Archimède : (a) une spirale avec $p = 50\mu\text{m}$, $\theta_{\max} = 4\pi$ et $\theta_0 = 0$; (b) la spirale S_2 est définie avec $p = 75\mu\text{m}$, $\theta_{\max} = 4\pi$ et $\theta_0 = \pi/4$ et la spirale S_3 avec $p = 25\mu\text{m}$, $\theta_{\max} = 10\pi$ et $\theta_0 = 0$.

balayage du levier AFM va varier en fonction de sa distance avec l'origine de la spirale. Pour avoir un suivi de trajectoire à vitesse constante $\frac{dr}{dt} = v = C$, la vitesse de rotation $\frac{d\theta}{dt} = \omega$ doit évoluer en fonction de r pour garder une vitesse de balayage constante. De plus, les paramètres $\{p, \theta_0, \theta_{\max}, x_0, y_0\}$ de la spirale doivent être adaptés en fonction des caractéristiques du faisceau gaussien au point focal. La Fig.V.9 donne les paramètres d'identification de la spirale au point focal du faisceau dans le cas où aucune sonde AFM n'est présente sur la section du faisceau ($p = 25\mu\text{m}$, $\theta_{\max} = 9\pi$ et $\theta_0 = 0$) et lorsque l'extrémité de la sonde AFM recouvre la section du faisceau ($p = 25\mu\text{m}$, $\theta_{\max} = 12\pi$ et $\theta_0 = 0$). L'algorithme de balayage de la trajectoire en spirale est décrit par l'algorithme 1. Dans la suite de nos expériences, nous choisirons comme gabarit initial celui correspondant au faisceau recouvert par l'extrémité de la sonde AFM pour réaliser la détection du minima local d'intensité lumineuse.

Algorithm 3 Méthode de balayage de la trajectoire en spirale.

1. *Calibration* : Mesure expérimentale de la distribution de l'intensité lumineuse au point focal, $I_{focal}(x, y)$, avec/sans présence sonde AFM.
 2. *Modélisation* avec une distribution gaussienne uniforme de la forme :
$$I_{focal}(x, y) = k \iint \frac{2E}{\pi^2 r} \cdot e^{\frac{2(x^2+y^2)}{r^2}} \cdot dx \cdot dy$$
 3. *Corrélation* entre la distribution gaussienne identifiée $I_{focal}(x, y)$ avec une spirale d'Archimède. Identification les paramètres $\{p, \theta_0, \theta_{\max}, x_0, y_0\}$.
 4. *Conversion* en coordonnées cartésiennes :
$$x_s = r \cos \theta + x_{s0}$$

$$y_s = r \sin \theta + y_{s0}$$
 5. *Envoi des points* x_s et y_s .
-

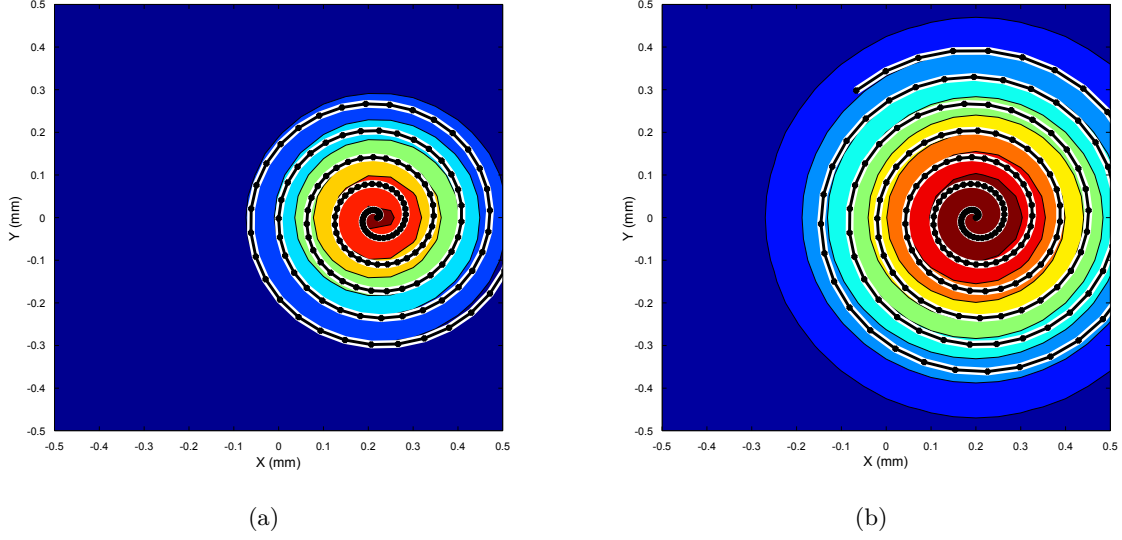


Figure V.9 – Calibration expérimentale de la trajectoire en spirale. Identification des paramètres de la spirale dans les cas : (a) Sans occultation du spot lumineux par la sonde AFM ($p = 25\mu\text{m}$, $\theta_{\text{max}} = 9\pi$ et $\theta_0 = 0$) et (b) avec occultation du spot lumineux par l'extrémité de la sonde AFM ($p = 25\mu\text{m}$, $\theta_{\text{max}} = 12\pi$ et $\theta_0 = 0$).

Algorithme de la Descente du Gradient suivant l'axe z : Sur la base des informations 2D fournies par le photodétecteur, une simple recherche du maximum d'intensité ne permettrait au final que de centrer le faisceau. Pour pouvoir converger vers le point focal du faisceau, l'algorithme du gradient est appliqué. Dans sa version la plus simple, l'algorithme ne permet de trouver ou d'approcher qu'un point stationnaire d'un problème d'optimisation sans contrainte (i.e., un point dans lequel le gradient de la fonction à minimiser est nul). De tels points sont des minima globaux, si la fonction est convexe. L'algorithme du gradient est également connu sous le nom d'algorithme de la plus forte pente ou de la plus profonde descente (*steepest descent*, en anglais). Afin de déterminer le point focal, après chaque itération de la spirale un incrément de déplacement, α_k , dans l'axe du faisceau (i.e., suivant l'axe z normal au photodétecteur) est appliquée. Puis, une recherche du minimum de gradient local entre la situation courante et précédente est réalisée suivant l'Algorithme 4.

Résultats expérimentaux : Dans le but de valider la procédure *backtracking*, nous avons évalué expérimentalement les capacités de poursuite de l'algorithme en présence d'un faisceau de lumière laser. Après avoir déterminé les caractéristiques du point focal (intensité lumineuse, diamètre et position) dans la phase de calibration présentée au paragraphe V.2.1, nous essayons de rechercher le maximum d'intensité lumineuse par l'intermédiaire d'un suivi de trajectoire en forme de spirale (voir Fig. V.11). Pour cela, nous identifions les paramètres de la spirale d'Archimède théorique avec le gabarit expérimental. Ce choix a été dicté par le nombre de niveaux identifiés sur le signal de tension issu du photodétecteur. Ce nombre de niveaux correspondra au nombre de spires théoriques. Par exemple,

Algorithm 4 Méthode de descente du gradient.

On donne un point de départ en $x_0 \in \text{dom}f$ et un seuil de tolérance $\varepsilon \geq 0$.

repeat

1. *Simulation.* Calcul de $\Delta x := -\nabla f(x_k)$
2. *Test d'arrêt.* Si $\|\nabla f(x)\| \leq \varepsilon$, arrêt.
3. *Calcul du pas* $\alpha_k > 0$. On choisit le pas incrémental suivant la règle linéaire suivante.
4. i) Mettre le compteur d'itération à 0 $k=0$, et fixer une valeur initiale, $\mathbf{x}_0$ comme minimum.
5. ii) Calculer une direction de descente $\mathbf{p}_k$.
6. iii) Choisir α_k afin de minimiser $\phi(\alpha) = f(\mathbf{x}_k + \alpha \mathbf{p}_k)$ en fonction de la variable $\alpha \in \mathbb{R}$.
7. iv) Mettre à jour $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \alpha_k \mathbf{p}_k$, $k = k + 1$.
8. Si $\|\nabla f(\mathbf{x}_k)\| \leq \text{tolerance}$, STOP.
9. Sinon, retourner au ii).
10. *Update.* $x_{k+1} := x_k - \alpha_k \Delta f(x_k)$

until Arrêt du critère lorsque les conditions sont satisfaites.

la Fig. V.10.(a) nous permet d'identifier 9 niveaux de spires distinctes séparés par un pas constant de $65 \mu\text{m}$: spire extérieure en bleu foncé et spire intérieure en rouge foncé. Les résultats d'identification nous donnent alors $p = 65 \mu\text{m}$, $\theta_{\max} = 10\pi$ et $\theta_0 = 0$. Nous convertissons ensuite la spire théorique en une spire discrète constituée d'une matrice de N_b points. On constate sur la Fig. V.10.(a) que le nombre N_b va augmenter au fur et à mesure que le rayon r de la spirale s'approche de son origine. Ceci est lié au fait que le temps mis pour réaliser une révolution complète reste constant quelque soit le diamètre de la spirale qui a tendance à diminuer en s'approchant de son origine. Une fois la phase d'identification réalisée, nous effectuons une pondération de la vitesse de convergence de l'algorithme par l'intermédiaire du facteur de sensibilité déterminé empiriquement à la Fig. V.3.

L'algorithme de *backtracking* est initialisé dès que l'extrémité de la micro-poutre AFM détecte le faisceau laser. Le suivi de trajectoire peut alors débuter en boucle-fermée avec le retour de position (x, y) du signal photodétecteur. Les vecteurs de déplacement micrométriques sont envoyés au micromanipulateur à double-étage de manière itérative. Pour chaque incrément de déplacement, trois signaux de commande sont envoyés : deux signaux de commande des axes (x, y) du micromanipulateur correspondant à un point de la spirale dans le plan xOy et un signal de commande de l'axe z du micromanipulateur correspondant à l'incrément lié à la descente du gradient suivant l'axe Oz . Le critère d'arrêt de l'algorithme de *backtracking* dépendant de la valeur de sensibilité minimale détectable au centre du photodétecteur, nous avons déterminé cette valeur par l'intermédiaire de la courbe d'étalement de la Fig. V.3. Si le seuil de sensibilité minimal $S_{\min}$ n'est pas atteint, un nouveau vecteur de commande est calculé et on passe à l'itération suivante. Le choix de l'incrément $\alpha_k p_k$ suivant l'axe Oz conditionne la stabilité de l'algorithme de descente du gradient : si celui-ci est trop grand l'algorithme n'est pas stable et oscille autour d'une solution, et si celui-ci est trop petit, un très grand nombre d'itérations sera nécessaire pour converger vers la solution, et la probabilité de convergence vers une solution locale est plus grande. Nous nous sommes donc orientés vers une solution plus simple dans son implémentation logicielle. Tout d'abord, nous réalisons le suivi de trajectoire en spirale, en boucle-

ouverte, dans le plan xOy jusqu'à atteindre le centre de la spirale. Puis, nous contrôlons le déplacement de l'extrémité du levier AFM le long de l'axe Oz jusqu'au point focal, c'est-à-dire au point maximal d'intensité lumineuse.

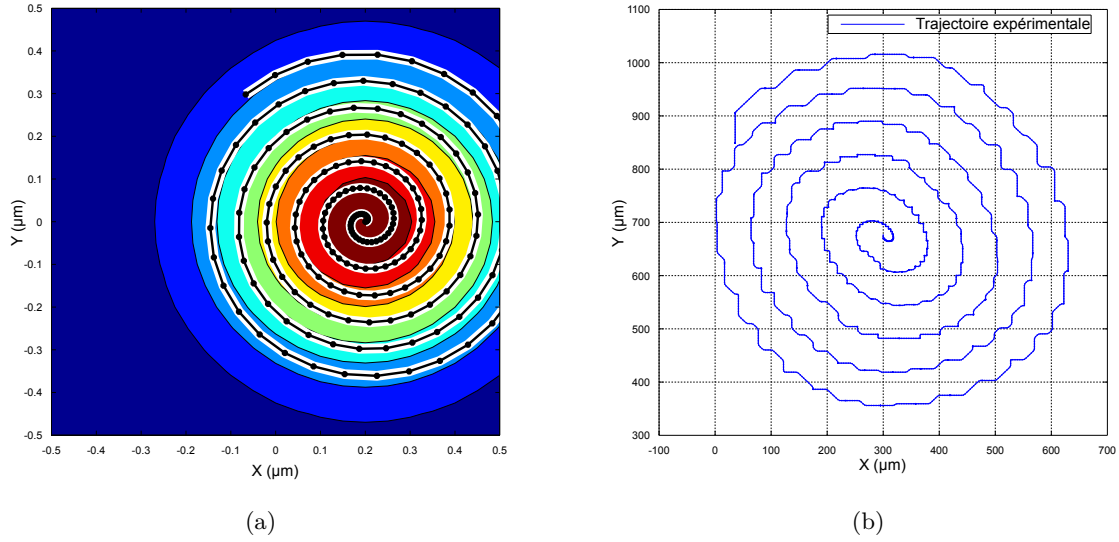


Figure V.10 – Suivi de trajectoire en forme de spirale d'Archimède : (a) Identification expérimentale d'une spirale avec $p = 75\mu\text{m}$, $\theta_{\text{max}} = 12\pi$ et $\theta_0 = 0$; (b) Suivi expérimental du gabarit de la spirale identifiée.

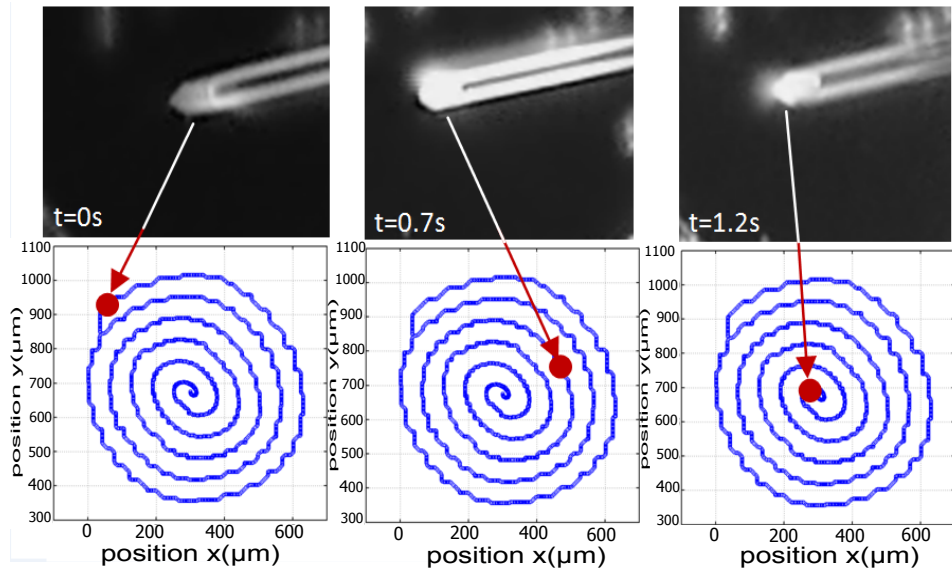


Figure V.11 – Suivi d'une spirale d'Archimède : photos prises aux instants de démarrage lors de la détection du faisceau laser ($t = 0s$), sur un point courant à l'instant ($t = 0.7s$) et au point final lors de la convergence vers la focale du faisceau ($t = 1.2s$).

La Fig.V.10.(b) donne les résultats expérimentaux obtenus dans la recherche du point focal du

faisceau laser. La Fig.V.11 illustre la procédure de recherche à des instants donnés. On peut observer sur la Fig.V.12 que l'utilisation du contrôleur robuste à commande découplée donne de bons résultats de poursuite de trajectoire bien que le micromanipulateur utilisée n'autorise que des déplacements cartésiens pour une pulsation de balayage du faisceau de $f=5\text{Hz}$. On s'aperçoit que les performances du contrôleur H_∞ en termes de stabilité et de robustesse remplissent parfaitement les spécifications de détection du maximum d'intensité. Un zoom présenté à la Fig.V.13 donne une erreur statique de position inférieure à 1nm pour des dépassements de consigne variant entre $10 - 30\text{nm}$ d'amplitude maximale. Le temps total de poursuite de trajectoire est de $t_{total} = 1.5\text{ sec}$.

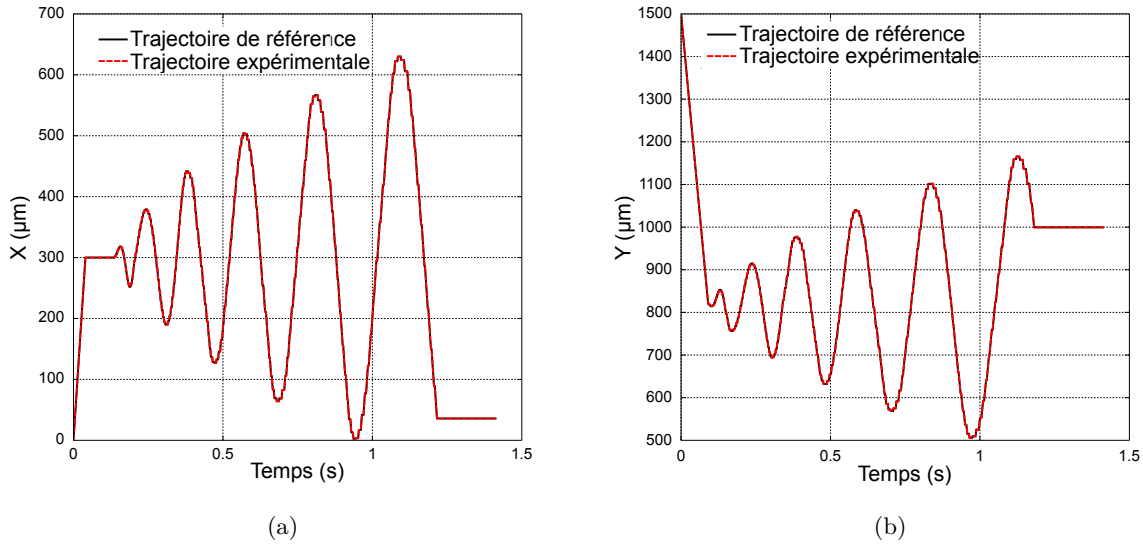


Figure V.12 – Signaux d'entrée appliqués aux axes x et y du micromanipulateur pour générer un suivi de trajectoire en forme de spirale d'Archimède (vitesse de balayage $v=1.1\text{mm/sec}$).

Une fois la position du point focal déterminée, celle-ci est enregistrée avant d'initier la tâche de préhension du micro-objet.

3.3 Phase (2) : Préhension de l'objet.

Une fois le centre de la sphère localisé par les algorithmes de traitement d'image, des commandes cartésiennes sont envoyées au micromanipulateur pour réaliser la préhension du micro-objet. Le levier AFM est asservi en position jusqu'au point de contact entre l'effecteur et l'objet. Ce point de contact doit être alors détecté. A cet effet, la mesure et le contrôle de la force est nécessaire avec une résolution suffisante (de l'ordre du μN) pour ne pas endommager l'échantillon à manipuler. Dans notre expérience, la force d'interaction est limitée à un niveau de saturation de $11.22\text{ }\mu\text{N}$. La Fig.V.14.(a) décrit les différentes phases de préhension : approche, adhésion, décollement et retrait de la microsphère. On constate que les microforces de capillarité mises en jeu sont importantes (de l'ordre de $24\text{ }\mu\text{N}$) comparativement au phénomène d'attraction de "pull-off" observé au niveau de l'apex du micro-levier

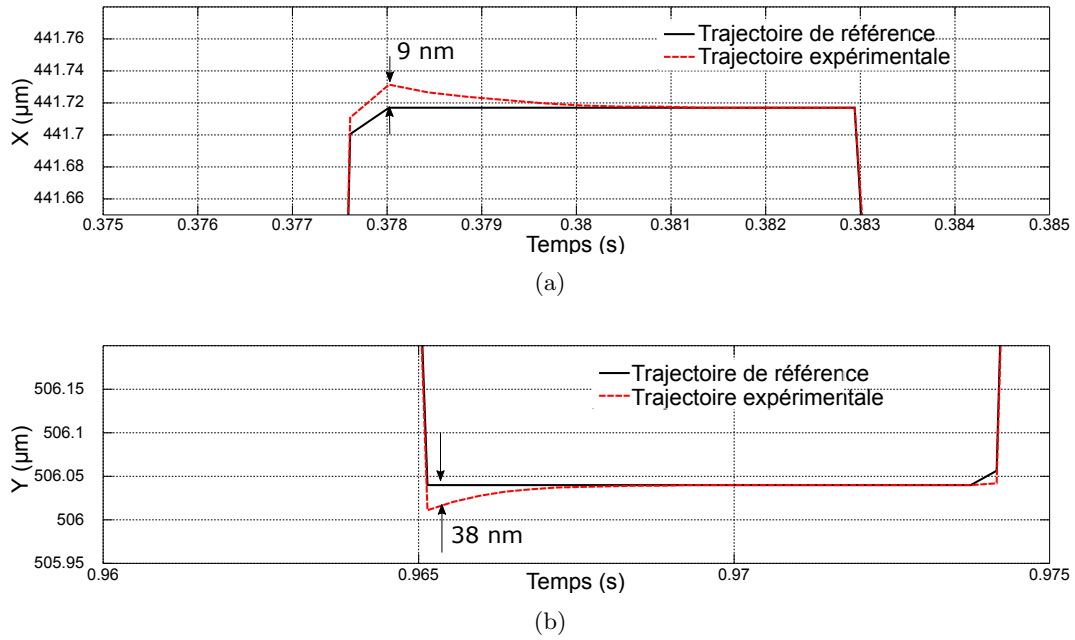


Figure V.13 – Zoom sur l'erreur maximale de suivi de la trajectoire sinusoidale et cosinusoidale.

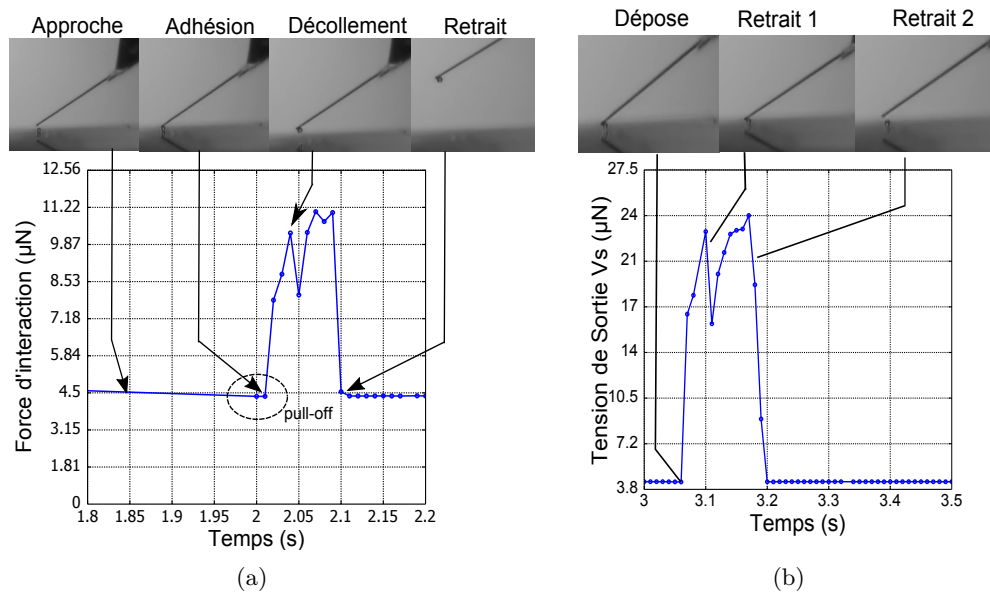


Figure V.14 – Préhension et dépose d'un microsphère de $8.2 \mu\text{m}$ de diamètre par adhésion à l'aide d'une sonde AFM : (a) Prise de l'objet à l'aide des forces d'adhésion. (b) Dépose de l'objet sur le substrat dues aux forces de capillarité.

(qqes 10^{-9} N). Nous avons également procédé à un essai de dépose de l'objet (Fig. V.14 (b)). L'objet est détaché lorsque la force capillaire objet/substrat devient supérieure à la force levier/objet. Nous constatons que deux tentatives de dépose ont été nécessaires. La stabilité mécanique de la préhension

a été maintenue pendant toute la phase de transport au point focal du faisceau.

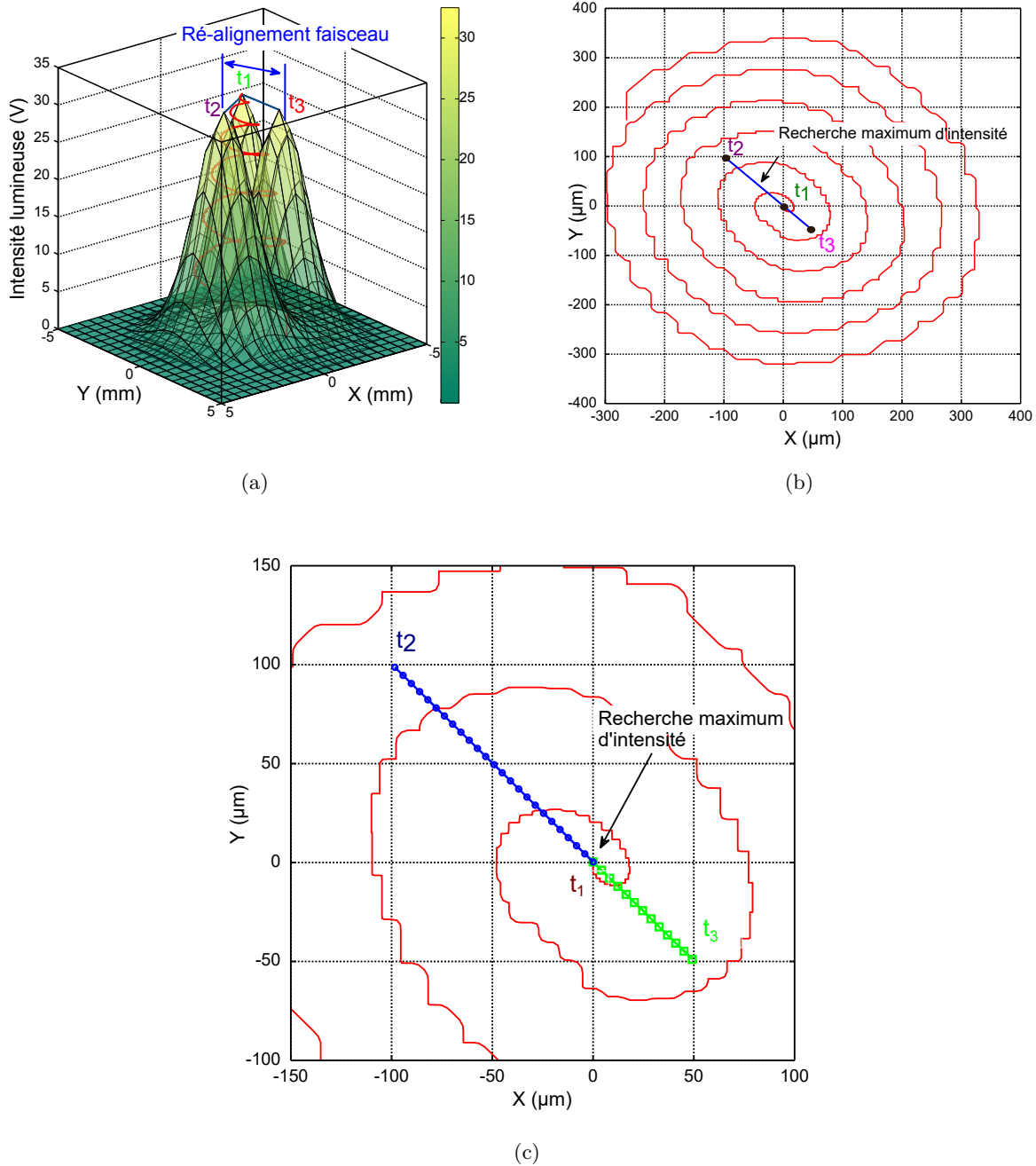


Figure V.15 – Ré-alignement de l'extrémité de la sonde AFM avec l'objet sous le point focal du faisceau. Suivi de la variation du point maximal d'intensité lumineuse due à des effets perturbateurs à l'aide d'un estimateur de position basé sur le filtre particulaire. Représentation (a) 3D et (b) 2D du suivi de position. (c) propose une vue détaillée de l'estimation (trait plein) et de la poursuite réelle (points) du faisceau lorsque ce dernier est soumis à des perturbations. Les points t_1 , t_2 et t_3 représentent respectivement les positions initiale et maximales du point focal lors du suivi de position.

3.4 Phase (3) : Transport et maintien sous faisceau de lumière.

Une fois la saisie de l'objet réalisée, ce dernier doit être transporté jusqu'à la position du maximum d'intensité lumineuse traité dans la Phase 1. Etant donné que le transport de l'objet peut se faire sur une course utile de plusieurs millimètres, l'objet doit être contrôlé en position de manière stable jusqu'au point focal du micro-faisceau. Comme illustré sur la Fig.V.15, une fois positionné sur le point focal à l'instant t_1 , le point focal est sujet aux variations thermiques et/ou perturbations extérieures ce qui a pour conséquence de faire varier la position du maximum d'intensité lumineuse. Pour cela, il est nécessaire de repositionner l'objet au point focal avec grande précision. Pour cela, l'estimateur de position basé sur le filtre particulaire développé au Chapitre 4 est utilisé. On constate que le suivi de position du maximum d'intensité est réalisé avec efficacité tout au long du suivi de position entre les intervalles de temps t_2 et t_3 . Ces résultats expérimentaux valident de manière satisfaisante les algorithmes de commande et d'estimation proposés dans les chapitres précédents.

4 Micromanipulation avec deux sondes AFM sous faisceau de lumière.

4.1 Méthodologie.

Des manipulations de microsphères par préhension ont été menées à l'aide de deux sondes AFM intégrant des microcapteurs piézorésistifs. Une petite quantité des microsphères en polystyrène de $8\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre ont été dispersées sur un substrat de silicium. Ces sphères sont vendues en solution colloïdale (PolybeadsMicrospheres $8.1\mu\text{m}$). Pour n'en disperser qu'une petite quantité, on fait sécher une goutte de cette solution sur une lame de verre que l'on vaporise ensuite au-dessus du substrat en silicium. Sur l'image optique (Fig.V.16) on peut voir les pointes de chaque sonde AFM, pointe AFM#1 et pointe AFM#2 au-dessus du substrat et distinguer les microsphères de polystyrène.

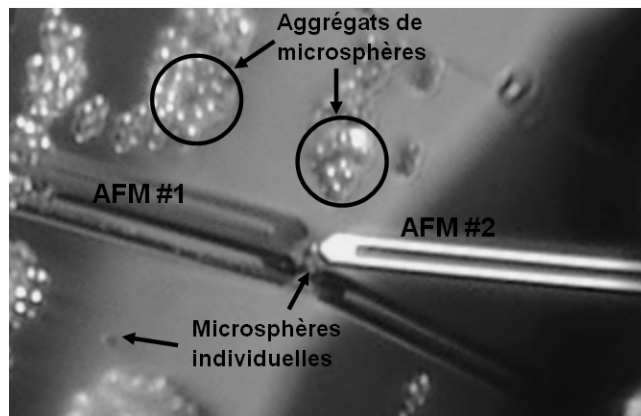


Figure V.16 – Photographie prise au début de l'expérience, les deux pointes AFM sont contrôlées en position près d'une sphère isolée en polystyrène de $8\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre sur un substrat de silicium.

Avant de décrire précisément chaque étape de la préhension, la Fig. II.11 illustre les différentes phases suivies lors de la manipulation dans les trois dimensions de l'espace d'une sphère de $8\mu\text{m}$ de diamètre par les deux pointes AFM pour être placées sous le point focal du faisceau laser. Nous décrivons dan ce qui suit ces différentes phases.

4.2 Phase (1) : Localisation automatisée du point focal par la procédure *Back-tracking*

Nous utiliserons la même procédure que celle développée précédemment au paragraphe V.3.2. la sonde AFM#1 sera utilisée pour détecter le faisceau et déterminer la position (x, y, z) du point focal du faisceau laser.

4.3 Phase (2) : Préhension de la microsphère

Plusieurs étapes sont à considérer dans l'automatisation de la tâche de micro-préhension à l'aide de deux pointes AFM.

4.3.1 Etape 1 : Positionnement grossier

A l'aide du microscope optique frontal on localise la position d'une sphère isolée en utilisant un algorithme de détection des contours et le calcul du centre d'inertie de la sphère. A partir des coordonnées de position de la sphère, les mouvements des deux micromanipulateurs à double étage sont contrôlés afin d'approcher les deux sondes AFM au voisinage de la sphère. La Fig. V.17 visualise les résultats expérimentaux obtenus lorsque les micromanipulateurs suivent une trajectoire prédéfinie. On constate que les mouvements des deux manipulateurs sont coordonnés et indépendants. Après une phase d'alignement des deux leviers AFM par rapport au centre de l'objet, les deux sondes AFM sont amenées en contact avec le substrat pour référencer l'axe z .

4.3.2 Etape 2 : Positionnement fin

Dans un premier temps, les nano-translateurs réalisent des incréments de déplacement de $1\mu\text{m}$ dans le plan $x - y$. Une fois l'alignement des sondes réalisé, la phase de préhension peut débuter. La distance entre les deux extrémités des sondes AFM doit pouvoir être contrôlée avec précision afin de pouvoir appliquer une force de préhension ajustée à la nature de l'objet et surtout faciliter la stabilité de la préhension. Pour cela, il est indispensable de connaitre auparavant la géométrie et les dimensions de l'objet. De plus, il est important de pouvoir régler la hauteur de préhension maximale (h) au dessus de la surface du substrat. Ainsi, pour une sphère de $8.2\mu\text{m}$ de diamètre, lorsque la pointe entre en interaction avec le substrat la pointe se rétracte suivant deux hauteurs possibles : $h_2 = 2.7\mu\text{m}$ (1/3 du diamètre de la sphère) et $h_1 = 5.4\mu\text{m}$ (2/3 du diamètre de la sphère). Ces valeurs ont été déterminées par expérimentation après de nombreux réglages possibles. Après détection de l'interaction de contact

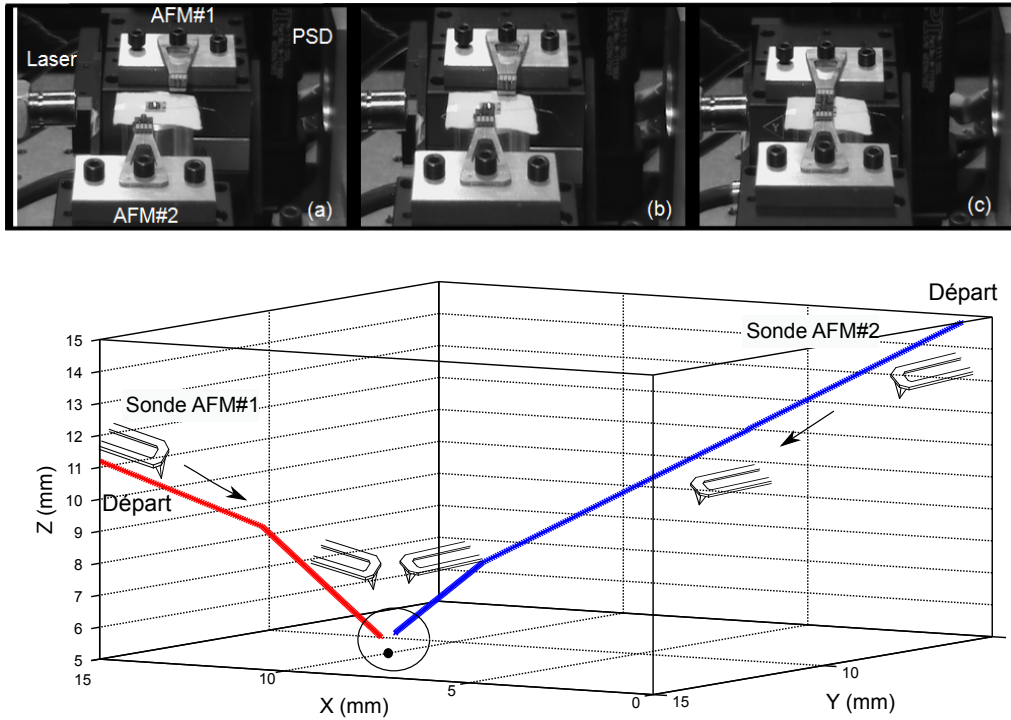


Figure V.17 – Déplacement grossier en mode automatique des sondes AFM le long d’une trajectoire prédéfinie par l’opérateur.

avec le substrat, on voit sur la Fig.V.18 que les pointes réalisent un mouvement de retrait coordonné suivant l’axe z (appelé *offset* en z) avant d’initier le contact avec l’objet. Dans le cas considéré, les pointes se rétractent et se positionnent à une hauteur de $h=5.4\mu\text{m}$.

4.3.3 Etape 3 : Préhension

La Fig.V.19 retrace les différentes positions des sondes AFM lors de leur positionnement final près de la sphère. Trois stratégies de préhension sont testées dans les expériences qui suivent. La force de contact pointe/objet possède trois composantes F_x, F_y, F_z qui vont dépendre fortement du type de préhension adoptée. Celles-ci ne seront pas toujours mesurables séparément compte tenu du caractère unidimensionnel du micro-capteur de force utilisé qui ne peut mesurer que la composante F_z de la force.

La première (Fig.V.19(a)) consiste à approcher les pointes AFM vers l’objet en maintenant le contact avec le substrat afin de soulever l’objet avec les faces supérieures des extrémités des préhenseurs (préhension par adhésion). Dans cette approche, les angles d’inclinaison des micro-poutres AFM possèdent une valeur identique $\theta_1 = \theta_2 = 30^\circ$ et sont réglées manuellement. Les forces mises en jeu sont essentiellement capillaires. La deuxième approche (Fig.V.19(b)) consiste à faire rouler la sphère le long d’une extrémité du préhenseur afin de la maintenir bloqué (préhension par contact). L’expérience

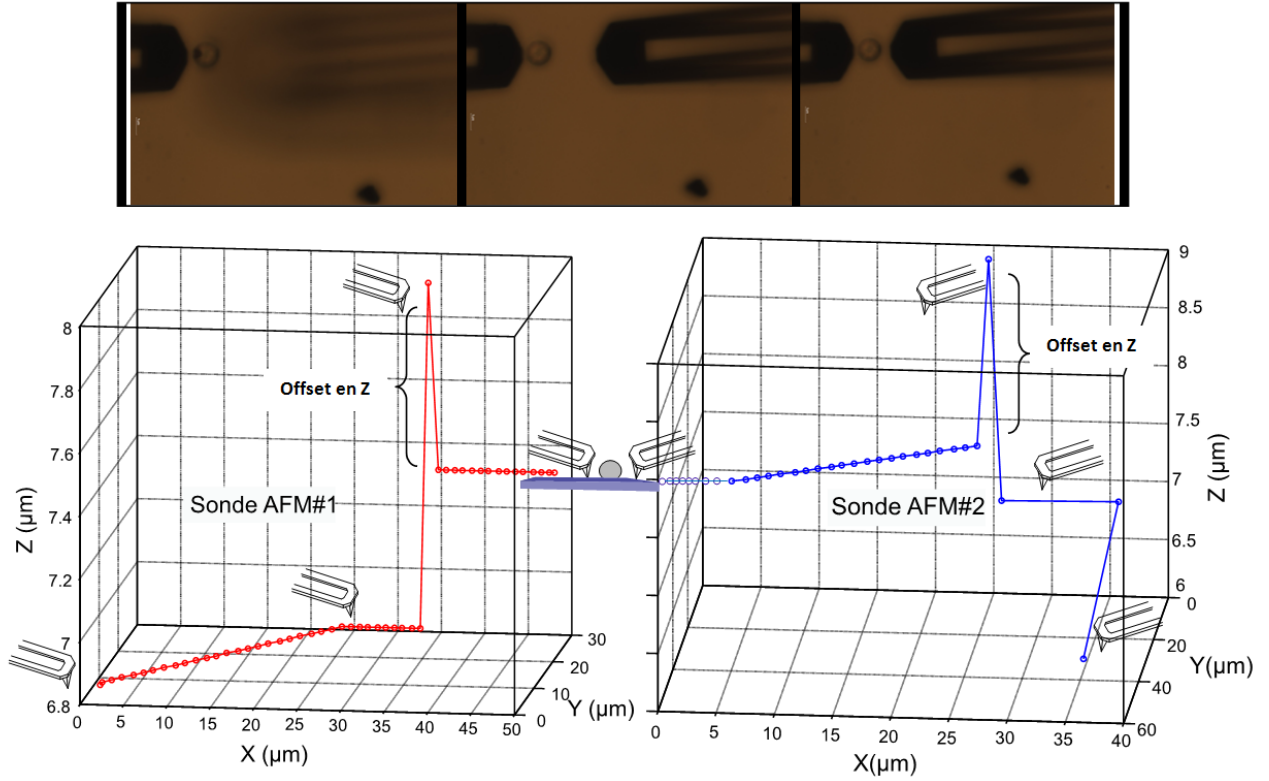


Figure V.18 – Déplacement fin et alignement des sondes AFM avec ajustement de la hauteur (*offset*) avant d’initier la tâche de préhension.

nous a montré qu’il était plus efficace de régler des angles d’inclinaison différents $\theta_1 = 20^\circ$ et $\theta_2 = 30^\circ$. Dans cette configuration, les forces normales de contact étant orientées suivant l’axe z , la force mesurée sera directement liée à la force d’interaction. Enfin, la troisième stratégie (Fig.V.19(c)) repose sur les interactions de contact entre les faces frontales de chaque micro-poutre AFM. Les angles d’inclinaison des micro-poutres AFM possèdent une valeur identique $\theta_1 = \theta_2 = 30^\circ$. La force d’interaction quant à elle est essentiellement liée à la composante F_x . Dans les trois cas considérés, l’opérateur règle à travers l’interface utilisateur les paramètres de préhension à savoir la hauteur h de la pointe (h_1 et h_2) par rapport au substrat et le pas de déplacement. La Fig.V.20 illustre la mise en application des trois stratégies de préhension. Nous détaillons ci-après, l’évolution expérimentale des forces d’interaction pour chaque stratégie.

1. **Préhension par adhésion** : Nous constatons à la Fig.V.21 que l’évolution des forces mesurées simultanément sur les deux sondes AFM restituent le même phénomène d’adhésion. Au repos, l’apex de chaque sonde AFM est en contact avec le substrat. Lorsque les extrémités des sondes s’approchent de la sphère en maintenant le contact avec le substrat, les forces d’adhésion (capillarité et électrostatique) font fléchir les deux micro-poutres : apparition d’un phénomène de *pull-in*. Une fois les interactions de contact initiées, un phénomène de *pull-off* apparaît cette

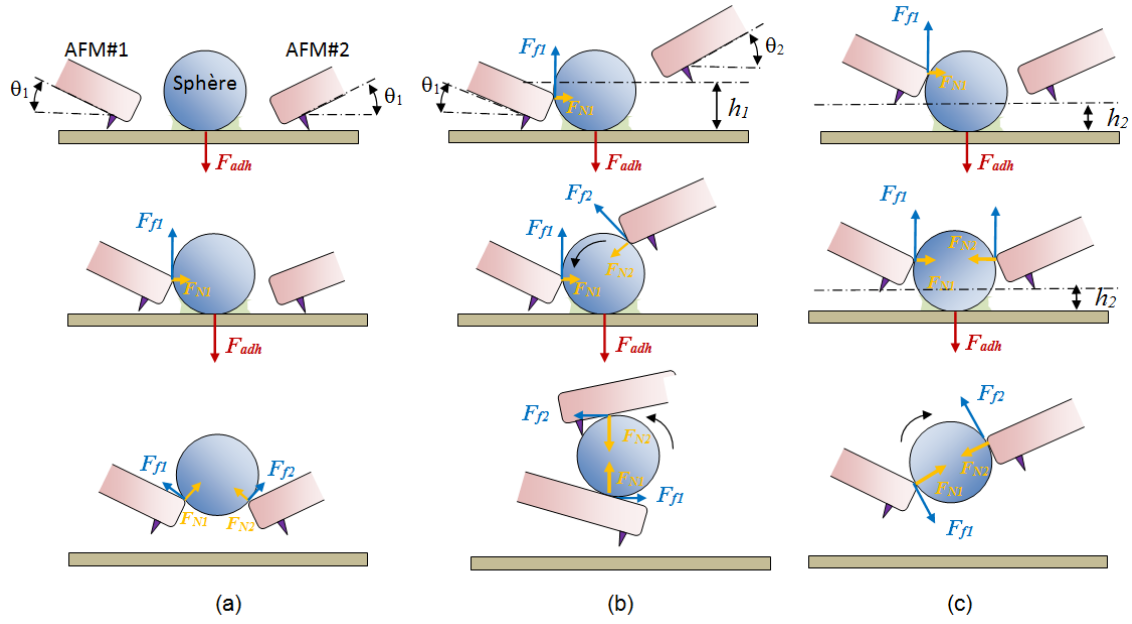


Figure V.19 – Illustration des trois stratégies de préhension d'une sphère à partir de deux sondes AFM : (a) micromanipulation par adhésion, (b) par contact longitudinal et (c) par contact frontal.

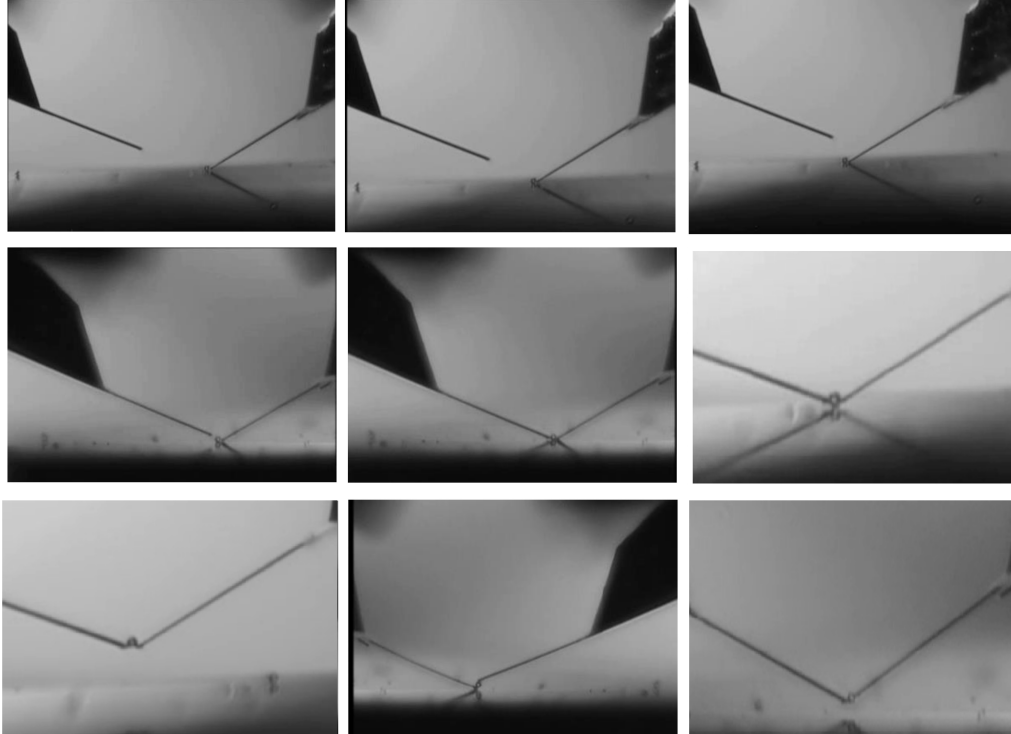


Figure V.20 – Procédure de micromanipulation expérimentale des trois stratégies : (a) micromanipulation par adhésion, (b) par contact longitudinal et (c) par contact frontal.

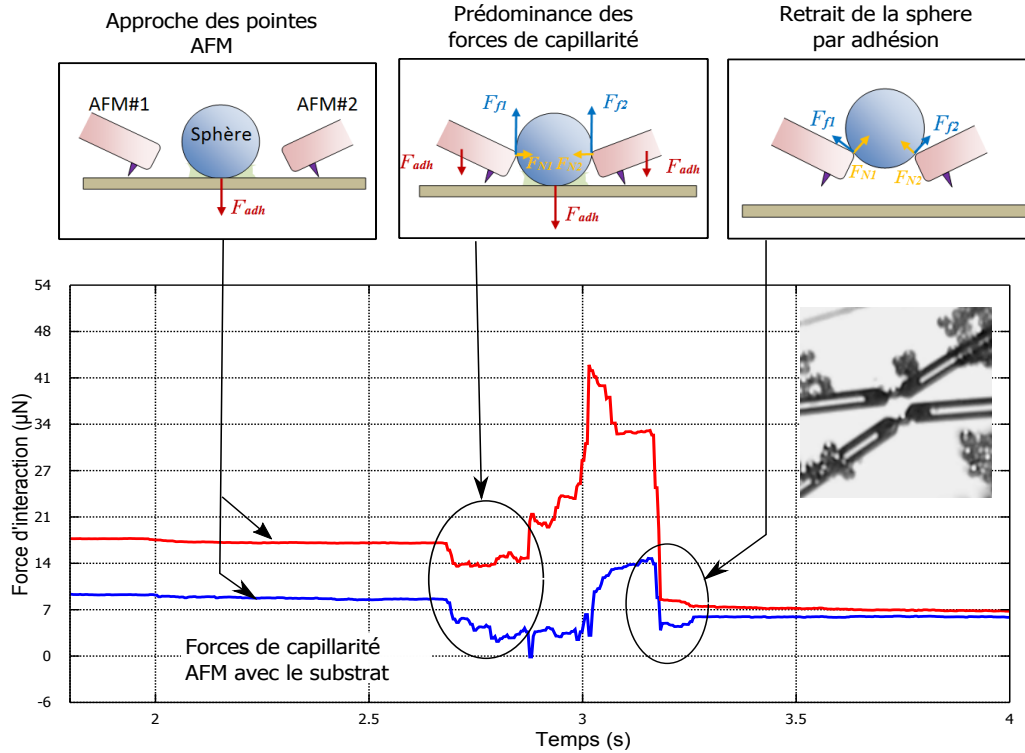


Figure V.21 – Préhension par adhésion : Evolution des forces d'interaction en fonction du temps.

fois-ci lors du retrait de l'objet du substrat. Etant donné que les facteurs d'amplification utilisés sur l'électronique de conditionnement ne sont pas identiques, ceci justifie le fait que les valeurs maximales diffèrent d'une courbe à l'autre. Lorsque l'objet a été saisi, les forces d'adhésion disparaissent et font tendre vers zéro les deux forces d'interaction de contact. Les micro-poutres AFM ne sont plus alors que soumises au propre poids de l'objet qui est négligeable. Cependant, la stratégie de préhension manque de fiabilité compte tenu de la présence de forces électrostatiques répulsives qui interdisent toute automatisation de la tâche robotique.

2. **Préhension par contact latéral** : Dans cette stratégie l'interaction de contact (sphère/plan) est réalisée à partir des surfaces frontales localisées à l'extrémité de chaque micro-poutre ($L : 20\mu\text{m} \times l : 40\mu\text{m} \times e : 15\mu\text{m}$). Une fois les extrémités frontales alignées, celles-ci sont positionnées à une hauteur $h=1/3$ du diamètre de la sphère. La Fig.V.22 donne les forces de contact latérales mesurées tout au long de la saisie de l'objet. Comme on peut le constater les mouvements de préhension sont beaucoup plus délicats. Lorsque la sonde AFM#1 pousse la sphère vers la sonde #2, un contrôle en force est nécessaire pour ne pas perdre la stabilité de la préhension lors du retrait de la sphère du substrat. Pour cela, la force de préhension est graduellement augmentée jusqu'à atteindre un seuil de référence. Une fois ce seuil atteint, une force de retrait capable de vaincre les forces d'adhésion objet/substrat est alors générée sans pour autant éviter des oscillations mécaniques parasites. Les résultats présentés sont comparables à ceux obtenus par Rabenoroso

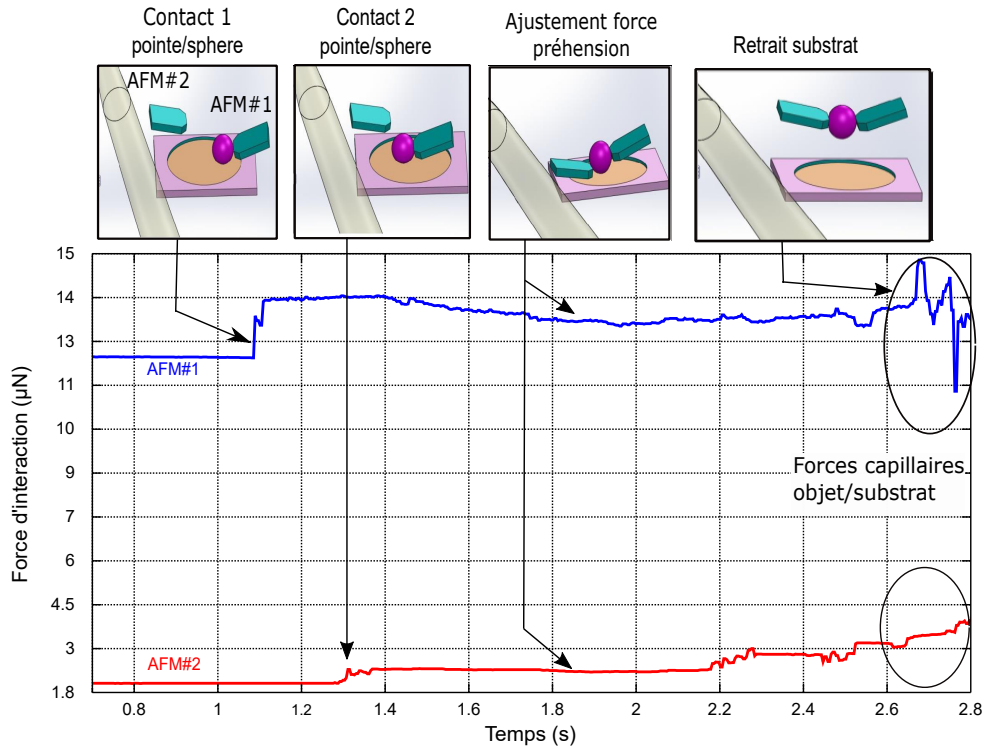


Figure V.22 – Préhension par contact latéral : Evolution des forces d'interaction en fonction du temps.

et al. [149] dans le cas de micro-effecteurs avec des surfaces de contact plan/plan. Cette stratégie a montré cependant des problèmes de stabilité liés à l'existence de couples antagonistes lors de la saisie de l'objet. Ces couples se sont avérés difficiles à compenser même avec un contrôleur robuste de type H_∞ .

3. **Préhension par contact longitudinal** : Cette stratégie consiste à faire rouler la sphère le long d'une pointe à l'aide de l'autre pointe. Pour cela, la pointe AFM#1 reste en contact avec le substrat alors que la pointe AFM#2 est positionnée à une hauteur $h=2/3$ du diamètre de la sphère. La Fig.V.23 montre l'évolution des forces longitudinales de contact lors des phases d'approche, de contact, de rotation et de préhension. On peut remarquer que des pics de force apparaissent sur la sonde AFM#1 lors de la rotation de la sphère le long de l'extrémité de la pointe. La saisie de l'objet est très clairement visible car le sens de variation des forces de contact sont diamétralement opposés. Encore une fois des oscillations mécaniques apparaissent lors du retrait de l'objet de son substrat. Cette stratégie de préhension s'est avérée très simple dans son utilisation ainsi que robuste aux instabilités mécaniques liés aux couples de torsion lors de la saisie de l'objet. Pour cette raison, nous retiendrons cette stratégie dans la suite des expérimentations.
4. **Préhension par contact avec sondes AFM verticales** : Enfin, une dernière stratégie consiste à positionner les leviers des sondes AFM dans une position verticale (voir Fig.V.25)

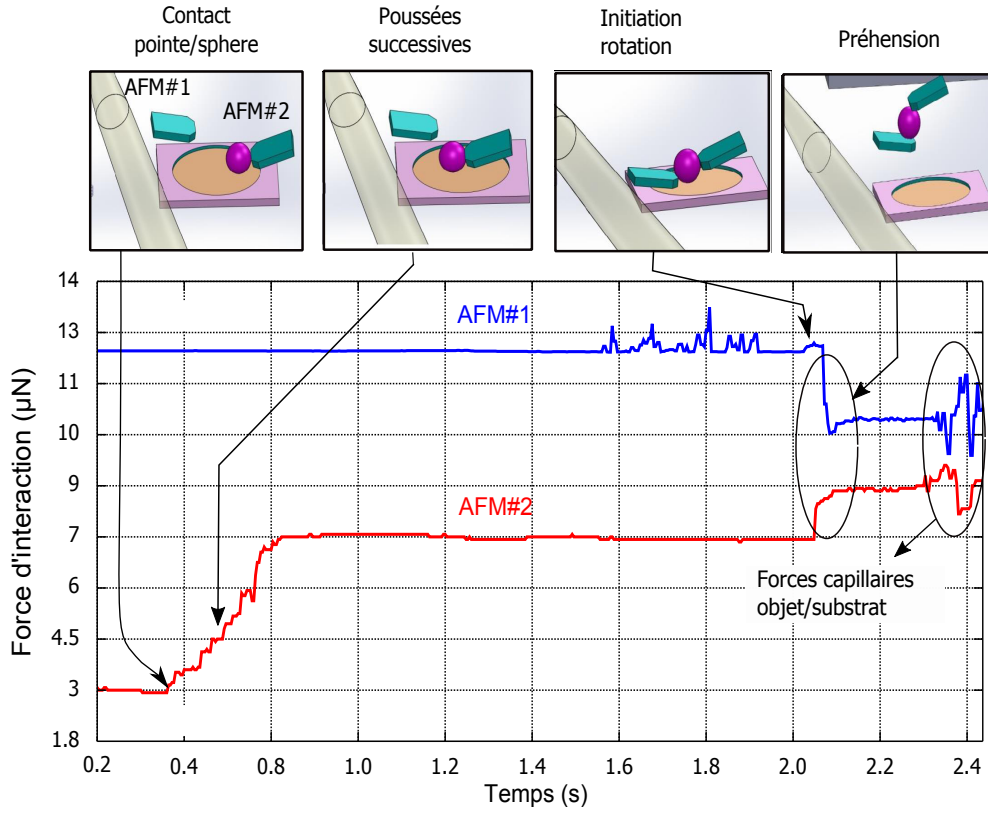


Figure V.23 – Préhension par contact longitudinal : Evolution des forces d'interaction en fonction du temps.

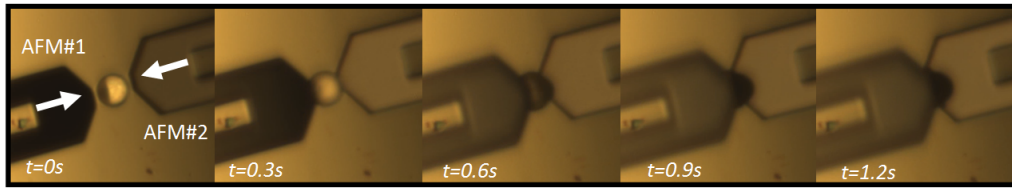


Figure V.24

afin d'améliorer la stabilité mécanique de la saisie de l'objet. Dans cet essai, la force de préhension a pu se faire de manière contrôlée en régulant l'interaction selon la direction latérale de préhension. Tout d'abord, un positionnement fin des pointes suivant la direction z est réalisée jusqu'à détecter le substrat. Elles sont ensuite remontées de $h_2 = 2.4 \mu\text{m}$ au-dessus de la surface : c'est-à-dire approximativement à un tiers du diamètre de la sphère. On observe sur le graphique Fig.V.26 que deux paliers de forces progressifs ont été programmés afin d'éviter la destruction de la sphère. Comme on peut le constater, l'indépendance des micromanipulateurs des deux pointes permet d'assurer un mouvement synchrone de celles-ci lors de l'extraction de la sphère de sa surface. Contrairement à la manipulation réalisée par contact latéral et longitudinal, où

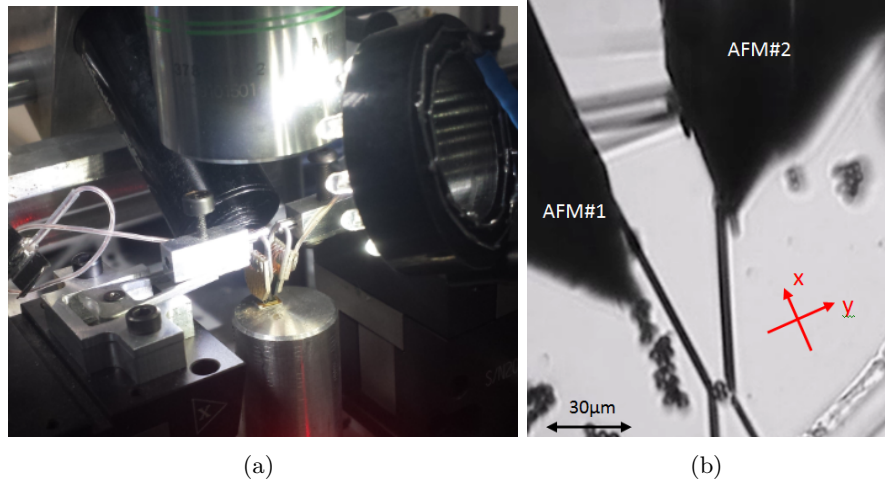


Figure V.25 – (a) Vue globale des sondes AFM en position verticale. (b) Image optique des deux leviers AFM proches du substrat en silicium sur lequel des sphères de polystyrène de $8.2\mu\text{m}$ de diamètre sont dispersées. La préhension de l'objet se fait selon la direction y .

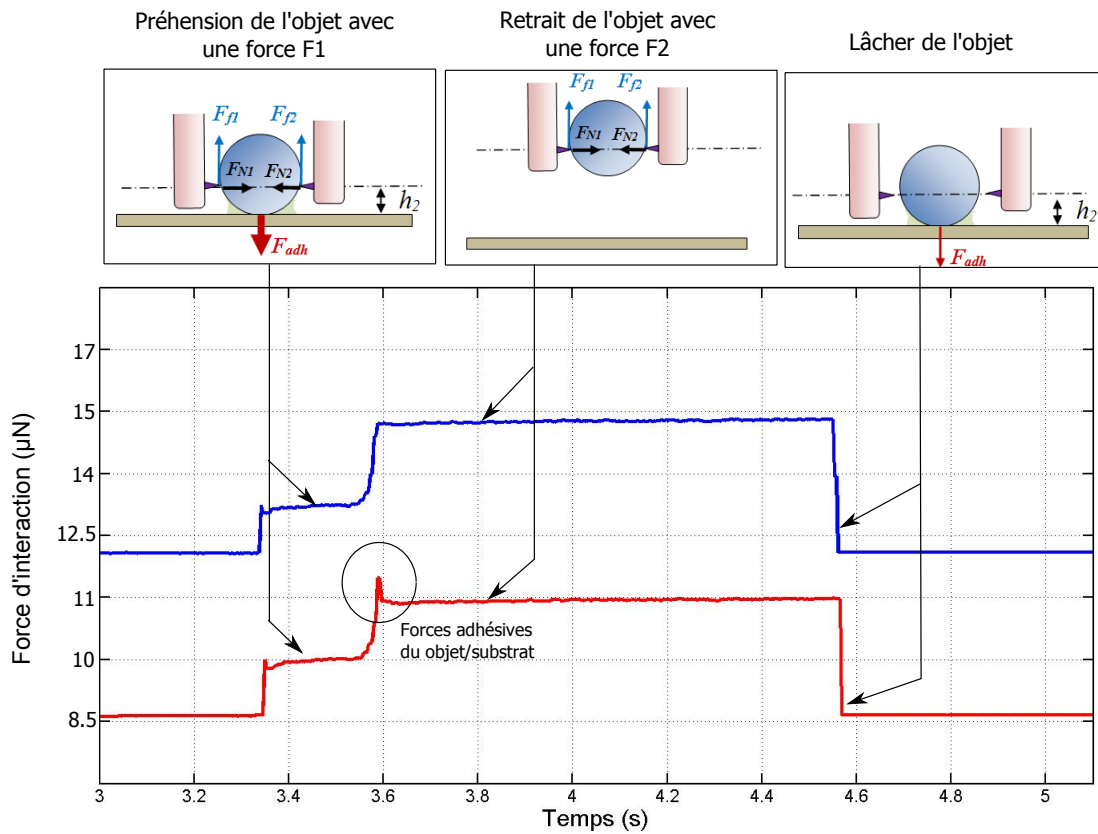


Figure V.26 – Préhension par contact avec sondes AFM verticales : Evolution des forces d'interaction en fonction du temps.

une des pointes a été écartée avant de revenir sur la surface, nous avons redéposé la sphère tout en la maintenant entre les leviers et de manière contrôlée.

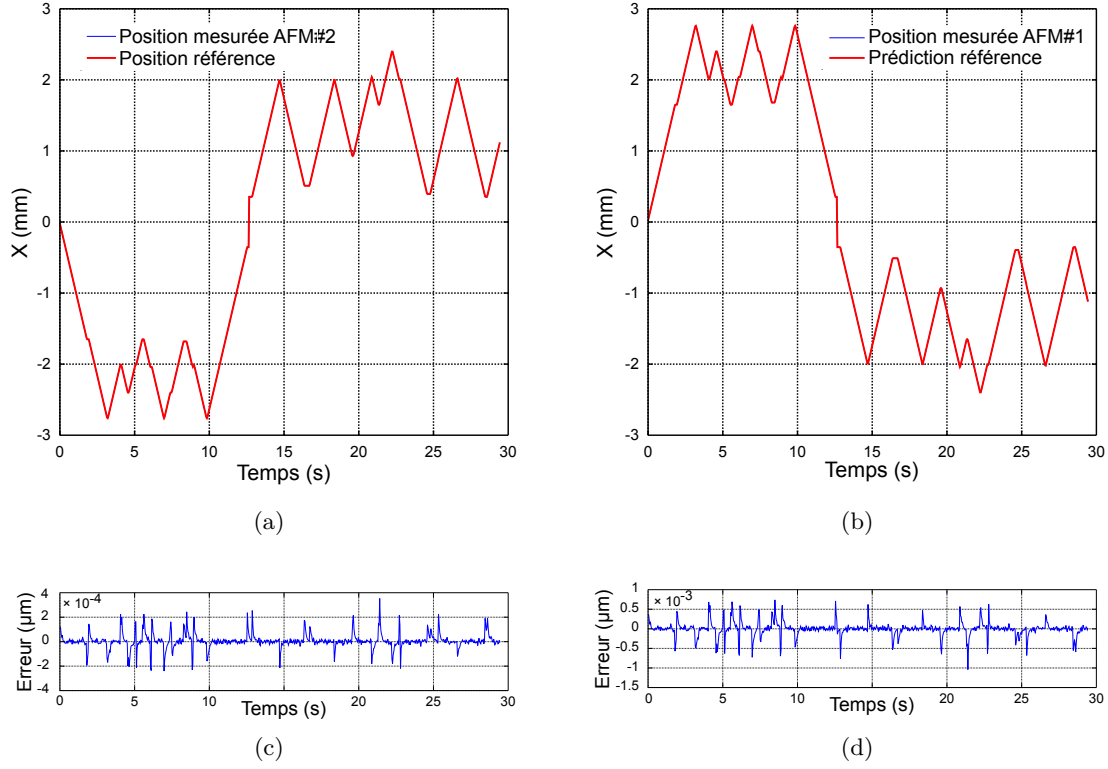


Figure V.27 – Positions suivant l’axe x des sondes AFM#1 et #2 lors d’un suivi du point focal soumis à une occlusion partielle et une déviation constante du faisceau.

4.4 Phase (3) : Transport et maintien sous faisceau de lumière.

Une fois la tâche de préhension terminée, le transport de l’objet est réalisé le long d’une trajectoire prédéfinie par l’opérateur pour être positionné sous la focale du faisceau laser. Pour cela, les mouvements des deux micromanipulateurs doivent être parfaitement coordonnés sans introduire de retards temporels dans la boucle de contrôle en position. A titre d’illustration, la Fig.V.27 donne les résultats de suivi de la trajectoire de chacun des micromanipulateurs à double-étage. On constate que les positions mesurées à l’extrémité des manipulateurs AFM#1 (Fig.V.27(a)) et AFM#2 (Fig.V.27(b)) coïncident parfaitement avec les trajectoires de référence. Les erreurs quadratiques moyennes de suivi de trajectoire sont de l’ordre du nanomètre (Fig.V.27(c)-(d)).

Afin de vérifier la stabilité de la préhension, nous avons introduit volontairement un retard temporel ($\Delta T = 350 \mu s$) dans la boucle de commande du contrôleur d’un des micromanipulateurs. Comme on peut le constater sur la Fig.V.28(a), les forces de contact longitudinales sont influencées, elles font

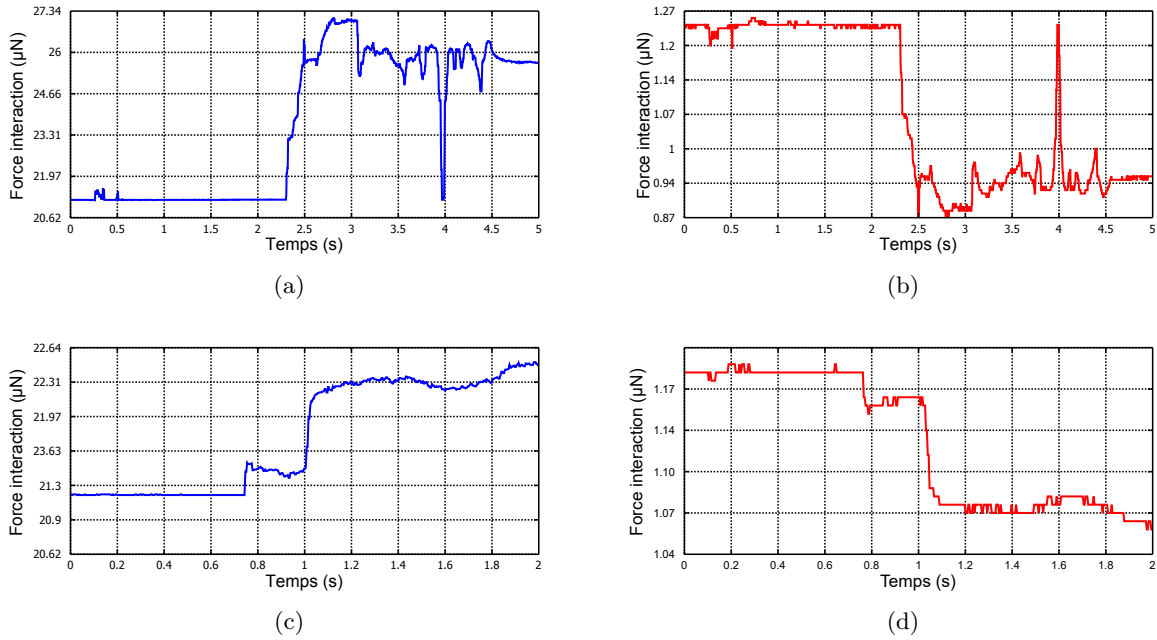


Figure V.28 – Forces d'interaction pendant une phase de transport de la microsphère : (a)-(b) lorsque les deux manipulateurs ne sont pas synchronisés et (c)-(d) lorsque ceux-ci sont synchronisés.

apparaître des pics de force liés à la rotation de la sphère le long des surfaces de préhension. Ces parasites n'apparaissent plus dans le cas où les mouvements des manipulateurs sont synchronisés entre eux (Fig.V.28(b)). Finalement, la sphère est placée au point focal du faisceau laser déterminé expérimentalement par la procédure *backtracking*.

Afin de tester les performances de suivi de l'estimateur nous avons introduit une dérive continue du faisceau laser associée à une atténuation de son intensité lumineuse d'émission en plaçant un filtre opaque devant l'objectif de la diode laser. Les résultats de l'expérience sont donnés à la Fig.V.29. Le zoom donné à la Fig.V.30 montre les bonnes performances de suivi du pic d'intensité lumineuse malgré l'atténuation de l'amplitude au cours du temps. L'encart situé en haut de la figure représente le positionnement sous faisceau laser de l'objet saisi par les deux sondes AFM. Des expériences dynamiques de suivi de faisceau ont également permis de retrouver des résultats similaires à ceux présentés au Chapitre 4 tout en conservant la stabilité mécanique de préhension de l'objet.

5 Mise en oeuvre sous faisceau de lumière à rayons X.

En vue de valider expérimentalement les algorithmes de contrôle et de suivi développés dans le cadre de cette thèse sous conditions réelles d'illumination avec un rayonnement X, une mise en oeuvre logicielle et matérielle a été initiée dans le cadre du projet PIANHO. Une plateforme de manipulation interactive compatible avec l'environnement de travail spécifique aux lignes de lumière (environnement

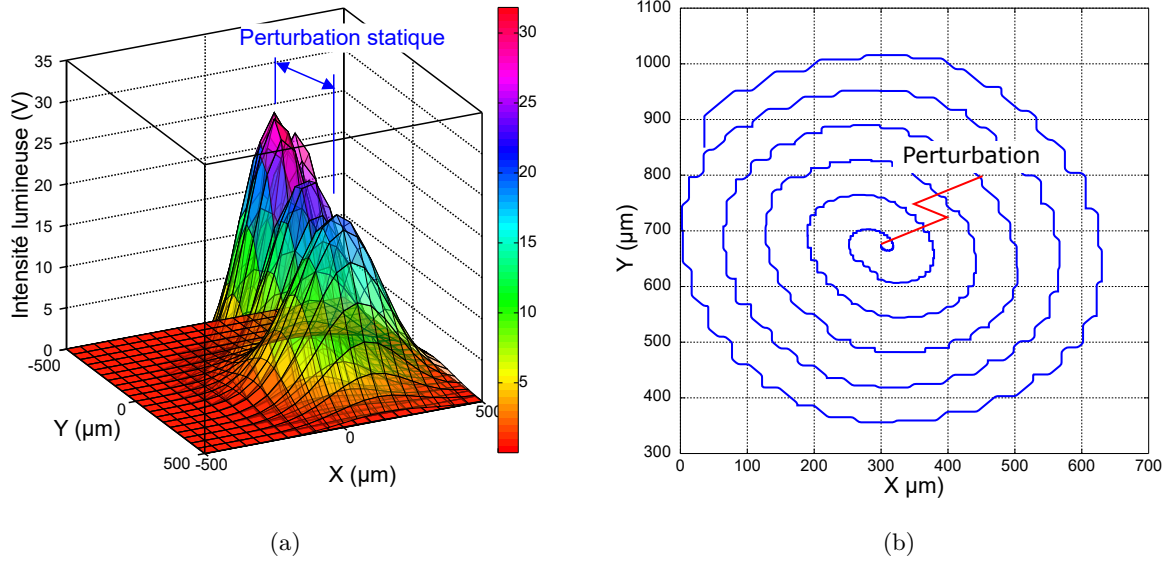


Figure V.29 – Estimation du maximum d'intensité suite à une perturbation. (b) représente l'évolution de la distribution 3D de l'intensité lumineuse au cours de la perturbation et (b) le suivi 2D de l'intensité lumineuse. Les points rouges et bleus représentent les points de suivi du maximum d'intensité et de la spirale d'Archimède.

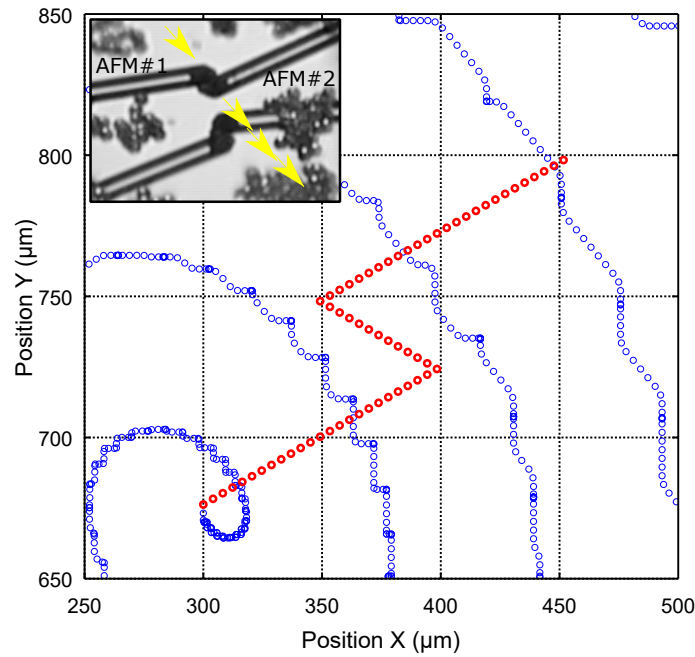


Figure V.30 – Zoom de l'estimation et du suivi réel de la position du maximum d'intensité lumineuse lorsqu'une perturbation extérieure fait dévier le faisceau de lumière.

bruité, compacité, distance imposée entre le poste de pilotage et l'instrument, etc.) a été développée au sein du Surface Science Lab de l'ESRF en étroite collaboration avec le partenaire I-Néel. Elle repose sur deux sondes locales de force basée sur des résonateurs à quartz (diapason ou LER-Long Extended Resonator) sur chacun desquels est fixée un levier AFM, qui permettent de mesurer le gradient de force entre la nanopointe et l'échantillon. Ces sondes ont été décrites dans le Chapitre 2. Elles ont la particularité d'embarquer à la fois l'actionneur et le capteur ce qui les rend compactes et autonomes, qualité appréciée pour une utilisation en environnement synchrotron. Les sondes sont indépendantes car chacune est équipée d'un système de micro/nano-déplacement 3D permettant un positionnement grossier (jusqu'à 8mm avec des pas de 30nm) et fin (grâce à un scanner piézoélectrique). L'échantillon est aussi équipé du même double dispositif de positionnement en 3D. Un microscope optique fixé au dessus de l'ensemble, donne une vision globale de l'espace de travail permettant ainsi un pré-positionnement des sondes et du suivi des manipulations (Fig.V.31(b)).

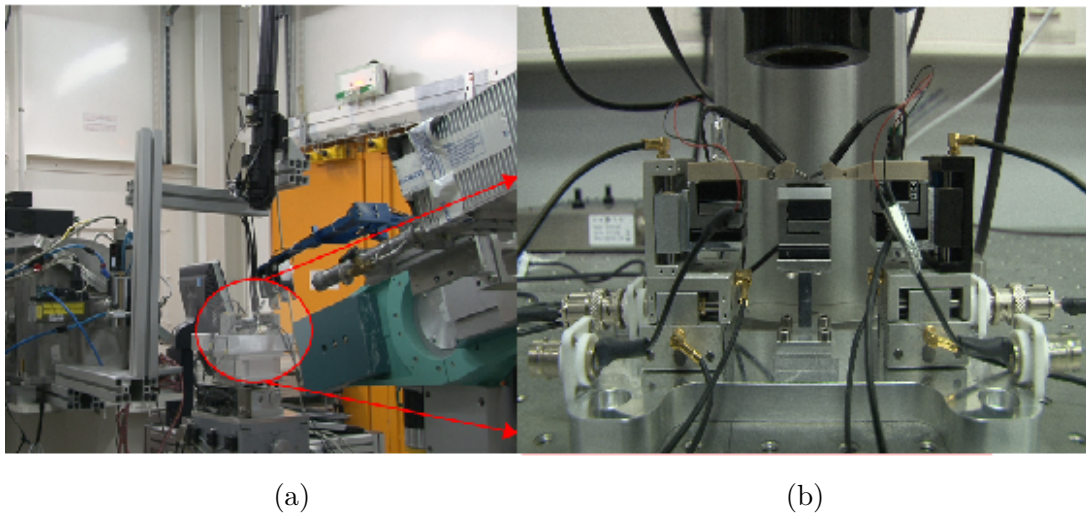


Figure V.31 – (a) Vue globale du montage de la tête duale nanopince mécanique sur une ligne de lumière ; (b) Zoom de la nanopince mécanique.

Les algorithmes de contrôle robuste des micromanipulateurs et de recherche de faisceau ont été implantés sur la plateforme de l'ESRF. Les premiers essais sur des lignes de lumières ont été initiées (Fig.V.31(a)). Cependant, ce projet se prolonge d'une part dans le cadre d'un partenariat sur fonds propres entre le laboratoire PRISME et l'ESRF par l'utilisation d'algorithmes robotiques spécifiques pour le repérage spatial de nano-faisceaux de rayons X et d'autre part, dans le cadre du projet "Micro/nano-station XRF" financée par le programme DEFI Nano 2015 du CNRS pour permettre l'implémentation de station interactive à des sources de rayons X de laboratoire.

6 Conclusion

Ce chapitre présente la validation expérimentale du positionnement d'un micro-objet sphérique sous un faisceau de lumière laser à l'aide de sondes AFM avec capteur de force intégré. La stratégie de contrôle des micromanipulateurs (Chapitre 3) et d'estimation de position du faisceau de lumière (Chapitre 4) ont été implémentés sur la plate-forme expérimentale décrite dans le Chapitre 2. Le travail présenté a permis de traiter le problème de la focalisation du micro-échantillon au coeur de la focale d'un faisceau de lumière. Diverses méthodologies de préhension avec 1 ou 2 sondes AFM ont été proposées en vue d'évaluer chacune d'entre-elles dans un contexte de positionnement tridimensionnel. On a ainsi démontré qu'il était possible d'automatiser une séquence d'analyse d'échantillon : détection du point focal du faisceau, approche grossière et fine des sondes AFM, préhension contrôlée en force et transport sous faisceau de lumière. Les résultats expérimentaux démontrent les performances de poursuite lorsque le faisceau laser incident est soumis à des perturbations externes. De plus, les résultats préliminaires montrent que la stabilité de la tâche de préhension est préservée au cours du suivi du faisceau de lumière. Ce "benchmark" démontre la faisabilité des approches proposées en vue de leur intégration future dans un synchrotron comme celui de l'ESRF à Grenoble.

Chapitre VI

Conclusion générale et perspectives

Nous avons présenté dans cette thèse les différentes étapes de conception d'une plateforme micro-robotique dédiée au positionnement sous faisceau de lumière d'objets de dimensions micrométriques. Cette plateforme a pour vocation de mettre en oeuvre les méthodologies d'asservissement et de suivi de position de micro-objets placés au coeur même d'un faisceau de lumière. L'objectif final étant de caractériser des micro/nano-matériaux par diffraction et diffusion des rayons X. Nous présentons dans ce qui suit les résultats clés obtenus dans ce travail afin de mettre en perspective les futures évolutions de la plateforme expérimentale ainsi que ses applications en milieu synchrotron.

1 Conclusion Générale

Le chapitre 2 a présenté la conception d'une plateforme microrobotique de manipulation duale parfaitement adaptable aux contraintes de l'analyse d'échantillons sous rayons-X. Notre choix s'est orienté vers l'utilisation d'un microscope optique pour la perception de la scène, de deux microscopes latéraux pouvant être associés à l'imagerie par AFM pour une résolution plus importante. Notamment, les sondes AFM avec capteur de force piézorésistif intégré sont utilisées pour manipuler les échantillons avec une force de préhension contrôlée. Le déplacement des pointes AFM est assuré quant à lui par deux micromanipulateurs à double-étage de positionnement synchrones : un étage magnétique assurant les grands déplacements avec une résolution grossière (3 ddl), et un second étage de nanopositionnement piézoélectrique pour les mouvements fins (3ddl). Le positionnement des sondes AFM étant asservi par photodétection de la lumière diffractée par l'objet sous test. Cependant, dans la mesure où l'accès aux sources de lumière à rayons X est fortement réglementé, le prototype condans le cadre de cette étude intègre une diode laser reproduisant une distribution gaussienne et centrée semblable à celle d'un faisceau X. La plateforme robotique développée permet ainsi de répondre à l'ensemble des spécifications du projet.

Le chapitre 3 a proposé une stratégie de commande des micromanipulateurs à double étage à mettre en oeuvre pour assurer l'asservissement de position des sondes AFM. De manière pragmatique, l'approche adoptée a consisté à tirer partie de l'électronique de contrôle du micromanipulateur pour réaliser une structure de contrôle robuste. Une architecture de contrôle de type MIMO à double-étage

a été choisie pour sa simplicité de mise en oeuvre. Notre choix s'est orienté vers la synthèse d'un contrôleur PID pour K_M (micro-transalteur magnétique) et d'un contrôleur H_∞ à sensibilité mixte pour K_N (nano-translateur piézoélectrique). L'objectif principal de la commande robuste que nous avons synthétisée était de faire face à différents types de phénomènes non-linéaires : perturbations, erreurs de modélisation et variabilité de la dynamique du système. Pour cela, nous avons introduit un algorithme génétique dans le choix des paramètres des fonctions de pondération des différents filtres passe-bas et passe-haut de la commande. Des résultats intéressants ont été obtenus en termes de stabilité et de performance ainsi qu'au niveau du rejet des perturbations dynamiques.

En se basant sur cette commande maître-esclave à structure découplée, le chapitre 4 propose des algorithmes permettant la synchronisation entre le faisceau de lumière émis par la source laser et le photodétecteur quatre-quadrants permettant la réception de ce signal. Ce problème a montré toute sa complexité lorsque l'on considère que le faisceau est soumis à des dérives d'alignement continues importantes (déviations du faisceau) ainsi qu'à des fluctuations dynamiques aléatoires liées au mouvement Brownien du faisceau. Pour traiter ce problème, nous avons proposé dans un premier temps une modélisation géométrique et dynamique du faisceau gaussien (laser ou rayons X) pour aborder le problème de l'asservissement en position du faisceau lumineux. L'un des éléments clés de la stratégie de synchronisation proposée réside dans la phase de prédiction de la position du faisceau sur le photodétecteur. Deux algorithmes d'estimation basés sur les filtres de Kalman et particulaire ont été simulés, testés et évalués expérimentalement. Une étude comparative a montré que leur utilisation dépendait fortement du type de perturbation, de la dynamique de poursuite et du caractère nonlinéaire des perturbations. Nous concluons sur le fait que compte tenu de sa facilité de mise oeuvre et de ses performances dans la poursuite du faisceau laser, le filtre particulaire sera retenu comme estimateur dans la suite de l'étude. Après avoir validé expérimentalement la robustesse et la stabilité des stratégies de commande des micromanipulateurs ainsi que du suivi du faisceau de lumière, nous avons abordé le côté applicatif de ces méthodes dans le chapitre 5. Le cas de la micromanipulation d'objets sphériques en polystyrène de $8\mu\text{m}$ de diamètre placés sous faisceau de lumière laser a été retenu comme "benchmark". Diverses méthodologies de préhension avec 1 ou 2 sondes AFM avec capteur de force intégré ont été proposées en vue d'évaluer chacune d'entre elles dans un contexte de positionnement 3D dans l'espace. On a ainsi démontré qu'il était possible d'automatiser une séquence complète d'analyse d'échantillon : détection du point focal du faisceau, approche grossière et fine des sondes AFM, préhension avec mesure de force et transport sous faisceau de lumière. Les résultats expérimentaux préliminaires démontrent de bonnes performances de poursuite lorsque le faisceau laser incident est soumis à des perturbations externes. De plus, les résultats préliminaires montrent que la stabilité de la tâche de préhension est préservée au cours du suivi du faisceau de lumière.

2 Perspectives

Plusieurs perspectives de recherche à court et moyen terme sont prévues :

- **Imagerie AFM de l'objet :** Les micromanipulations précédentes ont été grandement facilitées par le(s) microscope(s) optique(s) donnant accès à toute la scène (pointes+objet) compte tenu de la taille des microsphères. Pour aller plus loin et saisir un nano-objet avec un diamètre $< 500\text{nm}$, il faut mettre à profit les capacités d'imagerie AFM des sondes pour le localiser. De plus nos pointes étant indépendantes, il nous faut développer une stratégie pour localiser l'extrémité des pointes l'une par rapport à l'autre. Les stratégies de positionnement proposées par l'équipe de S. Régnier [15] constituent des pistes intéressantes.
- **Lois de commande :** Compte tenu de l'exposition de l'objet au rayonnement X, la force de préhension doit être adaptée en ligne compte tenu de la variation des forces extérieures (pression de radiation X) ainsi que de la modification des propriétés de l'échantillon (apparition de forces électrostatiques dues au rayonnement X) qui vont créer des instabilités mécaniques. De plus, compte tenu de la variabilité de la nature et de la rigidité des objets manipulés (cristaux, molécules,...). Bien que la mesure de la force de préhension ait permis de contrôler finement les forces d'interaction avec une résolution de l'ordre du μN , la notion de contrôle adaptatif en impédance semble être une voie prometteuse.
- **Partage d'autorité** Les premiers essais réalisés dans ce travail de thèse ont montré qu'il était très difficile de réaliser l'automatisation complète des tâches de localisation, de préhension, de transport, de maintien sous faisceau de lumière et enfin de dépose d'un micro-objet de manière contrôlée et sûre. A plus forte raison lorsque l'on considère des objets nanométriques. L'intégration du geste de l'opérateur dans la boucle de contrôle par l'intermédiaire de la téléopération à retour d'effort peut apporter une solution efficace au problème de l'automatisation. Des stratégies de partage d'autorité entre l'utilisateur et le contrôleur de tâches est une voie qui a déjà été initiée par simulation dans le cadre de ce projet.

Publications

Article dans des revues scientifiques à comité de lecture

N. Amari, D. Folio and A. Ferreira. "Motion of a Micro/Nanomanipulator using a Laser Beam Tracking System". International Journal of Optomechatronics, 2014, Vol 8, Issue 1, pp.30-46.

Article dans des Conférences internationales à comité de lecture

N. Amari, D. Folio and A. Ferreira. "Robust Tracking of a Two-Fingered Micromanipulation System Working Through the Focus of an Optical Beam", American Control Conference (ACC2014), June 2014, pp.1613-1618, Portland, USA.

N. Amari, D. Folio and A. Ferreira. " Robust Nanomanipulation Control based on Laser Beam Feedback", IEEE International Conference on Robots and Intelligent Systems (IROS'2014), September 2014, Chicago, USA.

N. Amari, D Folio, A Ferreira. "Robust laser beam tracking control using micro/nano dual-stage manipulators". IEEE International Conference on Robots and Intelligent Systems (IROS'2013), November 2013, pp.1543-1548, Tokyo Big Sight, Japon.

N. Amari, D. Folio, K. Belharet and A. Ferreira. "Motion of a Micro/Nanomanipulator using a Laser Beam Tracking System", IEEE International Symposium on Optomechatronic Technologies (ISOT2013), October 2013, Jeju Island, Korea.

Chapitres d'ouvrages scientifiques

N. Amari, D. Folio and A. Ferreira. "Nanorobotics for Synchrotron Radiation Applications", Springer Science+Business Media Dordrecht 2015B. Bhushan (ed.), Encyclopedia of Nanotechnology, à apparaître

Annexe A

La méthode des moindres carrées

La technique des moindres carrées se résume à déterminer un vecteur de paramètres de manière à minimiser un vecteur d'erreurs ε . Elle consiste à minimiser le carré de la norme euclidienne du vecteur d'erreurs.

La fonction $\mathbf{J} : \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}$, à minimiser est ainsi :

$$\hat{\vartheta}(k) = \left(\phi^T(k) \phi(k) \right)^{-1} \phi^T(k) \mathbf{y}(k) \quad (\text{A.1})$$

En supposant que la matrice d'observation $\phi(k)$ est de rang p , le vecteur de paramètres estimé est unique et est donné par l'équation précédente.

Démonstration Soit

$$\begin{aligned} \mathbf{J}(\vartheta) &= (\mathbf{y} - \phi\vartheta)^T (\mathbf{y} - \phi\vartheta) \\ &= \mathbf{y}^T \mathbf{y} - \mathbf{y}^T \phi\vartheta - \vartheta^T \phi^T \mathbf{y} + \vartheta^T \phi^T \phi\vartheta \end{aligned}$$

- $\mathbf{y}$ est le vecteur des sorties.
- ϕ est la matrice des observations.
- ϑ est le vecteur des paramètres à estimer.

Le rang de la matrice d'observation ϕ est égal à p par hypothèse ; l'algèbre linéaire nous enseigne que le rang de la matrice carrée $\phi^T \phi$ d'ordre p vaut aussi p ; elle est par conséquent inversible. L'égalité précédente peut s'écrire :

$$\mathbf{J}(\vartheta) = \left(\vartheta - \left(\phi^T \phi \right)^{-1} \phi^T \mathbf{y} \right)^T \phi^T \phi \left(\vartheta - \left(\phi^T \phi \right)^{-1} \phi^T \mathbf{y} \right) - \mathbf{y}^T \mathbf{y} + \mathbf{y}^T \phi \left(\phi^T \phi \right)^{-1} \phi^T \mathbf{y} \quad (\text{A.2})$$

Seul le premier terme de $\mathbf{J}(\vartheta)$, qui peut être mis sous la forme suivante dépend de ϑ :

$$\mathbf{J}(\vartheta) = \left(\phi(\vartheta - \left(\phi^T \phi \right)^{-1} \phi^T \mathbf{y}) \right)^T \left(\phi(\vartheta - \left(\phi^T \phi \right)^{-1} \phi^T \mathbf{y}) \right) \quad (\text{A.3})$$

Ce terme est toujours supérieur à 0, sauf quand $\phi(\vartheta - (\phi^T \phi)^{-1^T} \mathbf{y}) = 0$; il est alors nul et la fonction $\mathbf{J}(\vartheta)$ atteint son minimum. Le rang de ϕ étant p , le système d'équations algébriques linéaires $\phi(\vartheta - (\phi^T \phi)^{-1^T} \mathbf{y}) = 0$ possède une et une seule solution nulle : $\hat{\vartheta} - (\phi^T \phi)^{-1} \phi^T \mathbf{y} = 0$ d'où :

$$\hat{\vartheta} = (\phi^T \phi)^{-1} \phi^T \mathbf{y} \tag{A.4}$$

Annexe B

Transformation des Fonctions Discrètes en Continues

Les fonctions continues sont représentées par les équations suivantes pour les axes x , y et z respectivement :

$$G_{m(x,y,z)}(s) = \frac{b_0 + b_1 s^{-1} + b_2 s^{-2} + b_3 s^{-3}}{1 + a_1 s^{-1} + a_2 s^{-2} + a_3 s^{-3}} \quad (\text{B.1})$$

$$G_{n(x,y,z)}(s) = \frac{b_1 s^{-1} + b_2 s^{-2} + b_3 s^{-3}}{1 + a_1 s^{-1} + a_2 s^{-2} + a_3 s^{-3}} \quad (\text{B.2})$$

Les paramètres issus de l'identification sont donnés par le Tableau III.1. Les fonction des transfert identifiées sont données pour le micro-translateur magnétique :

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{m(x)}(s) = \frac{1.707 + 1.077 \times 10^4 s^{-1} + 4.284 \times 10^4 s^{-2} + 2.707 \times 10^{10} s^{-3}}{1 + 1.325 \times 10^4 s^{-1} + 4.647 \times 10^7 s^{-2} + 198 \times 10^{10} s^{-3}} \\ G_{m(y)}(s) = \frac{0.9414 + 1.216 \times 10^4 s^{-1} + 4.826 \times 10^7 s^{-2} + 1.987 \times 10^{10} s^{-3}}{1 + 1.354 \times 10^4 s^{-1} + 4.721 \times 10^7 s^{-2} + 2.031 \times 10^{10} s^{-3}} \\ G_{m(z)}(s) = \frac{0.7483 + 1.265 \times 10^4 s^{-1} + 4.496 \times 10^7 s^{-2} + 1.887 \times 10^{10} s^{-3}}{1 + 1.279 \times 10^4 s^{-1} + 4.563 \times 10^7 s^{-2} + 1.913 \times 10^{10} s^{-3}} \end{array} \right. \quad (\text{B.3})$$

et pour le nano-translateur piézoélectrique :

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{n(x)}(s) = \frac{-0.01481 + 122.4 s^{-1} - 3.557 \times 10^5 s^{-2} + 3.402 \times 10^8 s^{-3}}{1 + 200.5 s^{-1} + 1.179 \times 10^7 s^{-2} + 3.438 \times 10^8 s^{-3}} \\ G_{n(y)}(s) = \frac{-0.003595 + 24.35 s^{-1} - 7.794 \times 10^4 s^{-2} + 8.723 \times 10^7 s^{-3}}{1 - 10.07 s^{-1} + 1.176 \times 10^7 s^{-2} + 8.762 \times 10^7 s^{-3}} \\ G_{n(z)}(s) = \frac{-0.001392 + 16.73 s^{-1} - 5.463 \times 10^4 s^{-2} + 5.346 \times 10^7 s^{-3}}{1 - 21.37 s^{-1} + 1.182 \times 10^7 s^{-2} + 8.564 \times 10^7 s^{-3}} \end{array} \right. \quad (\text{B.4})$$

Tableau B.1 – Identification des paramètres des fonctions de transfert dans le domaine continu des micro-
translateurs (G_m) et nano-translateurs (G_n) pour chaque axe x , y , et z

Paramètres	G_{mx}	G_{my}	G_{mz}	G_{nx}	G_{ny}	G_{nz}
a_1	1.325×10^4	1.354×10^4	1.279×10^4	200.5	-10.07	-21.37
a_2	4.647×10^7	4.721×10^7	4.563×10^7	1.179×10^7	1.176×10^7	1.182×10^7
a_3	198×10^{10}	2.031×10^{10}	1.913×10^{10}	3.438×10^8	8.762×10^7	8.564×10^7
b_0	1.707	0.9414	0.7483	-0.014 81	-0.003 595	-0.001 392
b_1	1.077×10^4	1.216×10^4	1.265×10^4	122.4	24.35	16.73
b_2	4.284×10^4	4.826×10^7	4.496×10^7	-3.557×10^5	-7.794×10^4	-5.463×10^4
b_3	2.707×10^{10}	1.987×10^{10}	1.887×10^{10}	3.402×10^8	8.723×10^7	5.346×10^7

Annexe C

Contrôleur H_∞ par Loop Shaping

Au contraire de l'approche de Glover-Doyle, aucune fonction de pondération ne peut être introduite dans le problème. Le réglage des performances est donc obtenu en affectant un modelage ouvert (loop-shaping) du processus avant de calculer le correcteur. La démarche est la suivante [2] :

- Ajouter à la matrice $G(s)$ du système à réguler un pré-compensateur $W_1(s)$ ou un post-compensateur $W_2(s)$ de sorte qu'on effectue une première amélioration des performances du système augmenté $G_a(s) = W_2(s)G(s)W_1(s)$ (figure C.2(a)). Typiquement, on assurera des grands gains en basse fréquence (par exemple au moyen d'une action intégrale) et des faibles gains en haute fréquence. Dans le cas monovarié, cette démarche est menée en contrôlant le gain et la phase de $G_a(jw)$ dans le plan de Bode. Pour un système multivarié, on a le tracé des valeurs singulières représenté par la figure C.1 :

$$\sigma_i(G_a(jw)) = (\lambda_i(G_a(jw)G_a(-jw)^T))^{1/2} \quad (\text{C.1})$$

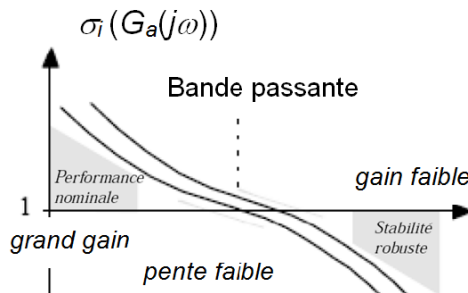


Figure C.1 – Valeurs singulières du système compensé.

- À partir des factorisations premières de $G_a(s)$, appliquer les résultats précédents pour calculer

ϵ_{max} , puis un correcteur K assurant avec une valeur de ϵ légèrement inférieure à ϵ_{max} .

$$\left\| \begin{pmatrix} I \\ K \end{pmatrix} (I - W_2 G W_1 K)^{-1} (I \quad W_2 G W_1) \right\|_{\infty} = \gamma = \epsilon^{-1} \quad (\text{C.2})$$

- La structure de correction est obtenue en combinant le correcteur K et les compensateurs W_1 et W_2 (figure C.2(a)).

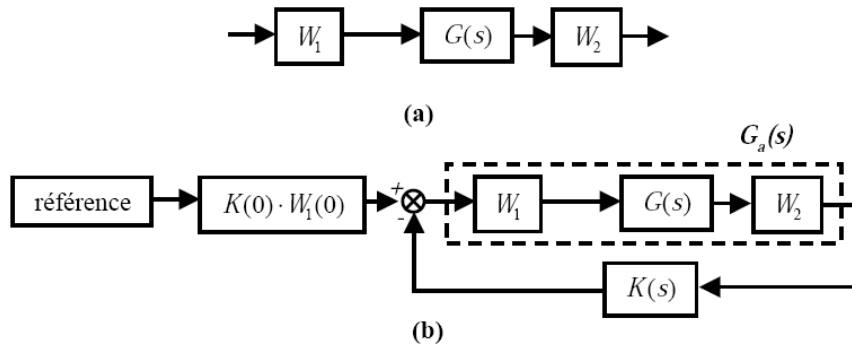


Figure C.2 – Synthèse H_{∞} par Loop-Shaping.

Du point de vue pratique, les points importants de cette approche sont les suivants :

- On notera que toute la connaissance issue de l'automatique fréquentielle peut être utilisée lors de la première étape, avec toutefois moins de contraintes sur la phase que dans un réglage traditionnel : en effet cette étape est suivie d'une synthèse H_{∞} qui, si nécessaire, améliore les marges de stabilité. En pratique, les compensateurs W_1 et W_2 sont des réseaux classiques de type PI , avance ou retard de phase, filtre passe-bas.
- La valeur de ϵ_{max} obtenue à la deuxième étape constitue un indicateur de robustesse (puisque'elle définit la taille de l'ensemble ξ_{ϵ}) mais aussi de performances. En effet le critère (C.2) contient quatre fonctions de transfert différentes du système bouclé, dont la norme H_{∞} ne sera plus égale à ϵ^{-1} ; de plus McFarlane et Glover ont montré que l'écart entre les valeurs singulières de $(W_1 K W_2)G$ ou $G(W_1 K W_2)$ - boucle ouverte finale- et celles de $(W_2 G W_1)$ -boucle ouverte de la première étape - est d'autant plus faible que ϵ . En pratique, une valeur comprise entre 0.3 et 0.5 peut être considérée comme satisfaisante.
- L'ordre du correcteur K est égal à la somme des ordres de G, W_1, W_2 , l'expérience montre que l'ordre est souvent moins élevé à celui d'un correcteur H_2 ou bien H_{∞} standard.

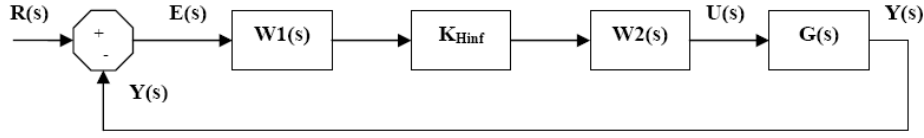


Figure C.3 – Schéma de principe d'une commande par H_∞ loop-shaping.

Commande loop shaping : choix des fonctions de pondération :

Le loop shaping est le fait de modeler la fonction de transfert en boucle ouverte en français : **calibrage de la boucle**.

Les fonctions de pondération sont choisies de telle manière à avoir les spécifications de la boucle ouverte. Il est à noter que le choix de ces fonctions de pondérations, bien que faisant appel aux connaissances de l'automatique classique, est primordial pour la synthèse d'un contrôleur H_∞ robuste. De ce fait, ce choix doit se faire judicieusement.

- Pour avoir un grand gain en basses fréquences, un correcteur PI a été synthétisé dont l'équation pour l'axe x est la suivante :

$$W_1 = 50 \times \frac{10s + 35.2}{10s} \quad (\text{C.3})$$

Il est à rappeler que le grand gain en basses fréquences et en boucle ouverte, permet de respecter les spécifications requises pour une bonne synthèse de la commande H_∞ par loop shaping.

- Pour un gain petit en basses fréquences, un filtre passe bas a été synthétisé toujours pour le même axe x :

$$W_2 = \frac{1}{s + 11.3} \quad (\text{C.4})$$

Le correcteur final en boucle qu'on nommera K est synthétisé en utilisant la commande Matlab `ncfsyn` (H_∞ normalized coprime factor controller synthesis). Cette commande génère un correcteur dont le degré minimal sera la somme des degrés du système étudié et les degrés des fonctions de pondération. Le correcteur K final calculé est le résultat de l'adjonction des fonctions de pondération et du correcteur K_s correcteur fourni par Matlab : $K(s) = W_1 \times K_s \times W_2$. Le correcteur H_∞ synthétisé est finalement le suivant :

$$K(s) = \frac{-72.66s^5 - 3345s^4 - 5.068 \times 10^7 s^3 - 1.453 \times 10^9 s^2 - 9.211 \times 10^9 s + 1.663 \times 10^{10}}{s^6 + 86.11s^5 + 6.988 \times 10^5 s^4 + 4.91 \times 10^7 s^3 + 6.03 \times 10^8 s^2 + 1.552 \times 10^9 s}. \quad (\text{C.5})$$

Le degré du correcteur étant assez élevé (degré 6), ce dernier peut être réduit en utilisant les fonctions de réduction de fonctions de transferts en conservant des caractéristiques identiques. Cette fonction sous Matlab est donnée par la commande `balmr`. On voit sur la figure C.7 que le correcteur réduit

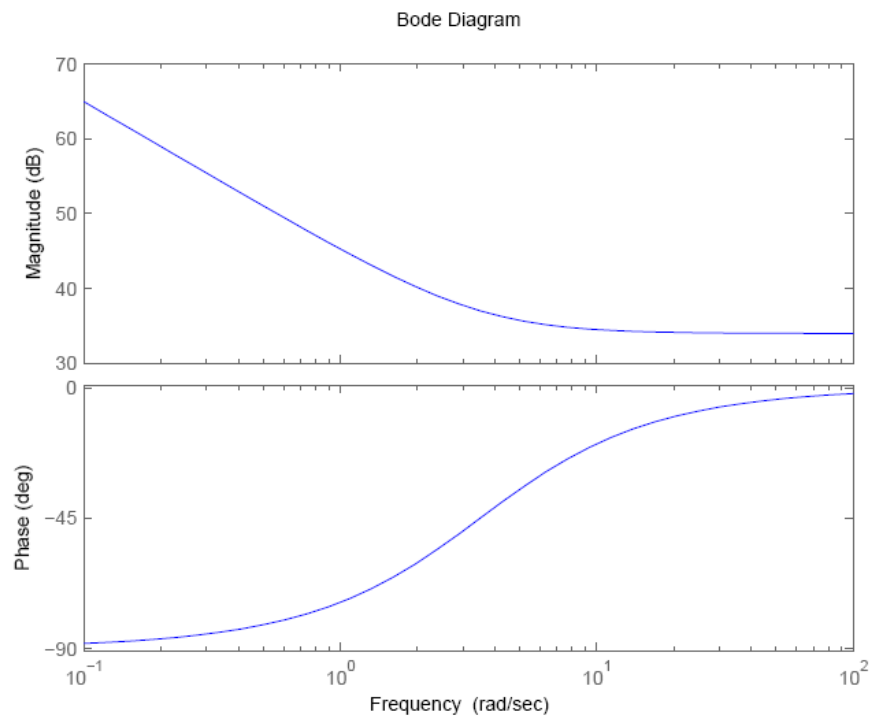


Figure C.4 – Fonction de pondération W1 : contrôleur PI.

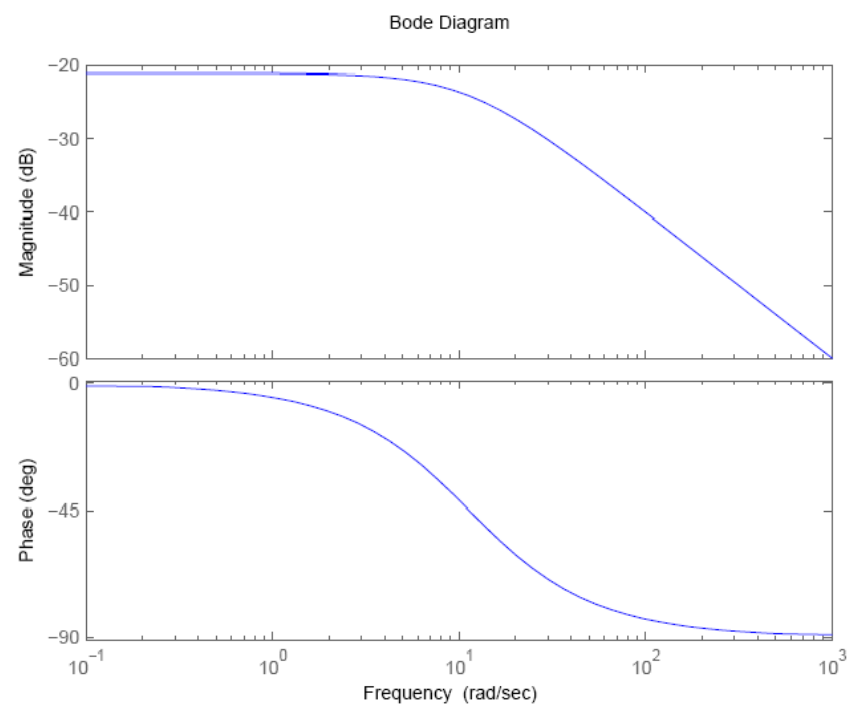


Figure C.5 – Fonction de pondération W2 : filtre passe-bas.

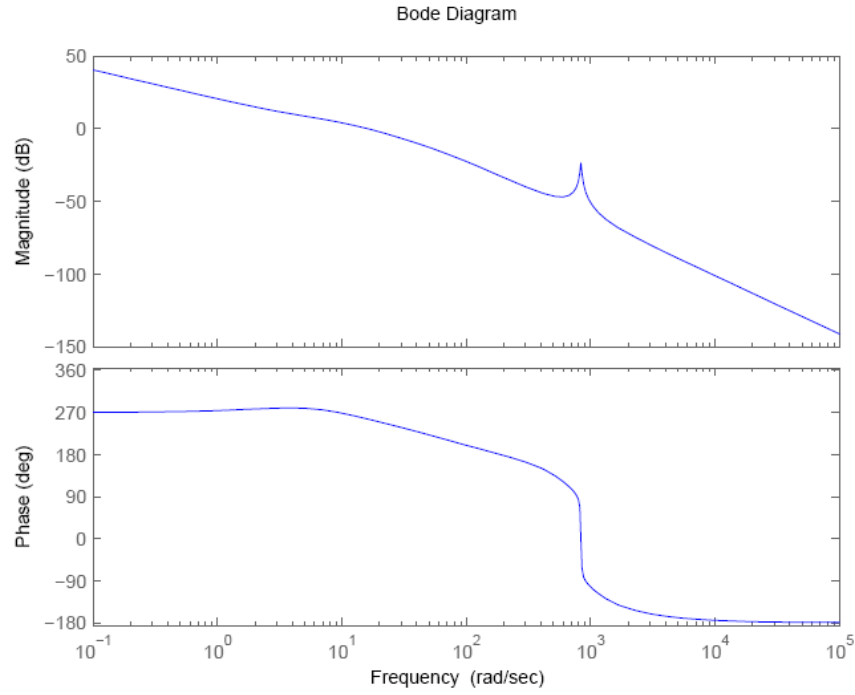


Figure C.6 – Système renforcé par les fontions de pondération.

est pratiquement identique au correcteur initial. Avec cette fonction le degré du correcteur a pu être réduit jusqu'à un degré 3 voir figure C.7, facilitant de ce fait l'implémentation de la commande sous C++.

$$K_r(s) = \frac{-72.69s^2 - 1824s - 6706}{s^3 + 66.88s^2 + 625.7s - 5.07 \times 10^{-11}}. \quad (\text{C.6})$$

En respectant la fréquence d'échantillonnage le correcteur en discret est donné par la fonction de transfert suivant :

$$K_{rd}(s) = \frac{0.1726z^2 - 0.3347z + 0.1622}{z^3 - 2.842z^2 + 2.688z - 0.846} \quad (\text{C.7})$$

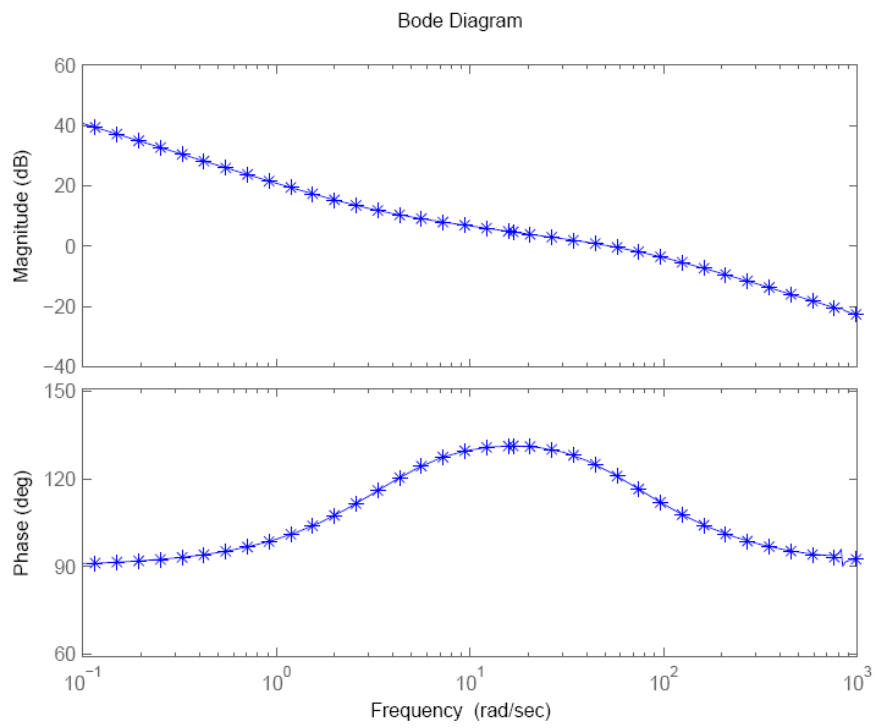


Figure C.7 – Correcteur initial(-) et correcteur réduit(*).

Annexe D

Données techniques des micro-translateurs (M-111.1DG)



Compact Micro- Translation Stage

CHOICE OF DRIVES & TRAVEL RANGES, XY(Z) COMBINATIONS POSSIBLE



M-110 • M-111 • M-112

- Travel ranges 5 mm, 15 mm and 25 mm
- Very cost effective
- Min. incremental motion 50 nm
- Max. velocity 2 mm/ s
- Closed- loop DC servo and stepper motor versions
- Noncontact limit and reference point switches
- Optional recirculating ball screw drives provide high speeds & long lifetimes
- Vacuum- compatible version down to 10^{-6} hPa

Specifications

	M-110.1DG / M-111.1DG / M-112.1DG	M-110.12S / M-111.12S / M-112.12S	M-110.2DG / M-111.2DG / M-112.2DG	M-110.22S / M-111.22S / M-112.22S	Unit	Tolerance
Motion and positioning						
Travel range	5 / 15 / 25	5 / 15 / 25	5 / 15 / 25	5 / 15 / 25	mm	
Integrated sensor	Rotary encoder	–	Rotary encoder	–		
Sensor resolution	2048		2048		Cts./ rev.	
Design resolution	0.0069	0.038*	0.0086	0.046*	µm	
Incremental motion	0.05	0.05	0.2	0.2	µm	min.
Backlash	2	2	4	4	µm	
Unidirectional repeatability	0.1	0.1	0.5	0.5	µm	
Pitch / yaw	±50 / ±150 / ±150	±50 / ±150 / ±150	±50 / ±150 / ±150	±50 / ±150 / ±150	µrad	
Velocity	1 / 1.5 / 1.5	1 / 1 / 1	1.5 / 2 / 2	1 / 1 / 1	mm/ s	max.
Mechanical properties						
Drive screw	Leadscrew	Leadscrew	Recirculating ball screw	Recirculating ball screw		
Thread pitch	0.4	0.4	0.5	0.5	mm	
Gear ratio	28.44444:1	28.44444:1	28.44444:1	28.44444:1		
Motor resolution*	–	384*	–	384*		
Load capacity	30 / 30 / 20	30 / 30 / 20	30 / 30 / 20	30 / 30 / 20	N	max.
Push / pull force	10	10	10	10	N	max.
Holding force	10	10	10	10	N	max.
Lateral force	15 / 10 / 10	15 / 10 / 10	15 / 10 / 10	15 / 10 / 10	N	max.
Drive properties						
Motor type	DC gear motor	2- phase stepper motor	DC gear motor	2- phase stepper motor		
Operating voltage	0 to ±12	24	0 to ±12	24	V	
Motor power	0.52 / 1.75 / 1.75	1.5	0.52 / 1.75 / 1.75	1.5	W	
Current consumption	160 / 320 / 320**		160 / 320 / 320**		mA	

Données techniques des nano-translateurs (P-611.3S)



NanoCube® XYZ Piezo Stage

COMPACT MULTI-AXIS PIEZO SYSTEM FOR NANOPositionING AND FIBER ALIGNMENT



P-611.3

- Travel range to 120 μm $\times$ 120 μm $\times$ 120 μm
- Ultra- compact: 44 mm $\times$ 44 mm $\times$ 44 mm
- Resolution to 0.2 nm
- Rapid response
- Frictionless, high- precision flexure guiding system
- Outstanding lifetime due to PICMA® piezo actuators
- For fast scanning
- Version with integrated fiber adapter interface
- Especially cost- effective systems

Specifications

	P-611.3S P-611.3SF	P-611.3O P-611.3OF	Unit	Tolerance
Active axes	X, Y, Z	X, Y, Z		
Motion and positioning				
Integrated sensor	SGS			
Open- loop travel, -20 to 120 V	120 / axis	120 / axis	μm	min. (20 % / -0%)
Closed- loop travel	100 / axis	–	μm	
Open- loop resolution	0.2	0.2	nm	typ.
Closed- loop resolution	1	–	nm	typ.
Linearity error	0.1	–	%	typ.
Repeatability	<10	–	nm	typ.
Pitch in X, Y	± 5	± 5	μrad	typ.
Runout θ_x (motion in Z)	± 10	± 10	μrad	typ.
Yaw in X	± 20	± 20	μrad	typ.
Yaw in Y	± 10	± 10	μrad	typ.
Runout θ_y (motion in Z)	± 10	± 10	μrad	typ.
Mechanical properties				
Stiffness	0.3	0.3	N/ μm	± 20 %
Unloaded resonant frequency X / Y / Z	350 / 220 / 250	350 / 220 / 250	Hz	± 20 %
Resonant frequency at 30 g in X / Y / Z	270 / 185 / 230	270 / 185 / 230	Hz	± 20 %
Resonant frequency at 100 g in X / Y / Z	180 / 135 / 200	180 / 135 / 200	Hz	± 20 %

Références bibliographiques

- [1] M. M. S. Rodrigues, “Bringing light into the nanoworld : What can you do with an atomic force microscope on top of your synchrotron radiation sample holder ?” Ph.D. dissertation, Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2009.
- [2] A. Nigues, “Manipulation dans le micro/nanomonde : dispositif haptique préhensile,” Ph.D. dissertation, Grenoble, 2012.
- [3] M. C. Roco and W. S. Bainbridge, “Overview converging technologies for improving human performance,” in *Converging technologies for improving human performance*. Springer, 2003, pp. 1–27.
- [4] T. Fukuda, F. Arai, and M. Nakajima, *Micro-nanorobotic manipulation systems and their applications*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [5] G. Duesberg, I. Loa, M. Burghard, K. Syassen, and S. Roth, “Polarized raman spectroscopy on isolated single-wall carbon nanotubes,” *Physical review letters*, vol. 85, no. 25, p. 5436, 2000.
- [6] I. Robinson and R. Harder, “Coherent x-ray diffraction imaging of strain at the nanoscale,” *Nature materials*, vol. 8, no. 4, pp. 291–298, 2009.
- [7] T. Bouvet, C. D. an E Mitchell, and J. Revo, Eds., *Science and Technology Programme 2008-2017*. ESRF, 2007, vol. 1, no. 1-4. [Online]. Available : <http://www.esrf.eu/about/upgrade/documentation/purple-book>
- [8] C. Mavroidis and A. Ferreira, *Nanorobotics : current approaches and techniques*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [9] D. Wu, J. Jang, and T. Nieh, “Elastic and plastic deformations in a high entropy alloy investigated using a nanoindentation method,” *Intermetallics*, vol. 68, pp. 118–127, 2016.
- [10] R. S. Fearing, “Survey of sticking effects for micro parts handling,” in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS’95)*, vol. 2. IEEE, 1995, pp. 212–217.
- [11] H. T. Miyazaki, Y. Tomizawa, S. Saito, T. Sato, and N. Shinya, “Adhesion of micrometer-sized polymer particles under a scanning electron microscope,” *Journal of Applied Physics*, vol. 88, no. 6, pp. 3330–3340, 2000.
- [12] H. Van Brussel, J. Peirs, D. Reynaerts, A. Delchambre, G. Reinhart, N. Roth, M. Weck, and E. Zussman, “Assembly of microsystems,” *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 49, no. 2, pp. 451–472, 2000.
- [13] S. Alvo, “Étude, modélisation et mesure des forces d’adhésion à l’échelle microscopique,” Ph.D. dissertation, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, 2012.
- [14] M. Gauthier, S. Régnier, P. Rougeot, and N. Chaillet, “Analysis of forces for micromanipulations in dry and liquid media,” *Journal of Micromechatronics*, vol. 3, no. 3, pp. 389–413, 2006.

-
- [15] H. Xie and S. Régnier, "High-efficiency automated nanomanipulation with parallel imaging/manipulation force microscopy," *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 11, no. 1, pp. 21–33, 2012.
 - [16] H. Xie, D. S. Haliyo, and S. Régnier, "A versatile atomic force microscope for three-dimensional nanomanipulation and nanoassembly," *Nanotechnology*, vol. 20, no. 21, pp. 215–301, 2009.
 - [17] M. Sitti and H. Hashimoto, "Teleoperated touch feedback from the surfaces at the nanoscale : modeling and experiments," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 8, no. 2, pp. 287–298, 2003.
 - [18] D. Haliyo, Y. Rollot, S. Regnier, and J. Guinot, "Micro-manipulation and adhesion forces," *Romansy 13 : Theory and Practice of Robots and Manipulators*, vol. 422, p. 265, 2014.
 - [19] R. Kumar, A. Kapoor, and R. H. Taylor, "Preliminary experiments in robot/human cooperative microinjection," in *Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'03)*, vol. 4. IEEE, 2003, pp. 3186–3191.
 - [20] J. Kim, H. Ladjal, D. Folio, A. Ferreira, and J. Kim, "Evaluation of telerobotic shared control strategy for efficient single-cell manipulation," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 9, no. 2, pp. 402–406, 2012.
 - [21] J. Agnus, P. De Lit, and N. Chaillet, "Une nouvelle micropince mmoc à quatre degrés de liberté," *Informatique industrielle*, vol. 1, no. IN13, pp. IN13–1, 2003.
 - [22] C. Clévy, A. Hubert, J. Agnus, and N. Chaillet, "A micromanipulation cell including a tool changer," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, no. 10, p. S292, 2005.
 - [23] K. Mølhave, T. Wich, A. Kortschack, and P. Bøggild, "Pick-and-place nanomanipulation using microfabricated grippers," *Nanotechnology*, vol. 17, no. 10, p. 2434, 2006.
 - [24] A. Cagliani, R. Wierzbicki, L. Occhipinti, D. H. Petersen, K. N. Dyvelkov, Ö. S. Sukas, B. G. Herstrøm, T. Booth, and P. Bøggild, "Manipulation and in situ transmission electron microscope characterization of sub-100 nm nanostructures using a microfabricated nanogripper," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 20, no. 3, p. 035009, 2010.
 - [25] Y. Nakazato, T. Yuasa, G. Sekine, H. Miyazawa, M. Jin, S. Takeuchi, Y. Ariga, and M. Murakawa, "Micromanipulation system using scanning electron microscope," *Microsystem technologies*, vol. 15, no. 6, pp. 859–864, 2009.
 - [26] X.-B. Wang, Y. Huang, P. R. Gascoyne, and F. F. Becker, "Dielectrophoretic manipulation of particles," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, no. 3, pp. 660–669, 1997.
 - [27] C. Gosse and V. Croquette, "Magnetic tweezers : micromanipulation and force measurement at the molecular level," *Biophysical journal*, vol. 82, no. 6, pp. 3314–3329, 2002.
 - [28] M. Gauthier and E. Piat, "Control of a particular micro-macro positioning system applied to cell micromanipulation," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 264–271, 2006.
 - [29] A. Haake and J. Dual, "Positioning of small particles by an ultrasound field excited by surface waves," *Ultrasonics*, vol. 42, no. 1, pp. 75–80, 2004.
 - [30] S. Toru, "Conception et réalisation d'une pince acoustique pour la manipulation de cellules," in *JCGE*, Saint-Nazaire, France, 2013, pp. actes-électroniques, "Prix scientifique" JCGE'2013 (3 prix attribués pour 80 présentations).
 - [31] A. Ashkin, J. Dziedzic, J. Bjorkholm, and S. Chu, "Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles," *Optics letters*, vol. 11, no. 5, pp. 288–290, 1986.
 - [32] A. Ashkin, J. Dziedzic, and T. Yamane, "Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams," *Nature*, vol. 330, no. 6150, pp. 769–771, 1987.

-
- [33] K. Sasaki, M. Koshioka, H. Misawa, N. Kitamura, and H. Masuhara, "Pattern formation and flow control of fine particles by laser-scanning micromanipulation," *Optics letters*, vol. 16, no. 19, pp. 1463–1465, 1991.
- [34] H. Liang, K. T. Vu, P. Krishnan, T. C. Trang, D. Shin, S. Kimel, and M. W. Berns, "Wavelength dependence of cell cloning efficiency after optical trapping," *Biophysical journal*, vol. 70, no. 3, p. 1529, 1996.
- [35] M. J. Lang, C. L. Asbury, J. W. Shaevitz, and S. M. Block, "An automated two-dimensional optical force clamp for single molecule studies," *Biophysical journal*, vol. 83, no. 1, pp. 491–501, 2002.
- [36] N. Chaillet and S. Régnier, *Microrobotics for micromanipulation*. John Wiley & Sons, 2013.
- [37] A. J. Fleming and K. K. Leang, *Design, modeling and control of nanopositioning systems*. Springer, 2014.
- [38] L. Dong, F. Arai, and T. Fukuda, "Destructive constructions of nanostructures with carbon nanotubes through nanorobotic manipulation," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 9, no. 2, pp. 350–357, 2004.
- [39] S. Fatikow, T. Wich, H. Hülsen, T. Sievers, and M. Jähnisch, "Microrobot system for automatic nano-handling inside a scanning electron microscope," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 12, no. 3, pp. 244–252, 2007.
- [40] L.-M. Peng, Q. Chen, X. Liang, S. Gao, J. Wang, S. Kleindiek, and S. Tai, "Performing probe experiments in the sem," *Micron*, vol. 35, no. 6, pp. 495–502, 2004.
- [41] M. Yu, M. J. Dyer, G. D. Skidmore, H. W. Rohrs, X. Lu, K. D. Ausman, J. R. Von Ehr, and R. S. Ruoff, "Three-dimensional manipulation of carbon nanotubes under a scanning electron microscope," *Nanotechnology*, vol. 10, no. 3, p. 244, 1999.
- [42] H. M. El-Badry, *Micromanipulators and micromanipulation*. Springer Science & Business Media, 2012, vol. 3.
- [43] S. Fatikow, J. Seyfried, A. Buerkle, F. Schmoedel *et al.*, "A flexible microrobot-based microassembly station," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 27, no. 1-2, pp. 135–169, 2000.
- [44] S. Floyd, C. Pawashe, and M. Sitti, "Two-dimensional contact and noncontact micromanipulation in liquid using an untethered mobile magnetic microrobot," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 25, no. 6, pp. 1332–1342, 2009.
- [45] E. Diller, M. Sitti *et al.*, "Micro-scale mobile robotics," *Foundations and Trends in Robotics*, vol. 2, no. 3, pp. 143–259, 2013.
- [46] M. Weck and C. Peschke, "Equipment technology for flexible and automated micro-assembly," *Microsystem technologies*, vol. 10, no. 3, pp. 241–246, 2004.
- [47] K. Mader, F. Marone, C. Hintermüller, G. Mikuljan, A. Isenegger, and M. Stampanoni, "High-throughput full-automatic synchrotron-based tomographic microscopy," *Journal of synchrotron radiation*, vol. 18, no. 2, pp. 117–124, 2011.
- [48] M. Tabib-Azar, *Microactuators : electrical, magnetic, thermal, optical, mechanical, chemical & smart structures*. Springer Science & Business Media, 2013, vol. 4.
- [49] M. Gauthier, "Micromanipulation robotique en milieu liquide," Ph.D. dissertation, Université de Franche-Comté, 2011.
- [50] Y. Haddab, "Conception et réalisation d'un système de micromanipulation contrôlé en effort et en position pour la manipulation d'objets de taille micrométrique," Ph.D. dissertation, Université de Metz, 2008.
- [51] T. Pfeifer and G. Dussler, "Process observation for the assembly of hybrid micro systems," in *Micro-mechatronics and Human Science, 2002. MHS 2002. Proceedings of 2002 International Symposium on*. IEEE, 2002, pp. 117–123.

-
- [52] Y. Shen, N. Xi, B. Song, W. J. Li, and C. A. Pomeroy, "Networked human/robot cooperative environment for tele-assembly of mems devices," *Journal of Micromechatronics*, vol. 3, no. 3, pp. 239–266, 2006.
- [53] T. Fukuda, F. Arai, and L. Dong, "Nano robotic world—from micro to nano," in *Int'l Workshop on Nano-\ Micro-Robotics in Thailand*, 2002.
- [54] W. Wang, X. Liu, and Y. Sun, "Autonomous zebrafish embryo injection using a microrobotic system," in *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE'07)*. IEEE, 2007, pp. 363–368.
- [55] D.-H. Kim, C. N. Hwang, Y. Sun, S. H. Lee, B. Kim, and B. J. Nelson, "Mechanical analysis of chorion softening in prehatching stages of zebrafish embryos," *IEEE Transactions on NanoBioscience*, vol. 5, no. 2, pp. 89–94, 2006.
- [56] E. Enikov and B. Nelson, "Three-dimensional microfabrication for a multi-degree-of-freedom capacitive force sensor using fibre-chip coupling," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 10, no. 4, p. 492, 2000.
- [57] Y. Sun, S. N. Fry, D. Potasek, D. J. Bell, and B. J. Nelson, "Characterizing fruit fly flight behavior using a microforce sensor with a new comb-drive configuration," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 4–11, 2005.
- [58] F. R. Blom, S. Bouwstra, J. Fluitman, and M. Elwenspoek, "Resonating silicon beam force sensor," *Sensors and Actuators*, vol. 17, no. 3, pp. 513–519, 1989.
- [59] Y. Shen, N. Xi, W. J. Li, and J. Tan, "A high sensitivity force sensor for microassembly : design and experiments," in *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, vol. 2. IEEE, 2003, pp. 703–708.
- [60] A. Menciassi, A. Eisinger, M. C. Carrozza, and P. Dario, "Force sensing microinstrument for measuring tissue properties and pulse in microsurgery," *Transactions on Mechatronics, IEEE/ASME*, vol. 8, no. 1, pp. 10–17, 2003.
- [61] M. Tortorese, R. Barrett, and C. Quate, "Atomic resolution with an atomic force microscope using piezoresistive detection," *Applied physics letters*, vol. 62, no. 8, pp. 834–836, 1993.
- [62] A. Wisitsoraat, V. Patthanasetakul, T. Lomas, and A. Tuantranont, "Low cost thin film based piezoresistive mems tactile sensor," *Sensors and Actuators A : Physical*, vol. 139, no. 1, pp. 17–22, 2007.
- [63] B. Komati, J. Agnus, C. Clévy, and P. Lutz, "Prototyping of a highly performant and integrated piezoresistive force sensor for microscale applications," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 24, no. 3, p. 035018, 2014.
- [64] Y. Li, K. H. Ang *et al.*, "Pid control system analysis and design," *IEEE Control Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 32–41, 2006.
- [65] A. J. Fleming, "Nanopositioning system with force feedback for high-performance tracking and vibration control," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 15, no. 3, pp. 433–447, 2010.
- [66] T. Ando, N. Kodera, T. Uchihashi, A. Miyagi, R. Nakakita, H. Yamashita, and K. Matada, "High-speed atomic force microscopy for capturing dynamic behavior of protein molecules at work," *e-Journal of Surface Science and Nanotechnology*, vol. 3, pp. 384–392, 2005.
- [67] G. Schitter, K. J. Åström, B. E. DeMartini, P. J. Thurner, K. L. Turner, and P. K. Hansma, "Design and modeling of a high-speed afm-scanner," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 15, no. 5, pp. 906–915, 2007.
- [68] A. Fleming, B. Kenton, and K. Leang, "Bridging the gap between conventional and video-speed scanning probe microscopes," *Ultramicroscopy*, vol. 110, no. 9, pp. 1205–1214, 2010.

-
- [69] D. Y. Abramovitch, S. Hoen, and R. Workman, "Semi-automatic tuning of pid gains for atomic force microscopes," *Asian Journal of Control*, vol. 11, no. 2, pp. 188–195, 2009.
- [70] S. S. Aphale, B. Bhikkaji, and S. R. Moheimani, "Minimizing scanning errors in piezoelectric stack-actuated nanopositioning platforms," *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 7, no. 1, pp. 79–90, 2008.
- [71] Y. Okazaki, "A micro-positioning tool post using a piezoelectric actuator for diamond turning machines," *Precision Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 151–156, 1990.
- [72] R. J. Merry, N. C. De Kleijn, M. J. Van de Molengraft, and M. Steinbuch, "Using a walking piezo actuator to drive and control a high-precision stage," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 14, no. 1, pp. 21–31, 2009.
- [73] S. Korson and A. J. Helmicki, "An h_∞ based controller for a gas turbine clearance control system," in *4th IEEE Conference on Control Applications, 1995*. IEEE, 1995, pp. 1154–1159.
- [74] S. Salapaka, A. Sebastian, J. P. Cleveland, and M. V. Salapaka, "High bandwidth nano-positioner : A robust control approach," *Review of scientific instruments*, vol. 73, no. 9, pp. 3232–3241, 2002.
- [75] C. Lee and S. M. Salapaka, "Fast robust nanopositioning—a linear-matrix-inequalities-based optimal control approach," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 14, no. 4, pp. 414–422, 2009.
- [76] U. Aridogan, Y. Shan, and K. K. Leang, "Design and analysis of discrete-time repetitive control for scanning probe microscopes," *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, vol. 131, no. 6, p. 061103, 2009.
- [77] R. J. Merry, M. J. Ronde, R. Van de Molengraft, K. R. Koops, and M. Steinbuch, "Directional repetitive control of a metrological AFM," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 19, no. 6, pp. 1622–1629, 2011.
- [78] Y. Shan and K. K. Leang, "Dual-stage repetitive control with prandtl-ishlinskii hysteresis inversion for piezo-based nanopositioning," *Mechatronics*, vol. 22, no. 3, pp. 271–281, 2012.
- [79] S. Devasia, E. Eleftheriou, and S. R. Moheimani, "A survey of control issues in nanopositioning," *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol. 15, no. 5, pp. 802–823, 2007.
- [80] J. A. Butterworth, L. Y. Pao, and D. Y. Abramovitch, "A comparison of control architectures for atomic force microscopes," *Asian Journal of Control*, vol. 11, no. 2, pp. 175–181, 2009.
- [81] E. Eleftheriou and S. R. Moheimani, *Control technologies for emerging micro and nanoscale systems*. Springer, 2011, vol. 413.
- [82] D. Croft and S. Devasia, "Hysteresis and vibration compensation for piezoactuators," *Journal of guidance, control, and dynamics*, vol. 21, no. 5, pp. 710–717, 1998.
- [83] —, "Vibration compensation for high speed scanning tunneling microscopy," *Review of Scientific Instruments*, vol. 70, no. 12, pp. 4600–4605, 1999.
- [84] D. Croft, S. Stilson, and S. Devasia, "Optimal tracking of piezo-based nanopositioners," *Nanotechnology*, vol. 10, no. 2, p. 201, 1999.
- [85] D. Croft, G. Shed, and S. Devasia, "Creep, hysteresis, and vibration compensation for piezoactuators : atomic force microscopy application," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 123, no. 1, pp. 35–43, 2001.
- [86] Y. Li and J. Bechhoefer, "Feedforward control of a closed-loop piezoelectric translation stage for atomic force microscope," *Review of Scientific Instruments*, vol. 78, no. 1, p. 013702, 2007.
- [87] G. M. Clayton, S. Tien, K. K. Leang, Q. Zou, and S. Devasia, "A review of feedforward control approaches in nanopositioning for high-speed spm," *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, vol. 131, no. 6, p. 061101, 2009.

-
- [88] M. Rakotondrabe, C. Clévy, and P. Lutz, "Complete open loop control of hysteretic, creeped, and oscillating piezoelectric cantilevers," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 440–450, 2010.
 - [89] H. Janocha and K. Kuhnen, "Real-time compensation of hysteresis and creep in piezoelectric actuators," *Sensors and actuators A : Physical*, vol. 79, no. 2, pp. 83–89, 2000.
 - [90] Q. Zou and S. Devasia, "Preview-based optimal inversion for output tracking : application to scanning tunneling microscopy," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 12, no. 3, pp. 375–386, 2004.
 - [91] S. Devasia, "Should model-based inverse inputs be used as feedforward under plant uncertainty?" *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 47, no. 11, pp. 1865–1871, 2002.
 - [92] G. Schitter, P. J. Thurner, and P. K. Hansma, "Design and input-shaping control of a novel scanner for high-speed atomic force microscopy," *Mechatronics*, vol. 18, no. 5, pp. 282–288, 2008.
 - [93] B. Mokaberi and A. A. Requicha, "Compensation of scanner creep and hysteresis for afm nanomanipulation," *Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 5, no. 2, pp. 197–206, 2008.
 - [94] M. Rakotondrabe, K. Rabenorosoa, J. Agnus, and N. Chaillet, "Robust feedforward-feedback control of a nonlinear and oscillating 2-DOF piezocantilever," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 506–519, 2011.
 - [95] M. Rakotondrabe, M. Diouf, and P. Lutz, "Robust feedforward-feedback control of a hysteretic piezocantilever under thermal disturbance." in *17th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control, IFAC'08.*, 2008, pp. 6–pages.
 - [96] M. Rakotondrabe, J. Agnus, and P. Lutz, "Feedforward and imc-feedback control of a nonlinear 2-dof piezoactuator dedicated to automated micropositioning tasks," in *IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE'11)*. IEEE, 2011, pp. 393–398.
 - [97] M. Iwasaki, K. Seki, and Y. Maeda, "High-precision motion control techniques : a promising approach to improving motion performance," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 6, no. 1, pp. 32–40, 2012.
 - [98] S. Maruo, K. Ikuta, and H. Korogi, "Submicron manipulation tools driven by light in a liquid," *Applied Physics Letters*, vol. 82, no. 1, pp. 133–135, 2003.
 - [99] Y. Takeichi, N. Inami, T. Ueno, K. Saito, H. Otori, R. Sagayama, R. Kumai, and K. Ono, "Micromanipulation and pick-up system for x-ray diffraction characterization of micrometer-sized single particles," in *Journal of Physics : Conference Series*, vol. 502, no. 1. IOP Publishing, 2014, p. 012008.
 - [100] "Une lumière intense pour la science," Brochure. [Online]. Available : <http://www.esrf.eu/about/information-material>
 - [101] M. S. Rodrigues, T. W. Cornelius, T. Scheler, C. Mocuta, A. Malachias, R. Magalhães-Paniago, O. Dhez, F. Comin, T. H. Metzger, and J. Chevrier., "In situ observation of the elastic deformation of a single epitaxial sige crystal by combining atomic force microscopy and micro X-ray diffraction," *Journal of Applied Physics*, vol. 106(10), p. 03525, 2009.
 - [102] F. De Carlo, X. Xiao, and B. Tieman, "X-ray tomography system, automation, and remote access at beamline 2-bm of the advanced photon source," in *SPIE Optics+ Photonics*. International Society for Optics and Photonics, 2006, pp. 63 180K–63 180K.
 - [103] V. Olieric, U. Rieder, K. Lang, A. Serganov, C. Schulze-Briesse, R. Micura, P. Dumas, and E. Ennifar, "A fast selenium derivatization strategy for crystallization and phasing of rna structures," *Rna*, vol. 15, no. 4, pp. 707–715, 2009.
 - [104] G. David and J. Pérez, "Combined sampler robot and hplc : a fully automated system for biological saxs experiments at the synchrotron soleil swing beamline," *J. Appl. Cryst.*, vol. 42, pp. 892–900, 2009.

-
- [105] M. Heidari Khajepour, H. Lebrette, X. Vernede, P. Rogues, and J.-L. Ferrer, "A geometrical approach for semi-automated crystal centering and in situ x-ray diffraction data collection," *Journal of Applied Crystallography*, vol. 46, no. 3, pp. 740–745, 2013.
- [106] T. Slobodskyy, A. Zozulya, R. Tholapi, L. Liefeth, M. Fester, M. Sprung, and W. Hansen, "Versatile atomic force microscopy setup combined with micro-focused x-ray beam," *Review of Scientific Instruments*, vol. 86, no. 6, p. 065104, 2015.
- [107] T. Hertel, R. Martel, , and P. Avouris, "Carbon nanotubes and their interaction with surfaces," *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 102(6), pp. 910–915, 1998.
- [108] M. R. Falvo, R. M. Taylor, A. Helser, V. Chi, F. P. Brooks, S. Washburn, and R. Superfine, "Nanometre scale rolling and sliding of carbon nanotubes," *Nature*, vol. 397(6716), pp. 236–238, 1999.
- [109] G. Li, N. Xi, H. Chen, A. Saeed, and M. Yu, "Assembly of nanostructure using afm based nanomanipulation system," *IEEE International Conference on Robotics and Automation 2004*, vol. 1, pp. 428–433, 2004.
- [110] K. Karrai and R. D. Grober, "Piezoelectric tip-sample distance control for near field optical microscopes," *Applied Physics Letters*, vol. 66(14), p. 1842, 1995.
- [111] F. J. Giessibl, "High-speed force sensor for force microscopy and profilometry utilizing a quartz tuning fork," *Applied Physics Letters*, vol. 73(26), p. 3956, 1998.
- [112] Y. Yongho, P. Paul, and V. Venkat, "Low-temperature scanning force microscopy using a tuning fork transducer," *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 50(2), p. 378, 1998.
- [113] W. H. J. Rensen, N. F. van Hulst, A. G. T. Ruiter, and P. E. West, "Atomic steps with tuning-fork-based noncontact atomic force microscopy," *Applied Physics Letters*, vol. 75(11), p. 1640, 1999.
- [114] A. Nigues, "Manipulation dans le micro/nanomonde : dispositif haptique préhensile," Ph.D. dissertation, Grenoble, 2012.
- [115] G. Dew and K. Holmlund, "Investigations of cross-correlation and euclidian distance target matching techniques in the mpef environment," in *International Winds Workshop*, Lorne, Australia, 2000.
- [116] F. Devernay, "Détection de points d'intérêts," Technical report, UFRIMA, Tech. Rep., 2004.
- [117] P. Aschwanden and W. Guggenbuhl, "Experimental results from a comparative study on correlation-type registration algorithms," *Robust computer vision*, pp. 268–289, 1992.
- [118] J. Crowley and J. Martin, "Experimental comparison of correlation techniques," in *IAS-4, International Conference on Intelligent Autonomous Systems*, Karlsruhe, 1995.
- [119] R. Longchamp, *Commande numérique de systèmes dynamiques*, 3rd ed., PPUR, Ed. Presses polytechniques et universitaires romandes, Oct. 2010.
- [120] G. Clayton and K. Leang, "Spatial-temporal control of dual-stage nanopositioners," in *IEEE International Conference on Conference on Decision and Control (CDC'12)*, 2012, pp. 5085–5090.
- [121] R. Nagamune, X. Huang, and R. Horowitz, "Robust control synthesis techniques for multirate and multisensing track-following servo systems in hard disk drives," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 132, pp. 021 005–1–021 005–10, 2010.
- [122] U. Boettcher, R. de Callafon, and F. Talke, "Modeling and control of a dual stage actuator hard disk drive," *Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing*, vol. 4(1), pp. 107–118, 2010.
- [123] Y. Li and R. Horowitz, "Design and testing of track-following controllers for dual-stage servo systems with pzt actuated suspensions," *Microsystems Technology*, vol. 8, pp. 194–205, 2002.
- [124] K. Abidi and A. Sabanovic, "Sliding-mode control for high-precision motion of a piezostage," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 1, pp. 629–637, 2007.

-
- [125] S.-M. Suh, C. C. Chung, and S.-H. Lee, "Discrete-time lqg/ltr dual-stage controller design in magnetic disk drives," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 37, no. 4, pp. 1891–1895, 2001.
 - [126] R. Horowitz, Y. Li, K. Oldham, S. Kon, and X. Huang, "Dual-stage servo systems and vibration compensation in computer hard disk drives," *Control Engineering Practice*, vol. 15, no. 3, pp. 291–305, 2007.
 - [127] K. Peng, B. M. Chen, T. H. Lee, and V. Venkataramanan, "Design and implementation of a dual-stage actuated hdd servo system via composite nonlinear control approach," *Mechatronics*, vol. 14(9), pp. 965–988, 2004.
 - [128] G. Guo, D. Wu, and T. C. Chong, "Modified dual-stage controller for dealing with secondary-stage actuator saturation," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 39, no. 6, pp. 3587–3592, 2003.
 - [129] S. Khadraoui, M. Rakotondrabe, and P. Lutz, "Combining h-infinity approach and interval tools to design a low order and robust controller for systems with parametric uncertainties : application to piezoelectric actuators," *International Journal of control*, vol. 85, no. 3, pp. 251–259, 2012.
 - [130] D. Habineza, M. Rakotondrabe, and Y. Le Gorrec, "Characterization, modeling and h-infinity control of n-dof piezoelectric actuators : Application to a 3-dof precise positioner," *Asian Journal of Control*, vol. 204, pp. 1–17, 2016.
 - [131] H. Ladjal, J.-L. Hanus, and A. Ferreira, "H-infinity robustification control of existing piezoelectric-stack actuated nanomanipulators," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'09)*, 2009, pp. 3353–3358.
 - [132] K. Nakano, "Three-dimensional beam tracking for optical lever detection in atomic force microscopy," *Review of Scientific Instruments*, vol. 71, no. 1, pp. 137–141, 2000.
 - [133] A. Rohrbach and E. H. Stelzer, "Three-dimensional position detection of optically trapped dielectric particles," *Journal of Applied Physics*, vol. 91, no. 8, pp. 5474–5488, 2002.
 - [134] A. Salazar, R. Fuente, E. Apinaniz, A. Mendioroz, and R. Celorrio, "Simultaneous measurement of thermal diffusivity and optical absorption coefficient using photothermal radiometry. ii multilayered solids," *Journal of Applied Physics*, vol. 110, no. 3, p. 033516, 2011.
 - [135] L. M. Manojlović, , and Ž. Barbarić, "Optimization of optical receiver parameters for pulsed laser-tracking systems," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, no. 3, pp. 681–690, 2009.
 - [136] A. Mäkinen, J. Kostamovaara, and R. Myllylä, "Positioning resolution of the position-sensitive detectors in high background illumination," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 45, no. 1, pp. 324–326, 1996.
 - [137] T. W. Ng, S. L. Foo, and H. Y. Tan, "Gaussian laser beam diameter measurement using a quadrant photodiode," *Review of Scientific Instruments*, vol. 76, no. 6, pp. 065 110–1, 2005.
 - [138] I. Karatzas and S. Shreve, *Brownian motion and stochastic calculus*. Springer Science & Business Media, 2012, vol. 113.
 - [139] B. Ristic, S. Arulampalam, and N. J. Gordon, *Beyond the Kalman Filter : Particle Filters for Tracking Applications*. Artech House, 2004.
 - [140] R. E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems," *Journal of basic Engineering*, vol. 82, no. 1, pp. 35–45, 1960.
 - [141] M. S. Arulampalam, S. Maskell, N. Gordon, and T. Clapp, "A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-gaussian bayesian tracking," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 50, no. 2, pp. 174–188, 2002.
 - [142] G. Evensen, "Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using monte carlo methods to forecast error statistics," *Journal of Geophysical Research : Oceans*, vol. 99, no. C5, pp. 10 143–10 162, 1994.

-
- [143] A. Smith, A. Doucet, N. de Freitas, and N. Gordon, *Sequential Monte Carlo methods in practice*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [144] A. Doucet, S. Godsill, and C. Andrieu, “On sequential monte carlo sampling methods for bayesian filtering,” *Statistics and computing*, vol. 10, no. 3, pp. 197–208, 2000.
- [145] N. J. Gordon, D. J. Salmond, and A. F. Smith, “Novel approach to nonlinear/non-gaussian bayesian state estimation,” in *Radar and Signal Processing, IEE Proceedings F*, vol. 140, no. 2. IET, 1993, pp. 107–113.
- [146] N. Gordon, “A hybrid bootstrap filter for target tracking in clutter,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 33, no. 1, pp. 353–358, 1997.
- [147] D. Crisan and A. Doucet, “A survey of convergence results on particle filtering methods for practitioners,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 50, no. 3, pp. 736–746, 2002.
- [148] G. N. Milstein, *Numerical integration of stochastic differential equations*, ser. Mathematics and Its Applications. Springer Science & Business Media, 1995, vol. 313.
- [149] K. Rabenorosoa, C. Clévy, Q. Chen, and P. Lutz, “Study of forces during microassembly tasks using two-sensing-fingers grippers,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 17, no. 5, pp. 811–821, 2012.

Développement et Commande d'une Plateforme Microrobotique pour la Synchronisation d'un Faisceau de Lumière

Nous présentons dans cette thèse les différentes étapes de conception d'une plateforme microrobotique dédiée au positionnement sous faisceau de lumière d'objets de dimensions micrométriques. Cette plateforme a pour vocation de mettre en œuvre des méthodologies d'asservissement et de suivi de position de micro-objets placés au cœur même d'un faisceau de lumière. L'objectif final étant de caractériser des micro/nano-matériaux par diffraction et diffusion des rayons X. Les différentes contraintes technologiques rencontrées par les systèmes de micro-nanomanipulation actuels en environnement synchrotron nous ont amené à concevoir une plateforme microrobotique de manipulation duale utilisant des sondes de microscope à force atomique (AFM). Diverses méthodologies de préhension avec une ou deux sondes AFM - avec capteur de force intégré - ont été proposées en vue d'évaluer chacune d'entre-elles dans un contexte de positionnement tridimensionnel. Une stratégie de commande des micromanipulateurs à double étage est mise en œuvre pour assurer l'asservissement de position des sondes AFM lors des tâches d'approche et de transport du micro-échantillon sous test. Afin d'augmenter la robustesse de positionnement vis-à-vis des erreurs de modélisation, des perturbations extérieures et des bruits de mesure, nous avons proposé une commande robuste de type H_∞ , avec optimisation des paramètres de pondération à partir d'algorithmes génétiques. De plus, les erreurs aléatoires d'alignement du faisceau de lumière avec l'objet sont corrigées en temps-réel par l'utilisation d'estimateurs de position (filtres de Kalman et particulaire). Finalement, des tâches microrobotiques automatisées de micro-préhension, de transport et de positionnement de micro-objets sphériques de 8 μm de diamètre placés sous faisceau de lumière laser ont été réalisées avec succès. Le « benchmark » proposé est en cours de transfert au sein du European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) à Grenoble pour validation sous faisceau de rayons X.

Mots clés : Microrobotique, micromanipulation, commande H_∞ , micro-levier AFM, plateforme instrumentale.

Development and Control of a Micro-Robotics Platform for the Synchronization of a Light Beam

We present in this thesis the various stages in the design of a microrobotics platform dedicated to the manipulation of micro/nano objects in a synchrotron environment. It is composed of dual micro/nano manipulators in order to handle and to maintain a micro/nano-sample through the focus of a X-ray or laser beam for material characterization and analysis. The main idea is to control and to drive in a robust way the micro/nanomanipulators by focusing the beam on the center part of the handled micro-object. A microgripper based on two Atomic Force Microscope (AFM) tips with integrated piezoresistive force sensors is proposed. First, the dual manipulators are controlled cooperatively by combining the different actuator dynamics to track a laser beam with nanometer precision. A robust control strategy based on H_∞ control ensures a robust microhandling task under the focus of the laser beam whatever the external perturbations involved and parametric model uncertainties. The Genetic Algorithm (GA) approach is used to compute the parameter weighting functions in to obtain an optimal H_∞ controller. Then, we propose to compensate the laser beam variations (thermal drift, mechanical variations) by estimating the position of the laser beam using stochastic estimators (Kalman and particle filters). To this aim, the maximum intensity of the laser beam is measured and tracked in real-time by a four-quadrant photodiode sensor. Finally, experimental results performed of micro-spheres (diameter: 8 μm) demonstrate the robustness of the robotic microhandling tasks using the proposed control scheme strategy.

Keywords: Microrobotics, micromanipulation, H_∞ control, AFM probe, instrumental platform.



Laboratoire PRISME, INSA Val de Loire
Campus Bourges, 88 boulevard Lahitolle
18000 Bourges

