



HAL
open science

Conception et commande de systèmes microrobotiques magnétiques en milieu ambiant

Soukeyna Bouchebout

► **To cite this version:**

Soukeyna Bouchebout. Conception et commande de systèmes microrobotiques magnétiques en milieu ambiant. Robotique [cs.RO]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2015. Français. NNT : 2015PA066259 . tel-01176733v2

HAL Id: tel-01176733

<https://hal.sorbonne-universite.fr/tel-01176733v2>

Submitted on 8 Dec 2015

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

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

Thèse

présentée à

L'Université Pierre et Marie Curie

par

Soukeyna Bouchebout

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Pierre et Marie Curie

Spécialité : Robotique

**Conception et commande de systèmes microrobotiques
magnétiques en milieu ambiant**

soutenance prévue le 03 juillet 2015

JURY

M.	F. LAMARQUE	Professeur à l'Université de Technologie de Compiègne	Rapporteur
M.	S. MARTEL	Professeur à l'École Polytechnique De Montréal	Rapporteur
M.	B. CAGNEAU	Maître de Conférences à l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines	Examineur
M.	Z. REN	Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie	Examineur
MME.	A. BOLOPION	Encadrante de thèse Chercheur CNRS à l'Institut FEMTO-ST	Examinatrice
M.	S. REGNIER	Directeur de thèse Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie	Examineur

Résumé

Ces dernières années une attention particulière a été portée sur les systèmes autonomes de taille micrométrique. La faible taille de ces robots, ou particules, rend impossible l'embarquement d'énergie. Des systèmes d'actionnement et de contrôle à distance, notamment par effets magnétiques, ont été proposés. Ces systèmes ont montré des résultats particulièrement prometteurs tant au niveau applicatif, de par leur faculté à agir dans des environnements contraints, qu'au niveau scientifique. Ils évoluent généralement dans le milieu liquide. Ce milieu est privilégié en raison de la force de traînée qui stabilise les systèmes et simplifie donc leur contrôle. En revanche, ce milieu induit une limitation majeure sur la vitesse de déplacement de ces particules. Pour exploiter pleinement le potentiel d'actionnement rapide lié à la faible inertie de ces particules de petite taille, cette thèse propose la conception, la fabrication, la commande et le test d'un système microrobotique dédié à l'actionnement haute vitesse.

Les choix de conception portent notamment sur l'augmentation de la force magnétique par l'intégration de noyaux dans les bobines, l'utilisation de particules ferromagnétiques et le choix d'un environnement de travail en milieu ambiant. Ce dernier point permet de s'affranchir de la viscosité du milieu liquide et d'atteindre des vitesses inatteignables avec les systèmes de l'état de l'art. Cependant il pose des problématiques inédites d'adhésion entre la particule et le substrat de travail et d'absence de modèle de connaissance. Différentes solutions sont proposées dans cette thèse pour vaincre ou réduire les forces d'adhésion dans ce milieu, allant de l'actionnement en couple de la particule magnétique pour la décoller à la structuration mécanique du substrat pour réduire l'adhésion. De nombreux tests expérimentaux attestent de la validité des solutions proposées. Une commande en boucle fermée est également implémentée pour augmenter la précision du positionnement et de l'orientation des particules. Une approche permettant de synthétiser et d'implémenter une loi de régulation proportionnelle des deux paramètres de contrôle, respectivement la durée d'application et l'amplitude du courant appliqué aux bobines, est proposée. L'approche expérimentale adoptée permet de quantifier les problématiques rencontrées dans le milieu ambiant et de proposer des solutions systématiques à ces dernières.

Ce travail n'est qu'un premier pas dans l'intégration des systèmes microrobotiques en milieu ambiant, mais il fournit des méthodologies de contrôle adaptées à ses spécificités.

Mots-clés : actionnement magnétique, micromanipulation, adhésion surfacique et asservissement en position.

Abstract

In the past few years, much attention has been given to autonomous systems of micrometric size. The small size of these robots, or particles, makes it impossible to embed their energy sources. Wireless systems for actuating and control, in particular through magnetic effects, have been proposed. These systems have yielded results which are especially promising as to their applications, thanks to their ability to perform in constrained environments, as well as from a scientific perspective. They usually operate in a liquid environment. This environment is favored due to the drag force which stabilizes a system and therefore makes it easier to control. However, this medium comes with a major limitation to the moving speed of these particles. In order to fully exploit the potential for high speed actuation inherent to the low inertia of these small-sized particles, this thesis proposes the design, fabrication, control and testing of a microrobotic system dedicated to high speed actuation.

The design choices include increasing the magnetic force by winding the magnetic coils around cores, using ferromagnetic particles and choosing to work in an ambient environment. This last point does away with the viscosity of a liquid medium and makes it possible to reach speeds otherwise unattainable with state-of-the-art systems. However, this leads to adhesion issues between the particle and the surface of the working substrate which are without precedent and not described by any known model. Various solutions are proposed in this thesis to overcome or reduce adhesion forces in this environment, from the coupled actuation of the magnetic particle in order to make it come unstuck, to the mechanical structuring of the surface of the substrate in order to reduce adhesion. Many experimental tests confirm the suitability of the proposed solutions. A closed-loop control has also been integrated to increase the accuracy of the positioning and orientation of the particles. An approach to the synthesis and implementation of a proportional regulation is proposed for the two control parameters, respectively the time length and intensity of the current applied to the coils. The chosen experimental approach makes it possible to quantify the issues related to the ambient environment and bring systematic solutions to them.

This work is but a first step in the integration of microrobotic systems in ambient environments, but it offers a control methodology which is adapted to its specificities.

Keywords : magnetic actuation, micromanipulation, surface adhesion and position control.

Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	v
Introduction générale	1
1 Actionnement magnétique pour la micromanipulation	5
1 Systèmes autonomes à l'échelle micrométrique	6
2 Actionnement à distance	7
2.1 Actionnement à l'échelle micrométrique	7
2.2 Actionnement magnétique	9
2.3 Bilan des forces	10
3 Microparticule magnétique	11
3.1 Matériaux magnétiques	11
3.2 Fabrication à l'échelle micrométrique	12
4 Plateforme magnétique	13
4.1 Actionneurs magnétiques	13
4.2 Configuration des actionneurs magnétiques	14
5 Contrôle des systèmes microrobotiques magnétiques	15
5.1 Modélisation du champ magnétique	16
5.2 Modélisation du comportement de la particule	17
5.3 Détection à l'échelle micrométrique	17
5.4 Contrôle	18
6 Les systèmes microrobotiques magnétiques	20
6.1 Mag- μ Bot (Magnetic micro roBot)	20
6.1.1 Conception du système microrobotique	21
6.1.2 Contrôle du système	22
6.1.3 Conclusion	23

6.2	OctoMag	24
6.2.1	Conception du système microrobotique	24
6.2.2	Contrôle du système	25
6.2.3	Conclusion	26
6.3	Contrôle de particules paramagnétiques	26
6.3.1	Conception du système microrobotique	27
6.3.2	Contrôle du système	28
6.3.3	Conclusion	28
6.4	MagMites (Magnetic Mite)	28
6.4.1	Conception du système microrobotique	29
6.4.2	Contrôle du système	30
6.4.3	Conclusion	31
6.5	Comparaison et conclusion	32
7	Objectif et approche retenue	36
2	Système microrobotique magnétique	39
1	Conception du micro-effecteur	40
1.1	Actionnement du micro-effecteur à haute vitesse	40
1.2	Fabrication du micro-effecteur	41
2	Plateforme d'actionnement magnétique	43
2.1	Conception de la plateforme	43
2.1.1	Nombre et disposition des bobines	44
2.1.2	Choix des bobines	44
2.1.3	Conclusion	47
2.2	Caractérisation de la plateforme magnétique	47
2.3	Évaluation de l'hystérésis	49
2.4	Identification du modèle du champ magnétique	50
3	Le système global	52
3.1	L'arène fermée	53
3.2	Détection de la particule	54
3.3	Actionnement et contrôle de la particule	55
4	Évaluation de l'actionnement magnétique	57
4.1	Évaluation de la vitesse du système	57
4.2	Évaluation de la répétabilité du système	59
5	Conclusion	59
3	Les forces d'adhésion dans le milieu ambiant	63
1	Force d'adhésion entre la particule et le substrat	64
1.1	Forces surfaciques à l'échelle micrométrique	64
1.1.1	Forces de van der Waals	64
1.1.2	Forces capillaires	65
1.1.3	Forces électrostatiques	66
1.1.4	Conclusion	67
1.2	Analyse des forces appliquées à la particule	68
2	Effets dynamiques pour vaincre l'adhésion	70

2.1	Effets dynamiques et adhésion	70
2.2	Particule magnétique et piézoélectrique	71
2.2.1	Matériaux piézoélectriques	71
2.2.2	Microfabrication des particules hybrides	72
2.3	Actionnement de la particule hybride	73
2.4	Évaluation de l'actionnement piézoélectrique	74
2.5	Conclusion	76
3	Substrat amélioré pour réduire l'adhésion	76
3.1	Rugosité	77
3.2	Réalisation des surfaces contrôlées	78
3.3	Mesure des forces surfaciques sur les surfaces contrôlées	79
3.3.1	Dispositif expérimental	79
3.3.2	Résultats des mesures des forces surfaciques	81
3.4	Actionnement magnétique sur les surfaces contrôlées	82
3.5	Conclusion	83
4	Actionnement pour rompre l'adhésion surfacique	84
4.1	Couple magnétique et adhésion	84
4.1.1	Principe de l'actionnement pour rompre l'adhésion	84
4.1.2	Premières validations expérimentales	85
4.2	Détermination des paramètres d'actionnement	86
4.2.1	Orientation de la particule	87
4.2.2	Translation de la particule	88
4.3	Méthode d'actionnement	89
4.4	Conclusion	90
5	Comparaison et conclusion	90
4	Approche de commande en boucle fermée par train d'impulsions	93
1	Automatique pour la microrobotique et positionnement du problème	94
1.1	Cahier des charges et démarche scientifique	95
1.2	Modélisation linéaire du comportement de la particule	96
2	Actionnement à un degré de liberté	97
3	Étude expérimentale du mouvement de la particule	98
3.1	Protocole expérimental	99
3.2	Identification de la réponse de la particule	101
3.3	Validation du modèle identifié	102
4	Commande proportionnelle intégrale F_*/h_e	103
4.1	Principe de la commande	103
4.2	Validation expérimentale de la commande	106
4.2.1	Contrôle de la position y	106
4.2.2	Contrôle de la position x	107
4.2.3	Contrôle de la position x/y séquentiel	108
5	Commande proportionnelle intégrale F_*/h_e généralisée	109
5.1	Actionnement à deux degrés de liberté	110
5.2	Asservissement de deux degrés de liberté en translation	111
6	Orientation de la particule par trains d'impulsions	113

7	Conclusion	114
	Conclusions et perspectives	117
	Notations et abréviations	121
	Bibliographie	123

Table des figures

1.1	Afin de manipuler des micro-objets, un effecteur micrométrique indépendant est utilisé. L'actionnement et la détection du micro-effecteur sont externes.	6
1.2	Exemples de sources d'énergie externes et des particules actionnées : l'électrostatique est utilisée dans (a) [Kharboutly 10] pour actionner une particule diélectrophorétique et les systèmes 'scratch drive devices' (b) [Paprotny 12]. Les systèmes (c) [Chowdhury 12] (d) [Fukada 13] utilisent le laser pour piéger une particule et la manipuler. Le champ magnétique est largement exploité : (e) [Mahoneya 11] (f) [Frutiger 10c] et (g) [Pawashe 09]	8
1.3	Amplitudes des forces électrostatiques, magnétiques et de van der Waals appliquées sur une sphère relativement à son poids, présentées en fonction de son rayon. Les forces électrostatiques et magnétiques sont générées respectivement par un potentiel électrique et un aimant comme schématisé par les figures (a) et (b). Les forces de van der Waals sont calculées entre deux sphères de même rayon à une distance constante [Abbott 07b].	10
1.4	Fabrication à l'échelle micrométrique. Des techniques standards comme la découpe au laser (a) sont utilisées pour produire des particules magnétiques. Les technologies salle blanche sont aussi répandues (b). Les méthodes les plus utilisées pour obtenir des micro-objets sont le moulage ou l'électro-déposition. Pour obtenir des moules micrométriques, l'empreinte des microparticules est réalisée par photolithographie. Cette dernière sert aussi à délimiter une aire micrométrique pour un dépôt selectif.	13
1.5	Exemples de configurations d'électro-aimants possibles : (i) trois paires de bobines Helmholtz pour produire des déplacements en 3D de micro-hélices [Xu 14a], (ii) quatre bobines orthogonales pour déplacer une particule en 2D [Khalil 12], (iii) pour générer des déplacements en 3D, 8 bobines sont utilisées dans [Diller 13].	15

1.6	Champ et gradient de champ magnétiques produit par le courant circulant dans une bobine. Sous l'action du moment et de la force magnétiques produits par le champ et le gradient de champ magnétique, la particule change d'orientation θ et de position \mathbf{P}	16
1.7	Erreur entre la position de référence ($\mathbf{P}_{ref}, \theta_{ref}$) et la position courante estimée (\mathbf{P}, θ) corrigée par un régulateur. Le modèle inverse (modèle géométrique, cinématique ou dynamique selon l'asservissement) calcule le courant nécessaire à envoyer aux bobines pour effectuer le déplacement pour atteindre la position désirée.	19
1.8	Translation en stick-slip de la microparticule : la ligne continue est sa position initiale, la ligne discontinue est sa position finale. La particule est basculée vers le bas (i) et vers le haut (ii), elle se déplace quand le frottement surfacique est surmonté [Floyd 09b].	20
1.9	Déplacements dans le plan, produits par une plateforme à 6 bobines (a). Pour produire des déplacements en 3D, 8 bobines sont utilisées (b).	21
1.10	Particule du Mag- μ Bot : $300 \times 300 \times 100 \mu\text{m}^3$	22
1.11	Exemples de résultats de simulations et d'expériences du comportement de la microparticule. La vitesse de la particule Mag- μ Bot est en fonction de la fréquence du courant. La surface de travail est en silicium rugueux, la particule évolue dans l'air [Pawashe 09].	22
1.12	Plateforme électromagnétique de l'OctoMag : 8 bobines à noyaux ferromagnétiques entourent l'espace de travail de la microparticule [Kummer 10].	24
1.13	Evaluation du contrôle de l'OctoMag : le temps d'exécution de cette trajectoire est de 8.3s en moyenne. La particule est orientée vers le centre de l'arène [Kummer 10].	26
1.14	Conception du système de contrôle des particules paramagnétiques.	27
1.15	Régulation de l'erreur de positionnement pour trois positions de référence. ε_x et ε_y sont, respectivement, les erreurs selon les axes \mathbf{e}_x et \mathbf{e}_y . La position de la particule converge en 4 s, l'erreur de positionnement est de $10\mu\text{m}$ [Khalil 12].	28
1.16	(a) Modélisation de la particule en système masse-ressort (b) apparition de forces d'attraction en présence du champ magnétique (c) la particule se déplace à l'aide de la force de rappel du ressort et les frottements surfaciques.	29
1.17	Actionnement électrostatique produit par une surface incrustée d'électrodes (a) actionnement magnétique est assuré par deux paires de bobines d'Helmholtz (b).	29
1.18	Particules du MagMites : les ressorts en or (a) sont remplacés par des ressorts en polymère (b), réduisant ainsi le coût de production. Les images des microparticules sont obtenues avec un microscope à balayage électronique.	30
1.19	Caractérisation du comportement de la particule : validation de sa fréquence de résonance (a) et évolution de la vitesse de la particule en fonction de l'amplitude du champ magnétique (b) [Tung 14].	31

1.20	Exemple de trajectoires de la particule. La particule est dirigée selon l'axe x pour différentes fréquences du champ magnétique, de 5.1 à 5.7 KHz pour (a) et de 1 à 9 KHz pour (b). La fréquence de résonance de la particule est autour de 6 KHz [Tung 14].	32
2.1	Principe de fonctionnement du système microrobotique magnétique : la microparticule est actionnée à distance par des électro-aimants, sa position est détectée par un retour visuel.	39
2.2	Microparticules utilisées en nickel, de forme rectangulaire et de différentes tailles.	42
2.3	Étapes de microfabrication : après nettoyage du substrat sacrificiel, un film Cr-Cu est pulvérisé. Une couche Ni est déposée ensuite par électrolyse. Enfin, le substrat sacrificiel est découpé à l'aide d'une scie à lame micrométrique. Les particules de nickel se séparent du substrat par contraintes mécaniques.	42
2.4	Profil du wafer : mesure au centre du wafer, l'épaisseur du nickel déposé est uniforme.	43
2.5	Plateforme magnétique : pour produire 3 degrés de liberté, quatre bobines orthogonales sont utilisées. Deux bobines coaxiales produisent une translation de la particule et deux bobines perpendiculaires orientent la particule dans le plan.	44
2.6	Étude de l'ajout d'un noyau ferromagnétique. Le noyau augmente le champ magnétique produit. La simulation du champ magnétique est réalisée par une modélisation en éléments finis avec le logiciel COMSOL TM , représentée dans (a). Le champ magnétique produit par bobine avec un noyau ferromagnétique $\mu_r = 400$, montré dans (b), produit un champ magnétique plus important qu'une bobine identique mais ne possédant pas de noyau. Les valeurs, représentées par une étoile '*', sont les valeurs obtenues par la simulation, tandis que la ligne continue est l'interpolation des valeurs simulées. Les longueur et le diamètre du noyau sont, respectivement, de 35 mm et de 6 mm, la longueur du bobinage est de 18 mm. La largeur de la couche du fil en cuivre est de 3.7 mm. La simulation est obtenue pour une densité de courant de 9.45 A/m ²	45
2.7	Choix des dimensions des bobines : la bobine choisie, en rouge, produit le champ magnétique et le gradient de champ magnétique les plus importants parmi les bobines simulées, dans l'espace de travail. Le champ magnétique, représenté dans (a), et le gradient du champ magnétique, représenté dans (b), sont simulés sur l'axe de la bobine.	46
2.8	Limitation de l'échauffement des bobines, le signal du courant en entrée des bobines est une impulsion de largeur h_e et de hauteur i_e	47
2.9	Protocole expérimental pour mesurer le champ magnétique. Le capteur Hall est placé dans l'espace de travail à $z = 0$ et différentes coordonnées x, y . . .	48

2.10	Détermination de l'hystérésis dans la bobine $e=3$. Le champ magnétique est mesuré à une position \mathbf{P} constante. Cycle 1 et 3 : le courant i_3 varie en croissant de 0.5A à 4.5A. Cycle 2 et 4 : le courant i_3 varie en décroissant de 4.5A à 0.5A	49
2.11	Valeurs expérimentales (B_x, B_y) obtenues pour la bobine $e = 0$ avec $i_0=3$ A. L'écart type est représenté en rouge pour chaque valeur (B_x, B_y) . Les écarts types sont faibles. Les mesures sont donc répétables.	51
2.12	Valeurs expérimentales et interpolées (\hat{B}_x, \hat{B}_y) pour la bobine $e = 0$ avec $i_0=3$ A. Les valeurs du champ magnétique estimées correspondent aux valeurs obtenues par les mesures expérimentales.	52
2.13	Système microrobotique : la plateforme magnétique contenant l'arène et le retour visuel utilisé pour détecter la particule.	53
2.14	Espace de travail : la particule est enfermée dans une arène pour limiter les perturbations externes, telles que la poussière, l'humidité etc.	53
2.15	Position et Orientation de la particule estimées à partir des images retournées par la caméra. Des méthodes classiques et rapides de traitement d'images sont utilisées : seuillage et opérations morphologiques suivis d'un filtre 'Canny'.	54
2.16	Position de la particule est obtenue par retour visuel et son déplacement est produit par le champ magnétique \mathbf{B} et le gradient du champ magnétique $\nabla\mathbf{B}$. Ces derniers sont générés par le courant envoyé i_e à la bobine, pendant un temps h_e . Pour envoyer le courant de façon contrôlable, une carte CNA est utilisée suivie d'une carte convertissant la tension délivrée en courant électrique.	55
2.17	Actionnement en boucle ouverte : l'entrée du système sont $\nabla\mathbf{B}$ et h_e pour déplacer la particule ou \mathbf{B} et h_e pour l'orienter. Il est aussi possible d'envoyer un courant i_e pendant un temps h_e	56
2.18	Amplitudes de déplacement de la particule pour un courant électrique en entrée de la bobine $e = 3$ en fonction du temps. La réponse de la particule est observée à haute fréquence (5000 positions par seconde). La particule est placée sur du verre pour les figures en haut, et sur une surface en silicium polie pour les figures du bas.	58
2.19	Variation des amplitudes et pourcentage d'occurrence du déplacement en fonction des jours. Les histogrammes de gauche représentent les pourcentages d'occurrence de déplacement et les histogrammes de droite montrent les moyennes des amplitudes de déplacement et les écarts types.	60
3.1	Cas du contact entre la particule et le substrat en présence d'un ménisque formé par condensation ou par la présence d'un liquide.	66
3.2	Comparaison entre les forces surfaciques. La simulation est établie pour deux surfaces lisses en SiO_2 . Les forces surfaciques diminuent en augmentant la distance entre les surfaces (Z [nm]). Les forces capillaires sont les plus prédominantes, tandis que les forces de van der Waals sont plus grandes que les forces électrostatiques pour des surfaces en contact (la distance entre les surfaces est inférieure à 1 nm) [Bellouard 09].	68

3.3	Particule, en contact avec une surface, soumise à son poids, négligeable à cette échelle, aux forces surfaciques et aux forces externes d'actionnement.	68
3.4	Accélérations perpendiculaires hors du plan de la particule pour vaincre l'adhésion : des déplacements à hautes fréquences peuvent être produits au niveau du substrat (a) ou au niveau de la particule (b). Les accélérations produites ont pour but de rompre l'adhésion de la particule avec le substrat.	70
3.5	Ajout d'une couche piézoélectrique. Cette couche se déforme en présence d'un champ électrique \mathbf{E} pour rompre l'adhésion avec la surface, la couche ferromagnétique assure l'actionnement de la particule à distance à partir du champ magnétique \mathbf{B} .	71
3.6	Exemples de particules réalisées : la couche Ni s'est décollée de la couche piézoélectrique dans (a), et elle est partiellement détachée dans (b), tandis qu'elle adhère à la céramique piézoélectrique dans (c).	73
3.7	Principe de l'actionnement piézoélectrique. Pour assurer l'actionnement piézoélectrique, la particule est placée à l'intérieur d'un condensateur. Une distance d est maintenue entre la particule et la surface supérieure du condensateur pour éviter des frottements supplémentaires avec cette dernière.	73
3.8	Arène pour l'actionnement hybride. L'arène est un condensateur pour appliquer un voltage U . Afin d'assurer la détection de la particule, un verre ITO est utilisé.	74
3.9	Expérience d'actionnement piézoélectrique. Une tension U [volts] est appliquée au condensateur à une fréquence de 3 MHz. La tension est incrémentée de 10 volts à chaque itération. La déformation de la particule pour une tension théorique U_{piezo} engendre une accélération suffisante pour vaincre l'adhésion. Les arènes risquent d'être endommagées à partir de la tension U_{max} . La première arène est détériorée pour $U=175$ volts et la particule surmonte l'adhésion pour une tension de 202 volts pour le premier test et 240 volts pour un deuxième test.	75
3.10	Image d'une arène endommagée par un claquage en tension.	76
3.11	Mesure du profil d'une surface en verre à l'aide d'un profilomètre mécanique. L'amplitude du profil de la surface $z(p)$ [μm] est mesurée sur une distance totale $L = 1$ mm.	78
3.12	Exemple d'une surface avec des motifs carrés, $D=8 \mu\text{m}$ est la largeur du motif et $d=7 \mu\text{m}$ est la distance entre deux motifs (a). Cette surface est produite par le procédé de microfabrication présenté dans (b).	78
3.13	Profilomètre d'une surface Si incrustée de motifs carrés. Le profil des surfaces est établi par une mesure par holographie. Cette méthode repose sur la réflexion de l'échantillon observé. Le Si absorbe une partie des ondes holographiques, la calibration de la mesure est difficile à mettre en oeuvre. La mesure de la profondeur des motifs ne reflète pas la profondeur effective du motif qui est de $11\mu\text{m}$.	79
3.14	Mesure de la force surfacique. La particule en contact avec une surface est poussée par un capteur d'effort. Les forces surfaciques dues à l'interaction entre la particule et la surface sont ainsi mesurées.	80

3.15	À droite, la vue de haut du capteur en contact avec la particule. L'image est obtenue par un microscope optique. À gauche, l'observation de la particule et du capteur, pour vérifier l'existence d'un contact entre la pointe du capteur et de la particule et la planéité du contact entre la particule et la surface.	80
3.16	Mesure des forces nécessaires pour pousser une particule sur un substrat donné.	81
3.17	Effet de la rugosité et du matériau de la surface sur le pourcentage et l'amplitude de déplacements de la particule.	83
3.18	Magnétisation de la particule. Le vecteur de magnétisation interne de la particule est considéré suivant l'axe \mathbf{u} , l'axe de la dimension la plus importante de la particule lorsqu'elle est soumise à un champ magnétique avec une orientation ϕ	85
3.19	Effet de l'orientation de la particule : La particule est actionnée pour un champ magnétique d'amplitude $\ \mathbf{B}\ =30$ mT (a) et pour un champ magnétique d'amplitude $\ \mathbf{B}\ =10$ mT (b).	86
3.20	Détermination des paramètres θ_{min} et h_{min} selon le critère de convergence de l'amplitude $\ \mathbf{B}\ $. Les angles θ_{min} retenus sont encadrés.	88
3.21	Evaluation des paramètres θ_{min} et h_{min} obtenus selon le critère de convergence de l'amplitude $\ \mathbf{B}\ $	89
4.1	Schéma illustrant la démarche scientifique adoptée pour la synthèse de la commande.	95
4.2	Schéma de principe de la modélisation. L'impulsion de courant d'amplitude i_e et de durée d'application h_e en entrée de la plateforme d'actionnement produit une force et un moment magnétiques. Ces derniers induisent le déplacement de la particule.	96
4.3	Commande en boucle ouverte du système avec en entrée la force magnétique et sa durée d'application. En négligeant les erreurs de modélisation du modèle I : $\mathbf{F}_{ref} = \mathbf{F}_m$	97
4.4	Système en boucle ouverte pour appliquer une force magnétique désirée à la position de la particule.	98
4.5	Translation de la particule y produite par $\ \nabla\mathbf{B}\ $ et h_1 en entrée de la plateforme d'actionnement.	99
4.6	Moyenne du déplacement \bar{y} et son écart type représentés en fonction de $\ \nabla\mathbf{B}\ $. Chaque courbe est représentée pour une durée h_1 constante et $\ \nabla\mathbf{B}\ $ variant.	100
4.7	Moyenne du déplacement et son écart type représentés en fonction de h_1 . Chaque courbe est représentée pour un $\ \nabla\mathbf{B}\ $ constant, tandis que la durée d'application h_1 varie.	100
4.8	Identification du comportement de la particule en fonction de $\ \nabla\mathbf{B}\ $ et h_1 à partir des données expérimentales. Les valeurs $\beta(\cdot)$, dans la figure (a), sont les coefficients de proportionnalité du déplacement en fonction du gradient du champ magnétique, pour chaque durée d'application h_1 . Ces valeurs sont interpolées en fonction de la durée d'application dans la figure (b). . .	101

4.9	Comparaison entre les données expérimentales et le modèle identifié. Les valeurs expérimentales sont représentées en lignes discontinues et celles obtenues par le modèle identifié sont en lignes continues.	102
4.10	Déplacement de la particule pour un signal en entrée donné. La position de la particule est mesurée pendant 0.4 s avec une période d'échantillonnage de 100 ms.	103
4.11	Schéma de la commande proportionnelle F_*/h_e	104
4.12	Commande F_*/h_e dans le cas du gradient du champ saturé.	105
4.13	Commande F_*/h_e dans le cas de la durée d'impulsion saturée.	105
4.14	Trajectoire de la particule pour un asservissement en y . La position initiale de la particule est $x_0=1.7$ mm et $y_0=3$ mm dans l'espace de travail.	107
4.15	Trajectoire de la particule pour un asservissement en x . La position initiale de la particule est $x_0=2.3$ mm et $y_0=1.9$ mm dans l'espace de travail.	108
4.16	Trajectoire de la particule pour un asservissement en x/y séquentiel. La position initiale de la particule est $x_0=1.6$ mm et $y_0=1.6$ mm.	109
4.17	Schéma de la commande proportionnelle F_*/h_e généralisée.	111
4.18	Mesures de position de la particule durant son asservissement x/y simultané.	112
4.19	Photos montrant le déplacement de la particule durant l'asservissement en position. Une image correspond à un pas d'échantillonnage.	112
4.20	Système en boucle fermée pour orienter la particule par trains d'impulsions. Le rôle du bloc logique est d'envoyer des impulsions tant que l'erreur est supérieure à la valeur imposée ε_{max}	114

Introduction générale

Le domaine des micro et nano technologies est en plein développement, et avec lui celui associé de la microrobotique. En effet la miniaturisation des produits nécessite des robots capables de réaliser des assemblages de pièces toujours plus petites, avec des précisions croissantes. Entre autres applications, la miniaturisation dans l'industrie repose sur l'assemblage de composants mécaniques. Par exemple, les microsystèmes opto-électromécaniques (MEMS et MOEMS) intègrent des systèmes mécaniques, optiques et électriques à l'échelle submillimétrique, pour capter ou manipuler des signaux optiques. Par conséquent, leur fabrication nécessite un système d'assemblage précis à l'échelle micrométrique.

Par ailleurs, la robotique modulaire peut également bénéficier de la microrobotique. La réduction de la taille des unités robotiques augmente la résolution spatiale des robots reconfigurables, et donc améliore leur polyvalence pour diversifier les tâches réalisables.

La biotechnologie industrielle et la médecine sont également des champs d'application propices pour les microrobots. En effet, les microrobots opèrent à la même échelle que les cellules organiques, permettant une interaction *in vitro* efficace comme déplacer et/ou trier des cellules. De plus, l'intégration des microrobots dans des lab-on-chip (micro-usines) est possible avec leur taille et leur actionnement à distance. Ils peuvent ainsi effectuer des tâches multiples sur des corpuscules tels que des globules rouges. Dans le futur, des robots de taille micrométrique pourraient être insérés dans le corps humain pour atteindre des endroits inatteignables par la chirurgie conventionnelle. Ils seraient aussi capables d'administrer de façon ciblée des médicaments aux cellules malades ou aux tumeurs.

Les systèmes de micromanipulation actuels sont essentiellement des outils inspirés de la

robotique classique, comme les pinces ou les pointes de microscope à force atomique. Ces systèmes ne sont pas utilisables dans le cadre d'environnements très contraints comme les puces fluidiques ou les environnements fermés.

De nouveaux systèmes micrométriques autonomes sont prometteurs pour cette classe d'application. Ils sont constitués d'un effecteur de taille micrométrique utilisé pour déplacer des objets. Il est donc possible de les utiliser dans des environnements difficilement accessibles. Cependant, il est impossible aujourd'hui d'embarquer des capteurs, des moteurs, des contrôleurs ou une quelconque forme d'intelligence à une pareille échelle. Ces systèmes reposent donc sur un actionnement à distance ainsi que sur une détection et une commande externes.

Plusieurs méthodes d'actionnement existent aujourd'hui. L'intérêt dans ce travail est porté sur l'actionnement par le champ magnétique, en raison de la force d'actionnement élevée produite et de la présence des matériaux magnétiques dans la microfabrication. Les systèmes microrobotiques magnétiques sont présentés dans le chapitre 1. Ces systèmes montrent de bonnes performances en milieu liquide mais la vitesse de déplacement reste limitée par la force de traînée. L'étude présentée dans ce chapitre montre que très peu de travaux abordent la manipulation en air ambiant.

Un système microrobotique à actionnement magnétique dédié aux déplacements à haute vitesse est conçu dans ce travail. Pour atteindre cet objectif, un environnement de travail sec est utilisé. La conception du système, présentée dans le chapitre 2, repose sur l'étude de chaque partie du système, de la plateforme d'actionnement à la microparticule. La géométrie, les dimensions et la disposition des bobines produisant le champ magnétique sont considérées pour augmenter la vitesse de déplacement de la microparticule. De la même façon, le matériau intrinsèque de la particule est étudié pour maximiser l'influence du champ magnétique. Par ailleurs, pour limiter l'échauffement excessif des bobines, une limitation des systèmes magnétiques, un courant électrique en impulsion est utilisé.

Ce nouveau système atteint des vitesses de déplacements élevée. Cependant, l'adhésion surfacique, prédominante dans le milieu ambiant, affecte la répétabilité de l'actionnement. L'impact de ces forces dans le milieu sec doit être minimisé pour éviter des phénomènes de collages locaux ou d'attraction à longue portée.

L'analyse des forces en présence dans le cadre de ce travail propose trois solutions. Ces solutions, présentées dans le chapitre 3, ont pour but de minimiser ou de vaincre l'adhésion surfacique :

- la première solution consiste à exploiter de grandes accélérations avec un actionnement secondaire piézoélectrique pour détacher la particule du substrat.
- dans la seconde approche, l'état de surface du substrat en contact avec la particule est contrôlé pour limiter les forces d'adhésion de contact et les phénomènes locaux de triboélectrification.
- la dernière méthode exploite le champ magnétique pour imposer des couples de tor-

sion. L'idée principale est que le moment magnétique de torsion peut être exploité pour vaincre l'effet adhésif alors qu'un effet normal n'est pas suffisant.

Ces solutions améliorent la répétabilité de l'actionnement dans le milieu ambiant de façon significative. Cependant, la répétabilité du déplacement n'est pas assurée. Pour augmenter la précision du déplacement, une loi de commande est proposée et évaluée dans le chapitre 4. La commande à l'échelle micrométrique est contrainte, entre autres, par la variabilité des systèmes, et l'absence de modèle de connaissance. L'approche proposée dans ce travail est une approche expérimentale qui peut être adaptée à d'autres systèmes. La non-linéarité, due à l'influence de la position de la particule dans le modèle de la plateforme d'actionnement, est éliminée en adaptant les variables de commande. De plus, l'étude de la réponse de la particule considère les degrés de liberté séparément. La perturbation du couplage entre ces derniers est donc limitée par cette approche. La caractérisation de l'influence des paramètres de commande sur la réponse de la particule permettent leur contrôle pour un positionnement avec précision.

La dernière partie de cette thèse est dédiée à la conclusion et aux perspectives de ce travail.

Actionnement magnétique pour la micromanipulation

La manipulation d'objets dont la taille est inférieure au millimètre s'effectue soit à l'aide de systèmes de micromanipulation avec contact, soit à l'aide de systèmes autonomes micrométriques [Régner 08]. Les systèmes avec contact regroupent les outils classiques comme les pinces ou les pointes de microscope à force atomique [Xie 11]. Cependant ils ne sont pas utilisables dans le cadre d'environnements contraints comme les puces fluidiques ou les environnements fermés. A l'inverse, les systèmes autonomes micrométriques sont constitués d'un effecteur de taille micrométrique actionné à distance et utilisé pour déplacer des objets [Diller 11a]. Il est donc possible de les utiliser dans des environnements difficilement accessibles.

La conception de ces systèmes autonomes micrométriques est contrainte par leur taille réduite. En effet, il est impossible aujourd'hui d'embarquer des capteurs, des moteurs, des contrôleurs ou une quelconque forme d'intelligence à une pareille échelle. Ces systèmes reposent donc sur un actionnement à distance ainsi que sur une détection et une commande externes. Ce chapitre présente les spécificités liées à la conception, la fabrication et la commande de tels systèmes.

Dans un premier temps, les différents éléments d'un système autonome micrométrique sont présentés. Dans un deuxième temps, l'actionnement est détaillé. L'actionnement magnétique est privilégié puisque un niveau de force important peut être atteint. Les plateformes d'actionnement magnétique ainsi que les effecteurs micrométriques associés sont présentés. Les problématiques de conception, les techniques de fabrication et les méthodes de commande sont ensuite détaillées. La dernière partie présente les systèmes par actionnement magnétique existants. De bonnes performances sont obtenues en milieu liquide mais

la vitesse de déplacement reste limitée par la force de traînée. L'étude présentée dans ce chapitre montre que très peu de travaux abordent la manipulation en air ambiant.

1 Systèmes autonomes à l'échelle micrométrique

En raison de l'échelle réduite des microsystèmes, il est difficile d'embarquer des capteurs, des actionneurs ou un contrôleur dans les systèmes autonomes. Par conséquent, un actionnement et une commande externes sont adoptés.

Le principe de fonctionnement de ces systèmes est schématisé dans la figure 1.1. Ils sont composés d'une partie micro-échelle (l'effecteur, également appelé microparticule) et une partie macro-échelle (actionnement, détection, contrôle).

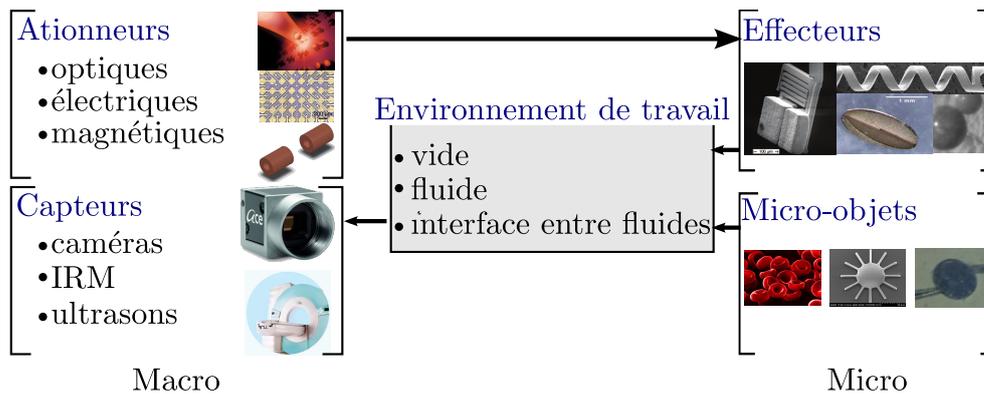


Figure 1.1 - Afin de manipuler des micro-objets, un effecteur micrométrique indépendant est utilisé. L'actionnement et la détection du micro-effecteur sont externes.

La conception d'un système micrométrique autonome consiste à définir :

- le type d'actionnement et la plateforme associée,
- la partie effecteur,
- la partie détection,
- la commande.

Ces différents points sont soumis à des contraintes variées et originales en robotique puisqu'ils doivent prendre en compte à la fois des problématiques à l'échelle macroscopique et des contraintes liées à l'échelle microscopique. Les capteurs et les actionneurs devront présenter des temps de réponse suffisamment faibles pour être utilisés sur des systèmes de micromanipulation avec des dynamiques rapides. Les effecteurs devront être réalisables avec les techniques de microfabrication. En particulier la compatibilité des différentes couches de matériaux les composant devra être assurée pour éviter des problèmes de tenue mécanique.

L'environnement dans lequel ces effecteurs évolue est varié. Il peut s'agir du vide, de l'air

ambient, de liquides, ou encore de l'interface entre deux fluides. Chaque environnement pose des problématiques spécifiques qui seront détaillées par la suite.

2 Actionnement à distance

2.1 Actionnement à l'échelle micrométrique

Afin d'actionner une particule à distance, une solution est de la soumettre à un champ physique à laquelle elle est sensible. Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour déplacer la particule selon l'application visée [Peyer 13] :

- push/pull : le champ physique peut être utilisé pour créer des forces d'attraction/répulsion (push/pull) sur la particule pour produire des déplacements en 2D ou 3D,
- déformations de la particule : pour obtenir des déplacements sur une surface en 2D, des déformations de la particule sont générées de façon successive. La particule se déplace en présence de frottements surfaciques,
- propulsion : pour des déplacements dans un milieu liquide, la propulsion de la particule par un champ externe peut être utilisée.

Les sources possibles d'actionnement à distance les plus fréquemment utilisées aujourd'hui (Fig. 1.2) peuvent être résumées comme suit :

Source optique :

- les rayons laser peuvent être utilisés comme méthodes d'actionnement par push/pull [Chowdhury 12, Onda 12, Fukada 13], mais cette méthode produit de faibles forces,
- l'effet thermique par laser profite de la taille micrométrique des systèmes, puisque la capacité thermique dépend du volume [Sul 06]. Le temps de chauffe et de refroidissement sont considérablement réduits pour les microdispositifs. Cette technique de déformation de particule devient ainsi attrayante, mais elle est inadaptée à des fins biologiques.

Source électrique :

- l'effet électrostatique alimente les systèmes 'scratch drive actuators'. Cependant, ces dispositifs nécessitent une surface particulière pour fonctionner [Donald 06, Paprotny 12],
- l'actionnement piézo-électrique s'appuie sur la déformation de la microparticule lorsqu'elle est soumise à un champ électrique pour créer un mouvement. Cette méthode nécessite un voltage important [Kósa 07],
- les forces diélectrophorétiques générées par des champs électriques variables peuvent être utilisées pour attirer une microparticule diélectrique dans une direction ou une autre [Kharboutly 10]. Cependant la portée du champ est réduite et cette contrainte limite les déplacements.

Source magnétique :

- l'actionnement par magnétostriction [Jing 11] repose sur la déformation du micro-objet en présence d'un champ magnétique pour créer un mouvement,
- les microparticules proposées dans [Ghosh 09, Mahoneya 11, Mahoney 14] emploient l'énergie magnétique comme moyen de propulsion dans un environnement fluide. De plus, les particules à propulsion peuvent être équipés d'hélices hélicoïdales [Yamazaki 04, Zhang 09, Tottori 12, Xu 14b]. Ces microparticules ciblent des applications médicales *in vivo*,
- divers micro-agents mobiles utilisent des électroaimants comme sources d'attraction ou de répulsion externe [Kummer 10, Keuning 11, Khalil 14]. Le Magnetically driven MicroTool (MMT), qui a montré de bonnes performances dans l'interaction avec les cellules biologiques [Hagiwara 11b] utilise également l'actionnement magnétique, généralement des aimants permanents.

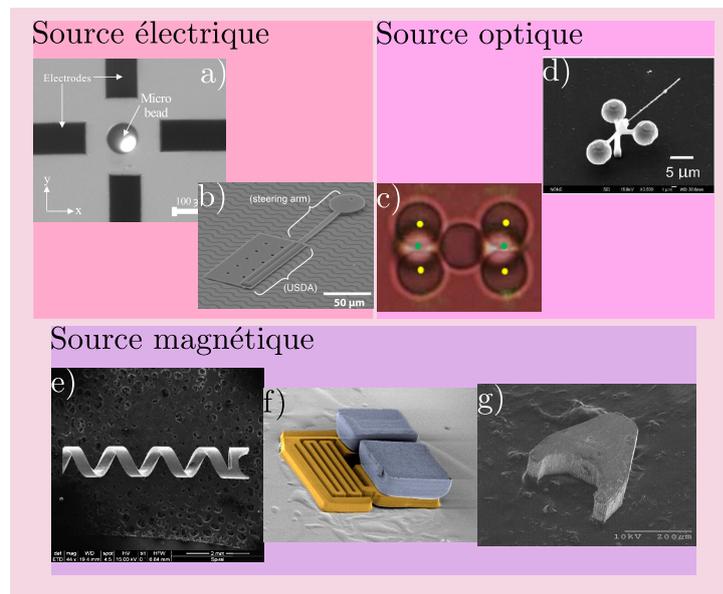


Figure 1.2 - Exemples de sources d'énergie externes et des particules actionnées : l'électrostatique est utilisée dans (a) [Kharboutly 10] pour actionner une particule diélectrophorétique et les systèmes 'scratch drive devices' (b) [Paprotny 12]. Les systèmes (c) [Chowdhury 12] (d) [Fukada 13] utilisent le laser pour piéger une particule et la manipuler. Le champ magnétique est largement exploité : (e) [Mahoneya 11] (f) [Frutiger 10c] et (g) [Pawashe 09]

L'avantage de l'actionnement externe par push/pull est le contrôle en force des microparticules. Ainsi, des limitations sur les forces produites peuvent être imposées pour permettre des interactions fiables avec les micro-organismes biologiques vivants en plus de l'exécution de tâches industrielles. Par ailleurs, la locomotion par déformation de la particule produit des vitesses plus faibles que l'actionnement par push/pull.

Le tableau 1.1 présente une comparaison des forces produites pour les méthodes d'actionnement introduites plus haut dans un mode push/pull. L'actionnement par champ

Actionnement	Force générée
Optique	0.1 nN
Diélectrophorèse	0.1 μ N
Magnétique	100 μ N

Tableau 1.1 - *Ordre de grandeur des forces produites dans le cas d'un actionnement push/pull*

magnétique provoque des forces plus importantes comparé aux autres méthodes. De plus le champ magnétique traverse la plupart des matériaux (en plus des tissus biologiques). Cette méthode est adaptée pour contrôler à distance des objets dans un environnement contraint. C'est actuellement l'une des plus utilisées, et elle sera privilégiée dans la suite de cette thèse.

2.2 Actionnement magnétique

Un objet avec une magnétisation interne non nulle est soumis à des forces et des moments magnétiques lorsqu'il est exposé à un champ magnétique non-uniforme [O'Handley 99, Coey 10]. Conformément à la nomenclature, le champ d'induction magnétique est noté \mathbf{B} et son unité est le milli-Tesla [mT]. Le champ d'induction magnétique est proportionnel au champ d'excitation magnétique, noté \mathbf{H} . Le terme 'champ magnétique' peut faire référence à \mathbf{B} et/ou \mathbf{H} [O'Handley 99, Coey 10]. Dans ce travail le terme 'champ magnétique' fait référence au champ d'induction magnétique \mathbf{B} .

La magnétisation interne d'un objet n'est pas uniforme en tout point de l'objet, excepté pour des objets de formes particulières telles que les ellipsoïdes [Abbott 07a]. La force magnétique \mathbf{F}_m [N] et le moment magnétique \mathbf{T}_m [N · mm] que subit un objet magnétique avec un volume V [mm³] s'écrivent :

$$\mathbf{F}_m = \int_V (\mathbf{M}(\mathbf{P}) \cdot \nabla) \mathbf{B} dV \quad (1.1)$$

$$\mathbf{T}_m = \int_V \mathbf{M}(\mathbf{P}) \times \mathbf{B} dV \quad (1.2)$$

où $\mathbf{M}(\mathbf{P})$ [A · mm⁻¹] est la magnétisation interne de l'objet qui varie en fonction de la position dans l'espace notée $\mathbf{P} = x\mathbf{e}_x + y\mathbf{e}_y + z\mathbf{e}_z$, tels que \mathbf{e}_x , \mathbf{e}_y et \mathbf{e}_z sont les vecteurs unitaires.

La particule doit avoir une taille supérieure aux dimensions des objets à manipuler. Afin de manipuler des objets dont la taille est comprise entre une dizaine et une centaine de micromètres les particules utilisées ont généralement une taille de quelques centaines de micromètre. Étant donnée cette taille réduite, la magnétisation interne est considérée constante à l'intérieur de la particule [Abbott 07b]. Les expressions de la force et du

moment magnétique se simplifient comme suit :

$$\mathbf{F}_m = V(\mathbf{M} \cdot \nabla)\mathbf{B} \quad (1.3)$$

$$\mathbf{T}_m = V\mathbf{M} \times \mathbf{B} \quad (1.4)$$

$\mathbf{M} = \xi_m \mathbf{H}$, avec \mathbf{M} la magnétisation interne et ξ_m étant la susceptibilité magnétique de la particule.

2.3 Bilan des forces

L'importance relative des forces aux échelles macro et micrométriques varie du fait de la réduction d'échelle [Trimmer 89, Fearing 95, Wautelet 01].

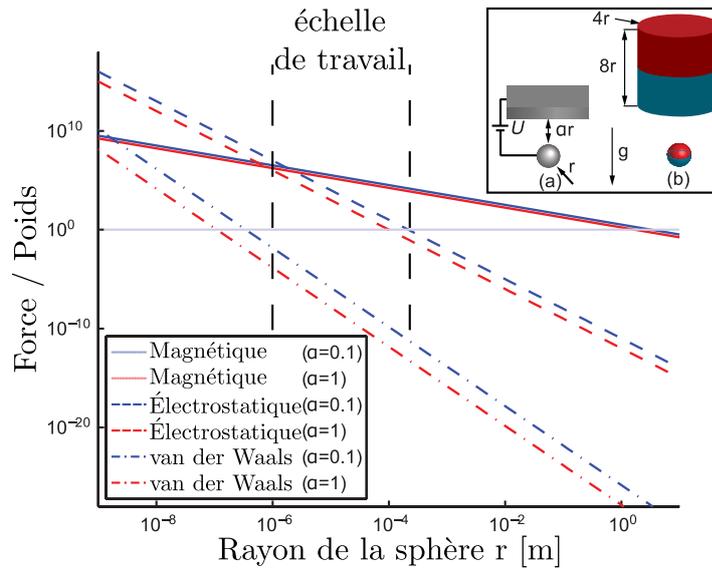


Figure 1.3 - Amplitudes des forces électrostatiques, magnétiques et de van der Waals appliquées sur une sphère relativement à son poids, présentées en fonction de son rayon. Les forces électrostatiques et magnétiques sont générées respectivement par un potentiel électrique et un aimant comme schématisé par les figures (a) et (b). Les forces de van der Waals sont calculées entre deux sphères de même rayon à une distance constante [Abbott 07b].

La figure 1.3, tirée de [Abbott 07b], montre que la force magnétique peut être supérieure au poids pour une bille de rayon inférieur au millimètre. Pour les objets utilisés dans cette thèse, la force magnétique est plus importante que le poids et les forces électrostatiques.

En conséquence, le champ magnétique produit un moment magnétique qui peut être utilisé soit pour orienter la particule, soit pour la déplacer, alors que le gradient du champ magnétique produit une force qui déplace la particule.

- **les moments magnétiques** : ils produisent un déplacement par un mouvement de stick-slip [Floyd 09b]. De plus, les rotations successives d'une particule sphérique, produites par les moments magnétiques, produisent sa translation dans le liquide [Jiang 10],
- **les forces magnétiques** : si elles sont suffisamment importantes, elles peuvent repousser/tirer (push/pull) un micro-objet [Kummer 10]. Cette dernière méthode nécessite un gradient de champ important, mais produit des forces suffisantes pour interagir avec des micro-objets. Les forces magnétiques peuvent aussi être utilisées pour créer des vibrations dans un microsystème résultant en un mouvement s'il est excité à son mode de résonance [Tung 14].

3 Microparticule magnétique

Seules les particules magnétiques sont sensibles au champ magnétique. Cette propriété est attrayante puisqu'il est possible de mettre un effecteur magnétique dans un environnement présentant un grand nombre d'objets différents sans que ceux-ci ne soient affectés par le champ destiné à contrôler la position de l'effecteur. Cependant, ce choix induit des contraintes spécifiques sur le choix des matériaux et la fabrication de l'effecteur.

3.1 Matériaux magnétiques

Un champ magnétique externe a pour effet d'aligner les domaines magnétiques de certains matériaux dans sa direction. L'effet du champ magnétique se traduit par un moment magnétique et, si le champ est non-uniforme, par une force magnétique. Différents types de matériaux magnétiques existent et peuvent être utilisés [O'Handley 99, Coey 10] :

Matériaux ferromagnétiques : dans ces matériaux, les domaines magnétiques regroupent localement de nombreux moments magnétiques d'atomes, qui pointent dans la même direction. Ces domaines magnétiques s'assemblent spontanément en un moment magnétique global dans les aimants permanents ou se compensent dans les autres matériaux. Les matériaux ferromagnétiques sont attirés vers les zones du champ les plus intenses. Par ailleurs, les domaines magnétiques se réalignent d'autant plus que le champ magnétique externe est fort, jusqu'à saturation où tous les domaines magnétiques ont la même direction, celle du champ externe. Un objet ferromagnétique ne produisant aucun champ magnétique spontanément peut donc être utilisé pour augmenter le champ magnétique d'une source externe. Une aimantation résiduelle peut survenir temporairement dans l'objet une fois le champ magnétique éliminé, et peut être permanente.

Les matériaux ferromagnétiques sont classifiés en matériaux doux ou durs, selon l'aimantation résiduelle. Si cette aimantation est faible et se dissipe rapidement, le matériau est dit doux. En revanche, si l'aimantation résiduelle est forte et permanente le matériau

est dit dur, ces derniers constituent les aimants permanents.

Matériaux paramagnétiques : les moments magnétiques sont alignés dans le sens du champ magnétique \mathbf{B} . Les matériaux paramagnétiques possèdent une susceptibilité magnétique beaucoup plus faible que les matériaux ferromagnétiques. Il nécessitent donc une source magnétique plus puissante pour obtenir le même niveau de force.

Matériaux diamagnétiques : les moments magnétiques sont alignés dans la direction opposée à \mathbf{B} . En conséquence, un micro-objet diamagnétique peut bénéficier d'un point d'équilibre stable. Cette propriété est appropriée pour le contrôle. Le diamagnetisme peut être observé dans tous les matériaux, mais il est très faiblement présent, sauf dans les supraconducteurs. Lorsque les propriétés paramagnétiques existent, elles prévalent sur la répulsion diamagnétique.

Les microparticules sont généralement soit en matériaux ferromagnétiques soit en matériaux diamagnétiques. Les premières sont privilégiées pour leur susceptibilité magnétique importante qui produit des niveaux de force importants. Les secondes sont choisies car elles peuvent être repoussées par une source de champ magnétique. Cette propriété est exploitée pour créer un point d'équilibre stable dans l'espace. Le contrôle est alors simplifié.

Les propriétés ferromagnétiques sont également utilisées pour ajouter des noyaux à l'intérieur des bobines dans le but d'augmenter le gradient du champ magnétique produit.

3.2 Fabrication à l'échelle micrométrique

Les dimensions des microparticules actionnées varient de quelques dizaines à quelques centaines de μm . Elles nécessitent donc des techniques de fabrication spécifiques (Fig. 1.4) rendues possibles par les technologies d'usinage laser. Ces dernières consistent à découper un matériau selon les dimensions souhaitées à l'aide d'un laser. Les procédés de micro-fabrication utilisés dans la micro-électronique, comme la lithographie, peuvent aussi être utilisés. Celle-ci combine des opérations de dépôts comme la pulvérisation cathodique, le dépôt chimique en phase vapeur, la galvanoplastie, le spin-coating, l'électro-déposition et l'enlèvement de matière sélectif, comme la gravure ionique réactive profonde (DRIE). La lithographie usine des micro-objets avec des couches de matériaux différents, et garantit une surface plus lisse que la fabrication au laser. Cependant cette dernière préserve l'aimantation et la densité de la matière.

Différents matériaux peuvent être utilisés dans les procédés de microfabrication. Cependant, l'état de surface à cette échelle reste difficile à maîtriser. Cette difficulté est particulièrement critique du fait de l'importance relative des forces d'adhésion sur les forces volumiques comme le poids. Concernant la forme des microparticules, la majorité des systèmes autonomes à l'échelle micrométrique possède des géométries simples. Selon leur application ils peuvent être parallélépipédiques, carrés ou encore concaves pour piéger

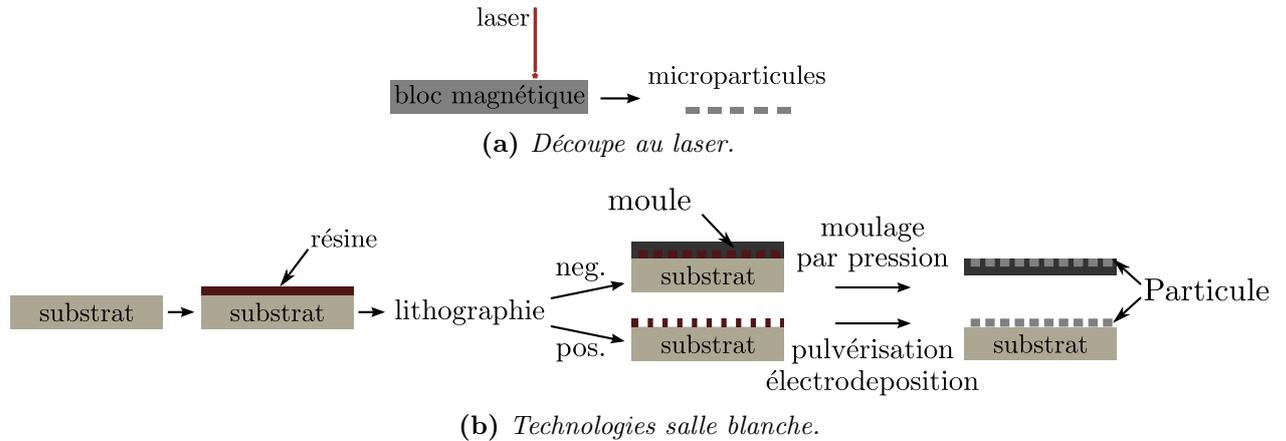


Figure 1.4 - Fabrication à l'échelle micrométrique. Des techniques standards comme la découpe au laser (a) sont utilisées pour produire des particules magnétiques. Les technologies salle blanche sont aussi répandues (b). Les méthodes les plus utilisées pour obtenir des micro-objets sont le moulage ou l'électro-déposition. Pour obtenir des moules micrométriques, l'empreinte des microparticules est réalisée par photolithographie. Cette dernière sert aussi à délimiter une aire micrométrique pour un dépôt sélectif.

des micro-objets. Des motifs sont parfois structurés à leur surface. Cependant les technologies de fabrication actuelles permettent d'aller plus loin et il est possible d'envisager des micro-effecteurs possédant des degrés de liberté (DDLs) internes, comme des pinces actives actionnées de manière indépendante pour effectuer des tâches de micromanipulation complexes.

Pour des applications biomédicales *in vivo* ou *in vitro*, la biocompatibilité est une problématique clef. Pour éviter la corrosion des matériaux magnétiques ces derniers peuvent être recouverts par une couche de polymères [Ramanujan 05]. En outre, certains matériaux magnétiques biocompatibles existent [Pouponneau 06] mais cette propriété est limitée dans le temps.

4 Plateforme magnétique

4.1 Actionneurs magnétiques

Les systèmes microrobotiques utilisent une source magnétique pour actionner à distance une microparticule avec des propriétés magnétiques. Deux techniques produisant le champ magnétique peuvent être citées :

- **les aimants permanents** : ils produisent un champ magnétique avec une intensité importante, facile à modéliser de façon analytique par un dipôle magnétique. Cependant, le champ produit n'est pas contrôlable et nécessite un dispositif asservi

pour déplacer l'aimant permanent. Cela pose des problèmes d'encombrement si la particule doit disposer de plusieurs degrés de liberté,

- **les électro-aimants** : le champ magnétique \mathbf{B} produit dépend du courant en entrée de l'électro-aimant ainsi que de sa géométrie et ses dimensions. La modélisation du champ magnétique est plus complexe que dans le cas d'un aimant permanent.

Les systèmes microrobotiques utilisent pour la plupart des électro-aimants [Diller 12, Khalil 14, Tung 14, Xu 14b] qui sont plus adaptés dans le cadre d'un contrôle de trajectoires de la microparticule. Lors de la conception des plateformes magnétiques, plusieurs critères sont recherchés, notamment la maximisation de l'espace de travail des forces magnétiques, et la minimisation de la latence et des non-linéarités du champ magnétique pour un contrôle rapide et robuste des microparticules. L'enjeu, en choisissant la configuration des bobines, est de réduire la distance entre les électro-aimants et la microparticule pour augmenter l'intensité du champ magnétique tout en limitant les non-linéarités prédominantes au voisinage des bobines [Kummer 10].

En outre, la température dans les bobines dépend du courant électrique appliqué. Pour éviter leur échauffement et leur altération, le courant est limité en fonction de la capacité thermique des bobines et du temps de dissipation de la chaleur. Cependant, ceci limite le champ magnétique produit. Un système de refroidissement [Kummer 10] ou une forme de signal de courant en impulsion [Ivan 11b] peuvent également éviter ce problème.

Par ailleurs, l'intensité et la linéarité du champ magnétique dépendent de la présence ou non d'un noyau ferromagnétique au centre de la bobine. Le champ généré par une bobine sans noyau est directement proportionnel à l'intensité du courant en entrée. Le champ magnétique produit est plus fort à l'intérieur de la bobine, et diminue rapidement à l'extérieur de son volume. Il est donc important de garder la microparticule aussi proche que possible de la bobine. Cette contrainte réduit et encombre l'espace de travail. Toutefois, il est possible de générer un champ magnétique plus fort à l'extérieur de l'électro-aimant en ajoutant un noyau magnétique en son centre. En revanche, lorsque le noyau atteint sa saturation magnétique, le champ magnétique n'est plus proportionnel au courant en entrée. De plus, des problèmes d'hystérésis apparaissent. L'ensemble de ces phénomènes doit être pris en compte pour le contrôle de ces microparticules.

4.2 Configuration des actionneurs magnétiques

Afin d'augmenter le nombre de degrés de liberté de la microparticule, plusieurs électroaimants fixes peuvent être contrôlés indépendamment pour produire plusieurs champs magnétiques résultant en un champ complexe lorsqu'ils sont combinés. Ce champ résultant peut être considéré comme la superposition linéaire des effets de chaque électro-aimant pour les bobines sans noyau, même s'il existe une très faible induction mutuelle entre les bobines. Cette approximation est également valable pour les bobines à noyau ferromagnétique, tant que les sources magnétiques sont suffisamment espacées les unes des autres pour éviter que le champ généré par un électro-aimant n'affecte le noyau d'une autre

bobine [Kummer 10].

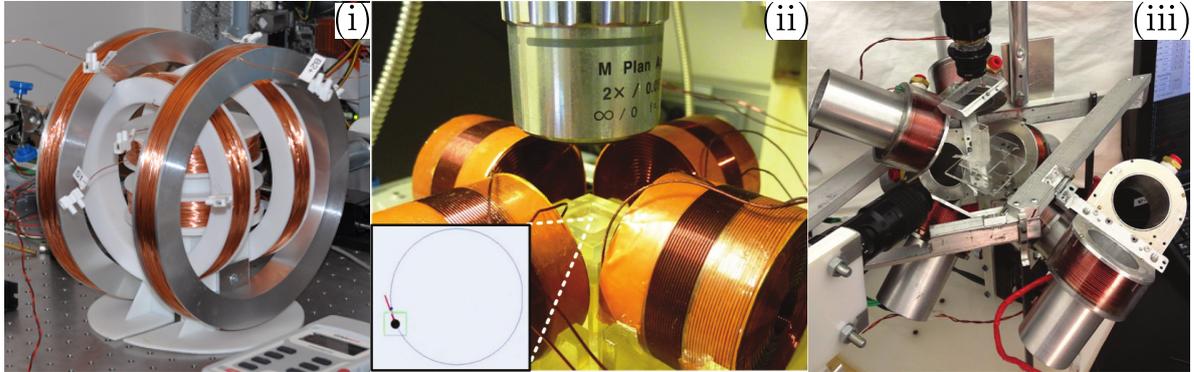


Figure 1.5 - Exemples de configurations d'électro-aimants possibles : (i) trois paires de bobines Helmholtz pour produire des déplacements en 3D de micro-hélices [Xu 14a], (ii) quatre bobines orthogonales pour déplacer une particule en 2D [Khalil 12], (iii) pour générer des déplacements en 3D, 8 bobines sont utilisées dans [Diller 13].

De plus, comme une bobine ne peut induire un déplacement de la microparticule que dans une seule direction, le nombre de bobines utilisées et leur configuration influencent directement les degrés de liberté de la microparticule. Pour obtenir un mouvement 2D contrôlé, au moins 3 bobines sont nécessaires, et pour un mouvement entièrement contrôlé en 3D un minimum de 6 bobines est nécessaire. Certaines configurations usuelles peuvent être utilisées dans la conception de la plateforme magnétique. Par exemple, dans un actionnement reposant sur les moments magnétiques, les bobines d'Helmholtz¹ produisent un champ magnétique uniforme à proximité du centre de la bobine de façon à aligner la microparticule située près du centre de la bobine le long de l'axe de la bobine. En revanche, les bobines de Maxwell² produisent un champ magnétique à gradient uniforme et dirigent la microparticule dans la direction désirée [Jeong 12]. Toutefois, en raison de la taille des électro-aimants, les configurations admissibles sont restreintes. Cela peut être résolu en recourant à une configuration dynamique des bobines [Hagiwara 12, Veron 13].

5 Contrôle des systèmes microrobotiques magnétiques

La particule magnétique est actionnée par le moment et la force magnétiques. Ces derniers sont produits respectivement par \mathbf{B} , le champ magnétique, selon l'équation (1.4) et le gradient du champ magnétique $\nabla\mathbf{B}$ selon l'équation (1.3). Le champ magnétique est produit par un courant i_e circulant dans une bobine $-e-$. Le gradient du champ magnétique est présent si le champ magnétique produit n'est pas uniforme dans l'espace.

1. Bobines d'Helmholtz : deux bobines magnétiques circulaires identiques sont placées symétriquement de chaque côté de l'espace de travail le long d'un axe commun, et sont séparées par une distance égale au rayon de la bobine. Les courants circulant dans les bobines sont égaux et ont la même direction.

2. Bobines de Maxwell : deux bobines magnétiques circulaires identiques sont placées symétriquement de chaque côté de l'espace de travail le long d'un axe commun, et sont séparées par une distance qui vaut

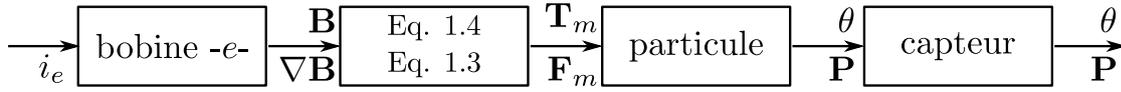


Figure 1.6 - Champ et gradient de champ magnétiques produit par le courant circulant dans une bobine. Sous l'action du moment et de la force magnétiques produits par le champ et le gradient de champ magnétique, la particule change d'orientation θ et de position \mathbf{P} .

Pour contrôler le déplacement de la particule, il faut maîtriser l'ensemble de la chaîne directe de ce système (Fig. 1.6). Il faut en particulier connaître :

- la relation entre le courant en entrée de la bobine et le champ et le gradient de champ magnétiques produits (celle-ci dépend des caractéristiques des bobines),
- la relation entre le moment et la force magnétiques et le champ et le gradient de champ magnétiques produits (équations (1.4) et (1.3)),
- la loi de comportement de la particule : elle dépend de son environnement relie la position et l'orientation (ou sa vitesse/accélération) et la force et le moment magnétiques.

Le deuxième point entre le moment et la force magnétique et le champ et le gradient de champ magnétique produits a été détaillé dans la section 2. Les deux autres relations sont détaillées dans les paragraphes suivants. La boucle de retour, en particulier le choix du capteur, et la loi de commande sont également abordés.

5.1 Modélisation du champ magnétique

La modélisation du champ \mathbf{B} produit par le courant i_e circulant dans la bobine est importante et doit inclure le temps de latence d'établissement du champ et sa non-linéarité. Cette modélisation peut être effectuée par un modèle analytique [Diller 12]. Cependant il est difficile de prendre en compte l'ensemble des spécificités des bobines, notamment leur imperfections de fabrication. Un modèle par éléments finis (FEM) [Kummer 10] est également utilisable. Il est calculé hors ligne et ne peut pas être utilisé en temps réel. Cependant, la combinaison de ces deux méthodes est possible et consiste à simuler la réponse hors ligne et ensuite à l'intégrer dans un modèle analytique pour un calcul en temps réel.

Dans tous les cas, le champ \mathbf{B} dépend grandement des propriétés physiques des matériaux composant la bobine, notamment son noyau. Or ces grandeurs varient considérablement selon les conditions de fabrication, et il est difficile de les trouver de manière précise dans la littérature. Il est donc courant de réaliser des mesures du champ magnétique à l'aide de capteurs à effet Hall pour recalibrer les modèles. Par ailleurs, l'évaluation du champ magnétique peut s'effectuer en temps réel par l'intégration de capteurs à effet Hall dans la plateforme magnétique. Ils sont placés à côté des bobines et par interpolation, il est possible d'estimer le champ \mathbf{B} à une position donnée dans l'espace de travail. En outre,

1.73 fois leur rayon. Les courants circulant dans les bobines sont égaux et ont des directions opposées.

le temps de latence des capteurs à effet Hall doit être minime s'il est prévu de les utiliser pour réaliser un contrôle en boucle fermée.

5.2 Modélisation du comportement de la particule

Il est couramment admis que l'orientation de la particule θ est équivalente à l'orientation du champ magnétique [Kummer 10]. Par contre, le déplacement d'une particule soumise à un champ magnétique doit être déterminé en fonction de la force magnétique appliquée. L'établissement de la relation entre la position, vitesse ou accélération de la microparticule (sortie du modèle) et le courant électrique ou le champ magnétique \mathbf{B} (entrée du modèle) est essentiel.

En fonction de l'environnement, le comportement de la microparticule est perturbé par les forces d'adhésion élevées en milieu sec [Abbott 07b], qui dépendent étroitement de la surface de l'arène et de la microfabrication de la particule. Les forces d'adhésion peuvent être réduites à cette échelle, par exemple en créant des vibrations par une couche piézo-électrique [Ivan 11b], ou par lévitation en utilisant l'effet électrostatique [Kharboutly 10]. Dans un environnement liquide, les microparticules rencontrent les forces de traînée dues au fluide [Abbott 07b], qui augmentent avec la vitesse. Quand la microparticule évolue dans un liquide, l'état du liquide change et conduit à des perturbations du système. Outre les forces de traînée dans les liquides, la microparticule peut subir des forces d'adhésion si elle colle à la surface. Afin de réduire ou d'éviter les forces d'adhésion dans un liquide, une surface nervurée peut être utilisée pour maintenir la particule en flottage [Hagiwara 12], ou elle peut être maintenue à l'interface liquide-air [Dkhil 14].

L'identification du comportement des microparticules magnétiques est complexe par l'importance significative des non-linéarités. Il est cependant possible de représenter le système par un modèle simplifié issu d'une approche théorique et de le corriger à l'aide de résultats expérimentaux. En outre, d'autres méthodes peuvent être utilisées pour évaluer le comportement de la microparticule, telles que les réseaux de neurones [Calderon 96] ou des méthodes d'apprentissage [Li 06, Kober 13]. Ces dernières ont montré de bonnes performances dans l'identification des systèmes non linéaires à l'échelle macroscopique.

5.3 Détection à l'échelle micrométrique

L'embarquement des capteurs est difficile à réaliser à cette échelle. Une détection par capteurs externes est l'alternative la plus courante pour localiser les microparticules. Le choix du système d'imagerie est important et dépend de l'environnement du micro-effecteur, du champ de détection, du coût souhaité, de la rapidité et de la flexibilité du suivi. Plusieurs méthodes de détection peuvent être utilisées pour connaître la position des microparticules \mathbf{P} :

Détection par le champ magnétique : cette technique utilise l'induction magnétique dans une bobine pour déterminer la position de la particule [Yang 09]. Plusieurs paramètres doivent être pris en compte, les propriétés du matériau, les dimensions et la géométrie de l'objet, etc. Cette méthode est sensible à la présence d'autres objets magnétiques en plus de celui à détecter et nécessite une calibration au préalable.

Détection par IRM (Imagerie par Résonance Magnétique) : elle est très utilisée dans le domaine médical [Martel 09, Folio 11, Belharet 11] pour détecter (et actionner) une particule magnétique dans le cas d'applications *in vivo*. Cette méthode a une faible résolution spatiale et un coût élevé.

Détection par ultrasons : elle est également très utilisée dans le médical, en raison de sa biocompatibilité et son faible coût. Cette méthode nécessite l'intégration d'un transducteur sur la particule. Cependant, le bruit de mesure est important dans ce cas.

Vision par caméras : la vision est largement utilisée en raison du faible coût et du temps de calcul rapide [Kummer 10]. La détection par caméras se fait sans contact et la résolution spatiale peut être augmentée en ajoutant des objectifs optiques. Le temps d'acquisition de la caméra doit être suffisamment rapide afin d'assurer la stabilité de la loi de commande. Le traitement d'images bénéficie du contraste entre la microparticule et son environnement, et la détection peut généralement se faire par exemple par seuillage et/ou à l'aide d'opérations morphologiques.

Par ailleurs, d'autres types de caméras peuvent être utilisées comme les capteurs événementiels, qui sont plus rapides. Ils imitent les systèmes de vision biologique et réagissent aux changements de contraste, qui correspondent à un mouvement. Ces derniers sont convertis en un flux d'événements asynchrones [Lichtsteiner 08, Ni 14]. Le traitement des informations est cependant plus complexe et une calibration avec une caméra classique est requise puisque ces capteurs ne fournissent aucune information sur les parties statiques de la scène.

5.4 Contrôle

Les systèmes autonomes micrométriques doivent pouvoir être positionnés et orientés avec une précision micrométrique, de manière à pouvoir interagir avec des objets de quelques dizaines de micromètres. Ce critère est cependant difficile à respecter du fait des importantes non-linéarités qui se manifestent à cette échelle : les forces prédominantes d'adhésion, les phénomènes d'hystérésis, et la sensibilité aux variations environnementales (e.g humidité, résidus, poussières). Par conséquent, un système de contrôle en boucle fermée (Fig. 1.7) est nécessaire. La commande doit être robuste face aux bruits de l'environnement et aux erreurs de modélisation. Le temps de réponse de la boucle de commande est également crucial puisque la faible inertie dans le micromonde induit des comportements à hautes dynamiques. En conséquence, un bon compromis entre la robustesse et la vitesse de la commande est essentiel.

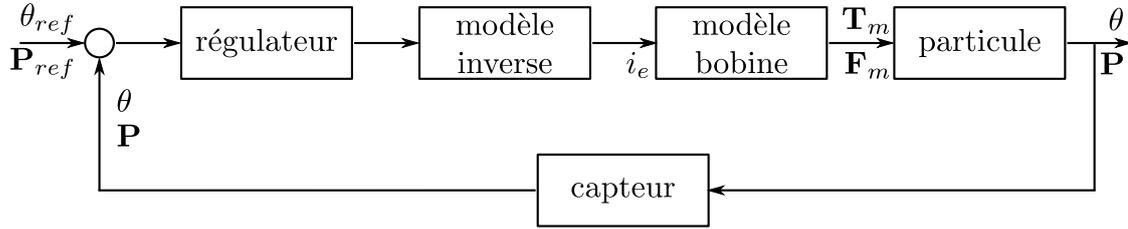


Figure 1.7 - Erreur entre la position de référence (\mathbf{P}_{ref} , θ_{ref}) et la position courante estimée (\mathbf{P} , θ) corrigée par un régulateur. Le modèle inverse (modèle géométrique, cinématique ou dynamique selon l'asservissement) calcule le courant nécessaire à envoyer aux bobines pour effectuer le déplacement pour atteindre la position désirée.

Le contrôleur calcule le courant i_e nécessaire pour atteindre la position désirée \mathbf{P}_{ref} . Le calcul du modèle direct du système puis son inversion, c'est à dire le calcul de la relation entre le déplacement, la vitesse ou l'accélération de la microparticule et le courant dans les bobines est alors l'un des principaux enjeux. La modélisation du champ magnétique en fonction du courant, et la modélisation du comportement de la particule sont combinés pour calculer le modèle direct. Il est ensuite généralement linéarisé pour être facilement inversible en temps réel. Le système est bouclé en utilisant la position de la particule. Le contrôleur utilise la valeur retournée par la méthode de détection, et en fonction de la position désirée définit l'entrée des électro-aimants. Il minimise ainsi l'erreur ε_* ³, qui est la différence entre les valeurs des positions actuelle et de référence. Pour corriger les erreurs de modélisation et augmenter la robustesse du contrôle, une loi de commande peut être intégrée. Le proportionnel intégral dérivé (PID) est un des régulateurs les plus couramment utilisés. Le PID est rapide d'exécution et simple à implémenter, de plus il s'adapte bien à des comportements linéaires. D'autres lois de commande peuvent être utilisées, offrant plus de robustesse face aux perturbations externes telle la commande robuste H_∞ [Gahinet 94].

Le contrôle des microparticules a deux objectifs : (i) assurer un suivi de trajectoire et garantir un positionnement et une orientation et (ii) assurer des tâches de manipulation à l'aide de la microparticule. Les contraintes pour la manipulation de micro-objets varient en fonction de l'environnement. Dans l'air, la microparticule doit produire des forces importantes pour pousser/tirer les objets et vaincre les forces d'adhésion. Dans le liquide la commande doit prendre en compte les mouvements du fluide générés par le déplacement de la microparticule. En particulier, il faut prendre en compte les mouvements produits lors du retrait de la particule après le positionnement des objets, qui sont susceptibles de modifier leur position. Outre le contrôle d'un micro-objet, la commande de multiples microparticules magnétiques en coopération peut permettre d'effectuer des tâches plus complexes, comme la manipulation d'un objet plus grand. Cependant des stratégies spécifiques doivent être développées pour contrôler de manière indépendante le déplacement de chacune des particules magnétiques soumises à un même champ magnétique.

3. ε_x , ε_y , ε_z , ε_θ , sont respectivement l'erreur suivant x , y , z et l'orientation.

6 Les systèmes microrobotiques magnétiques

Dans cette section, quatre travaux fondateurs des systèmes microrobotiques à actionnement magnétique sont présentés. Ils illustrent les approches proposées pour répondre aux problématiques de conception des microparticules, des plateformes magnétiques et des contrôleurs. L'analyse de ces systèmes donne une vue d'ensemble dans ce domaine de recherche.

6.1 Mag- μ Bot (Magnetic micro roBot)

Le système Mag- μ Bot [Pawashe 09,Diller 12,Diller 13] est dédié à la micromanipulation en 2D ou 3D en milieu liquide. Il a fait l'objet de nombreux travaux qui peuvent se décomposer selon les résultats obtenus.

Manipulation en 2D :

- la particule est en contact avec la surface,
- l'actionnement est de type stick-slip (Fig. 1.8). Le basculement de la particule vers le bas ensuite vers le haut produit sa translation en présence de frottements surfaciques,
- la particule peut évoluer dans un milieu liquide ou sec,
- le déplacement de la particule (orientation et translation) est produit par le champ magnétique.

La translation de la particule dans ce cas est produite par le champ magnétique uniquement. Cette méthode nécessite donc un champ magnétique réduit comparée à une translation produite par le gradient du champ magnétique. Cependant, ce mouvement composé limite la vitesse de la particule.

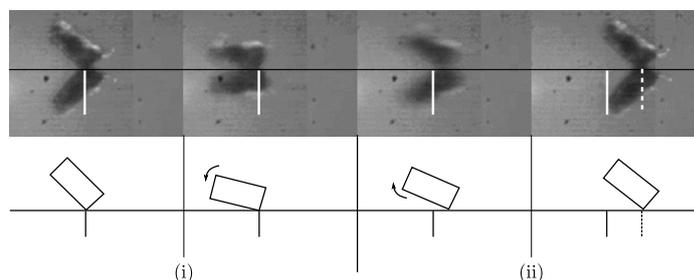


Figure 1.8 - Translation en stick-slip de la microparticule : la ligne continue est sa position initiale, la ligne discontinue est sa position finale. La particule est basculée vers le bas (i) et vers le haut (ii), elle se déplace quand le frottement surfacique est surmonté [Floyd 09b].

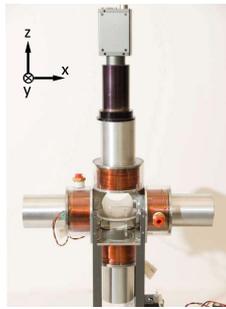
Manipulation en 3D :

- la translation de la particule est produite par le gradient du champ magnétique,

- l'orientation de la particule est générée par le champ magnétique,
- la particule se déplace dans le liquide.

6.1.1 Conception du système microrobotique

Plateforme d'actionnement : pour assurer les déplacements en 2D, six bobines identiques, dans une configuration orthogonale (Fig. 1.9(a)), sont utilisées. Les bobines dans le plan assurent l'orientation de la particule, tandis que les bobines hors plan sont utilisées pour produire la translation de la particule dans un mouvement en stick-slip. Le champ magnétique et le gradient du champ magnétique peuvent atteindre respectivement 15 mT et $0,65 \text{ T}\cdot\text{m}^{-1}$ au centre de l'espace de travail.



(a) Plateforme d'actionnement du Mag- μ Bot en 2D.



(b) Plateforme d'actionnement du Mag- μ Bot en 3D.

Figure 1.9 - Déplacements dans le plan, produits par une plateforme à 6 bobines (a). Pour produire des déplacements en 3D, 8 bobines sont utilisées (b).

Pour assurer les déplacements en 3D, huit bobines sont utilisées. Le champ magnétique et le gradient du champ magnétique peuvent atteindre respectivement 8,3 mT et $0,34 \text{ T}\cdot\text{m}^{-1}$ au centre de l'espace de travail pour cette plateforme d'actionnement. Par ailleurs le champ magnétique et le gradient du champ sont considérés uniformes dans cette configuration. En effet la variation du champ dans l'espace est de 6% de sa valeur nominale.

Détection de la particule : la détection de la particule se fait par deux caméras, pour obtenir une vue d'en haut et une vue de côté. Le traitement d'images utilise un algorithme de seuillage associé à une prédiction d'état [Floyd 09b] selon l'algorithme introduit dans [Isard 98].

Fabrication de la particule : la particule Mag- μ Bot est un composite de néodyme-fer-bore, un aimant permanent. La force produite est en conséquence plus importante.

Deux procédés de fabrication peuvent être utilisés dans la réalisation des particules Mag- μ bot. Le premier procédé utilise des techniques classiques de découpe au laser [Pawashe 09]. Le second procédé repose sur la fabrication en série par des techniques de

micromoulage. Les micromoules sont produits par lithographie. Ce dernier procédé réalise un plus grands nombre de particules, tandis que le premier procédé maintien l'amplitude et la direction de la magnétisation interne du matériau. De plus, pour manipuler des microcomposants, la forme de la microparticule peut être adaptée : parallélépipédique, cylindrique, etc. La figure 1.10 montre une particule Mag- μ Bot avec une forme concave pour piéger des micro-objets.

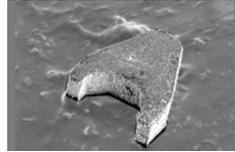


Figure 1.10 - Particule du Mag- μ Bot : $300 \times 300 \times 100 \mu\text{m}^3$.

6.1.2 Contrôle du système

Le modèle du champ magnétique est obtenu par un modèle théorique en fonction de la géométrie de l'électroaimant et de la position de la particule. Ce modèle est proportionnel au courant en entrée de l'électroaimant. Par ailleurs les bobines sont considérées parfaites, le champ produit est donc la somme des champs magnétiques produits par chacune des bobines. Des capteurs à effet Hall pour mesurer le champ magnétique sont aussi intégrés dans la plateforme d'actionnement en 3D.

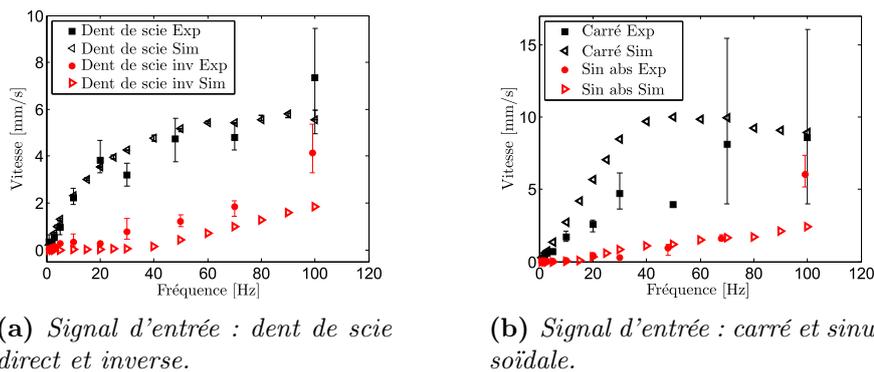


Figure 1.11 - Exemples de résultats de simulations et d'expériences du comportement de la microparticule. La vitesse de la particule Mag- μ Bot est en fonction de la fréquence du courant. La surface de travail est en silicium rugueux, la particule évolue dans l'air [Pawashe 09].

Afin d'asservir le système, une corrélation entre le signal d'entrée et le comportement de la microparticule est établie. Des simulations et des expériences sont réalisées pour déterminer la vitesse de la microparticule en fonction de la fréquence du signal et les

propriétés de la surface de contact (Fig. 1.11). L'orientation de la particule Mag- μ Bot est considérée équivalente à l'orientation du champ magnétique dans le plan xy .

Pour corriger la position de la particule, un régulateur PID (proportionnel intégrateur dérivé) est utilisé. Les termes du PID sont réglés expérimentalement. De plus, une saturation est intégrée dans le contrôleur pour limiter le courant envoyé à la plateforme d'actionnement et réguler l'orientation du champ magnétique et la vitesse de la particule. En effet lors d'accélération angulaires importantes, la particule peut changer de point de contact et son comportement devient imprévisible. L'objectif de la saturation est d'améliorer la stabilité du mouvement de la microparticule en limitant ses accélérations.

6.1.3 Conclusion

Positionnement et suivi de trajectoires : la vitesse du Mag- μ Bot atteint 25 mm.s^{-1} en milieu sec [Challenge 10]. De plus, les résultats d'asservissement de la particule sont utilisés pour obtenir un plus haut niveau d'autonomie : le système est muni d'un planificateur de trajectoires. Ce module calcule une trajectoire sans collision à partir d'une position initiale et d'une position finale, dans un environnement encombré.

Le contrôle du Mag- μ Bot repose sur son contact avec la surface. En effet, si le contact est rompu, la particule s'envole pendant la majeure partie de sa trajectoire à cause du gradient du champ magnétique. Le comportement de la microparticule, dans ce cas, est imprévisible et n'est pas pris en compte du point de vue du contrôle.

Interaction avec des micro-objets : le système Mag- μ Bot entraîne des forces suffisantes pour interagir avec des micro-objets. Il peut par exemple pousser des sphères de $50 \mu\text{m}$ de diamètre dans un milieu liquide. En outre, comme il est contrôlé dans un milieu liquide, la manipulation de micro-objets est effectuée en utilisant deux stratégies. La première est une manipulation sans contact en utilisant le flux produit par le mouvement du Mag- μ Bot [Pawashe 12]. La seconde est une manipulation par contact direct. Dans ce cas, le déplacement des micro-objets avant le contact avec la particule en raison de l'écoulement est important et doit être pris en compte.

Actionnement multiple : le système Mag- μ Bot offre également la possibilité de contrôler plusieurs microparticules. Deux méthodes sont utilisées. La première consiste à adapter la surface par des électrodes et à utiliser l'effet électrostatique pour maintenir tout les microparticules immobiles, sauf celle à déplacer [Floyd 09a, Diller 11b]. La seconde approche utilise des microparticules de tailles différentes. Dans ce cas, chaque microparticule est contrôlée avec un signal d'actionnement avec une fréquence spécifique [Diller 12].

6.2 OctoMag

L' OctoMag [Kummer 10] est un système de micromanipulation dédié à des applications médicales. Les déplacements doivent nécessairement s'effectuer dans tout l'espace et le milieu de travail est liquide.

6.2.1 Conception du système microrobotique

Plateforme d'actionnement : elle comporte 8 électro-aimants munis de noyaux en matériaux ferromagnétiques (Fig. 1.12). Les bobines utilisées supportent un courant de 15 A. La température dans des conditions typiques de fonctionnement est d'environ 60°. Un système de refroidissement des bobines est donc nécessaire. Par ailleurs, la disposition des bobines est conçue de façon à maximiser le gradient du champ magnétique produit dans l'espace de travail.



Figure 1.12 - Plateforme électromagnétique de l'OctoMag : 8 bobines à noyaux ferromagnétiques entourent l'espace de travail de la microparticule [Kummer 10].

Détection de la particule : pour observer la microparticule en 3D, deux caméras munies de zooms optiques sont disposées de façon à fournir une vue de dessus et une vue de face. Le traitement d'images consiste en un seuillage adaptatif et des opérateurs morphologiques (érosion et dilatation) pour plus de robustesse.

Fabrication de la particule : la microparticule de l'OctoMag est en nickel-cobalt avec une forme elliptique. C'est une structure tridimensionnelle obtenue par micro-assemblage de deux microparties indépendantes. Les pièces d'assemblage de la microparticule sont obtenues par électrodéposition de nickel-cobalt en utilisant un procédé de photolithographie et de découpe au laser [Yeşin 06] .

6.2.2 Contrôle du système

Le couple magnétique aligne l'axe le plus long du micro-objet magnétique avec le champ magnétique. Par conséquent, les rotations autour de cet axe ne sont pas possibles, ce qui réduit le nombre de DDLs contrôlables à 5 : 3 translations, produites par le gradient du champ magnétique, et 2 rotations, assurées par le champ magnétique.

Le champ magnétique produit par une bobine pour un courant en entrée est obtenu par une modélisation par éléments finis. Pour n électro-aimants, chaque électro-aimant e génère un champ magnétique \mathbf{B}_e en chaque point \mathbf{P} de l'espace. Les noyaux magnétiques des électro-aimants sont considérés idéaux. Le théorème de superposition des champs magnétiques est donc appliqué. Le champ généré par plusieurs bobines est ainsi la somme des champs magnétiques produits par chaque bobine :

$$\mathbf{B}(\mathbf{P}) = \sum_{e=1}^n \tilde{\mathbf{B}}_e(\mathbf{P}) i_e = B(\mathbf{P}) \mathbf{I} \quad (1.5)$$

avec $\tilde{\mathbf{B}}_e$ [T.A⁻¹] le vecteur du champ magnétique par unité de courant et i_e [A] la valeur scalaire unité du courant. \mathbf{I} est le vecteur des unités de courant i_e .

Dans ce travail l'orientation de la particule est considérée équivalente à l'orientation du champ magnétique dans le cas où son orientation est modifiée lentement. Le système est contrôlé par la force magnétique et le champ magnétique. La force dépend du gradient du champ selon l'équation 2.1. La plateforme d'actionnement est donc modélisée comme suit :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{F}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B(\mathbf{P}) \\ \mathbf{M}^T \mathbf{B}_x(\mathbf{P}) \\ \mathbf{M}^T \mathbf{B}_y(\mathbf{P}) \\ \mathbf{M}^T \mathbf{B}_z(\mathbf{P}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} = \mathcal{A}(\mathbf{M}, \mathbf{P}) \mathbf{I} \quad (1.6)$$

avec \mathbf{B}_* la dérivée du champ magnétique dans les directions $-x, y, z$ - en chaque point de l'espace de travail.

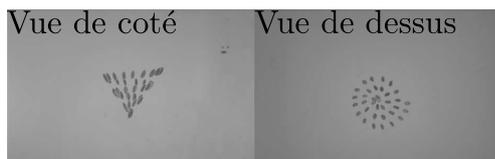
Le champ magnétique et la force magnétique sont proportionnels au courant électrique \mathbf{I} selon l'équation 1.6. Pour un champ magnétique et une force désirés, le courant est calculé pour chaque bobine en inversant le modèle de la plateforme magnétique de l'OctoMag :

$$\mathbf{I} = \mathcal{A}(\mathbf{M}, \mathbf{P})^+ \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{des} \\ \mathbf{F}_{des} \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

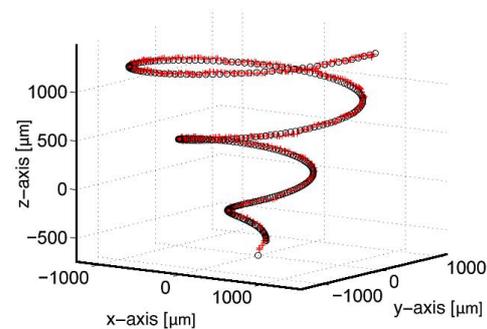
Une loi de commande robuste H_∞ est implémentée pour asservir la position de la particule [Marino 14].

6.2.3 Conclusion

Positionnement et suivi de trajectoire : l'OctoMag est conçu pour des déplacements en 3D, mais seulement 5 DDLs sont entièrement contrôlés. Pour évaluer la précision du positionnement de l'OctoMag, la microparticule est contrôlée d'une position de départ aléatoire dans l'espace de travail au centre de l'arène. Son positionnement a une déviation standard de $6.313 \mu\text{m}$, $4.757 \mu\text{m}$, et $8.951 \mu\text{m}$ respectivement le long des axes x, y, et z, et une déviation cartésienne maximum de $29.77 \mu\text{m}$. La figure 1.13 montre le suivi d'une trajectoire 3D en spirale. En raison de l'erreur de positionnement, la microparticule s'écarte de la trajectoire souhaitée dans certaines régions, mais cette erreur est corrigée et la particule poursuit la trajectoire.



(a) Suivi d'une trajectoire en spirale dans l'espace.



(b) Les positions de la particule (+) pendant le suivi de la trajectoire prédéfinie (o).

Figure 1.13 - Evaluation du contrôle de l'OctoMag : le temps d'exécution de cette trajectoire est de 8.3s en moyenne. La particule est orientée vers le centre de l'arène [Kummer 10].

Interaction *in vitro* : une application potentielle du système OctoMag est la réalisation *in vivo* d'opérations chirurgicales en ophtalmologie, comme la ponction des veines rétiniennes pour injecter un produit. Le système est testé *in vitro*. La microparticule est utilisée pour une ponction d'un vaisseau sanguin sur un embryon de poulet en croissance, qui est considéré comme un test valide pour les applications sur les vaisseaux de la rétine humaine. Pour cette expérience, une autre forme de microparticules est utilisée, composée de deux cubes NdFeB collés, de $800 \mu\text{m}$ de long, et d'une pointe d'aiguille [Kummer 10]. La taille totale de la particule est de plus de $1600 \mu\text{m}$ de longueur, le dispositif exerce alors la force requise pour la ponction de vaisseaux.

6.3 Contrôle de particules paramagnétiques

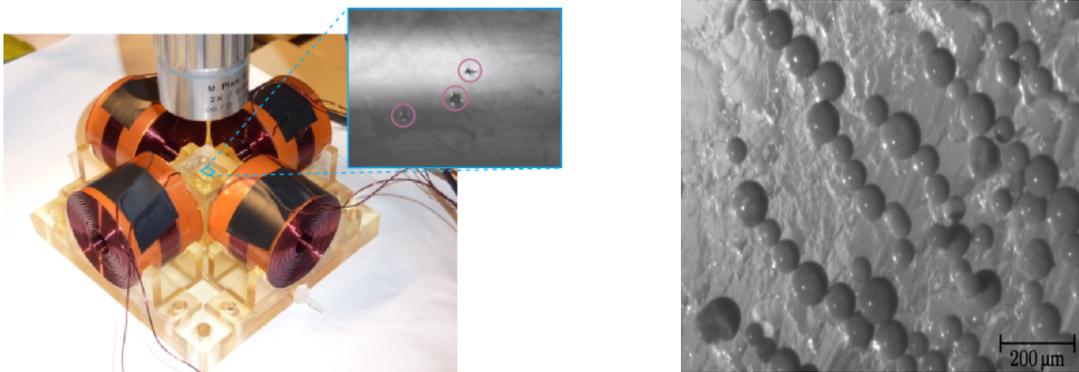
Un système de contrôle de particules paramagnétiques dans un milieu liquide est présenté dans [Keuning 11, Khalil 12]. Les particules sont composées d'un matériau parama-

gnétique. Elles présentent donc un comportement particulier : les forces magnétiques dans ce cas dépendent du carré du gradient du champ.

6.3.1 Conception du système microrobotique

Plateforme d'actionnement : la plateforme d'actionnement est composée de quatre électro-aimants identiques dans une configuration orthogonale. Pour une intensité de courant de 0,8 ampères, le gradient du champ au carré produit est de $1,8 \text{ mT}^2 \cdot \text{m}^{-1}$.

Les particules sont maintenues à l'interface air-eau. Cette configuration évite les forces d'adhésion de surface. Par ailleurs, le liquide contenu dans l'arène forme un ménisque au centre de l'arène. Pour réduire cette déformation du liquide, la taille de l'arène est augmentée et seulement une partie de l'arène est considérée comme l'espace de travail.



(a) Plateforme d'actionnement : quatre bobines entourent l'arène [Khalil 12].

(b) Image des particules paramagnétiques [Keuning 11].

Figure 1.14 - Conception du système de contrôle des particules paramagnétiques.

Détection de la particule : les particules sont observées par une caméra équipée d'un objectif de microscope, avec une période d'acquisition de 100 ms. Pour réduire le temps de calcul de la détection, l'algorithme de détection utilise une région d'intérêt, dont le centre est soit défini par l'utilisateur, soit considéré comme la dernière position de la particule. Afin d'éviter les perturbations d'éclairage, un seuillage adaptatif est appliqué sur la région d'intérêt. Ensuite, un filtre d'érosion est appliqué pour réduire le bruit sur l'image.

Cette méthode de détection manque de robustesse dans le cas de présence de plusieurs particules dans la zone d'intérêt. La solution utilisée est un test de taille pour vérifier que la particule détectée a une taille acceptable, sinon la particule est considérée comme perdue et l'expérience est arrêtée.

Fabrication de la particule : la particule est une sphère de $\sim 100 \mu\text{m}$ de diamètre en moyenne, en matériau paramagnétique (l'oxyde de fer). Ces particules sont standards

et disponibles sur le marché.

6.3.2 Contrôle du système

Les microsphères sont maintenues à l'interface air-eau. Il est alors possible de faire l'hypothèse que la seule force qui s'oppose au mouvement est la force de trainée. Cette dernière augmente avec la vitesse de la particule, dès lors la vitesse maximale de la particule est atteinte lorsque la force magnétique est égale à la force de trainée.

En pratique, l'environnement est soigneusement préparé pour éviter les perturbations. Pour améliorer l'asservissement en position, une loi de commande H_∞ est utilisée.

6.3.3 Conclusion

Positionnement et suivi de trajectoire : le contrôle en boucle fermée avec une loi de commande robuste H_∞ atteint la position de référence en 4 s avec une précision de $10 \mu\text{m}$ (Fig. 1.15).

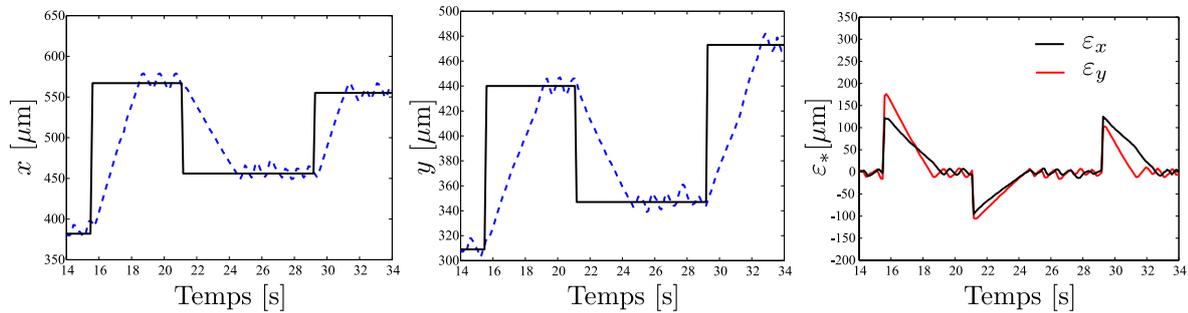


Figure 1.15 - Régulation de l'erreur de positionnement pour trois positions de référence. ε_x et ε_y sont, respectivement, les erreurs selon les axes e_x et e_y . La position de la particule converge en 4 s, l'erreur de positionnement est de $10 \mu\text{m}$ [Khalil 12].

Les particules contrôlées sont considérées maintenues à la frontière air-eau, en évitant ainsi la poussée d'archimède. En conséquence, les expériences doivent être soigneusement préparées, sinon le modèle proposé pour le système n'est plus valable.

6.4 MagMites (Magnetic Mite)

Le système MagMites est introduit par [Frutiger 10b, Frutiger 10c] et dans sa nouvelle version par [Tung 14]. Le système est conçu pour des déplacements dans le plan dans un milieu sec ou liquide.

La particule du système est un arrangement de deux masses reliées par un ressort (Fig. 1.16). Sous l'influence du champ magnétique, les masses se magnétisent. Les corps agissent comme deux aimants avec la même polarisation et créent ainsi une force d'attraction entre eux. L'attraction entre les deux masses comprime le ressort qui les relie. En l'absence de champ magnétique, la force d'attraction s'annule et la force de rappel du ressort déplace la particule. Les forces surfaciques ont un rôle important dans le déplacement de la particule. La maîtrise de ces forces est obtenue par une surface fonctionnalisée.

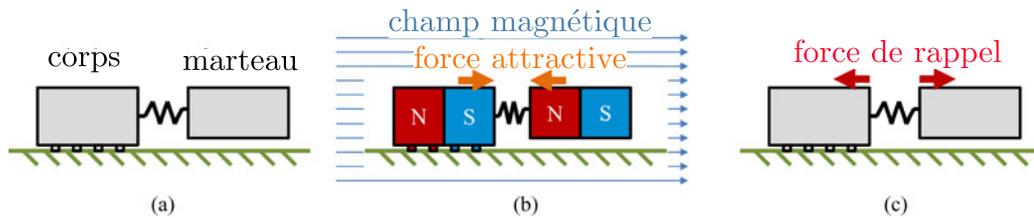
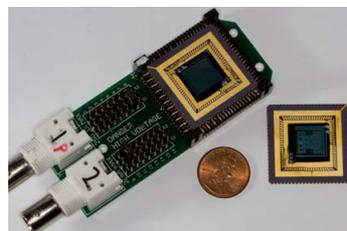


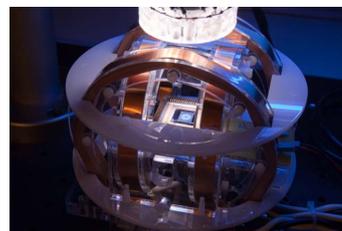
Figure 1.16 - (a) Modélisation de la particule en système masse-ressort (b) apparition de forces d'attraction en présence du champ magnétique (c) la particule se déplace à l'aide de la force de rappel du ressort et les frottements surfaciques.

6.4.1 Conception du système microrobotique

Plateforme d'actionnement : la plateforme d'actionnement comporte 4 bobines dans une configuration Helmholtz (Fig. 1.17(b)). Cette configuration produit un champ magnétique uniforme. La plateforme d'actionnement comporte aussi une surface incrustée d'électrodes pour générer un champ électrostatique. Pour réaliser cette surface (Fig. 1.17(a)), un wafer oxydé est couvert d'un film aluminium, de $1 \mu\text{m}$ d'épaisseur, gravé pour former des électrodes. Les électrodes ont une longueur de $15 \mu\text{m}$ et sont espacées de $3 \mu\text{m}$.



(a) L'espace de travail du Mag-Mites [Frutiger 10a].

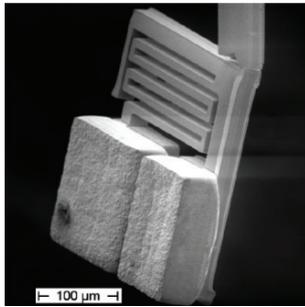


(b) Dispositif des bobines en configuration d'Helmholtz [Frutiger 10c].

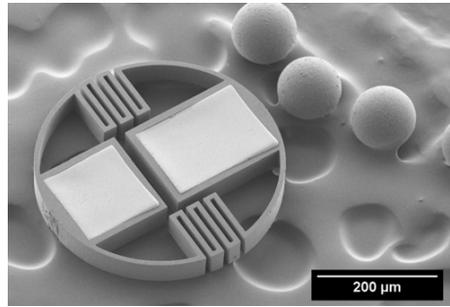
Figure 1.17 - Actionnement électrostatique produit par une surface incrustée d'électrodes (a) actionnement magnétique est assuré par deux paires de bobines d'Helmholtz (b).

Détection de la particule : pour détecter la position de la particule, une caméra munie d'un objectif est placée en haut de l'espace de travail. L'algorithme de détection repose sur la soustraction de l'arrière plan de la particule et sur la segmentation automatique d'images selon un motif rectangulaire [Frutiger 10c].

Fabrication de la particule : la particule MagMites comporte deux masses en nickel reliées par un ressort en or (Fig. 1.18(a)), ou par un ressort en polymère (Fig. 1.18(b)). L'avantage d'utiliser un ressort en polymère est la réduction considérable des coûts de fabrication. Par ailleurs, l'amélioration des particules inclut des appuis ponctuels qui permettent au système de s'affranchir des surfaces à actionnement électrostatique. La fabrication de la particule utilise des techniques de photolithographie, de gravure ionique et d'électrodéposition de CoNi (cobalt-nickel).



(a) Image d'une particule à ressort en or [Vollmers 08].



(b) Image d'une particule à ressort en polymère [Tung 14].

Figure 1.18 - Particules du MagMites : les ressorts en or (a) sont remplacés par des ressorts en polymère (b), réduisant ainsi le coût de production. Les images des microparticules sont obtenues avec un microscope à balayage électronique.

6.4.2 Contrôle du système

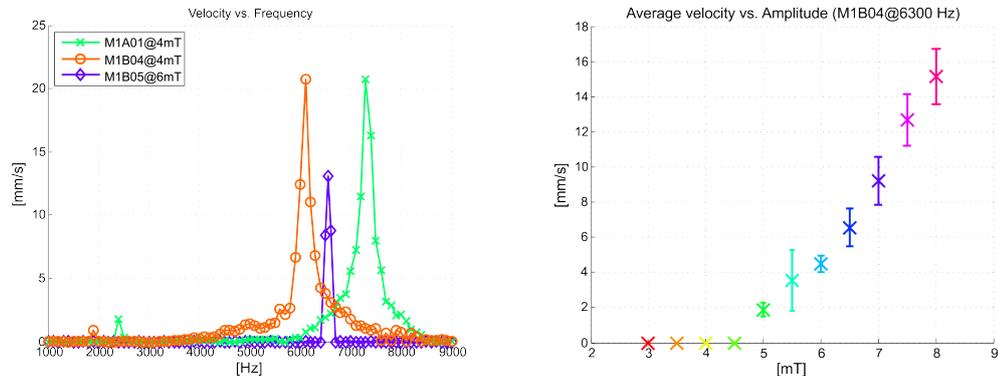
Le champ magnétique est produit par des bobines en configuration de Helmholtz. Le champ magnétique produit est donc uniforme dans l'espace de travail et dépend du courant en entrée I , du rayon des bobines R et du nombre des spires n des bobines et s'exprime par :

$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{3/2} \frac{\mu_0 n I}{R}$$

μ_0 est la perméabilité magnétique du vide.

Le courant électrique est un signal carré à la fréquence de résonance de la particule. La fréquence de résonance est prédite par la simulation en éléments finis et confirmée par l'expérience. La figure 1.19(a) montre la mesure de la fréquence de résonance pour trois modèles de particules évoluant dans l'air sur une surface en silicium sur laquelle une

couche en titane est pulvérisée. Par ailleurs, la vitesse de la particule à la fréquence de résonance est proportionnelle à l'amplitude du champ magnétique (Fig. 1.19(b)).



(a) Détermination expérimentale de la fréquence de résonance.

(b) Variation de la vitesse en fonction de l'amplitude du champ magnétique.

Figure 1.19 - Caractérisation du comportement de la particule : validation de sa fréquence de résonance (a) et évolution de la vitesse de la particule en fonction de l'amplitude du champ magnétique (b) [Tung 14].

En conséquence, il est possible de connaître la vitesse de la particule pour un courant donné en entrée du système. La commande du système MagMites est effectuée en boucle fermée avec un correcteur PID.

6.4.3 Conclusion

Positionnement et suivi de trajectoire : le système MagMites est capable de se déplacer dans un milieu sec ou liquide. La commande du système s'effectue en boucle ouverte. Cependant, le déplacement de la particule montre des déviations qui peuvent atteindre 0.2 mm par rapport à la trajectoire désirée (Fig. 1.20). La vitesse de la particule dans l'air atteint 20 mm/s (soit 40 fois sa taille par seconde) sur une surface en silicium avec une couche supérieure en titane.

Interaction avec des micro-objets : le système MagMites montre des résultats prometteurs pour le transport d'objets en milieu liquide. La manipulation de microbilles en verre de diamètre de 60 μm est effectuée par un contact direct. Le contact est rompu par adhésion lorsque la bille est mise en contact avec une autre surface à sa destination finale.

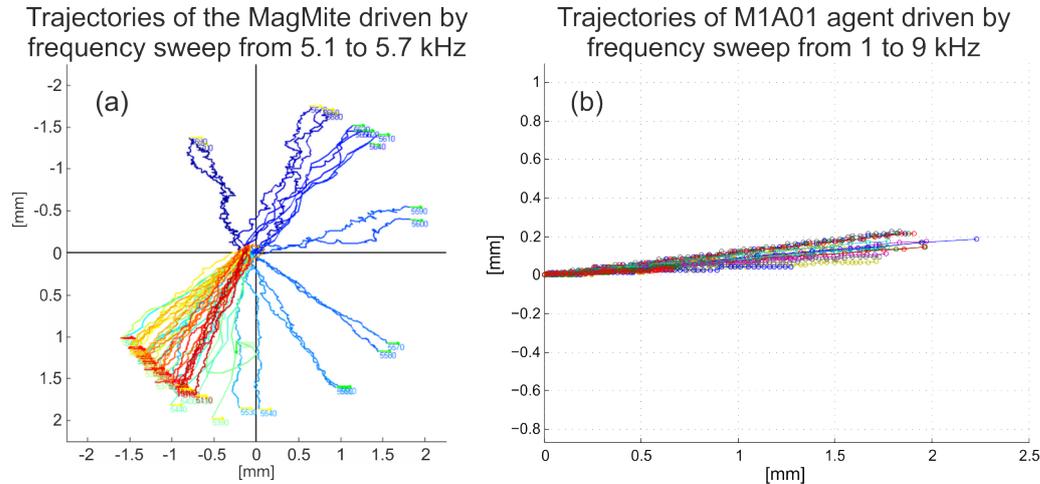


Figure 1.20 - Exemple de trajectoires de la particule. La particule est dirigée selon l'axe x pour différentes fréquences du champ magnétique, de 5.1 à 5.7 KHz pour (a) et de 1 à 9 KHz pour (b). La fréquence de résonance de la particule est autour de 6 KHz [Tung 14].

6.5 Comparaison et conclusion

Les systèmes microrobotiques magnétiques abordés dans ce travail sont tous composés de trois parties distinctes : la particule (effecteur micrométrique), la plateforme d'actionnement magnétique (assemblage d'électro-aimants) et le dispositif de détection (retour visuel par caméra). En plus de ces trois parties, un contrôleur est intégré dans les systèmes pour asservir l'effecteur magnétique. Cependant, les choix dans la conception et la réalisation de ces différentes composantes sont soumis à des compromis en fonction des objectifs du système, notamment :

- la force produite,
- le nombre de degrés de liberté et de l'environnement de travail,
- la vitesse et la précision du système.

Dans la suite, les choix de conception, résumés dans le tableau 1.2, et leurs impacts sont abordés pour chaque partie des systèmes microrobotiques présentés. La détection, qui est commune à tous les systèmes abordés, n'est pas détaillée.

Les particules déplacées doivent avoir des propriétés magnétiques. Les matériaux ferromagnétiques sont privilégiés en raison de leur aimantation interne élevée et de leur utilisation courante dans les techniques de microfabrication [Kummer 10, Diller 13, Tung 14]. Les matériaux paramagnétiques peuvent également être considérés [Khalil 12]. Ces matériaux produisent des forces répulsives sous l'influence du champ magnétique, ce qui simplifie le contrôle de la particule en créant des points d'équilibre stables. En revanche, l'aimantation interne des matériaux paramagnétiques est faible en comparaison à celle des matériaux ferromagnétiques. Ceci induit des forces moins importantes.

Les particules de taille micrométrique sont réalisées par des techniques d'électrodépositions de matériaux pour la plupart des systèmes microrobotiques [Kummer 10, Tung 14]. L'électrodéposition combinée aux procédés de micromoulages donne des particules de géométries différentes [Tung 14]. Les dimensions des particules obtenues par ces procédés sont contrôlées avec une grande précision. Les techniques d'usinage classiques comme la découpe à la scie ou au laser peuvent également être utilisées. Elles ont l'avantage d'être peu coûteuses mais les dimensions des particules sont moins précises. Elles sont adaptées pour l'usinage des particules à base d'aimants permanents car elles conservent l'aimantation interne des matériaux contrairement aux techniques de dépôt de matériaux. L'électrodéposition nécessite l'application d'un champ magnétique important (de l'ordre du Tesla en fonction du matériau) pour orienter les domaines magnétiques à l'intérieur de l'aimant permanent.

Le déplacement de la particule est obtenu par le champ magnétique et/ou le gradient du champ magnétique. L'orientation de la particule est produite uniquement par le champ magnétique [Kummer 10, Diller 13, Tung 14]. Pour assurer une translation en 3D ou 2D dans un liquide, l'attraction ou la répulsion de la particule par la force magnétique peut être utilisée dans un actionnement de type push/pull [Kummer 10, Khalil 12]. Dans le cas de déplacements sur une surface, des stratégies comme le stick-slip [Pawashe 09] ou la résonance d'un système mécanique [Tung 14] peuvent être utilisées dans un environnement sec ou liquide. Cependant, ces stratégies réduisent la vitesse de la particule.

L'environnement de travail influence la vitesse et le contrôle de la particule. Dans un environnement sec, la microparticule peut atteindre des vitesses importantes (20 mm/s) [Tung 14], alors que dans un milieu liquide sa vitesse est limitée par les forces de traînée du liquide. La vitesse des particules dans un milieu liquide peut atteindre 556 mm/s [Salmon 13] en utilisant des rotations successives de la particule à l'interface air-liquide. La viscosité du liquide stabilise la commande de la particule en ajoutant de l'amortissement. La plupart des systèmes microrobotiques magnétiques sont donc commandés dans le milieu liquide [Kummer 10, Khalil 12, Diller 13].

Par ailleurs les plateformes d'actionnement magnétique de ces systèmes respectent la même configuration : quatre bobines orthogonales dans le plan pour produire un mouvement en 2D, des bobines en dehors du plan peuvent être ajoutées pour augmenter le nombre de DDLs ou bien pour produire un mouvement dans le plan par une combinaison de rotations. Les plateformes magnétiques produisent en moyenne un champ magnétique d'environ 10 mT d'intensité. Certains systèmes ont recours à des noyaux ferromagnétiques pour accroître le champ magnétique. Cependant l'hystérésis engendré par ces noyaux ferromagnétiques augmentent les non-linéarités. Les plateformes magnétiques sont contraintes par le réchauffement des bobines pour produire d'importants gradients de champ, ce qui limite le courant admissible ou nécessite un système de refroidissement.

L'identification de la dynamique du champ magnétique et de la microparticule, établie expérimentalement, ne reflète pas exactement le comportement de la microparticule et ne considèrent pas les non-linéarités de l'échelle. Les systèmes nécessitent une loi de com-

mande en boucle fermée, généralement de type PID, pour obtenir un contrôle précis des microparticules malgré les erreurs de modélisation.

Les caractéristiques des systèmes microrobotiques magnétiques présentées précédemment sont résumées dans le tableau 1.2. Les systèmes présentés montrent des résultats prometteurs en termes de positionnement et de suivi de trajectoires dans le milieu liquide, avec une précision de 10% de la taille de la particule [Khalil 12]. À partir de ce contrôle de trajectoire, plusieurs techniques de manipulation d'objets sont envisageables. La manipulation d'objets micrométriques s'effectue uniquement dans le milieu liquide en contact direct avec l'objet manipulé [Tung 14] ou en profitant de la dynamique du liquide pour pousser l'objet [Pawashe 12]. Le système microrobotique peut être doté de plusieurs effecteurs afin de réaliser des tâches plus complexes [Diller 11b, Diller 12].

Les travaux présentés et cités dans ce travail ont donné lieu à des évolutions par la suite, telles les pinces magnétiques [Diller 14] etc., qui ne sont pas abordées dans ce travail. L'intérêt de notre analyse est porté sur les principaux travaux fondateurs qui abordent la conception et la réalisation des systèmes microrobotiques sans fils à actionnement magnétique.

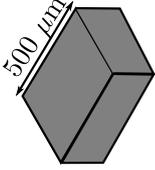
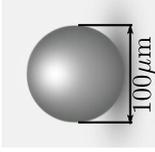
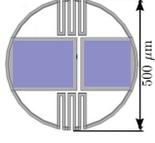
Système	Mag- μ Bot	OctoMag	Sphère paramagnétique	Magmites
Microparticule				
Matériau	neodyme-fer-bore	nickel	oxyde de fer	cobalt-nickel
Propriété magnétique	ferromagnétique dur	ferromagnétique doux	paramagnétique	ferromagnétique doux
Mouvement	stick-slip/push-pull	push-pull	push-pull	masse-ressort en résonance
Environnement	liquide/air	liquide	liquide	liquide/air
DDLs contrôlables	3/5	5	2	3
Nombre de bobines	6/3	8	4	4
Noyau des bobines	sans	alliage ferromagnétique	sans	sans
$\ B\ $ [mT]	15/8.3	20	6	8
Forme du signal	périodique/continu	continu	continu	périodique
Vitesse dans le liquide [mm.s ⁻¹]	4	1.9	0.300	–
Vitesse dans l'air [mm.s ⁻¹]	10	–	–	20
Modèle $B=f(I,P)$	analytique	éléments finis	éléments finis	uniforme
Loi de commande	PID	PID/ H_∞	PID/ H_∞	PID
	[Pawashe 09, Diller 12, Diller 13]	[Kummer 10]	[Keuning 11, Khalil 12]	[Frutiger 10c, Tung 14]

Tableau 1.2 - Récapitulatif des systèmes microrobotiques magnétiques abordés.

7 Objectif et approche retenue

Les systèmes microrobotiques magnétiques existants sont principalement dédiés à la manipulation dans le liquide. Ils ont montré des résultats prometteurs pour le positionnement précis de micro-objets et le suivi de trajectoires [Kummer 10, Pawashe 12] ainsi que pour l'actionnement simultané de plusieurs particules [Diller 12]. Ces systèmes bénéficient de la viscosité de ce milieu pour stabiliser le contrôle de la particule. Pour augmenter leur robustesse, des lois de commande complexes telle la loi H_∞ sont implémentées [Khalil 12]. Cependant, ces systèmes sont limités en vitesse en raison de la force de la viscosité du milieu liquide qui induit une force de traînée importante.

L'objectif de cette thèse est de réaliser un système microrobotique pouvant induire des déplacements rapides et précis. L'ensemble du système est reconçu et un des choix majeurs est de travailler en environnement sec pour s'affranchir des forces de traînée.

Les actionneurs magnétiques et l'effecteur sont conçus de façon à maximiser la force magnétique dans l'espace de travail et donc de produire une grande dynamique :

- les géométries et la disposition des bobines sont étudiées dans la conception de la plateforme d'actionnement,
- le choix du matériau de l'effecteur est réalisé pour répondre aux exigences de microfabrication tout en produisant une force magnétique importante,
- le signal en entrée des bobines est une impulsion afin de fournir un champ magnétique important sans endommager les bobines par leur échauffement excessif.

Le milieu ambiant choisi induit des contraintes spécifiques liées aux forces d'adhésion entre l'effecteur et le substrat. Ces forces d'adhésion rendent difficile l'actionnement de la particule par le champ magnétique. Les premières expériences montrent que l'actionnement et le déplacement de la particule ne sont pas répétables. Trois solutions sont proposées et évaluées pour augmenter la répétabilité de l'actionnement magnétique :

- la force d'actionnement est augmentée en introduisant une seconde source d'actionnement,
- les forces surfaciques sont réduites par des techniques de microfabrication,
- l'adhésion surfacique est surmontée en utilisant des efforts en torsion. L'actionnement dans ce cas repose sur la maximisation du moment magnétique produit.

Enfin pour assurer des déplacements à haute précision, un système de contrôle est implémenté, prenant en compte deux variables de commande : l'intensité du courant alimentant les bobines et sa durée. L'approche suivante est adoptée pour synthétiser la loi de commande sans connaissance de modèle :

- le champ et le gradient du champ magnétique sont identifiés en fonction du courant en entrée,
- la linéarité du déplacement de la particule est validée par rapport à ces deux entrées,
- un correcteur proportionnel intégral est implémenté pour augmenter la précision du déplacement.

Dans la suite du document, la conception du système microrobotique magnétique est abordée dans le chapitre 2. Les solutions pour assurer un actionnement répétable de la microparticule sont mises en œuvre et évaluées dans le chapitre 3. Enfin, le chapitre 4 aborde l'identification du système et sa commande en boucle fermée pour un positionnement précis de la particule.

Système microrobotique magnétique

Dans le chapitre précédent, différents systèmes microrobotiques magnétiques sont présentés. Des performances intéressantes sont atteintes, notamment pour le contrôle simultané de plusieurs particules ou le suivi de trajectoires 3D. Cependant la plupart de ces systèmes sont limités en vitesse. Pour aller au delà de l'état de l'art, il est nécessaire de reconcevoir complètement l'ensemble du système microrobotique. Comme décrit dans le chapitre 1, le système microrobotique magnétique comporte une plateforme d'actionnement, une particule micrométrique et un dispositif de détection de la particule (Fig. 2.1).

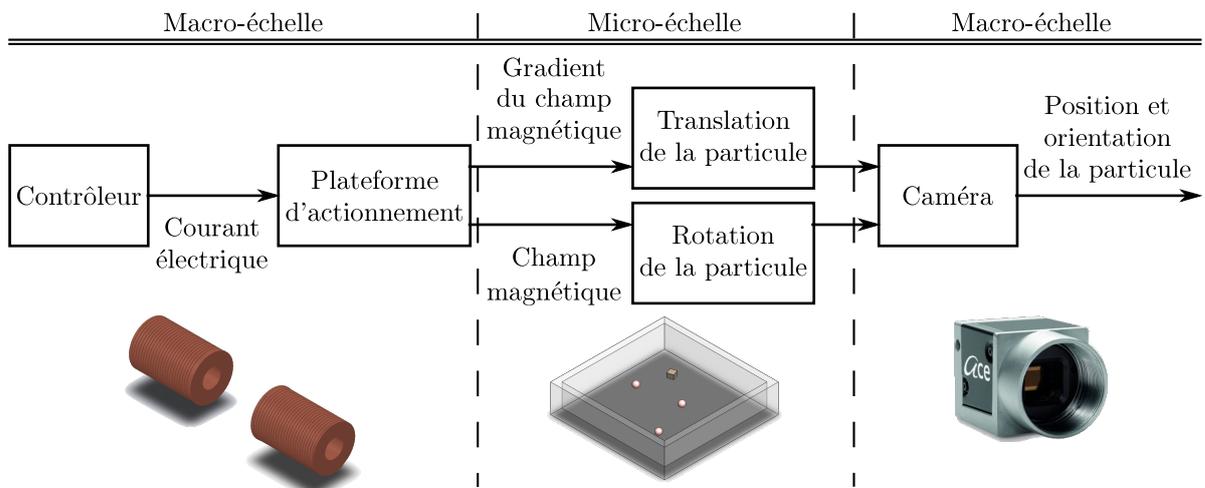


Figure 2.1 - Principe de fonctionnement du système microrobotique magnétique : la microparticule est actionnée à distance par des électro-aimants, sa position est détectée par un retour visuel.

Ce chapitre est dédié à la conception d'une plateforme d'actionnement pour produire des déplacements à haute vitesse. Pour atteindre cet objectif la particule micrométrique sera placée en milieu ambiant et non pas en milieu liquide comme pour la plupart des systèmes existants. La faible viscosité de cet environnement est exploitée pour obtenir des déplacements avec des dynamiques élevées. Chaque partie du système est étudiée, de la plateforme d'actionnement à la microparticule. La géométrie, les dimensions et la disposition des bobines produisant le champ magnétique sont considérées pour augmenter la vitesse de déplacement de la microparticule. De la même façon, le matériau intrinsèque de la particule est étudié pour maximiser l'influence du champ magnétique. La détection de la particule est simplifiée pour consommer un temps de calcul court pour atteindre des dynamiques de boucle de commande rapide.

La première partie étudie la conception du micro-effecteur, et la seconde partie traite de la conception et de la caractérisation de la plateforme d'actionnement. L'intégration des différentes parties du système est ensuite discutée. La dernière partie analyse les premiers résultats de déplacements de la particule magnétique.

1 Conception du micro-effecteur

1.1 Actionnement du micro-effecteur à haute vitesse

L'actionnement de la particule est effectué à distance par le champ magnétique. La force magnétique, produite par le gradient du champ magnétique $\nabla\mathbf{B}$, engendre des translations de la particule. Le moment magnétique, produit par le champ magnétique \mathbf{B} , contribue à orienter la particule. Les expressions de la force et du moment magnétiques, détaillées dans la section 2.2 du chapitre 1, s'écrivent :

$$\mathbf{F}_m = V(\mathbf{M} \cdot \nabla)\mathbf{B} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{T}_m = V\mathbf{M} \times \mathbf{B} \quad (2.2)$$

avec \mathbf{P} la position de la particule dans l'espace de travail $\mathbf{P} = x\mathbf{e}_x + y\mathbf{e}_y + z\mathbf{e}_z$, tels que \mathbf{e}_x , \mathbf{e}_y et \mathbf{e}_z sont les vecteurs unitaires. V et \mathbf{M} sont, respectivement, le volume et l'aimantation interne de la particule.

A l'échelle micrométrique les forces surfaciques sont prédominantes (Sect. 2.3 Chap. 1), en particulier dans le milieu ambiant. La force et le moment magnétiques doivent donc être importants pour vaincre l'adhésion avec la surface. La force magnétique est proportionnelle à la magnétisation interne de la particule et au gradient du champ magnétique. En conséquence, pour augmenter la force magnétique, et ainsi actionner la particule à haute vitesse, il faut choisir une aimantation interne élevée.

1.2 Fabrication du micro-effecteur

Pour augmenter la vitesse de la particule, il faut maximiser la magnétisation interne de l'effecteur. Le choix du matériau est alors crucial puisque la magnétisation interne joue un rôle clef dans les efforts appliqués sur la particule. Les matériaux magnétiques sont abordés dans la section 3.1 du chapitre 1. Le choix du matériau est adressé dans cette partie.

Le tableau 2.1 présente les ordres de grandeurs d'aimantation interne pour quelques uns des matériaux magnétiques classiques.

Matériau	Magnétisation interne [kA/m]
Paramagnétique	$\sim 5 \times 10^{-5}$
Diamagnétique	$\sim -40 \times 10^{-5}$
Ferromagnétique	100-10000

Tableau 2.1 - Exemples de valeurs de magnétisation en fonction des matériaux [Cullity 08].

Les matériaux paramagnétiques ou diamagnétiques exhibent de faibles magnétisations internes. En revanche, les matériaux ferromagnétiques sont fortement sensibles au champ magnétique. C'est le cas en particulier du fer, du nickel et du cobalt. Ces matériaux ferromagnétiques se divisent en matériaux magnétiques durs et doux. Les premiers, appelés aimants permanents, gardent une magnétisation interne en l'absence du champ magnétique. Les seconds présentent une magnétisation interne seulement en présence du champ magnétique et leur aimantation interne varie en fonction du champ magnétique auquel ils sont soumis. Cependant, pour de faibles variations du champ magnétique (de l'ordre du mT dans ce travail), la magnétisation interne d'un matériau ferromagnétique doux est considérée constante.

Le matériau choisi doit également répondre aux contraintes de microfabrication puisque les particules devront être de taille micrométrique. Les procédés classiques consistent en des dépôts de matériaux. Le nickel est un bon candidat à la microfabrication puisqu'il est facile à électro-déposer.

Pour répondre à la double exigence de magnétisation forte et de contrainte technologique le micro-effecteur sera donc réalisé en nickel.

Le micro-effecteur doit avoir une taille supérieure aux dimensions des objets à manipuler. Afin d'agir sur des objets dont la taille varie d'une dizaine à une centaine de micromètres les longueurs et largeurs des particules utilisées sont fixées à 200-600 μm selon le modèle de la particule. La figure 2.2 montre quelques exemples de micro-effecteurs. Pour fabriquer une particule dans ces dimensions, des procédés chimiques sont utilisés en salle blanche. Le processus de fabrication consiste à électro-déposer une couche de nickel

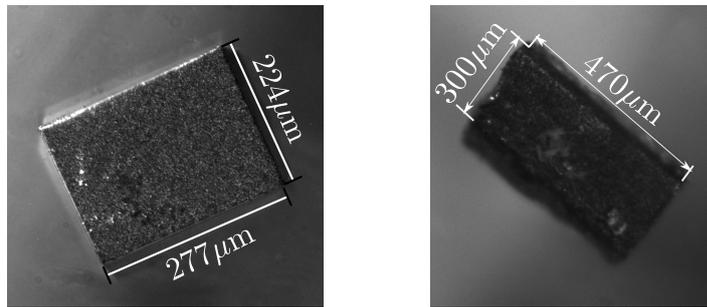


Figure 2.2 - Microparticules utilisées en nickel, de forme rectangulaire et de différentes tailles.

sur un support sacrificiel. Pour que l'électrolyse soit réalisée, la présence d'une surface conductrice est nécessaire. Comme le support utilisé n'est pas conducteur, une mince couche conductrice (Cr-Cu) est pulvérisée sur le substrat en céramique.

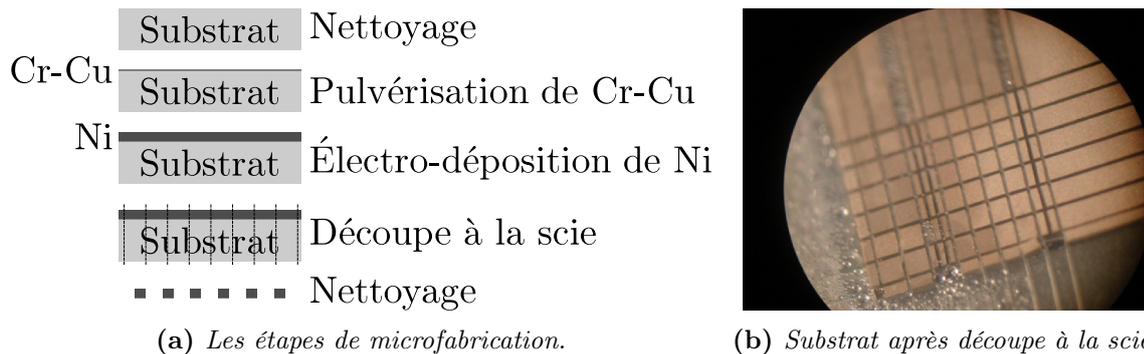


Figure 2.3 - Étapes de microfabrication : après nettoyage du substrat sacrificiel, un film Cr-Cu est pulvérisé. Une couche Ni est déposée ensuite par électrolyse. Enfin, le substrat sacrificiel est découpé à l'aide d'une scie à lame micrométrique. Les particules de nickel se séparent du substrat par contraintes mécaniques.

Les étapes de la microfabrication sont représentées par la figure 2.3 et se décomposent de la façon suivante :

- Nettoyage du substrat sacrificiel à l'acétone ensuite à l'éthanol,
- Pulvérisation d'une couche Cu-Cr : le procédé de pulvérisation cathodique dépose des atomes éjectés d'une cible sur un substrat. Les cibles sont des matériaux solides (de cuivre puis de chrome dans ce cas) qui sont bombardées par des particules énergétiques. Cette méthode est couramment utilisée dans le dépôt de couches nanométriques. Une couche de cuivre, de ~ 400 nm d'épaisseur, et une couche de chrome, de ~ 50 nm d'épaisseur, sont pulvérisées sur l'une des faces du substrat,
- Électro-déposition de la couche Ni : le substrat est placé dans un bassin contenant le sel de métal en solution. Sa face conductrice est reliée au pôle négatif d'une source électrique, tandis que l'autre pôle est relié à une électrode contenant le nickel. Sous

l'action du courant électrique, les ions nickel sont déposés sur le substrat et forment un film métallique. Il est possible d'évaluer l'épaisseur de la couche de Ni déposée, sachant la vitesse de dépôt et la durée du process. Une couche de $20\ \mu\text{m}$ est déposée sur le substrat,

- Découpe du substrat : le substrat est découpé dans les géométries et dimensions souhaitées des microparticules en utilisant une scie à lame micrométrique ($50\ \mu\text{m}$). Le nickel se sépare du substrat sacrificiel au moment de la découpe ;
- Nettoyage des microparticules obtenues à l'acétone puis à l'éthanol.

Les particules sont obtenues par électro-déposition. Or, cette méthode ne permet pas de contrôler a priori le profil de la surface produite. Le substrat obtenu après l'électro-déposition du nickel est donc analysé au profilomètre. Le nickel se dépose plus sur les bords du substrat. En conséquence, les particules situées en périphérie du substrat ne sont pas utilisables. Cependant, au centre du substrat l'épaisseur obtenue est relativement uniforme (Fig. 2.4). Cette partie, une fois découpée, donne des micro particules magnétiques ayant une magnétisation importante.

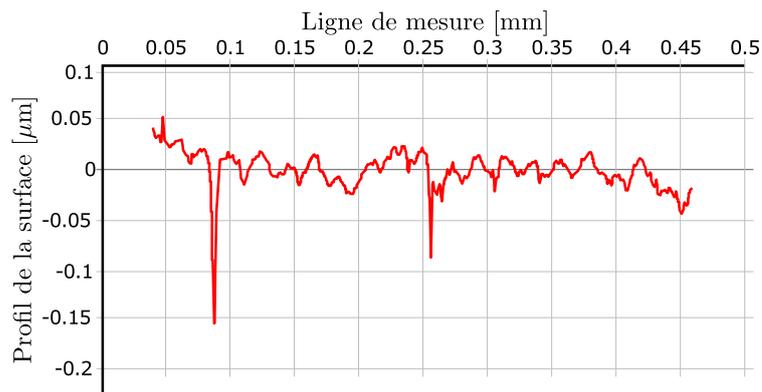


Figure 2.4 - Profil du wafer : mesure au centre du wafer, l'épaisseur du nickel déposé est uniforme.

2 Plateforme d'actionnement magnétique

2.1 Conception de la plateforme

La conception du système microrobotique doit répondre à deux critères : l'augmentation de la vitesse du système magnétique et la précision du contrôle de ses déplacements. Il faut donc une plateforme d'actionnement qui engendre un champ magnétique important de façon contrôlable.

2.1.1 Nombre et disposition des bobines

Pour assurer des déplacements dans le plan (2 translations et une rotation), trois bobines sont suffisantes. Elles produisent cependant des déplacements corrélés dans les directions du plan et la contrôlabilité de la particule devient complexe. Pour simplifier le contrôle, quatre bobines sont disposées dans une configuration orthogonale dans le même plan que la particule. Une bobine produit une translation dans sa direction, il faut donc deux bobines coaxiales pour obtenir 1 degré de liberté contrôlable en translation. La combinaison des champs magnétiques générés par deux bobines perpendiculaires oriente la particule dans les directions du plan. L'espace de travail de la microparticule est au centre des quatre bobines comme le montre la figure 2.5.

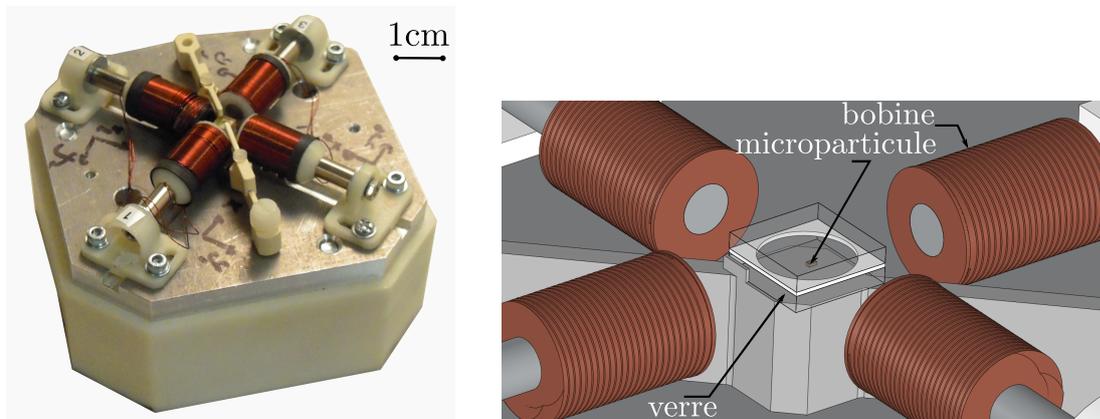


Figure 2.5 - *Plateforme magnétique : pour produire 3 degrés de liberté, quatre bobines orthogonales sont utilisées. Deux bobines coaxiales produisent une translation de la particule et deux bobines perpendiculaires orientent la particule dans le plan.*

Par ailleurs, chaque bobine e ($e=0, 1, 2, 3$) est parcourue indépendamment par un courant électrique i_e . Le champ magnétique dépend du courant envoyé à la bobine et de la géométrie de la bobine (nombre de tours du bobinage, longueur de la bobine). Par ailleurs, le champ magnétique et le gradient du champ magnétique diminuent rapidement en s'éloignant des bobines. Pour limiter la diminution du champ magnétique, et ainsi augmenter la vitesse de déplacements de la particule, les bobines sont rapprochées le plus possible de son espace de travail.

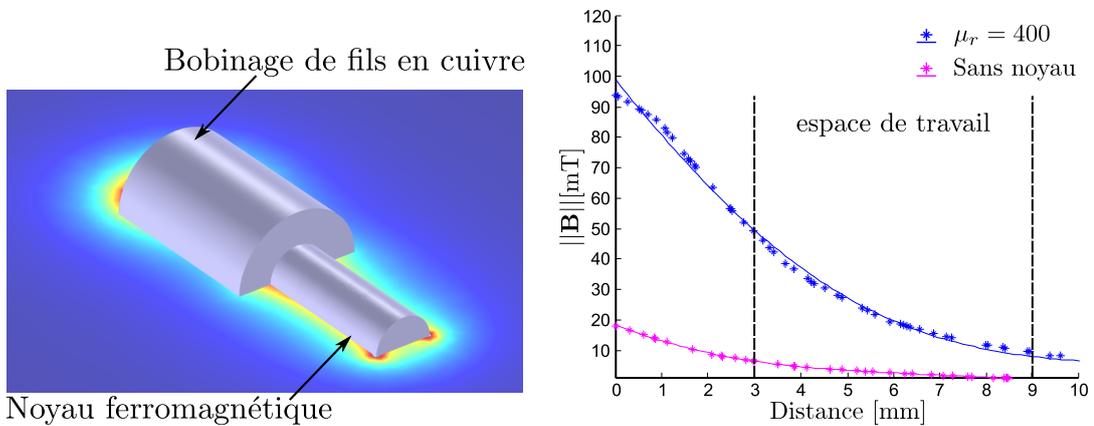
2.1.2 Choix des bobines

Pour augmenter le champ, une première solution consiste à augmenter la taille et le bobinage des électro-aimants ainsi que le courant électrique. Les bobines deviennent alors encombrantes et la consommation électrique est trop importante. Une solution originale est choisie dans cette thèse. Elle consiste à utiliser des bobines de taille réduite auxquelles

des noyaux ferromagnétiques sont ajoutés. En effet, l'addition d'un noyau ferromagnétique produit un champ magnétique qui multiplie le champ d'excitation magnétique \mathbf{H} , dû au courant électrique à l'intérieur de la bobine, par la perméabilité magnétique relative du noyau (μ_r) et la perméabilité magnétique dans le vide ($\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ T.m/A) :

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$$

La perméabilité relative μ_r dépend du matériau du noyau et varie en fonction de l'excitation magnétique à laquelle il est soumis. L'addition d'un noyau ferromagnétique augmente le champ magnétique au voisinage de la bobine mais décroît rapidement en traversant l'air. La figure 2.6(b) montre que le champ magnétique à l'extérieur de la bobine engendré par une bobine munie d'un noyau ferromagnétique est jusqu'à 7 fois plus important que celui produit par une bobine sans noyau ferromagnétique.



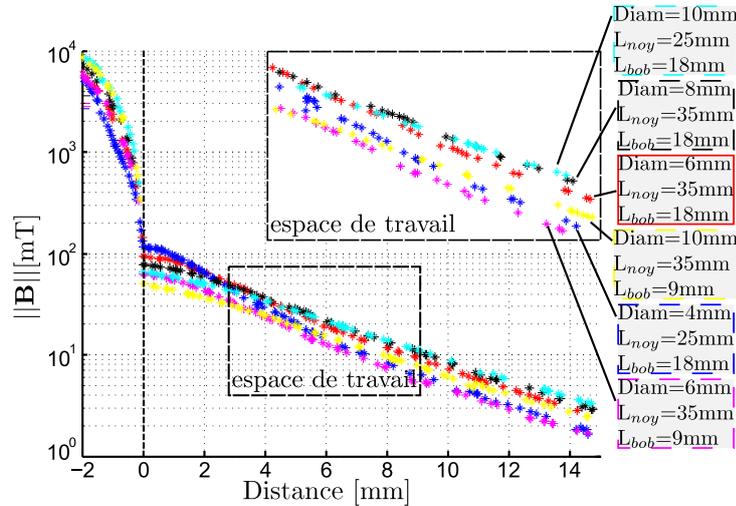
(a) Simulation du champ magnétique par la méthode d'éléments finis.

(b) Le champ magnétique en fonction de la distance à la bobine le long de son axe.

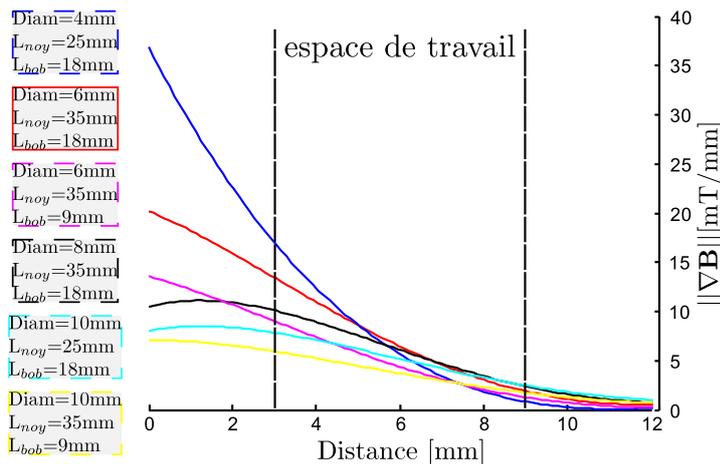
Figure 2.6 - Étude de l'ajout d'un noyau ferromagnétique. Le noyau augmente le champ magnétique produit. La simulation du champ magnétique est réalisée par une modélisation en éléments finis avec le logiciel COMSOLTM, représentée dans (a). Le champ magnétique produit par bobine avec un noyau ferromagnétique $\mu_r = 400$, montré dans (b), produit un champ magnétique plus important qu'une bobine identique mais ne possédant pas de noyau. Les valeurs, représentées par une étoile '*', sont les valeurs obtenues par la simulation, tandis que la ligne continue est l'interpolation des valeurs simulées. Les longueurs et le diamètre du noyau sont, respectivement, de 35 mm et de 6 mm, la longueur du bobinage est de 18 mm. La largeur de la couche du fil en cuivre est de 3.7 mm. La simulation est obtenue pour une densité de courant de 9.45 A/m².

Pour déterminer les dimensions des bobines, le champ et le gradient de champ magnétiques sont simulés par la méthode des éléments finis pour différents modèles de bobines. Les paramètres de la simulation sont la longueur de bobinage en fil de cuivre, la longueur et le diamètre du noyau.

La figure 2.7(a) montre les résultats pour certaines bobines modélisées. Les bobines avec un diamètre de noyau supérieur à 8 mm produisent d'importants champs magnétiques



(a) Simulation du champ magnétique produit par des bobines avec différentes dimensions.



(b) Le gradient du champ magnétique obtenu pour les différentes bobines simulées.

Figure 2.7 - Choix des dimensions des bobines : la bobine choisie, en rouge, produit le champ magnétique et le gradient de champ magnétique les plus importants parmi les bobines simulées, dans l'espace de travail. Le champ magnétique, représenté dans (a), et le gradient du champ magnétique, représenté dans (b), sont simulés sur l'axe de la bobine.

mais de faibles gradients. La bobine choisie est celle qui induit en même temps un champ et un gradient de champ magnétiques importants (Fig. 2.7(b)). Ses caractéristiques sont : le diamètre du noyau ferromagnétique est de 6 mm, sa longueur est de 35 mm tandis que la longueur du bobinage vaut 18 mm.

2.1.3 Conclusion

L'objectif est de concevoir une plateforme pour produire un champ magnétique et un gradient de champ magnétique importants. La taille des bobines est réduite grâce à l'ajout de noyaux ferromagnétiques. Toutefois, l'addition de noyaux ferromagnétiques augmente la non-linéarité du champ magnétique. Afin de limiter ces non-linéarités, des noyaux en alliage de fer sont utilisés. En effet, théoriquement, un noyau en alliage de fer a une faible coercitivité. Cette propriété augmente le champ magnétique sans les effets de non-linéarités qui se manifestent par l'hystérésis.

Dans la conception des actionneurs magnétique, un des problèmes majeurs est l'échauffement des bobines par effet Joule. Afin de limiter la surchauffe, un signal d'entrée en impulsion (de largeur $-h_e$ [ms] et d'intensité i_e [A]) est utilisé (Fig. 2.8).

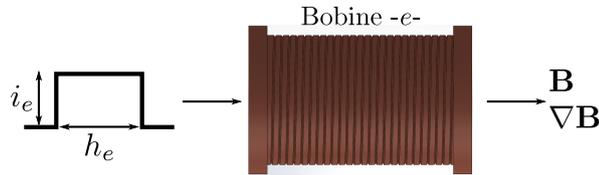


Figure 2.8 - Limitation de l'échauffement des bobines, le signal du courant en entrée des bobines est une impulsion de largeur h_e et de hauteur i_e .

Pour pouvoir contrôler les déplacements de la particule, il faut pouvoir contrôler le champ magnétique. En conséquence, la distribution du champ magnétique doit être déterminée dans l'espace de travail en fonction du courant électrique envoyé aux bobines. C'est l'objet des sections suivantes.

2.2 Caractérisation de la plateforme magnétique

Le déplacement de la particule dépend du champ et du gradient du champ magnétiques produits par les bobines. La connaissance de la distribution du champ magnétique dans l'espace de travail est ainsi un paramètre essentiel pour connaître le modèle du système d'actionnement et donc pour pouvoir contrôler la trajectoire des objets. Le comportement des bobines munies de noyaux ferromagnétiques doit être évalué. Il faut estimer les non-linéarités, notamment l'hystérésis engendré par l'apport des noyaux ferromagnétiques.

Pour établir le modèle du champ magnétique produit par la plateforme d'actionnement, il faut exprimer le champ magnétique dans l'espace de travail en fonction du courant électrique envoyé aux bobines. Des modèles analytiques du champ magnétique produit par un électroaimant (un solénoïde ou une bobine plate) sont proposés dans l'état de l'art [O'Handley 99, Coey 10]. Ces modèles reposent sur l'hypothèse que la bobine est plate (sa longueur est négligeable par rapport à son diamètre) ou que la bobine est un solénoïde (son diamètre est négligeable par rapport à sa longueur). De plus, ces modèles sont établis

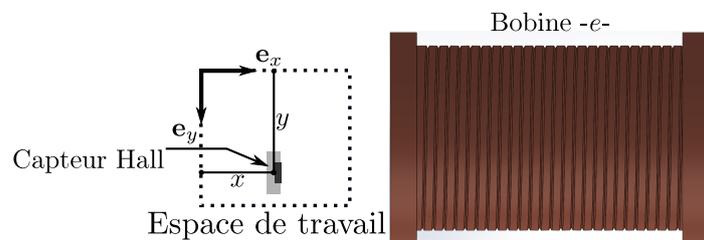
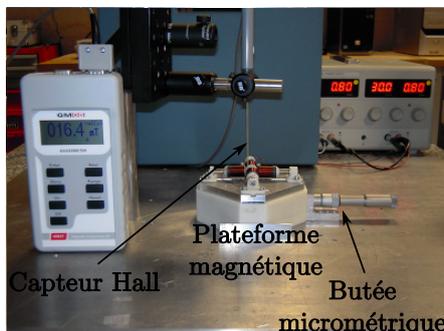
pour des électroaimants sans noyau ferromagnétique. Il n'existe pas d'expression pour les bobines choisies dans ce travail.

Une autre solution pour caractériser le champ magnétique est de réaliser un maillage de l'espace de travail et de déterminer la valeur du champ en un certain nombre de points de l'espace. Ces valeurs peuvent être obtenues soit à partir de simulations par éléments finis, soit par des mesures expérimentales. Cependant les simulations nécessitent de connaître parfaitement les caractéristiques des matériaux qui composent les bobines, notamment la susceptibilité magnétique. Comme cette valeur varie grandement en fonction des conditions de fabrication il est difficile d'en trouver la valeur dans la littérature. Il est donc courant de réaliser quelques mesures expérimentales pour calibrer la simulation. Dans tous les cas, il faut également considérer la dépendance du champ et du courant dans les bobines, et donc réaliser les mesures pour différentes valeurs de courant. L'approche retenue dans cette thèse pour caractériser le champ magnétique est la mesure expérimentale en un certain nombre de points de l'espace de travail. Un modèle du champ magnétique est ensuite interpolé à partir des données expérimentales.

Le champ magnétique est caractérisé par sa direction et son intensité. Dans l'espace de travail sa composante selon l'axe e_z est nulle car l'espace de travail est dans le plan de l'axe horizontal des bobines. Le champ magnétique se simplifie donc et s'exprime par :

$$\mathbf{B} = B_x \mathbf{e}_x + B_y \mathbf{e}_y$$

La solution retenue pour mesurer le champ magnétique est l'utilisation d'un capteur à effet Hall. Cette mesure repose sur le fait qu'un champ magnétique passant à travers un matériau conducteur ou semi-conducteur, dans lequel circule un courant, provoque une déviation du courant dans une direction perpendiculaire au plan défini par l'axe du champ et l'axe du courant. L'accumulation de charges sur un côté du conducteur donne ainsi naissance à un champ électrique [Coeys 10] mesuré par le capteur.



(a) Dispositif expérimental pour mesurer le champ dans l'espace de travail (b) Schéma illustrant la mesure de la composante B_x pour une bobine e

Figure 2.9 - Protocole expérimental pour mesurer le champ magnétique. Le capteur Hall est placé dans l'espace de travail à $z = 0$ et différentes coordonnées x, y .

Un capteur à effet Hall, GaussMeter Hirst GM08 [Hirst 14], est utilisé pour mesurer le champ magnétique dans les directions principales du plan (\mathbf{e}_x et \mathbf{e}_y) i.e. les composantes B_x et B_y . La figure 2.9(a) représente l'expérience mise en place pour mesurer le champ magnétique. La plateforme magnétique est mobile dans les deux directions du plan à l'aide de translateurs micrométriques, tandis que le capteur à effet hall est maintenu fixe dans l'espace de travail.

2.3 Évaluation de l'hystérésis

L'addition d'un noyau ferromagnétique dans les bobines favorise le phénomène d'hystérésis. En effet, lorsqu'un objet ferromagnétique est plongé dans un champ magnétique, les dipôles électriques atomiques s'alignent en fonction de ce dernier. Si le champ est retiré, une partie de l'alignement demeure au sein du matériau. Ce phénomène est appelé hystérésis magnétique et dépend du matériau composant le noyau.

Il est donc important de quantifier l'hystérésis des bobines utilisées. Pour cela le champ magnétique est mesuré en une position $\mathbf{P} = [x \ y]^T$ dans l'espace de travail pour des valeurs de courant croissantes puis décroissantes (i_e allant de 0.5 A à 4.5 A par pas de 0.5 A puis de 4.5 A à 0.5 A). L'expérience est reproduite pour trois positions différentes dans l'espace de travail.

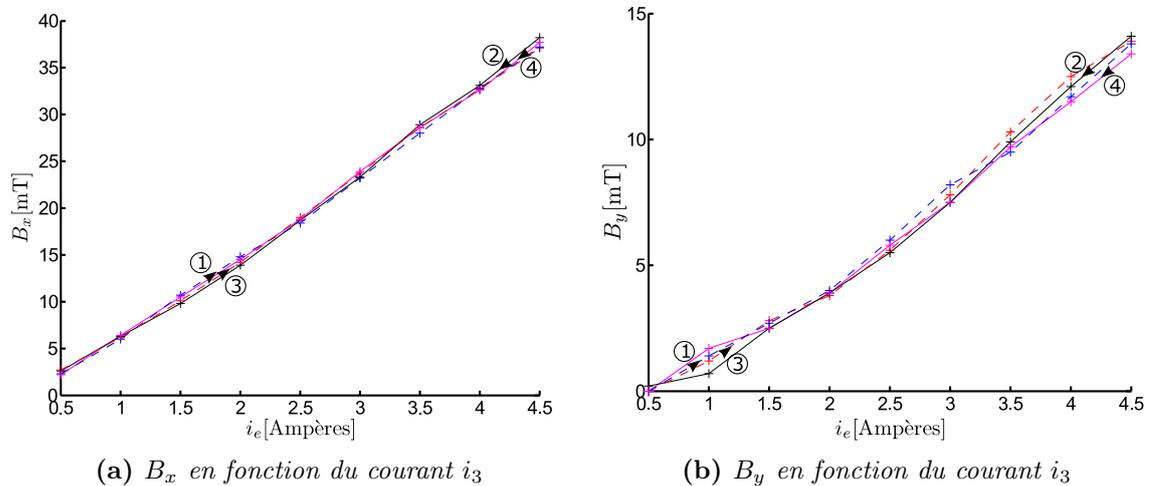


Figure 2.10 - Détermination de l'hystérésis dans la bobine $e=3$. Le champ magnétique est mesuré à une position \mathbf{P} constante. Cycle 1 et 3 : le courant i_3 varie en croissant de 0.5A à 4.5A. Cycle 2 et 4 : le courant i_3 varie en décroissant de 4.5A à 0.5A

La figure 2.10 représente les valeurs du champ magnétique mesurées pour la bobine $e = 3$. Les valeurs du champ sont proches pour les valeurs de courant croissantes et décroissantes. De plus, cette remarque est valide pour les composantes axiale et radiale du champ magnétique. Le phénomène d'hystérésis est donc négligeable pour les bobines

utilisées. Le choix d'un noyau en alliage de fer et de cobalt, qui a une faible coercivité et une saturation magnétique relativement élevée, limite l'hystérésis dans les bobines dues aux noyaux ferromagnétiques. De plus, pour les valeurs de courant typiques de travail le noyau ferromagnétique n'est pas saturé. La figure 2.10 montre aussi que le champ magnétique, à une position constante dans l'espace de travail, est proportionnel au courant.

2.4 Identification du modèle du champ magnétique

Le champ magnétique produit par une bobine e dépend de la position dans l'espace de travail, ici $\mathbf{P} = [x \ y]^T$, et du courant électrique i_e envoyé à la bobine. La section précédente montre que la relation entre le champ magnétique et le courant électrique est une loi proportionnelle. Pour établir le modèle du champ magnétique complet il suffit donc de déterminer son évolution en fonction des variables x et y de l'espace. Ceci revient à identifier les fonctions ${}^e f_x$ et ${}^e f_y$ telles que :

$$\begin{aligned} B_x &= {}^e f_x(x, y) i_e \\ B_y &= {}^e f_y(x, y) i_e \end{aligned}$$

Afin d'établir ces fonctions, le champ magnétique est mesuré en faisant varier les paramètres x et y , par pas de 0.65 mm, pour une même valeur de courant électrique. ${}^e f_x$ et ${}^e f_y$ sont ensuite interpolées à partir des mesures expérimentales. Pour s'assurer que le champ magnétique est proportionnel au courant électrique, ${}^e f_x$ et ${}^e f_y$ sont obtenues pour quatre valeurs de courant électrique ($i_e=1, \dots, 4$ ampères par pas de 1 ampère).

Pour chaque position et valeur de courant électrique (x, y, i_e) , trois mesures du champ magnétique dans les deux directions (B_x, B_y) sont relevées, pour s'assurer de la reproductibilité des mesures. La moyenne de ces mesures est la valeur du champ pour les paramètres (x, y, i_e) . Ces mesures expérimentales sont par ailleurs effectuées pour chaque bobine e .

La figure 2.11 représente les valeurs expérimentales (B_x, B_y) pour la bobine $e = 0$. Les données de la composante B_x ont l'allure d'une courbe d'ordre 3 selon x et d'ordre 2 en y , tandis que ceux de la composante B_y peuvent être interpolées par une courbe d'ordre 2 selon x et d'ordre 2 suivant y . Les fonctions ${}^e f_x$ et ${}^e f_y$ peuvent s'exprimer par des polynômes ${}^e P_{jk}$, tels que j et k sont, respectivement, les degrés du polynôme en \mathbf{e}_x et \mathbf{e}_y :

$$B_* = {}^e P_{jk}(x, y) i_e$$

De plus les bobines ont une disposition orthogonale. Les degrés du polynôme en \mathbf{e}_x et \mathbf{e}_y pour chaque bobine e se résument comme suit :

- l'axe des bobines $-e=0, 2-$ est selon l'axe \mathbf{e}_x :

$$B_x = {}^e P_{32}(x, y) i_e$$

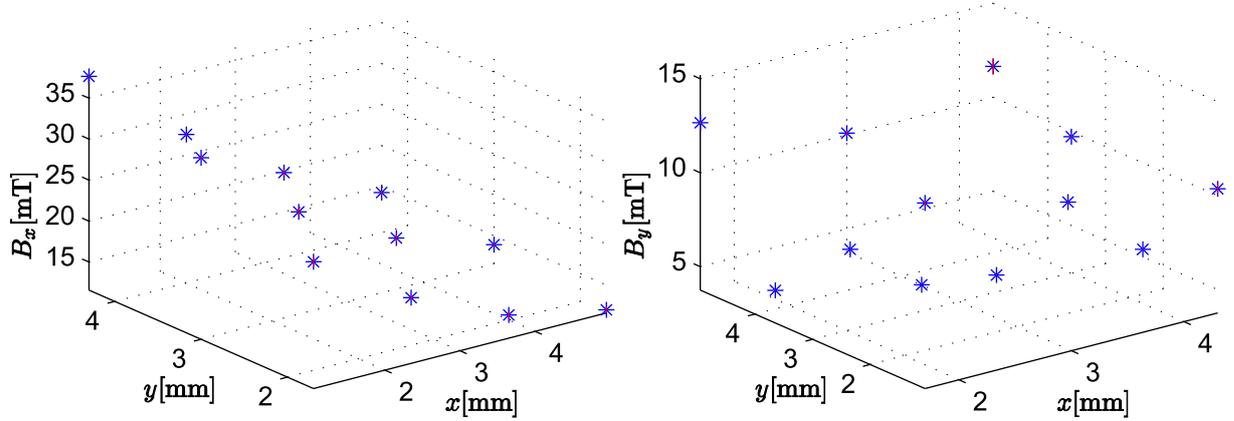


Figure 2.11 - Valeurs expérimentales (B_x, B_y) obtenues pour la bobine $e = 0$ avec $i_0 = 3$ A. L'écart type est représenté en rouge pour chaque valeur (B_x, B_y) . Les écarts types sont faibles. Les mesures sont donc répétables.

$$B_y = {}^e P_{22}(x, y) i_e$$

- l'axe des bobines $-e=1, 3-$ est selon l'axe \mathbf{e}_y :

$$B_x = {}^e P_{22}(x, y) i_e$$

$$B_y = {}^e P_{23}(x, y) i_e$$

Pour identifier les coefficients des polynômes ${}^e P_{jk}$, une régression polynomiale basée sur la méthode des moindres carrés est utilisée à partir des valeurs expérimentales. Les polynômes ${}^e P_{jk}$ sont identifiés pour différentes valeurs de courant i_e .

i_0	1 A	2 A	3 A	4 A	${}^0 P_{22}[m, n]$	$\sigma {}^0 P_{22}[m, n]$
${}^0 P_{22}[0, 0]$	9,13	10,02	10,86	11,22	10,31	0,93
${}^0 P_{22}[1, 0]$	-1,32	-1,15	-0,95	-0,80	-1,06	0,22
${}^0 P_{22}[0, 1]$	-3,34	-4,00	-4,61	-4,92	-4,22	0,70
${}^0 P_{22}[2, 0]$	0,12	0,09	0,07	0,05	0,08	0,03
${}^0 P_{22}[1, 1]$	0,08	0,10	0,10	0,09	0,09	0,01
${}^0 P_{22}[2, 2]$	0,46	0,56	0,65	0,70	0,59	0,11

Tableau 2.2 - Exemple de valeurs des coefficients du polynôme ${}^0 P_{22}$ interpolé pour les différentes valeurs de courant expérimentées. m correspond au degré du polynôme selon \mathbf{e}_x et n selon \mathbf{e}_y .

Le tableau 2.2 présente les coefficients du polynôme ${}^0 P_{22}$ pour les différentes valeurs de courant i_e utilisées et leur moyenne et écart type. Les coefficients identifiés sont proches pour les valeurs de courant utilisées. En conséquence le modèle du champ magnétique est établi en utilisant la moyenne des coefficients.

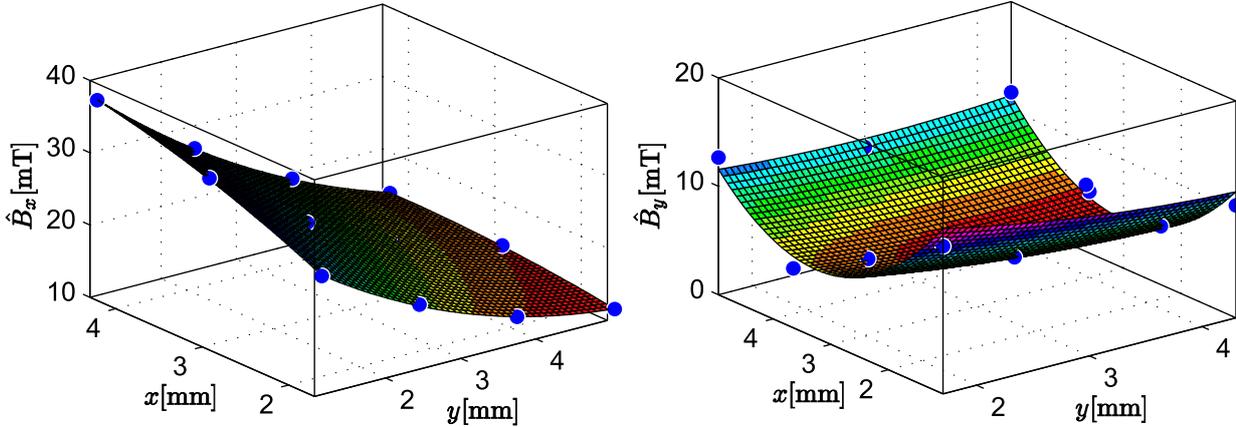


Figure 2.12 - Valeurs expérimentales et interpolées (\hat{B}_x , \hat{B}_y) pour la bobine $e = 0$ avec $i_0 = 3$ A. Les valeurs du champ magnétique estimées correspondent aux valeurs obtenues par les mesures expérimentales.

La figure 2.12 montre les valeurs expérimentales et les valeurs estimées \hat{B}_x , \hat{B}_y à partir du polynôme interpolé. Les valeurs du champ magnétique estimées correspondent aux valeurs obtenues par les mesures expérimentales.

Pour évaluer le modèle interpolé, le coefficient de détermination est considéré. Dans la figure 2.12, les modèles interpolés \hat{B}_x et \hat{B}_y ont des coefficients de détermination, respectivement de 0.94 et 0.68, ce qui signifie que l'interpolation du modèle justifie 94% et 68% des mesures expérimentales. Le modèle \hat{B}_y est moins prédictif à cause de la résolution du capteur à effet Hall. En effet, le champ perpendiculaire à l'axe de la bobine est faible (1-3 mT) au voisinage de l'axe de la bobine. Les erreurs d'interpolation sont principalement dues aux imprecisions du capteur à effet Hall. Les erreurs d'interpolation sont considérées négligeables et le modèle établi ici est utilisé dans la suite de la thèse.

3 Le système global

Le système microrobotique est composé d'un effecteur indépendant, de taille micrométrique, d'actionneurs à distance (la plateforme magnétique) et d'un dispositif de détection externe.

Les figures 2.13(a) et 2.13(b) montrent le système conçu :

- **La particule** : elle est de taille micrométrique et placée dans un espace de travail fermé pour limiter les perturbations externes,
- **Le dispositif de détection** : il comporte la caméra, le zoom optique et son éclairage,
- **La plateforme d'actionnement** : elle est réalisée en prototypage rapide et comporte les quatre bobines d'actionnement. Un espace est réservé au centre, pour



Figure 2.13 - *Système microrobotique : la plateforme magnétique contenant l'arène et le retour visuel utilisé pour détecter la particule.*

placer l'espace de travail contenant la particule. La plateforme d'actionnement est compacte ($15 \times 15 \text{ cm}^2$) et produit un champ magnétique maximal $||\mathbf{B}||=70 \text{ mT}$ au centre de l'espace de travail. Le champ magnétique produit est important. Les bobines utilisées ont une taille réduite : l'ajout des noyaux ferromagnétiques et leur rapprochement par rapport à l'espace de travail produisent un champ magnétique important. De plus, la consommation en puissance des bobines, et donc leur échauffement, est limitée par l'utilisation d'un signal de courant en impulsion.

Chacune des différentes parties du système est conçue pour augmenter la vitesse de déplacement et son contrôle. Les choix spécifiques de conception sont détaillés dans cette partie.

3.1 L'arène fermée

La particule, de part sa taille réduite, est sensible à la poussière et à l'humidité environnementales. Pour limiter ces perturbations externes, la particule est contenue dans un espace de travail fermé, appelé arène (Fig. 2.14).

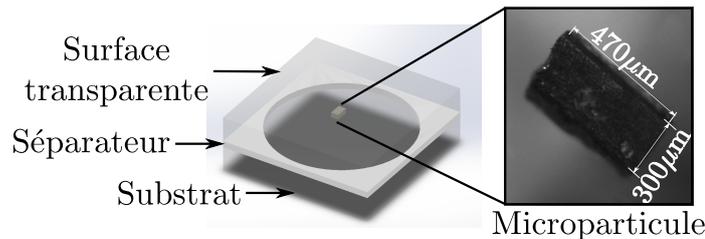


Figure 2.14 - *Espace de travail : la particule est enfermée dans une arène pour limiter les perturbations externes, telles que la poussière, l'humidité etc.*

L'arène consiste en deux surfaces séparées par un séparateur (spacer). La forme et les dimensions du spacer définissent la forme et la taille de l'espace de travail de la particule. La surface supérieure de l'arène doit être transparente pour permettre la visualisation de l'espace de travail. L'autre surface de l'arène est en contact avec la particule. Dans un premier temps, les surfaces utilisées sont en verre. Pour étudier l'influence des forces surfaciques sur le comportement de la particule, le substrat en contact avec la particule peut être modifié.

L'arène est assemblée en salle blanche après nettoyage de chaque partie. Pour assembler l'arène, les plaques de verres et le spacer sont alignés et maintenus avec un outil mécanique. Ensuite, à l'aide d'une colle epoxy transparente (AralditeTM), l'arène est scellée avec la microparticule à l'intérieur.

3.2 Détection de la particule

Afin de contrôler la trajectoire de la particule ferromagnétique, il faut connaître sa position. Pour détecter la position à haute fréquence, un retour visuel et des méthodes de traitement d'images rapides sont utilisées.

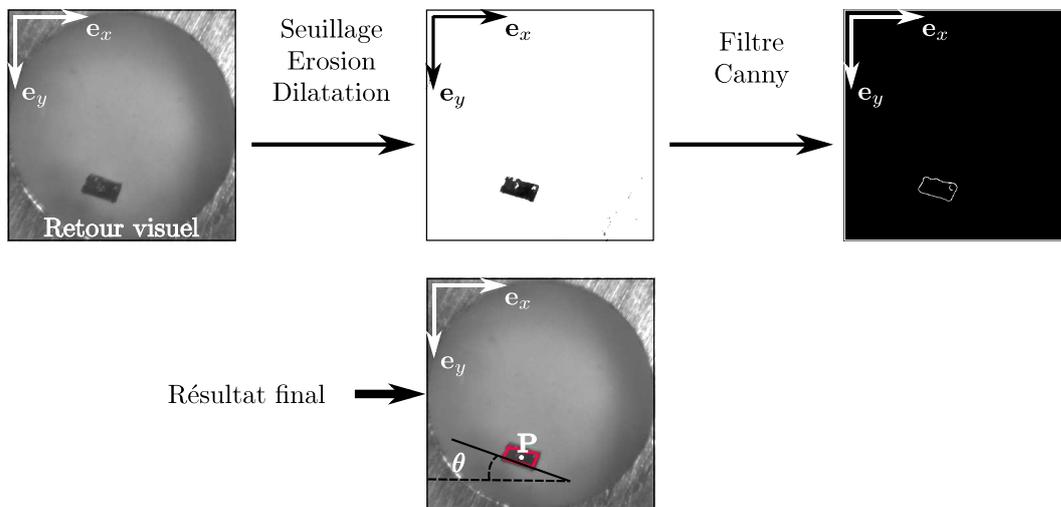


Figure 2.15 - Position et Orientation de la particule estimées à partir des images retournées par la caméra. Des méthodes classiques et rapides de traitement d'images sont utilisées : seuillage et opérations morphologiques suivis d'un filtre 'Canny'.

La position \mathbf{P} estimée de la particule représente son centre de gravité. Elle est obtenue par un traitement d'images qui minimise les opérations effectuées sur les images pour limiter le temps de traitement. Cette approche est rendue possible grâce au bon contraste entre la particule et la surface de l'arène obtenue à l'aide d'un éclairage dédié. Les étapes, représentés par la figure 2.15, sont :

- un seuillage d'image,

- des opérations morphologiques (érosion, dilatation),
- une application d'un filtre de type 'Canny' [Canny 86] pour retrouver le contour de la particule,

La position estimée \mathbf{P} est le centre de gravité du contour, et son orientation θ est l'orientation de la plus grande dimension du contour.

Le traitement d'images nécessite 10 ms pour obtenir \mathbf{P} et θ . La détection de la particule est principalement limitée par la fréquence d'acquisition des images, qui est fixée à 20 fps (image par seconde). La fréquence d'acquisition la caméra est volontairement réduite pour assurer un temps d'exposition long et ainsi faciliter le traitement d'images. Le traitement d'images utilisé est rapide mais il manque de robustesse dans le cas d'un éclairage faible ou variant. Il est donc important de garantir un éclairage puissant et uniforme de l'espace de travail.

3.3 Actionnement et contrôle de la particule

Pour coordonner l'actionnement, la détection et le contrôle du système, un PC sous un environnement Xenomai/Linux est utilisé. Le système d'exploitation en temps réel est particulièrement adapté à l'implémentation du contrôle numérique pour ses performances et aussi pour sa simplicité d'utilisation.

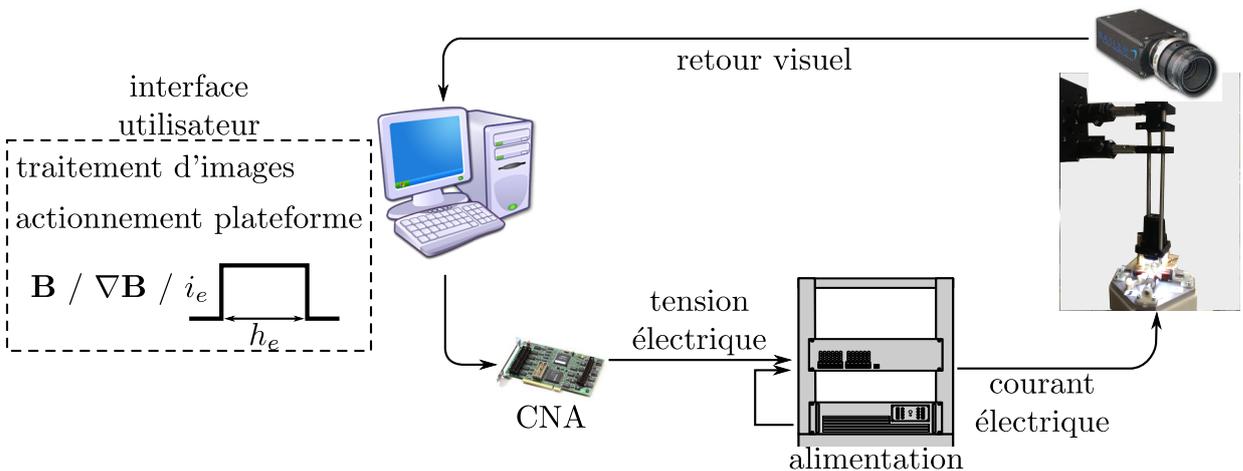


Figure 2.16 - Position de la particule est obtenue par retour visuel et son déplacement est produit par le champ magnétique \mathbf{B} et le gradient du champ magnétique $\nabla\mathbf{B}$. Ces derniers sont générés par le courant envoyé i_e à la bobine, pendant un temps h_e . Pour envoyer le courant de façon contrôlable, une carte CNA est utilisée suivie d'une carte convertissant la tension délivrée en courant électrique.

La figure 2.16 schématise l'ensemble du système. Pour envoyer un courant électrique contrôlable à la plateforme magnétique, une carte convertisseur numérique analogique

(CNA) est exploitée, suivie d'une carte électronique convertissant la tension délivrée par la CNA en courant électrique pour l'entrée des bobines. Dans ce travail, la carte National Instrument PCIe 6259 est utilisée avec les caractéristiques suivantes :

- elle comporte quatre sorties analogiques à une résolution 0.1 volts, pour actionner les quatre bobines de la plateforme d'actionnement,
- elle envoie des signaux séquentiellement ou simultanément à une fréquence de 1.25 MS/s et un temps de stabilisation de 2 μ s. Ceci assure le réglage du temps d'application du signal h_e à haute résolution.

La carte électronique convertissant la tension en courant est conçue pour alimenter les bobines en courant de façon séquentielle ou simultanée. Elle est alimentée à 30 volts et elle a un temps de réponse de 3,5 μ s.

Les déplacements de la particule sont produits par le moment et la force magnétiques. Ces derniers sont proportionnels, respectivement, au champ magnétique \mathbf{B} et au gradient du champ magnétique $\nabla\mathbf{B}$. Pour créer un champ magnétique \mathbf{B} ou un gradient de champ magnétique $\nabla\mathbf{B}$, un courant i_e est envoyé à la bobine $-e-$ pendant un temps h_e . Les modèles du champ \mathbf{B} et du gradient $\nabla\mathbf{B}$, déterminés dans la section 2.4, dépendent du courant i_e et de la position dans l'espace de travail. Pour connaître le courant i_e à envoyer à la bobine pour produire un champ magnétique \mathbf{B}_{ref} ou un gradient de champ magnétique $\nabla\mathbf{B}_{ref}$ désiré à la position de la particule \mathbf{P} , il suffit d'inverser le modèle du champ magnétique. L'entrée du système en boucle ouverte (Fig. 2.17) peut être :

- $\nabla\mathbf{B}$ et h_e pour produire la translation de la particule,
- \mathbf{B} et h_e pour orienter la particule.

Plus de détails sur le modèle du champ magnétique et son intégration dans le système sont donnés par la suite dans le chapitre 4.

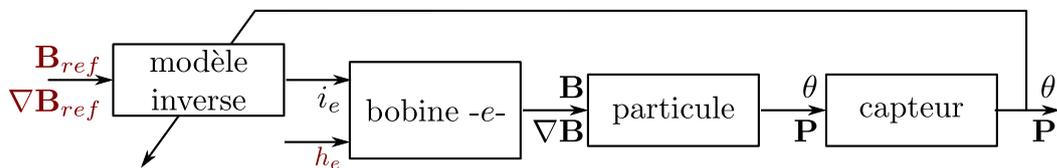


Figure 2.17 - Actionnement en boucle ouverte : l'entrée du système sont $\nabla\mathbf{B}$ et h_e pour déplacer la particule ou \mathbf{B} et h_e pour l'orienter. Il est aussi possible d'envoyer un courant i_e pendant un temps h_e .

Les performances de cette plate-forme sont présentées dans la suite de ce chapitre par les premiers tests d'actionnement en boucle ouverte.

4 Évaluation de l'actionnement magnétique

4.1 Évaluation de la vitesse du système

Pour évaluer la vitesse de la particule, sa réponse est observée pour un signal donné en entrée. Cependant, la particule se déplace à une grande vitesse. La caméra intégrée dans le système microrobotique a une fréquence de 20 fps qui est insuffisante pour suivre la trajectoire de la particule. En conséquence, une autre caméra, Fastcam SA1.1 de Photron [Photron 15], avec une fréquence de 5000 fps est exploitée pour cette expérience. En revanche, cette caméra ne peut pas être exploitée pour le traitement en temps réel des images. La position de la particule est donc obtenue par le traitement des images hors ligne. La réponse de la particule est relevée pour un courant électrique d'amplitude i_e et de largeur h_e . La particule est placée sur une surface en verre sans traitement particulier.

La figure 2.18 montre la réponse de la particule pour deux surfaces : le verre et le silicium. La figure 2.18(a) représente le déplacement de la particule en fonction du temps, pour un courant en entrée de hauteur $i_3 = 1$ A et de largeur $h_3 = 3$ ms sur une surface en verre. La particule parcourt $152 \mu\text{m}$ durant 11 ms. La particule se déplace donc à une vitesse moyenne de 14 mm/s. La vitesse de la particule peut atteindre 55 mm/s (Fig. 2.18(b)) pour un signal en courant de hauteur $i_3 = 3$ A et de largeur $h_3 = 3$ ms sur une surface en verre. Le matériau du substrat influence la vitesse de la particule. En effet, elle vaut 29 mm/s sur une surface en silicium, pour un courant en entrée de hauteur $i_3 = 1$ A et de largeur $h_3 = 3$ ms. La vitesse de déplacement de la particule sur un substrat en silicium atteint 176 mm/s, pour un courant en entrée de hauteur $i_3 = 3$ A et de largeur $h_3 = 3$ ms.

Le système microrobotique conçu actionne la particule à hautes vitesses en comparaison avec les systèmes magnétiques existants dans l'état de l'art. La vitesse d'une particule à actionnement magnétique atteint 20 mm/s dans l'air [Tung 14]. Elle atteint 4 mm/s [Diller 12] dans le liquide et peut être optimisée ponctuellement à 556 mm/s [Salmon 13] à l'interface air-liquide.

La figure 2.18 montre que la réponse de la particule est non-linéaire par rapport au courant en entrée de la bobine. En effet, l'amplitude du déplacement de la particule n'est pas proportionnelle à l'amplitude du courant en entrée. Elle est dix fois plus importante pour un courant trois fois plus grand sur un substrat en verre et cinq fois plus grande pour un substrat en silicium. En effet, la particule est soumise à la force magnétique et les forces surfaciques. La force magnétique est proportionnelle au gradient du champ magnétique, si son aimantation interne est considérée constante. Le gradient du champ magnétique dépend du courant en entrée de la bobine et de la position dans l'espace de travail. Son évolution est non-linéaire par rapport à la position dans l'espace de travail. De plus, les forces surfaciques dans le milieu ambiant sont prédominantes et complexes à modéliser. L'identification de la réponse de la particule et la synthèse de son contrôle

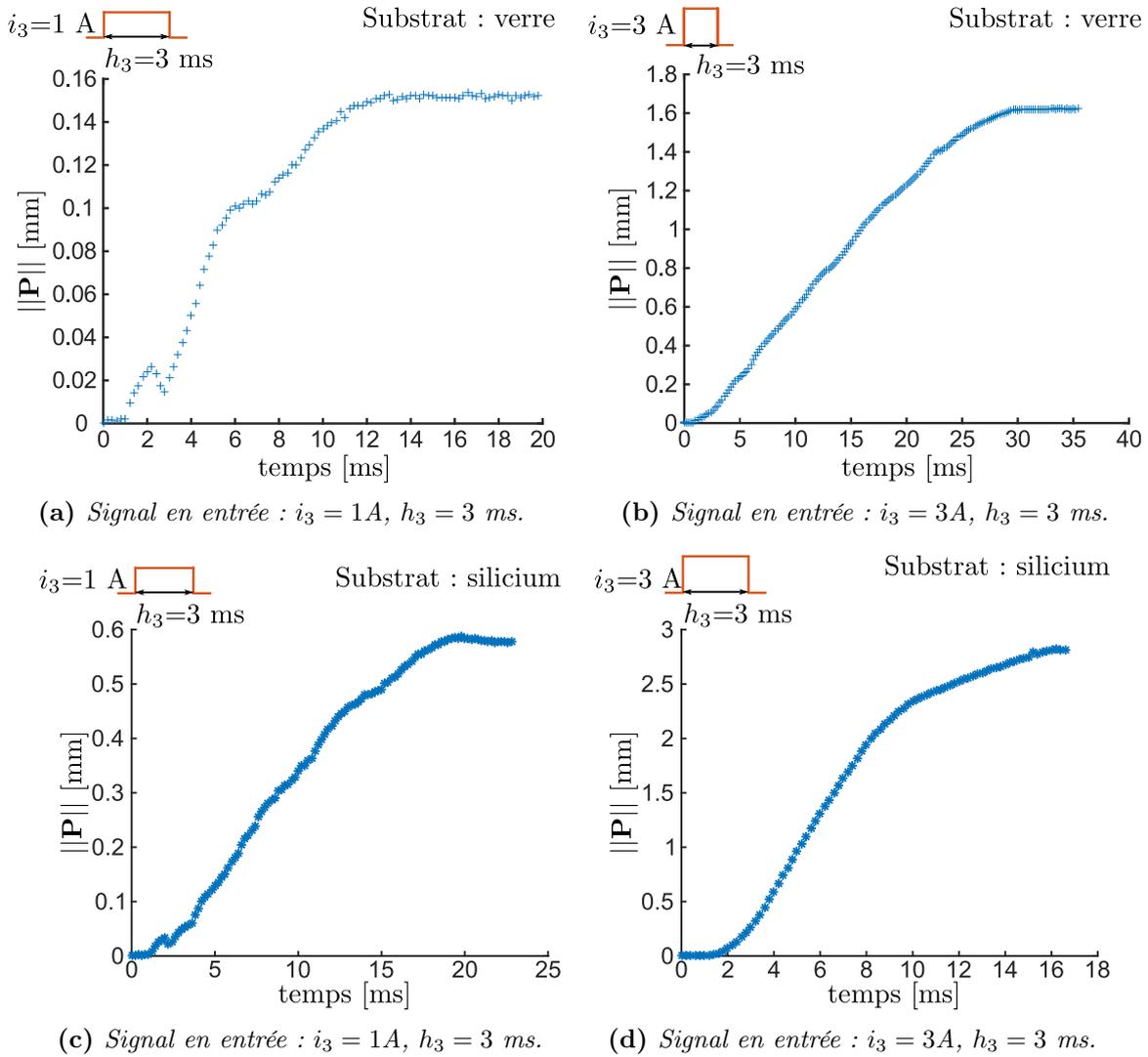


Figure 2.18 - Amplitudes de déplacement de la particule pour un courant électrique en entrée de la bobine $e = 3$ en fonction du temps. La réponse de la particule est observée à haute fréquence (5000 positions par seconde). La particule est placée sur du verre pour les figures en haut, et sur une surface en silicium polie pour les figures du bas.

doivent prendre en compte le comportement de la particule. Cependant, dans la suite, il est nécessaire d'utiliser une caméra permettant le traitement des images en ligne (et non pas hors ligne). La fréquence d'échantillonnage est alors plus réduite. L'identification et le contrôle devront prendre en compte cette limite matérielle. Ces problématiques sont abordées et détaillées dans le chapitre 4.

4.2 Évaluation de la répétabilité du système

Les expériences montrent que, pour un signal d'entrée, le déplacement de la particule peut être nul ou d'amplitudes variables. Afin d'évaluer la répétabilité de l'actionnement magnétique dans un milieu sec, une expérience d'actionnement de la particule est reproduite pendant six jours consécutifs.

L'actionnement utilisé ici est basé sur la force magnétique. En effet, la translation de la particule est produite par cette dernière, proportionnelle au gradient du champ magnétique. Connaissant, le modèle du champ magnétique, il est donc possible de connaître le courant électrique à envoyer à la bobine pour produire un gradient de champ magnétique donné à la position de la particule. L'actionnement de la particule est donc assuré par le gradient de champ magnétique $\|\nabla\mathbf{B}\|$ qui est appliqué pendant un instant h_e .

L'expérience journalière consiste à mesurer le déplacement de la particule pour différents signaux en entrée ($\|\nabla\mathbf{B}\|$, h_e). Les valeurs d'entrée du système sont les valeurs usuelles pour le fonctionnement de la plateforme d'actionnement :

- $\|\nabla\mathbf{B}\|$ varie de 4 mT/mm à 8 mT/mm par pas de 2 mT/mm,
- h_e varie de 1 ms à 5 ms par pas de 2 ms.

Les bobines -e- sont actionnées l'une à la suite de l'autre. Pour chaque couple ($\|\nabla\mathbf{B}\|$, h_e), le signal est envoyé 80 fois durant l'expérience journalière. Le déplacement de la particule $\|\mathbf{P}\|$ est la norme de la différence entre les positions avant et après l'envoi du signal. De plus, un temps de 1 s est respecté entre la détection de la position initiale et la position finale, pour s'assurer de l'établissement de la réponse de la particule. L'occurrence de déplacement signifie que le déplacement n'est pas nul.

La figure 2.19 représente la variation des pourcentages d'occurrence de déplacement sur 80 tests pour chaque signal d'entrée ($\|\nabla\mathbf{B}\|$, h_e) et la moyenne des amplitudes de déplacement $\|\bar{\mathbf{P}}\|$ en fonction des jours. Le pourcentage d'occurrence de déplacement pour un signal en entrée donné varie quotidiennement à cause des perturbations environnementales telles que le taux d'humidité, la température ambiante, les forces électrostatiques, etc. Cependant, deux tendances du comportement de la particule peuvent être notées. Le pourcentage de déplacement augmente avec l'intensité du gradient du champ magnétique $\|\nabla\mathbf{B}\|$, tandis que l'amplitude de déplacement augmente avec la durée d'application du signal h_e . En conclusion la réponse de la particule en contact avec une surface est variable. En effet la particule adhère fréquemment avec la surface. L'actionnement n'est pas répétable, il faut l'améliorer avant d'envisager un asservissement en position.

5 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est la conception d'un système microrobotique pour un actionnement à haute vitesse. Les choix réalisés peuvent se résumer de la façon suivante :

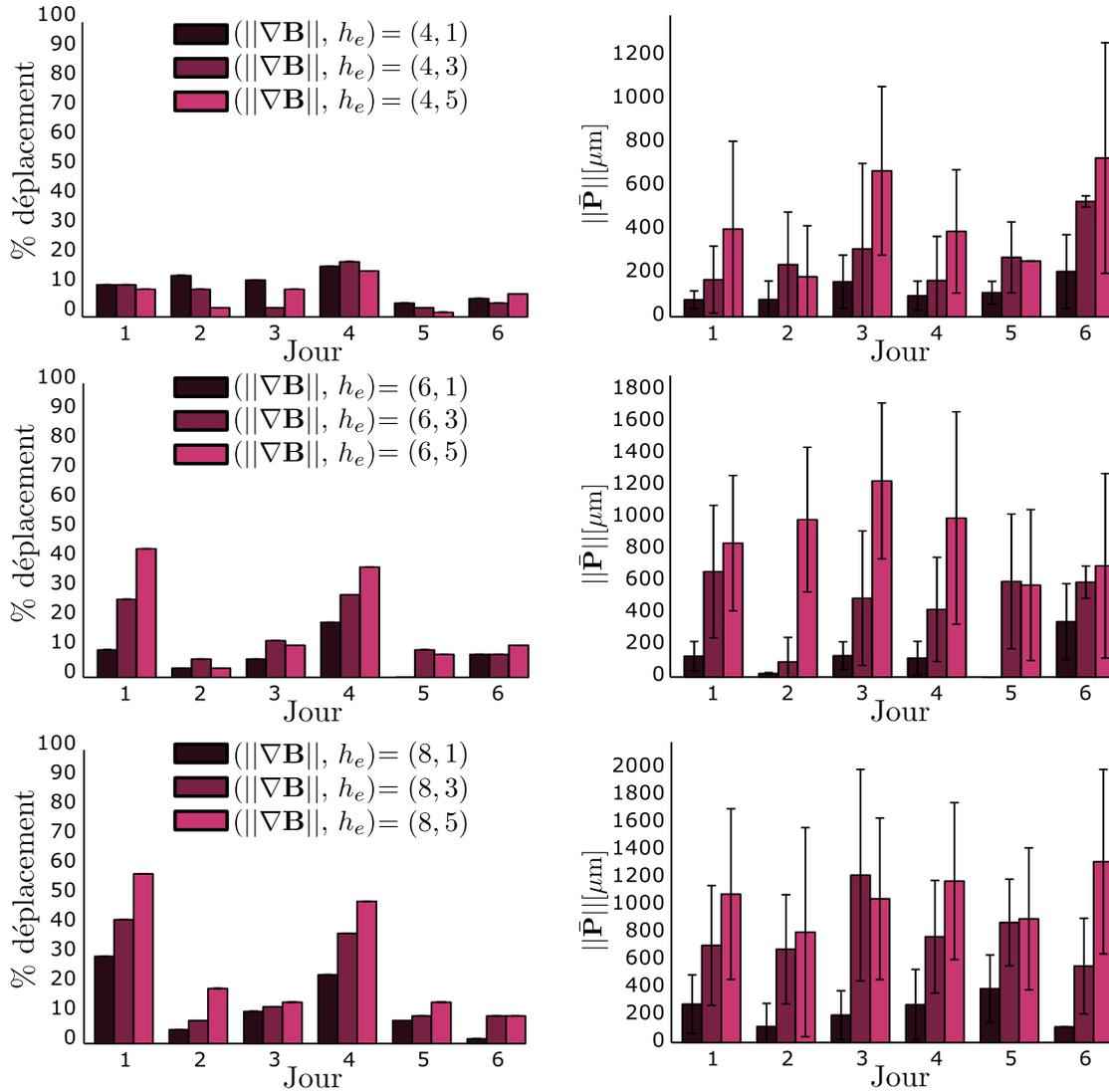


Figure 2.19 - Variation des amplitudes et pourcentage d'occurrence du déplacement en fonction des jours. Les histogrammes de gauche représentent les pourcentages d'occurrence de déplacement et les histogrammes de droite montrent les moyennes des amplitudes de déplacement et les écarts types.

- évolution dans un milieu sec,
- limitation des perturbations externes en utilisant un espace de travail fermé avec un substrat interchangeable pour évaluer l'effet des propriétés de la surface sur le comportement de la particule,
- production d'une force magnétique importante :

$$\mathbf{F}_m = V(\mathbf{M} \bullet \nabla)\mathbf{B}$$

- o par l'augmentation de \mathbf{M} : effecteur ferromagnétique,
- o par l'augmentation de $\nabla\mathbf{B}$ produit par la plateforme d'actionnement :

- addition de noyaux ferromagnétiques
- bobines très proches de l'espace de travail
- algorithme de traitement d'images simple pour réduire le temps de détection de la microparticule.

Cependant, les dispositions prises dans la conception du système microrobotique présentent certains inconvénients qui sont résumés dans le tableau 2.3. Parmi ceux ci, les forces d'adhésion représentent un problème majeur, problème étudié dans la suite de cette thèse.

Choix	Conséquence
Noyau ferromagnétique	Non linéarité du champ magnétique
Bobines rapprochés de l'espace de travail	Espace de travail limité (4 x 4 cm ² , 10 fois la taille de la particule)
Milieu sec	Importantes forces d'adhésion

Tableau 2.3 - *Les conséquences des choix dans la conception de la plateforme magnétique pour actionner à haute vitesse la particule.*

Les premières expériences d'actionnement de la particule ferromagnétique montrent que la plateforme conçue, et notamment le choix de l'évolution dans un milieu sec, atteint de grandes vitesses (55 mm/s sur une surface en verre et 176 mm/s sur une surface en silicium). Cependant la répétabilité de l'actionnement n'est pas assurée : le pourcentage d'actionnement varie de 60% à 10% selon les jours. En effet, l'adhésion surfacique dans le milieu sec est prépondérante. Dans le chapitre suivant, des solutions sont proposées pour réduire l'adhésion de la particule à la surface.

Les forces d'adhésion dans le milieu ambient

Un des problèmes majeurs à l'échelle micrométrique est l'adhésion surfacique, prédominante dans le milieu ambient. Le chapitre 2 montre les perturbations entraînées par ces forces surfaciques lors de l'actionnement de la particule magnétique. Pour assurer un contrôle répétable, l'impact de ces forces dans le milieu sec doit être minimisé pour éviter des phénomènes de collages locaux (engendrés par les forces de van der Waals ou les forces capillaires dues à la présence d'humidité résiduelle) ou d'attraction à longue portée (forces électrostatiques dues à des phénomènes de charges locales).

Ce chapitre propose une analyse des forces en présence dans le cadre de ce travail et détaille les méthodes mises en oeuvre pour améliorer la répétabilité de l'actionnement magnétique. Trois propositions de solutions sont évaluées pour minimiser ou vaincre cette adhésion surfacique.

La première solution, présentée dans la section 2, consiste à exploiter de grandes accélérations avec un actionnement secondaire piézoélectrique pour détacher la particule du substrat. Elle s'appuie sur des travaux effectués précédemment à l'ISIR sur des objets sphériques. Ces dernières montrent que l'accélération peut vaincre l'adhésion si elle atteint des valeurs très élevées (de 10^5 à 10^6 m.s⁻²).

Dans la seconde approche, l'état de surface du substrat en contact avec la particule est contrôlé pour limiter les forces d'adhésion de contact et les phénomènes locaux de tribo-électrification. Dans ce cadre, les effets de la friction et des phénomènes électrostatiques sur le comportement de la particule sont évalués (section 3).

Enfin, la dernière méthode, détaillée dans la section 4, exploite le champ magnétique

pour imposer des couples de torsion. L'idée principale est que le moment magnétique de torsion peut être exploité pour vaincre l'effet adhésif alors qu'un effet normal n'est pas suffisant. Une contrainte en torsion apparaît comme une solution prometteuse pour vaincre un effet adhésif de contact.

1 Force d'adhésion entre la particule et le substrat

1.1 Forces surfaciques à l'échelle micrométrique

À l'échelle micrométrique, les forces majeures contribuant à l'adhésion entre solides sont décomposées comme suit [Israelachvili 91, Fearing 95, Régnier 08] :

- **forces de van der Waals** : forces d'interaction entre les molécules de deux corps en présence,
- **forces électrostatiques** : forces d'interaction de Coulomb en présence de charges électriques, qui peuvent apparaître aussi par triboélectrification¹,
- **forces capillaires** : forces résultantes de la condensation d'humidité sur deux corps en proximité.

1.1.1 Forces de van der Waals

Les forces de van der Waals (vdW) [Hamaker 37, Lifshitz 56] dépendent des matériaux en contact, au travers de la constante de Hamaker, et de la distance d'interaction. L'évaluation de cette constante, qui détermine le calcul de la force, nécessite de nombreuses données physiques sur les matériaux. L'interaction de van der Waals est formée de la somme de trois forces interparticulaires :

- la force d'induction (interaction de Debye) : elle intervient lors de l'interaction dipôle-dipôle induit,
- la force d'orientation (interaction de Keesom) : elle intervient lors de l'interaction dipôle-dipôle,
- la force de dispersion (interaction de London) : cette interaction existe entre tout atome ou molécule, même neutre.

La force de dispersion apporte la plus grande contribution dans le total des trois composantes de l'interaction de vdW entre atomes et molécules. Elle présente la particularité d'être toujours présente, contrairement aux deux autres qui dépendent des propriétés des molécules [Israelachvili 91]. Ainsi, pour deux molécules polaires interagissant dans le vide,

1. apparition de charges électriques lors du contact entre deux matériaux de nature différente.

le potentiel d'interaction s'exprime :

$$w_{vdW}(z) = -\frac{(C_{ind} + C_{orient} + C_{disp})}{z^6} \quad (3.1)$$

C_{ind} , C_{orient} et C_{disp} représentent respectivement les contributions des phénomènes d'induction, d'orientation et de dispersion au potentiel d'interaction. z est la distance entre deux molécules des corps en interaction.

L'énergie d'interaction entre une molécule et une surface composée des mêmes molécules sera la somme des interactions entre la molécule et chaque molécule du corps. L'expression du potentiel d'interaction entre surfaces de différentes géométries est obtenue par l'intégration de $w_{vdW}(z)$ sur la surface en contact.

La particule possède une forme parallélépipédique. Le contact entre la particule et le substrat est considéré comme le contact entre deux surfaces planes et lisses. Le potentiel d'interaction entre ces deux surfaces s'exprime par unité de surface :

$$W = -\frac{A}{12\pi Z^2}$$

avec Z la distance entre les deux surfaces. La force de van der Waals totale par unité de surface dans ce cas est :

$$F_{vdW} = -\frac{A}{6\pi Z^3} \quad (3.2)$$

La constante A est la constante de Hamaker [Hamaker 37]. Cette constante dépend des matériaux et des conditions expérimentales. Elle est généralement obtenue expérimentalement, mais peut également être calculée.

Dans le cas d'interaction entre deux matériaux différents, il est possible d'obtenir des valeurs approchées des constantes de Hamaker en utilisant des « relations de combinaison » [McLachlan 64]. Ainsi, pour deux matériaux 1 et 2 interagissant au travers du vide, il est possible d'obtenir A_{12} en fonction des constantes A_{ii} de chaque matériau :

$$A_{12} \approx \sqrt{A_{11}A_{22}}$$

Ces formules de combinaison donnent une bonne approximation de A , sauf dans le cas où les milieux sont fortement polaires.

1.1.2 Forces capillaires

Les forces capillaires [Adamson 97, de Gennes 02, Lambert 07] apparaissent entre un solide et un liquide ou entre deux solides en présence d'un liquide intermédiaire. Les forces capillaires sont dues à la différence de pression à l'interface entre un gaz et un liquide et à

la tension de surface. La différence de pression à l'interface gaz/liquide produit une force exprimée par l'équation de Laplace [Adamson 97] qui dépend de la tension de surface et de la courbure moyenne du ménisque entre les solides. La tension de surface est le produit des interactions moléculaires à l'interface gaz/liquide et engendre une force qui dépend de la forme du ménisque.

Les forces capillaires dans le cas de contact entre deux surfaces planes (Fig. 3.1) dépendent des paramètres suivants :

- la tension de surface γ [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$] : elle exprime une propriété du liquide intermédiaire,
- le volume du liquide V_l : les forces capillaires sont relatives au volume du liquide qui forme le pont entre les deux solides,
- les angles de contact θ_1 et θ_2 : ces angles représentent la forme dont le liquide intermédiaire mouille les surfaces en contact. Ces angles dépendent de la rugosité et des impuretés des surfaces. Les angles θ_1 et θ_2 sont déterminés par la tangente à l'interface liquide-gaz et la tangente au solide au niveau de la ligne triple. Ces angles expriment l'intersection des trois interfaces liquide-gaz, liquide-solide et solide-gaz.

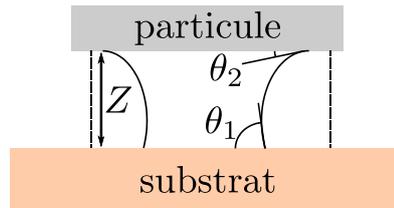


Figure 3.1 - Cas du contact entre la particule et le substrat en présence d'un ménisque formé par condensation ou par la présence d'un liquide.

Dans le cas d'un contact plan-plan entre deux matériaux de même nature ($\theta_1 = \theta_2 = \theta$), le modèle de la force capillaire F_{cap} proposé dans la littérature [Régner 08] s'écrit :

$$F_{cap} = -\frac{2\gamma V_l \cos \theta}{Z^2} - \frac{2\gamma \pi^{\frac{1}{2}} V_l^{\frac{1}{2}}}{Z^{\frac{1}{2}}}$$

avec Z la distance entre les solides en contact.

Les forces capillaires sont présentes dans le milieu liquide et apparaissent dans le milieu ambiant par l'effet de condensation de l'humidité qui forme un ménisque entre les solides.

1.1.3 Forces électrostatiques

Les forces électrostatiques sont dues à l'interaction entre les charges électriques. Ces forces sont exprimées par la loi de Coulomb. Deux charges q_1 et q_2 qui interagissent à une distance z produisent une force électrostatique F_{elec} :

$$F_{elec} = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon_0 z^2}$$

ϵ_0 la permittivité de l'air.

De façon générale, les forces électrostatiques sont fréquemment présentes en particulier dans le cas d'interaction avec des isolants électriques [Hays 91]. Les techniques qui existent pour limiter les forces électrostatiques se décomposent selon deux cas :

cas de conducteurs électriques : Le contact plan-plan entre deux conducteurs électriques forme un condensateur. La force électrostatique s'écrit alors :

$$F_{elec} = -\frac{1}{2} \left(\frac{dC}{dZ} \right) U^2$$

avec C la capacité, U la différence de potentiel entre les deux corps et Z la distance entre les deux électrodes du condensateur. Pour limiter la force électrostatique dans ce cas, il faut limiter le potentiel entre les deux corps. Les matériaux à faible résistivité électrique sont privilégiés, et le substrat est relié à la masse afin de disperser les charges électriques rémanentes.

cas d'isolants électriques : La force électrostatique entre deux isolants dans un contact plan-plan est donnée par la formule suivante :

$$F_{elec} = \frac{(\sigma_s S)^2}{4\pi\epsilon} \left(\frac{1}{Z^2} \right)$$

avec σ_s la densité de charges surfaciques, S l'aire de la surface en contact, Z la distance entre les deux isolants et ϵ la permittivité diélectrique du milieu intermédiaire. Le nettoyage du substrat à l'eau distillée en évitant les frictions contribue à minimiser les charges électriques dans le substrat.

1.1.4 Conclusion

Les trois forces mentionnées ci-dessus sont comparées à titre qualitative dans [Belouard 09] (Fig. 3.2). Cette comparaison est établie sous des hypothèses spécifiques. Dans ce travail, l'influence des forces relatives est difficile à quantifier. Dans le cas du contact entre deux solides, les forces de van der Waals sont considérées les plus prédominantes dans un milieu sec même si la différenciation avec les forces capillaires et les infimes couches d'eau résiduelle est délicate à mesurer. De même, les forces électrostatiques dont la portée est importante apparaissent aussi comme un élément perturbateur.

Pour simplifier notre propos, dans ce document, les forces d'adhésion sont considérées au sens large avec une prédominance pour les forces de van der Waals au contact et les forces électrostatiques à distance.

Les forces surfaciques sont importantes à l'échelle micrométrique dans le milieu ambiant. Elles restent cependant difficiles à quantifier et modéliser. Ces forces dépendent de différents paramètres, en particulier, la distance entre les corps en contact, leur état

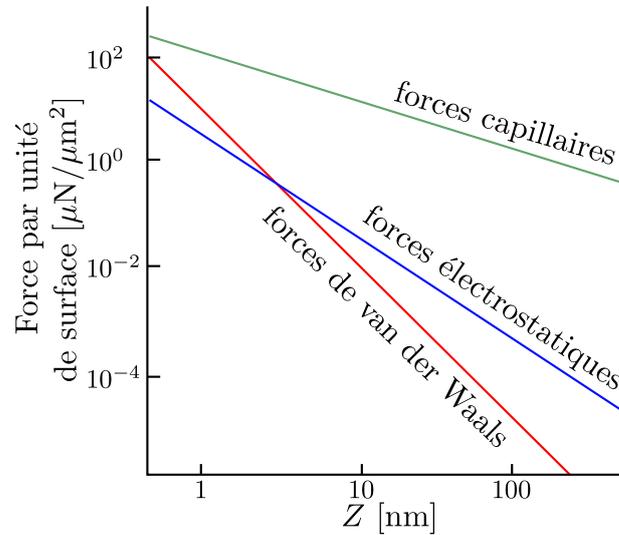


Figure 3.2 - Comparaison entre les forces surfaciques. La simulation est établie pour deux surfaces lisses en SiO_2 . Les forces surfaciques diminuent en augmentant la distance entre les surfaces (Z [nm]). Les forces capillaires sont les plus prédominantes, tandis que les forces de van der Waals sont plus grandes que les forces électrostatiques pour des surfaces en contact (la distance entre les surfaces est inférieure à 1 nm) [Bellouard 09].

de surface et les propriétés des matériaux les constituant. Dans la suite, des solutions, se basant sur ces remarques, sont présentées pour vaincre l'adhésion surfacique entre une particule ferromagnétique et un substrat donné.

1.2 Analyse des forces appliquées à la particule

Pour produire un déplacement de la particule, il faut produire une force extérieure supérieure aux forces d'adhésion ou réduire ces dernières.

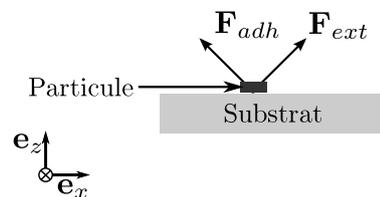


Figure 3.3 - Particule, en contact avec une surface, soumise à son poids, négligeable à cette échelle, aux forces surfaciques et aux forces externes d'actionnement.

La particule est soumise à la force d'actionnement \mathbf{F}_{ext} , les forces surfaciques d'adhésion \mathbf{F}_{adh} et son poids négligé à cette échelle (Fig. 3.3). Les forces surfaciques sont considérées des forces de contact [Régner 08]. L'influence des forces surfaciques dépend donc du

coefficient de frottement μ_s entre la surface et la particule. Pour simplifier l'analyse des équations de mouvement de la particule, le déplacement de la particule dans le plan est considéré suivant l'axe \mathbf{e}_x uniquement. Elles s'écrivent donc :

$$m \cdot \ddot{z} = \mathbf{F}_{ext} \cdot \mathbf{e}_z + \mathbf{F}_{adh} \cdot \mathbf{e}_z \quad (3.3)$$

$$m \cdot \ddot{x} = \mathbf{F}_{ext} \cdot \mathbf{e}_x + \mu_s \mathbf{F}_{adh} \cdot \mathbf{e}_x \quad (3.4)$$

$$I_z \cdot \ddot{\theta} = \Gamma_{ext} + \Gamma_{adh} \quad (3.5)$$

m et I_z sont, respectivement, la masse et le moment d'inertie de la particule. μ_s est le coefficient de frottement de la surface. Γ_{ext} et Γ_{adh} sont, respectivement, le couple d'actionnement externe et le moment surfacique.

Pour assurer un actionnement répétable de la particule, trois solutions sont étudiées :

première approche (Eq. 3.3) : cette approche repose sur l'augmentation de la force extérieure fournie. L'actionnement de la particule dans le plan s'effectue par la force magnétique. Pour augmenter la force d'actionnement, une force est introduite selon l'axe \mathbf{e}_z . La solution proposée est l'exploitation d'un champ électrique pour créer une contrainte mécanique à haute vitesse. Les contraintes engendrées hors du plan de la particule détachent la particule de la surface. Le matériau de la particule doit être adapté pour répondre à cet effet.

seconde approche (Eq. 3.4) : cette solution repose sur la réduction des forces surfaciques. Ces forces dépendent de l'état de surface du substrat sur lequel repose la particule. Les forces de van der Waals dépendent de l'aire de contact entre la particule et la surface. Pour réduire cette force, il faut réduire l'aire de contact. Pour cela, des surfaces rugueuses sont adaptées. Cependant l'augmentation de la rugosité risque d'augmenter la force électrostatique par l'apparition de charges par triboélectrification. Des techniques de microfabrication sont utilisées pour maîtriser l'état de surface en produisant des rugosités contrôlées.

troisième approche (Eq. 3.5) : cette méthode repose sur l'exploitation d'un moment (de torsion dans ce cas) pour vaincre l'effet adhésif de contact. Le moment extérieur est le couple magnétique dans ce cas produit. Ce moment dépend du champ magnétique, de la magnétisation interne de la particule et de la différence d'angle entre l'orientation du champ magnétique et la direction de l'aimantation interne de l'objet ferromagnétique. Ces paramètres sont considérés pour maximiser le couple magnétique produit et montrer l'utilisation de cet effet pour surmonter l'adhésion surfacique.

Les trois solutions mentionnées ci-dessus et résumées dans le tableau 3.1 sont mises en œuvre et évaluées dans la suite du document.

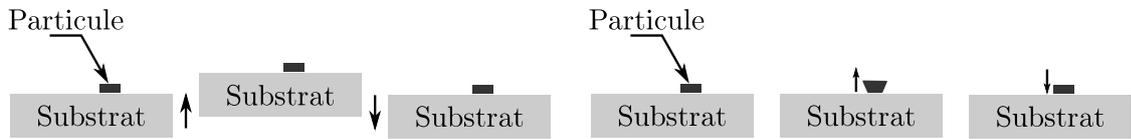
Mouvement produit	Principe	Approche
$m \cdot \ddot{z} = \mathbf{F}_{ext} \cdot \mathbf{e}_z + \mathbf{F}_{adh} \cdot \mathbf{e}_z$	augmentation de la force d'actionnement \mathbf{F}_{ext}	actionnement piézoélectrique pour produire une force selon \mathbf{e}_z
$m \cdot \ddot{x} = \mathbf{F}_{ext} \cdot \mathbf{e}_x + \mu_s \mathbf{F}_{adh} \cdot \mathbf{e}_x$	réduction des forces surfaciques \mathbf{F}_{adh}	surface contrôlée par micro-fabrication
$I_z \cdot \ddot{\theta} = \Gamma_{ext} + \Gamma_{adh}$	augmentation du couple d'actionnement Γ_{ext}	optimisation du moment magnétique produit

Tableau 3.1 - Solutions pour vaincre l'adhésion surfacique. μ_s est le coefficient de frottement de la surface.

2 Effets dynamiques pour vaincre l'adhésion

2.1 Effets dynamiques et adhésion

Plusieurs travaux dans l'état de l'art proposent des solutions pour surmonter l'adhésion surfacique. Parmi ces solutions, la dépose dynamique a montré des résultats probants. Cette méthode exploite les forces inertielles pour détacher les objets de l'outil de micro-manipulation. Cependant, les masses sont très faibles à l'échelle micrométrique. Il faut donc produire des accélérations conséquentes (jusqu'à 10^6 m.s^{-2}). Les systèmes présentés dans [Haliyo 02, Bing 11, Hagiwara 11a, Hagiwara 11c] profitent de la dynamique de l'outil ou du substrat pour vaincre l'adhésion surfacique sur des objets sphériques. Il est donc possible d'induire des déplacements à hautes fréquences soit au niveau du substrat sur lequel repose la particule, soit au niveau de la particule (Fig. 3.4).



(a) Déplacements du substrat pour rompre l'adhésion de la particule avec la surface. **(b)** Déformations de la particule pour libérer la particule de la surface.

Figure 3.4 - Accélérations perpendiculaires hors du plan de la particule pour vaincre l'adhésion : des déplacements à hautes fréquences peuvent être produits au niveau du substrat (a) ou au niveau de la particule (b). Les accélérations produites ont pour but de rompre l'adhésion de la particule avec le substrat.

Dans le cas de la micromanipulation, le déplacement du substrat engendre des déplacements indésirables des micro-objets présents. En conséquence, la solution la plus adaptée

pour créer un champ de force suffisant afin de vaincre l'adhésion est d'engendrer une dynamique forte dans l'axe vertical de la particule.

2.2 Particule magnétique et piézoélectrique

Afin de créer une force verticale importante, une couche déformable, en plus de la couche ferromagnétique, est utilisée dans la fabrication de la particule. Pour obtenir cette propriété de déformation à grande vitesse, un matériau piézoélectrique est utilisé. En effet, ces matériaux ont la propriété de se déformer lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique \mathbf{E} . En conséquence, la microparticule (Fig. 3.5) est composée de deux couches :

- une couche en matériau ferromagnétique (nickel) pour l'actionnement par le champ magnétique,
- une couche en céramique piézoélectrique en contact avec le substrat. Sous l'effet du champ électrique, elle se déforme pour vaincre les forces d'adhésion.

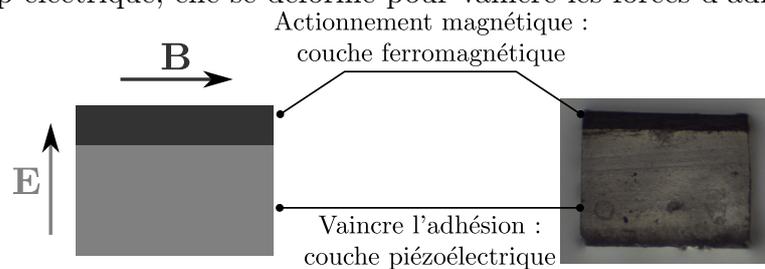


Figure 3.5 - Ajout d'une couche piézoélectrique. Cette couche se déforme en présence d'un champ électrique \mathbf{E} pour rompre l'adhésion avec la surface, la couche ferromagnétique assure l'actionnement de la particule à distance à partir du champ magnétique \mathbf{B} .

2.2.1 Matériaux piézoélectriques

Les matériaux piézoélectriques présentent un couplage électro-mécanique. Ces derniers n'ont pas de centre de symétrie et sont donc sujets aux déplacements des centres de gravité des charges positives et négatives. Une contrainte mécanique sur un matériau piézoélectrique crée un moment dipolaire, et donc une polarisation; et inversement la polarisation du matériau conduit à sa déformation [Bellouard 09]. Les matériaux piézoélectriques existent dans la nature sous forme de cristaux tel le quartz. Ils sont aussi produits industriellement sous forme de céramiques, les plus répandus sont des mélanges de plomb, zircon et titane (PZT).

Pour vaincre l'adhésion, une accélération élevée hors du plan de la particule est utilisée. Pour atteindre une telle accélération, le matériau utilisé doit produire de grandes déformations à haute vitesse. Un matériau piézoélectrique est polarisé dans une direction préférentielle. La déformation S [m] la plus importante est suivant cet axe [Bellouard 09] :

$$S = s_{33}T_3 + d_{33}E_3$$

avec s_{33} [$\text{m}^2.\text{N}^{-1}$] la complaisance élastique de l'axe polarisé, T_3 [$\text{N}.\text{m}^{-2}$] la contrainte extérieure sur le matériau, d_{33} [$\text{m}.\text{V}^{-1}$] le coefficient de déformation propre au matériau et E_3 [$\text{V}.\text{m}^{-1}$] l'amplitude du champ électrique dans la direction de l'axe polarisé du matériau. Pour obtenir une grande déformation du matériau, il faut choisir un matériau avec un grand coefficient de déformation.

Les techniques industrielles de production de céramiques piézoélectriques permettent la maîtrise de leurs propriétés comme la fréquence de résonance et l'amplitude de déformation [Régnier 08]. Ils présentent des coefficients de déformation plus élevés comparés aux cristaux piézoélectriques. La céramique piézoélectrique utilisée ici est en PMN-PT ($\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$: un composite de plomb-magnésium-niobium-titane, en raison de son coefficient piézoélectrique élevé comparé aux autres céramiques piézoélectriques (Tab. 3.2) [Ivan 11a]. La fréquence de résonance du PMN-PT est de 33 MHz. Pour une tension de 80 volts appliquée à la céramique PMN-PT, une déformation de 120 nm peut être atteinte en l'absence de contraintes externes. Il est possible d'avoir les accélérations requises pour détacher la particule du substrat [Haliyo 02].

	s_{33} [TPa^{-1}]	d_{33} [$\text{pm}.\text{V}^{-1}$]
PMN-PT	40-120	1500-3000
PZT	19-22	300-600

Tableau 3.2 - Comparaison entre les céramiques piézoélectriques commerciales les plus répandues [Ivan 11a].

2.2.2 Microfabrication des particules hybrides

L'objectif est d'obtenir une particule de taille micrométrique composée d'un matériau ferromagnétique et d'un matériau piézoélectrique. La difficulté dans la réalisation d'une particule multi-matériaux à l'échelle micrométrique est d'assurer l'adhérence entre ses différentes couches : 20 μm de nickel et 250 μm de PMN-PT. La particule est réalisée de façon similaire à la méthode introduite dans la section 1.2. Elle se résume par les étapes suivantes :

- pulvérisation d'un film nanométrique en Cr-Cu sur un substrat piézoélectrique en PMN-PT d'épaisseur de 250 μm ,
- électro-déposition d'une couche de nickel d'épaisseur de 20 μm sur la céramique PMN-PT,
- découpe à la scie à lame micrométrique en micro-échantillons.

L'objectif est de superposer une couche ferromagnétique et une couche piézoélectrique. Pour éviter la séparation de la couche Ni du PMN-PT, les contraintes mécaniques engendrées lors de la manipulation (dépôts de nickel et découpe) sont minimisées tout au long du procédé de fabrication. L'électro-déposition est donc effectuée à une vitesse lente ($<10 \mu\text{m}/\text{h}$), ainsi que la découpe à la scie.

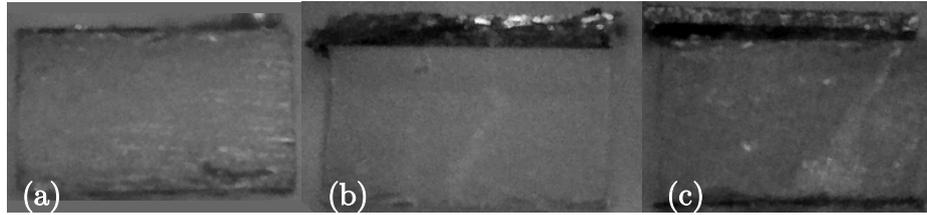


Figure 3.6 - Exemples de particules réalisées : la couche Ni s'est décollée de la couche piézoélectrique dans (a), et elle est partiellement détachée dans (b), tandis qu'elle adhère à la céramique piézoélectrique dans (c).

La figure 3.6 montre des exemples de particules réalisées avec ce procédé de micro-fabrication. Cette méthode, en dépit des précautions prises, n'est pas optimale. D'une part, plusieurs particules sont endommagées au moment de la découpe et d'autre part, la couche ferromagnétique tend à se séparer de la couche piézoélectrique.

2.3 Actionnement de la particule hybride

Le matériau piézoélectrique de la particule se déforme en présence d'un champ électrique. Une différence de potentiel U est nécessaire dans l'environnement de la particule. La particule est donc placée dans un condensateur (Fig. 3.7). Pour assurer la visualisation de la particule, les électrodes du condensateur doivent être transparentes. En l'occurrence, du verre enrobé d'une couche conductrice et transparente en ITO (Indium Tin Oxide) est utilisé.

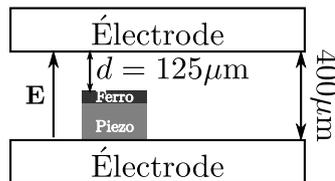


Figure 3.7 - Principe de l'actionnement piézoélectrique. Pour assurer l'actionnement piézoélectrique, la particule est placée à l'intérieur d'un condensateur. Une distance d est maintenue entre la particule et la surface supérieure du condensateur pour éviter des frottements supplémentaires avec cette dernière.

L'arène est composée de deux électrodes reliées à une source de tension. L'espace de travail de la particule est défini par un séparateur en silicium. Celui-ci maintient une distance entre les électrodes et les fils électriques peuvent être placés pour alimenter le condensateur (Fig. 3.8). Les différentes parties de l'arène sont alignées par un outil mécanique et scellées par une colle.

Pour obtenir des déplacements dans le plan, la particule est contrainte selon l'axe vertical. La distance entre les électrodes est définie par l'épaisseur du spacer. Son épaisseur est choisie légèrement supérieure à l'épaisseur de la particule ($\sim 400 \mu\text{m}$), pour contraindre la particule dans le plan sans ajouter des frottements avec la surface supérieure de l'arène.

Des hautes tensions à des fréquences élevées sont appliquées aux électrodes pour induire des déformations à hautes accélérations du matériau piézoélectrique. Cependant, les voltages utilisés peuvent induire le claquage du condensateur, étant donnée la distance d réduite entre les électrodes.

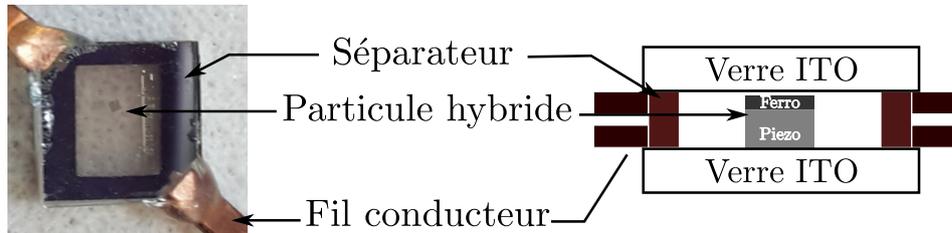


Figure 3.8 - Arène pour l'actionnement hybride. L'arène est un condensateur pour appliquer un voltage U . Afin d'assurer la détection de la particule, un verre ITO est utilisé.

La tension de claquage d'un condensateur est définie par le champ électrique maximal supporté par l'isolant diélectrique contenu dans le condensateur. Dans ce cas, l'air, le silicium et le PMN-PT sont les matériaux diélectriques du condensateur. La tension de claquage dépend de la rigidité diélectrique et de l'épaisseur du matériau soumis au champ électrique (Tab. 3.3).

Matériau	Rigidité diélectrique [$V \cdot mm^{-1}$]	Épaisseur [m]	Tension maximale [V]
Air	3×10^3	$125 \times 10^{-3} - 400 \times 10^{-3}$	375-1200
Silicium	15×10^3	400×10^{-3}	6000

Tableau 3.3 - La tension électrique maximale supportée par les isolants diélectriques contenus dans le condensateur [Tipler 87].

L'air possède la plus faible rigidité diélectrique des matériaux compris dans le condensateur (3×10^6 V/m) [Tipler 87]. Son épaisseur minimale est la distance entre la particule et l'électrode supérieure $d = 125 \mu m$. La tension maximale admise dans le condensateur est de 375 volts. Par mesure de sécurité, la tension maximale U_{max} est limitée à une valeur inférieure à celle calculée ($U_{max} = 325$ volts).

2.4 Évaluation de l'actionnement piézoélectrique

Les forces surfaciques sont prépondérantes à l'échelle micrométrique. Un objet macro-métrique situé sur une pente d'angle α est soumis à son poids et aux forces surfaciques. Si l'angle de la pente est suffisamment grand, l'objet glisse. À l'échelle micrométrique, le micro-objet placé sur une pente ne glisse pas quelque soit l'angle de l'inclinaison de la surface. Cette expérience est exploitée pour valider la contribution de l'actionnement piézoélectrique à vaincre l'adhésion surfacique. L'arène contenant la particule piézoélectrique

est placée sur un goniomètre afin de varier l'angle α d'inclinaison. Si un mouvement de la particule est observé, alors l'effet piezoélectrique a surmonté les forces d'adhésion.

Pour produire des tensions élevées à hautes fréquences, un générateur de tension suivi d'un amplificateur de tension Krohn-Hite (7602M) est utilisé. La tension maximale ainsi produite est de 240 volts à une fréquence maximale de 3 MHz. L'expérience est observée par-dessus à l'aide d'une caméra fixe. Les paramètres de l'expérience sont modifiés de la façon suivante :

- l'angle α est varié de 0° à 80° pour vérifier que la particule adhère à la surface de l'arène,
- l'angle α est fixé à 60° pour la suite de l'expérience,
- une tension d'amplitude U à une fréquence f est ensuite appliquée aux électrodes de l'arène, la tension U est augmentée par pas de 10 volts à chaque itération.

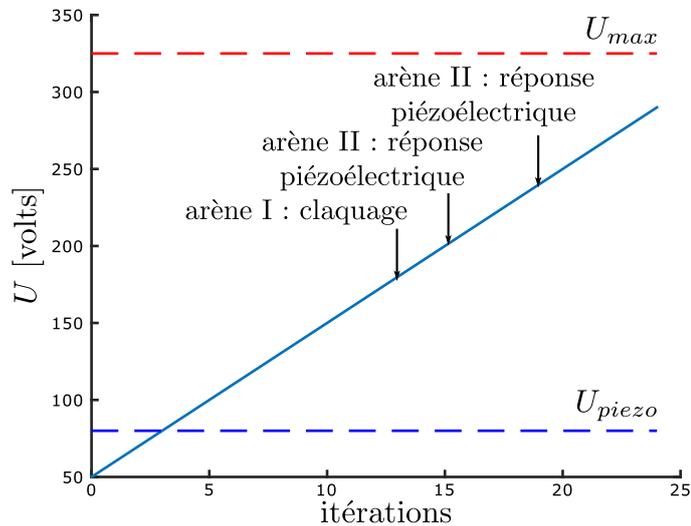


Figure 3.9 - *Expérience d'actionnement piézoélectrique. Une tension U [volts] est appliquée au condensateur à une fréquence de 3 MHz. La tension est incrémentée de 10 volts à chaque itération. La déformation de la particule pour une tension théorique U_{piezo} engendre une accélération suffisante pour vaincre l'adhésion. Les arènes risquent d'être endommagées à partir de la tension U_{max} . La première arène est détériorée pour $U=175$ volts et la particule surmonte l'adhésion pour une tension de 202 volts pour le premier test et 240 volts pour un deuxième test.*

La figure 3.9 montre les résultats obtenus pour les expériences d'actionnement piézoélectrique. La tension de claquage du condensateur est inférieure à la valeur théorique U_{max} . En réalité, cette tension dépend du taux d'humidité et de la présence de résidus dans les arènes. Les arènes risquent d'être endommagées à partir d'une tension de 160 volts (Fig. 3.10).

Par ailleurs, les tensions nécessaires pour produire des accélérations suffisantes pour rompre l'adhésion sont supérieures à 200 volts. Cette valeur n'est pas répétable. Elle diffère selon l'endroit où se trouve la particule. Les forces d'adhésion dépendent de la surface et leur impact est différent selon le point de contact.

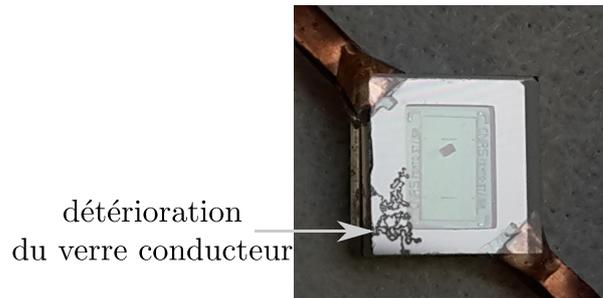


Figure 3.10 - Image d'une arène endommagée par un claquage en tension.

2.5 Conclusion

Pour vaincre l'adhésion surfacique, des grandes accélérations générées par l'effet piézo-électrique sont exploitées. Cependant, cette méthode pour rompre l'adhésion est complexe à mettre en œuvre avec différentes contraintes expérimentales :

- la fabrication : la couche Ni se sépare de la couche PMN-PT au moment de la découpe. Le taux des particules obtenues défectueuses est important ($\sim 60\%$),
- l'actionnement : les tensions requises sont importantes (supérieures à 200 volts),
- la tension de claquage : l'environnement de l'arène n'est pas contrôlé. L'humidité et la présence de possibles résidus diminuent la tension maximale supportée par le condensateur. Le claquage, induit par les tensions élevées et la distance réduite, endommage l'arène et détériore la particule.

Les difficultés de réalisation de cette méthode empêche l'exploitation réaliste d'un actionnement hybride piézoélectrique et magnétique pour vaincre l'adhésion. Cette solution n'est plus considérée dans la suite de ce travail.

3 Substrat amélioré pour réduire l'adhésion

En réduisant l'échelle de travail, les forces surfaciques deviennent prédominantes et perturbent les systèmes microrobotiques. Ces forces sont liées aux propriétés du substrat, notamment, son matériau et son état de surface. Un des moyens de minimiser ces forces d'adhésion est de modifier la surface du substrat en exploitant des surfaces contrôlées.

En considérant la prédominance de la force de van der Waals, il faut choisir un matériau avec une constante d'Hamaker réduite et limiter l'aire de contact entre la particule et la surface en augmentant sa rugosité. Cependant, l'augmentation de la rugosité augmente les frottements secs et les phénomènes de triboélectrification et donc augmente la force électrostatique. Un autre moyen pour minimiser les forces électrostatiques est d'utiliser des matériaux conducteurs ou semi-conducteurs de manière à dissiper les charges locales. L'objet de cette partie est donc de proposer la surface la plus adéquate pour réduire l'adhésion surfacique entre la particule et la surface.

3.1 Rugosité

La rugosité dépend de la topologie de la surface. Elle est le résultat des ondulations, stries et sillons présents sur la surface. Elle augmente avec la fréquence de ces paramètres et leurs profondeurs (amplitudes). Pour quantifier sa valeur, des indicateurs statistiques peuvent être exploités. L'indicateur utilisé dans ce document est l'écart moyen quadratique du profil R_q . Il se calcule pour un profil d'amplitude $z(p)$ sur une longueur L comme suit :

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L |z(p) - \bar{z}|^2 dp}. \quad (3.6)$$

avec \bar{z} la moyenne de l'amplitude du profil de la surface.

Dans ce travail le profil d'une surface est obtenu par une des deux techniques suivantes :

- **profilomètre mécanique** : ce dispositif utilise un stylet relié à un capteur. Le stylet se déplace le long de la surface de l'échantillon. Il mesure des rugosités inférieures à $1 \mu\text{m}$. Cette technique atteint une résolution spatiale de 15 à 100 nm et une résolution verticale de 0.1 à 1 nm. Cependant, le profilomètre mécanique est en contact direct avec la surface et risque de l'endommager. Les mesures au profilomètre mécanique sont effectuées à FEMTO-ST, avec le profilomètre 'Tencor Alpha Step IQ'.
- **microscopie optique** : elle englobe plusieurs techniques. Celle utilisée ici est l'holographie. L'amplitude du relief d'une surface est obtenue par l'intermédiaire de la phase d'un signal lumineux. Ceci peut être réalisé en introduisant des décalages de phases connus entre les deux faisceaux provenant respectivement de l'échantillon et d'un miroir de référence. Ce système mesure des rugosités inférieures à $1 \mu\text{m}$. La microscopie optique atteint une résolution spatiale allant de $0.5 \mu\text{m}$ à 1 mm et une résolution verticale allant de 0.02 à 25 nm. Toutefois, cette méthode nécessite des surfaces réfléchissantes. Le microscope utilisé dans ce travail est le Lyncée Tec Reflection DHM (Digital Holography Microscope), situé à l'ISIR.

La figure 3.11 montre un exemple de profil d'une surface en silicium obtenu par un profilomètre mécanique.

La rugosité augmente avec l'importance du relief de la surface et sa fréquence. Pour obtenir des surfaces avec des rugosités contrôlées, la solution adoptée dans ce travail est de produire des reliefs micrométriques sur la surface de façon contrôlée. Les méthodes de microfabrication sont adaptées pour incruster des motifs réguliers sur une surface. Pour limiter les forces électrostatiques, il est préférable d'utiliser des substrats conducteurs. Cependant ils ne sont pas très utilisés dans la microfabrication. En revanche, le silicium est un semi-conducteur fréquemment exploité dans les méthodes de microfabrication.

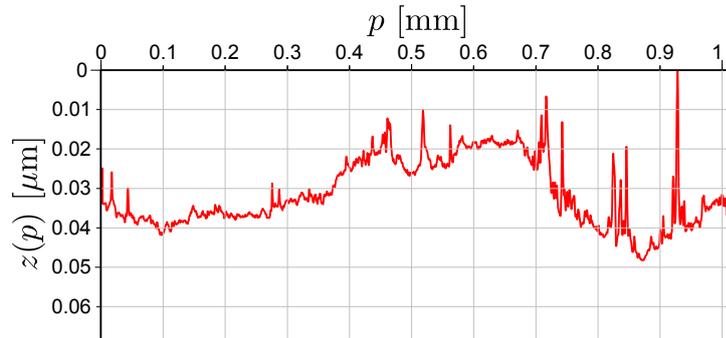
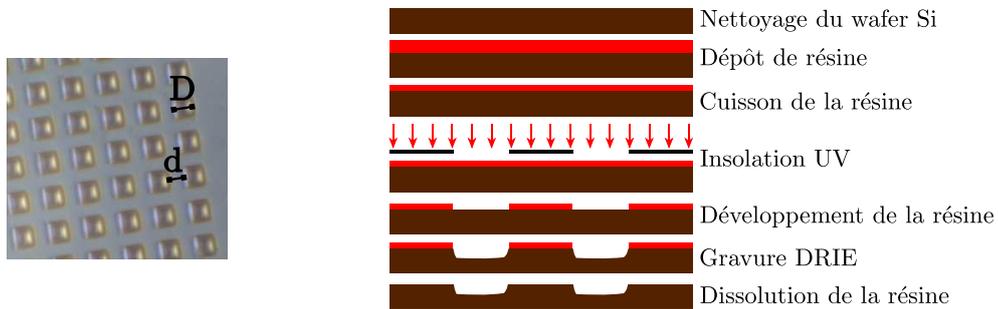


Figure 3.11 - Mesure du profil d'une surface en verre à l'aide d'un profilomètre mécanique. L'amplitude du profil de la surface $z(p)$ [μm] est mesurée sur une distance totale $L = 1$ mm.

3.2 Réalisation des surfaces contrôlées

Pour produire des surfaces avec des micromotifs, des procédés de microfabrication en salle blanche sont utilisés. La figure 3.12(a) montre une surface incrustée de motifs carrés de $8 \mu\text{m}$ de côté espacés de $7 \mu\text{m}$.



(a) Exemple d'une surface avec des motifs carrés.

(b) Procédé de microfabrication.

Figure 3.12 - Exemple d'une surface avec des motifs carrés, $D=8 \mu\text{m}$ est la largeur du motif et $d=7 \mu\text{m}$ est la distance entre deux motifs (a). Cette surface est produite par le procédé de microfabrication présenté dans (b).

Le procédé de microfabrication de ces surfaces, schématisé dans la figure 3.12(b), est basé sur la lithographie et la DRIE (gravure ionique réactive profonde). Les étapes du procédé de microfabrication sont les suivantes :

- une couche de résine photosensible est déposée sur le wafer en Si par enduction centrifuge,
- le wafer est maintenu sur une plaque chauffante le temps de cuisson de la résine,
- le wafer est exposé à des rayons UV (UltraViolet) à travers un masque avec les motifs désirés,

- la résine irradiée est dissoute par le développement de résine dans une solution basique,
- la DRIE, une procédure de gravure par bombardement ionique en présence d'un gaz fluoré, est utilisée pour graver les motifs avec une profondeur de $11\ \mu\text{m}$,
- l'excès de résine est nettoyé avec un solvant.

La figure 3.13 montre le profil d'une surface obtenue par le procédé décrit ci-dessus. Les motifs incrustés ont des parois évasées dues à la technique de gravure adoptée.

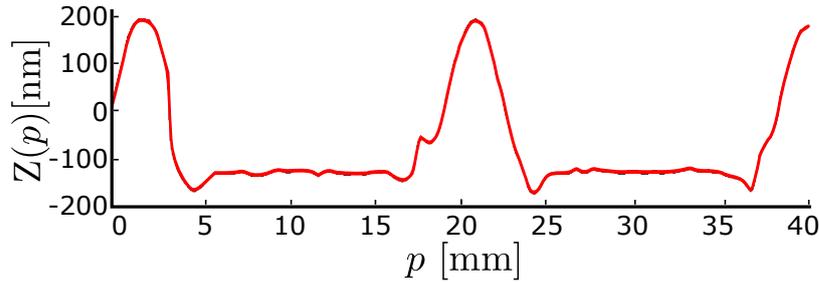


Figure 3.13 - Profilomètre d'une surface Si incrustée de motifs carrés. Le profil des surfaces est établi par une mesure par holographie. Cette méthode repose sur la réflexion de l'échantillon observé. Le Si absorbe une partie des ondes holographiques, la calibration de la mesure est difficile à mettre en oeuvre. La mesure de la profondeur des motifs ne reflète pas la profondeur effective du motif qui est de $11\ \mu\text{m}$.

3.3 Mesure des forces surfaciques sur les surfaces contrôlées

Afin d'évaluer les forces surfaciques que subit la particule sur un substrat, un capteur d'effort est utilisé. La force nécessaire, \mathbf{F}_{ext} , pour déplacer la particule suivant l'axe \mathbf{e}_x équivaut à la force surfacique si le poids est négligeable :

$$\mathbf{F}_{ext} \cdot \mathbf{e}_x = \mu_s \mathbf{F}_{adh} \cdot \mathbf{e}_x - m\ddot{x}$$

Cet ordre de grandeur donne une idée de la force magnétique nécessaire pour actionner la particule sur le substrat considéré.

3.3.1 Dispositif expérimental

L'objectif est de mesurer la force nécessaire pour pousser une particule sur une surface donnée. Afin de mesurer des forces à l'échelle micrométrique, un capteur commercial "FT-S1000" (de FemtoTools [femto tools 15]) est utilisé. Ce capteur mesure des forces de l'ordre du nano Newton (10^{-9}) au milli Newton (10^{-3}), selon son axe principal, avec une résolution de $0.5\ \mu\text{N}$ à une fréquence de 1 KHz et de $0.05\ \mu\text{N}$ à une fréquence de 10 Hz. Il possède un gain de mesure de $500\ \mu\text{N.V}^{-1}$.

Le capteur de forces micrométriques est placé sur une platine de translation. La sonde du capteur possède une épaisseur de $50\ \mu\text{m}$ supérieure à l'épaisseur des microparticules ferromagnétiques. En conséquence, les mesures de force sont effectuées pour un bloc en céramique piézoélectrique d'une épaisseur de $250\ \mu\text{m}$, de largeur $318\ \mu\text{m}$ et de longueur $441\ \mu\text{m}$. La figure 3.14 schématise l'expérience de mesure des forces surfaciques.

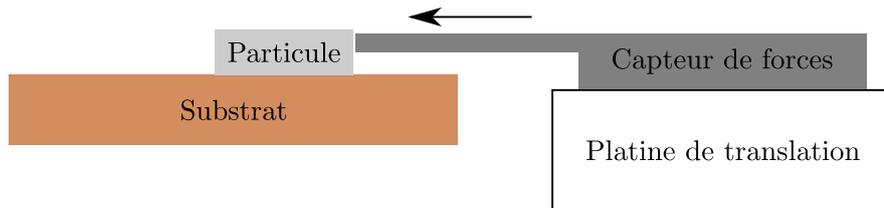


Figure 3.14 - *Mesure de la force surfacique. La particule en contact avec une surface est poussée par un capteur d'effort. Les forces surfaciques dues à l'interaction entre la particule et la surface sont ainsi mesurées.*

Afin de vérifier que le contact entre la particule et le capteur d'effort est effectif, l'expérience est observée par une caméra munie d'un objectif (Fig. 3.15).

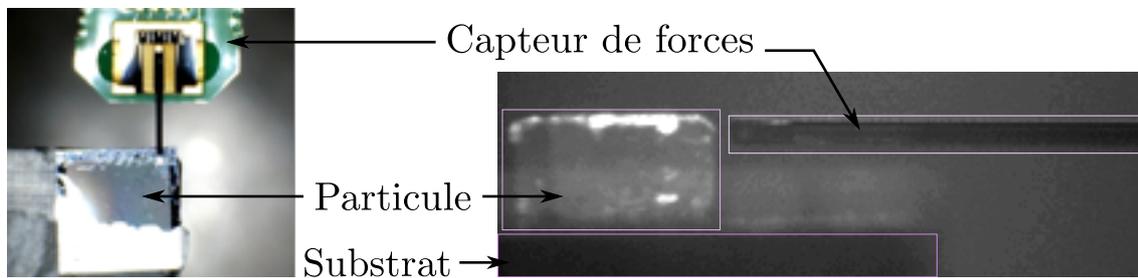


Figure 3.15 - *À droite, la vue de haut du capteur en contact avec la particule. L'image est obtenue par un microscope optique. À gauche, l'observation de la particule et du capteur, pour vérifier l'existence d'un contact entre la pointe du capteur et de la particule et la planéité du contact entre la particule et la surface.*

L'expérience de mesure des forces se déroule de la façon suivante :

- nettoyage du substrat,
- dépôt de la particule sur la surface du substrat,
- alignement de la particule et de la sonde du capteur,
- approche grossière du capteur avec la platine,
- début de l'enregistrement des mesures,
- déplacement du capteur à une vitesse constante.

3.3.2 Résultats des mesures des forces surfaciques

Les forces surfaciques sont mesurées pour deux surfaces et les mesures sont reproduites six fois sur chaque surface. La figure 3.16 montre les résultats de mesures des forces surfaciques pour les substrats suivants :

- **Substrat I** : une surface en silicium polie avec une rugosité $R_q = 0.3 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}$ selon l'équation 3.6,
- **Substrat II** une surface en silicium avec un motif carré d'une largeur $5 \mu\text{m}$ et une distance de $15 \mu\text{m}$ entre les motifs, sa rugosité vaut $R_q = 4.8 \mu\text{m}$ (Eq. 3.6).

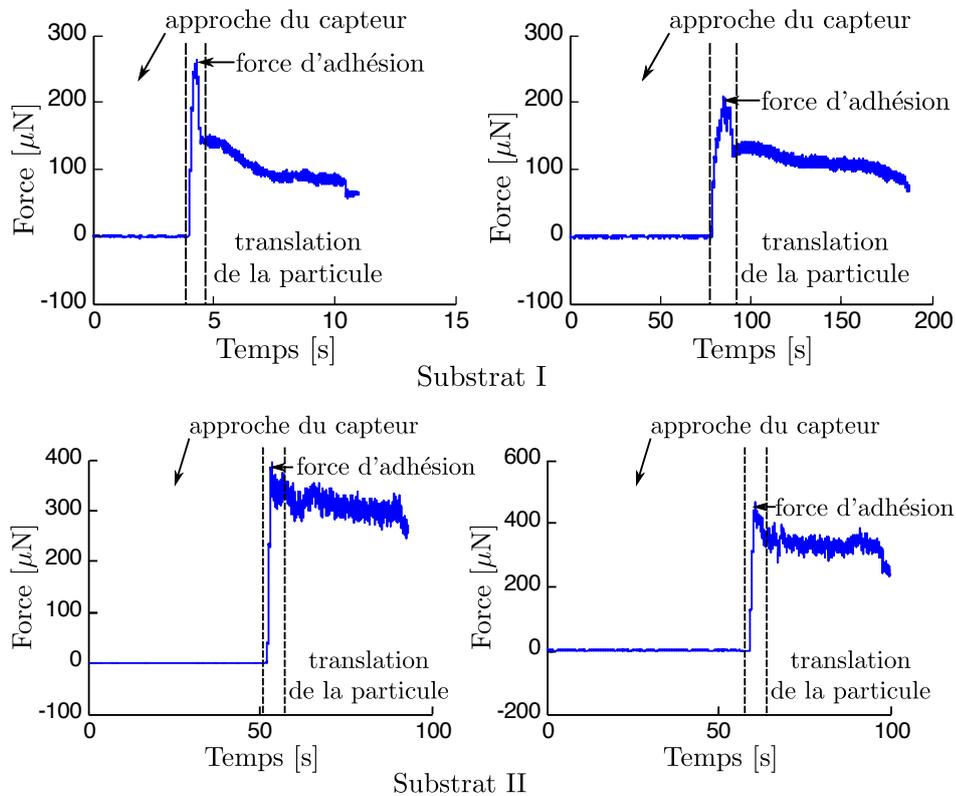


Figure 3.16 - Mesure des forces nécessaires pour pousser une particule sur un substrat donné.

Les mesures des forces par le capteur d'effort sont répétables pour les substrat I et II (Fig. 3.16). L'enregistrement de la mesure des forces commence avant le contact avec la particule. Les mesures commencent donc à une valeur nulle. Les forces d'adhésion sur une surface lisse sont d'environ $250 \mu\text{N}$ et sont supérieures aux forces de la friction dynamique. Par ailleurs, les forces d'adhésion sur une surface à rugosité (substrat II) sont supérieures aux forces d'adhésion relevées sur une surface lisse. La rugosité diminue l'aire de contact entre la particule et la surface. Ceci limite les forces de van der Waals. Cependant, la rugosité augmente les forces électrostatiques à cause des charges présentes par triboélectrification.

L'actionnement magnétique de la particule sera donc plus répétable sur une surface lisse comparée aux autres surfaces. Le paragraphe suivant s'attache à vérifier cette hypothèse.

3.4 Actionnement magnétique sur les surfaces contrôlées

Pour évaluer l'effet de la rugosité et la conductivité de la surface sur le comportement d'une particule ferromagnétique, plusieurs surfaces, présentées dans le tableau 3.4, sont expérimentées.

Surface	I	II	III	IV	Référence
Forme du motif	Cercle	Carré	Carré	–	–
D [μm]	25	12	5	–	–
d [μm]	5	8	15	–	–
Matériau		Si		Si Polie	Verre
Propriété électrique		Semi-conducteur			Isolant
Rq [μm]	4.1	5.4	4.8	$0.8 \cdot 10^{-3}$	$0.3 \cdot 10^{-3}$

Tableau 3.4 - Paramètres des surfaces expérimentées. D est la dimension du motif tandis que d est la distance entre les motifs.

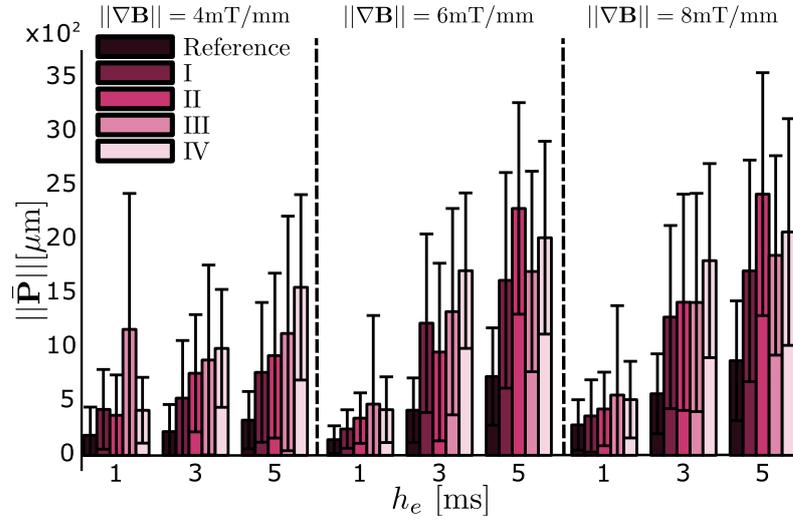
Les quatre surfaces en Si, semi-conductrices, sont évaluées avec la même particule en nickel de taille $295.7 \times 410 \mu\text{m}^2$. Une surface non-conductrice en verre, la surface de référence, est utilisée avec une particule en Ni de taille $300 \times 470 \mu\text{m}^2$. La rugosité d'une surface est quantifiée par la rugosité quadratique moyenne R_q (Eq. 3.6). L'expérience suivante, similaire à celle produite dans la section 4.2 du chapitre 2, est exploitée pour évaluer les surfaces en silicium. Le déplacement de la particule est relevé pour différentes valeurs du signal d'entrée ($\|\nabla\mathbf{B}\|$, h_e) :

- $\|\nabla\mathbf{B}\|$ varie de 4 mT/mm à 8 mT/mm par pas de 2 mT/mm,
- h_e varie de 1 ms à 5 ms par pas de 2 ms.

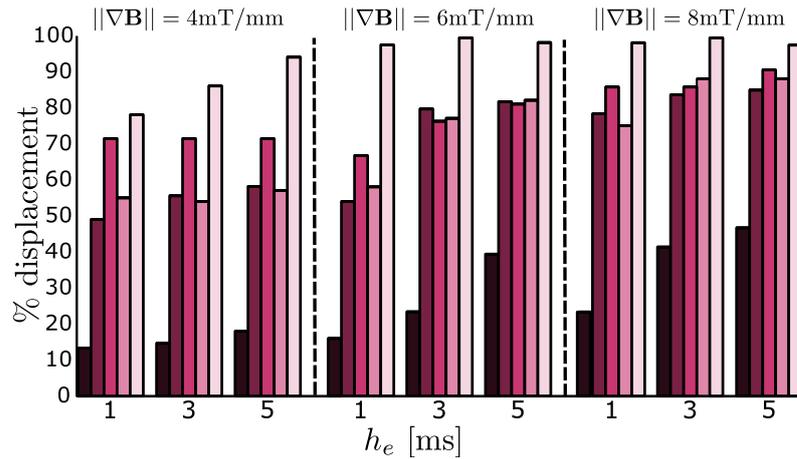
Un signal en entrée ($\|\nabla\mathbf{B}\|$, h_e) est appliqué 150 fois, la réponse de la particule $\|\mathbf{P}\|$ [μm] est mesurée pour chaque envoi du signal.

La figure 3.17(b) montre que le pourcentage de déplacements de la particule augmente avec l'intensité du gradient du champ magnétique et sa durée d'application. Il augmente aussi avec la réduction de la rugosité de la surface.

La surface en verre, un isolant électrique, présente le pourcentage de déplacements le plus faible (15% à 42%). En revanche les substrats en Si, un semi conducteur, sont plus adéquats pour l'actionnement d'une microparticule. Par ailleurs, la rugosité participe à la présence de forces électrostatiques par l'effet de triboélectrification. La surface en Si polie (surface IV), a une rugosité et une résistance électrique réduites. Cette surface garantit le pourcentage de déplacements le plus élevé parmi les surfaces expérimentées (80% à 100%).



(a) Variation de la moyenne des amplitudes de déplacements en fonction du signal en entrée $\|\nabla \mathbf{B}\|$ et h_e .



(b) Variation du pourcentage d'occurrence de déplacements en fonction du signal en entrée $\|\nabla \mathbf{B}\|$ et h_e .

Figure 3.17 - Effet de la rugosité et du matériau de la surface sur le pourcentage et l'amplitude de déplacements de la particule.

La moyenne des amplitudes de déplacements $\|\bar{\mathbf{P}}\|$, dans la figure 3.17(a), augmente avec le signal en entrée ($\|\nabla \mathbf{B}\|$ et h_e). Cependant, l'écart type des amplitudes de déplacements est important (la moitié de la moyenne des déplacements sur 150 tests pour le même signal en entrée) quelque soit la surface expérimentée.

3.5 Conclusion

Les propriétés de la surface de contact influencent l'actionnement de la particule, en particulier sa rugosité et son matériau. Les forces surfaciques dépendent des propriétés de

la surface. Les force de van der Waals augmentent avec l'aire de contact entre la particule et la surface, tandis que les forces électrostatiques augmentent avec la présence de charges statiques. L'utilisation d'une surface rugueuse réduit l'aire de contact mais augmente les charges électriques par l'effet de triboélectrification. Une surface sans rugosité est plus adaptée pour améliorer la répétabilité de l'actionnement dans le cadre de l'échelle de ce travail. Le matériau choisi est aussi important. Une surface isolante électriquement présente des charges statiques. Ceci réduit la répétabilité de l'actionnement de la particule en raison des forces électrostatiques.

Une surface semi-conductrice et polie en Si est adaptée pour améliorer l'occurrence de l'actionnement de la particule mais l'amplitude de déplacements de la particule n'est pas répétable. Un contrôle en boucle fermée de la position de la particule reste nécessaire pour un positionnement précis.

4 Actionnement pour rompre l'adhésion surfacique

Les expériences d'actionnement de la particule en boucle ouverte sur une surface sans traitement particulier montrent que la particule adhère fréquemment à la surface. Pour asservir en position la particule, il est important d'optimiser l'actionnement pour s'affranchir de l'adhésion de la particule à la surface.

Dans les sections précédentes des solutions pour surmonter l'adhésion sont proposées et évaluées. Ces solutions reposent sur l'augmentation de la force d'actionnement hors du plan de la particule et sur la réduction des forces surfaciques dans le plan de la particule. La dernière solution, présentée dans cette section, repose sur le couple magnétique. L'actionnement de la particule est adapté pour produire un moment magnétique maximal pour rompre l'adhésion avec la surface.

4.1 Couple magnétique et adhésion

4.1.1 Principe de l'actionnement pour rompre l'adhésion

Pour amorcer le déplacement de la particule il faut produire une force \mathbf{F}_m et un moment \mathbf{T}_m magnétiques plus importants que la force \mathbf{F}_{adh} et le moment $\mathbf{\Gamma}_{adh}$ surfaciques. \mathbf{T}_m dépend du champ magnétique et \mathbf{F}_m dépend du gradient de champ magnétique. Pour augmenter le moment et la force magnétiques, il suffit d'augmenter le champ magnétique et le gradient du champ magnétique. Cependant, à une distance d d'un électroaimant, l'intensité du champ magnétique décroît selon d^{-3} et le gradient du champ magnétique décroît selon d^{-4} [Abbott 09]. En conséquence, il est plus approprié d'augmenter le moment magnétique. Son équation s'écrit :

$$\mathbf{T}_m = \mathbf{VM} \times \mathbf{B} \quad (3.7)$$

avec \mathbf{M} le vecteur de magnétisation interne de la particule et V le volume de la particule.

Dans le cas des matériaux ferromagnétiques doux, la particule s'aimante en présence du champ magnétique. Le vecteur de magnétisation d'une particule, avec un axe de symétrie suivant sa dimension la plus longue, est assimilé à son axe de symétrie [Abbott 07b]. Dans le cas des particules utilisées, le vecteur de la magnétisation suit l'axe de la longueur de la particule comme montré dans la figure 3.18. Le moment magnétique tend à aligner le vecteur magnétisation suivant la direction du champ magnétique sous l'hypothèse que son orientation est variée lentement par rapport à l'axe de la longueur de la particule.

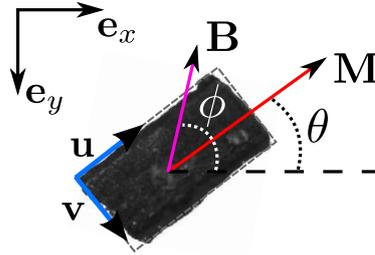


Figure 3.18 - Magnétisation de la particule. Le vecteur de magnétisation interne de la particule est considéré suivant l'axe \mathbf{u} , l'axe de la dimension la plus importante de la particule lorsqu'elle est soumise à un champ magnétique avec une orientation ϕ .

L'aimantation interne s'écrit :

$$\mathbf{M} = \|\mathbf{M}\| [\cos(\theta) \sin(\theta)]^T$$

Le champ magnétique est nul dans le plan des bobines. Selon l'équation 3.7, le moment magnétique s'exprime donc par :

$$\mathbf{T}_m = V \|\mathbf{B}\| \|\mathbf{M}\| (\cos(\theta)\sin(\phi) - \sin(\theta)\cos(\phi))\mathbf{e}_z$$

$\|\mathbf{B}\|$ [mT] est l'amplitude du champ magnétique. L'objectif est d'augmenter le moment magnétique appliqué à la particule. Il est nécessaire d'augmenter la norme du moment magnétique : qui peut se simplifier comme suit :

$$\|\mathbf{T}_m\| = V \|\mathbf{B}\| \|\mathbf{M}\| |\sin(\phi - \theta)|$$

Le moment magnétique dépend donc des paramètres $\|\mathbf{B}\|$ et ϕ . Il s'annule pour un champ magnétique avec une orientation $\phi = \theta$, dans le cas d'une orientation similaire à l'orientation de la particule.

4.1.2 Premières validations expérimentales

Le moment magnétique dépend de l'intensité du champ magnétique et de la différence entre son orientation et celle de l'aimantation de la particule. Pour une orientation du

champ magnétique différente de l'orientation de la particule, l'amplitude nécessaire pour actionner la particule est théoriquement plus faible que dans le cas où son orientation est similaire à l'orientation de la particule. Afin de valider cette hypothèse, l'expérience de la figure 3.19 est réalisée. Elle consiste à appliquer un champ magnétique à la position de la particule avec les orientations ϕ suivantes :

- cas (a) : une orientation parallèle à l'orientation de la particule ($|\phi - \theta| = \frac{\pi}{18}$)
- cas (b) : une orientation différente de l'orientation de la particule ($|\phi - \theta| = \frac{\pi}{3}$)

L'amplitude du champ magnétique dans les deux cas est incrémenté par pas de 5 mT. La valeur qui provoque le déplacement de la particule est relevée. Cette dernière est placée sur une surface en verre sans traitement particulier.

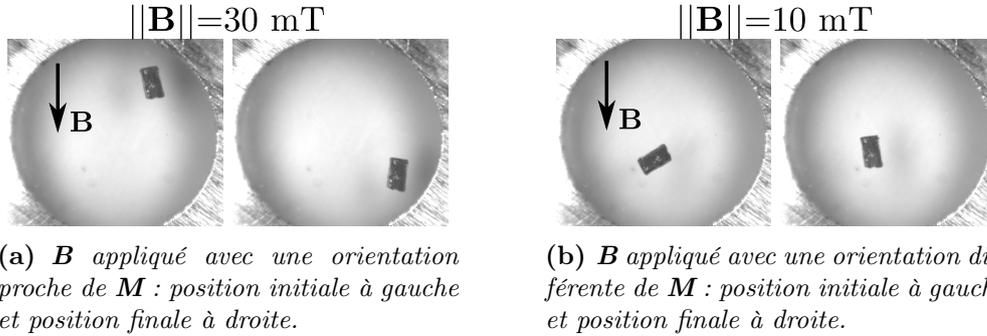


Figure 3.19 - Effet de l'orientation de la particule : La particule est actionnée pour un champ magnétique d'amplitude $||\mathbf{B}||=30 \text{ mT}$ (a) et pour un champ magnétique d'amplitude $||\mathbf{B}||=10 \text{ mT}$ (b).

Dans le premier cas (a), l'intensité du champ magnétique pour produire le mouvement (une translation) de la particule mesurée est $||\mathbf{B}||=30 \text{ mT}$. Dans le second cas (b), son mouvement (une rotation) est engendré pour un champ magnétique d'une plus faible intensité ($||\mathbf{B}||=10 \text{ mT}$) que dans le premier cas. Il semble ainsi adéquat d'utiliser le moment magnétique pour vaincre l'adhésion surfacique sans augmenter le champ magnétique produit.

L'actionnement proposé consiste à amorcer le mouvement de la particule par une rotation puis à utiliser les forces magnétiques pour déplacer la particule.

4.2 Détermination des paramètres d'actionnement

Afin de modifier l'orientation de la particule, un champ magnétique avec une orientation désirée est appliqué à la position de la particule. Cependant, le champ magnétique et le gradient de champ magnétique produits sont corrélés. L'orientation la particule peut aussi induire sa translation. Ces translations perturbent le système si elles sont très importantes.

L'intensité du champ magnétique, son orientation et sa durée d'application doivent être choisies pour amorcer le mouvement de la particule sans affecter sa position initiale.

4.2.1 Orientation de la particule

L'objectif est de modifier l'orientation de la particule. Celle-ci suit la direction du champ magnétique, sous l'hypothèse que la différence entre l'orientation de l'axe principal de particule et celui du champ magnétique permet l'aimantation suivant cet axe. Pour orienter la particule de θ_{min} , l'orientation du champ magnétique correspondante est : $\phi = \theta + \theta_{min}$. L'angle θ_{min} nécessaire pour détacher la particule est déterminé expérimentalement. Différentes valeurs de θ_{min} sont expérimentées pour déterminer la plus adéquate pour rompre l'adhésion de la particule utilisée avec la surface.

Par ailleurs, la translation de la particule augmente avec la durée d'application du champ magnétique h_{min} et son amplitude $\|\mathbf{B}\|$. Pour minimiser les déplacements en translation, il faut minimiser l'intensité du gradient du champ magnétique et donc le champ magnétique appliqué. $\|\mathbf{B}\|$ et h_{min} sont choisis de façon à orienter la particule d'un angle θ_{min} tout en minimisant sa translation.

L'angle θ_{min} correspond à la différence d'angle entre le champ magnétique et l'axe privilégié de magnétisation de la particule. La particule possède un axe de symétrie. L'angle peut donc varier de 0° à 180° . De plus, le matériau de la particule est un ferromagnétique doux. Son aimantation interne prend la direction du champ magnétique. Des valeurs d'angle θ_{min} variant de 0° à 90° représentent les différents cas possibles de magnétisation de la particule, lorsqu'elle est soumise à un champ magnétique d'une orientation $\phi = \theta + \theta_{min}$.

L'expérience itérative suivante est exploitée pour déterminer les paramètres θ_{min} , h_{min} et $\|\mathbf{B}\|$. Pour évaluer l'angle d'orientation θ_{min} adéquat pour rompre l'adhésion, sa valeur est variée de 15° à 90° par pas de 15° . Chacune de ces valeurs est appliquée avec une durée h_{min} variant de 0.5 ms à 1.5 ms par pas de 0.5 ms. Deux cents itérations sont effectuées selon le processus suivant :

- application d'un champ magnétique avec une orientation $\phi = \theta_i + \theta_{min}$ et une intensité $\|\mathbf{B}\|$,
- si la particule adhère à la surface, l'amplitude $\|\mathbf{B}\|$ est incrémentée.

Les paramètres θ_{min} et h_{min} sont considérés si l'amplitude du champ magnétique $\|\mathbf{B}\|$ converge au bout de 150 itérations et pour une valeur inférieure à 35 mT. Cette limite est imposée pour réduire la consommation électrique des bobines.

La figure 3.20 montre l'évolution de l'amplitude $\|\mathbf{B}\|$ en fonction des itérations pour les paramètres θ_{min} et h_{min} expérimentés. Les paramètres θ_{min} , h_{min} retenus sont évalués dans la section suivante. En particulier, la translation de la particule qu'ils engendrent est étudiée.

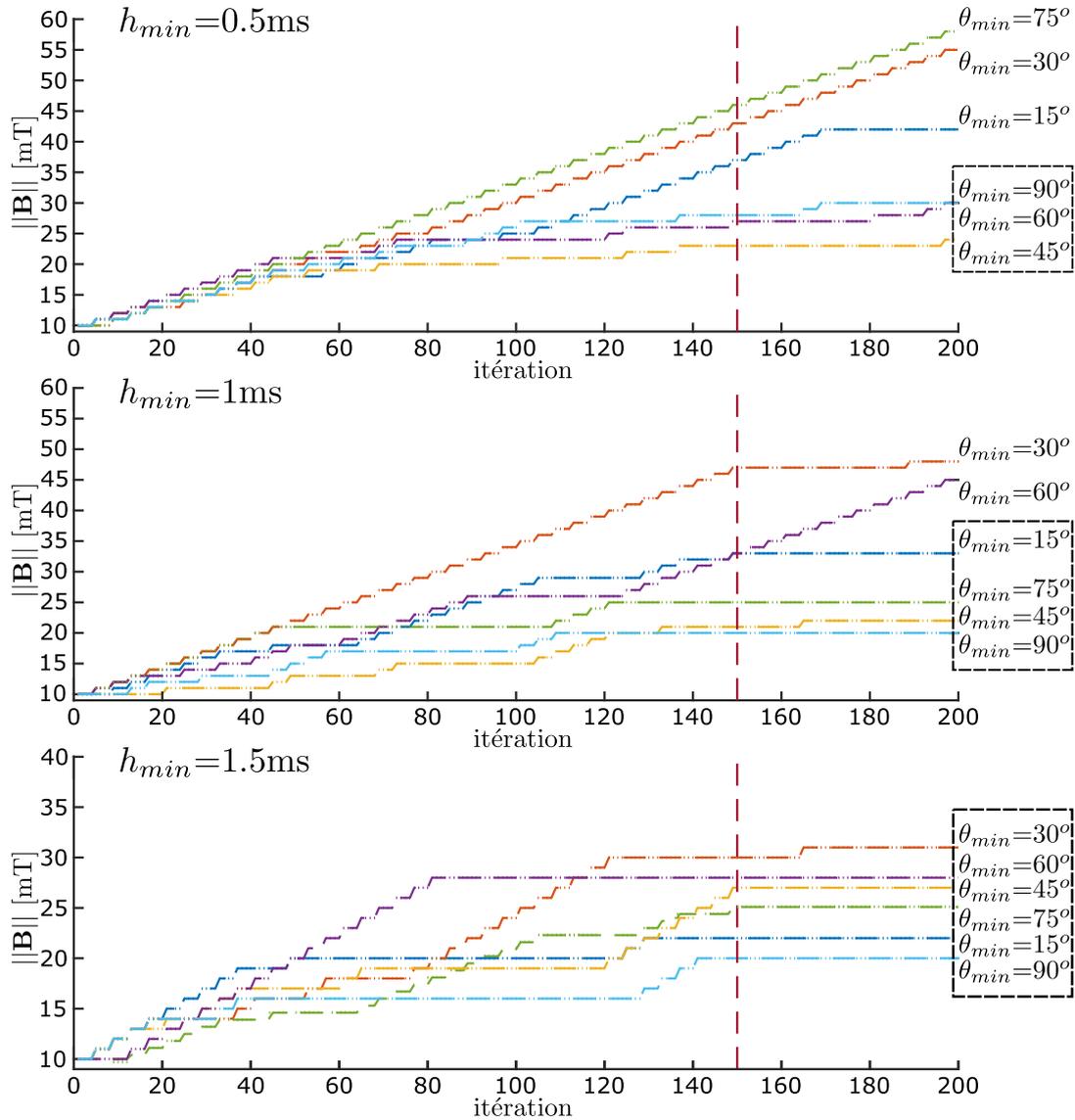


Figure 3.20 - Détermination des paramètres θ_{min} et h_{min} selon le critère de convergence de l'amplitude $\|\mathbf{B}\|$. Les angles θ_{min} retenus sont encadrés.

4.2.2 Translation de la particule

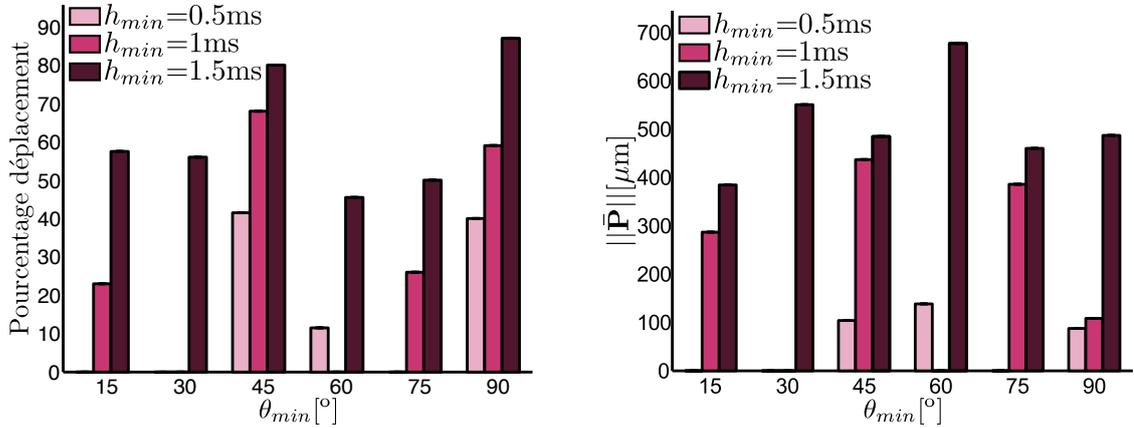
L'actionnement proposé a pour but de rompre l'adhésion surfacique par la rotation de la particule sans influencer sa position.

Les paramètres θ_{min} et h_{min} retenus pour rompre l'adhésion sont évalués dans l'expérience suivante. La translation de la particule entraînée par l'application du couple magnétique avec une orientation θ_{min} pendant h_{min} est mesurée :

- pour un couple donné θ_{min} et h_{min} : le couple magnétique correspondant (d'une intensité $\|\mathbf{B}\|$ et une orientation $\phi = \theta + \theta_{min}$) est appliqué 200 fois avec un temps

d'attente de 1 s entre chaque application du couple magnétique,

- le changement d'orientation et l'amplitude de déplacements sont relevés pour chaque application du couple.



(a) Pourcentage de déplacements sur 200 tests pour les différents θ_{min} et h_{min} .

(b) Moyenne des amplitudes de déplacements sur 200 tests pour les différents θ_{min} et h_{min} .

Figure 3.21 - Evaluation des paramètres θ_{min} et h_{min} obtenus selon le critère de convergence de l'amplitude $\|\mathbf{B}\|$.

La figure 3.21 montre le pourcentage de déplacements et la moyenne des amplitudes de déplacements pour les paramètres θ_{min} et h_{min} retenus. Le pourcentage de déplacements est plus important dans le cas où l'orientation de la particule est modifiée de 45° (80%) ou de 90° (87%). Le temps d'application du signal dans les deux cas est de $h_{min} = 1.5$ ms. Par ailleurs, la moyenne des amplitudes de déplacements dans ces deux cas est d'environ $500 \mu\text{m}$.

4.3 Méthode d'actionnement

Afin de valider la contribution du moment magnétique à vaincre l'adhésion surfacique, l'actionnement par l'application d'une force magnétique seulement est comparé à celui d'un couple magnétique suivi d'une force magnétique. Le protocole suivant est répété 100 fois :

- la force magnétique, d'intensité proportionnelle à $\|\nabla\mathbf{B}\| = 4 \text{ mT/mm}$, est appliquée sur la particule,
- le déplacement de la particule est relevé,
- un temps d'attente de 1 s est respecté,
- le moment magnétique correspondant aux paramètres déterminés ($\theta_{min} = 90^\circ$ et $h_{min} = 1.5$ ms) est appliqué à la particule suivi de la même force magnétique proportionnelle à $\|\nabla\mathbf{B}\| = 4 \text{ mT/mm}$,
- le déplacement de la particule est relevé.

Méthode d'actionnement	% de déplacements	$\ \bar{\mathbf{P}}\ [\mu\text{m}]$	$\sigma_{\ \mathbf{P}\ }[\mu\text{m}]$
\mathbf{F}_m	66	158	239
\mathbf{T}_m ensuite \mathbf{F}_m	95	613	348

Tableau 3.5 - Comparaison entre un actionnement par la force magnétique uniquement et l'actionnement pour rompre l'adhésion. $\|\bar{\mathbf{P}}\|$ et $\sigma_{\mathbf{P}}$ sont respectivement la moyenne des déplacements et leur écart type.

Le pourcentage de déplacements obtenu pour l'application de la force magnétique seulement est de 66 % contre 95 % pour l'application de la même force magnétique précédée du couple pour détacher la particule (Tab. 3.5). Il faut aussi noter que la moyenne des amplitudes de déplacements augmente de 500 μm en moyenne, dans le cas d'un actionnement en couple magnétique suivi d'une force magnétique.

4.4 Conclusion

L'adhésion de la particule à la surface perturbe l'actionnement de la particule. Pour détacher la particule, un moment magnétique est utilisé dans cette partie pour engendrer un phénomène de torsion pour vaincre l'adhésion. Le moment magnétique dépend de l'intensité du champ magnétique et de son orientation par rapport à l'aimantation de la particule. L'optimisation de ces deux paramètres maximise le couple magnétique produit pour vaincre les forces d'adhésion.

Cette solution ne nécessite pas un champ magnétique élevé et ouvre des solutions nouvelles pour vaincre l'adhésion surfacique. Cependant, elle entraîne des déplacements de l'ordre de 500 μm qui restent à corriger dans le cas d'un asservissement en position. Une loi de commande en boucle fermée est ainsi proposée dans le chapitre suivant.

5 Comparaison et conclusion

Pour asservir la particule en position, il est important d'actionner la particule de façon répétable. Les forces surfaciques sont prédominantes dans le milieu ambiant à l'échelle micrométrique. Pour assurer un actionnement répétable, il faut vaincre les forces surfaciques. Les trois approches proposées pour améliorer la répétabilité de l'actionnement sont résumées dans le tableau 3.6.

La première solution repose sur des accélérations à haute dynamique produites par l'effet piézoélectrique. Cependant, cette méthode pour rompre l'adhésion est complexe à mettre en œuvre. Les difficultés de réalisation de cette méthode empêchent l'exploitation réaliste d'un actionnement hybride piézoélectrique et magnétique pour vaincre l'adhésion.

Méthode	Principe	%	Limites
Augmentation de la force d'actionnement :	Actionnement hybride :		
	<ul style="list-style-type: none"> • Champ électrique : produit une contrainte piézo-électrique pour détacher la particule de la surface, • Champ magnétique : produit des déplacements suivant le champ magnétique. 	—	Couteuse à mettre en oeuvre. Claquage fréquent de l'arène.
Substrat contrôlé :	Réduction des forces surfaciques :		
	<ul style="list-style-type: none"> • Forces électrostatiques : substrat semi-conducteur, • Friction statique et dynamique : réduction de la rugosité par polissage du substrat. 	100%	Dépendance au substrat.
Maximisation du moment magnétique :	Augmenter le moment magnétique pour détacher la particule :		
	<ul style="list-style-type: none"> • Moment magnétique : pour orienter la particule et rompre ainsi l'adhésion éventuelle avec le substrat, • Force magnétique : pour produire les translations de la particule. 	95%	Ajoute des déplacements de la particule qui restent à corriger par une commande en boucle fermée.

Tableau 3.6 - Résumé des méthodes utilisées pour réduire l'adhésion de la particule à la surface afin d'améliorer la répétabilité de l'actionnement dans le milieu ambiant.

La seconde approche pour améliorer la répétabilité de l'actionnement considère les propriétés du substrat sur lequel repose la particule, en particulier sa rugosité et son matériau. En effet, les forces surfaciques augmentent avec l'aire de contact entre la particule et la surface par le biais des forces de van der Waals. Les forces surfaciques augmentent aussi avec les forces électrostatiques. L'utilisation d'une surface rugueuse réduit l'aire de contact mais augmente les charges électriques par l'effet de triboélectrification. Une surface sans rugosité et conductrice est plus adaptée pour améliorer la répétabilité de l'actionnement dans le cadre de l'échelle de ce travail.

La dernière approche propose d'augmenter l'intensité de l'actionnement ponctuellement pour rompre l'adhésion. Le moment magnétique est utilisé pour engendrer un phénomène de torsion pour vaincre l'adhésion. En effet, le couple magnétique dépend de l'intensité

du champ magnétique et son orientation par rapport à l'aimantation de la particule. L'optimisation de ces deux paramètres maximise le couple magnétique pour vaincre les forces d'adhésion. Le déplacement de la particule est ensuite obtenu à partir de la force magnétique.

Les deux dernières méthodes permettent d'améliorer significativement la répétabilité d'actionnement de 42% à, respectivement, 100% et 95%. Cependant la répétabilité du déplacement n'est pas assurée. Une commande en boucle fermée pour assurer un asservissement en position précis doit être implémentée.

Approche de commande en boucle fermée par train d'impulsions

Le chapitre précédent a mis en avant des solutions visant à accroître la répétabilité de l'actionnement magnétique dans le milieu ambiant. Elles sont fondées sur une étude des forces d'adhésion. Ces solutions garantissent un actionnement répétable de la particule. Cependant, la précision du positionnement et de la rotation n'est pas assurée. Une méthode de translation et de rotation de la particule magnétique garantissant la précision dans le milieu sec est proposée dans cette partie. La démarche scientifique consiste à s'affranchir d'un modèle de connaissance et à adopter une approche "système" appropriée dans le cas de déplacements incertains et fortement dépendant aux conditions environnementales. Elle repose sur l'identification du champ d'actionnement à distance et la réponse de la particule à ce dernier de façon expérimentale.

L'actionnement adopté dans ce travail a la particularité d'être inertiel. Le mouvement de la particule est produit non pas par un courant continu¹ mais par un train d'impulsions de courant électrique. Cette solution possède l'avantage de limiter l'échauffement excessif des bobines, en plus de son intérêt à pouvoir entraîner une particule dans un milieu sec. L'amplitude ainsi que la durée d'une impulsion de courant électrique influencent le comportement de la particule. L'architecture de commande est adaptée pour contrôler l'amplitude et la durée d'impulsions pour un positionnement précis de la particule. Il est convenient donc d'identifier le comportement de la particule en réponse aux deux entrées du système. La mesure de position est réalisée en temps réel par un retour visuel. Elle est par la suite utilisée dans la commande en boucle fermée.

1. L'utilisation d'un courant continu est une approche communément adoptée dans la littérature.

La méthode proposée n'est pas fondée sur un modèle de connaissance précis. Cependant, elle présente les avantages suivants : (i) elle est systématique, pouvant être appliquée à de nombreux systèmes magnétiques cités dans la littérature, (ii) elle est robuste aux conditions initiales (position initiale de la particule), (iii) elle s'intègre aisément dans un calcul temps réel et (iv) elle est adaptée et efficace dans le cas d'un retour visuel peu rapide.

Cette partie présente en premier lieu les enjeux de la commande à l'échelle micrométrique et l'approche choisie en particulier dans le contrôle du système introduit dans ce travail. Une étude du comportement de la particule est ensuite effectuée dans un cas particulier de déplacements. Une loi de commande pour ce cas particulier est implémentée et évaluée. Enfin, la loi de commande est généralisée à l'ensemble des degrés de liberté du système.

1 Automatique pour la microrobotique et positionnement du problème

La microrobotique est un cadre d'étude particulièrement intéressant pour l'automatique. Les problématiques liées au facteur d'échelle ne requiert pas de nouvelles études théoriques centrées autour de la microrobotique mais nécessitent une réflexion sur le système et l'architecture de commande adaptée. En effet, contrairement à la robotique conventionnelle, la microrobotique se distingue par (i) des mécanismes d'actionnement non-linéaires avec des bandes passantes élevées généralement supérieures à 1 kHz, (ii) des signaux de mesures à très faibles amplitudes favorisant un faible rapport signal/bruit, (iii) une sensibilité particulièrement importante aux vibrations externes et (iv) une forte dépendance aux conditions environnementales telles que la température, l'humidité et la pression atmosphérique.

Des approches de commande robustes au sens LTI/ H_∞ et LPV/ H_∞ ou non-linéaires telles que le backstepping [Ezal 00] et les modes glissants [Sira-Ramirez 02] ont été largement étudiées dans la littérature et sont adaptées en microrobotique. Cependant, elles nécessitent un modèle de connaissance.

Le système microrobotique dédié à l'environnement ambiant faisant l'objet de la thèse, présente en plus des problématiques citées, la particularité d'être incertain et d'être tributaire de phénomènes multiphysiques couplés et peu stationnaires. Il en résulte une complexité particulière à obtenir un modèle de connaissance fidèle et précis.

A ce titre, la première méthode pourrait s'appuyer sur des approches de commandes basée sur les réseaux de neurones ou la logique floue. Ces commandes peuvent être adaptées dans l'absolu à n'importe quel système nonlinéaire et/ou incertain mais elles ne considèrent aucunement sa nature physique et son principe de fonctionnement. Cela conduit naturellement à une forme de conservatisme. Notre approche est foncièrement différente et

suggère une stratégie de commande plus intuitive et basée sur le mode de fonctionnement du système étudié.

1.1 Cahier des charges et démarche scientifique

Afin de répondre aux besoins de positionnement à distance, le système en boucle fermée doit satisfaire le cahier des charges suivant :

- la précision de positionnement doit être inférieure ou égale à $50 \mu\text{m}$ (4 fois plus petite que celle relatée dans l'état de l'art actuel),
- le temps de réponse doit être inférieur à 5 périodes d'acquisition de la caméra ($T_s = 100 \text{ ms}$),
- la commande doit être robuste vis à vis de la position initiale de la particule et des conditions environnementales.

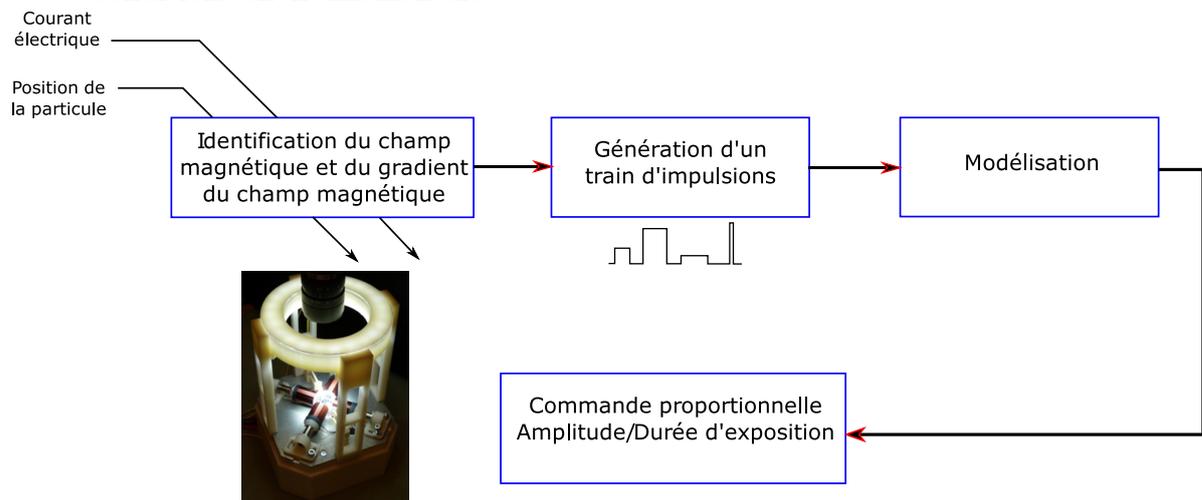


Figure 4.1 - Schéma illustrant la démarche scientifique adoptée pour la synthèse de la commande.

La démarche scientifique adoptée pour la synthèse de la commande est la suivante (représentée dans la figure 4.1) :

Étape 1 : identification du champ magnétique et du gradient du champ magnétiques en fonction du courant électrique et de la position de la particule. L'identification du champ magnétique est déterminée pour chaque bobine séparément dans la section 2.4 du chapitre 2. Elle est généralisée à l'ensemble de la plateforme magnétique dans la suite de ce chapitre.

Étape 2 : génération du mouvement de la particule par un train d'impulsions de courant électrique.

Étape 3 : modélisation du comportement de la particule en réponse à l'amplitude du courant électrique et sa durée d'application.

Étape 4 : synthèse d'un correcteur proportionnel amplitude/durée du courant électrique.

1.2 Modélisation linéaire du comportement de la particule

La translation \mathbf{P} et la rotation θ de la particule sont produites par la force magnétique \mathbf{F}_m et le moment magnétique \mathbf{T}_m . Ces derniers dépendent du gradient du champ magnétique $\nabla\mathbf{B}$ (Eq. 4.1) et du champ magnétique \mathbf{B} (Eq. 4.2), produits par le courant électrique d'amplitude i_e et appliqué pendant un temps h_e . Ils s'écrivent :

$$\mathbf{F}_m = V(\mathbf{M} \bullet \nabla)\mathbf{B} \quad (4.1)$$

$$\mathbf{T}_m = V\mathbf{M} \times \mathbf{B} \quad (4.2)$$

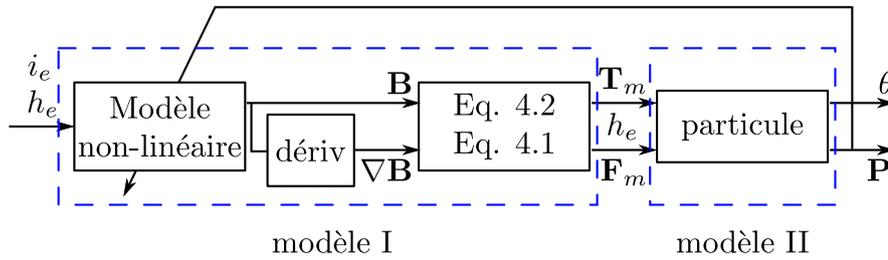


Figure 4.2 - Schéma de principe de la modélisation. L'impulsion de courant d'amplitude i_e et de durée d'application h_e en entrée de la plateforme d'actionnement produit une force et un moment magnétiques. Ces derniers induisent le déplacement de la particule.

L'ensemble du système microrobotique (Fig. 4.2) est de type MIMO (multi-entrées et multi-sorties). Il possède huit entrées et trois sorties :

- les entrées du système sont : pour chaque bobine, le courant électrique d'amplitude i_e et de durée d'application h_e ,
- les sorties du système sont : la position $\mathbf{P} = [x \ y]^T$ et la rotation θ de la particule.

Sans perte de généralités, la rotation et la translation de la particule sont considérées découplées. Dans la suite de l'étude, l'attention est portée, en premier lieu, sur la translation de la particule \mathbf{P} . L'orientation et le moment magnétique sont ainsi négligés. Le nombre de sorties du système est réduit à deux dans ce cas.

Pour établir la relation entre la translation de la particule \mathbf{P} et les entrées du système (i_e, h_e) , les éléments à identifier sont :

- la force magnétique \mathbf{F}_m produite par la plateforme magnétique dans l'espace de travail en fonction du courant électrique (i_e, h_e) . Ce transfert $\mathbf{F}_m/(i_e, h_e)$ est défini par le modèle I,
- la translation de la particule \mathbf{P} en fonction de la force magnétique \mathbf{F}_m et sa durée d'application h_e . Le modèle II définit le transfert $\mathbf{P}/(\mathbf{F}_m, h_e)$.

La relation entre le gradient du champ magnétique et la position de la particule dans l'espace de travail est non-linéaire. Le modèle I est ainsi non-linéaire. En revanche, le transfert $\mathbf{P}/(\mathbf{F}_m, h_e)$ est considéré linéaire. Il est plus adapté de commander le système

avec les variables \mathbf{F}_m et h_e (Fig. 4.3). Pour appliquer une force magnétique de référence \mathbf{F}_{ref} , l'inverse du modèle I est utilisée pour calculer le courant électrique nécessaire. Cette inversion est facile à mettre en œuvre en raison de la proportionnalité du modèle I par rapport au courant électrique.

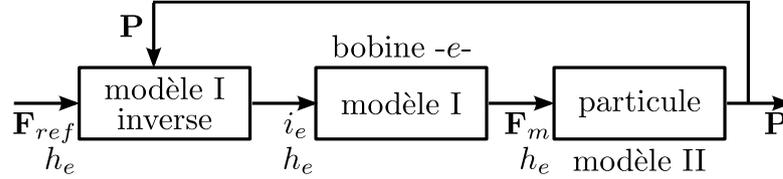


Figure 4.3 - Commande en boucle ouverte du système avec en entrée la force magnétique et sa durée d'application. En négligeant les erreurs de modélisation du modèle I : $\mathbf{F}_{ref} = \mathbf{F}_m$.

2 Actionnement à un degré de liberté

Dans un premier temps, pour étudier le comportement de la particule, le déplacement de la particule est considéré restreint à des translations suivant un seul axe à la fois.

La force magnétique \mathbf{F}_m dépend du gradient du champ magnétique $\nabla \mathbf{B}$ et de l'aimantation interne de la particule \mathbf{M} . Son équation est donnée par l'équation 4.1. Le gradient du champ magnétique dérive du champ magnétique. Il est nécessaire de connaître le champ magnétique produit par la plateforme d'actionnement. Dans la section 2.4 du chapitre 2, le modèle du champ magnétique est établi pour chaque bobine e en fonction de la position de la particule dans l'espace de travail et du courant électrique i_e :

$$B_* = {}^e P_{jk}(x, y) i_e$$

B_* est la composante du champ magnétique selon x ou y . P_{jk} est un polynôme d'ordre j suivant x et d'ordre k suivant y .

La plateforme d'actionnement comptant quatre bobines, le courant en entrée de la plateforme est défini par le vecteur $\mathbf{I} = [i_0 \ i_1 \ i_2 \ i_3]^T$. Le champ magnétique identifié s'exprime en fonction du vecteur du courant comme suit :

$$\begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^0 P_{32}(x, y) & {}^1 P_{22}(x, y) & {}^2 P_{32}(x, y) & {}^3 P_{22}(x, y) \\ {}^0 P_{22}(x, y) & {}^1 P_{23}(x, y) & {}^2 P_{22}(x, y) & {}^3 P_{23}(x, y) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix}$$

La translation de la particule est considérée suivant un seul axe \mathbf{e}_x ou \mathbf{e}_y . La composante du champ magnétique tangentielle à l'axe (\mathbf{n}_e) d'une bobine e est de ce fait négligeable :

$$B_{\perp \mathbf{n}_e} = 0$$

Le champ magnétique se simplifie ainsi comme suit :

$$\begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^0P_{32}(x, y) & 0 & {}^2P_{32}(x, y) & 0 \\ 0 & {}^1P_{23}(x, y) & 0 & {}^3P_{23}(x, y) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

L'aimantation interne de la particule \mathbf{M} est alignée avec le champ magnétique. Elle est dans la direction de la bobine actionnée ($\mathbf{M} = \|\mathbf{M}\|\mathbf{n}_e$). La force magnétique \mathbf{F}_m se déduit des équations 4.3 et 4.1 telle que :

$$\mathbf{F}_m = \mathbf{G}_r(\mathbf{P})\mathbf{I} \quad (4.4)$$

$\mathbf{G}_r(\mathbf{P})$ est la matrice réduite qui représente le modèle I dans le cas de l'actionnement restreint à un seul degré de liberté. Elle s'écrit donc :

$$\mathbf{G}_r(\mathbf{P}) = V\|\mathbf{M}\| \begin{pmatrix} \frac{\partial({}^0P_{32}(x,y))}{\partial x} & 0 & \frac{\partial({}^2P_{32}(x,y))}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial({}^1P_{23}(x,y))}{\partial y} & 0 & \frac{\partial({}^3P_{23}(x,y))}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

Connaissant la direction du déplacement et son axe, la bobine à actionner e est déterminée. Les composantes du courant \mathbf{I} , i_e sont nulles, exceptée pour la bobine actionnée. Sa valeur est donnée par l'inversion de $\mathbf{G}_r(\mathbf{P})$. La figure 4.4 présente le schéma bloc du transfert statique $\mathbf{P}/\mathbf{F}_{ref}$ en boucle ouverte.



Figure 4.4 - Système en boucle ouverte pour appliquer une force magnétique désirée à la position de la particule.

La limitation de l'étude à un seul degré de liberté considère que la force est suivant un axe : $\mathbf{F}_m = [0 \ F_y]^T$ ou $\mathbf{F}_m = [F_x \ 0]^T$. La force magnétique est proportionnelle à la valeur du gradient du champ magnétique ($F_* \propto \|\nabla\mathbf{B}\|$). Par conséquent, les entrées de commande peuvent également être : $\|\nabla\mathbf{B}\|$ et h_e . Cette convention est adoptée dans la suite de l'étude du comportement de la particule.

3 Étude expérimentale du mouvement de la particule

L'objectif est de définir une loi de comportement statique entre les entrées ($\|\nabla\mathbf{B}\|$, h_e) et la sortie x ou y . L'intérêt ici est porté sur le déplacement y de la particule dans une seule direction (i.e une seule bobine actionnée $e=1$). Les résultats peuvent aisément être interpolés dans l'autre direction de l'axe \mathbf{e}_y ainsi que dans le cas où le déplacement est suivant l'axe \mathbf{e}_x .

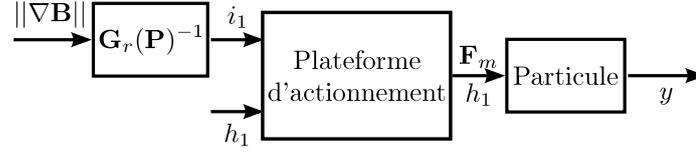


Figure 4.5 - Translation de la particule y produite par $\|\nabla\mathbf{B}\|$ et h_1 en entrée de la plateforme d'actionnement.

Pour étudier la linéarité du système en fonction des deux entrées $\|\nabla\mathbf{B}\|$ et h_e , le système MIMO est décomposé en sous systèmes SISO (une entrée et une sortie). La linéarité du système MIMO global (Fig. 4.5) est assurée si chacun de ses sous systèmes est linéaire [Rakotondrabe 07], à savoir :

- le déplacement de la particule est proportionnel au gradient du champ magnétique :
 $y \propto \|\nabla\mathbf{B}\| \ (\forall h_1)$
- le déplacement de la particule est proportionnel à la durée d'application :
 $y \propto h_1 \ (\forall \|\nabla\mathbf{B}\|)$

L'étude de la linéarité est basée sur des tests expérimentaux.

3.1 Protocole expérimental

Le déplacement y de la particule est mesuré pour différentes valeurs en entrée de la bobine actionnée. La position x initiale de la particule est limitée à une zone de travail qui est définie autour l'axe de la bobine (\mathbf{n}_1) ($\pm 600 \mu\text{m}$ autour de l'axe \mathbf{n}_1). En effet, les mesures du champ magnétique (Sect. 2.4 Chap. 2) montrent que la composante $B_{\perp\mathbf{n}_e}$ est négligeable comparée à la composante axiale $B_{\parallel\mathbf{n}_e}$, dans cette zone. La particule est placée sur une surface en silicium polie, pour profiter de la répétabilité de l'actionnement magnétique (Sect. 3 Chap. 3).

Les valeurs en entrée de la bobine sont choisies comme suit :

- $\|\nabla\mathbf{B}\|$ varie de 0.5 mT/mm à 4.5 mT/mm par pas de 0.5 mT/mm,
- h_1 varie de 0.5 ms à 3.5 ms par pas de 0.5 ms.

Le déplacement y est la différence entre les positions initiales et finales de la particule. Afin d'assurer la fin de course de la particule, une durée temporelle de 1 s est respectée entre l'application du signal et la mesure de la position de la particule. L'application d'un signal ($\|\nabla\mathbf{B}\|$, h_1) donné est répétée 10 fois. En raison de la faible répétabilité de déplacement de la particule, la valeur du déplacement retenue est la moyenne, notée \bar{y} [μm], des 10 mesures relevées.

La figure 4.6 illustre la moyenne du déplacement \bar{y} et son écart type en fonction du gradient du champ magnétique $\|\nabla\mathbf{B}\|$. Le déplacement de la particule est négligeable si le gradient est sous le seuil $\|\nabla\mathbf{B}_{of}\|=1.5 \text{ mT/mm}$. Le déplacement engendré par un gradient du champ magnétique supérieur à $\|\nabla\mathbf{B}_{sat}\|=3 \text{ mT/mm}$ dépasse les limites de

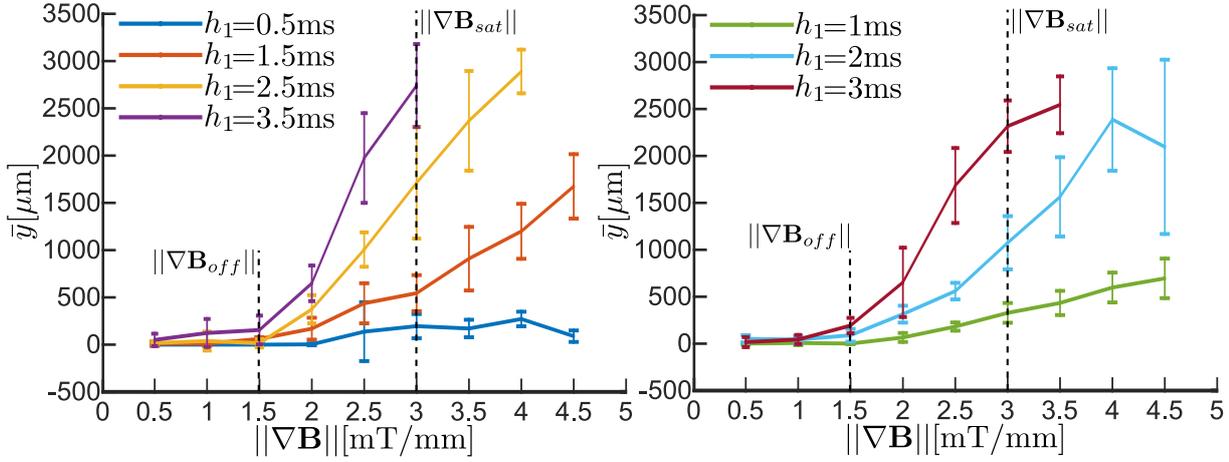


Figure 4.6 - Moyenne du déplacement \bar{y} et son écart type représentés en fonction de $\|\nabla \mathbf{B}\|$. Chaque courbe est représentée pour une durée h_1 constante et $\|\nabla \mathbf{B}\|$ variant.

l'espace de travail. En revanche, les déplacements produits pour une durée h_1 constante, et pour des valeurs de $\|\nabla \mathbf{B}\|$ comprises entre $\|\nabla \mathbf{B}_{off}\|$ et $\|\nabla \mathbf{B}_{sat}\|$, sont proportionnels au gradient du champ magnétique. Le déplacement de la particule est donc linéaire par rapport au gradient du champ magnétique sous l'hypothèse que sa valeur est limitée à $\|\nabla \mathbf{B}_{sat}\|$ et supérieure à $\|\nabla \mathbf{B}_{off}\|$.

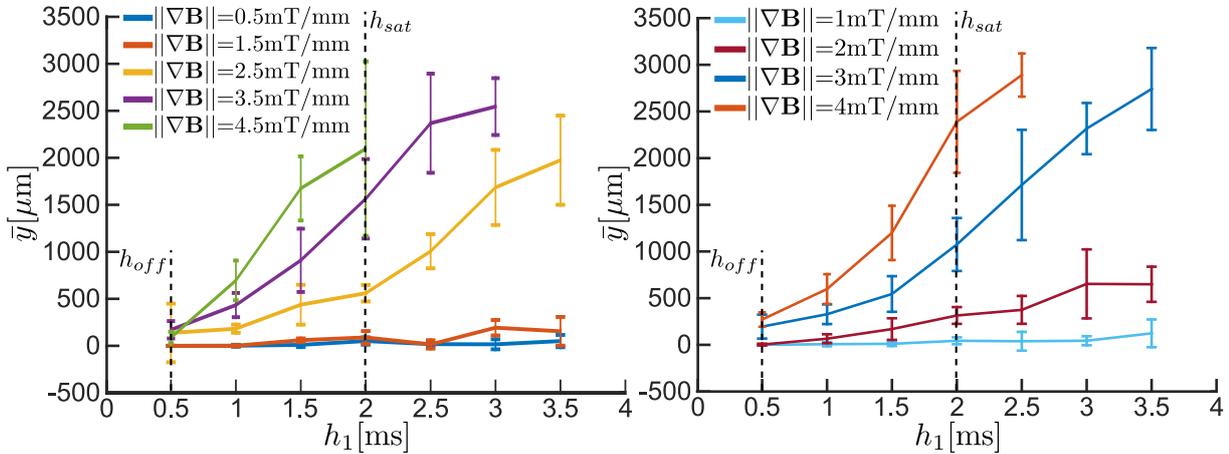


Figure 4.7 - Moyenne du déplacement et son écart type représentés en fonction de h_1 . Chaque courbe est représentée pour un $\|\nabla \mathbf{B}\|$ constant, tandis que la durée d'application h_1 varie.

La figure 4.7 représente la moyenne du déplacement \bar{y} et son écart type en fonction de h_1 . Le déplacement de la particule est négligeable si la valeur h_1 est inférieure à la valeur $h_{off}=0.5\text{ ms}$. De plus, le déplacement engendré par une durée d'application h_1 supérieure à $h_{sat}=2.5\text{ ms}$ dépasse les limites de l'espace de travail. De façon similaire au gradient, les déplacements pour des valeurs de h_1 comprises entre h_{off} et h_{sat} sont proportionnels au gradient du champ magnétique. Le déplacement de la particule est donc linéaire par

rapport à la durée h_1 sous l'hypothèse que sa valeur est comprise entre h_{sat} et h_{off} .

Le sous système avec en entrée la durée h_1 et en sortie le déplacement y , ainsi que le sous système avec en entrée la durée $\|\nabla\mathbf{B}\|$ et en sortie le déplacement y , sont linéaires. Le déplacement de la particule varie donc linéairement par rapport aux deux entrées du système $\|\nabla\mathbf{B}\|$ et h_1 . Un modèle permettant de représenter le comportement de la particule est proposé et évalué dans la suite.

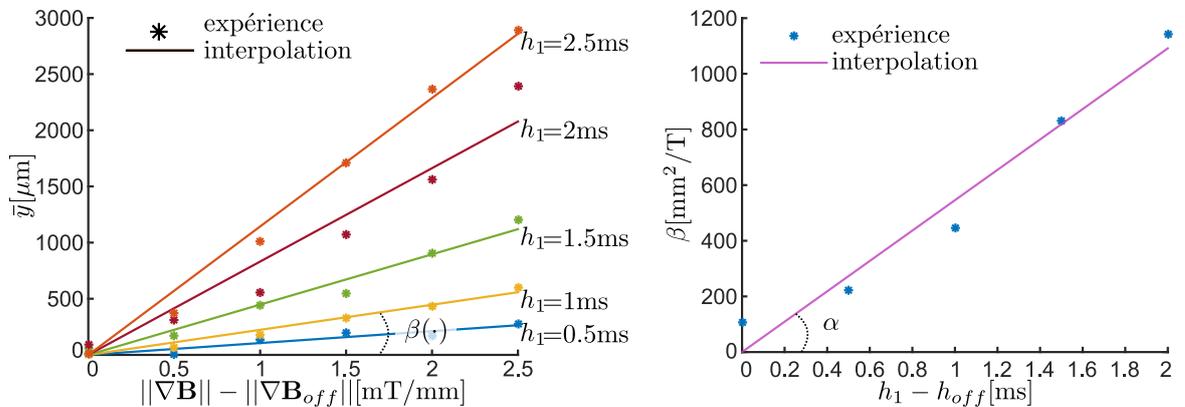
3.2 Identification de la réponse de la particule

Le déplacement de la particule est proportionnel à $\|\nabla\mathbf{B}\|$ et h_1 , sous l'hypothèse qu'ils sont compris respectivement entre $\|\nabla\mathbf{B}_{off}\|$, $\|\nabla\mathbf{B}_{sat}\|$ et h_{off} , h_{sat} .

Le déplacement de la particule peut s'écrire comme suit :

$$\begin{cases} y = 0 & \text{si } \|\nabla\mathbf{B}\| < \|\nabla\mathbf{B}_{off}\| \text{ ou } h_1 < h_{off} \\ y = \alpha \cdot (\|\nabla\mathbf{B}\| - \|\nabla\mathbf{B}_{off}\|) \cdot (h_1 - h_{off}) & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.6)$$

Pour caractériser le modèle de déplacement de la particule (Eq. 4.6), la valeur α est déterminée à partir de l'interpolation linéaire des données expérimentales.



(a) Interpolation de la moyenne des déplacements en fonction du gradient. (b) Détermination de β en fonction de la durée d'impulsion.

Figure 4.8 - Identification du comportement de la particule en fonction de $\|\nabla\mathbf{B}\|$ et h_1 à partir des données expérimentales. Les valeurs $\beta(\cdot)$, dans la figure (a), sont les coefficients de proportionnalité du déplacement en fonction du gradient du champ magnétique, pour chaque durée d'application h_1 . Ces valeurs sont interpolées en fonction de la durée d'application dans la figure (b).

La figure 4.8 illustre les résultats de l'identification du modèle présenté dans l'équation 4.6. Le déplacement \bar{y} en réponse au gradient du champ magnétique (Fig. 4.8(a)) est d'abord identifié pour chaque valeur de h_1 . Les coefficients de proportionnalité β des

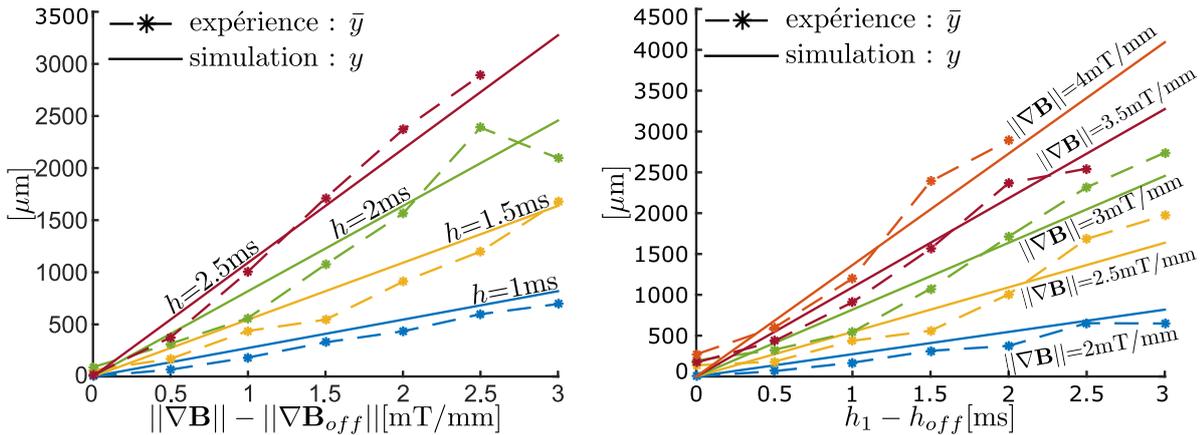
courbes obtenues sont par la suite interpolées en fonction de h_1 (Fig 4.8(b)). La pente de cette dernière est la valeur de α .

Les valeurs identifiées pour le modèle (Eq. 4.6) sont :

- $\alpha=545 \text{ mm}^2/\text{T}$,
- $h_{off}=0.5 \text{ ms}$,
- $\|\nabla\mathbf{B}_{off}\|=1.5 \text{ mT/mm}$.

3.3 Validation du modèle identifié

Afin de valider le modèle identifié précédemment, les données expérimentales utilisées dans l'identification sont comparées à celles prédites par le modèle (i.e. celles données par l'équation 4.6).



(a) Déplacement en fonction du gradient du champ magnétique. (b) Déplacement en fonction de la largeur d'impulsion.

Figure 4.9 - Comparaison entre les données expérimentales et le modèle identifié. Les valeurs expérimentales sont représentées en lignes discontinues et celles obtenues par le modèle identifié sont en lignes continues.

La figure 4.9 montre l'évolution du déplacement de la particule en fonction du gradient du champ magnétique et de sa durée d'application. Les valeurs obtenues par le modèle identifié sont proches des valeurs expérimentales. L'erreur moyenne de modélisation est estimée à $127 \mu\text{m}$.

Le modèle (Eq. 4.6) en boucle ouverte est implémenté en simulation à l'aide du logiciel simulink[®]. La simulation considère l'hypothèse de déplacements selon un seul axe. Par ailleurs, les perturbations externes telles que l'humidité et la température ne sont pas prises en compte en simulation.

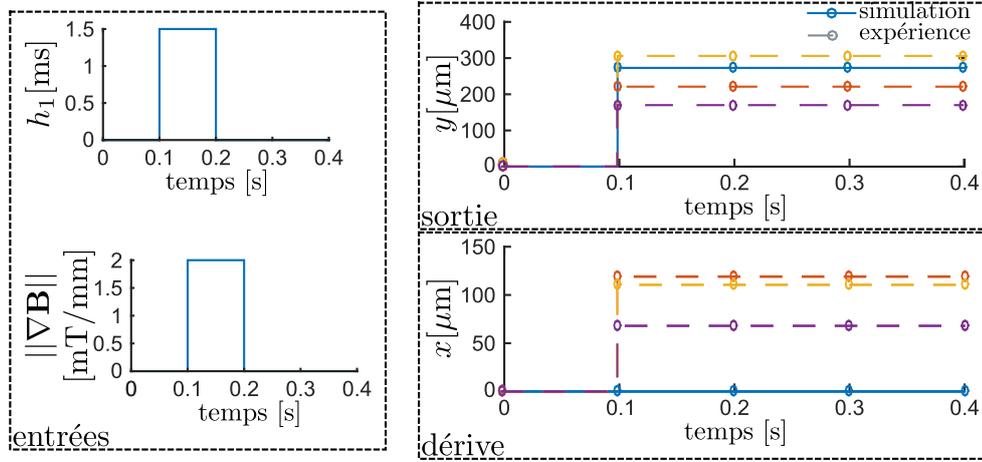


Figure 4.10 - Déplacement de la particule pour un signal en entrée donné. La position de la particule est mesurée pendant 0.4 s avec une période d'échantillonnage de 100 ms.

La figure 4.10 illustre le déplacement obtenu en simulation pour le signal de commande ($\|\nabla\mathbf{B}\|=2$ mT/mm et $h_1=1.5$ ms). Le déplacement obtenu expérimentalement est également représenté. Trois déplacements de la particule sont effectués pour ce signal. Le déplacement x est nul en simulation. Cependant, elles ne sont pas négligeables comme le montrent les expériences. Par ailleurs, le déplacement de la particule n'est pas répétable. Cependant, il est proche de celui prédit par la simulation. Pour augmenter la précision du positionnement, une commande en boucle fermée est nécessaire.

4 Commande proportionnelle intégrale F_*/h_e

Le déplacement y de la particule suivant une seule direction selon l'axe \mathbf{e}_y est proportionnel au gradient du champ magnétique et sa durée d'impulsion. Ce résultat est généralisé aux deux directions de cet axe. Dans ce cas, l'actionnement séquentiel de deux bobines est utilisé.

4.1 Principe de la commande

Le déplacement y de la particule est linéaire par rapport à ses deux entrées $\|\nabla\mathbf{B}\|$ et h_e . Son modèle pour un déplacement y dans les deux directions de l'axe \mathbf{e}_y s'écrit :

$$\begin{cases} y = 0 & \text{si } (\|\nabla\mathbf{B}\| < \|\nabla\mathbf{B}_{off}\| \text{ ou } h_e < h_{off}) \\ y = \alpha \cdot (\|\nabla\mathbf{B}\| - \|\nabla\mathbf{B}_{off}\|) \cdot (h_e - h_{off}) & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.7)$$

Afin d'amener la particule d'une position y à une position désirée y_{ref} , un correcteur proportionnel intégral est adapté. Le terme intégral est introduit pour réduire l'erreur

statique. La loi de commande en boucle fermée utilisée est schématisée par la figure 4.11.

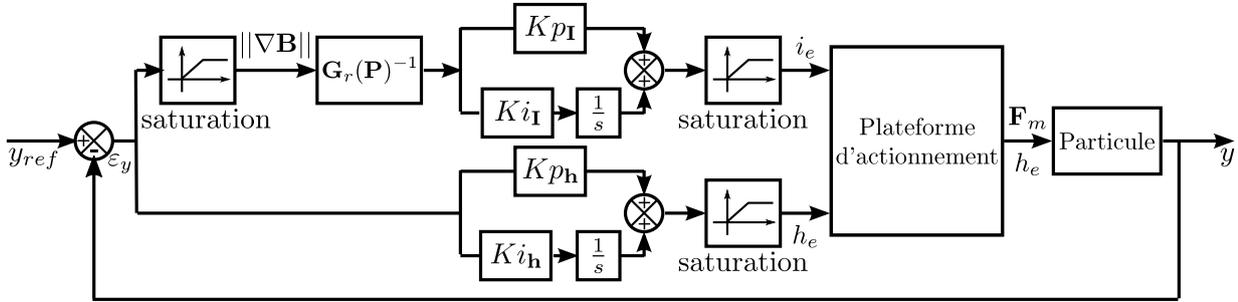


Figure 4.11 - Schéma de la commande proportionnelle F_*/h_e .

Chaque variable de commande du système est régulée par un terme proportionnel (Kp_I pour le gradient et Kp_h pour la durée d'impulsion) et par un terme intégral (Ki_I pour le gradient et Ki_h pour la durée d'impulsion). Pour chaque pas d'échantillonnage n , l'erreur entre la position courante et la position de référence $\varepsilon = |y_{ref} - y|$ est mesurée. La commande ($\|\nabla\mathbf{B}\|$ et h_e) générée par le contrôleur doit réduire cette erreur.

En fonction de la valeur de l'erreur à un instant $n \times Ts$, la loi de commande F_*/h_e utilisée peut se décomposer suivant les cas suivants :

cas 1 : $(Kp_h \cdot \varepsilon + Ki_h \cdot \int \varepsilon) \leq h_{off}$ ou $\varepsilon \leq \|\nabla\mathbf{B}\|_{off}$

De l'équation 4.6 :

$$y = 0$$

Le déplacement de la particule dans ce cas est nul.

cas 2 : $(Kp_h \cdot \varepsilon + Ki_h \cdot \int \varepsilon) \geq h_{sat}$ et $\varepsilon \geq \|\nabla\mathbf{B}\|_{sat}$

De l'équation 4.6 :

$$y = \alpha \cdot (\|\nabla\mathbf{B}_{sat}\| - \|\nabla\mathbf{B}_{off}\|) \cdot (h_{sat} - h_{off})$$

Le déplacement de la particule dans ce cas est le déplacement maximal admis dans l'espace de travail.

cas 3 : $h_{off} < (Kp_h \cdot \varepsilon + Ki_h \cdot \int \varepsilon) < h_{sat}$ et $\varepsilon > \|\nabla\mathbf{B}\|_{sat}$

Le gradient en entrée est constant à la valeur $\|\nabla\mathbf{B}\|_{sat}$. La durée d'application h_e est le seul paramètre régulé. La figure 4.12 schématise ce cas de figure.

La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit :

$$Y = \frac{K \cdot Kp_h}{(K \cdot Kp_h + 1)} \left(s + \frac{Ki_h}{Kp_h} \right) Y_{ref} - \frac{K}{(K \cdot Kp_h + 1)} h_{off} \left(s + \frac{K}{K \cdot Kp_h + 1} \right)$$

avec $K = \alpha \cdot (\|\nabla\mathbf{B}\|_{sat} - \|\nabla\mathbf{B}\|_{off})$. Le système en boucle fermée est un premier ordre avec une perturbation h_{off} . La stabilité est assurée car les pôles sont toujours négatifs.

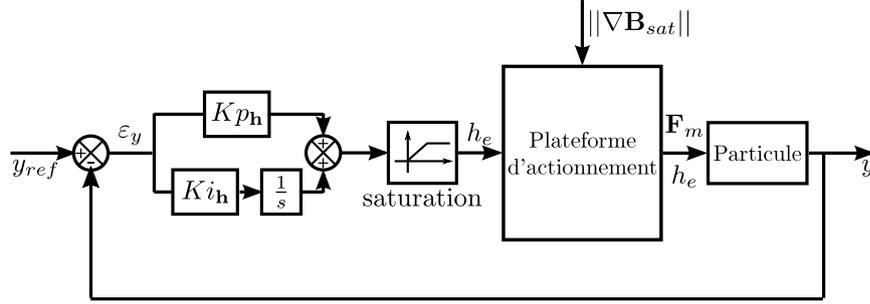


Figure 4.12 - Commande F_*/h_e dans le cas du gradient du champ saturé.

cas 4 : $(Kp_h \cdot \varepsilon + Ki_h \cdot \int \varepsilon) > h_{sat}$ et $\|\nabla \mathbf{B}\|_{off} < \varepsilon < \|\nabla \mathbf{B}\|_{sat}$

La durée d'impulsion du signal est constante et égale à h_{sat} . La commande dans ce cas est une loi de commande proportionnelle intégrale par rapport à $\|\nabla \mathbf{B}\|$ seulement. La figure 4.12 présente ce cas particulier.

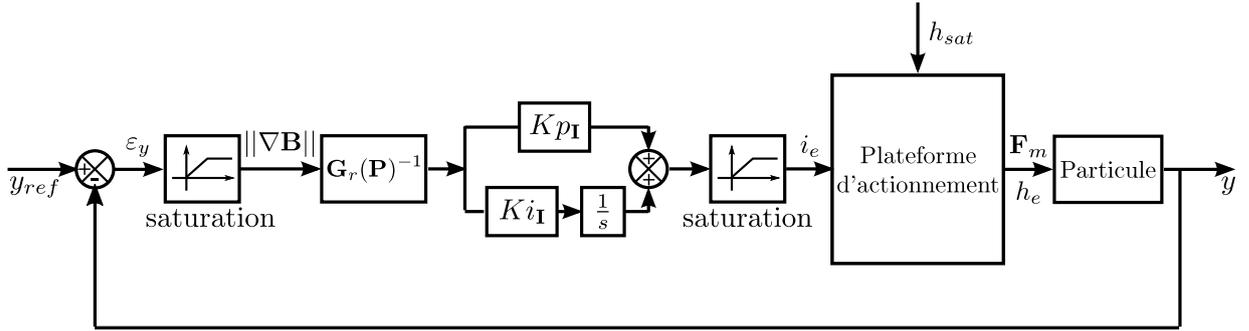


Figure 4.13 - Commande F_*/h_e dans le cas de la durée d'impulsion saturée.

La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit :

$$Y = \frac{K \cdot G_r(\mathbf{P})^{-1} \cdot Kp_I}{s + \frac{K}{K \cdot Kp_I + 1}} \left(s + \frac{Ki_I}{Kp_I} \right) Y_{ref} - \frac{\frac{K}{(K \cdot G_r(\mathbf{P})^{-1} \cdot Kp_I + 1)}}{s + \frac{K}{K \cdot G_r(\mathbf{P})^{-1} \cdot Kp_I + 1}} \|\nabla \mathbf{B}\|_{off}$$

avec $K = \alpha \cdot (h_{sat} - h_{off})$. Le système en boucle fermée est un premier ordre avec une perturbation $\|\nabla \mathbf{B}\|_{off}$. La stabilité est assurée car les pôles sont toujours négatifs.

cas 5 : $h_{off} < (Kp_h \cdot \varepsilon + Ki_h \cdot \int \varepsilon) < h_{sat}$ et $\|\nabla \mathbf{B}\|_{off} < \varepsilon < \|\nabla \mathbf{B}\|_{sat}$

Les deux paramètres de commande $\|\nabla \mathbf{B}\|$ et h_e sont régulés dans ce cas. Ce cas correspond au schéma de commande global montré dans la figure 4.11. La fonction de transfert dans ce cas est plus complexe et dépend de la position courante et de la position de référence. Le comportement de la commande en boucle fermée est considéré pseudo-linéaire du premier ordre.

L'objectif est d'obtenir un positionnement précis et rapide. Le choix des gains influence les performances de la commande en terme de précision, de rapidité et de stabilité. Pour

optimiser le choix des gains, ils sont d'abord réglés en simulation et ajustés pendant les expériences. Le tableau 4.1 comprend les résultats de simulation de l'influence des gains sur les performances du système bouclé.

Réglage des gains	Conséquence
Faibles Kp_h et Ki_h	la précision diminue
Faibles Kp_I et Ki_I	la rapidité diminue
Kp_h et Kp_I supérieurs à 10	le système est en limite de stabilité

Tableau 4.1 - Influence du réglage des gains sur les performances de la commande.

4.2 Validation expérimentale de la commande

La loi de commande F_*/h_e synthétisée est validée expérimentalement, pour un seul degré de liberté asservi dans un premier temps (y ensuite pour x). Elle est par la suite adaptée, en utilisant un actionnement séquentiel, pour le contrôle de deux degrés de liberté (x et y).

Le protocole suivant est respecté pour les trois cas de commande (y , x et x/y séquentiel). La position de la particule est asservie suivant les cas à une valeur de référence (y_{ref} , x_{ref} ou x_{ref}/y_{ref}). Les positions initiales et de références sont choisies aléatoirement dans la zone de travail définie. Cette expérience est répétée dix fois. Les gains obtenus en simulation sont d'abord ajustés expérimentalement. Durant ces expériences, la période d'échantillonnage est fixée à $T_s = 100$ ms.

4.2.1 Contrôle de la position y

La position de la particule est asservie suivant y pour dix positions initiales et finales différentes. Le nombre d'impulsions n nécessaire à la convergence de la position vers sa position finale y_∞ est relevé. L'erreur statique est notée $\varepsilon_s = |y_{ref} - y_\infty|$. La valeur x_∞ finale de la particule est aussi relevée. Elle représente la dérive du positionnement suivant l'axe qui n'est pas asservi (x dans ce cas).

	ε_s [μm]	x_∞ [μm]	n
Moyenne	38.9	250.4	4.9
Écart type	26.7	134.7	3.4

Tableau 4.2 - Performances de la commande en y pour les gains choisis. ε_s est la différence entre y_{ref} et la position finale y_∞ de la particule. x_∞ est la dérive suivant la direction x .

Le tableau 4.2 montre les performances de la commande implémentée. L'erreur statique, dans ce cas, vaut en moyenne $38.9 \mu\text{m}$, soit 8% de la taille de la particule. La position y de la particule converge vers sa position finale en moyenne pour 5 impulsions de courant envoyées. En revanche, lors de l'asservissement de la composante y , la position x de la particule est perturbée. La particule s'éloigne de sa position x initiale de $250 \mu\text{m}$ en moyenne sur les dix tests effectués.

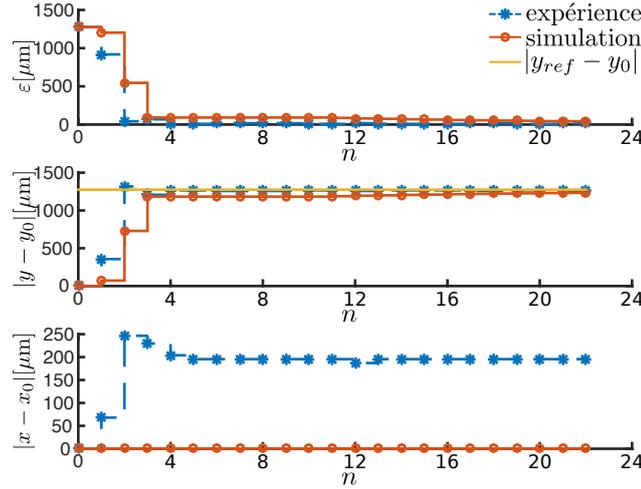


Figure 4.14 - Trajectoire de la particule pour un asservissement en y . La position initiale de la particule est $x_0=1.7 \text{ mm}$ et $y_0=3 \text{ mm}$ dans l'espace de travail.

La figure 4.14 illustre une des trajectoires de la particule lors de son asservissement en position. Elle représente l'expérience et la simulation correspondante. Le comportement de la particule durant l'expérience est proche de celui simulé en boucle fermée.

4.2.2 Contrôle de la position x

Comme précédemment, la position de la particule est asservie suivant x pour dix positions initiales et finales différentes. Le nombre d'impulsions n nécessaire à la convergence de la position vers sa position finale est relevé. L'erreur statique ε_s dans ce cas vaut $|x_{ref} - x_\infty|$, tel que x_∞ est la position de convergence suivant x . La dérive y_∞ du positionnement suivant l'axe qui n'est pas asservi (y dans ce cas) est aussi mesurée.

	ε_s [μm]	y_∞ [μm]	n
Moyenne	39.6	326.3	8.5
Écart type	28.3	134.7	3.6

Tableau 4.3 - Performances de la commande en x .

Le tableau 4.3 résume les performances de la commande implémentée en terme d'erreur

statique ε_s , de dérive selon l'axe qui n'est pas asservi et de temps de convergence de la commande. L'erreur statique vaut en moyenne $39.6 \mu\text{m}$, soit environ 8% la taille de la particule. La position x de la particule converge vers sa position finale en moyenne pour 8 impulsions de courant envoyées. Par ailleurs, lors de l'asservissement de la composante x , la position en y de la particule est perturbée. La particule s'éloigne de sa position y initiale de $326 \mu\text{m}$.

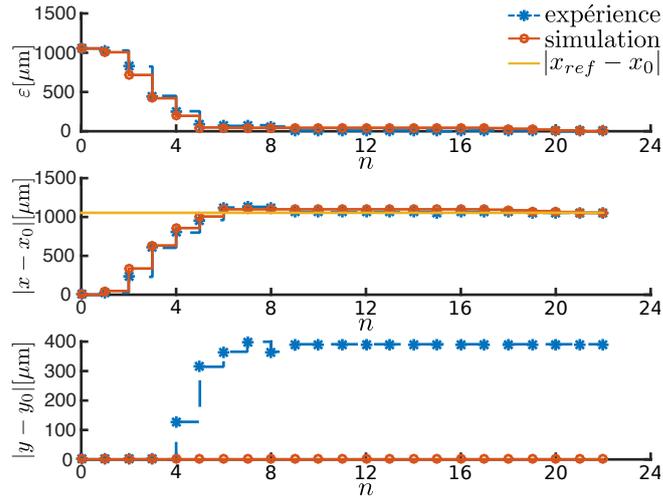


Figure 4.15 - Trajectoire de la particule pour un asservissement en x . La position initiale de la particule est $x_0=2.3 \text{ mm}$ et $y_0=1.9 \text{ mm}$ dans l'espace de travail.

La figure 4.15 illustre la trajectoire de la particule lors de son asservissement en position. Elle montre l'expérience et la simulation correspondante. La dérive de la particule selon l'axe qui n'est pas asservi est importante. Pour asservir entièrement la position de la particule, il faut contrôler sa position suivant les deux axes du plan.

4.2.3 Contrôle de la position x/y séquentiel

Pour réguler la position de la particule en x et y , une solution est d'utiliser un actionnement séquentiel alternant à chaque pas d'échantillonnage une correction de la position en x et y .

La position de la particule est asservie pour dix positions initiales et finales différentes. Ces positions initiales et de références sont choisies aléatoirement. Le temps de convergence n de la position vers sa position finale, les erreurs statiques suivant y ($\varepsilon_y = |y_{ref} - y_\infty|$) et x ($\varepsilon_x = |x_{ref} - x_\infty|$) sont relevés.

Le tableau 4.3 résume les performances de la commande pour le réglage de gains qui stabilise la commande séquentielle. L'erreur statique en x est plus importante que celle en y . Les gains intégraux pour la correction en x sont plus faibles. Le nombre d'impulsions de convergence sont autour de 19 en moyenne. En effet, la commande est séquentielle dans

	ε_x [μm]	ε_y [μm]	$\ \varepsilon\ $ [μm]	n
Moyenne	140	16	141	19
Écart type	92	10	93	9,5

Tableau 4.4 - Performances de la commande pour les gains choisis dans la commande x/y séquentielle.

cette partie. Elle nécessite théoriquement deux fois plus d'impulsions pour corriger la position en x et y que dans le cas du contrôle d'un seul degré de liberté. Cette commande n'est pas robuste : sur les dix asservissements de la position de la particule effectués, la position de la particule a convergé dans 8 cas seulement. La correction en x entraîne un déplacement en y qui doit être corrigé par la suite.

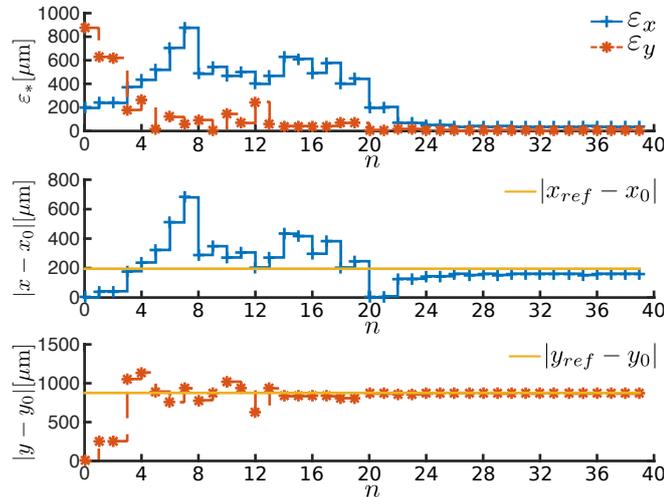


Figure 4.16 - Trajectoire de la particule pour un asservissement en x/y séquentiel. La position initiale de la particule est $x_0=1.6$ mm et $y_0=1.6$ mm.

La figure 4.16 illustre la trajectoire de la particule lors de son asservissement en position. La correction de la position en y engendre des déplacements en x . Cette divergence est ensuite corrigée. La commande dans ce cas converge pour un temps plus long. Pour réduire le temps de réponse en boucle fermée, la solution est de contrôler la position en x et y simultanément.

5 Commande proportionnelle intégrale F_*/h_e généralisée

Dans la partie précédente, la force magnétique produite est considérée suivant l'axe des bobines. Cependant, l'asservissement de la particule selon une direction montre que le

déplacement tangentiel n'est pas négligeable.

Afin de produire des déplacements contrôlés de la particule suivant x et y , la force magnétique est produite dans les différentes directions du plan de la particule. A cet effet, l'actionnement simultané des bobines est utilisé. Un modèle généralisé de la force magnétique est introduit pour contrôler la force produite. Ce modèle est ensuite intégré dans la loi de commande F_*/h_e .

5.1 Actionnement à deux degrés de liberté

Les noyaux magnétiques des électro-aimants sont considérés idéaux. Le théorème de superposition des champs magnétiques est donc appliqué, c'est à dire que le champ généré par plusieurs bobines est la somme des champs magnétiques produits par chaque bobine. La force magnétique (Eq. 4.1) s'écrit :

$$\mathbf{F}_m = \mathbf{G}(\mathbf{P}, \theta)\mathbf{I} \quad (4.8)$$

La matrice $\mathbf{G}(\mathbf{P}, \theta)$ est définie comme suit :

$$\mathbf{G}(\mathbf{P}, \theta) = \begin{pmatrix} \mathbf{VM}(\theta)^T B_{dx}(\mathbf{P}) \\ \mathbf{VM}(\theta)^T B_{dy}(\mathbf{P}) \end{pmatrix} \mathbf{I} \quad (4.9)$$

$\mathbf{M}(\theta) = \|\mathbf{M}\|[\cos(\theta) \sin(\theta)]^T$ est le vecteur de magnétisation de la particule. Ce vecteur est selon l'axe le plus long de la particule qui est déterminé par son orientation. $B_{dx}(\mathbf{P})$ et $B_{dy}(\mathbf{P})$ sont les matrices des dérivées des composantes du champ magnétique. Elles s'écrivent :

$$B_{dx}(\mathbf{P}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial(^0 P_{32}(x,y))}{\partial x} & \frac{\partial(^1 P_{22}(x,y))}{\partial x} & \frac{\partial(^2 P_{32}(x,y))}{\partial x} & \frac{\partial(^3 P_{22}(x,y))}{\partial x} \\ \frac{\partial(^0 P_{22}(x,y))}{\partial x} & \frac{\partial(^1 P_{23}(x,y))}{\partial x} & \frac{\partial(^2 P_{22}(x,y))}{\partial x} & \frac{\partial(^3 P_{23}(x,y))}{\partial x} \end{pmatrix}$$

et :

$$B_{dy}(\mathbf{P}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial(^0 P_{32}(x,y))}{\partial y} & \frac{\partial(^1 P_{22}(x,y))}{\partial y} & \frac{\partial(^2 P_{32}(x,y))}{\partial y} & \frac{\partial(^3 P_{22}(x,y))}{\partial y} \\ \frac{\partial(^0 P_{22}(x,y))}{\partial y} & \frac{\partial(^1 P_{23}(x,y))}{\partial y} & \frac{\partial(^2 P_{22}(x,y))}{\partial y} & \frac{\partial(^3 P_{23}(x,y))}{\partial y} \end{pmatrix}$$

Pour produire une force magnétique désirée \mathbf{F}_{ref} , il faut trouver le courant électrique \mathbf{I} qui résout l'équation suivante :

$$\begin{cases} \mathbf{F}_{ref} - \mathbf{G}(\mathbf{P}, \theta)\mathbf{I} = \mathbf{0}_2 \\ i_e > 0 \text{ et } i_e < i_{max} \quad \forall e = 0, 1, 2, 3 \end{cases} \quad (4.10)$$

Le courant électrique est limité à une valeur maximale $i_{max} = 6 \text{ A}$ et le nombre de bobines actionnées simultanément est limité à deux pour des raisons matérielles.

L'équation 4.10 peut avoir zéro ou plusieurs solutions en fonction de la force désirée. Pour résoudre cette équation quelque soit la force désirée, la méthode des moindres carrés est utilisée pour déterminer le courant électrique \mathbf{I}_{MC} :

$$\mathbf{I}_{MC} = \underset{\mathbf{I}}{\operatorname{argmin}} \|\mathbf{F}_{ref} - \mathbf{G}(\mathbf{P}, \theta)\mathbf{I}\|$$

5.2 Asservissement de deux degrés de liberté en translation

Le déplacement par rapport aux entrées F_* et h_e est linéaire (Sect. 3). En conséquence, le déplacement \mathbf{P} est considéré proportionnel par rapport à \mathbf{F}_{ref} et h_e dans le plan. La loi de commande proportionnelle F_*/h_e est donc adaptée pour contrôler le déplacement dans le plan. Le schéma de la commande est présentée dans la figure 4.17.

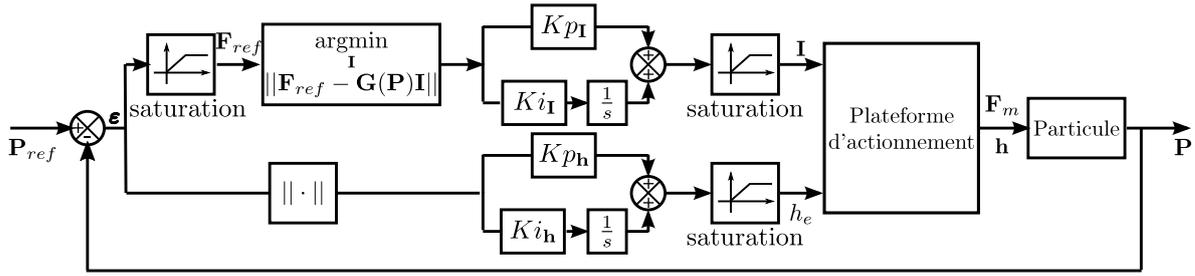


Figure 4.17 - Schéma de la commande proportionnelle F_*/h_e généralisée.

Pour valider la loi de commande, le protocole expérimental suivant est utilisé. Les gains sont d'abord ajustés expérimentalement pour le contrôle de la position. La position de la particule est asservie pour des positions initiales et désirées différentes. Ces positions initiales et de références sont choisies aléatoirement. Le nombre d'impulsions envoyées n pour lesquelles la position de la particule converge vers sa position finale est relevé. Les erreurs statiques suivant y ($\varepsilon_y = |y_{ref} - y_\infty|$) et x ($\varepsilon_x = |x_{ref} - x_\infty|$) sont aussi mesurées. Cette expérience est répétée dix fois.

	$\varepsilon_x [\mu\text{m}]$	$\varepsilon_y [\mu\text{m}]$	$\ \varepsilon\ [\mu\text{m}]$	n
Moyenne	74	45	87	15.4
Écart type	40	40	57	8.4

Tableau 4.5 - Performances de la commande F_*/h_e généralisée.

Le tableau 4.5 résume les performances de la commande implémentée. Le nombre d'impulsions électriques nécessaires à la convergence de la position de la particule dans ce cas (15.4) est réduit par rapport à la commande x/y séquentielle (19). La norme de l'erreur finale est en moyenne de $87 \mu\text{m}$, soit 18% de la taille de la particule. La correction de la position en y est plus précise que dans la direction x . L'erreur finale y est de $45 \mu\text{m}$ contre $74 \mu\text{m}$ pour celle en x . La précision du déplacement dans un contrôle en deux degrés de liberté diminue par rapport au contrôle d'un seul degré. Ceci est dû à deux raisons principales. La valeur du courant électrique pour produire une force magnétique donnée est calculée de façon approchée par la méthode des moindres carrés. Le couplage des bobines pour produire une force contrôlable avec précision devrait être pris en compte.

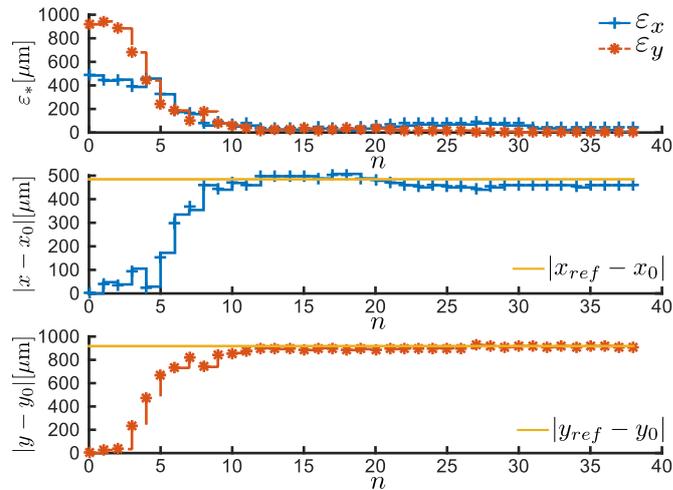


Figure 4.18 - Mesures de position de la particule durant son asservissement x/y simultané.

La figure 4.18 montre la trajectoire de la particule lors de son asservissement en position. Les valeurs de la position en x et y convergent simultanément vers leurs valeurs de référence. Les images de la particule lors de son positionnement sont présentées dans la figure 4.19.

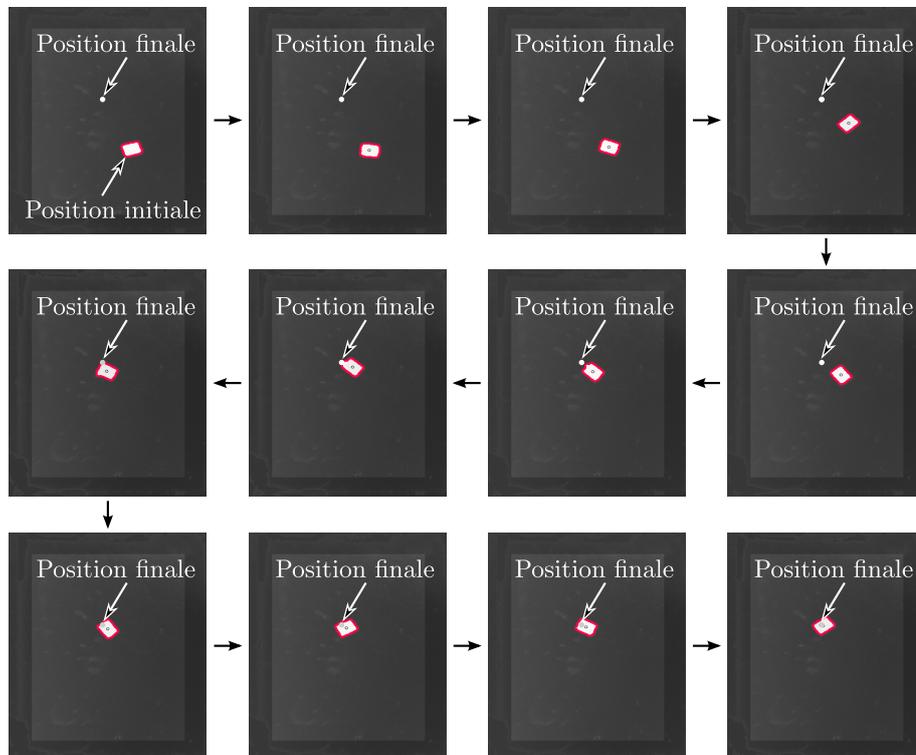


Figure 4.19 - Photos montrant le déplacement de la particule durant l'asservissement en position. Une image correspond à un pas d'échantillonnage.

6 Orientation de la particule par trains d'impulsions

L'orientation de la particule est communément considérée comme étant équivalente à l'orientation du champ magnétique appliqué pour les systèmes évoluant dans le liquide [Abbott 07b]. Elle est donc effectuée en boucle ouverte. Cependant, dans le milieu ambiant les moments surfaciques sont importants. Une boucle fermée est nécessaire pour contrôler précisément l'orientation.

Les rotations de la particule sont dues au moment magnétique qui dépend du champ magnétique selon l'équation 4.2. Les noyaux magnétiques des électro-aimants sont considérés idéaux. Le théorème de superposition des champs magnétiques est donc appliqué. Le champ magnétique produit par l'ensemble des bobines s'écrit proportionnellement au courant électrique :

$$\mathbf{B} = \mathbf{K}(\mathbf{P})\mathbf{I} \quad (4.11)$$

avec $\mathbf{K}(\mathbf{P})$:

$$\mathbf{K}(\mathbf{P}) = \begin{pmatrix} {}^0P_{32}(x, y) & {}^1P_{22}(x, y) & {}^2P_{32}(x, y) & {}^3P_{22}(x, y) \\ {}^0P_{22}(x, y) & {}^1P_{23}(x, y) & {}^2P_{22}(x, y) & {}^3P_{23}(x, y) \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

Le moment magnétique tend à aligner l'axe principal de la magnétisation de la particule avec les lignes du champ magnétique. Pour orienter la particule, il faut appliquer un champ magnétique avec l'orientation désirée. En conséquence, l'entrée du système est le champ magnétique. D'après l'équation 4.11, il suffit d'inverser la matrice $\mathbf{K}(\mathbf{P})$ pour estimer le courant en entrée pour appliquer un champ magnétique avec l'orientation de référence.

Le champ magnétique produit par la plateforme magnétique est non-uniforme. L'application d'un champ magnétique produit aussi un gradient de champ magnétique. Ce dernier modifie la position de la particule. L'intensité du champ magnétique appliqué $\|\mathbf{B}\|$ est choisie la plus petite possible pour produire l'orientation de la particule sans modifier sa position. De plus, par convention les bobines actionnées sont les bobines les plus éloignées de la particule, pour minimiser le gradient de champ magnétique produit. La méthode d'actionnement est basée sur des impulsions de courant. La durée d'application h_e influence aussi le déplacement de la particule. Cette valeur est également choisie de façon à minimiser le déplacement produit. Les valeurs du champ magnétique et de sa durée d'application sont choisies expérimentalement :

- $\|\mathbf{B}\| = 15 \text{ mT}$,
- $h_e = 0.5 \text{ ms}$.

L'orientation de la particule est assurée par des impulsions de signaux. La précision de l'orientation de la particule est limitée par le traitement d'images. La détection de l'orientation n'est pas robuste, son erreur d'estimation est de 20° . Pour réduire l'erreur d'orientation ε_θ dans les limites de la précision atteignable compte tenu du problème de détection, les impulsions de courant sont envoyées tant que l'erreur est supérieure à $\varepsilon_{max} = 20^\circ$. La figure 4.20 présente le système d'orientation par train d'impulsions. À chaque pas d'échantillonnage, ε_θ est mesurée et une impulsion \mathbf{B} avec une durée h_e est envoyée.

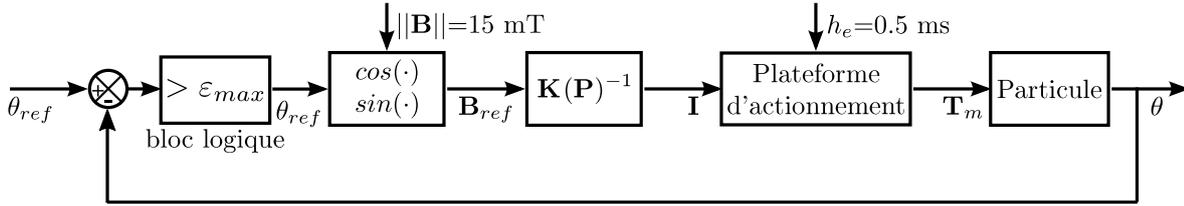


Figure 4.20 - Système en boucle fermée pour orienter la particule par trains d'impulsions. Le rôle du bloc logique est d'envoyer des impulsions tant que l'erreur est supérieure à la valeur imposée ε_{max} .

Afin d'évaluer les performances de la commande en orientation par retour visuel, 150 tests d'asservissement de l'orientation de la particule sont effectués. Les orientations initiales et de références θ_{ref} de la particule sont choisies aléatoirement. Le nombre d'impulsions envoyées n et l'erreur d'orientation finale ε_θ ainsi que les déplacements $\|\mathbf{P}\|$ produits sont mesurés pour chaque asservissement. Les résultats de la commande sont présentés dans le tableau 4.6.

	ε_θ [°]	$\ \mathbf{P}\ $ [μm]	n
Moyenne	12.1	273.9	3.4
Écart type	6	189.3	2.1

Tableau 4.6 - Résumé des performances de l'asservissement de l'orientation de la particule.

L'orientation de la particule s'effectue avec une précision moyenne de 12.1° . Cependant, l'orientation génère une translation de la particule de l'ordre de $272 \mu\text{m}$ en moyenne. Pour limiter cette perturbation, une solution est d'intégrer la commande de l'orientation dans la commande de sa translation. Les variables de commande seraient donc : le champ et la force magnétiques. Pour cela, l'actionnement des bobines doit être amélioré pour fournir les courants électriques nécessaires simultanément aux quatre bobines pour produire la valeur du champ magnétique et de la force magnétique désirés.

7 Conclusion

La commande des systèmes microrobotiques est contrainte par le caractère multi-variables de ces systèmes et le manque de modèle de connaissance en particulier dans le milieu ambiant. De plus, le système introduit dans le chapitre 1, possède huit paramètres en entrée et trois paramètres en sortie. L'approche adoptée ici repose sur l'expérimentation. Les choix effectués dans l'étude de la réponse de la particule sont :

- le déplacement de la particule est considéré découplé, pour réduire le nombre de sorties. Les degrés de liberté sont donc étudiés séparément,

- les variables de commande sont adaptées. Elles sont la force magnétique et sa durée d'application. La force magnétique est considérée en entrée du système pour s'affranchir de la non-linéarité due à l'influence de la position de la particule dans le modèle de la plateforme d'actionnement,
- l'influence des deux variables de commande (l'amplitude et la durée d'application de la force magnétique) sur le comportement de la particule est estimé à partir des données expérimentales.

Cette étude montre que le déplacement possède une zone de linéarité par rapport aux deux entrées du système : l'amplitude de la force magnétique et sa durée d'impulsion. Une loi de commande proportionnelle est donc appropriée pour ce système.

Commande de	Méthode		$\varepsilon_x [\mu\text{m}]$	$\varepsilon_y [\mu\text{m}]$	$\varepsilon_\theta [^\circ]$	n
y	Proportionnelle intégrale	Moyenne	38.9	250.4	–	4.9
		Écart type	26.7	134.7	–	3.4
x	Proportionnelle intégrale	Moyenne	326.3	39.6	–	8.5
		Écart type	134.7	28.3	–	3.6
x et y	Proportionnelle intégrale séquentielle	Moyenne	140	16	–	19
		Écart type	92	10	–	9,5
x et y	Proportionnelle intégrale couplée	Moyenne	74	45	–	15.4
		Écart type	40	40	–	8.4
θ	Trame d'impulsions	Moyenne	–	–	12.1	3.4
		Écart type	–	–	6	2.1

Tableau 4.7 - Comparaison entre les performances des commandes utilisées dans cette étude.

Le tableau 4.7 résume les résultats de commande obtenus pour chaque degré de liberté séparément et dans le cas de deux degrés asservis et pour l'orientation avec précision de la particule. La commande proportionnelle intégrale produit des déplacements précis à $40 \mu\text{m}$, soit 8% de la taille de la particule, dans le contrôle d'un seul degré de liberté et de $87 \mu\text{m}$, soit 18% de la taille de la particule, pour un contrôle de deux degrés de liberté en translation. Le contrôle d'un seul degré de liberté s'effectue en moyenne pour 5 impulsions de courant, soit 500 ms. Le contrôle de la position en x et y simultanément dure, quand à elle, en moyenne 1.5 s, soit 15 impulsions de courant.

Par ailleurs la loi de commande est robuste par rapport à la position initiale de la particule. L'asservissement de la position de la particule s'effectue pour des positions de départ aléatoires dans l'espace de travail. Cependant, la loi de commande proportionnelle n'est pas robuste face aux perturbations environnementales. Les gains du correcteur doivent être ajustés régulièrement (en fonction des jours). Une solution est d'utiliser une loi de commande adaptative (des gains du correcteur dans ce cas) pour améliorer la robustesse de la commande face aux bruits environnementaux.

Conclusions et Perspectives

Les systèmes micrométriques autonomes actionnés et commandés à distance sont un domaine de recherche en pleine expansion. Ils constituent une solution attrayante pour effectuer des opérations dans des milieux confinés et difficile d'accès.

Ce travail s'est concentré sur les systèmes microrobotiques à actionnement magnétique. Cette solution, largement étudiée, possède de nombreux avantages comme les efforts importants applicables par la force magnétique. L'état de l'art réalisé dans cette thèse montre la grande diversité des travaux existants, mais pointe une limitation forte : la vitesse. Les systèmes existants sont principalement dédiés à la manipulation en milieu liquide. Ils ont montré des résultats prometteurs pour le positionnement précis de micro-objets et le suivi de trajectoires ainsi que pour l'actionnement simultané de plusieurs particules. Ces systèmes bénéficient de la viscosité du milieu pour stabiliser le contrôle de la particule, mais cette viscosité limite la vitesse atteignable par les particules magnétiques.

L'objectif de cette thèse a été de proposer un système microrobotique magnétique pour l'actionnement précis à haute vitesse. La conception du système a été effectuée. Les principaux choix réalisés pour augmenter la vitesse et leur conséquence sur la commande du système peuvent se résumer de la façon suivante :

- l'addition de noyaux ferromagnétiques aux électro-aimants et leur rapprochement par rapport à l'espace de travail produit un gradient de champ et donc une force magnétique importante mais augmente les non linéarités de la force magnétique,
- le signal d'entrée des bobines en impulsion fournit un champ magnétique important sans endommager les bobines par leur échauffement excessif mais génère deux variables de commande qui sont la durée de l'impulsion et l'intensité du courant,
- le choix du matériau de l'effecteur est réalisé pour répondre aux exigences de microfabrication tout en produisant une force magnétique importante. Le nickel est

un matériau ferromagnétique qui répond bien à ces deux contraintes,

- l'algorithme de traitement d'images est simplifié pour réduire le temps de détection de la microparticule,
- un actionnement en milieu ambiant a été privilégié.

La vitesse de déplacement en utilisant le système ainsi conçu atteint 55 mm/s sur un substrat en verre et 176 mm/s sur un substrat en silicium pour des particules de tailles, respectivement, de 470 μm et 410 μm . Cependant, les dispositions prises dans la conception du système microrobotique nécessitent des stratégies d'actionnement et des lois de commande adaptées. En particulier l'environnement de travail en milieu ambiant, peu abordé dans la littérature, pose des problématiques inédites d'adhésion entre la particule et le substrat de l'espace de travail. Pour assurer un actionnement répétable, il faut vaincre ces forces surfaciques. Trois solutions sont proposées et évaluées pour augmenter la répétabilité de l'actionnement magnétique :

- la force d'actionnement est augmentée en introduisant une seconde source d'actionnement,
- les forces surfaciques sont réduites par des techniques de microfabrication,
- l'adhésion surfacique est surmontée en utilisant des efforts en torsion. L'actionnement dans ce cas repose sur la maximisation du moment magnétique produit.

Les méthodes introduites, en particulier les deux dernières, améliorent significativement la répétabilité d'actionnement (de 42% à respectivement 100% et 95%). De plus, la dernière solution est indépendante du substrat et ne nécessite pas un champ magnétique élevé. Elle ouvre donc des solutions nouvelles et prometteuses pour vaincre l'adhésion surfacique.

Pour augmenter la précision du positionnement de la particule, une loi de commande en boucle fermée est proposée. Cette loi de commande, basée sur un retour visuel de l'état du système, prend en compte l'aspect multi-variable qui caractérise ce système. L'approche proposée pour synthétiser la commande est une approche expérimentale, basée sur :

- la linéarisation du système en adaptant son entrée,
- la validation de la linéarité du déplacement de la particule effectuée sur chacun degrés de liberté séparément, pour rejeter l'influence du couplage du déplacement,
- l'implémentation d'un correcteur proportionnel intégral.

Elle assure des déplacements de la particule magnétique suivant un seul axe avec une précision moyenne de 45 μm et dans le plan avec une précision moyenne de 95 μm , ce qui représente respectivement 8% et 19% de la taille de la particule. De plus cette loi de commande se distingue par sa simplicité d'implémentation. L'ensemble des approches proposées dans cette thèse, tant sur la réduction de l'adhésion que sur la commande, sont validées par un nombre important d'expériences apportant une profonde connaissance du système. Ce travail n'est qu'un premier pas dans l'intégration des systèmes microrobotiques autonomes en 2D dans le milieu ambiant, mais il montre l'intérêt et les problématiques liés à cet environnement.

Les perspectives de ce travail sont nombreuses, tant au niveau scientifique qu'applicatif. Concernant la commande, il serait intéressant d'adapter la commande proportionnelle en

intégrant l'orientation de la particule. La robustesse de la commande aux perturbations environnementales doit également être améliorée par exemple en considérant une loi de commande adaptative. Le système développé est maintenant suffisamment répétable pour des lois de commande plus complexes puissent être testées.

Les systèmes dans le milieu ambiant présentent des dynamiques importantes. Cependant, elles ne sont pas prises en compte par les capteurs majoritairement utilisées aujourd'hui : les caméras classiques. En revanche, les caméras événementielles, inspirées de la vision biologique et en plein développement, offrent l'avantage d'atteindre de grandes fréquences (4 kHz) et un faible coût. Elles représentent une solution adaptée pour profiter de la dynamique des microparticules dans le milieu ambiant avec précision.

Cette thèse s'est attachée à développer les méthodologies de base pour un contrôle précis et suffisamment répétable pour les systèmes d'actionnement magnétiques en milieu ambiant. Elle ouvre la voie à des opérations plus complexes, à l'instar de celles effectuées par les systèmes en milieu liquide. Le positionnement d'objets non magnétiques en utilisant des pousseurs magnétiques est maintenant envisageable, ainsi que l'actionnement de plusieurs particules, pour effectuer une tâche collaborative par exemple, qui reste encore aujourd'hui un problème inexploré dans l'environnement sec. Le champ applicatif du microassemblage, entre autres, bénéficiera sans nul doute de ces nouveaux systèmes robotisés présentant un environnement favorable notamment aux composants électroniques qui ne peuvent être immergés.

Notations et abréviations

Cette section regroupe l'ensemble des notations et des abréviations. Ces dernières sont valables pour l'ensemble du manuscrit, sauf indication contraire.

Notations :

\mathbf{F}_m	Force magnétique
\mathbf{T}_m	Moment magnétique
\mathbf{B}	Champ magnétique
$\nabla\mathbf{B}$	Gradient du champ magnétique
\mathbf{H}	Champ d'excitation magnétique
\mathbf{P}	Position de la particule ferromagnétique
θ	Orientation de la particule ferromagnétique
\mathbf{P}_{ref}	Position de référence de la particule ferromagnétique
θ_{ref}	Orientation de référence de la particule ferromagnétique
i_e	Courant électrique en entrée d'une bobine e
h_e	Largeur de l'impulsion du courant électrique en entrée d'une bobine e
\mathbf{I}	Courant électrique en entrée de la plateforme magnétique
ξ_m	Susceptibilité magnétique de la particule
\mathbf{M}	Vecteur de l'aimantation interne de la particule

μ_0	Perméabilité magnétique du vide
μ_r	Perméabilité magnétique relative
s	Variable de Laplace discrète

Abréviations :

MEMS	<i>Micro Electro Mechanical Systems</i> (MicroSystème ElectroMécanique)
MOEMS	<i>Micro Opto Electro Mechanical Systems</i> (MicroSystème Optico-ElectroMécanique)
IRM	Imagerie par Résonance Magnétique
MMT	<i>Magnetically driven MicroTool</i> Micro-Outil à Actionnement Magnétique
DRIE	<i>Deep Reactive Ion Etching</i> Gravure Ionique Réactive Profonde
DDL	Degrés De Liberté
PID	Proportionnel Intégrateur Dérivé
fps	<i>Frames per second</i> images par seconde
vdW	Forces de van der Waals
SISO	<i>Single-Input and Single-Output</i> une entrée et une sortie
MIMO	<i>Multiple-Input and Multiple-Output</i> multi-entrées et multi-sorties
GBF	Générateur Basse Fréquence
ISIR	Institut des Systèmes intelligents et de Robotique
UV	UltraViolet

Bibliographie

- [Abbott 07a] **Jacob J. Abbott, Olgaç Ergeneman, Michael Kummer, Ann M. Hirt et Bradley J. Nelson.** *Modeling Magnetic Torque and Force for Controlled Manipulation of Soft-Magnetic Bodies.* IEEE Transactions on Robotics, vol. 23, n° 6, pages 1247–1252, 2007.
- [Abbott 07b] **Jacob J. Abbott, Zoltan Nagy, Felix Beyeler et Bradley J. Nelson.** *Robotics in the Small, Part I : Microrobotics.* IEEE Robotics and Automation Magazine, vol. 14, n° 2, pages 92–103, 2007.
- [Abbott 09] **Jacob J. Abbott, Kathrin E. Peyer, Marco C. Lagomarsino, Li Zhang, Lixin X. Dong, Ioannis K. Kaliakatsos et Bradley J. Nelson.** *How Should Microrobots Swim ?.* The International Journal of Robotics Research, vol. 28, n° 11-12, pages 1434–1447, 2009.
- [Adamson 97] **Arthur W. Adamson et Alice P. Gast.** Physical chemistry of surfaces. John Wiley and Sons, 6th edition, 1997.
- [Belharet 11] **Karim Belharet, David Folio et Antoine Ferreira.** *Three-Dimensional Controlled Motion of a Microrobot using Magnetic Gradients.* Advanced Robotics, vol. 25, n° 8, pages 1069–1083, 2011.
- [Bellouard 09] **Yves Bellouard.** Microrobotics : Methods and applications. CRC Press, 2009.
- [Bing 11] **Shao Bing et Chen Tao.** *The research on release micromanipulation mechanism and method of microparticle based on dynamic adhesion control.* IEEE Industrial Electronics and Applications, pages 1716–1721, 2011.

- [Calderon 96] **Gustavo Calderon, Jean-Philippe Draye, Davor Pavisic, Roberto Teran et Gaetan Libert.** *Nonlinear Dynamic System Identification with Dynamic Recurrent Neural Networks.* International Workshop on Neural Networks for Identification, Control, Robotics, and Signal/Image Processing, pages 49–54, 1996.
- [Canny 86] **John Canny.** *A computational approach to edge detection.* IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, pages 679–698, 1986.
- [Challenge 10] **NIST Challenge.** <http://www.nist.gov/el/isd/robotals.cfm>. 2010.
- [Chowdhury 12] **Sagar Chowdhury, Petr Svec, Wang Chenlu, Wolfgang Losert et Satyandra K. Gupta.** *Gripper synthesis for indirect manipulation of cells using Holographic Optical Tweezers.* IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 2749–2754, 2012.
- [Coey 10] **Michael J. D. Coey.** Magnetism and magnetic materials. Cambridge University Press, 2010.
- [Cullity 08] **Bernard D. Cullity et Charles D. Graham.** Introduction to magnetic materials. Wiley-IEEE press, 2008.
- [de Gennes 02] **Pierre-Gilles de Gennes, Françoise Brochart-Wyart et David QuÈrÈ.** Gouttes, bulles, perles et ondes. Belin, 2002.
- [Diller 11a] **Eric Diller et Metin Sitti.** *Micro-Scale Mobile Robotics.* Foundations and Trends® in Robotics, vol. 2, n° 3, pages 143–259, 2011.
- [Diller 11b] **Eric D. Diller, Chytra Pawashe, Steven Floyd et Metin Sitti.** *Assembly and disassembly of magnetic mobile micro-robots towards deterministic 2-D reconfigurable micro-systems.* The International Journal of Robotics Research, vol. 30, n° 14, pages 1667–1680, 2011.
- [Diller 12] **Eric D. Diller, Steven Floyd, Chytra Pawashe et Metin Sitti.** *Control of Multiple Heterogeneous Magnetic Microrobots in Two Dimensions on Nonspecialized Surfaces.* IEEE Transactions on Robotics, vol. 28, n° 1, pages 172–182, 2012.
- [Diller 13] **Eric Diller, Joshua Giltinan et Metin Sitti.** *Independent control of multiple magnetic microrobots in three dimensions.* The International Journal of Robotics Research, vol. 32, n° 5, pages 614–631, 2013.
- [Diller 14] **Eric Diller et Metin Sitti.** *Three-Dimensional Programmable Assembly by Untethered Magnetic Robotic Micro-Grippers.* Advanced Functional Materials, vol. 24, n° 28, pages 4397–4404, 2014.
- [Dkhil 14] **Mohamed Dkhil, Aude Bolopion, Stéphane Régnier et Michaël Gauthier.** *Modeling and experiments of high speed magnetic micromanipulation at the air/liquid interface.* IEEE/RSJ Interna-

- tional Conference Intelligent Robots and Systems, pages 4649–4655, 2014.
- [Donald 06] **Bruce R. Donald, Christopher G. Levey, Craig D. Mcgray, Igor Paprotny et Daniela Rus.** *An Untethered, Electrostatic, Globally Controllable MEMS Micro-Robot.* Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 15, n° 1, pages 203–219, 2006.
- [Ezal 00] **Kenan Ezal, Zigang Pan et Petar V. Kokotovic.** *Locally optimal and robust backstepping design.* IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 45, n° 2, pages 260–271, Feb 2000.
- [Fearing 95] **Ronald S. Fearing.** *Survey of Sticking Effects for Micro Parts Handling.* IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 'Human Robot Interaction and Cooperative Robots', vol. 2, pages 212–217, 1995.
- [femto tools 15] **femto tools.** <http://www.femtotools.com/>. 2015.
- [Floyd 09a] **Steven Floyd, Chytra Pawashe et Metin Sitti.** *Microparticle manipulation using multiple untethered magnetic micro-robots on an electrostatic surface.* IEEE/RSJ International Conference Intelligent Robots and Systems, pages 528–533, 2009.
- [Floyd 09b] **Steven Floyd, Chytra Pawashe et Metin Sitti.** *Modeling and Experimental Characterization of an Untethered Magnetic Micro-Robot.* The International Journal of Robotic Research, vol. 28, n° 8, pages 1077–1094, 2009.
- [Folio 11] **David Folio, Christian Dahmen, Tim Wortmann, M. Arif Zeehan, Kaiyu Shou, Salvador Pane, Bradley J. Nelson, Antoine Ferreira et Sergej Fatikow.** *MRI magnetic signature imaging, tracking and navigation for targeted micro/nano-capsule therapeutics.* IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pages 1297 – 1303, 2011.
- [Frutiger 10a] **Dominic R. Frutiger.** *MagMites : Design, Fabrication, and Control of Wireless Resonant Magnetic Micromachines for Dry and Wet Environments.* Thèse de doctorat, ETH Zurich, 2010.
- [Frutiger 10b] **Dominic R. Frutiger, Bradley Kratochvil et Bradley J. Nelson.** *MagMites - Microrobots for Wireless Microhandling in Dry and Wet Environments.* IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 1112 – 1113, 2010.
- [Frutiger 10c] **Dominic R. Frutiger, Karl Vollmers, Bradley Kratochvil et Bradley J. Nelson.** *Small, Fast, and Under Control : Wireless Resonant Magnetic Micro-agents.* The International Journal of Robotics Research, vol. 29, n° 5, pages 613–636, 2010.

- [Fukada 13] **Shota Fukada, Kazuhisa Onda, Hisataka Maruyama, Taisuke Masuda et Fumihito Arai.** *3D fabrication and manipulation of hybrid nanorobots by laser.* IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 1050–4729, 2013.
- [Gahinet 94] **Pascal Gahinet et Pierre Apkarian.** *A Linear Matrix Inequality Approach to H_∞ Control.* International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 4, n° 4, pages 421–448, 1994.
- [Ghosh 09] **Ambarish Ghosh et Peer Fischer.** *Controlled Propulsion of Artificial Magnetic Nanostructured Propellers.* Nano Letters, vol. 9, n° 6, pages 2243–2245, 2009.
- [Hagiwara 11a] **Masaya Hagiwara, Tomohiro Kawahara, Lin Feng, Yoko Yamanishi et Fumihito Arai.** *High performance magnetically driven microtools with ultrasonic vibration for biomedical innovations.* IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 3453–3454, 2011.
- [Hagiwara 11b] **Masaya Hagiwara, Tomohiro Kawahara, Lin Feng, Yoko Yamanishi et Fumihito Arai.** *On-chip enucleation of oocyte by magnetically driven microtools with ultrasonic vibration.* IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 2680–2685, 2011.
- [Hagiwara 11c] **Masaya Hagiwara, Tomohiro Kawahara, Yoko Yamanishi, Taisuke Masuda, Lin Feng et Fumihito Arai.** *On-chip magnetically actuated robot with ultrasonic vibration for single cell manipulations.* Lab on a Chip, vol. 11, n° 12, pages 2049–2054, 2011.
- [Hagiwara 12] **Masaya Hagiwara, Tomohiro Kawahara, Toru Iijima, Yoko Yamanishi et Fumihito Arai.** *High speed microrobot actuation in a microfluidic chip by levitated structure with riblet surface.* IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 2517–2522, 2012.
- [Haliyo 02] **Sinan Haliyo, Yves Rollot et Stephane Régnier.** *Manipulation of Micro-Objects using Adhesion Forces and Dynamical Effects.* IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 1949–1954, 2002.
- [Hamaker 37] **Hugo C. Hamaker.** *The London Van der Waals attraction between spherical particles.* Physica, vol. 4, n° 10, pages 1058–1072, 1937.
- [Hays 91] **Dan A. Hays.** Fundamentals of adhesion : Role of electrostatics in adhesion. Springer US, 1991.
- [Hirst 14] **Hirst Magnetic Instruments Ltd. Hirst.** *GM08 GAUSS METER.* <http://www.gaussmeter.co.uk/product/gauss-meter-gm08/>, 2014.

- [Isard 98] **Michael Isard et Andrew Blake.** *CONDENSATION - Conditional Density Propagation for Visual Tracking.* International Journal of Computer Vision, vol. 29, n° 1, pages 5–28, 1998.
- [Israelachvili 91] **Jacob N. Israelachvili.** Intermolecular and surface forces. Academic Press, 1991.
- [Ivan 11a] **Alexander I. Ivan, Joël Agnus, Micky Rakotondrabe, Philippe Lutz et Nicolas Chaillet.** *PMN-PT piezoelectric material and related applications in Silicon-integrated devices like microactuators and energy harvesters.* International Semiconductor Conference, pages 149–152, 2011.
- [Ivan 11b] **Alexander I. Ivan, Gilgueng Hwang, Joël Agnus, Micky Rakotondrabe, Nicolas Chaillet et Stéphane Régnier.** *First experiment on MagPieR : a planar wireless magnetic and piezoelectric microrobot.* IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 102 – 108, 2011.
- [Jeong 12] **Semi Jeong, Hyunchul Choi, Seong Young Ko, Jong-oh Park et Sukho Park.** *Remote Controlled Micro-Robots Using Electromagnetic Actuation (EMA) Systems.* IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, pages 482 – 487, 2012.
- [Jiang 10] **Guan-Lin Jiang, Yunn-Horng Guu, Chiang-Ni Lu, Pei-Kao Li, Hui-Mei Shen, Lung-Sheng Lee, Jerliang Andrew Yeh et Max Ti-Kuang Hou.** *Development of rolling magnetic microrobots.* Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 20, n° 8, page 085042, 2010.
- [Jing 11] **Wuming Jing, Xi Chen, Sean Lyttle, Zhenbo Fu, Yong Shi et David J. Cappelleri.** *A magnetic thin film microrobot with two operating modes.* IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 96–101, 2011.
- [Keuning 11] **Jasper D. Keuning, Jeroen de Vries, Leon Abelmann et Sarthak Misra.** *Image-based magnetic control of paramagnetic microparticles in water.* IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pages 421–426, 2011.
- [Khalil 12] **Islam S. M. Khalil, Jasper D. Keuning, Leon Abelmann et Sarthak Misra.** *Wireless Magnetic-based Control of Paramagnetic Microparticles.* IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, pages 460–466, 2012.
- [Khalil 14] **Islam S. M. Khalil, Veronika Magdanz, Samuel Sanchez, Oliver G. Schmidt et Sarthak Misra.** *Wireless Magnetic-Based Closed-Loop Control of Self-Propelled Microjets.* PLoS ONE, vol. 9, n° 2, page e83053, 02 2014.

- [Kharboutly 10] **Mohamed Kharboutly, Michaël Gauthier et Nicolas Chaillet.** *Modeling the trajectory of a micro particle in a dielectrophoresis device.* IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 4125–4130, 2010.
- [Kober 13] **Jens Kober, Andrew J. Bagnell et Jan Peters.** *Reinforcement Learning in Robotics : A Survey.* The International Journal of Robotics Research, n° 11, pages 1238–1274, 2013.
- [Kósa 07] **Gábor Kósa, Moshe Shoham et Menashe Zaaroor.** *Propulsion Method for Swimming Microrobots.* IEEE Transactions on Robotics, vol. 23, n° 1, pages 137–150, 2007.
- [Kummer 10] **Michael Kummer, Jacob J. Abbott, Bradley E. Kratochvil, Ruedi Borer, Ali Sengul et Bradley J. Nelson.** *OctoMag : An Electromagnetic System for 5-DOF Wireless Micromanipulation.* IEEE Transactions on Robotics, vol. 26, n° 6, pages pp. 1006–1017, September 2010.
- [Lambert 07] **Pierre Lambert.** *Capillary forces in microassembly : Modeling, simulation, experiments, and case study.* Microtechnology and MEMS. Springer, 2007.
- [Li 06] **Ming-Bin Li et Meng Joo Er.** *Nonlinear System Identification Using Extreme Learning Machine.* International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, pages 1–8, 2006.
- [Lichtsteiner 08] **Patrick Lichtsteiner, Christoph Posch et Tobi Delbruck.** *A 128*128 120 dB 15 μ s Latency Asynchronous Temporal Contrast Vision Sensor.* IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 43, n° 2, pages 566–576, 2008.
- [Lifshitz 56] **Evgenni Mikhailovich Lifshitz.** *Sov. Phys. - JETP*, vol. 73, n° 2, 1956.
- [Mahoney 14] **Arthur Mahoney et Abbott Jake.** *5-DOF Manipulation of an Untethered Magnetic Device in Fluid using a Single Permanent Magnet.* Proceedings of Robotics : Science and Systems, 2014.
- [Mahoneya 11] **Arthur W. Mahoneya, John C. Sarrazinb, Eberhard Bambergb et Jake J. Abbott.** *Velocity Control with Gravity Compensation for Magnetic Helical Microswimmers.* Advanced Robotics, vol. 25, n° 8, pages 1007–1028, 2011.
- [Marino 14] **Hamal Marino, Christos Bergeles et Bradley J. Nelson.** *Robust Electromagnetic Control of Microrobots Under Force and Localization Uncertainties.* IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 11, n° 1, pages 310–316, 2014.

- [Martel 09] **Sylvain Martel, Ouajdi Felfoul, Jean-Baptiste Mathieu, Arnaud Chanu, Samer Tamaz, Mahmood Mohammadi, Martin Mankiewicz et Nasr Tabatabaei.** *MRI-based Medical Nanorobotic Platform for the Control of Magnetic Nanoparticles and Flagellated Bacteria for Target Interventions in Human Capillaries.* The International Journal of Robotic Research, vol. 28, n° 9, pages 1169–1182, 2009.
- [McLachlan 64] **A. McLachlan.** *Three-body dispersion forces.* Mol. Phys., vol. 7, pages 423–427, 1964.
- [Ni 14] **Zhenjiang Ni, Sio-Hoi Ieng, Christoph Posch, Stéphane Régnier et Ryad Benosman.** *Visual Tracking using Neuromorphic Asynchronous Event-based Cameras.* Neural Computation, 2014. to appear.
- [O’Handley 99] **Robert C. O’Handley.** *Modern Magnetic Materials : Principles and Applications.* Wiley-Interscience, novembre 1999.
- [Onda 12] **Kazuhisa Onda et Fumihito Arai.** *Parallel teleoperation of holographic optical tweezers using multi-touch user interface.* IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 1069–1074, 2012.
- [Paprotny 12] **Igor Paprotny, Christopher Levey, Paul Wright et Bruce Donald.** *Turning-rate Selective Control : A New Method for Independent Control of Stress-engineered MEMS Microrobots.* Proceedings of Robotics : Science and Systems, 2012.
- [Pawashe 09] **Chytra Pawashe, Steven Floyd et Metin Sitti.** *Modeling and Experimental Characterization of an Untethered Magnetic Micro-Robot.* The International Journal of Robotic Research, vol. 28, pages 1077–1094, August 2009.
- [Pawashe 12] **Chytra Pawashe, Steven Floyd, Eric D. Diller et Metin Sitti.** *Two-Dimensional Autonomous Microparticle Manipulation Strategies for Magnetic Microrobots in Fluidic Environments.* IEEE Transactions on Robotics, vol. 28, n° 2, pages 467–477, 2012.
- [Peyer 13] **Kathrin E. Peyer, Li Zhang et Bradley J. Nelson.** *Bio-inspired magnetic swimming microrobots for biomedical applications.* Nanoscale, vol. 5, n° 4, pages pp. 1259–1272, 2013.
- [Photron 15] **High Speed Camera Products Photron.** *www.photron.com.* 2015.
- [Pouponneau 06] **Pierre Pouponneau, L’Hocine Yahia, Yahye Merhi, Laura Mery Epure et Sylvain Martel.** *Biocompatibility of candidate materials for the realization of medical microdevices.* IEEE International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society, pages 2362–2365, 2006.

- [Rakotondrabe 07] **Micky Rakotondrabe, Yassine Haddab et Philippe Lutz.** *High-Stroke Motion Modelling and Voltage/Frequency Proportional Control of a Stick-Slip Microsystem.* IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 4490–4496, 2007.
- [Ramanujan 05] **Raju V. Ramanujan et Y. Y. Yeow.** *Synthesis and characterisation of polymer-coated metallic magnetic materials.* Materials Science and Engineering, vol. 25, n° 1, pages 39–41, 2005.
- [Régnier 08] **Stéphane Régnier et Nicolas Chaillet.** *La microrobotique : applications à la micromanipulation.* Hermes science publ. Lavoisier 2008., 2008.
- [Salmon 13] **Hugo Salmon, Laurent Couraud et Gilgueng Hwang.** *Swimming property characterizations of Magnetic Polarizable microrobots.* IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 5520–5526, 2013.
- [Sira-Ramirez 02] **Hebertt Sira-Ramirez.** *Dynamic second-order sliding mode control of the hovercraft vessel.* IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 10, n° 6, pages 860–865, 2002.
- [Sul 06] **Onejae J. Sul, Michael R. Falvo, R. M. Taylor, Sean Washburn et Richard Superfine.** *Thermally actuated untethered impact-driven locomotive microdevices.* Applied Physics Letters, vol. 89, n° 20, pages –, 2006.
- [Tipler 87] **P.A. Tipler.** *College physics.* Worth Publishers, 1987.
- [Tottori 12] **Soichiro Tottori, Li Zhang, Famin Qiu, K. Krawczyk, A. Franco-Obregón et Bradley J. Nelson.** *Magnetic Helical Micromachines : Fabrication, Controlled Swimming, and Cargo Transport.* Advanced Materials, vol. 24, n° 6, pages 811–816, 2012.
- [Trimmer 89] **W.S.N. Trimmer.** *Microrobots and micromechanical systems.* Sensors and Actuators, vol. 19, n° 3, pages 267–287, 1989.
- [Tung 14] **Hsi-Wen Tung, Massimo Maffioli, Dominic R. Frutiger, Kartik M. Sivaraman, Salvador Pane et Bradley J. Nelson.** *Polymer-Based Wireless Resonant Magnetic Microrobots.* IEEE transactions on robotics, vol. 30, n° 1, pages 26–32, 2014.
- [Veron 13] **Baptiste Veron, Arnaud Hubert, Joël Abadie et Nicolas Andreff.** *Geometric analysis of the singularities of a magnetic manipulation system with several mobile coils.* IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pages 4996–5001, 2013.
- [Vollmers 08] **Karl Vollmers, Dominic R. Frutiger, Bradley E. Kratochvil et Bradley J. Nelson.** *Wireless resonant magnetic microactuator*

- for untethered mobile microrobots*. Applied Physics Letters, vol. 92, n° 14, 2008.
- [Wautelet 01] **Michel Wautelet**. *Scaling laws in the macro-, micro- and nano-worlds*. European Journal of Physics Volume 22 Number 6, vol. 22, pages 602–611, 2001.
- [Xie 11] **Hui Xie, Cagdas Onal, Stéphane Régnier et Metin Sitti**. Atomic force microscopy based nanorobotics. Springer Verlag, 2011.
- [Xu 14a] **Tiantian Xu, Gilgueng Hwang, Nicolas Andreff et Stéphane Régnier**. *Characterization of Three-dimensional Steering for Helical Swimmers*. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 4686–4691, 2014.
- [Xu 14b] **Tiantian Xu, Gilgueng Hwang, Nicolas Andreff et Stéphane Régnier**. *Modeling and Swimming Property Characterizations of Scaled-Up Helical Microswimmers*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 19, n° 3, pages 1069 – 1079, 2014.
- [Yamazaki 04] **Aya Yamazaki, Masahiko Sendoh, Kazushi Ishiyama, Ken Ichi Arai, Ryutaro Kato, Masaki Nakano et Hirotohi Fukunaga**. *Wireless micro swimming machine with magnetic thin film*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 272–276, Supplement, pages E1741 – E1742, 2004.
- [Yang 09] **Wan'an Yang, Chao Hu, M.Q.-H. Meng, Shuang Song et Houde Dai**. *A Six-Dimensional Magnetic Localization Algorithm for a Rectangular Magnet Objective Based on a Particle Swarm Optimizer*. Magnetism, IEEE Transactions on, vol. 45, n° 8, pages 3092–3099, Aug 2009.
- [Yeşin 06] **Kemal Berk Yeşin, Karl Vollmers et Bradley J. Nelson**. *Modeling and control of Untethered Biomicrobots in a Fluidic environment using Electromagnetic Fields*. The International Journal of Robotics Research, vol. 25, n° 5–6, pages 527–536, 2006.
- [Zhang 09] **Li Zhang, Jacob J. Abbott, Lixin X. Dong, Bradley E. Kratochvil, Dominik J. Bell et Bradley J. Nelson**. *Artificial Bacterial Flagella : Fabrication and Magnetic Control*. Applied Physics Letters, vol. 94, n° 6, 2009.