



## EU4M : EUropean Master in Mechatronics and MicroMechatronics Systems

### Mémoire de stage master

Domaine : Sciences – Technologies – Santé

Mention : Sciences Pour l'Ingénieur

Spécialité

### **Mécanique – Mécatronique – Microsystèmes et Ingénierie**

### Mesure de micro-force par vision

Lucas LOPES LEMOS

Institut FEMTO-ST, département AS2M  
24, rue Alain Savary  
25000 Besançon - France



# Remerciements

Dans ce mémoire, l'unique endroit où j'utiliserais le pronom "je" sera ici dans les remerciements. Je pense qu'un travail de recherche comme celui-ci est assez complexe pour qu'un étudiant puisse le développer tout seul. De cette forme, il faut être reconnaissant avec les collaborations des autres personnes et utiliser plutôt le "nous" dans les textes. Je consacrerais les prochaines lignes à des remerciements à ceux qui d'une façon directe ou indirecte ont contribué à ce travail.

Je voudrais adresser mes premiers remerciements à ceux qui sont de l'autre côté de l'océan, au Brésil. Je remercie d'abord ma famille, surtout mes parents, pour leur soutien. Je remercie également, avec un accent espagnol, Rosenda Valdés Arencibia, professeur à l'Université Fédérale d'Uberlândia, pour m'avoir initié à la recherche scientifique.

Puis, de l'autre côté du méridien, je remercie les membres de l'équipe du master EU4M qui ont beaucoup travaillé pour la formulation d'un programme intéressant et constructif. Un "dank", un "merci beaucoup" et un "muchas gracias" doivent être spécialement dirigés aux directeurs et directrices du master : Fritz Neff (Allemagne), Nadine Piat (France), Constantina Alvarez et Miguel José Prieto (Espagne).

J'offre mes sincères remerciements aux Messieurs Cédric Clevy et Guillaume Laurent qui m'ont encadré tout au long de ce stage et qui m'ont fait partager leurs savoirs et expériences. Merci pour m'avoir prodigué de nombreux conseils pour le bon développement des travaux de ce stage.

Je désire exprimer toute ma reconnaissance à July A. Galeano Zea et à Patrick Sandoz pour leurs grandes contributions au développement du projet. Merci pour leurs remarques, leurs questionnements, leurs conseils et surtout un merci beaucoup pour m'avoir transférée une grosse partie de leurs connaissances.

Pour finir, je remercie tout le personnel du département AS2M de l'institut FEMTO-ST pour me faire sentir comme si j'étais chez moi.



# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>9</b>
<b>1 État-de-l'art</b>	<b>11</b>
1.1 Défis de la micro-manipulation . . . . .	11
1.2 Capteurs de micro-force . . . . .	14
1.2.1 Capteurs piézorésistifs . . . . .	14
1.2.2 Capteurs capacitifs . . . . .	16
1.2.3 Capteurs piézoélectriques . . . . .	18
1.2.4 Capteurs optiques . . . . .	19
1.3 Systèmes de mesure de micro-force par vision . . . . .	19
1.4 Conclusion . . . . .	21
<b>2 Mesure de déplacements avec résolution subpixélique</b>	<b>25</b>
2.1 Présentation de la méthode . . . . .	26
2.1.1 Détermination de la position relative par la méthode de différence de phase . . . . .	26
2.1.2 Décodage de la mire . . . . .	29
2.2 Conclusions . . . . .	32
<b>3 Le système de mesure de micro-force par vision</b>	<b>33</b>
3.1 Présentation et modélisation de la plateforme de micro-manipulation . . . . .	33
3.2 Description de la station de mesure . . . . .	34
3.3 Essais expérimentaux . . . . .	36
3.3.1 Essais de mesure de position . . . . .	36
3.3.2 Détermination de la raideur de la plateforme . . . . .	43
3.3.3 Essais de validation de la méthode . . . . .	44
3.4 Conclusions . . . . .	45
<b>4 Incertitude de mesure</b>	<b>47</b>
4.1 La démarche d'estimation et expression de l'incertitude de mesure . . . . .	47
4.2 Estimation et expression de l'incertitude de la mesure de force . . . . .	48
4.2.1 Incertitude de mesure des déformations . . . . .	49
4.2.2 Incertitude de mesure de la raideur . . . . .	52

---

4.3 Conclusions . . . . .	55
<b>5 Conclusion générale et perspectives</b>	<b>57</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>62</b>

# Table des figures

1.1	(a) Assemblage d'un cube de 20 mm de longueur. (b) Assemblage d'un cube de 0,2 mm de longueur. . . . .	12
1.2	Poutre soumis à une charge mécanique. . . . .	15
1.3	Changement de la capacitance avec l'application d'une force. . . . .	16
1.4	Capteur capacitif connecté à une sonde. [1] . . . . .	17
1.5	Comparatif de plage de mesure des capteurs de micro-force décrits dans 1.2. . . . .	22
1.6	Comparatif de plage de mesure entre les méthodes de mesure de micro-force par vision décrites dans 1.3 et la région correspondante à l'objectif du stage. . . . .	23
2.1	Image d'un ensemble de franges périodiques avec la représentation de son signal sinusoïdal. . . . .	27
2.2	Illustration de la liaison entre la différence de phase et le déplacement d'un ensemble de franges. . . . .	27
2.3	Matrice périodique de points (a) avec son spectre de puissance (b). . . . .	28
2.4	Principe du codage de la mire. . . . .	30
2.5	Combinaison de séquences LFSR pour le codage 2D. . . . .	31
2.6	Identification de la présence ou l'absence d'un point. . . . .	31
3.1	(a) Conception de la plateforme de micro-manipulation. (b) Plateforme de micro-manipulation avec la mire codée attachée. . . . .	34
3.2	Image du système de mesure de micro-force par vision. . . . .	35
3.3	Détail de la station de mesure. . . . .	35
3.4	Schéma de la vue de dessus de la station de mesure. . . . .	37
3.5	Image d'un morceau de la mire capté par le système de vision. . . . .	37
3.6	Résultats de l'essai statique pour la mesure de déplacements dans la direction $x$ . . . . .	38
3.7	Résultats de l'essai statique pour la mesure de déplacement dans la direction $y$ (a) et de la rotation du plan de la mire par rapport à la caméra (b). . . . .	39
3.8	Résultats de l'essai avec une rampe en entrée de déplacement dans la direction $x$ . . . . .	40

3.9	Résultats de l'essai avec une rampe en entrée pour les mesures de déplacement dans la direction $y$ (a) et de la rotation du plan de la mire (b). . . . .	40
3.10	Extrait de la partie en mouvement de l'essai d'exactitude pour les mesures de déplacement dans la direction $x$ . . . . .	41
3.11	Essai de répétabilité pour la mesure de déplacement dans la direction $x$ . . . . .	42
3.12	Essai de répétabilité pour la mesure de déplacement dans la direction $y$ (a) et de la rotation du plan de la mire (b). . . . .	42
3.13	Déplacement de la navette (en vert) et force d'interaction entre la plate-forme de micro-manipulation et le capteur de force (en noir). . . . .	43
3.14	Mesure de force (a) et déformation (b) par la vision et par de capteurs externes. . . . .	44
3.15	Mesure de force (a) et déformation (b) par la vision et par de capteurs externes. . . . .	45
5.1	Comparatif de plage de mesure entre les méthodes de mesure de micro-force par vision décrites dans 1.3 avec la région correspondante au résultat du stage. . . . .	58

# Introduction

À LA FIN des années 1980, en voyant le succès technologique et économique de l'électronique, la communauté de la recherche en robotique et l'industrie se sont intéressés à la conception de micro-systèmes hybrides, caractérisés par la combinaison entre des éléments mécaniques et électroniques. A partir de là, nous avons été témoins de l'essor de divers produits mécatroniques quasi invisibles à nos yeux comme les accéléromètres, présents dans les véhicules pour déclencher des airbags, plus récemment encore dans les *smartphones*, dans les miroirs déformables des gros télescopes qui corrigent des images floues ou encore dans l'innovant distributeur d'insuline composé par une matrice d'aiguilles très petites et fines qui, fixée sur la peau, délivre continuellement de l'insuline (encore en phase finale de tests). L'apparition de nouveaux termes comme MEMS<sup>1</sup>, MOEMS<sup>2</sup> et NEMS<sup>3</sup> est également remarquable.

En général, ces micro-systèmes permettent l'amélioration de performances telles que la précision, la vitesse, la sensibilité et la réduction du poids et de la consommation énergétique. Intellectuellement, ils représentent un défi scientifique avec un horizon d'exploration assez large et prometteur [33].

Des progrès considérables ont été réalisés pour la fabrication de micro-systèmes. Des nouvelles techniques ainsi que des nouveaux matériaux ont été proposés pour la création de petits dispositifs. Cependant, malgré ces progrès, la majorité des mécanismes submillimétriques développés aujourd'hui utilise des processus et des matériaux créées par l'industrie du semi-conducteur. Par conséquent, lorsque nous développons un micro-système, nous sommes souvent limités à l'utilisation des *wafers* de silicium et donc à la conception en deux dimensions et demie [3]. De cette façon, l'assemblage, une tâche essentielle pour la fabrication d'un produit, devient fondamentale pour la construction de structures hétérogènes et en trois dimensions [8].

À l'échelle du micron, le succès d'une manipulation dépend du positionnement précis des éléments et du contrôle des forces d'interaction entre les pièces, les manipulateurs et l'environnement. La connaissance des forces en jeu est importante car les micro-objets sont parfois fragiles et peuvent être facilement endommagées au long de l'exécution de la manipulation [12]. De plus, l'observation de la force rend possible la détection du contact ce qui nous permet de savoir quand un manipulateur touche une pièce [14].

1. MEMS : Micro-Electro-Mechanical Systems
2. MOEMS : Micro-Optical-Electro-Mechanical Systems
3. NEMS : Nano-Electro-Mechanical Systems

Comme les efforts impliqués dans les micro-manipulations sont de l'ordre de quelques micro-Newton, des capteurs de force spéciaux dont la haute résolution est une caractéristique indispensable doivent être utilisés. Sur le marché, nous pouvons trouver une large gamme de ces dispositifs avec différents principes de fonctionnement, résolution et plage de mesure. Actuellement, les capteurs de force les plus utilisés dans les micro-techniques sont les capteurs piézorésistifs, les capteurs piézoélectriques, les capteurs capacitifs et les capteurs optiques [24]. Les trois premiers mentionnés nécessitent un contact avec l'objet pour réaliser des mesures tandis que le dernier peut estimer des efforts d'interaction à distance. En outre, tous ces capteurs ont besoin d'équipements complémentaires pour l'amplification et le conditionnement du signal de sortie. Enfin, comme le sera montré dans les prochaines sections, il n'existe pas encore un système de mesure qui a un rapport plage de mesure/résolution important.

Dans ce travail, nous proposons un nouveau système de mesure de micro-force en utilisant la vision. Les stations de micro-manipulation en général disposent d'une caméra CCD, d'un objectif ou d'un microscope et d'un ordinateur pour l'exécution de ses fonctions. Ainsi, le premier avantage d'un tel système est l'utilisation des appareils qui existent déjà dans ces stations. La vision possède encore des autres bénéfices comme la mesure de force sans contact et la facilité d'adaptation à diverses applications.

Nous décrivons dans ce manuscrit la démarche du développement d'un système de mesure de force par vision sur une direction appliquée à une plateforme de micro-manipulation compliant. Pour augmenter la résolution et la plage de mesure du système nous nous servirons d'une méthode d'estimation de la position d'un objet au niveau subpixélique. Cette méthode a été proposée par Zea et Sandoz [39] et consiste en une combinaison entre la vision et le mode de traitement des données de l'interférométrie. Une position est estimée en deux étapes : (1) évaluation de la position relative par différence de phase (2) récupération de la position absolue en utilisant d'un codage incorporé à une mire.

Ce mémoire est organisé de la façon suivante : le premier chapitre est consacré à l'état-de-l'art où nous conduisons l'analyse de publications existantes importantes pour le développement du projet ; dans le deuxième chapitre nous exposons la méthode de mesure de déplacements qui dispose d'une résolution subpixélique ; la troisième partie concerne la description du système de mesure de force et la validation expérimentale ; dans le quatrième chapitre nous discutons sur les incertitudes de mesure de notre système ; dans le cinquième chapitre nous présentons des conclusions, commentaires et perspectives.

# Chapitre 1

## État-de-l'art

DANS ce chapitre nous faisons une brève discussion sur quelques points de la littérature pertinents par rapport à notre projet. Le but de cette analyse est de réfléchir aux défis de la micro-manipulation qui expliquent les besoins de la mesure de forces (1.1). Nous présentons également l'étude des capteurs de forces les plus utilisés dans le domaine des micro-techniques (1.2) et les systèmes de mesure de micro-force par vision déjà proposés (1.3) de façon à justifier la conception d'un nouveau système de mesure de micro-force et à extraire des informations qui vont nous aider à établir un cahier des charges. À la fin du chapitre, des commentaires et conclusions (1.4) seront proposés.

### 1.1 Défis de la micro-manipulation

Dans le macro-monde, les tâches telles que le déplacement, le positionnement et l'assemblage peuvent être exécutées sans grands problèmes (par les humains) à l'œil nu et sans la nécessité d'outils spéciaux. À cette échelle, les pièces sont parfaitement visibles et nous pouvons les sentir aisément avec nos doigts. De plus, la force de la gravité est tellement importante qu'on la considère comme la seule interaction entre la pièce et l'environnement, en négligeant les autres comme celles de surface. Enfin, la précision de positionnement et les tolérances de fabrication et d'assemblage de macro-machines sont de l'ordre d'une centaine de micromètres et peuvent être atteintes par un ouvrier entraîné.

En revanche, quand on travaille avec des pièces de taille submillimétrique nous avons des difficultés à voir ainsi qu'à identifier précisément le moment où on les touche. À titre d'illustration, observons la Figure 1.1. Dans la partie (a) de ce dessin nous trouvons un cube et un support pour celui-ci avec des dimensions millimétriques. Déplacer le cube vers l'alésage qui se localise à son côté droit ne nous pose pas de problème dès qu'on exécute cette tâche dans des conditions normales de température et de pression. Néanmoins, dans la partie (b), où le même ensemble est présent mais à l'échelle du micron, nous ne pouvons pas identifier visuellement les pièces. Ainsi, la première grande différence entre la manipulation de macro- et micro-pièces est l'aptitude des opérateurs de percevoir les composants.

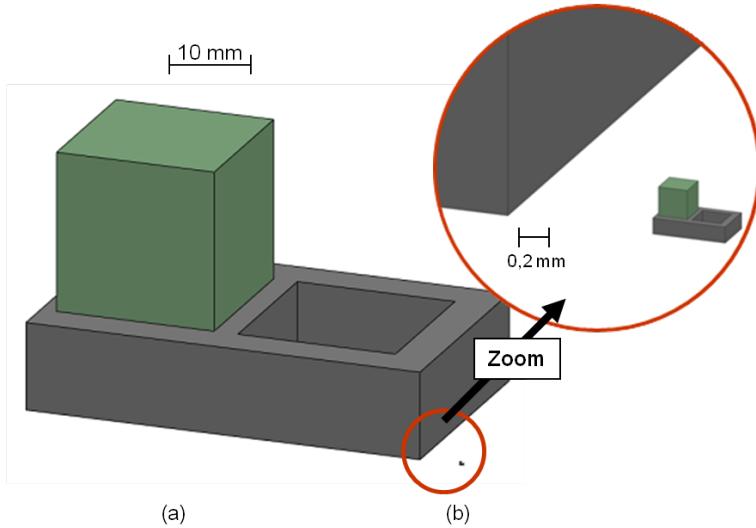


FIGURE 1.1 – (a) Assemblage d'un cube de 20 mm de longueur. (b) Assemblage d'un cube de 0,2 mm de longueur.

Une conséquence directe de ce fait est le besoin d'outils spécifiques pour le déroulement des opérations de micro-manipulation. En général, ils consistent en un système de vision, composé normalement par une caméra CCD montée sur un objectif ou un microscope, un dispositif de positionnement assez fidèle et un mécanisme manipulateur.

La deuxième disparité entre des manipulations à ces deux échelles, considéré par Nelson et al. [24] et Brussel et al. [8] comme la principale, est la précision de positionnement que de telles activités nécessitent. D'une part, pour le domaine du macro, des erreurs de placement de l'ordre de quelques centaines de micromètres sont en principe acceptables. D'autre part, pour le micro-monde, souvent une fidélité en dessous du micron est obligatoire. Le nanomètre est un degré de précision qui exige des équipements de positionnement avec une grande résolution et un haut niveau de fidélité et d'exactitude. Le développement des axes robotiques pour cette échelle est assez difficile car le modèle cinématique est complexe et beaucoup influencé par les effets de la température.

Un autre aspect divergent entre le macro et le micro, le plus important à notre projet, est la mécanique d'interaction entre les objets [8], [24], [27]. Au niveau du millimètre, lorsqu'on tient une vis avec une pince, par exemple, et qu'on ouvre ses doigts, dans des conditions ambiantes normales on sait que la vis va tomber par terre. Le principe cause-effet est applicable à ce cas parce que la force de la gravité est beaucoup plus grande que la somme des autres efforts. Ce fait nous permet de prédire *a priori* les événements d'un processus. En revanche, dès que nous commençons à miniaturiser des pièces, la masse, le volume et le poids se réduisent à un rapport proportionnel à  $(longueur)^3$  tandis que la surface diminue de  $(longueur)^2$ . De cette façon, pour une longueur donnée, les effets de surface et la force électrostatique vont devenir plus importants que la force de gravité. Ainsi, si une micro-pince qui serre une micro-vis ouvre ses doigts, nous ne pouvons plus

savoir à l'avance si la pièce va tomber ou rester en contact avec l'outil. Les interactions entre des objets de masse très petite relèvent de phénomènes physiques encore mal connus par la science. Il n'existe pas un modèle fiable qui régit leur comportement. Le système de forces en jeu dans ce cas est plus complexe et nous ne pouvons pas déterminer sa résultante sans avoir mesuré les efforts. En d'autres mots, sans la mesure des micro-forces on perd la prévisibilité des phénomènes. La prévisibilité est la clé maîtresse pour la création de micro-manipulations automatiques.

Par ailleurs, la micro-manipulation concerne l'ensemble des manipulations robotiques des objets qui ont une taille comprise entre  $1 \mu\text{m}$  et quelques millimètres [3]. Le micro-assemblage et la manipulation de cellules sont des exemples de telles tâches.

Dans le prochain paragraphe nous allons parler sur les spécificités des micro-assemblages et le suivant est consacré à la présentation des problématiques des bio-manipulations.

Actuellement, la photolithographie et les *wafers* de silicium sont le couple de base de plusieurs techniques de fabrication de MEMS. Ces procédés produisent généralement des objets plans et monolithiques qui nécessitent très peu d'assemblage. La conception de micro-systèmes composés par des pièces qui ont des processus de fabrication incompatibles, différents matériaux ou avec une géométrie complexe passe nécessairement par des opérations d'assemblage [11]. Les micro-assemblages de nos jours sont normalement pilotés par des humains dans des stations de micro-manipulation. Des mécanismes à haute précision, délicats, chers et difficiles à adapter à différentes situations sont téléopérés par un opérateur bien entraîné. Le prix final d'un MEMS assemblé augmente beaucoup car de telles opérations sont largement affectées par des erreurs humaines et parce qu'elles ont globalement besoin de beaucoup de temps pour l'exécution d'un cycle [5]. La réduction des coûts et la production en masse de ces produits sont attendues par l'utilisation des assemblages automatiques. Plusieurs travaux ont été menés pour la conception de systèmes pour les micro-assemblages [11], pourtant, très peu ont concerné des opérations automatiques. En général, les micro-assemblages automatiques combinent des informations de position et force pour la commande du processus [5]. Ces données sont acquises à l'aide de capteurs qui, en général, nécessitent du contact pour réaliser les mesures. Comme les éléments présents ont des dimensions très petites, incorporer l'organe sensible du capteur est physiquement difficile ou même impossible. Ainsi, la mesure de force sans contact, comme celles qui peuvent être effectuées à partir de la vision, sont envisageables.

La bio-manipulation, terme qui désigne des manipulations de micro-structures vivantes comme le positionnement, la préhension et l'injection de matière dans les cellules [38], est aussi une activité réalisée en général manuellement. L'opérateur doit disposer d'un long entraînement et même ceux qui ont beaucoup d'expérience ne sont pas capables de reproduire fidèlement des essais. En vérité, le taux de succès des bio-manipulations réalisées par des humains est très bas [26]. Dernièrement des MEMS ont été conçus pour ce domaine pour aider les manipulations. Ces dispositifs incorporent un manipulateur et un capteur de force dans un même outil. Les enjeux de l'utilisation de ces dispositifs sont liés à la mesure précise des efforts de contact et, principalement, à la compatibilité entre le matériel du MEMS et celui des cellules. Une incompatibilité peut provoquer la

contamination ainsi que l'endommagement des éléments de l'expérience. La mesure de force sans contact est envisagée dans ce cas pour permettre l'utilisation des manipulateurs compatibles avec le matériel biologique et surtout pour rendre possible la création de tâches automatiques.

## 1.2 Capteurs de micro-force

Selon Lu et al. [22], la manipulation des objets avec une grande précision peut être facilitée avec le contrôle des forces présentes dans le processus. En outre, la connaissance des efforts existants dans des micro-assemblages ou des bio-manipulations est d'importance fondamentale pour la protection des éléments en manipulation et aussi pour l'établissement de tâches automatiques. La mesure de force est effectuée par des organes qui permettent de transformer des efforts d'interaction en signaux électriques. Comme dans la micro-manipulation la gamme de forces est de l'ordre des  $\mu\text{N}$  jusqu'aux  $n\text{N}$  et parfois plus petit, des capteurs spéciaux qui disposent de haute résolution sont nécessaires. Actuellement le marché propose une vaste diversité de ces dispositifs. Les plus utilisés par les spécialistes des micro-techniques sont les capteurs piézorésistifs, les capteurs piézoélectriques, les capteurs capacitifs et les capteurs optiques. Il est très important de connaître les caractéristiques les plus importantes de chacun comme le principe de fonctionnement, la résolution, les avantages et les inconvénients pour être en mesure de choisir le meilleur pour une certaine application. De cette forme, dans les sections suivantes, une description de capteurs susmentionnés sera faite.

### 1.2.1 Capteurs piézorésistifs

Le principe de fonctionnement des capteurs piézoresistifs est fondé sur l'effet de la variation de la résistance des matériaux lorsqu'ils sont soumis à des charges mécaniques. Une poutre faite d'un matériel de résistivité  $\rho$  et qui a pour dimensions la longueur  $L$ , la largeur  $H$  et l'épaisseur  $E$ , peut avoir sa résistance électrique estimée par l'équation 1.1.

$$R = \rho \frac{L}{HE} \quad (1.1)$$

Quand une force  $F$  normale à la section transversale est appliquée à cet objet, sa géométrie changera proportionnellement à la magnitude de cet effort, comme le montre la Figure 1.2. Avec la connaissance des nouvelles dimensions de la poutre ( $L'$ ,  $H'$  et  $E'$ ) il est possible de recalculer la valeur de la résistance à partir de l'équation précédente. La différence entre les deux résistances, évaluée par un circuit électrique tel qu'un pont de Wheatstone, nous permet de calculer la sollicitation mécanique. D'une façon générale, les matériaux comme l'acier et le silicium ont la résistivité électrique constante au long d'un intervalle de déformation. Par conséquent, il existe une relation linéaire entre la force et la variation de la résistance dans cette plage. Ainsi, cette caractéristique des matériaux, connue comme effet piézorésistif, peut être appliquée à la conception de capteurs.

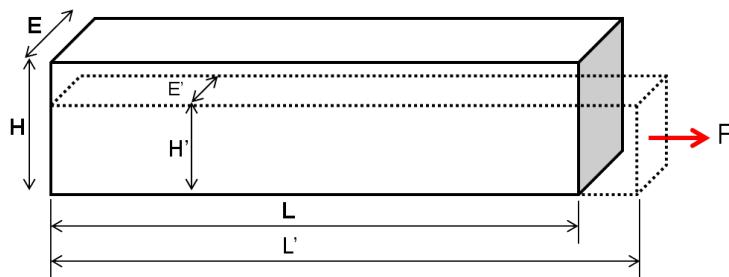


FIGURE 1.2 – Poutre soumis à une charge mécanique.

La résolution des capteurs piézorésistifs dépend de deux éléments : l'aptitude de l'élément sensitif de réagir à des excitations mécaniques et la capacité du circuit électrique de percevoir le changement de la résistance. Dans des systèmes qui travaillent avec des données numériques, la résolution du convertisseur analogique-numérique a également une influence sur la plus petite variation de force perceptible. En général, les systèmes de mesure de micro-forces composés par ce type de capteur ont une résolution de l'ordre de  $1 \mu\text{N}$  et une plage de mesure de centaines de  $\mu\text{N}$ . Dans la littérature, nous trouvons plusieurs essais d'amélioration de la résolution de ces systèmes. À ce propos, du côté de la transformation de micro-force en signal électrique, Tanikawa et al. [32] ont développé un transducteur capable de percevoir jusqu'à  $0,5 \text{ nN}$ , théoriquement. D'un autre côté, Haddab et al. [16] ont travaillé dans la partie de traitement du signal et ont utilisé des filtres de Kalman pour réduire les bruits de mesure et ainsi améliorer les estimations de micro-force avec des jauge de déformations.

Pour la mesure d'efforts, l'élément terminal doit être collé sur la surface où l'on désir mesurer des déformations ou tensions. À la méso-échelle cette opération peut être facilement exécutée parce que souvent le capteur est plus petit que l'objet à surveiller. En revanche, au niveau submillimétrique, les pièces sont tellement petites et donc la fixation des éléments sensitifs dans les zones d'intérêt est une tâche assez difficile, considérée comme un des inconvénients de ce genre de capteur. Le positionnement correct du transducteur est important pour garantir la fidélité et la répétabilité des estimations du système de mesure.

Concernant les applications, il existe des travaux dans lequel les jauge sont collées sur les doigts de la micro-pince pour récupérer la valeur de la force de serrage. Il y a aussi des situations où l'organe transducteur remplace un des doigts et travaille comme manipulateur et capteur [22]. Dans ces deux cas, la force est estimée dans une seule direction. Arai et al. [6] proposent un capteur piézorésistif qui mesure la force en trois directions.

Il existe diverses entreprises qui fabriquent ce type de capteur pour la mesure de micro-force. Par exemple, SensorOne™ fournit le très utilisé AE801® qui a une plage de mesure de  $0,12 \text{ N}$ . Sa résolution varie selon le système d'amplification et de conditionnement du signal de sortie.

En résumé, les avantages de ce modèle de capteur sont le bas coût d'acquisition, la

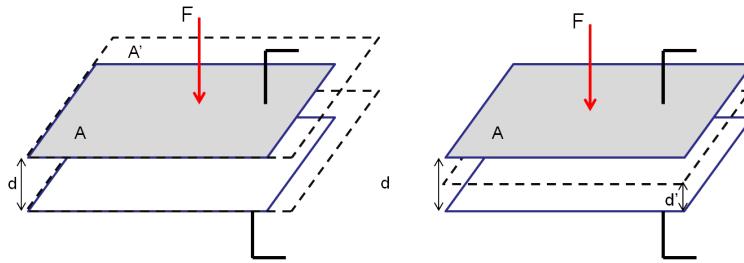


FIGURE 1.3 – Changement de la capacitance avec l’application d’une force.

bonne linéarité dans la plage de travail et la capacité de réaliser des mesures statiques et dynamiques en temps réel. Ses inconvénients sont la difficulté de positionner précisément le composant sensitif sur la zone où les charges se produisent, la variation de la constante de résistivité avec la température, le vieillissement de l’élément, la sensibilité à des champs électromagnétiques et la fragilité du capteur. De plus, comme les mesures sont effectuées à partir de la déformation de la structure du capteur, celui doit être assez compliant pour réussir à se déformer avec le plus petit effort. De grandes déformations limitent la réponse du système de mesure et à partir d’une certaine valeur provoque des erreurs de mesure due à l’hystérosis et à la non-linéarité [22]. Enfin, si les jauge sont connectées au système conditionneur en utilisant des câbles, la sensibilité du capteur va réduire et le facteur de la jauge ne sera plus le même car les fils ont aussi une résistance [13].

### 1.2.2 Capteurs capacitifs

La capacitance  $C$  entre deux plaques d’aire  $A$ , séparés d’une distance  $d$  par un matériau avec permittivité diélectrique  $\epsilon$  peut être calculée en utilisant l’expression 1.2.

$$C = \frac{A\epsilon}{d} \quad (1.2)$$

Dès qu’une force normale à ces plaques est appliquée à une d’elles, soit la valeur de l’aire  $A$  soit la distance  $d$  vont changer, comme l’expose la Figure 1.3. En conséquence, nous aurons que la capacitance  $C$  va aussi varier de façon proportionnelle à la force  $F$  et au changement de  $A$  ou  $d$ . La nouvelle valeur de la capacitance, quand mesurée par un circuit électrique, permet d’estimer la force  $F$ . Les composants sensitifs qui utilisent cet effet sont appelés capteurs capacitifs.

La technologie de production de MEMS est en mesure de fabriquer des senseurs capacitifs avec une grande sensibilité. Normalement le corps de ces dispositifs est monolithique, en silicium et composé par un châssis externe fixe et une structure interne mobile. Ces deux parties ont un peigne de fines plaques. Une sonde est souvent attachée à la structure mobile, comme le montre la Figure 1.4. Cette sonde est l’élément qui va entrer en contact avec l’objet sous tension mécanique et déplacer la structure mobile du capteur, en changeant la distance entre les plaques de la structure mobile et celles du châssis. De cette façon, la capacitance globale du système ne sera plus la même. Un cir-

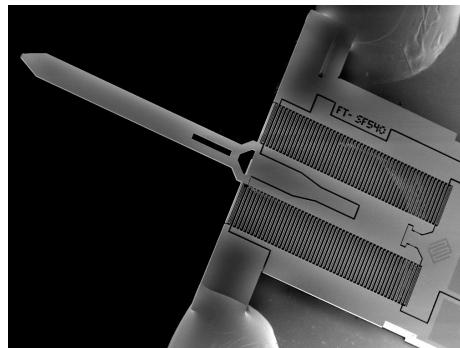


FIGURE 1.4 – Capteur capacitif connecté à une sonde. [1]

cuit électronique connecté à cette armature peut mesurer la variation de la capacitance et ainsi estimer la force. Pour augmenter la sensibilité de l'organe capacitif il est désirable d'avoir la plus petite distance entre les plaques et la plus grande aire de celles-ci. De plus, comme pour le capteur piézoresistif, la résolution d'un système de mesure composé par ce genre de dispositif est affecté par la sensibilité de l'organe capacitif et aussi par le système de conditionnement du signal. D'une façon globale, la plus petite variation de force perceptible est en dessous du microNewton et la plage de mesure est de quelques milliNewtons.

La société Femto Tools<sup>TM</sup> propose des produits intéressants pour la mesure de micro-force. La première gamme, composé par la pièce présente dans la Figure 1.4, est un capteur de force mono-axiale. La résolution, selon le modèle, peut être de 5 nN et la plage de mesure de jusqu'à 10 mN. Le deuxième ensemble de produit comprend des micro-pinces avec un élément moteur et un capteur intégrés dans un même dispositif. Cet appareil rend possible la manipulation et la mesure de force simultanément sur un même objet. La résolution du capteur de ce système a le même ordre que celle des capteurs avec la sonde [1]. En autre, Yamahata et al. [36] ont développé des micro-pinces qui intègrent un capteur capacitif qui ressemble un peu à ceux de Femto Tools<sup>TM</sup> et qui a été utilisé par Laffite et al. [19] pour la caractérisation des molécules d'ADN<sup>1</sup>. Enfin, nous pouvons trouver chez Yu et al. [37] le développement d'un prototype qui mesure la force selon deux directions.

Parmi les bénéfices que les capteurs capacitifs proposent, il est intéressant de citer leur basse consommation énergétique et génération de bruit, haute sensibilité, la capacité d'effectuer des mesures en temps réel en mode statique et dynamique. En outre, ces mesures sont plus stables que celles des jauge électriques et n'exhibent pas l'hystérésis. Cependant, ils sont sensibles à la température, à l'humidité et à des champs électromagnétiques externes. De plus, un système électronique robuste capable de mesurer de picoFaraday doit être conçu pour mesurer la variation de capacitance.

---

1. ADN : Acide DésoxyriboNucléique

### 1.2.3 Capteurs piézoélectriques

Les capteurs de force piézoélectriques sont construits à partir des matériaux qui deviennent polarisés lorsqu'ils sont soumis à des tensions mécaniques. Cet effet, appelé piézoélectricité, est observé en quelques matériaux céramiques comme les quartz, semi-conducteurs comme l'oxyde de zinc et polymères comme le PVDF<sup>2</sup>. La valeur des charges générées sont d'environ 2 pC/N pour le quartz et de 350 pC/N pour des céramiques artificielles [13]. Ces matériaux présentent aussi l'effet inverse, c'est-à-dire, une pièce de quartz qui reçoit un champ électrique change ses dimensions en réponse à cette entrée. La réciprocité des effets des piézoélectriques est utilisée pour la conception de systèmes qui sont en même temps actionneurs et capteurs.

La majorité des capteurs piézoélectriques sont fabriqués à partir du PVDF. Ce matériau dispose de plusieurs avantages par rapport aux autres comme une haute sensibilité, une considérable résistance mécanique et une bonne réponse sur un large spectre de fréquences [22]. La résolution d'un système de mesure qui incorpore ce type de capteur est liée, comme pour les deux cas précédents, à l'aptitude des dispositifs d'acquisition de données à capter la moindre charge électrique générée. En général, la résolution est en dessous du milliNewton.

Les matériaux céramiques et le PVDF ont la raideur comparable à celle de l'acier [22]. Ainsi, même avec des petites dimensions, un morceau de piézoélectrique maintient une bonne rigidité. Par conséquent, la déformation de ce capteur sera beaucoup plus petite que celle d'un capteur capacitif, par exemple. De cette façon, le temps de réponse de ce genre de dispositif est assez petit et ça permet la mesure de force d'événements extrêmement rapides.

En revanche, la charge électrique générée par le piezo à partir d'un effort se réduit rapidement après l'application de la force. Ce fait empêche l'estimation des charges statiques.

Concernant des applications, du côté d'actionneurs, Park et Moon [25] ont développé une micro-pince avec un capteur de force intégré. Le doigts de la pince sont micro-fabriqués à partir du silicium et des morceaux de *wafer* de matériaux piézoélectriques sont intégrés pour l'actionnement du système. De l'autre côté, Kim et al. [17] ont proposé un autre système de micro-pince où le PVDF est utilisé pour la mesure de force. Ces deux travaux montrent la versatilité de ce type de matériel pour la conception de MEMS.

En résumé, les avantages des capteurs piézoélectriques sont la mesure des événements rapides, la haute raideur du matériel, la possibilité de réaliser des mesures en temps réel et la non utilisation d'une source externe pour allumer le capteur. Aussi, les inconvénients sont que ce capteur n'est pas capable de mesurer des charges statiques, la résolution est assez faible, il est sensible à des champs électromagnétiques et en général son intégration avec des autres matériaux est difficile.

---

2. PVDF : Polyvinylidene Difluoride

### 1.2.4 Capteurs optiques

Les méthodes de mesure de force en utilisant des éléments optiques comme l'AFM<sup>3</sup> et la vision sont souvent celles qui ont les meilleures résolution et sensibilité parmi les capteurs de micro-force [24]. Globalement, des  $nN$  ou même moins peuvent être perceptibles par de telles techniques. Néanmoins, la plage de mesure n'est pas plus large que quelques  $\mu N$ .

Le premier avantage de ces systèmes est la possibilité de réaliser les mesures sans contact. En outre, des champs électromagnétiques externes n'ont plus d'influence sur les valeurs captées.

L'AFM est le système de mesure optique le plus utilisé dans le micro-monde. Son principe de fonctionnement consiste en mesurer la flexion d'une très petite poutre mono-encastrée de raideur connue à partir du changement de la réflexion d'un rayon de lumière émise par une diode laser sur la pointe de cette poutre, mesurée par un ensemble de quatre photo-diodes en quadrature. Cette poutre a une raideur tellement petite et elle peut être utilisée pour la manipulation des objets. Cette méthode effectue des mesurages en temps réel et il est apte à mesurer des événements statiques et dynamiques.

Quand l'AFM est utilisé en milieu aqueux la réflexion de la lumière est influencée par le liquide et ça réduit l'exactitude du mesurage [22]. Par ailleurs, la raideur de la poutre est aussi une autre source d'incertitude de mesure car sa valeur n'est pas bien connue même par le fabricant de celle-ci. Diverses méthodes d'étalonnage des AFM ont été proposées pour essayer d'estimer de façon plus fidèle et exacte la valeur de la raideur, néanmoins, jusqu'à maintenant aucune ne donne des résultats très précis.

Dernièrement, avec l'avènement des ordinateurs modernes et des caméras, la vision a commencé à être beaucoup utilisée pour la mesure de force. Plusieurs articles concernant le développement des systèmes de mesure de micro-force par vision ont été publiés. Dans la section suivante nous présenterons les plus importants.

## 1.3 Systèmes de mesure de micro-force par vision

Différents méthodes de mesure de micro-force par vision ont été déjà proposées. Dans cette section nous allons les présenter dans l'ordre chronologique de publication.

Le premier travail à traiter cette problématique est celui de Wang et al. [35], publié au début des années 2000. En profitant du développement d'un système d'extraction de modèles CAO de pièces à partir d'images captées par une caméra CCD, ce groupe de chercheurs a étudié la possibilité d'utiliser la même technique pour estimer des efforts appliqués à des structures déformables. Avec des images de l'objet original et de celui déformé et d'une analyse en utilisant la méthode des éléments finis (MEF), ils ont été capables de mesurer quelques centièmes de Newton sur une micro-poutre bi-encastrée. Ce travail a été décrit avec plus de détails dans [34]. Une des conclusions faites par les auteurs, très intéressante pour notre projet, est que la mesure de force par vision est réalisable si les déformations de l'objet peuvent être fidèlement estimées. Le point négatif

3. AFM : Atomic Force Microscope

de cette méthode est le besoin de suivre et de déterminer les efforts de tous les éléments du maillage de la MEF pour estimer la valeur de la force externe. Malheureusement, les informations concernant la résolution et la plage de mesure attendues par le système ne sont pas fournies dans ces deux papiers.

Plus tard, Greminger a décrit dans son mémoire de master [14] et puis dans [15] (avec la collaboration de Nelson) une méthode qui consiste à récupérer la force d'interaction d'une structure élastique à partir de son contour dans une image. Un algorithme de correspondance de modèle (*template matching*) a été conçu en englobant des équations qui gouvernent le comportement élastique du matériau. Quand l'objet est soumis à une force et se déforme, le modèle va suivre ce changement et altérer sa forme de façon à rétablir la concordance avec la géométrie actuelle de la pièce. L'algorithme de correspondance dispose d'une stratégie qui permet au système d'avoir une résolution subpixélique. En outre, les auteurs ont proposé une optimisation pour la réduction du temps d'exécution de la procédure qui est fondamentale pour son utilisation dans des applications en temps réel. Des essais ont été faits avec une poutre d'un AFM et une micro-pince. Les résultats montrent que le système est capable de mesurer fidèlement des dizaines de  $nN$  dans un intervalle d'environ  $700\text{ }nN$  et de dizaines de  $\mu N$  dans une plage de deux centièmes de Newton. Cette technique peut devenir difficile à appliquer à d'autres applications car la modélisation de l'élément élastique est difficile et parce que le temps de calculs de la procédure augmente considérablement avec la complexité du modèle.

Anis et al. [4] ont proposé un système pour la récupération des efforts de manipulations de doigts de micro-pinces présents durant l'exécution d'un micro-assemblage. En mesurant la déformation de la pointe de la pince les auteurs ont réussi à évaluer quelques micro-Newton de façon précise. Ils ont essayé deux méthodes différentes pour faire cela, la première consiste en la correspondance de modèle et la deuxième traite d'un outil de détection de caractéristiques en utilisant le Laplacien appliqué sur une méthode d'identification de contour à partir d'une Gaussienne (*zero-crossing Laplacian of Gaussian edge detection*). La relation déformation-force du matériau a été modélisée à partir d'une analyse par la MEF. La technique est très spécifique au problème exposé dans la publication et son extrapolation à d'autres applications passe nécessairement par l'établissement de nouvelles équations mathématiques régissant la réponse mécanique du manipulateur. De cette façon, nous retrouvons la même difficulté trouvée dans le travail de Greminger : la complexité du modèle. Par ailleurs, la résolution du système n'est pas plus petite que la taille du pixel et la plage de mesure est de l'ordre de quelques dizaines de  $\mu N$ . Néanmoins, ce travail est assez intéressant car dans [5] Anis développe un micro-assemblage automatique en l'utilisant.

La correspondance de modèle a été aussi la base du travail de Kratochvil et al. [18]. En se servant d'un microscope électronique à balayage (MEB), ils ont développé une technique apte à percevoir jusqu'au picoNewton. Pour cela, l'algorithme de correspondance intègre une méthode de résolution sub-pixel (ils atteignent le 1/20 du pixel) et la structure déformable consiste en une bobine hélicoïdale ultra-souple (raideur égale à  $0,003\text{ N/m}$ ). Ce système est très utile à la caractérisation de nano-matériaux et de NEMS. En plus, il peut travailler avec des images bruitées et permet des acquisitions de

données en temps réel (10 images par seconde). L'inconvénient de cette méthode est lié à des restrictions du MEB à capter de bonnes images pour différentes situations.

Dans [21] et [20], Lui et al. ont réalisé un dispositif pour la manipulation individuelle de cellules qui consiste en une base avec des micro-poutres de PDMS<sup>4</sup> placées de manière à former un motif circulaire. Les poutres jouent un double rôle et servent à tenir la cellule et comme transducteur de la force appliquée. En utilisant un système de vision composé par un microscope monté sur une caméra CMOS, les déflexions des poutres sont estimées par un algorithme de correspondance de modèle avec capacités sub-pixeliques (résolution de 0,5 du pixel). Avec la connaissance du comportement mécanique du PDMS les efforts de manipulation sont déterminés. Le PDMS a les avantages d'être assez souple et biocompatible avec l'environnement des cellules. La plus petite valeur de charge perceptible pour ce système est de  $3,7 \mu\text{N}$  tandis que la plage de mesure est d'ordre de  $700 \mu\text{N}$ . La technique proposée par Lui est très intéressante du point de vue de la biologie mais elle n'a pas de grandes applications dans la micro-robotique.

Les derniers articles apparus dans la littérature concernant le sujet en discussion sont ceux de Cappelleri et al. [10], [9]. Dans ces travaux, les auteurs présentent un capteur de force par vision avec résolution de  $\mu\text{N}$  capable de mesurer des efforts dans deux directions. L'organe sensitif consiste en un mécanisme élastique, fait à partir du PDMS et qui a de faibles raideurs dans le plan de mesure et haute dans la direction hors du plan. La méthode consiste à mesurer la déformation en 2D de cette structure à partir du suivi de quatre points localisés sur le capteur. Avec la connaissance des raideurs, les forces peuvent être estimées. Ce système a l'avantage d'estimer des efforts multi-axiales. Le point faible de cette méthode réside dans l'algorithme de suivi qui ne dispose pas d'un traitement d'image avec une résolution subpixélique. De plus, les mesurages ne doivent pas être assez fidèles car le suivi des points est une technique qui n'identifie pas précisément le même point dans des images distinctes.

## 1.4 Conclusion

A partir de l'état-de-l'art il est possible de réaliser un bilan des informations qui sont applicables à notre travail. D'abord, nous avons constaté que la mesure de force d'interaction entre les éléments d'une micro-manipulation est importante pour préserver la structure de ces objets et pour rendre possible le développement de manipulations automatiques. Ces estimations sont faites à l'aide de capteurs de force qui doivent être aptes à mesurer des efforts très petits, souvent de l'ordre de quelques  $\mu\text{N}$ . Il existe divers types de capteurs de force avec différents principes de fonctionnement, résolution et plage de mesure. Il est important de connaître les caractéristiques principales de chacun pour savoir définir celui qui est le plus approprié à une certaine application. Les capteurs de force, à l'exception des optiques, réalisent les mesures à partir du contact d'un organe sensitif avec la zone excitée. Dans le domaine des micro-techniques, où les pièces en général ont des dimensions beaucoup plus petites que le millimètre, réaliser l'incorporation d'un transducteur est une tâche assez difficile sinon impossible.

---

4. PDMS : Polydimethylsiloxane

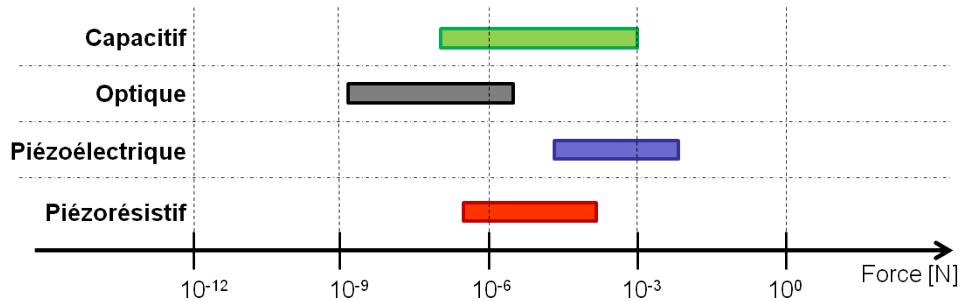


FIGURE 1.5 – Comparatif de plage de mesure des capteurs de micro-force décrits dans 1.2.

Ensuite, nous avons remarqué qu'avec la réduction du prix et l'évolution technologique des caméras et des ordinateurs personnels la mesure de position et de force par vision est devenue une technique envisageable et qui comporte plusieurs avantages comme l'évaluation de grandeurs sans contact, la facilité d'adaptation à des applications différentes et la récupération au format numérique des résultats des mesurages. Des systèmes de mesure de micro-force par vision ont été déjà proposés. Normalement, ils consistent à déterminer la déformation d'un objet d'intérêt par un algorithme de suivi de modèle et à estimer la force à partir d'une équation qui lie la défexion à la valeur de la charge mécanique. La méthode de suivi exige que l'élément à suivre soit dans le champ de vision de la caméra, ce qui empêche des déformations plus grandes que la taille de l'image. En outre, nous avons remarqué que la majorité de ces techniques de mesure visuelle disposent d'un algorithme qui permet d'atteindre une résolution subpixélique.

A titre d'illustration, nous avons conçu dans la Figure 1.5 un graphique qui montre la plage de mesure des capteurs de force classiques. Nous pouvons voir dans cette figure que, par exemple, la résolution et la plage de mesure des capteurs capacitifs sont, en général, de l'ordre de  $10^{-7}$  N et de  $10^{-3}$  N, respectivement. De la même manière, un diagramme a été tracé dans la Figure 1.6 pour les systèmes de mesure de micro-force par vision analysés dans la section 1.3. La conclusion la plus évidente qui peut être faite à partir de ces figures est qu'il n'existe pas de système de mesure de micro-force ayant un rapport plage de mesure/résolution important. L'objectif du stage est donc le développement d'un système de mesure de micro-forces qui ait une résolution et une plage de mesure dans la région définie dans la Figure 1.6. Cela correspond à un rapport plage de mesure/résolution meilleur que  $10^3$ .

En somme, le domaine de la vision artificielle est assez large et en conséquence des études liées à la qualité des résultats doivent être menés. Parmi les travaux dédiés à l'estimation de force en utilisant la vision, aucun d'entre eux ne réalise ou même prend en considération une évaluation de l'incertitude des mesures.

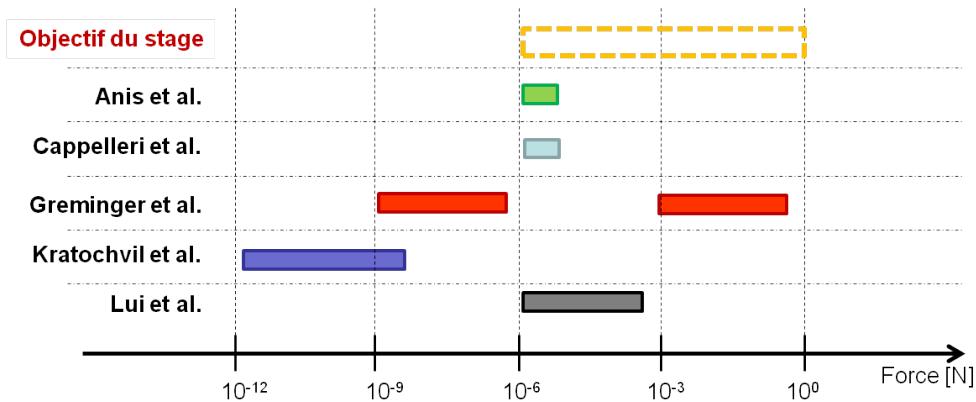


FIGURE 1.6 – Comparatif de plage de mesure entre les méthodes de mesure de micro-force par vision décrites dans 1.3 et la région correspondante à l'objectif du stage.



## Chapitre 2

# Mesure de déplacements avec résolution subpixélique

**L**a section 1.3 du chapitre précédent a fait une analyse concernant les techniques de mesure de micro-force existants dans la littérature. Il a été remarqué que toutes ces approches ont une plage de mesure limitée par le champ de vision de la caméra et par la taille de l'élément déformable. D'ailleurs, nous avons vu que la majorité de ces systèmes disposent d'une méthode qui leur permet d'avoir une résolution en dessous du pixel.

Au début de ce stage nous avons essayé de développer une méthode qui ressemblait à celles de la littérature. Cette technique consistait à mesurer le déplacement d'une mire carrée fixée sur la plateforme de micro-manipulation proposée dans [28] à partir d'un algorithme de suivi. Cet algorithme ne possédait pas d'outil pour augmenter la résolution de la vision. Ainsi, la sensibilité de notre capteur était limitée à la taille du pixel. La dimension d'un pixel correspond à la longueur et la largeur d'une cellule de la matrice CCD de la caméra divisée par le taux de grossissement de l'objectif. Par la suite, pour réussir à avoir des estimations très précises des déplacements, un zoom assez puissant devrait être utilisé. Cependant, si d'un côté on gagnait en résolution, de l'autre on perdait en plage de mesure. Nous nous sommes rendu compte que cette approche du suivi d'un objet ne satisfaisait pas nos besoins et qu'il faudrait chercher ailleurs des solutions alternatives pour notre problème. C'est à ce moment là que nous sommes tombés sur le travail de Zea et Sandoz.

Dans ce chapitre, nous présentons l'algorithme d'identification de la position d'une mire codée développée dans [40] et [39] par les auteurs précités. Cette méthode permet d'élargir la plage de mesure au-delà du champ de vision de la caméra et d'évaluer la position dans deux directions et la rotation du plan de mesure avec une résolution subpixélique. Les résultats fournis dans ces publications montrent que la technique est capable d'atteindre jusqu'au  $10^{-2}$  du pixel pour la position et  $10^{-3}$  degrés pour la rotation. De plus, le plus grand déplacement mesurable peut arriver à quelques millimètres. En conclusion, la méthode offre un rapport plage de mesure/résolution très important. Ces qualités nous ont convaincu et donc nous nous sommes engagés à essayer de l'appliquer à notre travail.

La méthode est décrite dans la section 2.1 et des conclusions et commentaires sont proposés dans 2.2.

## 2.1 Présentation de la méthode

La transformée de Fourier est un outil mathématique assez puissant pour l'analyse des signaux. Selon Bracewell [7], le déplacement d'un objet dans l'espace correspond à un changement de phase dans le domaine de la fréquence. De ce fait, nous pouvons considérer que les variations des valeurs des pixels des images provoquées par le mouvement d'un élément correspondent à l'oscillation d'un signal. Ainsi, à partir du traitement des images à l'aide de la méthode de Fourier, il est possible d'extraire des informations précises comme la position avec une résolution subpixélique. De plus, nous pouvons incorporer des codes binaires sur des objets, comme ceux employés dans la conception des encodeurs absolus, pour que l'identification de sa position soit possible même si son déplacement a été plus large que le champ de vision de la caméra.

La technique introduite au début de ce chapitre est fondée sur l'utilisation d'une mire codée. La mire, qui dispose d'une matrice de points avec un codage associé, est employée pour la détermination de déplacements d'un dispositif. La position d'une petite portion de sa surface captée par la caméra est identifiée en deux étapes : (i) traitement de l'image par la méthode de Fourier pour la détermination de la différence de phase dans le domaine fréquentiel pour obtenir une information précise (résolution subpixélique) sur la position en relation au repère de l'image ; (ii) décodage de la séquence des points pour évaluer la position de l'image par rapport au repère de la mire ou à un cadre initial (résolution du pixel). Ce dernier pas réalise la conversion de la position relative acquise dans le premier en position absolue en maintenant la précision plus petite que le pixel. Dans les sections suivantes nous donnons des explications plus détaillées concernant ces deux étapes.

### 2.1.1 Détermination de la position relative par la méthode de différence de phase

#### Principe

La stratégie pour l'identification très précise de la position consiste essentiellement en l'analyse des ensembles de franges, tels que ceux utilisés dans le domaine de l'interférométrie aussi pour la mesure de déplacements. L'utilisation des franges est très intéressant parce qu'elles disposent d'un signal spatial qui correspond à une fonction sinusoïdale. D'après la théorie de Fourier, des informations spatiales des motifs sinusoïdaux bidimensionnels peuvent être obtenues directement à partir du spectre de phase.

Une image captée d'un ensemble de franges , comme celle de la Figure 2.1, est équivalente à une distribution sinusoïdale horizontale des intensités des pixels et peut être modélisée mathématiquement par l'équation 2.1. Dans cette expression,  $I(x, y)$  est la valeur de l'intensité du pixel de coordonnées  $(x, y)$  de l'image,  $a$  et  $b$  correspondent au contraste entre le fond et les franges,  $p$  est la périodicité du motif.

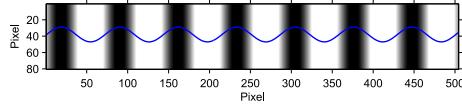


FIGURE 2.1 – Image d'un ensemble de franges périodiques avec la représentation de son signal sinusoïdal.

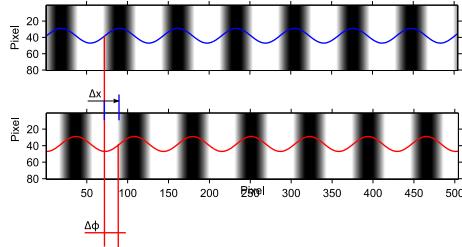


FIGURE 2.2 – Illustration de la liaison entre la différence de phase et le déplacement d'un ensemble de franges.

$$I(x, y) = a + b \left[ 1 + \cos \left( \frac{2\pi}{p} x + \phi_0 \right) \right] \quad (2.1)$$

La fréquence spatiale  $f_x$  de ce groupe de franges est  $\frac{2\pi}{p}$  et la phase  $\phi_0$ . Lorsqu'un déplacement de  $\Delta x$  est réalisé dans la direction horizontale, une décalage se produira dans la phase, comme illustré dans la Figure 2.2. À partir de la différence de phase  $\Delta\phi$ , déterminée dans le domaine fréquentiel, entre l'image initiale et celle avec le groupe de franges déplacé, nous pouvons récupérer la valeur de  $\Delta x$ , tel comme le traduit l'expression 2.2.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{p} \Delta x \quad (2.2)$$

Dans [30], [31] et [29], Sandoz propose une solution pour la mesure de position en trois dimensions  $(x, y, \theta)$  à partir du signal extrait des images d'une mire composée par une matrice de points comme celle de la Figure 2.3(a). Cette matrice est le résultat de l'intersection de deux groupes de franges perpendiculaires et peut avoir les valeurs des intensités de pixels modélisées par l'équation 2.3.

$$I(x, y) = I_H(x, y)I_V(x, y) \quad (2.3)$$

Avec,

$$I_H(x, y) = a + b \cos \left[ \frac{2\pi}{p} (x \cos(\theta) - y \sin(\theta)) + \phi_{H0} \right] \quad (2.4)$$

$$I_V(x, y) = a + b \cos \left[ \frac{2\pi}{p} (x \sin(\theta) + y \cos(\theta)) + \phi_{V0} \right]$$

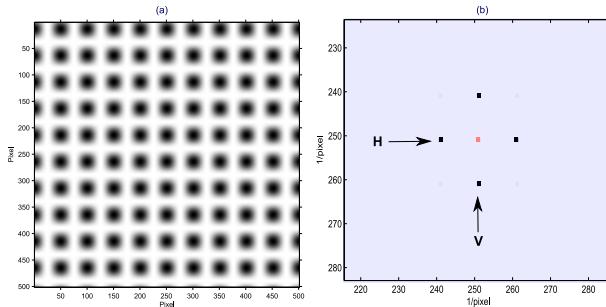


FIGURE 2.3 – Matrice périodique de points (a) avec son spectre de puissance (b).

Dans ces expressions,  $\theta$  est l’angle de rotation du plan de la mire,  $\phi_{H_0}$  et  $\phi_{V_0}$  représentent les phases initiales pour les directions horizontale et verticale, respectivement. Les autres termes correspondent aux mêmes de l’équation 2.1. Avec la transformée de Fourier bi-dimensionnelle nous pouvons analyser la phase dans deux directions, ainsi que la rotation du plan, et de cette façon estimer des déplacements en  $x$  et  $y$ .

Le problème de cette méthode est que tout déplacement égal à la périodicité des franges (ou un multiple de celle) la valeur de la phase revient au même niveau que l’initiale de telle sorte que nous aurons des ambiguïtés de position toutes les  $2\pi$  de variation de la phase. Une des solutions contre cette limitation est l’introduction d’une codification binaire à partir de l’élimination de quelques points de la mire. Cette procédure sera présentée dans la section 2.1.2.

## Démarche

L’évaluation de la différence qui correspond à un morceau de la mire capté par la caméra est réalisée à partir des calculs mathématiques suivants : (i) transformée de Fourier 2D discrète ; (ii) filtrage du spectre de Fourier en utilisant un filtre gaussien ; (iii) transformé inverse de Fourier ; (iv) déroulement de phase ; (v) détermination des équations des plans de phase par la méthode des moindres carrés.

Avec la transformée de Fourier nous obtenons le spectre de puissance de l’image comme celui représenté dans la Figure 2.3(b). Dans ce spectre, les deux lobes en noir alignés horizontalement avec celui en rose, indiqués par un H, contiennent des informations correspondantes à la position horizontale de la mire tandis que les deux alignés verticalement, indiqués par un V, contiennent des informations sur la position verticale. À l’aide d’un filtre passe-bande du type gaussien nous réalisons le filtrage de ce spectre. Deux spectres sont extraits à partir de ce processus, un qui contient seulement les lobes de la position verticale et l’autre avec les lobes de la position horizontale. Après, la transformée de Fourier inverse est appliquée aux spectres filtrés et les phases relatives aux deux directions sont obtenues. Pourtant, ces phases sont “empaquetées” car l’arc-tangent, fonction utilisée pour évaluer l’argument d’un nombre complexe, à son image entre  $-\pi$  et  $+\pi$ . Ainsi, un déroulement de phase est nécessaire pour la détermination de la phase en relation à la position du pixel. Cette relation entre phase et pixel est

linéaire et peut être déterminée à partir d'une régression par la méthode des moindres carrés. Les équations 2.5 et 2.6 expriment les plans de phase pour la direction horizontal ( $\phi_H(x, y)$ ) et vertical ( $\phi_V(x, y)$ ).

$$\phi_H(x, y) = A_H \cdot x + B_H \cdot y + C_V \quad (2.5)$$

$$\phi_V(x, y) = A_V \cdot x + B_V \cdot y + C_H \quad (2.6)$$

Où,

$$C_H = 2k\pi + \phi_{H_0} \quad (2.7)$$

$$C_V = 2k\pi + \phi_{V_0} \quad (2.8)$$

Dans ces équations les paramètres  $C_H$  et  $C_V$  sont obtenus avec ambiguïté  $2k\pi$  parce que le déroulement de phase dépend la phase empaquetée du point de départ du processus, qui se trouve dans l'intervalle  $(-\pi, +\pi]$ . Le codage intégré à la mire vient justement éliminer cette ambiguïté.

Les termes  $A_H$ ,  $B_H$ ,  $A_V$  et  $B_V$  représentent la rotation du plan de la mire par rapport à la caméra. La relation entre ces termes et l'angle  $\theta$  de rotation est donnée par les équations suivantes.

$$A_H = B_V = \frac{2\pi}{p} \sin(\theta) \quad (2.9)$$

$$B_H = A_V = \frac{2\pi}{p} \cos(\theta) \quad (2.10)$$

### 2.1.2 Décodage de la mire

#### Principe

La méthode décrite dans la section précédente permet l'estimation de déplacements avec une résolution subpixélique, pourtant, la plage de mesure est plus petite que le cadre d'observation de la caméra. La limitation existe due aux ambiguïtés  $2k\pi$  de la phase. Une stratégie a été développée pour éliminer ces ambiguïtés et ainsi agrandir la plage de mesure du système. Cette stratégie consiste à utiliser des codes binaires pour créer des représentations uniques des coordonnées bidimensionnelles de la mire. Le codage est généré en supprimant quelques points de la matrice de points de la mire. Une procédure cherche dans l'image captée par la caméra les points qui sont présents et ceux qui sont absents. Nous considérons un point présent comme un bit de valeur 1 et un point absent comme un bit de valeur 0. Avec un mot binaire formée par quelques bits extraits de l'image nous composons un code et ensuite nous cherchons dans une table la position correspondant à ce code.

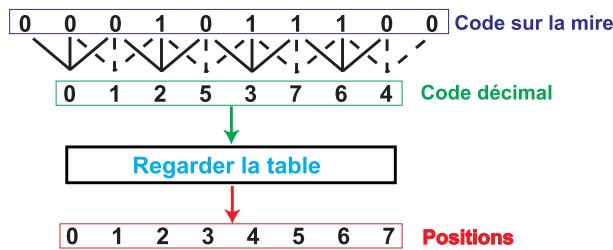


FIGURE 2.4 – Principe du codage de la mire.

Le système de codage utilisé pour la représentation des positions a son principe représenté dans la Figure 2.4. Le registre à décalage à rétroaction linéaire (LFSR<sup>1</sup>) a été adopté pour la génération des séquences de bits pour la matrice des points de la mire. Le LFSR consiste essentiellement en des séquences linéaires appropriées pour le codage 1D. L'extension au cas 2D nécessite un artifice spécial qui sera détaillé dans le paragraphe suivant. Comme nous pouvons voir dans la figure, 8 positions ont été codées par des mots binaires composés de 3 bits. La lecture directe d'une séquence de mots donne comme résultat une séquence décimale qui n'est pas consécutive. Pour résoudre ce problème, une table a été créée pour connecter le décimal obtenu à partir du code à sa position correspondante, comme le montre la partie finale de l'image.

Pour la construction du codage en 2D, une direction, disons X (horizontal), contient des séquences LFSR tel qu'exposé dans le paragraphe précédent. Pour la direction perpendiculaire, disons Y (vertical), il a été opté pour la coder à partir de décalages entre des reproductions consécutives de séquences LFSR, comme l'illustre la Figure 2.5. Dans ce cas, une matrice de codification 2D est composée par deux types de séquences LFSR. Pour les lignes paires ( $Y = 0, 2, 4, \dots$ ) la séquence est identique pour n'importe quelle position de Y. Celles-ci sont appelées lignes de référence. Pour les lignes impaires ( $Y = 1, 3, 5, \dots$ ) les séquences changent selon la position de la coordonnée Y. Ces lignes contiennent une reproduction du code LFSR mais avec une décalage incrémental proportionnel à la position verticale.

Au moment du décodage, des lignes paires et impaires sont comparées. Les lignes de référence contiennent l'information sur la position horizontale et sont identifiées en regardant quelle séquence de mots binaires se répète le long de la direction verticale. La position X est déterminée à partir d'un mot de cette ligne de référence. La position Y est obtenue en faisant la soustraction entre la valeur de X et la valeur d'une position correspondante à un mot binaire d'une ligne décalée.

La mire que nous utilisons dans notre travail a été conçue avec un codage composé par des mots binaires de 11 bits et de périodicité de  $4 \mu\text{m}$ . L'élimination de bits pour la construction de séquences peut changer la périodicité de la matrice de points. Ainsi, une ligne de points a été ajouté à chaque intervalle entre une ligne de référence et une décalée pour maintenir la périodicité du motif.

1. LFSR : Linear Feedback Shift Register

	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	*	*
$Y=0$	*	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	*	*
$Y=1$	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	*	*
$Y=2$	*	*	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	*	*
$Y=3$	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	*	*
$Y=4$	*	*	*	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1
$Y=5$	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	*	*
$Y=6$	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	*	*

FIGURE 2.5 – Combinaison de séquences LFSR pour le codage 2D.

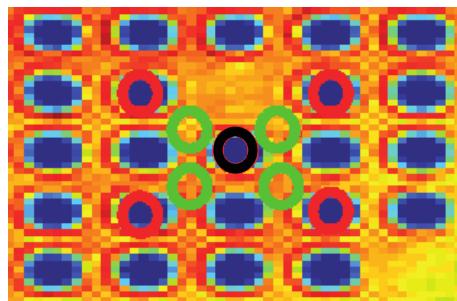


FIGURE 2.6 – Identification de la présence ou l'absence d'un point.

## Démarche

Après la définition des équations des plans de phase, décrite dans la section 2.1.1, l'image du morceau de la mire passe pour une rotation pour que les lignes de points soient alignées avec le cadre de pixels. Ensuite, le processus de décodage de séquences est initialisé.

La démarche de décodage consiste initialement à identifier des points présents et absents de la mire. La méthode de Fourier utilisée pour l'évaluation de la phase rend possible la détermination des endroits où probablement il existe un point. Ainsi, nous pouvons construire une matrice avec des coordonnées des lieux où il devrait avoir des points. Avec cette matrice nous allons comparer, comme le montre le Figure 2.6, les intensités des pixels d'une région où probablement il y a un point ( cercle en noir de l'image) avec les intensités des régions qui appartiennent au fond de la mire ( cercles verts) et à des endroits correspondants à d'autres points ( cercles rouges). Si les intensités de la région considérée sont au niveau des celles du fond de la mire, le point est absent. Au contraire, lorsque ces intensités s'approchent de celles des cercles rouges, le point est présent. Après l'identification de 11 bits, correspondant à deux mot binaires, le système réalise la conversion du code décimal en position à partir d'une table existant dans la mémoire de l'ordinateur.

Une fois que nous avons décodé la position, nous obtenons une valeur qui correspond au terme  $k$  des équations des plans de phase (2.6). Donc, avec cette information il est possible de convertir la position relative déterminée par la différence de phase en position absolue par rapport au repère de la mire.

## 2.2 Conclusions

Nous avons présenté dans ce chapitre le système de mesure de position utilisé dans notre travaux. Ce système est composé par une mire qui dispose d'une matrice de points avec un codage associé. Grâce à deux processus complémentaires, il est possible d'évaluer la position absolue d'un morceau de la surface de la mire captée par une caméra avec résolution subpixélique. Cette méthode est très appropriée à notre application car elle dispose d'un fort rapport plage de mesure/résolution, permettant attendre  $10^5$ , et aussi parce qu'elle permet la mesure de déplacements dans deux directions.

## Chapitre 3

# Le système de mesure de micro-force par vision

**L**a méthode de la mesure de force par vision adoptée dans ce travail consiste fondamentalement à déterminer la valeur de la déformation d'un objet d'intérêt qui dispose d'un comportement mécanique connu. Dans le chapitre précédent nous avons exposé la technique pour l'estimation de déplacements. Dans celui-ci, nous allons présenter et modéliser la plateforme qui servira pour le développement du système de mesure (3.1). Par la suite, nous allons décrire notre station de mesure de force (3.2). De plus, nous allons réaliser trois expérimentations (section 3.3) : une pour la vérification de la qualité des mesures de déplacement par la vision, une deuxième pour la détermination de la raideur de la plateforme de micro-manipulation et une dernière pour la validation de notre méthode. Des analyses, des commentaires et des conclusions seront données à la fin du chapitre (3.4).

### 3.1 Présentation et modélisation de la plateforme de micro-manipulation

La plateforme de micro-manipulation en question a été développée par Rakotondrabe et al. dans [28] et est un outil qui permet la mesure de forces de micro-manipulation en utilisant des capteurs de forces classiques. La Figure 3.1(a) présente la conception de celle-ci. Deux poutres en acier de dimensions 0,1x1x60 mm sont bi-encastées à l'aide de supports qui sont fixés à la base. Entre les deux supports, plus précisément à la moitié de leur longueur, une navette qui sert à placer les composants à manipuler est attachée aux poutres.

Les poutres sont assez souples et subissent des déformations considérables avec de petits efforts. Cette caractéristique est intéressante puis qu'elles seront l'élément sensitif de notre capteur. A l'aide de la vision nous allons mesurer les déplacements de la navette (qui correspondent aux déformations des poutres) et avec le modèle mécanique proposé dans le paragraphe suivant nous pouvons récupérer la valeur de la force qui agit sur la

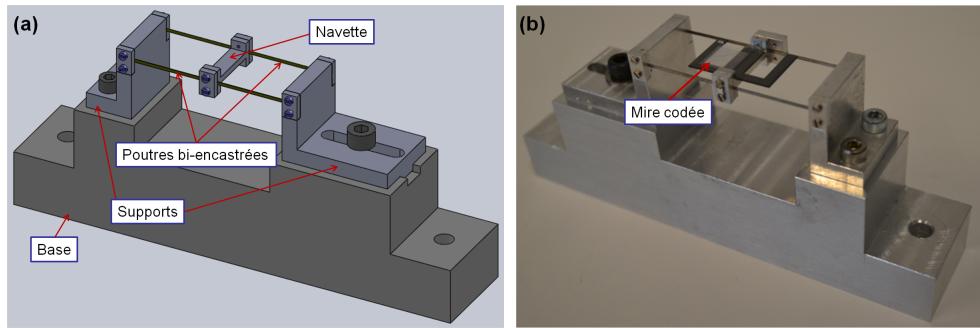


FIGURE 3.1 – (a) Conception de la plateforme de micro-manipulation. (b) Plateforme de micro-manipulation avec la mire codée attachée.

plateforme.

L'acier a la caractéristique de se déformer proportionnellement à la charge à laquelle il est soumis tant que cette déformation se trouve dans sa zone de plasticité. De cette forme, il est raisonnable de modéliser le comportement mécanique des poutres par un modèle linéaire. L'équation mathématique qui lie le déplacement de la table ( $\delta$ ) en relation à la position d'équilibre à la force de manipulation ( $F$ ) est donnée dans l'expression 3.1.

$$F = K.\delta \quad (3.1)$$

La constante de proportionnalité  $K$  est la raideur des poutres qui va être déterminée expérimentalement dans la section 3.3.2.

## 3.2 Description de la station de mesure

La station de mesure de force, représentée dans la Figure 3.2 et en détail dans 3.3, est composée de sept ensembles de dispositifs : plateforme de micro-manipulation, table anti-vibration, vision, système de nano-positionnement, mesure de position, mesure de température et sources d'énergie et signal, carte d'acquisition de données et ordinateur.

1. *Plateforme de micro-manipulation* : conçue à partir de celle présentée dans la section précédente avec la mire codée collée sur sa navette, comme le montre la Figure 3.1(b).
2. *Table anti-vibration* : pour réduire les vibrations externes, nous utilisons comme base de la construction de notre système mécanique une table anti-vibration à col d'aire Vibraplane® 5702E-3036031.
3. *Vision* : le système de vision est composé par une caméra CCD AVT Stingray® F-125B qui a la taille du pixel de la matrice CCD de  $3,75 \times 3,75 \mu\text{m}$  de l'image du maximum 1292(H) x 964(V) pixels, et un objectif Mitutoyo™ APO SL20® montée sur un tube infini Optem® 70XL (zoom de jusqu'à 20 fois). La caméra est fixée sur une potence et le tube de l'objectif sur un support. Cet ensemble est

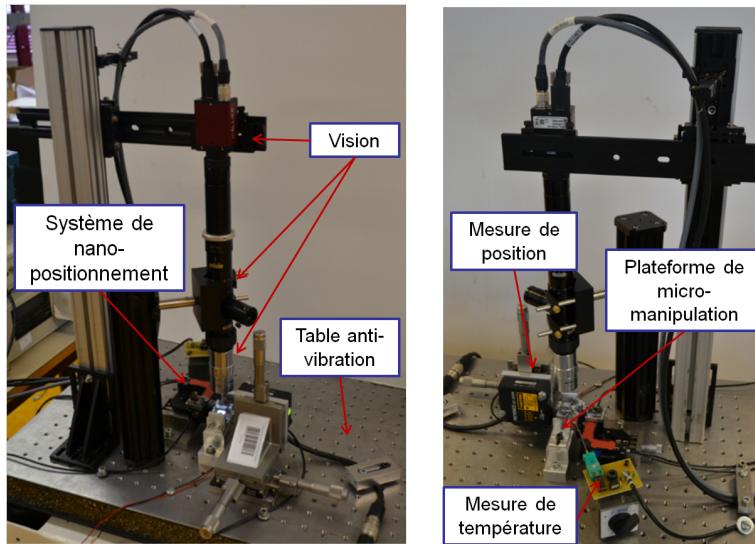


FIGURE 3.2 – Image du système de mesure de micro-force par vision.

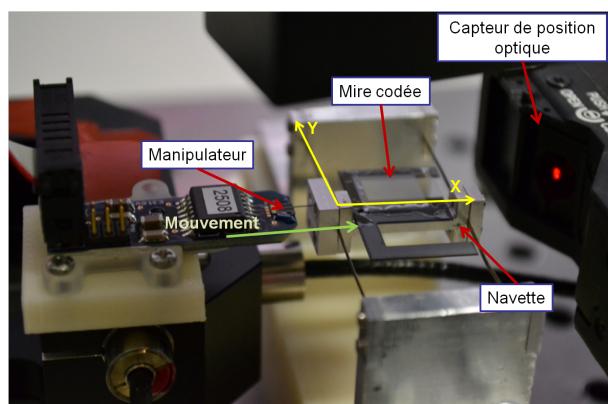


FIGURE 3.3 – Détail de la station de mesure.

positionné dans la direction verticale. Ces supports de fixation sont attachés à la table anti-vibration. Une led de haut intensité lumineuse Z2 Pure White® 260 lm est posée sur la plateforme au-dessous de la mire codée pour éclairer.

4. *Système de nano-positionnement* : c'est le groupe responsable pour le positionnement de l'élément manipulateur. Il est formé par une table XY motorisée Piezosystem Jena™ PXY 200 D12® qui dispose de deux capteurs de position capacitifs. Cette table est limitée à un déplacement de 200  $\mu\text{m}$ . Pour faciliter son placement près de la plateforme de micro-manipulation, elle est montée sur une table micrométrique. Cette dernière est fixée sur la table anti-vibration à l'aide d'une pièce d'interface. Une pièce de liaison a été conçue pour attacher le manipulateur ou le capteur de force à la table motorisée. Le capteur de force utilisé dans les essais est le Femto Tools™ FT-270®.
5. *Mesure de position* : un capteur de position optique Keyence™ LC-2400® ayant une tête de mesure LC-2420® qui est montée sur une table micrométrique XYZ. Cette table est fixée sur la table anti-vibration. Cet ensemble est utilisé pour la mesure de déplacement de la navette.
6. *Mesure de température* : la température est estimée à l'aide d'un thermocouple attaché à un support magnétique et positionné près de la plateforme.
7. *Sources d'énergie et signal, carte d'acquisition de données et ordinateur* : l'acquisition des données est effectuée à l'aide d'une carte NI USB-6009® connectée à un ordinateur qui a Windows 7® comme système d'exploitation. Un générateur de fonctions est utilisé pour créer un signal carré qui servira comme déclencheur des acquisitions de la caméra et de la carte d'acquisition NI. La table XY motorisée, la led d'éclairage et le capteur de force sont alimentés par des sources de tension à courant continu.

### 3.3 Essais expérimentaux

Nous présentons des essais expérimentaux qui ont les objectifs suivants :

- Vérification qualitative du montage mécanique de la station de mesure et des mesures de position effectuées par le système visuel ;
- Évaluation de la raideur de la plateforme de micro-manipulation ;
- Validation de la méthode de mesure de micro-force par vision.

#### 3.3.1 Essais de mesure de position

##### Introduction

Avant de déterminer la raideur de la plateforme de micro-assemblage et de réaliser des mesurages de force, il faut vérifier la construction de la structure mécanique de la station de mesure et l'adaptation de la technique d'estimation de déplacements à notre système. De plus, comme la mesure de force est extrêmement sensible à la qualité des estimations de déformations, il est important de comparer les résultats obtenus par la vision avec

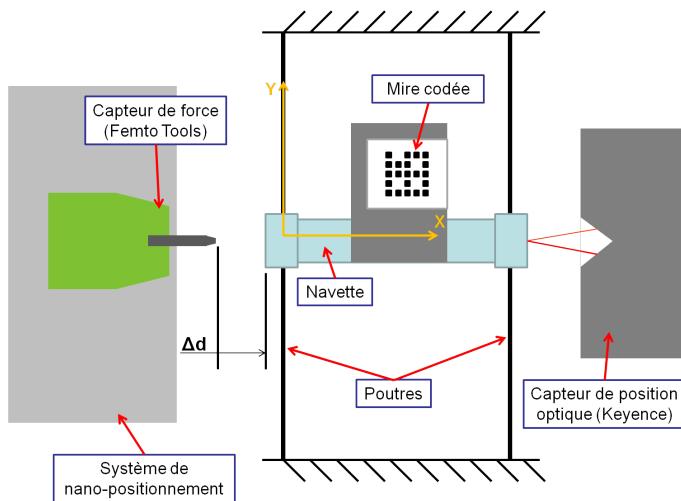


FIGURE 3.4 – Schéma de la vue de dessus de la station de mesure.

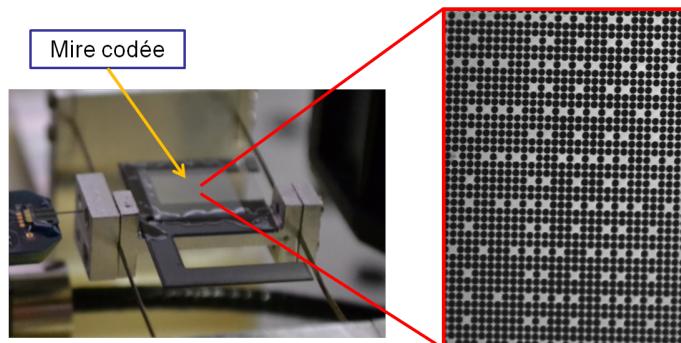


FIGURE 3.5 – Image d'un morceau de la mire capté par le système de vision.

celles des références externes comme le capteur incorporé dans la table motorisée et le capteur optique monté dans la station de mesure.

Pour réaliser les expérimentations, nous avons remplacé le capteur de force indiqué dans le schéma 3.4 par une pointe. Cette dernière est connectée au système de nano-positionnement à une certaine distance initiale ( $\Delta d$ ). Grâce à cette pointe nous allons faire différents mouvements dans la direction de l'axes  $x$  qui vont entraîner différents déplacements de la navette. Pour mesurer ces déplacements nous allons utiliser le capteur optique, le capteur capacitif et le système de vision.

Le système de vision effectue des estimations de déplacements à partir des images de morceaux de la mire codée captées par la caméra, comme le montre la Figure 3.5.

Nous proposons trois types d'essais : (i) essai statique ; (ii) essai avec une rampe en entrée ; (iii) essai périodique avec des échelons en entrée.

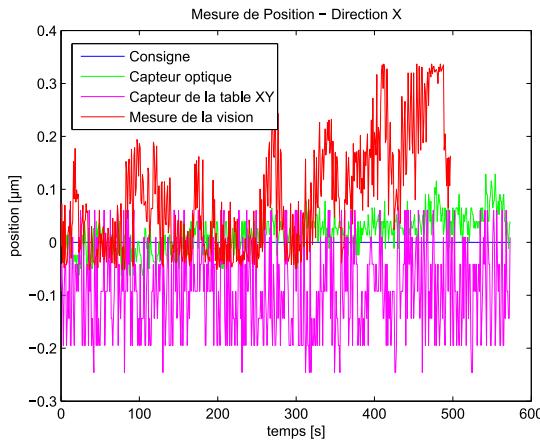


FIGURE 3.6 – Résultats de l’essai statique pour la mesure de déplacements dans la direction  $x$ .

### Essai statique

Dans cet essai nous allons laisser le système de nano-positionnement au repos et mesurer les déplacements libres de la table. Par conséquent, nous allons étudier la stabilité du système.

Une fois les expérimentations faites, nous obtenons les Figures 3.6 et 3.7. La première figure contient des déplacements dans l’axes des abscisses. En bleue nous avons la consigne qui est totalement nulle, le signal en rose sont les mesures du capteur capacitif de la table XY, en vert les estimations effectuées par le capteur optique et en rouge les mesures de la vision.

Nous constatons que les amplitudes des bruits des signaux provenant du capteur capacitif et de la vision sont du même ordre. Par contre, nous pouvons remarquer qu’il existe une certaine déviation des mesures obtenues à partir de la caméra. Cela est dû d’une part au mouvement de la potence et d’autre part à des petits déplacements de la navette. On constate que le capteur optique capte aussi un petit déplacement de la navette. En chiffres, la moyenne et l’écart-type des mesures de la vision sont, respectivement, de  $0.0848 \mu\text{m}$  et de  $0.1062 \mu\text{m}$ .

Dans les autres figures, nous avons les mesures de déplacement dans la direction  $y$  et de la rotation de la mire réalisés par la caméra. Nous constatons que ces mesures sont relativement stables par rapport à la figure précédente. La moyenne et l’écart-type de ces deux grandeurs sont, respectivement, de  $0,0041$  et  $0,0082 \mu\text{m}$  pour  $y$  et de  $-1,2191 \cdot 10^{-4}$  et  $1,8807 \cdot 10^{-4}$  degrés.

Ces données nous montrent que dans de bonnes conditions nous pouvons attendre une centaine de  $\text{nm}$  de résolution pour la vision.

Nous avons observé avec cet essai que le montage mécanique de la structure joue un rôle important dans la fiabilité des mesures. L’utilisation de supports rigides pour tenir la caméra et l’objectif est un exemple d’une stratégie utilisée pour augmenter la rigidité

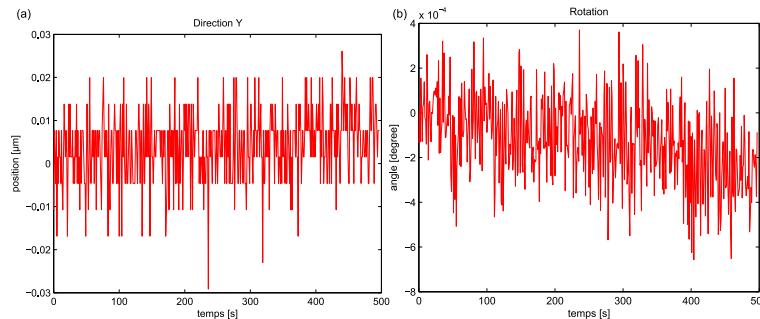


FIGURE 3.7 – Résultats de l’essai statique pour la mesure de déplacement dans la direction  $y$  (a) et de la rotation du plan de la mire par rapport à la caméra (b).

mécanique de la station. De plus, nous avons utilisé une table anti-vibration pour réduire les vibrations.

Ensuite, nous allons faire des observations par rapport au système de mesure de position lui-même. Nous avons constaté durant l’exécution des essais que la méthode d’estimation de déplacements nécessite des images propres, c’est-à-dire, avec un bon contraste entre les points et la base en verre de la mire pour la détection de la périodicité des franges. On a aussi remarqué qu’au moins une quarantaine de points doivent être présents dans le champs de vision de la caméra pour qu’un mot binaire correspondant à la position soit identifié. De cette façon, un des premiers pas pour la mise en marche du système de mesure est le bon réglage du focus et du zoom de l’objectif. Nous avons observé aussi que chaque image prend en moyenne cinq secondes pour être traitée. En conséquence, des mesurages en temps réel ne peuvent pas être exécutées. C’est l’un des inconvénients de cette technique dans l’état actuel. Pourtant, il est possible de réaliser de modifications dans la méthode, comme par exemple la réduction du nombre de pixels qui représentent une position et la programmation de la procédure dans un langage de programmation qui exige la compilation du code (comme le C++), pour qu’elle soit plus rapide.

### Essai avec une rampe en entrée

À partir d’un mouvement de type rampe réalisé par le système de nano-positionnement nous avons testé si les mesures de la vision sont exactes. Après avoir réalisé les essais, nous obtenons les résultats des Figures 3.8 et 3.9.

Dans la première figure, nous avons les mesures des capteurs et de la vision pour la direction  $x$ . Nous pouvons voir qu’il y a au début un certain décalage entre (la consigne et les mesures obtenues par le capteur capacitif) et les mesures effectuées par le capteur optique et la vision. Cela s’explique par la distance initiale  $\Delta d$  entre la pointe de manipulation et la navette.

On constate aussi sur la Figure 3.9 un certain couplage du mouvement dans la direction  $y$ . Ce phénomène est dû au désalignement entre la mire, la navette et la caméra. Nous

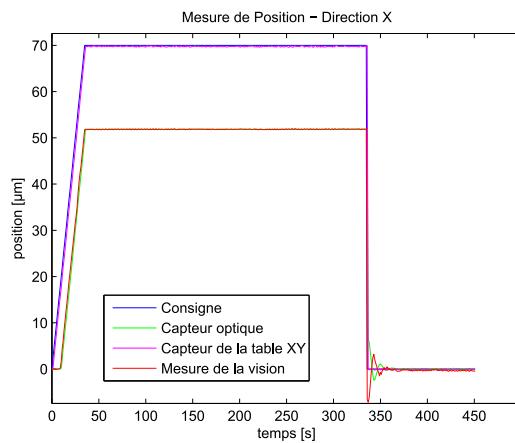


FIGURE 3.8 – Résultats de l'essai avec une rampe en entrée de déplacement dans la direction  $x$ .

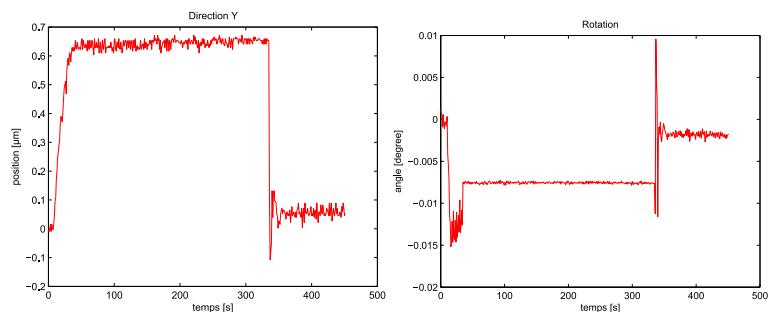


FIGURE 3.9 – Résultats de l'essai avec une rampe en entrée pour le mesures de déplacement dans la direction  $y$  (a) et de la rotation du plan de la mire (b).

pouvons remarquer également dans cette figure qu'il existe encore une petite rotation de la mire.

Concernant l'exactitude, nous pouvons constater que l'estimation de déplacements réalisée par la vision est cohérente avec celles obtenues avec le capteur optique et le capacatif. En plus, si nous compensons la distance entre le manipulateur et la plateforme, il est possible de remarquer que ces mesures suivent aussi la consigne et la valeur de sortie du capteur de la table motorisée. La figure 3.10 a été conçue à partir des données correspondant au mouvement du système de nano-positionnement. On constate que toutes ces courbes ont la même pente, par contre elles ont des points d'origine différents. Cela est due à la distance initiale  $\Delta d$ . Grâce à la conformité des différentes pentes, on conclut que les mesures de la vision sont exactes.

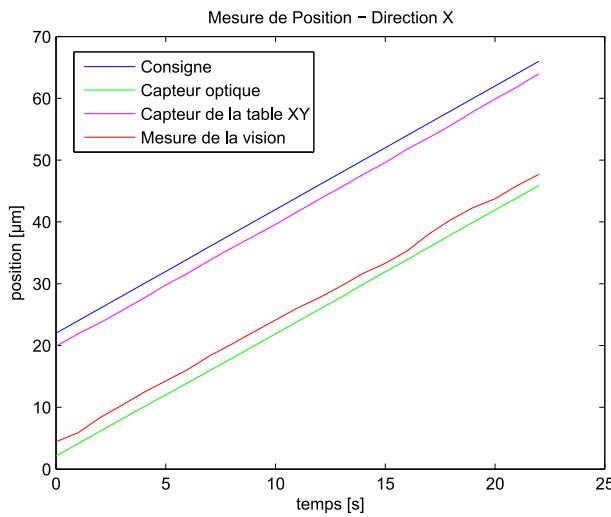


FIGURE 3.10 – Extrait de la partie en mouvement de l’essai d’exactitude pour le mesures de déplacement dans la direction  $x$

### Essai périodique avec des échelons en entrée

Le système de nano-positionnement va réaliser des mouvements périodiques pour évaluer la répétabilité du système. Pour cela deux types d’échelon ont été utilisés dont un correspond à  $20 \mu\text{m}$  et l’autre à  $40 \mu\text{m}$  de déplacement de la table motorisée XY.

Les résultats des expérimentations sont exposés dans les figures 3.11 et 3.12. Les moyennes, les écart-types et la répétabilité des mesures pour la direction  $x$  sont indiqués dans les tableaux 3.1 et 3.2.

D’abord, il est possible de remarquer dans le graphique 3.11 que les mesures de la vision sont cohérentes avec celles des capteurs externes. De plus, à partir des tableaux 3.1 et 3.2, nous pouvons constater que la répétabilité des mesures par image est de l’ordre de la dizaine de nanomètres. La résolution en position de notre système de mesure, considérée comme trois fois l’écart-type des essais, est donc une centaine de nanomètres. Nous pouvons voir aussi que les écart-types des mesures de la table motorisée sont plus grands que ceux de la vision. Le grand écart-type présenté par cette table est la somme des imprécisions de positionnement de l’actionneur et des mesures de son capteur. De cette façon, on peut espérer que quelques variations des estimations par image correspondent à la répétabilité de ce dispositif.

TABLE 3.1 – Résultats des mesurages en  $\mu\text{m}$  pour l’échelon de  $20 \mu\text{m}$  (direction  $x$ ).

	Moyenne	Ecart-type	Répétabilité ( $3^*\text{écart-type}$ )
Vision	1,3113	0,0491	0,1473
Capteur optique	1,4238	0,0304	0,0911
Capteur capacitif	19,7860	0,0804	0,2412

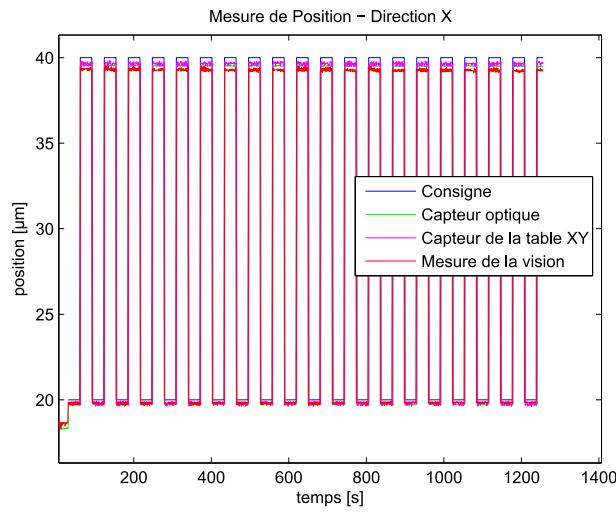


FIGURE 3.11 – Essai de répétabilité pour la mesure de déplacement dans la direction  $x$ .

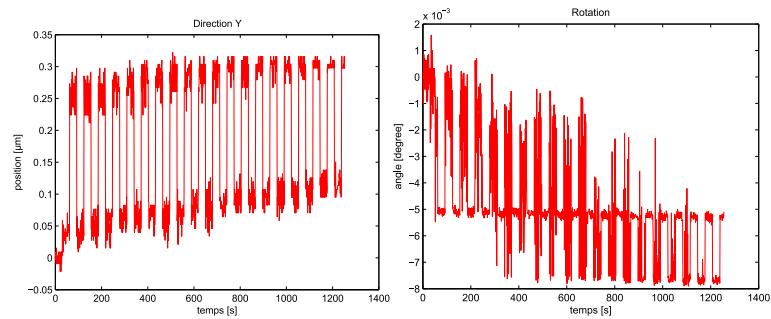


FIGURE 3.12 – Essai de répétabilité pour la mesure de déplacement dans la direction  $y$  (a) et de la rotation du plan de la mire (b).

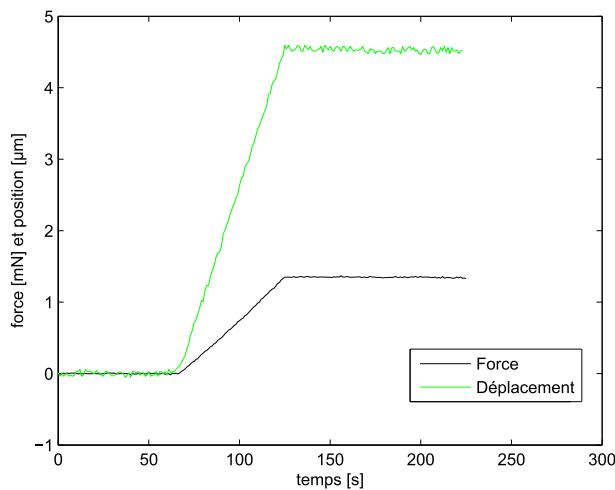


FIGURE 3.13 – Déplacement de la navette (en vert) et force d’interaction entre la plate-forme de micro-manipulation et le capteur de force (en noir).

TABLE 3.2 – Résultats des mesurages en  $\mu\text{m}$  pour l’échelon de  $20 \mu\text{m}$  (direction  $x$ ).

	Moyenne	Ecart-type	Répétabilité ( $3^*\text{écart-type}$ )
Vision	20,7743	0,0781	0,2342
Capteur optique	21,1998	0,0278	0,0835
Capteur capacitif	39,6420	0,0816	0,2447

La répétabilité est souvent utilisée comme base pour la détermination de la résolution d’un système de mesure. Nous pouvons conclure que la plus petite valeur de déplacement que notre station est capable de mesurer dans les conditions actuelles de l’ordre de la centaine de nm.

### 3.3.2 Détermination de la raideur de la plateforme

Après la réalisation des essais de position, nous avons changé la pointe utilisée pour la manipulation de la navette par le capteur de force. Ce dispositif va être utilisé comme manipulateur et capteur en même temps. Le système de nano-positionnement va le déplacer en direction de la navette. Ce mouvement est du type rampe et est exécuté tant que la force estimée est inférieure à  $1300 \mu\text{N}$ . Avec la mesure de la force de manipulation et du déplacement de la navette (réalisée par le capteur de position optique) la raideur sera déterminée.

Le Figure 3.13 montre les résultats obtenus avec l’essai. En noir, nous avons les valeurs des forces et en vert les valeurs de déplacement de la navette.

Pour le calcul de la raideur, nous allons prendre un intervalle de valeurs de force et un de déplacement qui correspondent aux instants où la navette réalisait un mouvement. En effectuant la division entre l’intervalle de forces par celui des déformations nous obtenons

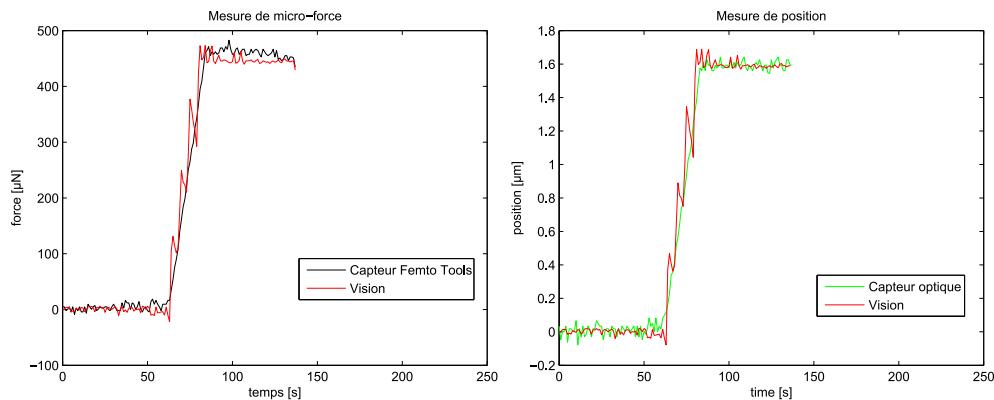


FIGURE 3.14 – Mesure de force (a) et déformation (b) par la vision et par de capteurs externes.

un vecteur de raideurs. La moyenne de ce vecteur sera considérée comme l'estimation de la raideur.

Les résultats des calculs montrent que la raideur moyenne des poutres est d'environ 280,22 N/m et que l'écart-type de cette moyenne est de 13,91 N/m. Comme cet écart-type de l'ordre de 5% de la moyenne, nous pouvons considérer que cette raideur correspond raisonnablement à la vraie valeur de la raideur des poutres.

En somme, en tenant en compte que la résolution de la mesure de position de notre station est d'environ  $10^{-7}$  m et que la raideur des poutres est de plus au moins  $10^2$  N/m, on peut espérer que la résolution en force de notre système de mesure est de l'ordre de  $10^{-5}$  N. Dans [28] Rakotondrabe et al. ont conçu la plateforme de micro-manipulation de sorte qu'elle soit apte à recevoir des déformations de jusqu'à 35  $\mu\text{m}$ . Ainsi, la plage de mesure de notre méthode est estimée à quelques Newtons. Par la suite, le rapport plage de mesure/résolution est alors de  $10^5$ , en étant assez plus grand que ceux trouvés dans les capteurs de forces classiques et dans les techniques de mesure de force par vision proposées dans la littérature.

### 3.3.3 Essais de validation de la méthode

Les essais de validation de la méthode consistent à réaliser des mesurages de force et déplacement par vision et par le capteur de force et le capteur de position optique et de comparer les résultats. La procédure des expérimentations est la même que celle adoptée pour l'estimation de la raideur.

Après avoir mené les essais, nous obtenons les données présentées dans les graphiques 3.14 et 3.15. À gauche, nous avons l'estimation de la force par la vision (en rouge) et par le capteur de force (en noir). À droite, il y a les résultats de mesure des déplacements de la navette effectués au travers des images (en rouge) et du capteur optique (en vert).

À partir de ces images, nous remarquons que les mesures de la vision sont cohérents avec celles des capteurs externes. En d'autres termes, l'exactitude de mesure semble acceptable car l'erreur des estimations des grandeurs entre la vision et les capteurs est

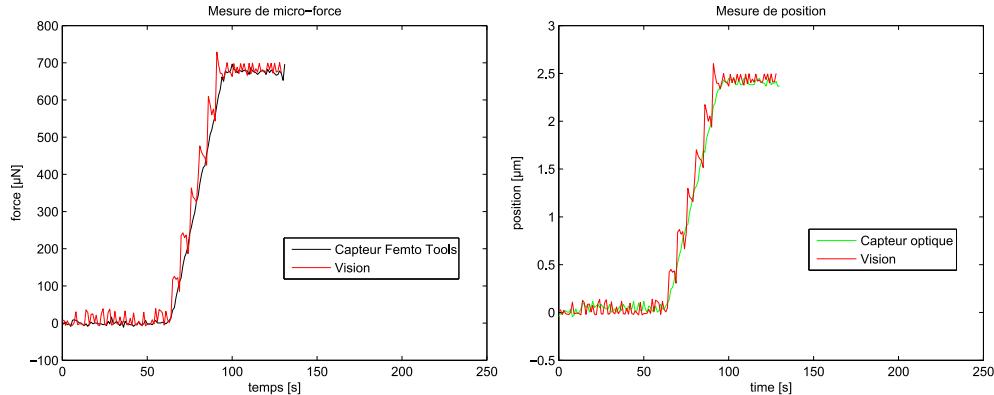


FIGURE 3.15 – Mesure de force (a) et déformation (b) par la vision et par de capteurs externes.

de moins de 10%. Nous pouvons voir que l'évaluation de la position et de la force sont très bruitées. Un des facteurs qui peut expliquer ce fait est la dynamique du capteur de force. Quand nous avons effectué les essais de mesure de position avec le manipulateur décrit dans la sub-section 3.3.1, les résultats de la vision pour les déplacements étaient plus performants et moins bruités. Avec le capteur de force, nous avons menés plusieurs expériences qui ont conduit à des valeurs équivalentes à celles présentées dans les figures.

### 3.4 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présenté la plateforme de micro-manipulation et la station de mesure de force. Ensuite, nous avons modélisé le comportement mécanique de la plateforme par une équation linéaire où la constante de proportionnalité correspond à la raideur des poutres. Des essais ont été réalisés pour tester la qualité et la stabilité des mesures de position par vision, pour estimer la valeur de la raideur et pour confirmer la conformité des évaluations de forme par notre méthode.

Concernant les estimations de déplacements, il a été vérifié que la stabilité mécanique de la station de mesure est importante pour la fidélité et la répétabilité des mesures. Nous avons vu qu'il est fondamental d'effectuer un montage du système en utilisant des supports et d'autres éléments de fixation pour réduire les vibrations des dispositifs. Par rapport au système de mesure de déplacement par vision, nous avons constaté que l'image de la mire doit avoir un bon contraste et qu'au minimum quarante points doivent être présents dans le champ de vision de la caméra pour que le logiciel soit capable d'identifier la périodicité et de trouver le mot binaire pour chercher la position. Il a été constaté aussi que la procédure de traitement d'image prend, en l'état, en moyenne cinq secondes pour l'estimation de la position pour chaque acquisition, c'est qui rend le système impraticable pour la réalisation de mesurages en temps réel. Concernant les résultats des essais, nous avons observé que la répétabilité des mesures de déplacement par image de notre station de mesure est d'environ  $10^{-7}$  m. La répétabilité sert comme un indicateur de la possible

résolution d'un système de mesure.

Ensuite, nous avons mené des essais pour l'estimation de la raideur des poutres de la plateforme. La valeur de la raideur a été évaluée à 280,22 N/m. Nous avons vérifié que cette valeur peut être attribuée à la vraie valeur de la raideur et que le comportement mécanique de la plateforme modélisé par un système linéaire est capable de donner de bons résultats. À la fin, des expériences pour la validation de la méthode ont été conduites et ont montré que l'erreur d'estimation de la force par la vision, en comparaison avec des mesures d'un capteur externe, est de moins de 10%. Finalement, à partir des informations sur la mesure de position et de la raideur, nous avons conclu que la résolution de notre système de micro-force peut atteindre quelques dizaines de  $\mu$ N et la plage de mesure quelques Newtons.

## Chapitre 4

# Incertitude de mesure

Le chapitre précédent a présenté des résultats de mesurages de force sans avoir réalisé une analyse concernant leur qualité. En fait, l'exactitude de tous les systèmes de mesure existants est influencée par un ensemble facteurs. Ainsi, il convient d'ajouter au résultat d'un mesurage une déclaration de sa fiabilité. Cette déclaration est connue comme incertitude de mesure. Nous consacrerons ce chapitre à estimer et exprimer l'incertitude de mesure de la force du système proposé dans ce travail. La section 4.1 présente la procédure pour la détermination de l'incertitude. L'analyse et l'évaluation de l'incertitude sur la mesure de la force est réalisée dans 4.2. Enfin, nous conclurons ce chapitre avec des remarques et interprétations.

### 4.1 La démarche d'estimation et expression de l'incertitude de mesure

La méthodologie adoptée pour l'estimation et expression de l'incertitude de mesure est établie par le *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure* (ISO GUM, 2008) [2]. La démarche est composée de huit étapes :

1. Exprimer mathématiquement la relation fonctionnelle  $f$  entre le mesurande  $y$  et les grandeurs d'influence  $x_i$  ;
2. Déterminer les valeurs estimées des grandeurs d'entrée  $x_i$ , soit sur la base de l'analyse statistique de séries d'observations, soit par d'autres moyens.
3. Evaluer l'incertitude-type  $u(x_i)$  de chaque grandeur d'influence. Selon la méthode utilisée pour estimer les grandeurs ces incertitudes sont divisées en deux groupes : type A et type B. Les évaluations du type A sont réalisées statistiquement tandis que les évaluations type B sont obtenues à partir d'autres sources d'informations comme des spécifications du fabricant, des données fournies par des certificats d'étalonnage ou autres certificats et des valeurs de référence provenant d'ouvrages et manuels.
4. Evaluer les covariances associées à toutes les estimations d'entrée qui sont corrélées.

5. Calculer le résultat du mesurage, c'est-à-dire l'estimation  $y$  du mesurande, à partir de la relation déterminée dans la première étape en utilisant les estimations  $x_i$  obtenues à l'étape 2.
6. Déterminer l'incertitude-type composée  $u_c(y)$  du résultat de mesure  $y$  à partir des incertitudes-types et des covariances associées aux estimations d'entrée. L'expression mathématique de l'incertitude-type composée est obtenue à partir de l'équation 4.2.

$$u_c(y)^2 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 . u(x_i)^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j) \quad (4.1)$$

Cette équation est connue aussi sous le nom de *loi de propagation des incertitudes*. Le terme  $\left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)$  est appelé coefficient de sensibilité et  $r(x_i, x_j)$  correspond au coefficient de corrélation entre  $x_i$  et  $x_j$ . Quand le processus ne contient pas de variables corrélées, la loi de propagation se réduit à :

$$u_c(y)^2 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 . u(x_i)^2 \quad (4.2)$$

7. Calculer l'incertitude élargie  $U$ , avec pour objectif de fournir un intervalle plus large des valeurs qui pourraient être attribuées au mesurande.
8. Donner dans un rapport le résultat du mesurage  $y$  avec son incertitude-type composée  $u_c(y)$  ou son incertitude élargie  $U$ . Décrire comment les incertitudes ont été obtenues.

## 4.2 Estimation et expression de l'incertitude de la mesure de force

Nous allons estimer l'incertitude de mesure des estimations de force de l'essai réalisé dans la section précédente correspondant aux données de la Figure 3.15. Les valeurs de forces considérées sont celles proches de  $700 \mu\text{N}$ .

Dans notre méthode, la force est déterminée par le produit de la raideur ( $K$ ) par des estimations de déformations ( $\delta$ ) de la plateforme. Ainsi, le modèle mathématique pour l'estimation de l'incertitude de mesure de force est composée par la variabilité des estimations de  $\delta$  et par l'incertitude concernant la valeur de la raideur. La relation entre ces variables est exprimée par l'équation 4.3.

$$F = K \cdot \delta \quad (4.3)$$

Nous pouvons obtenir l'expression de l'incertitude-type composée de la force ( $u_c(F)$ ) en appliquant l'expression 4.2 au modèle précédent. Cela conduira à l'équation suivante :

$$u_c(F)^2 = K^2 \cdot u(\delta)^2 + \delta^2 \cdot u(K)^2 \quad (4.4)$$

Les incertitudes-types  $u(\delta)$  et  $u(K)$  seront évaluées dans les sections suivantes.

#### 4.2.1 Incertitude de mesure des déformations

Les déformations sont estimées à partir de la valeur de la position actuelle de la navette  $x$  moins une position initiale ou de référence  $x_0$ . Ainsi, le modèle de l'incertitude est formée par les variations des mesures de ces deux positions. Une position est calculée à partir de la phase du morceau de mire capté par la caméra et par la périodicité de la matrice des points. Les variations des estimations de la phase correspondent à une source d'incertitude. De plus, comme la périodicité a été mesurée par un système de mesure externe, son estimation contient une incertitude associée. Cette incertitude provoque des changements des valeurs de la position. Ainsi, le modèle mathématique pour l'incertitude de mesure de déplacements contient toutes les grandeurs citées et est donné par l'équation 4.5.

$$\delta = x - x_0 = \frac{2\pi}{p}(\phi - \phi_0) \quad (4.5)$$

Les termes  $\phi$  et  $\phi_0$  correspondent aux phases des positions  $x$  et  $x_0$ , respectivement.  $p$  est la période de la mire. En appliquant la loi de propagation des incertitudes à l'équation précédente nous obtenons l'incertitude-type composée de la déformation  $u_c(\delta)$  comme le montre l'expression 4.6.

$$u_c(\delta)^2 = \left( \frac{-2\pi}{p^2}(\phi - \phi_0) \right)^2 \cdot u(p)^2 + \left( \frac{2\pi}{p} \right)^2 \cdot u(\phi)^2 + \left( -\frac{2\pi}{p} \right)^2 \cdot u(\phi_0)^2 \quad (4.6)$$

Pour la suite, nous devons estimer les incertitudes-types de la périodicité  $u(p)$  et des phases  $u(\phi)$  et  $u(\phi_0)$ .

#### Incertitude de mesure de la périodicité de la mire

La valeur de la périodicité de la mire a été estimée en utilisant un AFM. A partir de la mesure de la distance entre de différentes paires de points nous allons calculer une périodicité moyenne. La résolution de l'AFM représente une limitation pour les mesures étant donné qu'elle est une source d'incertitude. Ainsi, la périodicité est influencée par les variations des lectures ( $\bar{p}$ ) et par la résolution du système de mesure ( $R_{AFM}$ ). Le modèle mathématique est donné par l'équation suivante.

$$p = \bar{p} + R_{AFM} \quad (4.7)$$

L'incertitude-type composée de la périodicité  $u_c(p)$  est obtenue par l'application directe de l'équation 4.2 au modèle proposé. L'expression 4.11 représente cette incertitude.

$$u_c(p)^2 = u(\bar{p})^2 + u(R_{AFM})^2 \quad (4.8)$$

L'incertitude associée à la variation des lectures est évaluée par des moyens statistiques donc elle est une incertitude du type A. Nous avons effectués deux mesures pour déterminer  $\bar{p}$ . La moyenne de ces essais est égale à  $4,02 \mu\text{m}$ . La loi de probabilité qui représente ce mesurage est la t-student, car le nombre d'observations effectuées pour l'estimation de la grandeur est moins de 30, avec 1 d.d.l. . L'écart-type de ces observations ( $s(p)$ ) est égal à  $0,13 \mu\text{m}$ . L'incertitude-type  $u(\bar{p})$  est estimée par l'écart-type de la moyenne  $s(\bar{p})$  à un niveau de confiance de 68%, calculée à partir de l'expression suivante :

$$u(p) = s(\bar{p}) = k \frac{s(p)}{\sqrt{N}} = 1,9626 \frac{0,13}{\sqrt{2}} = 0,1804 \quad (4.9)$$

Le terme  $k$  correspond à un facteur d'élargissement utilisé pour augmenter le niveau de confiance de l'écart-type de la moyenne à 68%. Cette valeur a été obtenue à partir de la table de la loi t-student disponible dans les annexes de ce manuscrit.

La résolution de l'AFM est de  $0,01 \mu\text{m}$ . Son évaluation est du type B parce que nous l'avons fait par des moyens non statistiques. Nous considérons que sa distribution de probabilité statistique est rectangulaire avec un degré de liberté infini. Ainsi, l'incertitude associée à la résolution est :

$$u(R_{AFM}) = \frac{0,01}{\sqrt{3}} = 0,0057735 \mu\text{m} \quad (4.10)$$

Par la suite, nous pouvons calculer l'incertitude-type composée de la périodicité à partir des résultats précédents :

$$u_c(p) = \sqrt{0,1804^2 + 0,0057735^2} = 0,18049 \mu\text{m} \quad (4.11)$$

Il est convenable de déterminer maintenant le degré de liberté effectif de ce mesurage. Ce terme sera utilisé à la fin des calculs pour définir le degré de liberté effectif correspondant à tout le processus de mesure de force par vision.

$$v_{eff}(p) = \frac{0,18049^4}{\frac{0,1804^4}{1} + \frac{0,0057735^2}{\infty}} = 1 \quad (4.12)$$

### Incertitude de mesure de la phase

Les estimations de la phase sont influencées par les variation des lectures  $\bar{\phi}$  et par la résolution du système de mesure par vision  $R_\phi$ . Donc, l'équation de la mesure s'écrit sous la forme suivante.

$$\phi = \bar{\phi} + R_\phi \quad (4.13)$$

L'expression mathématique qui représente l'incertitude-type composée de la phase  $\phi$  est telle que :

$$u_c(\phi)^2 = u(\bar{\phi})^2 + u(R_\phi)^2 \quad (4.14)$$

Nous allons estimer l'incertitude de la phase initiale  $\phi_0$  et celle de la phase finale  $\phi$ . Nous commençons par la première.

Nous avons pris les estimations de phases correspondantes aux 30 premières secondes pour déterminer la phase initiale. La moyenne et l'écart-type de ces valeurs sont, respectivement,  $\phi_0 = 8959,5830$  rad et  $s(x) = 0,0731$  rad. Comme le nombre d'observations est  $N = 30$  nous considérons que les variations de la phase suivent une loi de probabilité normale avec 29 d.d.l. Ainsi, l'incertitude liée aux variations de la phase est égal à l'écart-type de la moyenne.

$$u(\bar{\phi}_0) = \frac{s(\phi_0)}{\sqrt{N}} = \frac{0,0731}{\sqrt{30}} = 0,013346 \text{ rad} \quad (4.15)$$

Selon Zhao et Asundi [41], la sensibilité à des déplacements des systèmes de mesure par détection de phase de franges est égale à la période de franges divisée par la taille de l'image. Ainsi, la résolution du système pour la mesure de phase est égale à  $\frac{2\pi}{N_x}$ , où  $N_x = 1024$  pixel (dimension de l'image dans la direction  $x$ ). Par la suite, la résolution est d'environ 0,0061 rad. La distribution de probabilité de la résolution est du type rectangulaire avec infini d.d.l. Donc, l'incertitude associée à cette grandeur est :

$$u(R_\phi) = \frac{0,0061}{\sqrt{3}} = 0,003522 \text{ rad} \quad (4.16)$$

En s'appuyant sur l'expression 4.14 et sur les valeurs des incertitudes-types, il est possible de calculer l'incertitude-type composée de la phase initiale :

$$u_c(\phi_0) = \sqrt{(0,013346)^2 + (0,003522)^2} = 0,013803 \text{ rad} \quad (4.17)$$

L'incertitude-type composée a un niveau de confiance de 68%. Le facteur d'élargissement  $k$  est déterminé à partir du degré de liberté effectif, calculé dans l'expression suivante.

$$v_{eff}(\phi_0) = \frac{0,013803^4}{\frac{0,013346^4}{29} + \frac{0,003522^4}{\infty}} = 33 \quad (4.18)$$

Pour la phase finale  $\phi$ , nous avons pris les valeurs de phase mesurées dans l'intervalle de temps [96;125] secondes. La moyenne et l'écart-type de ces donnés sont, respectivement, 8962,6436 et 0,0575 rad. La distribution de probabilité adopté pour cette grandeur est la normale car 30 lectures ont été effectuées pour le calcul de la moyenne. La démarche de l'estimation de l'incertitude de  $\phi$  est la même utilisée pour  $\phi_0$ . Ainsi, l'incertitude-type de la variation des mesures de la phase est  $u(\bar{\phi}) = 0,010498$  et l'incertitude-type composée est  $u_c(\phi) = 0,017341$ . Le degré de liberté effectif du mesurage est :

$$v_{eff}(\phi) = \frac{0,017341^4}{\frac{0,010498^4}{29} + \frac{0,003522^4}{\infty} + \frac{0,013803^4}{33}} = 59 \quad (4.19)$$

Avec les incertitudes de  $p$ ,  $\phi_0$  et  $\phi$  nous pouvons revenir à l'équation 4.6 et déterminer la valeur de l'incertitude-type composée de la mesure de déplacement. D'abord, nous allons calculer les coefficients de sensibilité des incertitude-type qui correspondent aux dérivées partielles de l'équation 4.2 :

$$\begin{aligned} \left( \frac{-2\pi}{p^2}(\phi - \phi_0) \right) &= \left( \frac{-2\pi}{4,02^2}(8962, 6436 - 8959, 5830) \right) = -1,189965 \\ \left( \frac{2\pi}{p}\phi_0 \right) &= \left( \frac{2\pi}{4,02} \right) = 1,562981 \end{aligned} \quad (4.20)$$

Ainsi,  $u_c(\delta) = 0,217553 \mu\text{m}$ .

Le degré de liberté de la mesure de déplacement est égal à 2.

#### 4.2.2 Incertitude de mesure de la raideur

La raideur de la plateforme a été déterminée dans la section 3.3.2 ( $K = 280,22 \text{ N/m}$ ). A partir de la division d'un vecteur de forces  $F^*$  par un vecteur de déformations  $\delta^*$  nous obtenons un vecteur de raideurs. La moyenne de cet ensemble de données est considérée comme la valeur de la raideur  $K$  des poutres. Les variations des mesures de forces et de déformations représentent des sources d'incertitude de la raideur. Ainsi, le modèle mathématique qui lie  $K$  aux grandeurs d'influence  $F^*$  et  $\delta^*$  est tel que comme décrit dans l'expression suivante :

$$K = \frac{F^*}{\delta^*} \quad (4.21)$$

L'incertitude-type correspondante à la raideur est :

$$u_c(K) = \left( \frac{1}{\delta^*} \right)^2 \cdot u(F^*)^2 + \left( -\frac{F}{\delta^{*2}} \right)^2 \cdot u(\delta^*)^2 \quad (4.22)$$

Pour la suite des calculs il faut estimer les valeurs des incertitudes  $u(F^*)$  et  $u(\delta^*)$ .

#### Incertainude de mesure de la force par le capteur de force

Dans cette section, nous nous intéressons au calcul de l'incertitude de mesure de force par le capteur de force Femto Tools<sup>TM</sup>. Les mesures du capteur sont influencées par la variation des lectures ( $\bar{F}^*$ ), par l'offset ( $Offset$ ), par la résolution du capteur ( $R_{F^*}$ ) et par la résolution du CAN ( $R_{CAN}$ ). Donc, l'équation qui représente les mesures de force par le Femto Tools<sup>TM</sup> s'écrit sous la forme suivante :

$$F^* = \bar{F}^* + R_{F^*} + R_{CAN} + Offset \quad (4.23)$$

En s'appuyant sur la loi de propagations des erreurs et sur l'équation précédente, nous pouvons déterminer l'expression de l'incertitude-type composée de la force ( $F^*$ ) :

$$u_c(F^*) = u(\bar{F}^*)^2 + u(R_{F^*})^2 + u(R_{CAN})^2 + u(Offset)^2 \quad (4.24)$$

Pour la détermination de  $u(\bar{F}^*)$ , nous allons considérer que l'intervalle de valeurs de force qui est compris entre [96 ; 125] secondes représente les variations des mesures de  $F^*$ . La moyenne et l'écart-type de ces données sont, respectivement, 2714,56 et 7,35  $\mu\text{N}$ . La résolution du capteur de force est de 0,04  $\mu\text{N}$ . Le CAN dispose de 12 bits pour convertir un signal compris entre 0 et +5V en données numériques. Ainsi, l'incertitude-type des variations de mesures  $u(\bar{F}^*)$ , de la résolution du capteur  $u(R_{F^*})$  et de la résolution du CAN  $u(R_{CAN})$  sont, respectivement :

$$u(\bar{F}^*) = \frac{7,35}{\sqrt{30}} = 1,34192 \mu\text{N} \quad (4.25)$$

$$u(R_{F^*}) = \frac{0,04}{\sqrt{3}} = 0,023094 \mu\text{N} \quad (4.26)$$

$$u(R_{CAN}) = \frac{\frac{5}{2^{12}}}{\sqrt{3}} = 0,000705 \text{ Volt} \quad (4.27)$$

L'incertitude-type de l'offset est estimée à partir de l'équation 4.24 sans le terme  $u(Offset)$ . Nous allons prendre les mesures effectuées entre 1 et 30 secondes pour déterminer la moyenne et l'incertitude. La moyenne de ces données est 2037,62  $\mu\text{N}$  et l'écart-type correspond à 5,46  $\mu\text{N}$ . Par la suite, l'incertitude-type composée de l'offset est  $u_c(Offset) = 0,997122 \mu\text{N}$ . Le degré de liberté effectif de ce processus est tel que le montre l'expression suivante :

$$v_{eff}(Offset) = \frac{0,997122^4}{\frac{0,994254^4}{29} + \frac{0,023094^4}{\infty} + \frac{0,0007054^4}{\infty}} = 29 \quad (4.28)$$

Dans ce cas, nous n'avons pas besoin d'exprimer le résultat complet du mesurage. Ainsi, l'incertitude élargie pour cet offset ne sera pas calculée.

Avec les informations précédentes, on a que l'incertitude-type composée de  $F^*$  est égale à  $u_c(F^*) = 1,672 \mu\text{N}$ . Le degré de liberté effectif de ce mesurage est :

$$v_{eff}(F^*) = \frac{1,672^4}{\frac{1,34192^4}{29} + \frac{0,023094^4}{\infty} + \frac{0,0007054^4}{\infty} + \frac{0,997122^4}{29}} = 53 \quad (4.29)$$

### Incertitude de mesure de déplacement par le capteur de positionnement optique

Les mesures des déplacements sont influencées par les variations des lectures, par la résolution de l'instrument de mesure, par la résolution du CAN et aussi par la correction de l'offset. L'expression 4.30 correspond à la modélisation de ce processus.

$$\delta^* = \bar{\delta}^* + R_{\delta^*} + R_{CAN} + Offset \quad (4.30)$$

A partir de l'application de la loi de propagation des incertitudes à l'expression précédente nous obtenons l'équation de l'incertitude-type composée de  $\delta^*$  :

$$u_c(\delta^*)^2 = u(\bar{\delta}^*)^2 + u(R_{\delta^*})^2 + u(R_{CAN})^2 + u(Offset)^2 \quad (4.31)$$

Pour la détermination de la variation de  $\bar{\delta}^*$  et pour l'estimation de l'offset nous avons pris les valeurs acquises dans les mêmes intervalles que ceux considérés pour l'évaluation de la force. Le capteur de position optique a une résolution de  $0,01 \mu\text{m}$ . La conversion analogique-numérique est effectuée à l'aide d'une carte NI qui dispose de 12 bits pour convertir des signaux qui varient entre -10 et +10 V. De cette forme,  $u(R_{\delta^*}) = \frac{0,01}{\sqrt{3}} = \frac{+10 - (-10)}{\sqrt{3}} = 0,0057735 \mu\text{m}$  et  $u(R_{CAN}) = \frac{2^{12}}{\sqrt{3}} = 0,002819 \text{ Volt}$ .

Concernant l'offset, nous allons estimer l'incertitude  $u(Offset)$  en utilisant de 4.31, mais sans le terme  $u(Offset)^2$ . A partir des donnés acquis par le capteur optique dans l'intervalle considéré nous avons que  $Offset = 0,71 \mu\text{m}$  et  $s(Offset) = 0,04 \mu\text{m}$ . Par la suite,  $u(Offset) = \frac{0,04}{\sqrt{30}} = 0,007303 \mu\text{m}$ . Ces informations conduisent à une incertitude-type composée  $u_c(\delta^*) = 0,009727 \mu\text{m}$ . Le degré de liberté effectif de ce mesurage s'approche de 91.

La moyenne des valeurs de positions acquises entre les instants 96 et 125 secondes est égale à  $3,08 \mu\text{m}$  et l'écart-type de ces données est de  $0,03 \mu\text{m}$ . Ainsi,  $u(\bar{\delta}^*) = \frac{0,03}{\sqrt{30}} = 0,005477 \mu\text{m}$  et l'incertitude-type composée de  $\delta^*$ , calculée à partir de l'équation 4.31, est  $u_c(\delta^*) = 0,0129 \mu\text{m}$ . Dans ce cas, le degré de liberté effectif est égale à 213.

Une fois que les incertitudes des estimations de forces et déplacements ont été estimées, nous pouvons avancer vers le calcul de l'incertitude-type composée de la raideur ( $u_c(K)$ ) :

$$u_c(K) = \left( \frac{1}{2,37} \right)^2 \cdot (1,672)^2 + \left( -\frac{676,94}{2,37^2} \right)^2 \cdot (0,0129)^2 = 1,7051 \text{ N/m} \quad (4.32)$$

Le processus de détermination de la raideur dispose de 58 degrés de liberté.

Donc, jusqu'à maintenant nous avons calculé les incertitudes associées à la mesure de déplacements et à l'estimation de la raideur. Maintenant nous pouvons retourner à l'équation 4.4 et continuer avec l'évaluation de l'incertitude de mesure de force par vision. L'incertitude-type composée de la force est donnée par l'expression suivante :

$$u_c(F) = \sqrt{(280,22)^2 \cdot (0,2178)^2 + (2,3918)^2 \cdot (1,7051)^2} = 61,2335 \mu\text{N} \quad (4.33)$$

Une observation par rapport à la fidélité de mesure peut être faite à partir de l'expression précédente. Nous pouvons remarquer que le coefficient de sensibilité associé à l'incertitude de mesure de déformation (280,22) est environ dix fois plus grand que celui associé à la raideur (2,3918). Cela veux dire que la fidélité de la mesure de force est très affectée par les variations d'estimation de la déformation. En continuant avec le calcul de l'incertitude, nous avons que le degré de liberté correspondant à la mesure de force par vision est de l'ordre de  $2,8356 \cdot 10^6$ . Donc, pour un niveau de confiance de 95%, nous pouvons considérer que la valeur du facteur d'élargissement  $k$  s'approche de celle de l'infini, c'est-à-dire, 1,96.

Avec tous ces éléments, il est possible exprimer le résultat complet du mesurage de force par vision, comme le montre l'expression suivante :

$$F = 280,22 * 2,3918 \pm 1,96 * 61,2335 = 670,23 \pm 120,02 \mu N \quad (4.34)$$

Ce résultat nous indique que la valeur moyenne de la force appliquée à la plateforme de micro-manipulation est de  $670,23 \mu N$  et que nous avons 95% de certitude que la valeur vraie correspondante à cette grandeur se trouve dans un intervalle de  $\pm 120,02 \mu N$  autour de cette moyenne.

### 4.3 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons réalisé l'estimation et l'expression de l'incertitude de mesure de force par vision. Dans ce but, les facteurs d'influence du mesurage ont été identifiés, des modèles de mesures ont été proposés et les incertitudes-type de chaque variable ont été estimées. Nous avons observé au cours de ce processus que le coefficient de sensibilité lié à l'inexactitude de la mesure de déformation est assez grand par rapport aux autres. Ce fait indique que la mesure de déformation a une influence très accentuée sur les variations des mesures de force. Nous n'avons pas considéré l'influence de la température parce que les variations que cette grandeur provoque dans le résultat de mesurage sont insignifiantes.



## Chapitre 5

# Conclusion générale et perspectives

DANS ce travail, nous avons développé un système de mesure de micro-force par vision dans une direction pour une plateforme de micro-micromanipulation. Le problème de l'estimation des efforts consiste essentiellement à déterminer la déformation d'un objet d'intérêt qui dispose de caractéristiques mécaniques connues. Dans notre application, les éléments déformables sont des poutres soutenant une plateforme mobile. Pour la mesure des déformations, une technique de mesure de position par vision a été utilisée. Cette technique est capable de mesurer des déplacements plus grands que le champ de vision de la caméra et permet d'atteindre une résolution subpixélique.

La détermination de la force entre les éléments d'une micro-manipulation est importante pour garantir l'intégrité structurelle de ceux-ci. De plus, elle est nécessaire pour la création de manipulations automatiques. Les mesures sont effectuées à l'aide des capteurs de force. Dans le domaine des micro-techniques ces dispositifs doivent être aptes à évaluer des efforts d'interaction de l'ordre du  $\mu\text{N}$ . Nous avons vu qu'il existe divers types de capteurs pour l'estimation de la force. En général, ces capteurs ont besoin d'un contact pour réaliser la mesure (les capteurs optiques sont une exception). Par conséquent, l'intégration d'un organe sensitif dans le système de micro-manipulation est nécessaire. La fixation de ces éléments sur des pièces de dimensions micrométriques est une opération est assez difficile. De plus, un circuit électronique pour l'amplification et le conditionnement du signal est indispensable pour ces capteurs. La vision permet de réaliser la mesure de force et de déplacement simultanément sans contact. En outre, le résultat du mesurage est fourni sous la forme numérique pouvant être utilisé directement dans une boucle de contrôle. La vision nous permet également de visualiser l'expérience en même temps qu'on exécute les mesures. Cette caractéristique est très utile pour certaines manipulations en temps réel, surtout celles liées à la biologie.

Pour la modélisation de la mécanique de la plateforme, nous avons supposé qu'un comportement linéaire du type  $F = K.\delta$ , où  $K$  est la raideur de la plateforme et  $\delta$  le déplacement de la navette par rapport à la position d'équilibre, est suffisant pour représenter notre système.

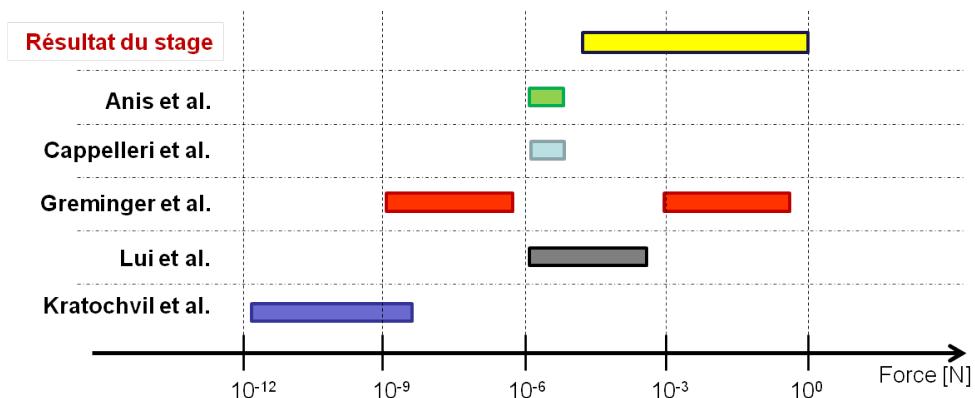


FIGURE 5.1 – Comparatif de plage de mesure entre les méthodes des mesure de micro-force par vision décrites dans 1.3 avec la région correspondante au résultat du stage.

Des expérimentations ont été menées pour la vérification de la qualité des mesures de force par vision, pour la détermination de la raideur et pour la validation de la méthode. Nous avons remarqué avec les essais que notre station de mesure est capable d'estimer fidèlement des centaines de nm. De plus, on a vu que la raideur de la plateforme est d'environ 280 N/m. Ces résultats nous montrent que la résolution des mesures de force de notre système est de l'ordre des dizaines de  $\mu$ N. Le rapport plage de mesure/résolution est de l'ordre de  $10^5$ , un fait rare dans les micro-techniques. La Figure 5.1 compare la région correspondant à la plage de mesure obtenue dans ce travail avec celles de la littérature. Nous pouvons voir que cette région est plus grande que celles obtenues par des travaux précédents et qu'elle satisfait l'objectif du stage.

Comme perspectives pour des prochains travaux, nous pensons que la méthode nécessite encore des expérimentations. L'utilisation d'un capteur de force externe qui dispose d'une plage de mesure plus large que celle du Femto Tools™ FT-270® est aussi envisageable pour la détermination de la raideur pour des grandes déformations des poutres. Nous considérons encore l'extrapolation de la technique pour la mesure de force en multiples directions. D'abord, nous voulons adapter la méthode à la plateforme de micro-manipulation à 2 d.d.l. présentée dans [23]. Par la suite, nous envisageons la conception de systèmes de mesure de force en trois directions en utilisant de la stéréo-vision.

# Bibliographie

- [1] <http://www.femtotool.com>. 7, 17
- [2] Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure, 2008. 47
- [3] J. J. Abbott, Z. Nagy, F. Beyeler, and B. J. Nelson. Robotics in the small, part i : Microrobotics. *Robotics & Automation Magazine*, 14(2) :92–103, June 2007. 9, 13
- [4] Y. H. Anis, J. K. Mills, and W. L. Cleghorn. Vision-based measurement of microassembly forces. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 16(8) :1639–1652, July 2006. 20
- [5] Y. H. Anis, J. K. Mills, and W. L. Cleghorn. Automated microassembly task execution using vision-based feedback control. In *International Conference on Information Acquisition*, pages 476–481, 2007. 13, 20
- [6] F. Arai, A. Kawaji, T. Sugiyama, Y. Onomura, M. Ogawa, T. Fukuda, H. Iwata, and K. Itoigawa. 3d micromanipulation system under microscope. In *International Symposium on Micromechatronics and Human Science*, pages 127–134, November 1998. 15
- [7] R. N. Bracewell. *The Fourier Transform and its Applications*. McGraw-Hill, New York, 3rd edition, 2000. 26
- [8] H. V. Brussel, J. Peirs, D. Reynaerts, A. Delchambre, G. . Reinhart, N. Roth, M. Weck, and E. Zussman. Assembly of microsystems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 49(2) :451–772, 2000. 9, 12
- [9] D. J. Cappelleri, G. Krishnan, C. Kim, V. Kumar, and S. Kota. Toward the design of a decoupled, two-dimensional, vision-based mun force sensor. *ASME Journal of Mechanics and Robotics*, 2, May 2010. 21
- [10] D. J. Cappelleri, G. Piazza, and V. Kumar. Two-dimensional, vision-based mun force sensor for microrobotics. In *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, ICRA'09, pages 2952–2957, Piscataway, NJ, USA, May 2009. IEEE Press. 21
- [11] J. Cecil, D. Powell, and D. Vasquez. Assembly and manipulation of microdevices - a state of the art survey. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23(5) :580–588, October 2007. 13
- [12] C. Clévy, A. Hubert, and N. Chaillet. Micromanipulation and micro-assembly systems. In *International Advanced Robotics Programme (IARP)*, 2006. 9

- [13] W. Göpel, J. Hesse, and J. N. Zemel, editors. *Sensors - A Comprehensive Survey : Mechanical Sensors*, volume 7. VCH, New York, USA, 1994. [16](#), [18](#)
- [14] M. A. Greminger. Vision-based force measurement for micromanipulation and microrobotics. Master's thesis, University of Minnesota, May 2002. [9](#), [20](#)
- [15] M. A. Greminger and B. J. Nelson. Vision-based force measurement. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 26(3) :290–298, March 2004. [20](#)
- [16] Y. Haddab, Q. Chen, and P. Lutz. Improvement of strain gauges micro-forces measurement using kalman optimal filtering. *Mechatronics*, 19(4) :457–462, June 2009. [15](#)
- [17] D.-H. Kim, B. Kim, and H. Kang. Development of a piezoelectric polymer-based sensorized microgripper for microassembly and micromanipulation. *Microsystem Technologies*, 10(4) :275–270, 2004. [18](#)
- [18] B. E. Kratochvil, L. X. Dong, L. Zhang, and B. J. Nelson. Automatic nanorobotic characterization of anomalously rolled-up sige/si helical nanobelts through vision-based force measurement. In *Proc. of the 3rd IEEE Conference on Automation Science and Engineering (IEEE CASE 2007)*, Scottsdale, Arizona, USA, September 2007. [20](#)
- [19] N. Lafitte, M. Kumemura, L. Jalabert, D. Collard, and H. Fujita. Détection biomécanique de réactions enzymatiques sur des molécules d'adn grâce à une micro-pince en silicium. In *MajecSTIC 2010*, Bordeaux, France, October 2010. [17](#)
- [20] X. Liu, K. Kim, Y. Zhang, and Y. Sun. Nanonewton force sensing and control in microrobotic cell manipulation. *The International Journal of Robotics Research*, 28(8) :1065–1076, August 2009. [21](#)
- [21] X. Liu, Y. Sun, Wenhui Wang, and B. M. Lansdorp. Vision-based cellular force measurement using an elastic microfabricated device. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 17(7) :1281–1288, July 2007. [21](#)
- [22] Z. Lu, P. C. Y. Chen, and W. Lin. Force sensing and control in micromanipulation. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C : Applications and Reviews*, 36(6) :713–724, November 2006. [14](#), [15](#), [16](#), [18](#), [19](#)
- [23] P. M. Moore, M. Rakotondrabe, C. Clévy, and G. J. Wiens. Development of a modular and compliant micro-assembly platform with integrated force measurement capabilities. In *International Conference on MicroManufacturing*, March 2012. [58](#)
- [24] B. J. Nelson, Y. Zhou, and B. Vikramaditya. Sensor-based microassembly of hybrid mems devices. *Control Systems Magazine*, 18(6) :35–45, December 1998. [10](#), [12](#), [19](#)
- [25] J. Park and W. Moon. A hybrid-type micro-gripper with an integrated force sensor. *Microsystem Technologies*, 9(8) :511–519, 2003. [18](#)
- [26] A. Pillarisetti, M. Pekarev, A. D. Brooks, and J. P. Desai. Evaluating the effect of force feedback in cell injection. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 4(3) :322–331, July 2007. [13](#)

- [27] D. O. Popa and H. E. Stephanou. Micro and mesoscale robotic assembly. *Journal of Manufacturing Process*, 6(1) :52–71, 2004. [12](#)
- [28] M. Rakotondrabe, C. Clévy, K. Rabenorosoa, and K. Ncir. Presentation, force estimation and control of an instrumented platform dedicated to automated micro-manipulation tasks. In *6th Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering*, pages 722–727, August 2010. [25](#), [33](#), [44](#)
- [29] P. Sandoz. Nanometric position and displacement measurement versus the six degrees of freedom by means of a patterned surface element. *Applied Optics*, 44(8) :1449–1453, 2005. [27](#)
- [30] P. Sandoz, V. Bonnans, and T. Gharbi. High-accuracy position and orientation measurement of extended two-dimensional surfaces by a phase-sensitive vision method. *Applied Optics*, 41(26) :5503–5511, September 2002. [27](#)
- [31] P. Sandoz, B. Trolard, D. Marsaut, and T. Gharbi. Micro-structured surface-element for high-accuracy position measurement by vision and phase-measurement. In A. M. O. and J. L. Paz, editors, *5th Iberoamerican Meeting on Optics and 8th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Their Applications*, volume 5622, pages 606–611, November 2004. [27](#)
- [32] T. Tanikawa, M. Kawai, N. Koyachi, T. Arai, T. Ide, S. Kaneko, R. Ohta, and T. Hirose. Force control system for autonomous micro-manipulation. In *International Conference on Robotics & Automation*, pages 610–616, May 2001. [15](#)
- [33] W. Trimmer. Microrobots and micromechanical systems. *Sensors and Actuators*, 19(1) :267–287, September 1989. [9](#)
- [34] X. Wang, G. Ananthasuresh, and J. P. Ostrowski. Vision-based sensing of forces in elastic objects. *Sensors and actuators. A, Physical*, vol. 94(3) :142–156, 2001. [19](#)
- [35] X. Wang, G. K. Ananthasuresh, and J. P. Ostrowski. Vision-based extraction of geometry and forces from fabricated micro devices. In *Technical Proceedings of the MSM 2000 International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems*, pages 257–260, University of Pennsylvania, US, March 2000. [19](#)
- [36] C. Yamahata, D. Collard, B. Legrand, T. Takekawa, M. Kumemura, G. Hashiguchi, and H. Fujita. Silicon nanotweezers with subnanometer resolution for the micromanipulation of biomolecules. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 17(3) :623–631, June 2008. [17](#)
- [37] S. Yu, S. N. Fry, D. P. Potasek, D. J. Bell, and B. J. Nelson. Characterizing fruit fly flight behavior using a microforce sensor with a new comb-drive configuration. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 14(1) :4–11, February 2005. [17](#)
- [38] S. Yu and B. J. Nelson. Microrobotic cell injection. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation*, volume 1, pages 620–625, 2001. [13](#)
- [39] J. A. G. Zea. *Position Referenced Microscopy : Microfabricated pseudo-periodic patterns for absolute positionning of specimens with sub-micrometer accuracy*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, December 2010. [10](#), [25](#)

- [40] J. A. G. Zea, P. Sandoz, Émilie Gaiffe, J.-L. Prétet, and C. Mougin. Pseudo-periodic encryption of extended 2d surfaces for high accurate recovery of any random zone by vision. *International Journal of OptoMechatronics*, 4(1) :65–82, March 2010. **25**
- [41] B. Zhao and A. Asundi. Microscopic grid methods-resolution and sensitivity. *Optics and Lasers in Engineering*, 36(5) :437–450, November 2001. **51**

## Table de la Loi de Student – Test $t$

	Seuil de risque $\alpha$ (bilatéral)														
DDL	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01	0,005	0,001	
1	0,1584	0,3249	0,5095	0,7265	1	1,3764	1,9626	3,0777	6,3137	12,706	31,821	63,656	127,32	636,58	
2	0,1421	0,2887	0,4447	0,6172	0,8165	1,0607	1,3862	1,8856	2,92	4,3027	6,9645	9,925	14,089	31,6	
3	0,1366	0,2767	0,4242	0,5844	0,7649	0,9785	1,2498	1,6377	2,3534	3,1824	4,5407	5,8408	7,4532	12,924	
4	0,1338	0,2707	0,4142	0,5686	0,7407	0,941	1,1896	1,5332	2,1318	2,7765	3,7469	4,6041	5,5975	8,6101	
5	0,1322	0,2672	0,4082	0,5594	0,7267	0,9195	1,1558	1,4759	2,015	2,5706	3,3649	4,0321	4,7733	6,8685	
6	0,1311	0,2648	0,4043	0,5534	0,7176	0,9057	1,1342	1,4398	1,9432	2,4469	3,1427	3,7074	4,3168	5,9587	
7	0,1303	0,2632	0,4015	0,5491	0,7111	0,896	1,1192	1,4149	1,8946	2,3646	2,9979	3,4995	4,0294	5,4081	
8	0,1297	0,2619	0,3995	0,5459	0,7064	0,8889	1,1081	1,3968	1,8595	2,306	2,8965	3,3554	3,8325	5,0414	
9	0,1293	0,261	0,3979	0,5435	0,7027	0,8834	1,0997	1,383	1,8331	2,2622	2,8214	3,2498	3,6896	4,7809	
10	0,1289	0,2602	0,3966	0,5415	0,6998	0,8791	1,0931	1,3722	1,8125	2,2281	2,7638	3,1693	3,5814	4,5868	
11	0,1286	0,2596	0,3956	0,5399	0,6974	0,8755	1,0877	1,3634	1,7959	2,201	2,7181	3,1058	3,4966	4,4369	
12	0,1283	0,259	0,3947	0,5386	0,6955	0,8726	1,0832	1,3562	1,7823	2,1788	2,681	3,0545	3,4284	4,3178	
13	0,1281	0,2586	0,394	0,5375	0,6938	0,8702	1,0795	1,3502	1,7709	2,1604	2,6503	3,0123	3,3725	4,2209	
14	0,128	0,2582	0,3933	0,5366	0,6924	0,8681	1,0763	1,345	1,7613	2,1448	2,6245	2,9768	3,3257	4,1403	
15	0,1278	0,2579	0,3928	0,5357	0,6912	0,8662	1,0735	1,3406	1,7531	2,1315	2,6025	2,9467	3,286	4,0728	
16	0,1277	0,2576	0,3923	0,535	0,6901	0,8647	1,0711	1,3368	1,7459	2,1199	2,5835	2,9208	3,252	4,0149	
17	0,1276	0,2573	0,3919	0,5344	0,6892	0,8633	1,069	1,3334	1,7396	2,1098	2,5669	2,8982	3,2224	3,9651	
18	0,1274	0,2571	0,3915	0,5338	0,6884	0,862	1,0672	1,3304	1,7341	2,1009	2,5524	2,8784	3,1966	3,9217	
19	0,1274	0,2569	0,3912	0,5333	0,6876	0,861	1,0655	1,3277	1,7291	2,093	2,5395	2,8609	3,1737	3,8833	
20	0,1273	0,2567	0,3909	0,5329	0,687	0,86	1,064	1,3253	1,7247	2,086	2,528	2,8453	3,1534	3,8496	
21	0,1272	0,2566	0,3906	0,5325	0,6864	0,8591	1,0627	1,3232	1,7207	2,0796	2,5176	2,8314	3,1352	3,8193	
22	0,1271	0,2564	0,3904	0,5321	0,6858	0,8583	1,0614	1,3212	1,7171	2,0739	2,5083	2,8188	3,1188	3,7922	
23	0,1271	0,2563	0,3902	0,5317	0,6853	0,8575	1,0603	1,3195	1,7139	2,0687	2,4999	2,8073	3,104	3,7676	
24	0,127	0,2562	0,39	0,5314	0,6848	0,8569	1,0593	1,3178	1,7109	2,0639	2,4922	2,797	3,0905	3,7454	
25	0,1269	0,2561	0,3898	0,5312	0,6844	0,8562	1,0584	1,3163	1,7081	2,0595	2,4851	2,7874	3,0782	3,7251	
26	0,1269	0,256	0,3896	0,5309	0,684	0,8557	1,0575	1,315	1,7056	2,0555	2,4786	2,7787	3,0669	3,7067	
27	0,1268	0,2559	0,3894	0,5306	0,6837	0,8551	1,0567	1,3137	1,7033	2,0518	2,4727	2,7707	3,0565	3,6895	
28	0,1268	0,2558	0,3893	0,5304	0,6834	0,8546	1,056	1,3125	1,7011	2,0484	2,4671	2,7633	3,047	3,6739	
29	0,1268	0,2557	0,3892	0,5302	0,683	0,8542	1,0553	1,3114	1,6991	2,0452	2,462	2,7564	3,038	3,6595	
30	0,1267	0,2556	0,389	0,53	0,6828	0,8538	1,0547	1,3104	1,6973	2,0423	2,4573	2,75	3,0298	3,646	
31	0,1267	0,2555	0,3889	0,5298	0,6825	0,8534	1,0541	1,3095	1,6955	2,0395	2,4528	2,744	3,0221	3,6335	
32	0,1267	0,2555	0,3888	0,5297	0,6822	0,853	1,0535	1,3086	1,6939	2,0369	2,4487	2,7385	3,0149	3,6218	
33	0,1266	0,2554	0,3887	0,5295	0,682	0,8526	1,053	1,3077	1,6924	2,0345	2,4448	2,7333	3,0082	3,6109	
34	0,1266	0,2553	0,3886	0,5294	0,6818	0,8523	1,0525	1,307	1,6909	2,0322	2,4411	2,7284	3,002	3,6007	
35	0,1266	0,2553	0,3885	0,5292	0,6816	0,852	1,052	1,3062	1,6896	2,0301	2,4377	2,7238	2,9961	3,5911	
36	0,1266	0,2552	0,3884	0,5291	0,6814	0,8517	1,0516	1,3055	1,6883	2,0281	2,4345	2,7195	2,9905	3,5821	
37	0,1265	0,2552	0,3883	0,5289	0,6812	0,8514	1,0512	1,3049	1,6871	2,0262	2,4314	2,7154	2,9853	3,5737	
38	0,1265	0,2551	0,3882	0,5288	0,681	0,8512	1,0508	1,3042	1,686	2,0244	2,4286	2,7116	2,9803	3,5657	
39	0,1265	0,2551	0,3882	0,5287	0,6808	0,8509	1,0504	1,3036	1,6849	2,0227	2,4258	2,7079	2,9756	3,5581	
40	0,1265	0,255	0,3881	0,5286	0,6807	0,8507	1,05	1,3031	1,6839	2,0211	2,4233	2,7045	2,9712	3,551	
41	0,1264	0,255	0,388	0,5285	0,6805	0,8505	1,0497	1,3025	1,6829	2,0195	2,4208	2,7012	2,967	3,5443	
42	0,1264	0,255	0,388	0,5284	0,6804	0,8503	1,0494	1,302	1,682	2,0181	2,4185	2,6981	2,963	3,5377	
43	0,1264	0,2549	0,3879	0,5283	0,6802	0,8501	1,0491	1,3016	1,6811	2,0167	2,4163	2,6951	2,9592	3,5316	
44	0,1264	0,2549	0,3878	0,5282	0,6801	0,8499	1,0488	1,3011	1,6802	2,0154	2,4141	2,6923	2,9555	3,5258	
45	0,1264	0,2549	0,3878	0,5281	0,68	0,8497	1,0485	1,3007	1,6794	2,0141	2,4121	2,6896	2,9521	3,5203	
46	0,1264	0,2548	0,3877	0,5281	0,6799	0,8495	1,0482	1,3002	1,6787	2,0129	2,4102	2,687	2,9488	3,5149	
47	0,1263	0,2548	0,3877	0,528	0,6797	0,8493	1,048	1,2998	1,6779	2,0117	2,4083	2,6846	2,9456	3,5099	
48	0,1263	0,2548	0,3876	0,5279	0,6796	0,8492	1,0478	1,2994	1,6772	2,0106	2,4066	2,6822	2,9426	3,505	
49	0,1263	0,2547	0,3876	0,5278	0,6795	0,849	1,0475	1,2991	1,6766	2,0096	2,4049	2,68	2,9397	3,5005	
50	0,1263	0,2547	0,3875	0,5278	0,6794	0,8489	1,0473	1,2987	1,6759	2,0086	2,4033	2,6778	2,937	3,496	
60	0,1262	0,2545	0,3872	0,5272	0,6786	0,8477	1,0455	1,2958	1,6706	2,0003	2,3901	2,6603	2,9146	3,4602	
70	0,1261	0,2543	0,3869	0,5268	0,678	0,8468	1,0442	1,2938	1,6669	1,9944	2,3808	2,6479	2,8987	3,435	
80	0,1261	0,2542	0,3867	0,5265	0,6776	0,8461	1,0432	1,2922	1,6641	1,9901	2,3739	2,6387	2,887	3,4164	
90	0,126	0,2541	0,3866	0,5263	0,6772	0,8456	1,0424	1,291	1,662	1,9867	2,3685	2,6316	2,8779	3,4019	
100	0,126	0,254	0,3864	0,5261	0,677	0,8452	1,0418	1,2901	1,6602	1,984	2,3642	2,6259	2,8707	3,3905	
110	0,126	0,254	0,3863	0,5259	0,6767	0,8449	1,0413	1,2893	1,6588	1,9818	2,3607	2,6213	2,8648	3,3811	
120	0,1259	0,2539	0,3862	0,5258	0,6765	0,8446	1,0409	1,2886	1,6576	1,9799	2,3578	2,6174	2,8599	3,3734	
130	0,1259	0,2539	0,3862	0,5257	0,6764	0,8444	1,0406	1,2881	1,6567	1,9784	2,3554	2,6142	2,8557	3,367	
140	0,1259	0,2538	0,3861	0,5256	0,6762	0,8442	1,0403	1,2876	1,6558	1,9771	2,3533	2,6114	2,8522	3,3613	
infini	0,1257	0,2533	0,3853	0,5244	0,6744	0,8416	1,0364	1,2816	1,6449	1,96	2,3264	2,5759	2,8072	3,2908	

## Résumé

Dans ces travaux nous proposons un système de mesure de micro-force par vision appliquée à une plateforme de micro-manipulation. L'évaluation des efforts d'interaction pendant une tâche de micro-manipulation est importante pour garantir la santé structurelle des composants manipulés et des outils de préhension et pour réaliser des tâches automatiques. La méthode de mesure de force consiste fondamentalement à déterminer la valeur de la déformation d'un objet d'intérêt qui dispose d'un comportement mécanique connu. Le comportement mécanique de la plateforme a été modélisé par une équation linéaire où la constante de proportionnalité correspond à la raideur de la partie déformable de celle-ci. Une technique de mesure de déplacement composée par une mire codée a été utilisé pour estimer les déformations. Cette technique dispose de stratégies qui permettent l'évaluation de positions avec une résolution subpixélique dans une plage de mesure plus large que le champ de vision de la caméra. Des essais ont été menés pour la validation de la méthode et ont montré que le système possède une résolution de  $10^{-5}$  N sur une plage de mesure de  $10^0$  N. Un étude concernant les incertitudes de mesures a été réalisé.

**Mots-clés :** capteur de force, vision artificielle, micro-manipulation, incertitude de mesure.

## Abstract

In this work, we propose a vision-based micro-force measurement system applied to a compliant micro-manipulation platform. Force measurement is important to ensure the structural health of the elements of a micro-manipulation and to allow the development of automated tasks. The method for force estimation basically consists in determining the deformation of an object of interest which has a known mechanical behavior. The behavior of the platform mechanical was modeled by a linear equation where the constant of proportionality is the stiffness of its deformable part. A displacement measuring system composed of a coded pattern was used to estimate the deformations. This system consists of strategies for evaluating positions with a sub-pixel resolution in a measuring range wider than the field of view of the camera. Experiments were conducted to validate the method and showed that the system has a resolution of  $10^{-5}$  N and a measuring range of  $10^0$  N. A study on the uncertainties of measurements was performed.

**Keywords :** force sensor, computer vision, micro-manipulation, uncertainty of measurement.