

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**École nationale polytechnique, Alger**



**Département : Génie Mécanique**  
**Laboratoire : Génie Mécanique et**  
**Développement**



# Thèse de Doctorat

**Spécialité : Génie Mécanique**

Présentée par :

**BOUALI Hichem**

## **Étude métrologique des erreurs de position de l'effecteur d'un robot miniature par un système vision-mire**

**Soutenue le 14/12/2023 devant le jury composé de :**

M. Saïd RECHAK	Professeur, ENP, Alger	Président
M. Mohamed BOUAZIZ	Professeur, ENP, Alger	Directeur de thèse
M. Jean-François FONTAINE	Professeur, UBFC, France	Codirecteur de thèse
M. Yacine BELCACEMI	MCA, ENP, Alger	Codirecteur de thèse
M. Mohamed TADJINE	Professeur, ENP, Alger	Examineur
M. Moussa HADDAD	Professeur, EMP, Alger	Examineur
M. Chawki MAHFOUDI	Professeur, Univ. Oum El Bouaghi	Examineur
M. Reda KARA	MCA, Univ. Médéa	Examineur

**ENP 2023**

---

Laboratoire de Génie Mécanique et Développement, École Nationale Polytechnique  
10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP.182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie

[www.enp.dz](http://www.enp.dz)



**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**École nationale polytechnique, Alger**



**Département : Génie Mécanique**  
**Laboratoire : Génie Mécanique et**  
**Développement**



# Thèse de Doctorat

**Spécialité : Génie Mécanique**

Présentée par :

**BOUALI Hichem**

## **Étude métrologique des erreurs de position de l'effecteur d'un robot miniature par un système vision-mire**

**Soutenue le 14/12/2023 devant le jury composé de :**

M. Saïd RECHAK	Professeur, ENP, Alger	Président
M. Mohamed BOUAZIZ	Professeur, ENP, Alger	Directeur de thèse
M. Jean-François FONTAINE	Professeur, UBFC, France	Codirecteur de thèse
M. Yacine BELCACEMI	MCA, ENP, Alger	Codirecteur de thèse
M. Mohamed TADJINE	Professeur, ENP, Alger	Examineur
M. Moussa HADDAD	Professeur, EMP, Alger	Examineur
M. Chawki MAHFOUDI	Professeur, Univ. Oum El Bouaghi	Examineur
M. Reda KARA	MCA, Univ. Médéa	Examineur

**ENP 2023**

---

Laboratoire de Génie Mécanique et Développement, École Nationale Polytechnique  
10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP.182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie

[www.enp.dz](http://www.enp.dz)

## **ملخص:**

تعتبر هذه الأطروحة مساهمة في دراسة وتطوير أجهزة القياس المجهرية والتي تعتبر أداة فعالة وضرورية تزودنا بالمعلومات والمعطيات التي تمكننا من التحكم في الروبوتات المجهرية. وقد قمنا بتقديم تفصيل عن الروبوتات المجهرية، أنواعها واستعمالاتها المختلفة كما قدمنا عرضا لبعض تقنيات القياس بالمساطر الدورية واخترنا من بينها تقنية القياس باستخدام نظام بصري مزود بمسطرة دورية مشفرة وأجرينا بعض التعديلات عليه حيث قمنا بتعويض المسطرة المصنعة بمساطر افتراضية يتم إسقاطها مباشرة على الجسم المراد دراسته. كما قمنا بإجراء دراسة ميتروولوجية مفصلة لنظام القياس وذلك باستخدام عدة طرق تمكننا من تحديد أهم الأسباب التي تؤثر في نتيجة القياس فاستعملنا بيان ايشيكاوا (النتيجة والأسباب) ، وركزنا في دراستنا على القاعدة المتحركة الحاملة للعينات بكونها أكثر الأجزاء المسببة للأخطاء . واعتمدنا في الأخير على معايرة الكاميرا ومعايرة النظام ككل لتصحيح الأخطاء وتداركها باستعمال معاملات التصحيح ومعادلات المعايرة.

**الكلمات المفتاحية:** نظام القياس ، المسطرة الدورية المشفرة، أخطاء القياس، المعايرة.

---

## **Abstract:**

This thesis is a contribution to the study and development of microscopic measurement systems, which are an effective tool for providing information for the control and manipulation of miniature robots. The techniques for measuring and controlling microrobots using periodic patterns are presented. In our study, we have chosen the one with a vision pattern system, to which we have made some modifications by replacing the manufactured pattern with virtual patterns projected directly on the object to be studied. The analysis of measurement errors in this system is studied using the Ishikawa method, which makes it possible to identify the main causes affecting the measurement result. The micropositioning plate, which is the main source of error, has also been studied. Calibration of the camera and measurement system is carried out to correct measurement errors by adjusting the calibration equations.

**Keywords:** measurement system, coded periodic pattern, measurement errors, calibration.

---

## **Résumé :**

Cette thèse est une contribution à l'étude et au développement des systèmes de mesures microscopiques qui sont un outil efficace pour fournir des informations permettant de contrôler et de manipuler les robots miniatures. Les techniques de mesure et de contrôle de microrobots par mires périodiques sont présentées. Dans notre étude, nous avons retenu celle par un système vision-mire à laquelle nous avons apporté quelques modifications en remplaçant la mire fabriquée par des mires virtuelles projetées directement sur l'objet à étudier. L'analyse des erreurs de mesure de ce système est étudiée en utilisant la méthode d'Ishikawa qui permet d'identifier les causes les plus importantes affectant le résultat de la mesure. La platine de micro-positionnement qui est considérée comme la plus grande source d'erreurs a été aussi étudiée. Le calibrage de la caméra et du système de mesures sont réalisés pour corriger les erreurs de mesures par l'ajustement des équations de calibrage.

**Mots clés :** système de mesures, mire périodique codée, erreurs de mesure, étalonnage.

# Dédicace

À Ma chère mère,

À Mon Cher père,

À Ma chère femme,

À mes enfants : Maram, Moussaab, Ishak,

À mes frères et sœurs,

À toute ma famille,

À tous mes amis,

Je dédie ce modeste travail

# Remerciements

Les travaux de recherche ont été réalisés au sein du laboratoire de génie Mécanique et Développement de l'École Nationale Polytechnique (ENP) en Algérie, en collaboration avec le Laboratoire de Institut universitaire de technologie de Dijon, antenne d'Auxerre (IUT) d'Université de Bourgogne Franche-Comté (UBFC), France et avec la contribution du Laboratoire d'Automatique et Systèmes Micro-mécatroniques (AS2M) de L'institut FEMTO-ST (Franche-Comté Électronique Mécanique Thermique et Optique - Sciences et Technologies), France.

Je tiens tout d'abord à exprimer mes vifs remerciements à mon directeur de thèse, Monsieur Mohamed BOUAZIZ, Professeur à l'École Nationale Polytechnique, Alger, pour m'avoir assuré l'encadrement dans ce domaine de recherche, pour sa confiance, sa disponibilité, sa passion pour la recherche et les nombreuses discussions que nous avons eues durant toute la période de préparation de cette thèse.

Je tiens également à exprimer ma profonde reconnaissance à mon codirecteur de thèse, Monsieur Jean-François FONTAINE, Professeur à l'université de Bourgogne, pour m'avoir accueilli au laboratoire à l'Institut Universitaire d'Auxerre, France, et pour tout ce qu'il m'a appris dans le domaine expérimental, la recherche scientifique et ses encouragements pendant tout mon séjour scientifique.

Je tiens aussi à exprimer mes vifs remerciements à mon codirecteur de thèse, Monsieur Yacine BELKACEMI, MCA à l'École Nationale Polytechnique, Alger, pour avoir accepté d'assurer la codirection après le départ à la retraite de mon directeur de thèse principal, pour son soutien et pour tous ses efforts afin d'aboutir ce travail à la soutenance.

Je remercie vivement les Professeurs Patrick SANDOZ et Guillaume J. LAURENT de m'avoir accueilli dans leur laboratoire d'Automatique et Systèmes Micro-mécatroniques (AS2M) à l'Institut FEMTO-ST (Franche-Comté Électronique Mécanique Thermique et Optique - Sciences et Technologies), France, pour effectuer un stage scientifique. Je tiens également à remercier Monsieur Antoine N. ANDRE, PHD, spécialiste en vision par ordinateur, pour les discussions fructueuses que nous avons eues au sein du même Laboratoire.

Aussi, je remercie sincèrement Monsieur François Hannebelle, Enseignant-Chercheur en Métrologie, Auxerre, Bourgogne-Franche-Comté, France pour les discussions fructueuses que nous avons eues au sein du laboratoire de l'institut universitaire d'Auxerre, France.

Je tiens aussi à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur Saïd RECHAK, Professeur à l'École Nationale Polytechnique, Alger, qui a bien voulu me faire l'honneur de présider le jury de soutenance.

Mes sincères remerciements s'adressent également aux membres examinateurs, Monsieur Mohamed TADJINE, Professeur à l'École Nationale Polytechnique, Alger, Monsieur Moussa HADDAD, Professeur à l'École Militaire Polytechnique, Alger, Monsieur Chawki MAHFOUDI, Professeur à l'université d'Oum El Bouaghi et Monsieur Reda KARA, MCA à l'université de Médéa, d'avoir bien voulu expertiser ma thèse et accepter de faire partie du jury de soutenance.

Un grand merci aux personnes qui ont contribué de près ou de loin à mon séjour à Auxerre et à Besançon en France.

Finalement, mes remerciements s'adressent au conseil scientifique de l'université d'Abbas LAGHROUR, Khenchela et au ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifiques d'Algérie pour m'avoir accordé une bourse d'études dans le cadre du Programme National Exceptionnel (P.N.E).

# Table des matières

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Liste des abréviations	
Introduction générale .....	17
Chapitre I : Les robots miniatures .....	20
I.1 Introduction .....	21
I.2 Échelle de miniaturisation .....	21
I.3 Spécifications et enjeux de la miniaturisation .....	23
I.4 Les applications des robots miniatures.....	26
I.4.1 Applications microrobotique aux domaines de transport et d'automobile .....	26
I.4.2 Applications microrobotiques en biomédical.....	27
I.5 Classification des microsystèmes .....	29
I.5.1 Micro-capteurs et actionneurs .....	29
I.5.2 Microsystèmes Magnétiques.....	29
I.5.3 Les systèmes micro-électromécaniques radiofréquences (MEMS RF).....	29
I.5.4 Les systèmes micro-électromécaniques biomédicaux (Bio MEMS).....	30
I.5.5 Microsystèmes d'analyse totale ( $\mu$ TAS).....	30
I.5.6 Microsystème Opto Électromécaniques (MOEMS). .....	30
I.5.7 La micro-fluidique .....	31
I.6 Les effecteurs des robots miniatures .....	31
I.7 Les micros-mires de mesure de position.....	35
I.8 Procédure de fabrication des mires .....	39
I.9 Conclusion .....	41
Chapitre II : Technique de mesure de position par un SMVM.....	42
II.1 Introduction .....	43
II.2 Présentation de la méthode de mesure par SMVM.....	44
II.2.1 Dispositifs de mesure par SMVM.....	45
II.2.2 Algorithme générale de traitement et de calcul de position .....	47
II.3 Génération d'une carte périodique .....	48
II.3.1 Frange spatiale et signal numérique .....	48
II.3.2 Le codage d'une carte périodique .....	50
II.4 Mesure de la position absolue par une MPC.....	52
II.5 Mesure de la position relative par une MP.....	56

II.5.1	La transformée de Fourier d'un signal unidimensionnel .....	56
II.6	Mesure de la rotation d'une mire périodique.....	59
II.7	Projection des MPC dans un système de vision (SV).....	60
II.8	L'interface de mesure par MPP :.....	62
II.9	Conclusion.....	63
Chapitre III :	Étude métrologique des erreurs de mesure par un SMVM .....	64
III.1	Introduction .....	65
III.2	L'erreur et l'incertitude de mesure .....	65
III.3	Présentation de la méthode d'Ichikawa.....	67
III.4	Inventaire des sources d'incertitudes .....	69
III.4.1	Erreurs et incertitudes dues au milieu.....	70
III.4.2	Erreurs et incertitudes dues aux méthodes .....	71
III.4.3	Erreurs et incertitudes dues aux mains d'œuvres .....	72
III.4.4	Erreurs et incertitudes dues à la matière .....	73
III.4.5	Erreurs et incertitudes dues aux matériels .....	73
III.4.6	Inventaire récapitulatif.....	75
III.5	La méthode d'estimation du type A des incertitudes .....	75
III.6	La méthode d'estimation du type B des incertitudes .....	76
III.6.1	Estimation type B des incertitudes dues aux caractéristiques de la mire .....	77
III.7	Conclusion.....	78
Chapitre IV :	Erreurs et incertitudes liées à la platine de micro-positionnement.....	79
IV.1	Introduction .....	80
IV.1.1	Les différents types des platines.....	80
IV.2	États de l'art sur les platines .....	81
IV.3	Les causes des erreurs de positionnement par une platine .....	86
IV.4	Étude d'une platine en AMF .....	86
IV.4.1	Conception et principe de fonctionnement.....	87
IV.4.2	Simulation de contrôle d'une barre en AMF .....	89
IV.4.3	Simulation de modèle dynamique de la platine.....	91
IV.4.4	Simulation de la transformation de chaleur dans la barre.....	94
IV.4.5	Simulation de la loi constitutive de comportement des AMF .....	96
IV.4.6	Résultats et erreurs d'une platine en AMF .....	97
IV.5	Conclusion.....	100
Chapitre V :	Erreurs et incertitudes liées à l'étalonnage. ....	101
V.1	Introduction .....	102
V.2	Incertitudes liées à l'étalonnage du système de vision.....	102

V.2.1	Projection d'un objet dans une image .....	102
V.2.2	Transformation géométrique d'un système de vision .....	103
V.2.3	Les étapes d'étalonnage d'une caméra .....	107
V.2.4	Résultats de l'étalonnage de la caméra .....	107
V.3	Incertitudes liées à l'étalonnage du système de mesures .....	110
V.3.1	Règle de vérification des positions de références .....	110
V.3.2	Procédure de l'étalonnage de la méthode de mesure par SMVM.....	111
V.3.3	Courbe et paramètres d'étalonnage .....	112
V.3.4	Résultats d'étalonnage de SMVM.....	115
V.4	Récapitulation générale .....	121
V.5	Conclusion et perspectives.....	123
Les Annexes	.....	125
Annexe A	: Technique de suivis et de mesure de la trajectoire d'un effecteur par SMVM. ...	126
Annexe B	: diagramme d'Ichikawa des facteurs d'influences sur un SMVM.....	127
Bibliographies	.....	128
Sites Internet	.....	134

# Liste des figures

Figure I.1 : Ordres de taille de certains objets physiques par rapport aux objets naturels .....	22
Figure I.2 : Nano hélice pour les fluides biologique .....	22
Figure I.3 : Microrobot à quatre pattes.....	23
Figure I.4 : Assemblage des composantes d'une structure complexe d'une MEMS .....	24
Figure I.5: Alignement et assemblage des micros-antennes en systèmes avancés des satellites .	25
Figure I.6 : Manipulation des micro-objets par force électrostatique .....	25
Figure I.7 : Différentes applications microrobotiques en biomédical.....	27
Figure I.8 : Classification des microsystèmes.....	29
Figure I.9 : microscope confocal endoscopique laser à balayage avec des micro-miroirs .....	31
Figure I.10 : les composantes d'actionnement et du capteur liées à une micro pince FT-G100....	32
Figure I.11 : Les micro-effecteurs en silicone.....	33
Figure I.12 : Manipulation des grains par des micro-effecteurs. ....	33
Figure I.13 : Les effecteurs en composite pliée. ....	34
Figure I.14 : schéma de fonctionnement d'un préhenseur à glace. ....	34
Figure I.15 : Deux micro modèles périodiques de Vernier avec des périodes légèrement différentes .....	35
Figure I.16 : Fabrication et utilisation des MPC en biologie. ....	36
Figure I.17 : Capteur de position miniature des micro-marqueurs imprimés. ....	36
Figure I.18 : Caractérisation d'une cellule par un capteur de déformation menu d'une mire qui se base sur l'interférence des franges de Moiré. ....	37
Figure I.19 : Micro-modèles périodiques servant à mesurer des micro-déplacements linéaire...	37
Figure I.20 : Les micro-capteurs de force.....	38
Figure I.21 : Deux mires "QR-Code" utilisées pour assembler deux micro-objets situés sur deux plans différents. ....	38
Figure I.22 : Les mires périodiques bidimensionnelles. ....	39
Figure I.23 : Étapes de fabrication des mires par photolithographie en salle blanche.....	40
Figure II.1 : Définition de la position P (x, y, $\theta$ ) d'une zone ( $\psi$ ) de taille ( $u \times v$ ) observée au microscope par rapport à la surface codée ( $\Sigma$ ) de taille ( $U \times V$ ). ....	44
Figure II.2 : Dispositif expérimental de mesure de position par SMVM .....	45
Figure II.3 : Montage de mesure par SMVM et une MPC fixée sur un goniomètre.....	46
Figure II.4 : système de mesures par MPP (Mires périodiques projetées).....	47

Figure II.5 : Processus de détermination des coordonnées x et y du centre de caméra à partir de l'image d'une mire.....	47
Figure II.6 : Mire périodique unidimensionnelle. ....	49
Figure II.7 : Mire bidimensionnelle avec ou sans rotation.....	50
Figure II.8 : Génération des MPC bidirectionnelle.....	51
Figure II.9 : Principe de changement de code avec le mouvement de la séquence codée. ....	51
Figure II.10 : Processus de codage d'une position sous forme d'un signal.....	52
Figure II.11 : Processus de détermination de la position absolue par le traitement d'une image d'une mire codée.....	54
Figure II.12 : Processus générale de détermination de la position finale (absolue et relative) par le traitement d'images d'une mire codée. ....	55
Figure II.13 : Mire périodique en domaine fréquentiel. ....	57
Figure II.14 : Mouvement d'un point M sur un réseau périodique unidirectionnel.....	57
Figure II.15 : Comparaison entre la phase roulé et déroulé de deux signaux décalés entre eux par un déphasage $\delta\Phi$ . ....	58
Figure II.16 : Rotation des MP en espace spatial et fréquentiel.....	59
Figure II.17 : spectre modulaire des franges en rotation par un angle de $\theta=\pi/8$ . ....	60
Figure II.18 : détail de la technique de mesure par projection des mires périodiques. ....	61
Figure II.19 : Détail de la chaîne de mesure et de ses composantes. ....	62
Figure II.20 : Interface de mesure par projection des mires périodiques.....	63
Figure III.1 : Relation entre les erreurs et l'incertitude de mesure. ....	66
Figure III.2 : Diagramme cause-effet d'Ishikawa .....	68
Figure III.3 : Diagramme simplifié d'Ishikawa des causes des erreurs de mesure par SMVM.....	69
Figure III.4 : Facteurs d'influence de l'environnement sur la mesure de position par SMVM .....	70
Figure III.5 : Facteurs d'influences des méthodes sur la mesure de position par SMVM. ....	71
Figure III.6 : Facteurs d'influence des manipulateurs sur la mesure de position par SMVM .....	72
Figure III.7 : Facteurs d'influence de la matière sur la mesure de position par SMVM.....	73
Figure III.8 : Facteurs d'influence des matériels sur la mesure de position par SMVM. ....	74
Figure III.9 : Erreur de positionnement de la mire par rapport à la caméra.....	74
Figure IV.1 : Une illustration schématique d'une platine d'un système goniométrique.....	82
Figure IV.2: Table panoramique linéaire sur l'axe XY avec plate-forme rotative .....	82
Figure IV.3 : Platine micrométrique en PZTs.....	83
Figure IV.4 : Platine à 3 DDL sous forme d'un robot parallèle continu .....	84

Figure IV.5 : Mécanisme d'un mouvement rotatif avec deux câbles d'AMF.....	84
Figure IV.6 : Plateforme de détection de force.....	85
Figure IV.7 : Configuration d'une platine à la base l'allongement de quartes barres et l'allongement d'une corde en AMF. ....	87
Figure IV.8 : Commande et contrôle d'une platine en AMF.....	88
Figure IV.9 : Bloc de control d'un matériau en AMF par un courant électrique. ....	89
Figure IV.10 : Bloc générale de principe de commande d'une barre en AMF par une commande thermique et électrique (blocs sous MATLAB/Simulink). ....	91
Figure IV.11 : Principe de fonctionnement d'un mécanisme en mouvement de rotation et de translation à la base des déformations des barres en AMF.....	92
Figure IV.12 : Simulation de modèle dynamique de translation sous MATLAB/Simulink.....	93
Figure IV.13 : Simulation de modèle dynamique de rotation sous MATLAB/Simulink. ....	94
Figure IV.14 : Simulation des deux phases de transformation sous MATLAB/Simulink.....	96
Figure IV.15 : Simulation de modèle constitutif sous MATLAB/Simulink.....	97
Figure IV.16 : Variation de potentiel électrique en fonction du temps pour les différentes longueurs de la barre en AMF. ....	98
Figure IV.17 : Variation de la dilatation des barres d'AMF en cas de chauffage.....	99
Figure IV.18 : Variation de la dilatation des barres d'AMF en cas de refroidissement.....	99
Figure V.1 : Projection des points en système des coordonnées mondiale 3D vers des points en système de coordonnées image 2D. ....	103
Figure V.2 : Décomposition de la transformation objet / image. ....	103
Figure V.3 : Les transformations de passage d'un espace Objet 3D vers un espace image 2D.	104
Figure V.4 : Interface de calibration de caméra sous Matlab.....	108
Figure V.5 : Erreur de translation de l'image dans les deux sens.....	108
Figure V.6 : Erreur de rotation de l'image autour des trois axes.....	109
Figure V.7 : Erreur moyenne de la projection des images. ....	109
Figure V.8 : Règle microscopique de calibrage en trois dimensions X, Y et $\theta$ .....	110
Figure V.9 : Processus d'étalonnage de la méthode de mesure par SMVM.....	111
Figure V.10 : Courbe d'étalonnage avec ajustement par un modèle linéaire. ....	115
Figure V.11 : Rapport de prédiction et de régression linéaire de la phase relative avec le déplacement relatif mesuré.....	116
Figure V.12 : Distribution des résidus d'ajustement en moindres carrées des déplacements relatifs de l'effecteur.....	117

Figure V.13 : Trajectoire parcourue par l'effecteur durant un essai d'étalonnage. ....	118
Figure V.14 : Distribution des résidus d'ajustement en moindres carrées des déplacements absolus de l'effecteur.....	119
Figure V.15 : Distribution des résidus d'ajustement en moindres carrées des rotations de l'effecteur.....	120

# Liste des tableaux

Tableau III.1 : L'incertitude obtenue avec les différentes longueurs de la période .....	77
Tableau III.2 : L'incertitude obtenue avec les différentes tailles de l'image .....	78
Tableau IV.1: Principe d'obtention d'un déplacement désiré en fonction des barres excitées.....	88
Tableau IV.2 : description et valeurs des paramètres de simulation.....	90
Tableau V.1 : Plan d'essai d'étalonnage d'un système de mesures. ....	113
Tableau V.2 : Les points de références pour l'étalonnage de la position relative par SMVM.....	115
Tableau V.3 : Les points de références pour l'étalonnage de la position absolue par SMVM.....	118
Tableau V.4 : récapitulation des résultats des estimations des incertitudes de SMVM.....	121

# Nomenclature

<i>Symbole</i>	<i>Désignation</i>	<i>Unité</i>
$A(x)$	Signal spatial	/
$A_0$	L'amplitude du signal spatial	/
$x$	La variable spatiale	m
$f_H$ et $f_v$	La fréquence	1/m
$\varphi$	La phase	rad
$I_H(u, v)$	L'intensité lumineuse des franges	Cd (candela)
$P_x$ et $P_y$	Les deux périodes suivant x et y	Pixel , m
$\Delta\varphi_V$ et $\Delta\varphi_H$	Déphasage d'un signal dans le sens vertical et horizontal	rad
$\delta_x$ et $\delta_y$	Sont les déplacements dans les deux sens	m, pixel
$k_x$ et $k_y$	Ordre des périodes correspondantes au centre de l'image.	/
$\phi_x$ et $\phi_y$	Les deux phases relatives	rad
$\Phi_x$ et $\Phi_y$	phases absolues	rad
$\mathcal{F}()$	Transformation de Fourier	/
$M$ et $N$	Nombre des périodes suivant x et y	/
$x_i$	Une estimation d'une grandeur d'entrée $X_i$	/
$X_i$	Une grandeur d'entrée	/
$Y_i$	Une grandeur de sortie	/
$\bar{x}$	Moyenne des estimations $x_i$	/
$u^2(x_i)$	La variance estimée associée	/
$e_i$	Les résidus des moindres carrés	/
$s_y^2$	La variance résiduelle	/
$\hat{Y}_i$ et $\hat{X}_i$	Les valeurs prévues par le modèle	/
$(X_i, Y_i)$	La série des mesures	/
$m$	La masse par unité de longueur	$kg/m^3$

<i>Symbole</i>	<i>Désignation</i>	<i>Unité</i>
$A$	Section de profil	$m^2$
$l_0$	Longueur initiale	$m$
$\varepsilon_0$	Déformation initiale	%
$\sigma_0$	Contrainte initiale	$Mpa$
$\xi_m$	Fraction volumique initial de la martensite	/
$E_a$	Module de Young d'austénite	$Gpa$
$E_m$	Module de Young de martensite	$Gpa$
$A_s$	Température initiale d'austénite	$^{\circ}C$
$A_f$	Température finale d'austénite	$^{\circ}C$
$M_s$	Température initiale de la martensite	$^{\circ}C$
$M_f$	Température finale de la martensite	$^{\circ}C$
$\theta_t$	Facteur de dilatation thermique	$1/k$
$c_p$	Chaleur spécifique	$J/Kg.^{\circ}C$
$R$	Résistance électrique par unité de longueur	$\Omega.m$
$T_a$	Température ambiante	$^{\circ}C$
$h_0$	Coefficient de convection thermique	$W/m^2.^{\circ}C$
$h_2$	Coefficient de convection thermique 2 <sup>e</sup> ordre	$W/m^2.^{\circ}C$
$k$	Rigidité du ressort	$N/m$
$l_{0r}$	Longueur initiale du ressort	$m$
$P_M(X_m, Y_m, Z_m)$	Un point dans le repère objet (mondial)	$m$
$P_c(X_c, Y_c, Z_c)$	C'est la projection d'un point dans le repère caméra	$m$
$P_u(u, v)$	Un point dans une image	$pixel$
$P_d(x_d, y_d)$	Point dans une image distordue	$pixel$
$T(t_x, t_y, t_z)$	Translations spatiales	$pixel$
$\delta_x$ et $\delta_y$	Distorsions autour de x et y	$rad$
$u_0$ et $v_0$	Coordonnées de centre optique	$pixel$
$f$	Distance focale	$m$

# Liste des abréviations

Abréviation	Désignation
MP	Mire Périodique
MPC	Mire Périodique Codée
MPP	Mire Périodique Projetée
SV	Système de Vision
SM	Système de Mesure
SMVM	Système de Mesure Vision-Mire
VIM	Vocabulaire international de métrologie
MEMS	Système Micro-électromécanique
BioMEMS	Systèmes Biomédicaux Micro-électromécaniques
MEMS-RF	Systèmes Micro-électromécaniques Radiofréquences
MOEMS	Microsystème Opto électromécanique
$\mu$ TAS	Microsystème d'analyse totale
AMF	Alliage à mémoire de forme
MEB	Microscope Électronique à Balayage
LFSR	Registre de décalage à rétroaction linéaire
TF	Transformation de Fourier
TFD	Transformation de Fourier discrète

# Introduction générale

La micro-mesure est une discipline apparue avec la microrobotique et progresse avec lui de jour à un autre. La miniaturisation des robots et des systèmes nécessite une miniaturisation des capteurs, en particulier des capteurs de position.

L'automatisation des microsystèmes repose sur deux piliers fondamentaux : la mesure et l'asservissement. Tous les deux dépendent de la technique des capteurs. Cependant, si les méthodes de mesure et l'asservissement des systèmes sont appliqués aisément en monde macroscopique, elles sont en gênant au niveau du monde microscopique en raison de la distinction intrinsèque entre les deux mondes, surtout, du côté des phénomènes physiques qui contrôlent chaque monde et la différence importante entre les facteurs d'échelle (rapport plage/résolution) des deux.

Le dimensionnement et le positionnement des micro-effecteurs et micro-objets dans le champ de travail sont très importants pour l'asservissement de ces effecteurs, afin d'achever les interventions désirées. Le problème que ce positionnement nécessite une surveillance visuelle au temps réel surtout sans contact pour éviter l'encombrement autour de champ de travail et pour éviter ainsi les interactions indésirables entre le capteur et l'objet surveillé. Ce type de capteur doit effectuer des mesures à haute précision sur une plage étendue.

D'autre part, il est essentiel de choisir soigneusement le motif utilisé pour qualifier ce système, afin de pouvoir réaliser des mesures multidimensionnelles précises avec différents degrés de liberté. On distingue parmi les mires utilisées par certains auteurs, les mires périodiques avec un simple motif qui servent à mesurer des déplacements sur une plage qui ne dépasse pas la longueur d'une période. C'est ainsi que se trouvent les mires périodiques codées qui permettent de mesurer les déplacements sur des plages plus étendues.

La méthode de mesure par des micro-mires périodiques fait l'objet de nombreuses publications scientifiques [1], [2], [3], [4]. C'est l'une des méthodes fortement conseillées pour les micro-applications. Ces mires sont considérées comme un bon choix pour notre étude, mais leur fabrication est trop coûteuse par rapport à leur utilisation, car elle nécessite une procédure technologique spéciale en salle blanche, ce qui nous rend liés par cette mire et restant incapables de modifier ses propriétés ou ses dimensions pour s'adapter à de multiples usages. Pour cela, on a proposé une nouvelle technique qui se base sur la génération et la projection des mires virtuelles sur le champ de travail ou lieu de les fabriquer. Cette technique permet le changement et le contrôle des mires virtuelles aisément par un algorithme spécial. Notre travail consiste à affirmer et évaluer la performance, la capacité et l'efficacité de cette technique.

En addition, nous avons choisi d'utiliser la caméra comme un capteur de position, qui, installé sur un microscope optique, qui surveille une mire fixée sur sa platine, ainsi que l'unité de traitement et l'écran d'affichage, constitue ce qu'il appelle le système de mesures mire-vision.

Le problème majeur réside dans le traitement des erreurs qui ont un impact sur la chaîne de mesure, et donc sur le résultat de mesure. Pour répondre à cette question, il est nécessaire d'étudier en détail la chaîne de mesure, qui comprend plusieurs sous-systèmes, capteurs, actionneurs et autres éléments secondaires.

Chaque composante est affectée par un ou plusieurs facteurs qui perturbent le résultat de mesure, que ce soit de manière directe ou indirecte. C'est pourquoi une étude métrologique est nécessaire pour déterminer et estimer les erreurs les plus influentes, ainsi que leurs sources probables et leurs types. Alors, il est utile de poser la question sur la bonne démarche pour réussir une telle étude métrologique performante exhaustive pour tous les aspects de notre problème. Le détail de la chaîne de mesure est l'une des étapes principales d'une étude métrologique réussie, elle consiste à déterminer les différentes composantes de notre processus de mesure et de définir également les relations entre eux, c'est ce à quoi nous avons essayé de répondre dans notre thèse. Cependant, le processus d'inventaire reste le point le plus complexe de toute étude, car il ne dépend pas d'une procédure mathématique stricte et précise, mais dépend plutôt principalement d'hypothèses et de spéculations humaines qui peuvent être soumises au mieux à des méthodes statistiques. On a appuyé sur deux procédures de base et complémentaires pour résoudre ce problème, à savoir, la méthode d'Ishikawa pour déterminer la relation entre le résultat et les causes, et la seconde procédure, qui est la méthode du remue-méninge pour déterminer les causes les plus influentes parmi toutes les causes qui ont été inventoriées par la méthode Ishikawa.

Après s'être appuyés sur les techniques précédentes d'Ishikawa et remue-méninge, pour déterminer les causes des erreurs qui affectent de plus le résultat de la mesure. il est nécessaire de déterminer l'ampleur de l'influence et sa valeur quantitative. Certains de ces causes nécessitent des études directes basées sur des méthodes expérimentales et statistiques car ils diffèrent par leur nature, leur degré de complexité et leur impact. tandis que d'autres dépendent de la littérature antérieure et des commentaires et résultats qu'elle contient, ou en fonction de ce que les fabricants fournissent dans les fiches techniques ou certificats d'étalonnage. Nous avons donc adopté la méthode de calcul des incertitudes du type A et B pour chacune de ces causes.

L'étude que nous avons exécutée se déroule dans le cadre général des travaux de recherche sur la microrobotique par l'équipe de recherche du laboratoire de Génie Mécanique et Développement de l'École Nationale Polytechnique (ENP) en Algérie, en collaboration avec le laboratoire de l'institut universitaire de technologie de Dijon, antenne d'Auxerre (IUT) d'Université de Bourgogne, en France et avec la contribution du laboratoire d'Automatique et Systèmes Micro-mécatroniques (AS2M) de L'institut FEMTO-ST en France.

La thèse est organisée en cinq chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons étudié la miniaturisation des robots et comment elle est importante pour les industries contemporaines. Nous avons également discuté des obstacles rencontrés lors du développement de cette technologie et des méthodes pour les surmonter.

Le deuxième chapitre commence avec une présentation de la méthode de mesure de position à l'aide d'un système vision-mire. Le dispositif expérimental utilisé est décrit en détail. De plus, une interface de mesure, créée en Matlab, est présentée pour effectuer des mesures directes sur les images des micro-objets.

Dans le troisième chapitre, une étude métrologique examine les facteurs qui affectent les résultats de mesure dans le but d'améliorer les performances et la qualité de mesure à l'aide d'un système de mesures vision-mires.

L'étude de l'influence de la platine de positionnement sur les résultats de mesure et une simulation d'une platine en alliages à mémoire de forme sont abordées dans le quatrième chapitre. Le processus d'étalonnage du système de mesures vision-mire, qui est un système de mesure complexe composé de plusieurs sous-systèmes (vision, positionnement, projection et unité de traitement), a été abordé dans le cinquième chapitre.

# **Chapitre I : Les robots miniatures**

## I.1 Introduction

La micro-robotique s'intéresse essentiellement à l'étude et la réalisation des robots miniatures qui sont de petite dimension. En outre, elle étudie les mouvements et les gestes micrométriques. La première difficulté rencontrée dans le passage entre le domaine macroscopique et microscopique, c'est le changement des lois et des phénomènes physiques dominants sur la matière et sur les mécanismes. L'approche robotique sera changée d'un monde micro de petite échelle à un autre monde macro de grande échelle, et de nombreux changements et considérations doivent être pris en compte.

La miniaturisation des robots et des objets induit ainsi un accroissement important de l'impact et d'influence de la plupart des perturbations. On distingue donc à cette échelle les perturbations thermiques, mécaniques, électriques, magnétiques ou d'autres. Ces perturbations impactent directement la précision requise et la performance des microsystèmes.

Valerian et al. [5] ont traité un autre problème imposé par la réduction d'échelle, c'est l'augmentation du rapport entre la plage de mesure et la précision requise qui doit être nanométrique pour des plages millimétriques (un rapport de  $10^6$ ). Donc, il est essentiel d'évaluer et d'étudier l'environnement et l'entourage dans lequel se trouve le micro-robot étudié. D'autre part, le choix des capteurs et des actionneurs appropriés de cet environnement nécessite une bonne connaissance de celle-ci en termes de technologie et de caractéristiques spécifiques, tel que : la haute résolution, la rapidité, la stabilité ou la sensibilité, etc. De surcroît, le nombre de degrés de liberté et l'encombrement des dispositifs autour du système à étudier jouent un rôle important dans le choix de ces capteurs et de ces actionneurs.

Enfin, le choix des méthodes et des techniques d'actionnement et de mesure des microsystèmes est un facteur intéressant dans la détermination et l'optimisation de la performance des systèmes miniatures.

## I.2 Échelle de miniaturisation

La microrobotique est un nouveau domaine, né d'une combinaison entre les microsystèmes et la robotique. C'est le domaine scientifique étudie la conception de dispositifs robotiques dont les dimensions varient du micromètre au millimètre. D'autre part, les microsystèmes sont définis comme des dispositifs multifonctionnels miniaturisés intelligents, qui associent des éléments mécaniques, optiques, électromagnétiques, thermiques et fluidiques à de l'électronique »[6].

La fabrication des microsystèmes ou des microrobots est basée essentiellement sur le progrès de la technologie de miniaturisation qui approche lentement vers l'échelle nanométrique. La Figure I.1 présente l'ordre de taille de quelques objets fabriqués par rapport aux objets naturels.

Pour approcher la compréhension, un nanomètre correspond à un millionième de centimètre (5000 fois plus petit qu'une cellule), alors qu'un atome est de taille de 0.1 à 0.5 nm, un transistor mesure entre 10 et 100 nm et un nanotube de carbone mesure quelques nanomètres.

Taille caractéristique		Objets physiques
1 mm	$10^{-3}$ m	Cheveu (10 à 50 $\mu\text{m}$ )
100 $\mu\text{m}$	$10^{-4}$ m	
10 $\mu\text{m}$	$10^{-5}$ m	Cellules (2 à 5 $\mu\text{m}$ )
1 $\mu\text{m}$	$10^{-6}$ m	Circuits intégrés
100 nm	$10^{-7}$ m	Transistors, virus, nanofils, nanoplots
10 nm	$10^{-8}$ m	Diamètre ADN, Nanotubes de carbone
1 nm	$10^{-9}$ m	Agrégats et molécules
0,1 nm	$10^{-10}$ m	Atome

Figure I.1 : Ordres de taille de certains objets physiques par rapport aux objets naturels [7].

Le défi pour les scientifiques est de passer le seuil du micromètre pour fabriquer des nanorobots. Malgré le succès impressionnant dans la fabrication de certains nano-objets tels que les nano-spirales [7], les nanotubes [8] et les nano-agrégats [9]. La fabrication d'un nanorobot au sens scientifique du robots reste seulement jusqu'au moment dans le cadre des tentatives et des rêves lointains.

Le plus grand succès obtenu à ce jour est la fabrication d'une nano-hélice contrôlé à distance par un champ magnétique (Figure I.2).

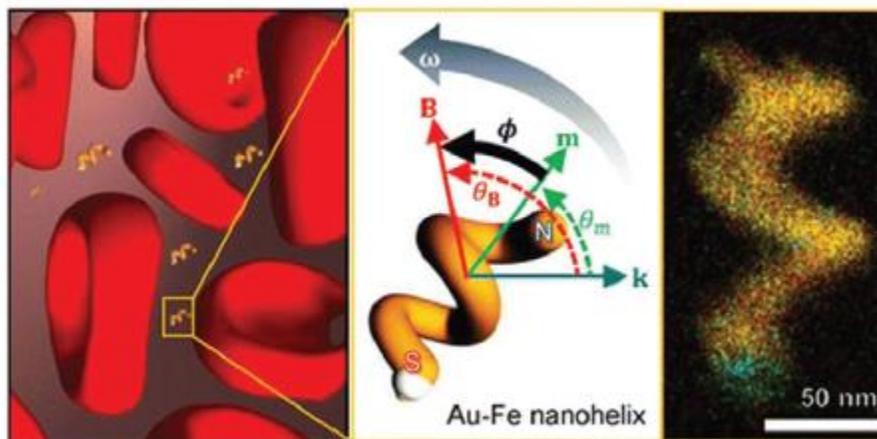


Figure I.2 : Nano hélice pour les fluides biologique [10].

Quant à l'échelle micrométrique, les scientifiques sont passés l'étape de la fabrication des micro-objets à l'étape des microrobots télécommandés.

M. Z. MISKIN et autres [11], au laboratoire de l'université Cornell en États-Unis ont réussi de produire massivement des microrobots mobiles. Ils sont assez petits pour être injectés. Chaque microrobot mesure environ  $40 \times 50 \times 5 \mu\text{m}$ . Il est équipé par des cellules solaires sur le dos et de quatre petites pattes (Figure I.3). En outre, ces microrobots sont équipés par des actionneurs électrochimiques, qui répondent aux contrôles à distance. Le principe de fonctionnement effectué par l'excitation d'une cellule solaire à l'aide d'un faisceau laser pour actionner la patte correspondante.

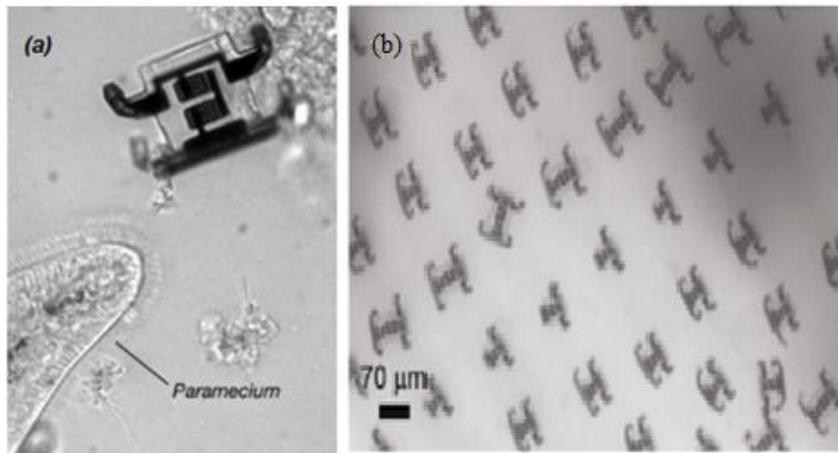


Figure I.3 : Microrobot à quatre pattes [11].

- (a) Comparaison de taille de microrobot avec la bactérie (paramécie).
- (b) Des microrobots injectés par seringue.

### I.3 Spécifications et enjeux de la miniaturisation

La miniaturisation est le processus consistant à réduire la taille des composants d'un système électronique ou mécanique. Les enjeux de la miniaturisation sont multiples et peuvent varier en fonction du contexte spécifique dans lequel elle est utilisée. Cependant, voici quelques-uns des enjeux les plus courants de la miniaturisation :

- Gain de place : L'un des avantages les plus évidents de la miniaturisation est le gain de place. En réduisant la taille des composants, les fabricants peuvent créer des produits plus compacts, plus portables et plus faciles à transporter.
- Réduction des coûts : La miniaturisation peut également contribuer à réduire les coûts de fabrication et de production en permettant l'utilisation de moins de matériaux, ce qui peut réduire les coûts de production globaux.
- Augmentation des performances : En réduisant la taille des composants, les fabricants peuvent également augmenter la densité des composants, ce qui peut améliorer les performances des produits électroniques et mécaniques.

- Amélioration de l'efficacité énergétique : La miniaturisation peut également contribuer à améliorer l'efficacité énergétique en permettant la conception de produits qui nécessitent moins d'énergie pour fonctionner.
- Nouvelles applications : La miniaturisation a ouvert la voie à de nouvelles applications, notamment dans les domaines de la médecine, de la biologie et de l'environnement. Des capteurs miniaturisés peuvent être utilisés pour surveiller les signes vitaux des patients, pour analyser l'eau et l'air, ou pour suivre les mouvements des animaux.
- Avancées technologiques : La miniaturisation est également un catalyseur pour les avancées technologiques. Elle a permis le développement de nombreuses technologies telles que les ordinateurs portables, les smartphones, les drones et les capteurs IoT (Internet of Things).

Les problématiques industrielles et scientifiques liées aux objets et systèmes miniatures ont beaucoup évolué. Elles concernent plusieurs domaines variés tels que les microsystèmes, la mécanique, l'espace, la chirurgie, la biologie, la robotique l'instrumentation ou la télécommunication. Beaucoup de ces disciplines portent sur la maîtrise du micromonde, c'est-à-dire le monde des objets dont les dimensions vont de quelques micromètres à un millimètre.

De nombreuses particularités et difficultés liées à cette échelle dimensionnelle entraînent une méconnaissance importante de leur comportement ou de leurs propriétés. Il en va de même, pour l'étude de ces objets, qu'ils soient biologiques ou artificiels est un premier grand objectif. Selon leur échelle dimensionnelle, les scientifiques mènent de nombreux moyens de caractérisation pour étudier leurs propriétés, leurs mouvements, leur réponse à diverses sollicitations, la possibilité de les déplacer et de les manipuler, etc.

L'assemblage et l'alignement des microcomposants au niveau des microstructures (Figure I.4) sont des défis techniques importants dans la fabrication de dispositifs électroniques et microélectroniques, et nécessitent souvent des techniques de mesure de précision pour garantir leur fiabilité et leur performance optimale.

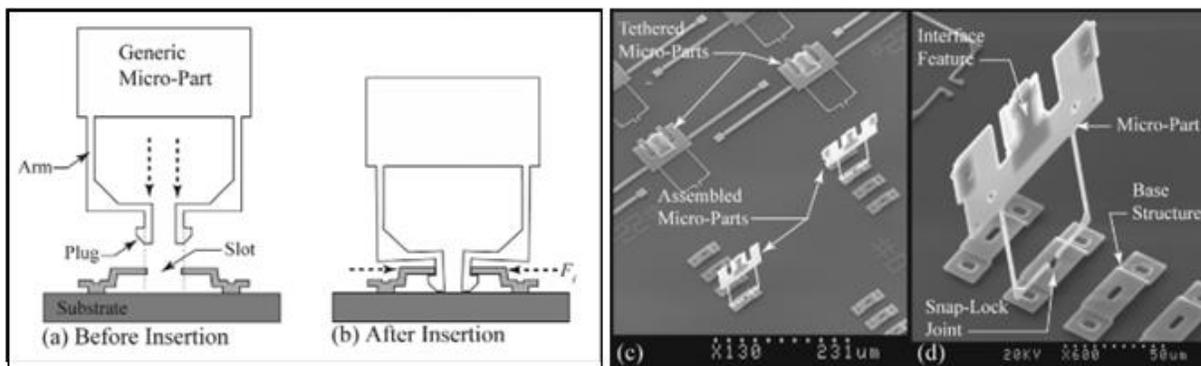


Figure I.4 : Assemblage des composantes d'une structure complexe d'une MEMS [12].  
 (a) et (b) : Insertion d'un élément à son emplacement dans une microstructure  
 (c) : Image sur une partie d'une microstructure complexe  
 (d) : Zoom d'un élément après assemblage

L'alignement précis des microcomposants est particulièrement critique car les erreurs peuvent entraîner des dysfonctionnements du circuit ou une défaillance complète du dispositif (Figure I.5). Les méthodes de mesure optique, telles que la microscopie électronique à balayage (MEB) et la microscopie à force atomique (AFM), sont souvent utilisées pour vérifier l'alignement et la position des microcomposants.

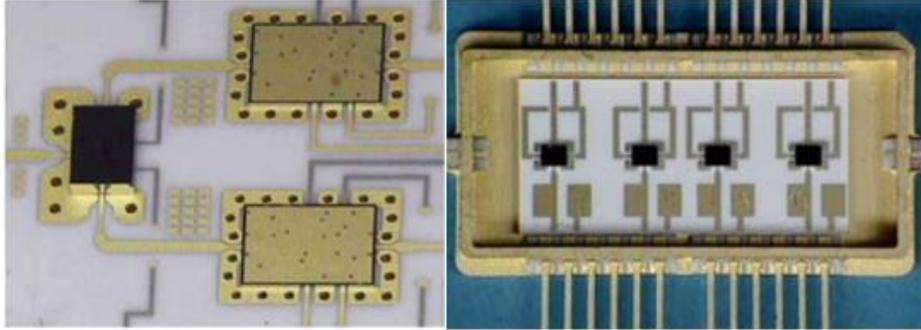


Figure I.5: Alignement et assemblage des micros-antennes en systèmes avancés des satellites [int 1].

La micromanipulation est une compétence avancée qui nécessite des moyens et des formations spécialisées. La Figure I.6 illustre la technique de manipulation des micro-objets par force électrostatique sous la visualisation d'un microscope optique.

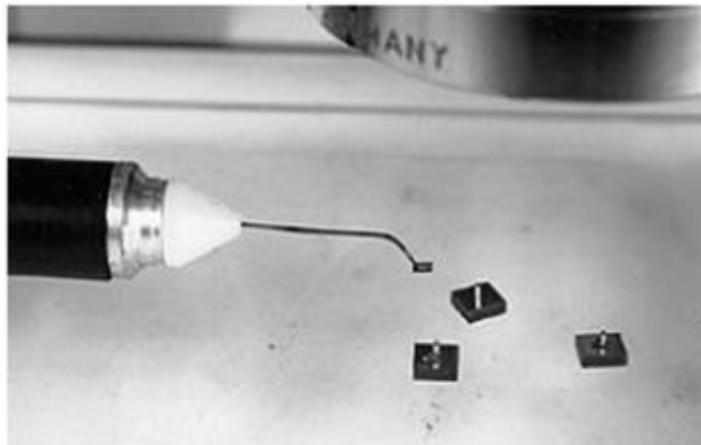


Figure I.6 : Manipulation des micro-objets par force électrostatique [13].

Bien que les lois de la physique statique et dynamique soient applicables à l'échelle microscopique, le rapport d'amplitude des forces est différent. La dynamique à l'échelle microscopique est principalement régie par les forces surfaciques qui sont prépondérantes par rapport aux forces volumiques. Contrairement, à l'échelle macroscopique la dynamique est principalement régie par les forces volumiques (ou les forces inertielles). Cette différence majeure pose des problèmes spécifiques notamment l'adhésion des micro-objets dus aux forces surfaciques, telles que les forces électrostatiques, les forces de Van Der Waals et les forces de capillarité [13].

## **I.4 Les applications des robots miniatures**

L'application des robots miniatures offre de nombreux avantages dans divers domaines, tels que la médecine, l'industrie, la sécurité, l'exploration spatiale et l'environnement. Ils peuvent effectuer des tâches dangereuses, précises et répétitives plus rapidement et plus efficacement que les humains, ce qui permet de gagner du temps et d'améliorer la qualité du travail. De plus, les robots miniatures peuvent accéder à des espaces restreints, agressifs et dangereux pour les humains, ce qui réduit les risques pour la sécurité.

Cependant, l'application des robots miniatures peut également poser des défis. Par exemple, la programmation et le contrôle de ces robots peuvent être complexes et nécessitent une expertise technique. De plus, le coût d'achat et de maintenance de ces robots peut être élevé.

Enfin de compte, l'application des robots miniatures a le potentiel de révolutionner de nombreux secteurs et d'améliorer la qualité de vie de l'humanité. Cependant, cela dépendra de l'efficacité et de la rentabilité de leur utilisation, ainsi que de l'acceptation et de la confiance de la société à l'égard de ces nouvelles technologies.

De nos jours, des microrobots ont déjà été développés et appliqués dans le domaine militaire comme dans le domaine civil. Bien que de nombreux domaines aient bénéficié du grand développement des microsystèmes, mais les trois domaines qui ont le plus profité de ce développement sont le domaine de transport, d'automobiles et de biomédical.

### **I.4.1 Applications microrobotique aux domaines de transport et d'automobile**

Des fonctions complexes sont et seront remplacées avec le temps par la technologie des MEMS. En fait, la nécessité de réduire les pièces mécaniques et les différents systèmes liés aux voitures et aux moteurs est devenue une urgence en raison de ce qu'elle offre comme espaces supplémentaires et un grand gain en énergie. Les systèmes concernés par ce développement sont, par exemple, système d'airbag, de refroidissement, de freinage, suspension, échappement, etc.

Afin d'obtenir des plus d'informations sur l'entourage d'un accident. On est besoin de nombreux microsystèmes électroniques équipés de différents types des micro-capteurs, ce c'est qui a été étudié par Peter Steine et al. [14], dans ses études sur les systèmes de sécurité en automobile.

Un autre travail proposé par Ramakrishnan et al. [15], présentent l'étude et l'analyse d'un accéléromètre capacitif basé sur système micro-électromécanique pour des applications automobiles, notamment en système d'airbag. Des tests expérimentaux sont effectués pour s'assurer que cet accéléromètre fonctionne sur une plus grande bande passante sans compromettre la sensibilité.

C. Zachäus et al. [16] présentent dans leur livre intitulé « Solutions de systèmes intelligents pour la mobilité automobile et au-delà : microsystèmes avancés pour les applications automobiles », plusieurs applications des microsystèmes et microrobots en domaine de transport et d'automobile.

## I.4.2 Applications microrobotiques en biomédical

La technologie de la miniaturisation actuelle a considérablement aidé à inventer des microrobots médicaux, dont l'unité de mesure est le micron et n'est plus le millimètre. Ces robots miniatures peuvent diagnostiquer et surveiller les maladies en temps réel, mesurer la glycémie des diabétiques ou livrer précisément les médicaments nécessaires à une zone ciblée, telle qu'une tumeur. Les développeurs ont également inventé des dispositifs flottants sous forme de microrobots capables de naviguer dans les fluides corporels humains. Ces robots imitent les processus naturels du corps. Les scientifiques tentent de trouver des applications à ces technologies, du traitement de chirurgie oculaire et à des maladies cardiovasculaires. On pense que dans l'avenir, un robot médical ou une aide médicale microrobotique pourrait être capable de travailler dans un organisme vivant, et de même pourraient nettoyer les artères de la plaque et devenir plus efficaces surtout pour briser les calculs rénaux.

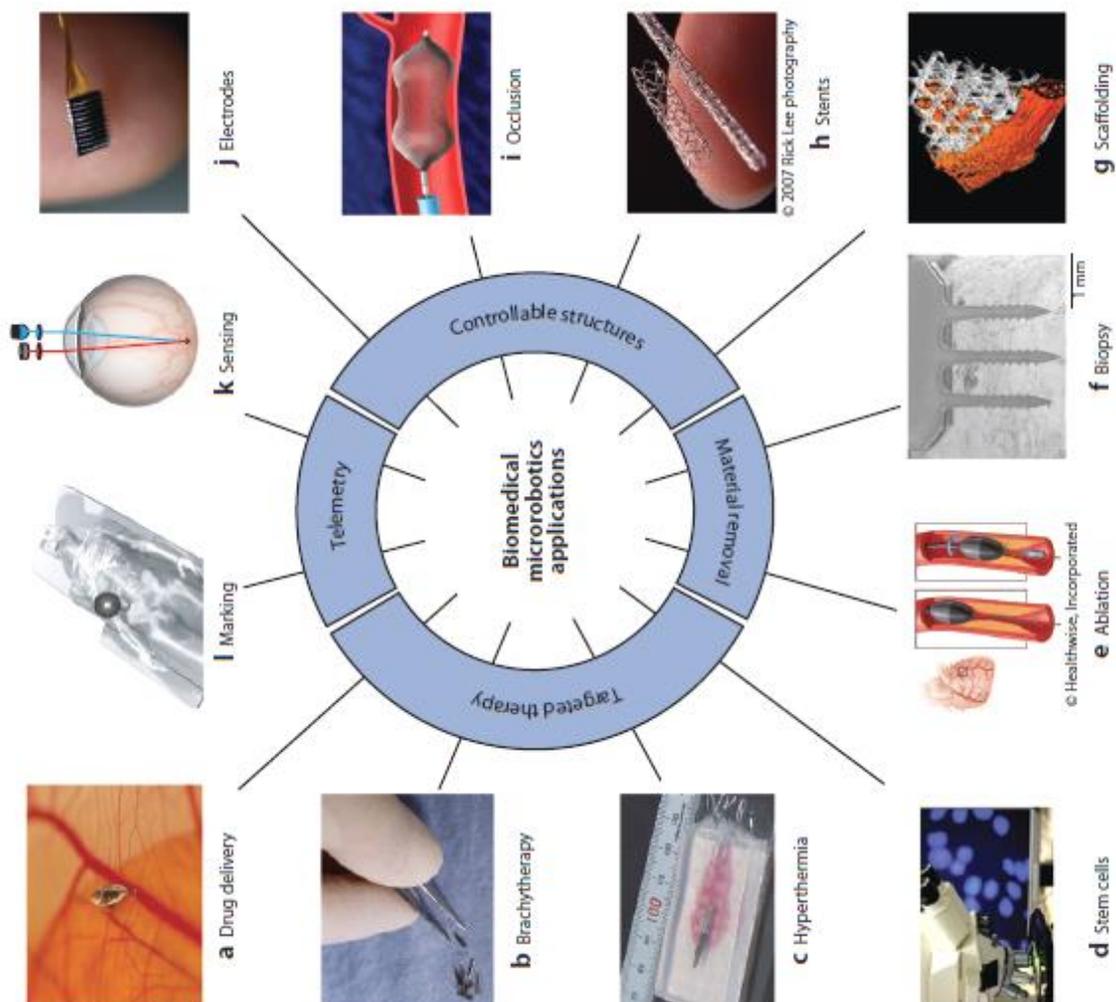


Figure I.7 : Différentes applications microrobotiques en biomédical [17] .

La microrobotique en biomédical permet :

- a) la livraison ciblée de médicaments pour l'augmentation de l'efficacité des thérapeutiques tout en minimisant les effets secondaires indésirables. Gorkem [18], ont étudié la livraison ciblée de médicaments rétinien avec des microrobots magnétiques sans fil.
- b) d'aider à la curiethérapie en transportant des graines radioactives pour détruire les tumeurs.
- c) d'établir des champs magnétiques variant dans le temps et qui induisent un chauffage dans un microrobot qui peut être utilisé pour la thérapie par hyperthermie. Ce projet est détaillé dans les références [19-21] en proposant un système de chauffage magnétique attaché à un élément magnétique de type spiral. Cet élément peut chauffer à plus de 50°C par application d'un champ magnétique rotatif pour le mouvement et un champ magnétique alternatif pour le chauffage.
- d) la recherche au laboratoire sur les cellules souches pour progresser rapidement grâce à l'application des techniques des microrobots qui ont la capacité de transmettre et appliquer les sucés à l'intérieur de l'être vivant.
- e) L'ablation pour éliminer les tissus indésirables effectués par des microrobots.
- f) de bénéficier également à la biopsie de cette technologie microrobotique pour obtenir des échantillons d'un tissu en utilisant des mécanismes tels que le dispositif illustré à la Figure I.7-f [22].
- g) la réalisation d'un support pour les tissus endommagés. La Figure I.7-g montre une construction qui consiste en une incrustation minéralisée à l'intérieur d'un échafaudage en polymère [23].
- h) l'insertion des endoprothèses qui peuvent être utilisées pour maintenir les passages ouverts [24].
- i) l'insertion des bouchons dans les cas où un passage doit être bloqué.
- j) l'implantation des électrodes dans le cerveau.
- k) effectuer une télédétection sans fil, comme ce capteur d'oxygène intraoculaire dont la luminescence est fonction de la concentration en oxygène [25].
- l) la localisation et le marquage des tumeurs. Dans la Figure I.7-l, un microrobot équipé d'une structure mécanique vibrante à des fréquences ultrasonores peut être localisé dans le corps à l'aide de récepteurs placés à l'extérieur du corps [26].

## I.5 Classification des microsystèmes

Les microsystèmes peuvent être classés selon différents critères, tels que leur domaine d'application, leur fonctionnalité ou leur taille. Voici quelques-unes des classifications les plus couramment utilisées pour les microsystèmes (Figure I.8) :

- MEMS RF (les systèmes micro-électromécaniques radiofréquences) [27],
- BioMEMS, (les systèmes micro-électromécaniques biomédicaux) [28],
- MOEMS [29],
- Micro-fluidique [30],
- $\mu$ TAS (micro Total Analysis Systems).

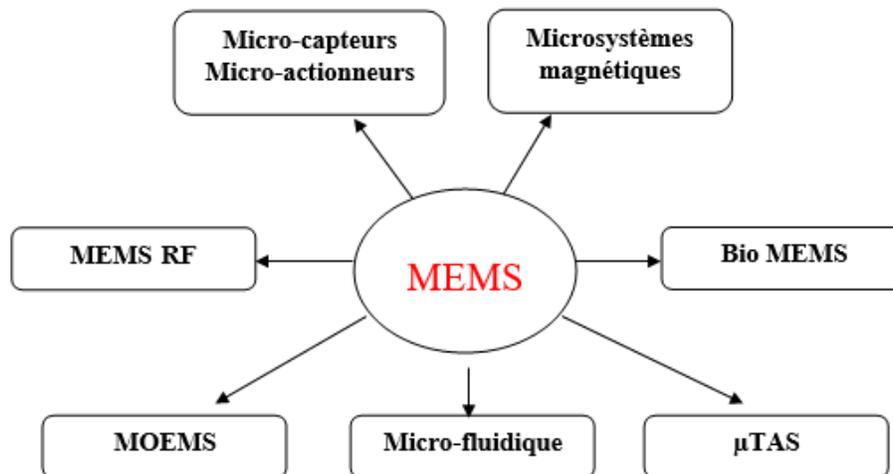


Figure I.8 : Classification des microsystèmes

### I.5.1 Micro-capteurs et actionneurs

Les micro-capteurs et actionneurs sont des composants miniaturisés qui utilisent des technologies MEMS pour convertir des signaux physiques en signaux électriques ou pour fournir des actions mécaniques en réponse à des signaux électriques. Ils sont largement utilisés dans une variété d'applications pour fournir des fonctionnalités complexes dans un format compact et efficace [31].

### I.5.2 Microsystèmes Magnétiques

Des micro-moteurs asynchrone magnétique ont été étudiés par Victor Manuel et al. [32] afin de réduire les pertes dues au frottement, une étude et une analyse de paliers magnétiques passifs miniatures sont proposées.

### I.5.3 Les systèmes micro-électromécaniques radiofréquences (MEMS RF)

Les MEMS RF sont des dispositifs miniaturisés qui intègrent des composants électromécaniques à l'échelle microscopique pour des applications en radiofréquence (RF) [27]. Les MEMS RF sont

utilisés dans diverses applications sans fil telles que les téléphones mobiles, les antennes [33], les commutateurs [34], les filtres [35], les oscillateurs, etc.

Les MEMS RF offrent plusieurs avantages par rapport aux composants RF traditionnels tels que la réduction de la taille, de la consommation d'énergie et du coût. Ils sont également plus rapides et plus fiables que les composants RF traditionnels, car ils utilisent des microstructures mécaniques pour manipuler les signaux RF, ce qui permet une réponse plus rapide et plus précise.

#### **I.5.4 Les systèmes micro-électromécaniques biomédicaux (Bio MEMS)**

Les BioMEMS signifient des systèmes biomédicaux micro électrochimiques. Ils utilisent un certain nombre de nouveautés, issues de domaines tels que les matériaux polymères, la physique micro-fluidique, la chimie des surfaces, la technologie de fabrication douce et la biocompatibilité [28]. Ils peuvent être implanté dans le corps humain pour effectuer des surveillances telle que le rythme cardiaque ou la glycémie chez les patients (Figure I.7).

Une autre tendance en BioMEMS prise par la technologie de miniaturisation pour fournir des laboratoires intégrés et complets de la taille d'une puce [36-38].

Cette nouvelle technologie de puce est très rentable, car elle repose sur des échantillons microscopiques à analyser en peu de temps sans qu'il soit nécessaire de les transporter sur de grandes distances. Un tel système peut être placé à proximité d'un site de prélèvement. Cela réduit ainsi l'exposition des techniciens de laboratoire aux produits chimiques toxiques, ce qui est un grand avantage supplémentaire par rapport aux anciennes techniques. Un autre avantage de cette miniaturisation lors des événements épidémiques est que les kits de diagnostic au point d'utilisation ne nécessitent pas de techniciens qualifiés et ne nécessitent absolument pas de contact direct entre les techniciens et les patients. Ces puces peuvent contribuer donc à sauver des millions de vies.

#### **I.5.5 Microsystèmes d'analyse totale ( $\mu$ TAS)**

Les microsystèmes d'analyse totale ( $\mu$ TAS) [39], également appelés lab-on-a-chip, sont des systèmes miniaturisés qui intègrent plusieurs fonctions d'analyse dans un seul dispositif, généralement de la taille d'une carte de crédit. Ils sont utilisés pour réaliser des analyses biologiques, chimiques et physiques à petite échelle, en utilisant des volumes d'échantillons très faibles [37].

#### **I.5.6 Microsystème Opto Électromécaniques (MOEMS).**

Les microsystèmes optoélectromécaniques (MOEMS) sont des dispositifs miniaturisés qui combinent des composants optiques, électriques et mécaniques sur une même puce. Ces dispositifs sont utilisés pour réaliser des fonctions optiques telles que la détection, la mesure, la transmission et la manipulation de la lumière [29].

Un exemple de MOEMS est le micro-miroir MEMS qui est constitué d'un petit miroir qui peut être incliné sur deux axes grâce à des actionneurs électromécaniques (Figure I.9). Ce type de

dispositif est utilisé dans les projecteurs vidéo pour diriger la lumière vers des zones spécifiques de l'écran, et dans les systèmes de mesure optique pour déplacer un faisceau laser sur une surface à mesurer.

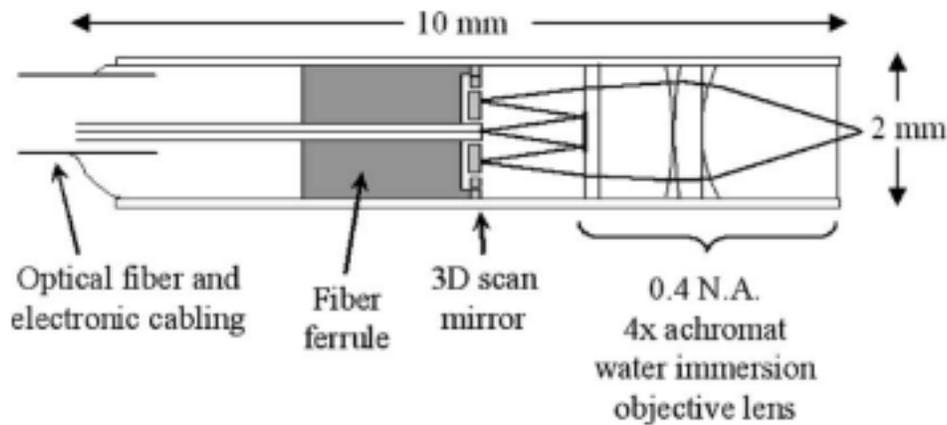


Figure I.9 : microscope confocal endoscopique laser à balayage avec des micro-miroirs [40].

### I.5.7 La micro-fluidique

La micro-fluidique est une branche de la science et de la technologie qui étudie les fluides à l'échelle microscopique. Elle s'intéresse à la manipulation, au contrôle et à la mesure des fluides à des échelles allant de quelques micromètres à quelques millimètres. La micro-fluidique trouve des applications dans de nombreux domaines, notamment la biologie, la chimie, la physique, l'électronique et la médecine [30]. Elle a de nombreux avantages par rapport aux techniques traditionnelles. Elle permet d'utiliser de faibles quantités de fluides, de réaliser des analyses plus rapides, d'obtenir des résultats plus précis et de minimiser les pertes de réactifs. Elle est également plus économique, plus facile à utiliser et plus respectueuse de l'environnement.

La micro-fluidique selon George Whitesides et al. [41], est la technologie des systèmes qui manipulent de micro-volumes de fluide, en utilisant des conduites de la dimension de quelques dizaines de micromètres. Le contrôle et la commande de ces systèmes fluidique miniaturisé et bien détaillé par Jun Zhang et al. [42].

## I.6 Les effecteurs des robots miniatures

Les effecteurs des robots miniatures sont les parties des robots qui interagissent avec leur environnement. Ce sont les composants qui permettent aux robots de réaliser leurs tâches en manipulant des objets ou en effectuant des actions précises. Les effecteurs des robots miniatures peuvent être très différents selon leur application et leur domaine d'utilisation.

On distingue quelques exemples d'effecteurs de robots miniatures :

- **Les micro-pinces** : Les pinces sont souvent utilisées pour saisir et manipuler des objets. Les pinces peuvent avoir une variété de formes et de tailles en fonction de l'application.

Certaines pinces sont conçues pour saisir des objets délicats, tandis que d'autres sont conçues pour des objets plus robustes.

- **Micro-outils de coupe** : Les robots miniatures utilisent souvent des outils de coupe pour effectuer des opérations chirurgicales ou pour couper des matériaux dans des espaces restreints.
- **Les outils de soudage** : Les outils de soudage sont utilisés pour souder des pièces ensemble. Les robots miniatures peuvent utiliser des outils de soudage pour effectuer des réparations dans des espaces restreints.
- **Les capteurs** : Les robots miniatures utilisent les capteurs pour détecter les caractéristiques des environnements inconnus.

Les effecteurs des robots miniatures sont des éléments essentiels pour leur fonctionnement. Ils permettent aux robots de réaliser des tâches précises et de manipuler des objets dans des espaces restreints, ce qui les rend très utiles dans de nombreux domaines tels que l'industrie, la médecine ou encore l'exploration spatiale.

Nous présentons, en cette section, quelques techniques de micromanipulation des effecteurs des robots miniatures.

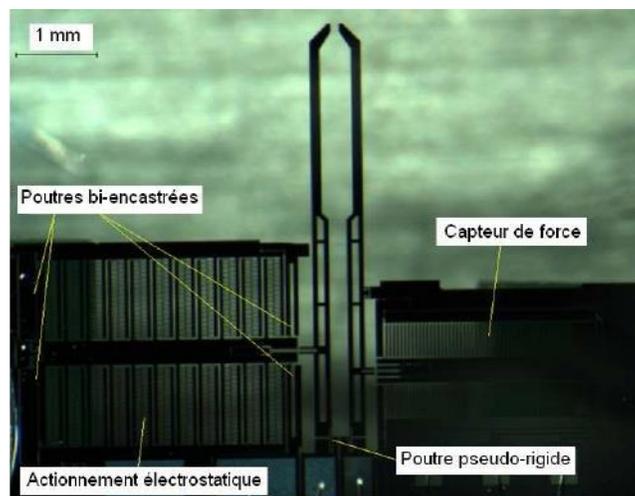


Figure I.10 : les composantes d'actionnement et du capteur liées à une micro pince FT-G100 réalisée par la société FEMTO TOOLS.

La Figure I.10 montre l'architecture d'une micro-pince pilotée par une force électrostatique dont le but est de manipuler l'extrémité du préhenseur avec précision micrométrique et sans dépassement sous l'influence de la tension d'alimentation de l'actionneur à peigne pour déplacer, assembler ou caractériser des objets biologiques en milieu liquide et d'élasticité différente.

L'Institut FEMTO-ST mène plusieurs travaux sur la réalisation et la manipulation des micro-effecteurs. La section suivante met en lumière certaines de ces réalisations.

Des effecteurs spécifiques en silicone qui mesurent 10  $\mu\text{m}$  d'épaisseur sont conçus pour pouvoir accueillir des objets entre 10  $\mu\text{m}$  et 100  $\mu\text{m}$ . Ces effecteurs sont détaillés en Figure I.11.

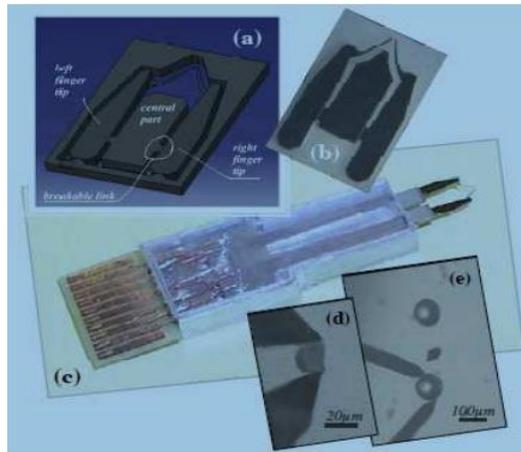


Figure I.11 : Les micro-effecteurs en silicone.

- (a) : Un bout des doigts de silicone dans une phase de micro-fabrication.
- (b) : Le bout des doigts après fabrication.
- (c) : Les pôles de contrôle électrique d'une micropince.
- (d) : Manipulation d'un grain de silicate d'un diamètre de  $20\mu\text{m}$ .
- (e) : Manipulation d'une sphère de verre d'un diamètre de  $100\mu\text{m}$ .

Des prototypes de plusieurs effecteurs ont été équipés de bouts de doigts en nickel d'environ de  $200\mu\text{m}$  d'épaisseur, ces effecteurs sont fabriqués par le procédé UV-LIGA qui combine le procédé de photolithographie et le procédé de croissance de la matière dans un bain galvanique. La Figure I.12 montre différentes micro-pinces permettant la manipulation des micro-objets entre  $100\mu\text{m}$  et plus.

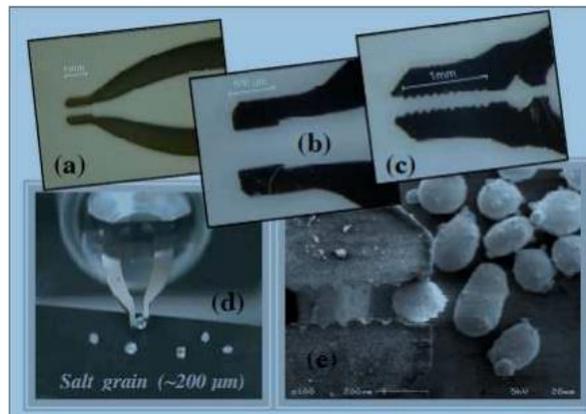


Figure I.12 : Manipulation des grains par des micro-effecteurs.

- (a, b et c) : Bout des doigts en nickel.
- (d) : Manipulation des grains de sable mesure environ de  $200\mu\text{m}$ .
- (e) : Manipulation d'un micro-grain de polystyrène.

Un autre groupe de centre de micro- et nanorobotique (CMNR) de la même Institut FEMTO-ST à Besançon en réussit d'assembler la silice et l'aluminium pour former un matériau composite plieur, ce nouveau matériau est utilisé pour construire un micro effecteur en trois dimensions actionnables par un effet électro-thermomécanique (Figure I.13).

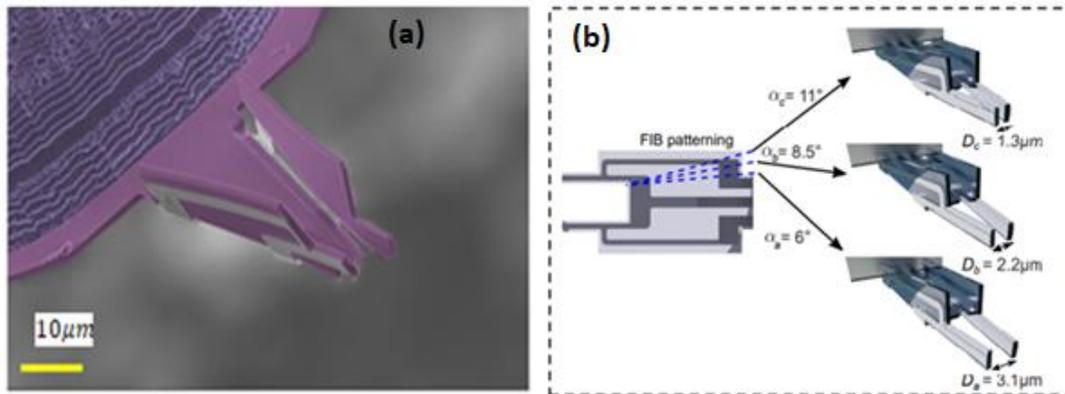


Figure I.13 : Les effecteurs en composite pliée.

- (a) : Effecteur en couleur d'une micropince fabriquée par un composite plié.  
 (b) ouverture et fermeture de la micropince selon l'angle de pliage.

Lopez-Walle et al. [43], exploite le phénomène de changement de phase d'un liquide entre solidification et liquéfaction pour la commande des micro-préhenseur immergé. L'utilisation de ce phénomène à proximité d'un micro-objet peut permettre de le libérer ou de le saisir. La Figure I.14 présente l'architecture de ce préhenseur qui se compose de deux modules à effet Peltier, un mini module assure des mouvements millimétriques et un micro module assure les micro-déplacements.

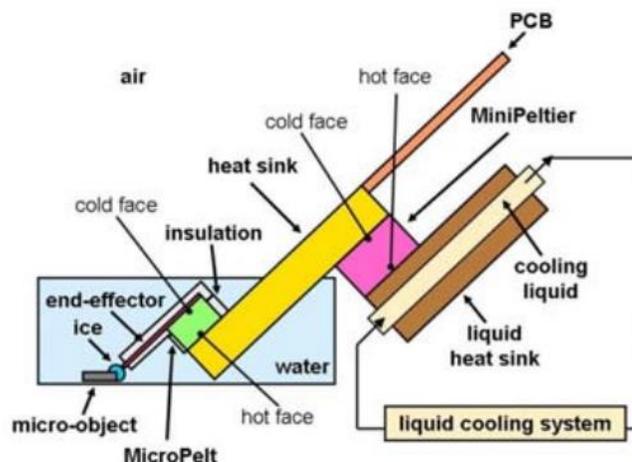


Figure I.14 : schéma de fonctionnement d'un préhenseur à glace.

Lutz et al. [44] ajoute également en décrivant cette technique : le contrôle de la formation de la glace nécessite l'étude d'une stratégie de commande des deux courants électriques dans les deux modules à effet Peltier et requiert l'établissement d'un modèle réaliste et aisément manipulable.

D'autres micro-effecteurs sont réalisés à la base de phénomène de mémoire de forme des alliages de Nithanol. On adapte ce principe de fonctionnement pour manipuler et commander les barres de la platine d'AMF proposée (Chapitre IV :).

## I.7 Les micros-mires de mesure de position

Nous présentons dans cette section quelques exemples des mires utilisées pour effectuer des mesures à l'échelle microscopique. Les citations de cette section ne sont pas exhaustives, mais elles sont considérées comme les plus importantes et les plus fréquemment utilisées.

July Galeano et al. [45], dans le cadre du projet national ANR Émergence MYMESYS<sup>1</sup> présente une méthode visuelle de mesure des déplacements en une dimension. La récupération de la position ne repose que sur des calculs de phase élémentaire et pourrait donc devenir compatible avec un traitement à haut débit en implémentant l'algorithme de traitement sur des calculateurs à haut débit comme un DSP<sup>2</sup> ou un dispositif FPGA<sup>3</sup>. La méthode est basée sur un micro-modèle de Vernier à double échelle fixé sur la cible mobile d'intérêt (Figure I.15). Les deux grilles périodiques ont des périodes légèrement différentes afin de coder l'ordre des périodes dans le déphasage observé entre les deux sous-motifs. En conséquence, une plage non ambiguë de 168  $\mu\text{m}$  est obtenue à partir de périodes de grille de 8  $\mu\text{m}$  et 8,4  $\mu\text{m}$ . La résolution est évaluée à 11,7 nm. Les mesures différentielles ont en effet démontré une précision de mesure meilleure que 5nm.

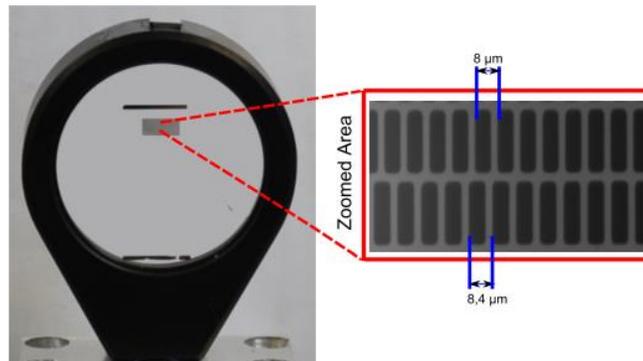


Figure I.15 : Deux micro modèles périodiques de Vernier avec des périodes légèrement différentes

Le procédé de photolithographie a été utilisé pour imprimer le motif de points de la MPC sur des substrats en verre et en plastique. La taille du point est de 2 $\mu\text{m}$  pour une période de 4 $\mu\text{m}$ . La Figure I.16 montre le motif pseudopériodiques tel qu'il est reproduit sur la couche de résine photosensible déposée sur un substrat en verre ainsi qu'une boîte de Pétri dans laquelle un ensemble de quatre motifs pseudopériodiques a été imprimé [46]. Les plots sont en aluminium sur fond transparent. Ces mires sont destinées à des applications biologiques.

<sup>1</sup> Systèmes de Mesure Embarqués à Hautes Performances pour les Microsystèmes multi Degrés de Liberté.

<sup>2</sup> Digital Signal Processor : processeur de signal numérique.

<sup>3</sup> Field-Programmable Gate Array : réseau de portes programmables sur site.

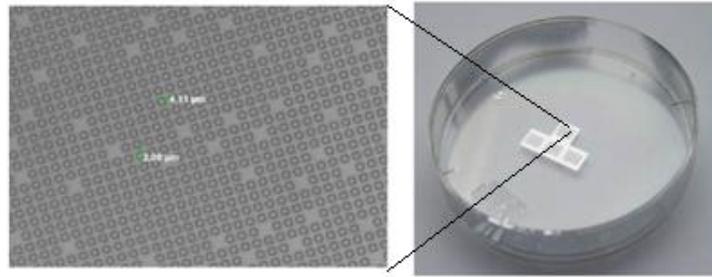


Figure I.16 : Fabrication et utilisation des MPC en biologie.  
 (a) : Gravure de couche de résine photosensible sur une plaque de verre pour produire un motif de points d'une MPC.  
 (b) : MPC placé sur la face inférieure d'une boîte de Pétri pour une observation au-dessous d'un microscope optique.

Yong-Sik et al. [47], ont développé un système de suivi par vision sur la base de positionnement des micro-marqueurs imprimés sur un nano-positionneur MEMS en tant que capteur de déplacement linéaire. Le système de suivi de vision reconnaît les motifs prédéterminés des micro-marqueurs et peut déduire et calculer une position et une rotation de l'élément MEMS. Le système présenté peut surveiller le déplacement linéaire avec une erreur inférieure à 1 % d'un mouvement prévu et une erreur inférieure à 1 μm (Figure I.17).

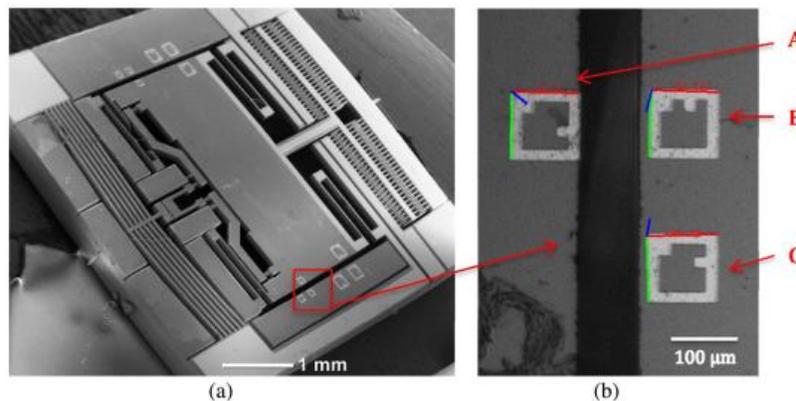


Figure I.17 : Capteur de position miniature des micro-marqueurs imprimés.  
 (a) : Nano-positionneur avec quatre ensembles de marqueurs de repérage,  
 (b) : Zoom sur les marqueurs de repérage.

Hirota et al. [48], a proposé une méthode pour caractériser les propriétés mécaniques des cellules à l'aide d'une puce micro-fluidique intégrée à un robot (robochip) et de la microscopie. La puce micro-fluidique est conçue pour appliquer les déformations spécifiées à une seule cellule détachée à l'aide d'une sonde d'actionneur sur puce. La force de réaction est mesurée simultanément à l'aide d'un capteur de force composé d'une poutre pliée creuse et d'une structure de sonde (Figure I.18). Afin de mesurer les caractéristiques cellulaires plus en détail, un niveau de résolution sous-pixel de la position de la sonde est nécessaire. Par conséquent, Hirota a utilisé la détection de phase de la frange de Moiré et atteindre enfin une précision de 42 nm. C'est environ dix fois plus petit que la longueur d'onde optique, qui est la limite de

l'imagerie nette avec un microscope. Cette technique permet ainsi de mesurer le module d'élasticité des cellules.

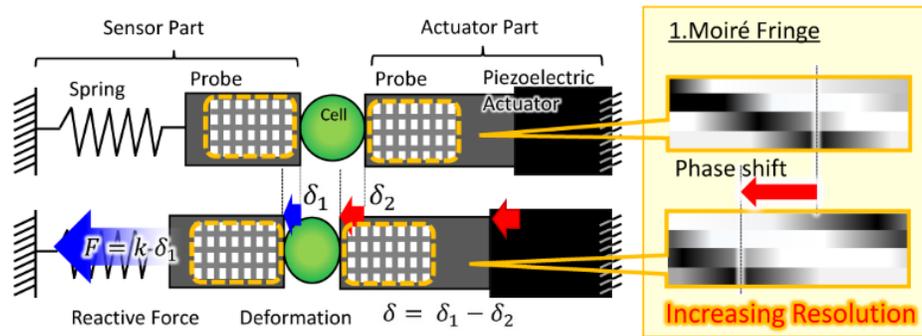


Figure I.18 : Caractérisation d'une cellule par un capteur de déformation menu d'une mire qui se base sur l'interférence des franges de Moiré.

Une autre approche est présentée par Christophe Y. et al. [49], qui mesure les déplacements linéaires dans le plan des systèmes micro-électromécaniques avec une précision inférieure au nanomètre à l'aide de l'observation des micro-modèles périodiques avec une caméra fixée à un microscope optique (Figure I.19). La caméra exporte une série des images vers un algorithme de calcul de déphasage à l'aide d'une analyse par la transformation de Fourier discrète. Cette approche est validée par des mesures sur des dispositifs en silicium présentant des microstructures périodiques. Les résultats sont cohérents avec la lecture électrique d'un capteur capacitif, démontrant la pertinence de cette technique à la fois pour l'étalonnage et la détection. Un écart type de  $\sigma = 0,13 \text{ nm}$  a pu être atteint, permettant une résolution de mesure de  $0,5 \text{ nm}$  ( $4\sigma$ ) et une résolution de sous-pixel jusqu'à la valeur de  $1/100$  pixel.

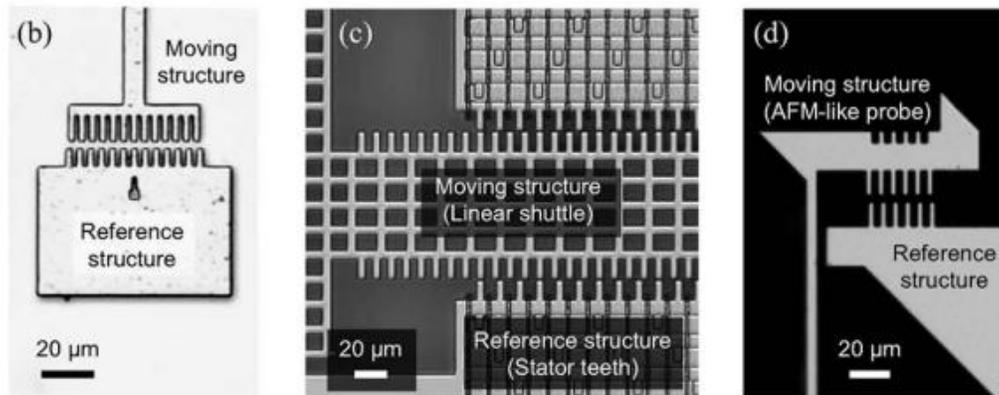


Figure I.19 : Micro-modèles périodiques servant à mesurer des micro-déplacements linéaire.

La Figure I.20 illustre le principe de mesure des micro-forces par imagerie sous microscope électronique à balayage (MEB) fabriqué au laboratoire Femto-st [5], ce capteur est développé avec combinaison des performances des mires périodiques avec le potentiel de la micro-

impression 3D. Le capteur est capable d'estimer une raideur à  $15,3 \text{ N.m}^{-1}$ . Il mesure ainsi une force estimée à  $2,1 \mu\text{N}$ .

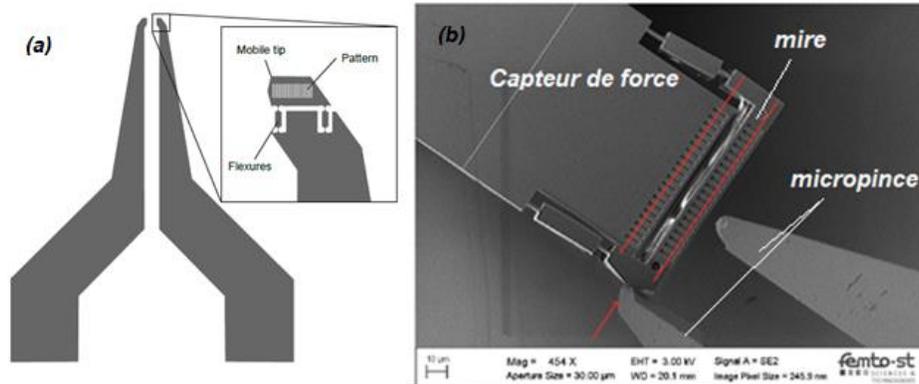


Figure I.20 : Les micro-capteurs de force.

- (a) : capteur de force en tant qu'organe terminal d'une micropince.  
 (b) : capteur de force sous MEB durant l'essai de mesure de force.

Des essais ont été réalisés au sein du même laboratoire pour réaliser des tâches d'assemblage et d'alignement des microcomposants plans à l'aide des motifs de code QR qui sont utilisés comme des mires de mesure à haute précision.

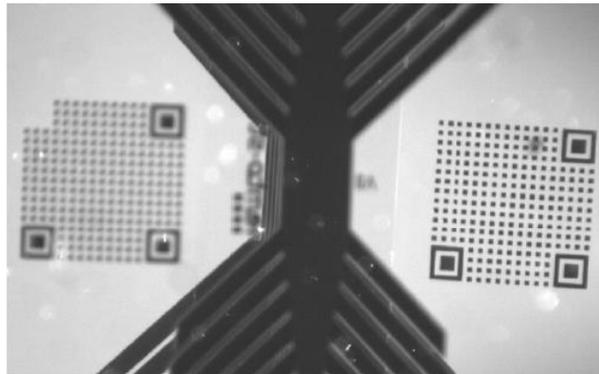


Figure I.21 : Deux mires "QR-Code" utilisées pour assembler deux micro-objets situés sur deux plans différents.

Une mire périodique non codée avec une période de  $3 \mu\text{m}$  utilisée par [2] pour la caractérisation des vibrations de corps rigides dans le plan, basé sur le traitement numérique d'images stroboscopiques d'une partie mobile (Figure I.22). Une erreur quadratique moyenne d'environ  $5,23 \cdot 10^{-3}$  et  $5,64 \cdot 10^{-3}$  pixels dans les deux directions X et Y respectivement ; correspondante à un déplacement de 2,4 et 2,1 nm respectivement. Ces résultats offrent une résolution de position très élevée, c'est-à-dire meilleure que  $10^{-2}$  pixels avec une caméra CCD standard.

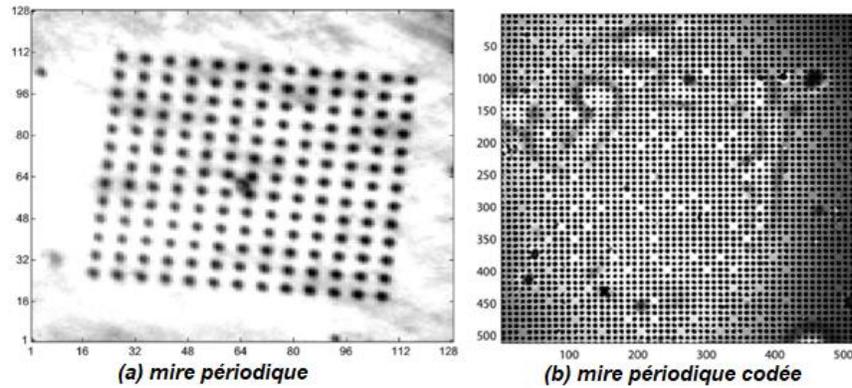


Figure I.22 : Les mires périodiques bidimensionnelles.

(a) : mire périodique non codée en rotation

(b) : mire périodique codée sous l'effet d'un bruit.

Un capteur visuel dans une boucle de contrôle de position appliquée à la microscopie optique basé sur l'intégration des mires périodiques codées (MPC). Également, une méthode de codage de position binaire pour des surfaces bidimensionnelles étendues est présentée [4]. Le cryptage de position est basé sur des séquences de registres à décalage à rétroaction linéaire (LFSR sigle en anglais) insérées dans une trame périodique de spots.

La position et l'orientation de toute vue locale sont récupérées avec précision par rapport à la surface cryptée. Le traitement d'images combine des calculs de phase avec une analyse de caractéristiques d'images binaires. La résolution de mesures est de l'ordre de  $10^{-2}$  pixels en position et de  $10^{-3}$  degrés pour l'orientation dans le plan.

## I.8 Procédure de fabrication des mires

La photolithographie est le processus utilisé pour la fabrication de n'importe quel type de mire, en raison de sa fiabilité, rapidité et grande capacité de miniaturisation. En fait, le travail en salle blanche permettra tout d'abord d'assurer une fabrication fiable, précise et propre sans poussière.

**La photolithographie** est une opération qui consiste à déposer une couche de la résine polymère dite photo-résine sensible aux rayons ultraviolets sur un wafer pour ensuite l'exposer à une lumière ultraviolette qui passe à travers d'un photo-masque comporte le négatif de la mire désirée.

Les étapes du procédé de photolithographie, commencent par l'application d'une photo-résine sous forme d'une couche mince sur la surface du substrat formée par la pulvérisation cathodique. Elle est ensuite exposée à une radiation ultraviolette. Lors de cette étape l'utilisation du photo-masque, formé de zones opaques et transparentes, permet de définir le motif que l'on souhaite reproduire sur la plaquette (Figure I.23).

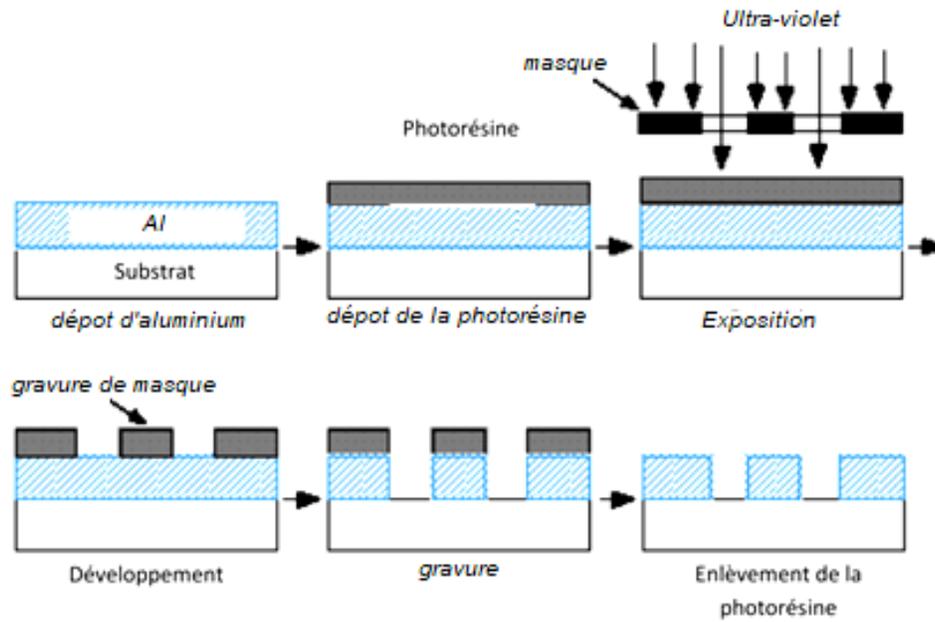


Figure I.23 : Étapes de fabrication des miroirs par photolithographie en salle blanche.

La photo-résine est un polymère qui dans certaines conditions (exposition à un rayon UV) se dissout dans un révélateur qui sera utilisé pour la gravure sélective des matériaux. Soit un substrat en verre couvert d'une couche d'aluminium. Une couche photo-résine est ensuite ajoutée à la surface d'aluminium. Pour transférer les motifs du photo-masque vers la couche photo-résine, celle-ci est insolée à la lumière ultraviolette à travers le photo-masque.

Le développement est la dernière étape dans la fabrication des micro-miroirs, cette étape consiste premièrement à éliminer la photo-résine endommagée, ensuite les couches de métaux en dessous et finalement la photo-résine restante pour aboutir à un substrat où se trouvent les motifs du photo-masque copiés et formés par une couche d'aluminium. Ce développement s'effectue à l'aide d'une combinaison d'attaques chimiques. À la fin de ce processus, on obtient une plaque en verre sur laquelle sont imprimés les points ou le motif de la mire.

La complexité de cette technologie de fabrication coûteuse est considérée comme un obstacle à la généralisation de l'utilisation de ces miroirs, et c'est ce qui amenait à proposer les miroirs virtuels projetés comme alternative aux miroirs fabriqués, voir plus de détails au paragraphe II.7.

## **I.9 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons traité du sujet des robots miniatures et de leur importance dans les industries modernes, et de l'énorme potentiel qu'ils offrent dans plusieurs domaines tels que la médecine, la biologie, les transports, les communications et d'autres domaines. Nous avons également mis en évidence les enjeux et les difficultés auxquels sont confrontés les chercheurs pour développer cette technologie et comment la maîtriser.

On présente ainsi les avantages de la miniaturisation, tels que le gain de place, la réduction des coûts, l'augmentation des performances et l'amélioration de l'efficacité énergétique. Cependant, on a présenté les défis en matière de dissipation de chaleur, de fiabilité, de coût et de complexité de fabrication. Concluant que les avantages de la miniaturisation doivent être soigneusement pesés contre les défis et les risques potentiels lors de la conception de produits miniaturisés.

La mesure des robots miniatures pose plusieurs problématiques liées à leur petite taille et leur complexité. En effet, la taille réduite des robots peut rendre difficile la mesure de certains paramètres tels que la vitesse, la force, la précision des mouvements, etc. De plus, la complexité des mouvements et des interactions avec l'environnement rend notamment la mesure de position encore plus compliquée.

Les capteurs traditionnels peuvent également poser des problèmes dans le cas des robots miniatures, car ils peuvent être trop grands ou trop lourds pour être intégrés dans le robot. Les capteurs miniatures existent, mais ils ont des limites en termes de précision et de fiabilité. Par conséquent, et en vue de minimiser les différents problèmes liés à la mesure, en choisissant la technique de mesure par un système vision-mire qui se base sur l'acquisition par une caméra, placée sur le microscope, des images des mires périodiques codées projetées sur un micro-objet, dont nous parlerons plus en détail dans le chapitre suivant.

## **Chapitre II : Technique de mesure de position par un SMVM**

## II.1 Introduction

Le besoin d'un capteur qui fonctionne à distance sans contact avec les micro-objets hypersensibles est devenu urgent et nécessaire. Et parmi les méthodes les plus recommandées et les plus répondues à cette nécessité, la technique de mesure de position par un système vision-mire SMVM.

Cette technique est utilisée pour déterminer la position et l'orientation d'un objet par rapport à un repère de référence. Elle consiste à utiliser une caméra pour capturer des images de la mire, qui est placée sur l'objet dont la position doit être mesurée. La mire est généralement composée de marques ou de motifs réguliers qui sont facilement détectables par la caméra.

Le système vision-mire utilise ensuite des algorithmes de traitement d'images pour extraire les informations de position à partir des images capturées. Ces informations peuvent être utilisées pour calculer la position et l'orientation de l'objet par rapport à un repère de référence, tel qu'un système de coordonnées global.

Les avantages de cette technique sont sa grande précision et sa capacité à mesurer la position et l'orientation dans les trois dimensions. Elle est largement utilisée dans les domaines de la robotique, de la navigation, de la réalité augmentée et de la réalité virtuelle, ainsi que dans d'autres applications nécessitant une mesure précise de la position et de l'orientation.

Il existe plusieurs variantes de cette technique, qui diffèrent par la forme et la taille de la mire, le type de caméra utilisé et les algorithmes de traitement d'images employées. Chacune de ces variantes peut être plus appropriée pour des applications spécifiques en fonction des exigences de précision, de vitesse et de robustesse nécessaires.

On présente dans ce chapitre plusieurs systèmes de mesures visuels par le couplage entre un système de vision et une mire spéciale, on obtient alors plusieurs catégories selon le type de la mire utilisée :

- Système de mesures par mire périodique (MP),
- Système de mesures par mire périodique codée (MPC),
- Système de mesures par mire périodique codée projetée (MPCP),
- ...

## II.2 Présentation de la méthode de mesure par SMVM

Le problème est défini comme illustré à la Figure II.1. La zone grise correspond à un espace de travail étendu, trop vaste pour être observé dans son intégralité. Seule une zone plus petite schématisée par le rectangle rouge peut être immédiatement observée.

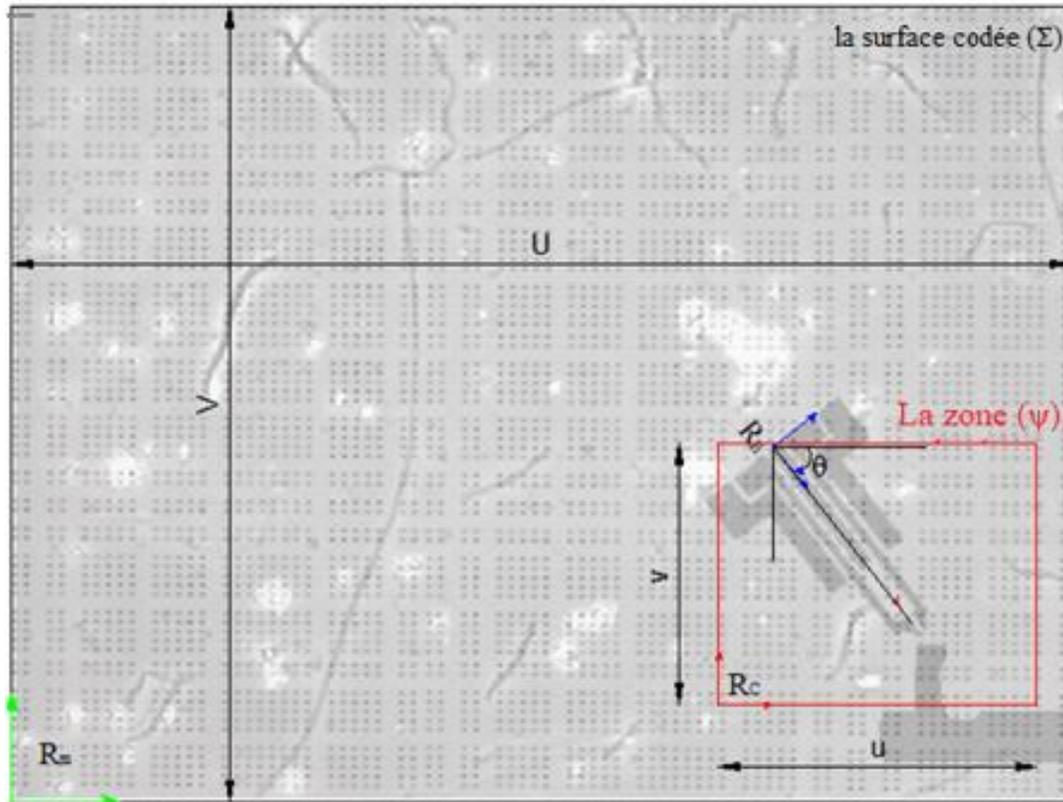


Figure II.1 : Définition de la position  $P(x, y, \theta)$  d'une zone  $(\psi)$  de taille  $(u \times v)$  observée au microscope par rapport à la surface codée  $(\Sigma)$  de taille  $(U \times V)$ .

Le problème a essentiellement deux formes :

1. Quelle est la position  $(x, y)$  et l'orientation  $(\theta)$  de la zone observée par rapport à l'espace de travail en entier ?
2. Comment trouver la région d'existence de l'effecteur et de la cible afin de continuer le processus de pilotage ?

La méthode de cryptage d'un code binaire sur une surface 2D étendue permet la détermination des coordonnées du centre de l'image dans le repère réel global  $R_m$ . De cette manière, les images qui se chevauchent partiellement et qui sont enregistrées à différents instants peuvent être affichées dans un système de référence commun en fonction de leur position réelle. Par cette manière, des comparaisons d'images nettes sont possibles avec une précision inférieure au pixel.

Plusieurs méthodes et stratégies de cryptage et de codage binaire ont été proposées dans la référence [50].

## II.2.1 Dispositifs de mesure par SMVM

Les dispositifs de mesure par mire-caméra sont des systèmes qui permettent de mesurer les distances, les angles et les positions en utilisant une caméra et une mire. Ces dispositifs sont couramment utilisés dans les domaines de la microrobotique.

La Figure II.2 présente les différentes composantes d'un système SMVM qui peut se résumer dans les éléments de base suivants :

1. Le micro-positionneur.
2. La mire.
3. La caméra.
4. L'objectif d'agrandissement.
5. L'unité de traitement.

Ces éléments sont nécessaires et essentiels pour former le SMVM ou le système Vision-Mire. On peut ajouter d'autres éléments complémentaires selon les besoins et selon la demande.

On cite parmi ces éléments complémentaires :

1. le système d'éclairage adaptatif,
2. le système d'asservissement et de commande automatique des micro-positionneurs,
3. micro-positionneurs avec d'autres degrés de liberté (XY, XY $\theta$ , XYZ, ...),
4. système stéréoscopique (double caméra),
5. système de projection des mires virtuelles.

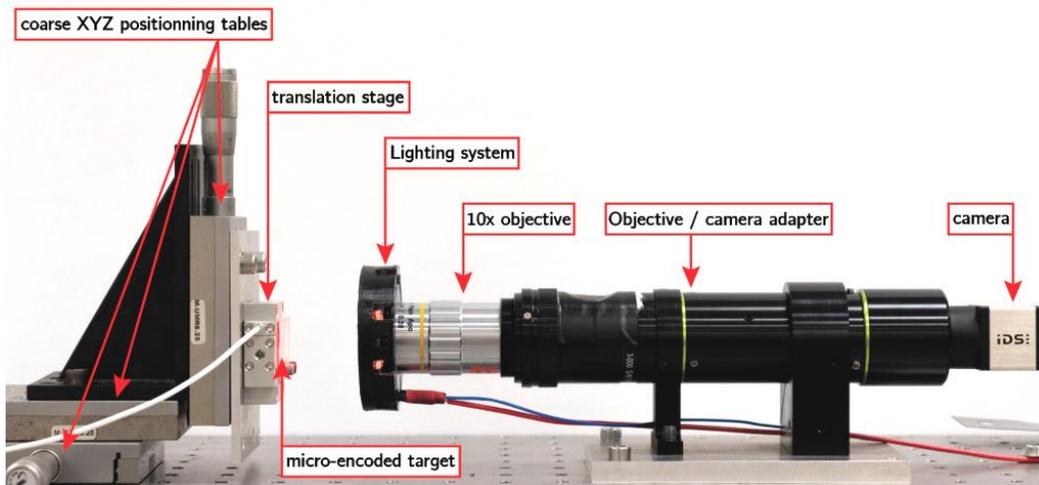


Figure II.2 : Dispositif expérimental de mesure de position par SMVM [51].

L'acquisition des images issues de la caméra CCD se fait par l'intermédiaire d'un câble USB vers l'utilitaire Swift Imaging 3.0 compagnon de la caméra.

La Figure II.3 présente un autre montage de mesure par SMVM. En utilise dans ce montage un goniomètre, en trois degrés de liberté ( $\alpha\theta\psi$ ), fixé sur un micro-positionneur en trois degrés de liberté (XYZ), la plage de mesure est limitée par la taille du motif de la mire, qui est dans cet exemple, 9,5  $\mu\text{m}$  pour l'axe x et de 9,2  $\mu\text{m}$  pour l'axe y.

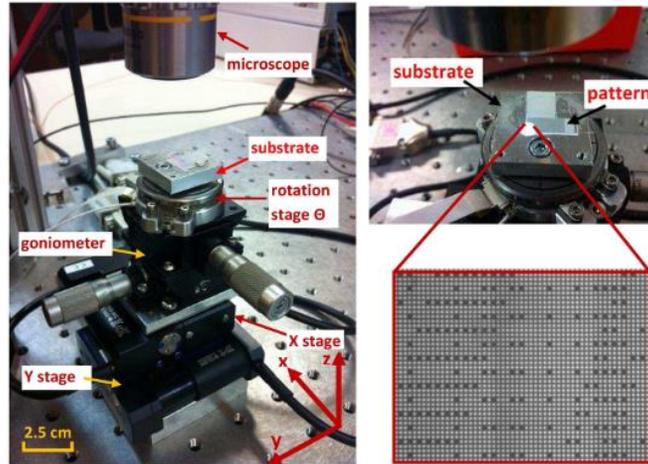


Figure II.3 : Montage de mesure par SMVM et une MPC fixée sur un goniomètre [52].

Le dispositif de mesure utilisé est illustré à la Figure II.4, il est composé de :

- un projecteur (vidéoprojecteur CROSSTOUR P600, avec une brillance de 2000 lm, un balayage de 60 Hz et un contraste 2000 :1),
- une caméra (SC 300, 3.1 MP 1/2" CMOS senseur, avec un nombre de pixels effectifs 2048 x 1536, pixels carrés de 3,2  $\mu\text{m}$ ),
- un objectif macroscopique (TOKURA MC AUTO ZOOM 55 mm 1 :3 :9,  $f = 70\text{-}220$  mm),
- une mire générée par un algorithme en MATLAB est installé sur un microportable (un processeur Intel® Core™ i5 de 8e génération).

Une autre partie de l'algorithme permet d'acquérir et de traiter une image capturée par la caméra afin d'obtenir les informations sur la position et le déplacement de l'effecteur par rapport à la mire.

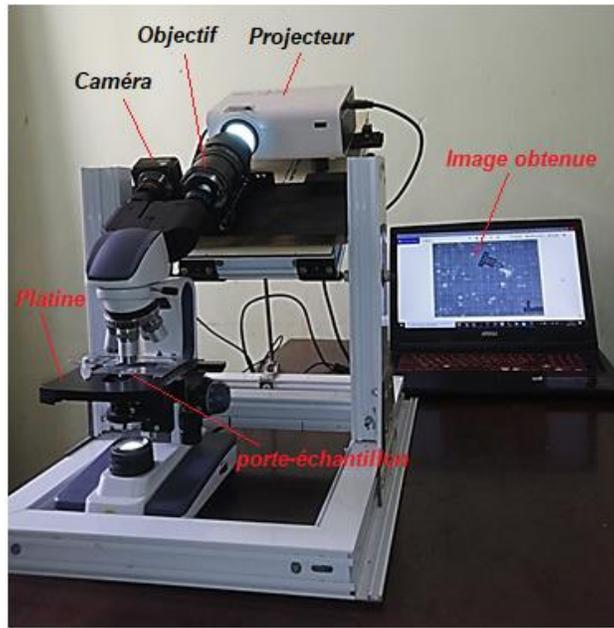


Figure II.4 : système de mesures par MPP (Mires périodiques projetées).

### II.2.2 Algorithme générale de traitement et de calcul de position

Le processus illustré à la Figure II.5 est bien détaillé par Tan et al. [53], présente les trois processus principaux de la détermination des coordonnées  $(x, y)$  du centre de caméra et sa rotation à partir de l'image d'une mire :

- a) Détermination de la position **absolue** par décodage de l'image.
- b) Détermination de la position **relative** par calcul de phase.
- c) Détermination de calcul de la **rotation** de l'image à partir du spectre de Fourier.

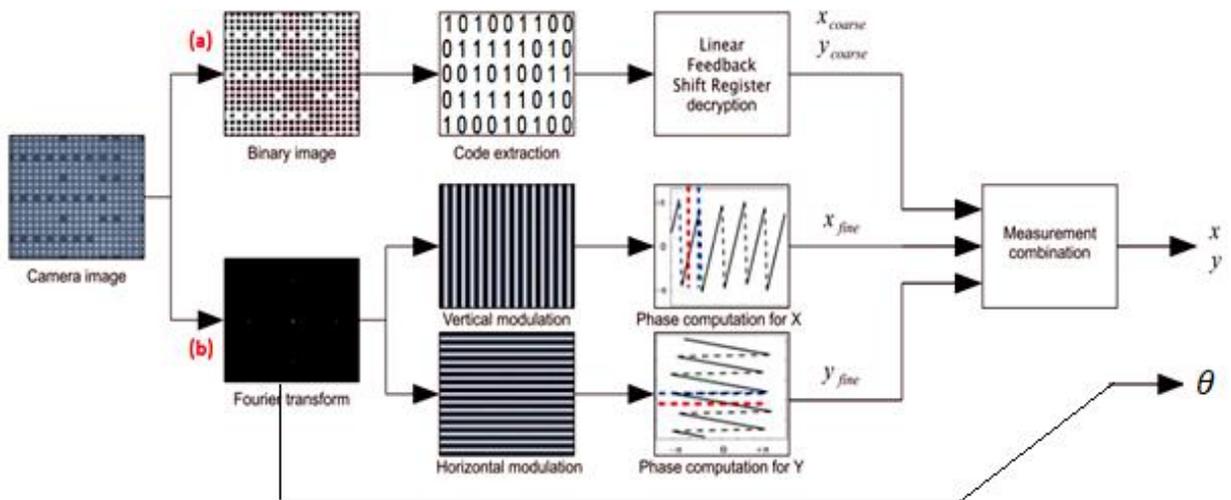


Figure II.5 : Processus de détermination des coordonnées  $x$  et  $y$  du centre de caméra à partir de l'image d'une mire [53].

La plupart des études [1, 54-60], qui se basent sur la technique des mires périodiques sont limités par la taille de la mire et de la taille de sa période. Notant que la taille de la mire détermine et limite la plage de la méthode. Davantage, les difficultés liées à la fabrication complexe de ces mires et le cout élevé par rapport à l'intérêt de son utilisation, ces contraintes techniques exigent d'introduction des améliorations sur le système de mesures jusqu'à ce qu'il devienne adaptable à la qualité et à la nature de plusieurs problèmes.

On propose une amélioration qui consiste à changer les mires fabriquées par des mires virtuelles projetées et déposées sur l'objet à étudier. Cette nouvelle technique de projection permet de modifier la taille, le type de motif, le type de la mire et même d'ajouter des couleurs et d'autres modifications utilisées pour faciliter l'acquisition et le traitement des images obtenues par le système de mesures.

## II.3 Génération d'une carte périodique

### II.3.1 Frange spatiale et signal numérique

Un signal périodique peut s'écrire sous la forme sinusoïdale suivante :

$$A(x) = A_0 \sin(2\pi f x + \varphi) \quad (\text{II-1})$$

Avec  $A_0$  l'amplitude de signal spatial  $A(x)$ ,  $x$  la variable spatiale (généralement en mètres),  $f$  la fréquence et  $\varphi$  la phase (typiquement en radians).

Ce signal est utilisé ensuite pour construire ou approcher une image réelle d'une mire périodique. Il est possible de représenter ce signal dans des différentes espaces, tel que l'espace spatial et l'espace fréquentielle.

La représentation dans l'espace spatial donne une image réelle de la mire et la représentation dans l'espace fréquentiel donne d'autres informations importantes de cette image. L'amplitude, la fréquence et la phase sont les principales informations obtenues dans le domaine fréquentiel. Ces informations servent ensuite pour déterminer les déformations et les mouvements effectués au niveau de l'image d'origine.

En analogie avec un signal temporel périodique, on peut représenter une image spatiale des franges verticales ou horizontales sous forme d'un signal périodique, dont on applique les différentes méthodes de traitement adaptées en domaine temporel.

Soit donc deux mires sous forme des franges verticales et horizontales avec les deux périodes  $P_x$  et  $P_y$  successivement. L'intensité lumineuse des franges sur chaque mire s'obtient par les deux équations suivantes :

$$I_H(u, v) = [0.5 + 0.5 \left( \frac{2\pi}{PM} (u \cos(\theta) - v \sin(\theta)) + \Delta\phi_V \right)] \quad (\text{II-2})$$

$$I_V(u, v) = [0.5 + 0.5 \left( \frac{2\pi}{PM} (u \sin(\theta) + v \cos(\theta)) + \Delta\phi_H \right)] \quad (\text{II-3})$$

En cas des franges qui ne subissent aucune rotation planaire, on met alors :

$$\cos(\theta) = 1 \text{ et } \sin(\theta) = 0$$

Les équations (II-2) et (II-3) deviennent :

$$I_H(v) = [0.5 + 0.5(\frac{2\pi}{pM}(u) + \Delta\phi_V)] \quad (\text{II-4})$$

$$I_V(v) = [0.5 + 0.5(\frac{2\pi}{pM}(v) + \Delta\phi_H)] \quad (\text{II-5})$$

Ces deux équations expriment un signal sinusoïdal (Figure II.6-a), qui se présente par des franges (Figure II.6-b) orientés suivant l'orientation de signal.

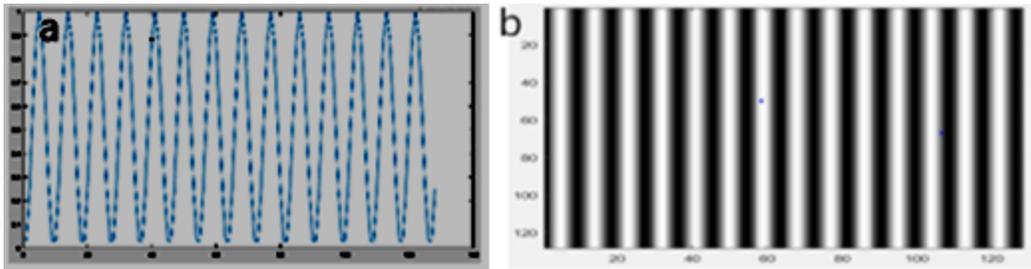


Figure II.6 : Mire périodique unidimensionnelle.

(a) : signal sinusoïdal.

(b) : image des franges correspondant à ce signal.

L'intensité lumineuse de la mire résultante s'obtient par :

$$I(u, v) = I_H(u, v)I_V(u, v) \quad (\text{II-6})$$

La Figure II.7 présente la superposition des mires unidimensionnelles pour obtenir une mire bidimensionnelle avec ou sans rotation.

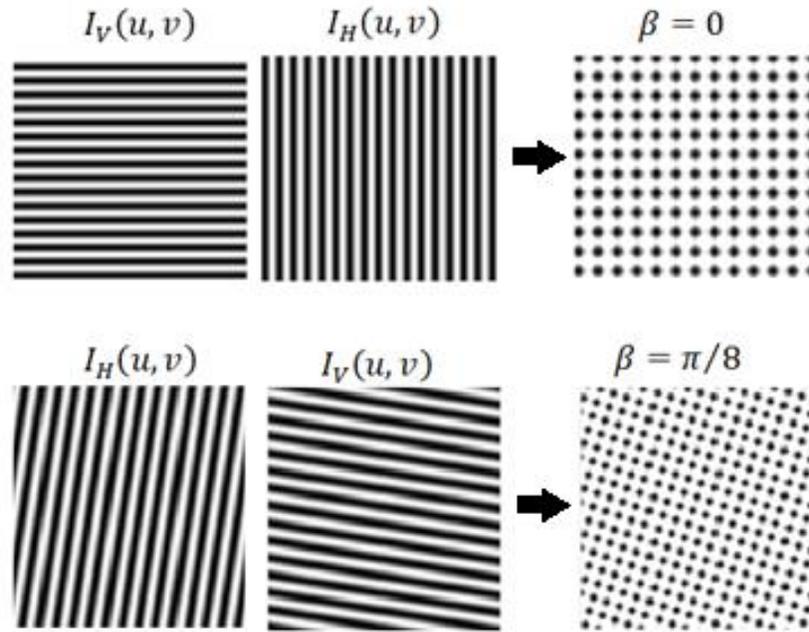


Figure II.7 : Mire bidimensionnelle avec ou sans rotation.

### II.3.2 Le codage d'une carte périodique

Après l'obtention de la carte périodique on passe à l'étape de codage, c'est-à-dire la modification de cette carte par la suppression des lignes, des colonnes ou des points selon un code bien défini.

Notant que le processus de codage est l'inverse du processus de décodage détaillé à la section 0II.4.

Les étapes suivantes permettent le codage d'une carte périodique :

- 1- Création d'une séquence des chiffres 0 et 1 à la base du code LFSR.
- 2- Élargissement de code pour élargir la plage de la carte comme suit :
  - Remplacer chaque byte 1 par 3 bits 111
  - Remplacer chaque byte 0 par 3 bits 101
- 3- Création du tableau des codes binaires à partir de cette séquence, chaque élément de ce tableau se compose de 8 bytes ou 24 bits (Figure II.9).
- 4- Création du tableau des codes décimaux par transformation de chaque code binaire du tableau précédent en un code décimal correspondant.
- 5- Le tableau décimal, présente le tableau de l'ordre des périodes  $k$  correspondantes.
- 6- Élimination et suppression des lignes et des colonnes (codage en deux dimensions) de la mire suivant le code de la séquence binaire de l'étape 2 (Figure II.8).



La section suivante (II.4) présente le processus inverse de l'étape de codage, c'est le processus de décodage de l'image d'une MPC à la base des trois tableaux créés dans la phase de génération de la carte codée.

## II.4 Mesure de la position absolue par une MPC

On appelle une image partielle de la carte codée une mire périodique codée (MPC), cette image peut être traitée et déchiffrée pour obtenir des informations de sa position dans la carte globale.

Le principe de décalage de code LFSR par un pas pour donner un nouveau code différent du code qui lui précède est la base de création et décodage des mires périodiques codées, sachant que, chaque pas ou chaque case de décalage correspond à un déplacement égal à une période. La Figure II.9 décrivait ce principe en détail.

À partir de la séquence du code binaire on génère le tableau des positions binaires, cette position se compose de 24 bits (3 bits en chaque byte). Notant que, le choix de nombre des bits et des bytes est arbitraire (Figure II.9).

On génère ensuite les codes décimaux par le changement de chaque code binaire en un code décimal correspondant. Finalement, on relie le tableau des codes décimaux par le tableau des positions absolues. Ces positions sont présentées par un nombre entier  $k_i$  multiplié par la période  $P_i$ .

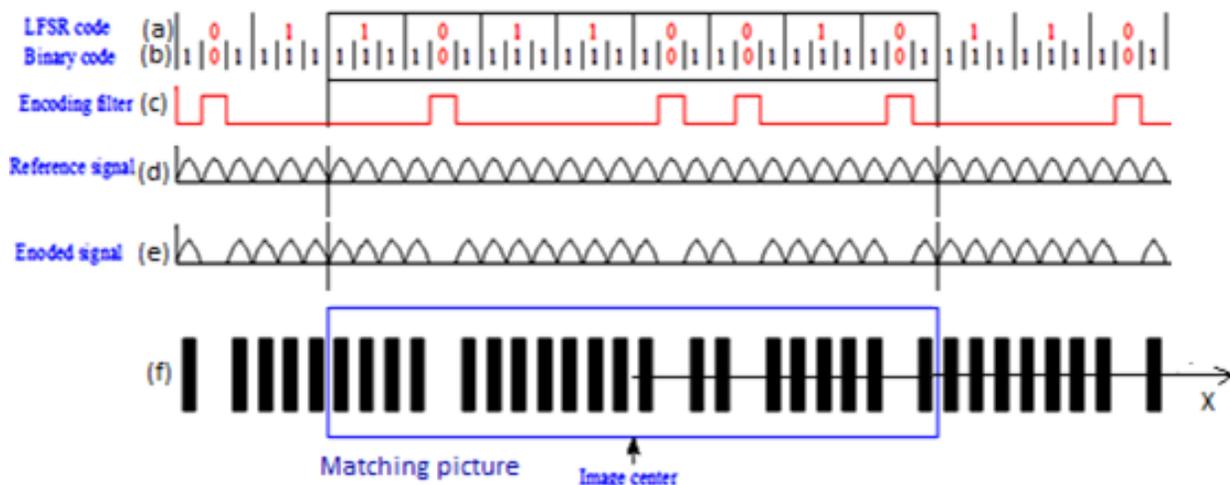


Figure II.10 : Processus de codage d'une position sous forme d'un signal.

- (a) : séquence de codes LFSR,
- (b) : séquence du code binaire,
- (c) : filtre portique encodé,
- (d) : signal sinusoïdal initial de référence sans codage,
- (e) : signal encodé,
- (f) : mire en une dimension générée à partir du signal encodé.

La séquence du code LFSR au-dessus se transforme en une séquence du code binaire de la manière suivante :

- Le code 1 dans la séquence LFSR se transforme en code 111 dans la séquence binaire,

- Et le code 0 dans la séquence LFSR se transforme en code 101 dans la séquence binaire.

Cette transformation augmente la taille de la séquence et alors l'augmentation de la plage de la mire générée.

Le code binaire utilisé pour créer un filtre sous forme d'un signal portique coïncide avec l'emplacement des zéros sur la chaîne binaire. Le produit de convolution entre le filtre  $S_f$  et le signal de référence  $S_r$  donne un signal encodé  $S_c$  :

$$S_c = S_r \otimes S_f \quad (\text{II-7})$$

Enfin, on transforme le signal encodé à une séquence des franges verticales toutes en respectant le principe de l'existence d'une frange pour le code 1 et l'absence de frange pour le code 0.

Le principe de la méthode est consisté à déplacer l'image codée de ces franges au-dessous d'une caméra fixée sur le cadre factice bleu présenté sur la Figure II.10.

La caméra prend des photos instantanées et transporte à chaque instant donné une photo vers un algorithme de traitement qui sert à déduire la position correspondante au codage apparu sur cette image.

La déduction de deux positions différentes  $x_i$  et  $x_f$  en deux instants  $t_i$  et  $t_f$  permet de calculer le déplacement  $\Delta x = x_f - x_i$  parcouru par la chaîne des franges dans la durée  $\Delta t = t_f - t_i$ .

Notant que, les franges verticales servent à calculer le déplacement horizontal et les franges horizontales servent à calculer le déplacement vertical.

L'application de même principe dans les deux sens x et y a fourni une mire périodique codée (MPC) bidimensionnelle résultante de la multiplication des deux mires (Figure II.8).

La Figure II.11 présente en détail les différentes étapes de décodage d'une MPC. Donc, à partir d'une image on peut extraire un code binaire puis une position selon les étapes suivantes :

1. Acquisition de l'image de la mire par une caméra.
2. Appliquer la transformation de Fourier pour tracer la courbe des phases roulées.
3. Détecter les limites des périodes à partir de la phase roulée.
4. Créer une mire  $A$  sans codage suivant la période détectée ;
5. Utiliser un filtre de seuillage pour trouver les zones des points manquants et créer une autre mire  $B$  suivant ces zones.
6. Fusionner les deux mires selon la formule :  $C = \overline{A \wedge B}$  .
7. Transformer chaque spot dans la mire en un chiffre 1 et chaque spot dans la mire  $B$  en un chiffre 0.
8. L'assemblage des deux matrices donne une matrice qui présente la mire en deux sens.
9. On s'adresse au tableau des codes binaires préparé préalablement pour transformer chaque code binaire en un code décimal.
10. On s'adresse maintenant au tableau des ordres des périodes pour trouver les ordres  $K_x$  et  $K_y$  correspondants à nos codes décimaux.
11. Calculer la position absolue selon la formule :

$$X = 2\pi K_x P_x \quad (\text{II-8})$$

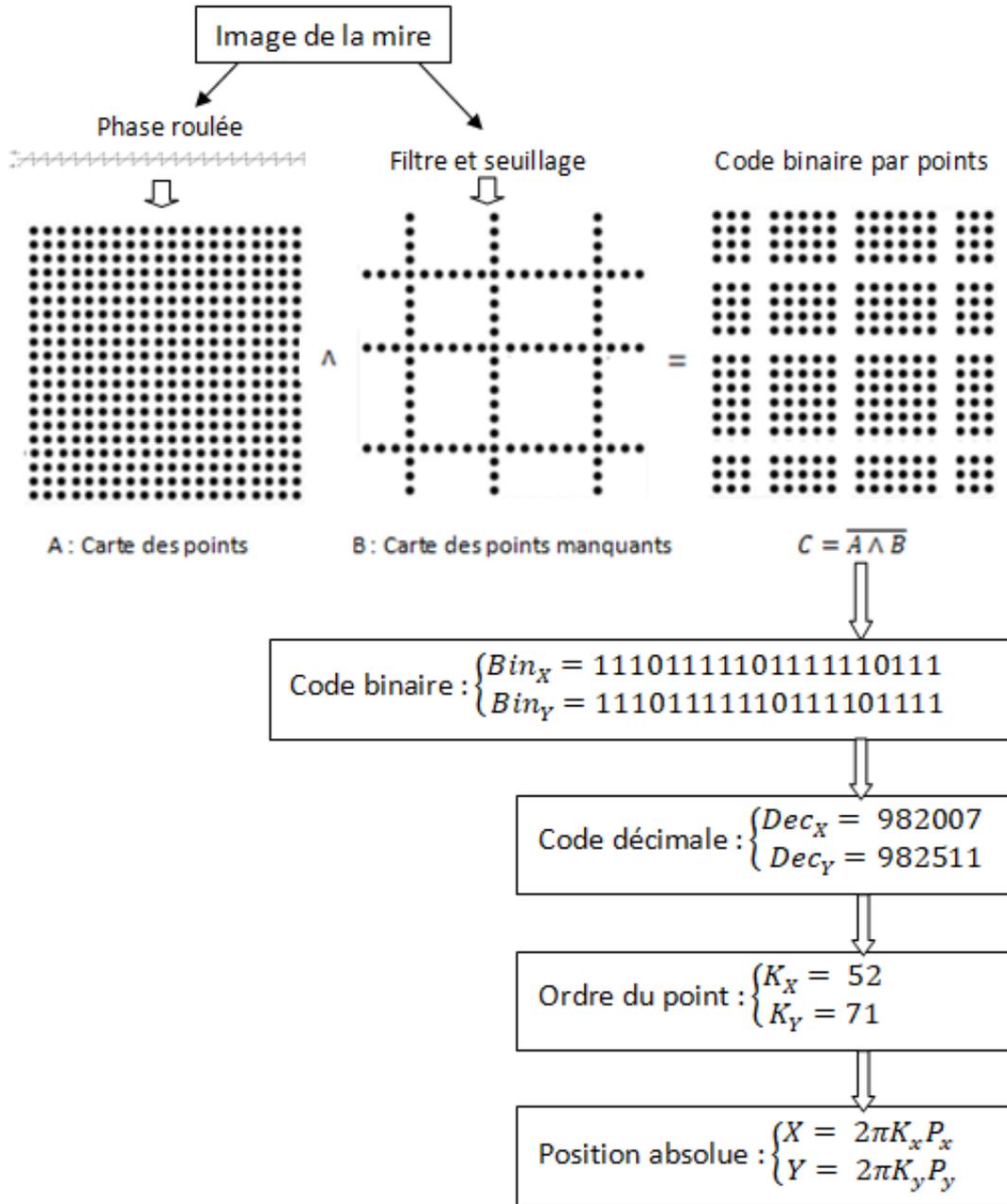


Figure II.11 : Processus de détermination de la position absolue par le traitement d’une image d’une mire codée.

Les deux processus de calcul de la position relative et absolue détaillés dans les sections précédentes sont récapitulés dans la Figure II.12

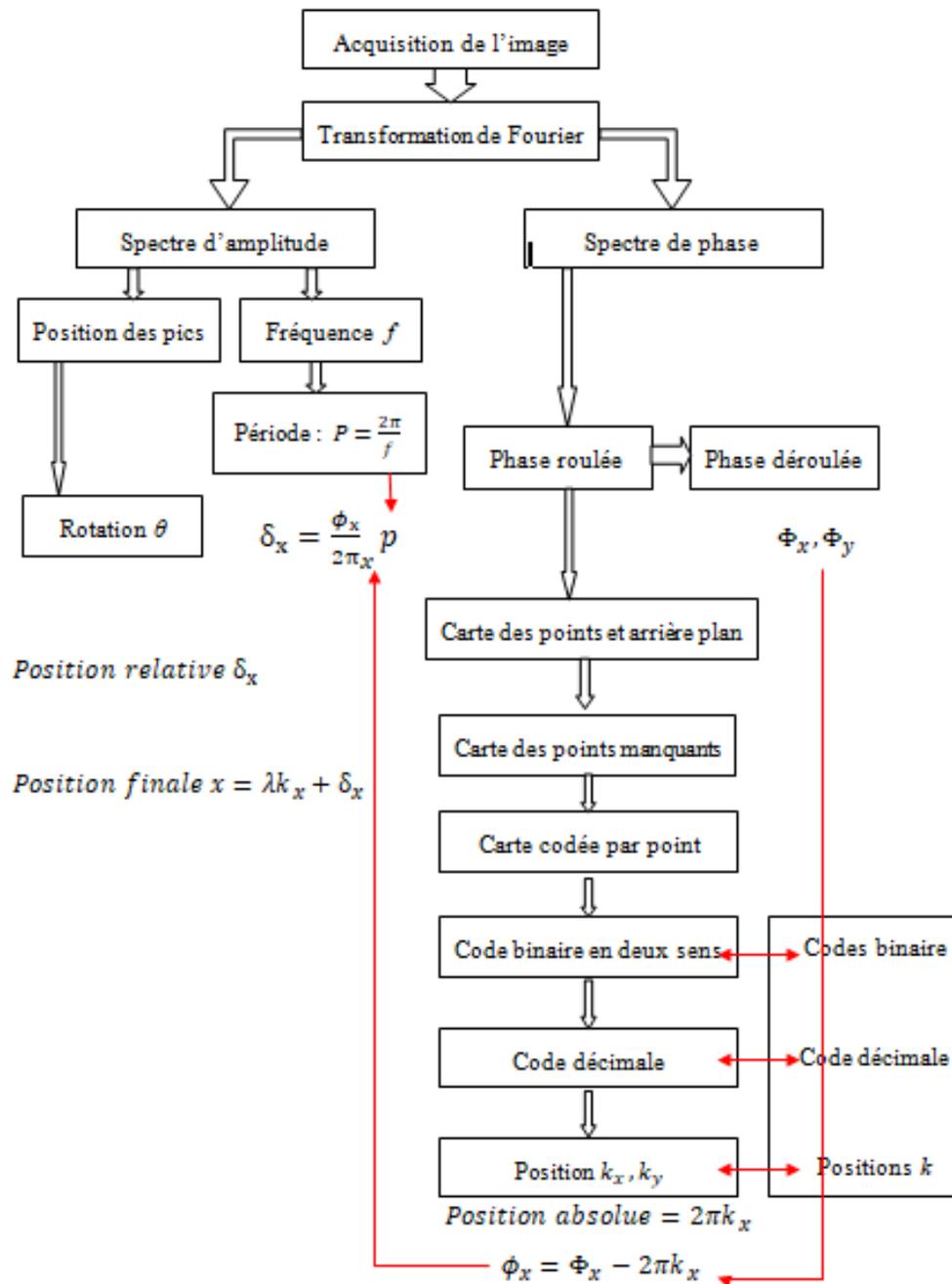


Figure II.12 : Processus générale de détermination de la position finale (absolue et relative) par le traitement d'images d'une mire codée.

Notant que :  $f$  est la fréquence en  $1/pixel$ ,  $P_x$  et  $P_y$  sont les périodes dans les deux sens en  $pixel$ ,  $\delta_x$  et  $\delta_y$  sont les déplacements dans les deux sens en  $pixel$ ,  $k_x$  et  $k_y$  présentent l'ordre des périodes correspondantes aux positions du centre de l'image.

Les deux phases relatives  $\phi_x$  et  $\phi_y$  sont calculées en fonction de phases absolues  $\Phi_x$  et  $\Phi_y$  selon les deux formules :

$$\begin{cases} \phi_x = \Phi_x - 2\pi k_x \\ \phi_y = \Phi_y - 2\pi k_y \end{cases} \quad (II-9)$$

## II.5 Mesure de la position relative par une MP.

### II.5.1 La transformée de Fourier d'un signal unidimensionnel

Le calcul de déplacement horizontal  $d_x$  suivant l'axe OX des franges verticales exige le calcul de déphasage  $\Delta\phi_H$  correspondant.

La formule suivante donne la relation entre le déplacement et le déphasage :

$$d_x = P_x \frac{\Delta\phi_H}{2\pi} \quad \text{II-10}$$

Tel que  $P_x$  c'est la période spatiale du signal en pixel.

La transformée rapide de Fourier permet un passage vers le domaine fréquentiel pour calculer la phase selon le processus détaillé par la suite.

La première étape consiste au calcul de la transformée de Fourier de l'équation (II-4) et (II-5) par l'application de la formule suivante [61]:

$$\mathcal{F}(I_V(v)) = \widetilde{I}_{f_v} = \int_{-\infty}^{+\infty} I_V(v) e^{-j2\pi f_v v} dv \quad \text{II-11}$$

$$\mathcal{F}(I_H(u)) = \widetilde{I}_{f_H} = \int_{-\infty}^{+\infty} I_H(u) e^{-j2\pi f_H u} du \quad \text{II-12}$$

L'application de la formule (II-11) et (II-12) sur un signal discret exige quelques modifications, et conduit à la transformation de Fourier discrète (TFD) [62], donc on a :

$$\mathcal{F}(I_V(v)) = \widetilde{I}_{f_v} = \sum_{n=0}^{N-1} I_V(n) e^{-j2\pi \frac{K}{N} n} \quad \text{II-13}$$

$$\mathcal{F}(I_H(u)) = \widetilde{I}_{f_H} = \sum_{m=0}^{M-1} I_H(m) e^{-j2\pi \frac{K}{M} m} \quad \text{II-14}$$

L'intégrale se remplace par une somme sur une plage finie de N éléments dans le sens horizontal et M éléments dans le sens vertical. Avec que les paramètres  $\frac{K}{N}$ ,  $\frac{K}{M}$  dans le domaine discret est l'équivalent de la fréquence  $f_v$  et  $f_H$  dans le domaine continu.

Par remplacement de l'expression (II-5) de  $I_V$  dans l'équation (II-13) et l'expression (II-4) de  $I_H$  dans l'équation (II-14), on obtient [62, 63]:

$$\mathcal{F}(I_V(v)) = \widetilde{I}_{f_v} = \sum_{n=0}^{N-1} [0.5 + 0.5(\frac{2\pi}{P_y M}(n) + \Delta\phi_H)] e^{-j2\pi \frac{K}{N} n} \quad \text{II-15}$$

$$\mathcal{F}(I_H(u)) = \widetilde{I}_{f_H} = \sum_{m=0}^{M-1} [0.5 + 0.5(\frac{2\pi}{P_x M}(m) + \Delta\phi_V)] e^{-j2\pi \frac{K}{M} m} \quad \text{II-16}$$

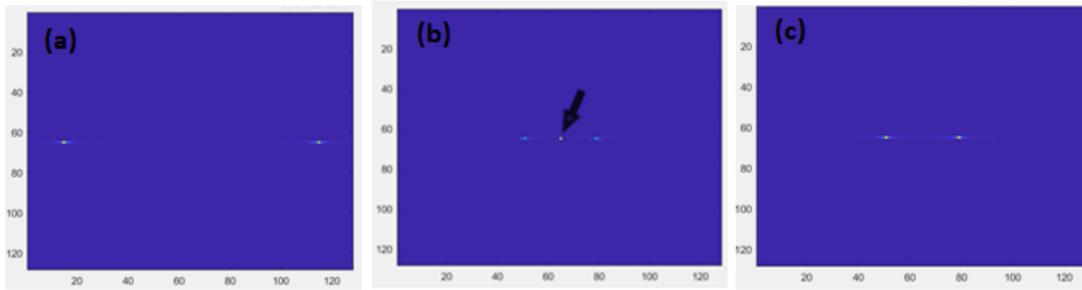


Figure II.13 : Mire périodique en domaine fréquentiel.

- (a) : Spectre d’amplitude de la TFD de la mire de la Figure II.5.
- (b) : Spectre en amplitude décalé vers le centre avec une fréquence fondamentale.
- (c) : élimination de la fréquence fondamentale.

Soit un point  $M$  qui parcourt une distance  $d$  entre les deux positions  $M_i$  et  $M_f$ , qui peut se diviser en deux déplacements : un déplacement absolu qui est un multiple entier  $k$  de la période  $\lambda$ , et un autre déplacement relatif  $\delta d$  qui est un reflet de déphasage.

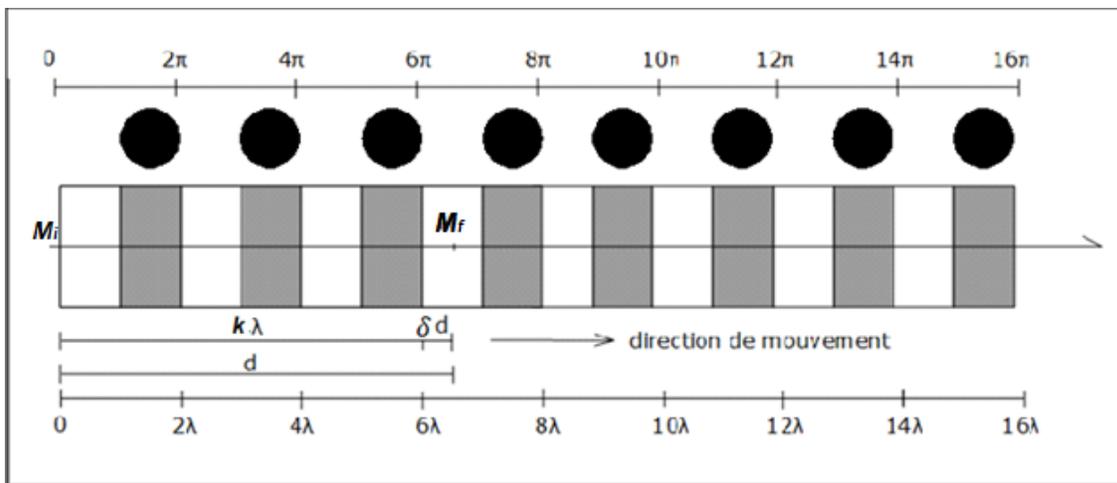


Figure II.14 : Mouvement d’un point  $M$  sur un réseau périodique unidirectionnel.

$$d = k\lambda + \delta d = k\lambda + \lambda \frac{\phi}{2\pi} \tag{II-17}$$

En terme angulaire équivalent (tel que  $\lambda = 2\pi$ ) cette égalité s’écrit :

$$\theta = 2\pi k + \phi \tag{II-18}$$

On exprime le mouvement linéaire du point  $M$  ( $x, y$ ) suivant un réseau périodique par un mouvement circulaire périodique d’un point sur un cercle. Donc, le point  $M$  se définit par les deux coordonnées  $x$  et  $y$  comme suit en fonction de la magnitude  $A$  :

$$\begin{cases} x = A \cos(\theta) \\ y = A \sin(\theta) \end{cases} \quad (\text{II-19})$$

Le point M se définit encore par un nombre Z dans l'espace complexe comme suit :

$$Z = x + yi \quad (\text{II-20})$$

L'extraction de la phase d'un nombre complexe se fait par la fonction *arctang* qui donne une variation de phase dans l'intervalle  $[-\pi/2, \pi/2]$  et la fonction *arctang2* qui donne une variation de phase dans l'intervalle  $[-\pi, \pi]$  (Voir plus de détails sur [64] et [3]).

L'application de cette formule sur une variation de l'angle  $\theta$  sur une large plage de 0 à  $250\pi$  par une période  $\lambda=100\pi$  conduit aux résultats suivants :

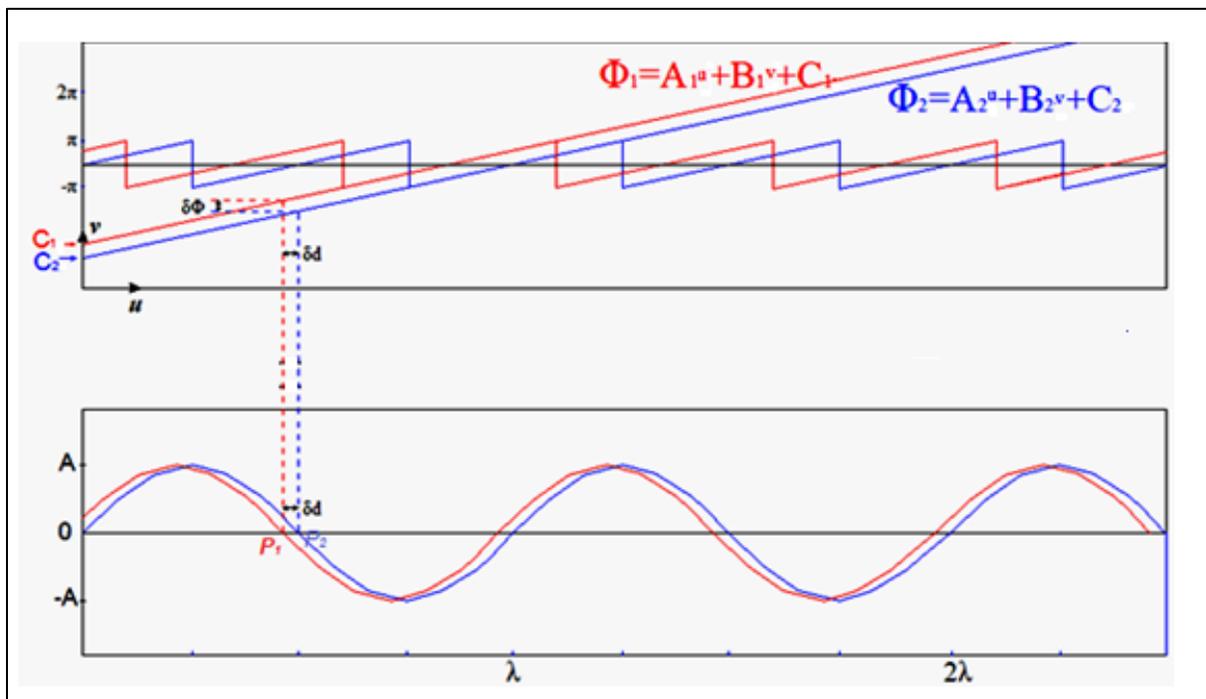


Figure II.15 : Comparaison entre la phase roulé et déroulé de deux signaux décalés entre eux par un déphasage  $\delta\Phi$ .

$\Phi_1$  et  $\Phi_2$  : les deux phases absolues de deux signaux décalés par un pas  $\delta d$ .

$A_1$  et  $B_1$  : paramètres de régression par moindres carrés de la phase déroulée  $\Phi_1$ .

$A_2$  et  $B_2$  : paramètres de régression par moindres carrés de la phase déroulée  $\Phi_2$ .

$u$  et  $v$  : les coordonnées des points  $P_1$  et  $P_2$  sur les deux signaux.

$C_1$  et  $C_2$  : valeurs des phases  $\Phi_1$  et  $\Phi_2$  dans les points de départ.

La phase absolue  $\Phi$  permet de calculer la position de n'importe quel point sur le signal et de comparer les positions des signaux entre eux.

## II.6 Mesure de la rotation d'une mire périodique

La rotation des franges verticales autour de l'axe de l'image soumise au modèle suivant :

$$I_V(u, v) = [0.5 + 0.5 \left( \frac{2\pi}{pM} (u \sin(\theta) + v \cos(\theta)) + \Delta\phi_H \right)] \quad (\text{II-21})$$

Tel que l'angle  $\theta$  n'est pas nul.

La figure suivante présente les franges en rotation :

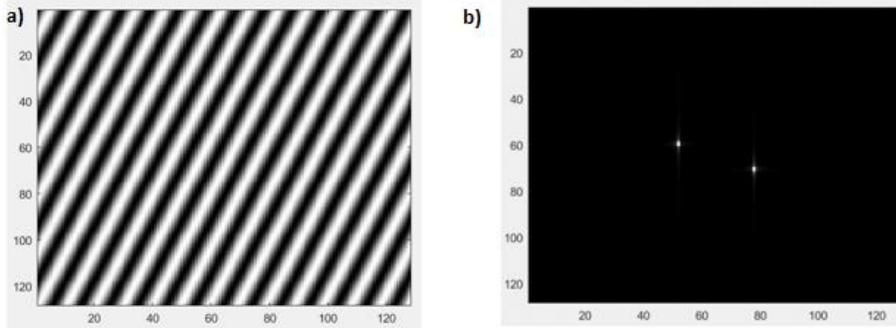


Figure II.16 : Rotation des MP en espace spatial et fréquentiel.

(a) : mire des franges verticales en rotation,

(b) : spectre modulaire du même angle de rotation  $\theta = -\pi/8$ .

La recherche de lobe ou de pic maximum s'effectue donc dans un quart de l'image spectrale, soit à l'un quart droit haut (rotation dans le sens des aiguilles d'une montre  $\theta < 0$ ) ou dans l'un quart droit bas (rotation dans le sens contraire des aiguilles d'une montre  $\theta > 0$ ).

Le pic maximum présente une luminosité maximum dans l'image spectrale, c-à-dire la fréquence principale est présentée sur la carte spectrale par un point pixelique plus lumineux que la fréquence secondaire (Figure II.17).

Il est clair que l'angle  $\theta$  sera calculé à partir de ce spectre par la relation :

$$\theta = \arctang \left( \frac{\overline{AM}}{\overline{OA}} \right) \quad (\text{II-22})$$

D'autre part, l'angle de rotation  $\theta$  peut se calculer à partir des équations d'ajustement des phases relatives pour les franges horizontales et verticales (Figure II.15) :

$$\begin{aligned} \phi_V(u, v) &= A_V \cdot u + B_V \cdot v + C_V \\ \phi_H(u, v) &= A_H \cdot u + B_H \cdot v + C_H \end{aligned} \quad (\text{II-23})$$

Et l'angle de rotation se calcule ainsi à partir de ces deux équations par :

$$\theta = \arctan^{-1} \left( \frac{B_V}{A_V} \right) \text{ Ou } \theta = \arctan^{-1} \left( \frac{A_H}{B_H} \right) \quad (\text{II-24})$$

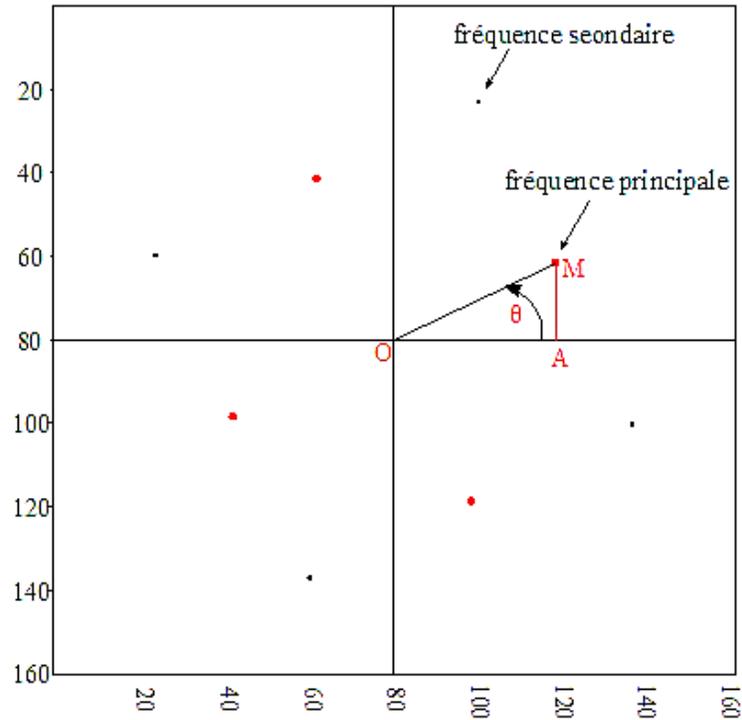


Figure II.17 : spectre modulaire des franges en rotation par un angle de  $\theta=\pi/8$ .

## II.7 Projection des MPC dans un système de vision (SV)

Le système de projection est composé d'un projecteur, d'une lentille de réduction et d'un programme de génération des mires sous Matlab qui permet d'obtenir plusieurs types de mire avec des positions différentes en trois dimensions  $XY\theta$ .

Les mires générées seront projetées à travers le système optique du microscope sur la platine qui comporte le micro-objet à mesuré.

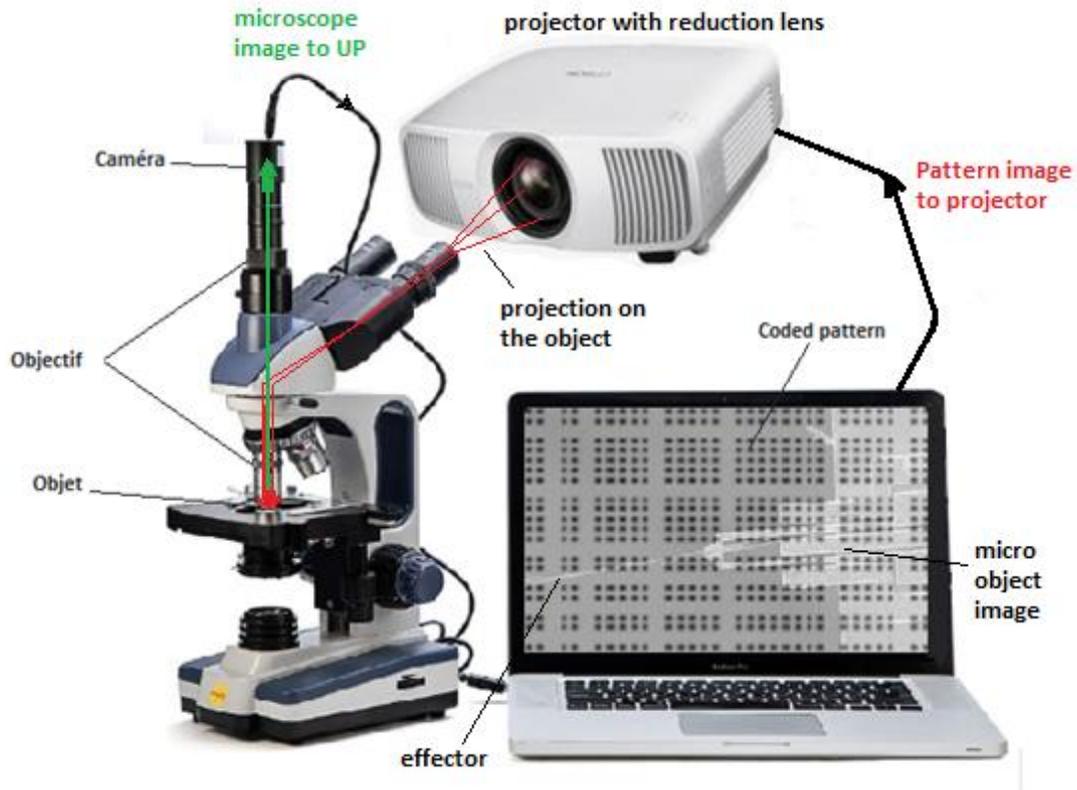


Figure II.18 : détail de la technique de mesure par projection des mires périodiques.

Le dispositif pratique illustré à la Figure II.18. Il est composé de :

- un projecteur (vidéoprojecteur CROSSTOUR P600, avec une brillance de 2000 lm, un balayage de 60 Hz et un contraste 2000 :1);
- une caméra (SC 300, 3.1 Migas Pixel, 1/2" CMOS senseur, avec une taille de pixel :  $3.2\mu\text{m} \times 3.2\mu\text{m}$ ) ;
- un objectif macroscopique (TOKURA MC Auto-zoom 55 mm 1 :3 :9,  $f = 70\text{-}220$  mm) ;
- une mire générée par un algorithme en MATLAB installé sur un microportable,
- un microportable avec un processeur Intel® Core™ i5 de 8e génération ;
- un microscope optique Swift 350B avec une platine mécanique de dimensions  $130 \times 130$  mm, et une plage de déplacement de l'étage suivant X et Y :  $70 \times 30$  mm.

Ces composantes forment entre eux une chaîne de mesure, qui peut être définie selon le vocabulaire international des termes métrologique [65, 66] comme suit :

**La chaîne de mesure** : est une « suite d'éléments d'un système de mesures qui constitue un seul chemin du signal depuis le capteur jusqu'à l'élément de sortie ».

En fait, la chaîne de mesure est un système composé de plusieurs éléments qui permettent de mesurer une grandeur physique.

La chaîne de mesure de dispositif de la Figure II.18 est présentée sur la Figure II.19.

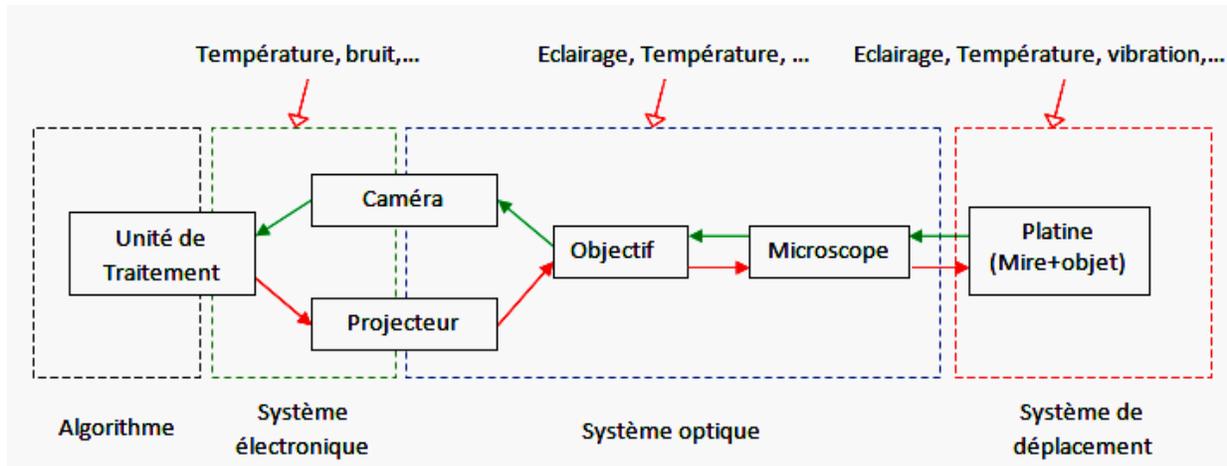


Figure II.19 : Détail de la chaîne de mesure et de ses composantes.

La chaîne de mesure de SMVM est composée de ces éléments :

- 1- **Une platine de positionnement ou système de déplacement** : c'est le système qui permet de déplacer la mire ou l'objet dans les différentes directions, il est affecté par la température, l'éclairage et la vibration.
- 2- **Le système optique** : il se compose d'une caméra, un projecteur, un objectif et un microscope. Ce système assure la projection de la mire sur l'objet ou la projection de l'objet sur le capteur de caméra. Il est essentiellement, affecté par la température, l'éclairage et la vibration.
- 3- **Le système électronique** : il présente toutes les composantes électroniques de caméra, de projecteur et de l'unité de traitement. Ce système est affecté par l'augmentation de la température des composantes internes et du bruit électronique.
- 4- **L'unité de traitement** : c'est l'élément qui coordonne l'ensemble des éléments de la chaîne de mesure et qui effectue les calculs nécessaires au traitement du signal. Elle contient en plus l'interface utilisateur qui permet à l'utilisateur de communiquer avec la chaîne de mesure.

## II.8 L'interface de mesure par MPP :

L'interface de mesure est un outil essentiel pour obtenir des mesures précises et exactes d'objets microscopiques. Il s'agit d'un outil indispensable pour la recherche scientifique, l'inspection industrielle et le contrôle de qualité. L'interface de mesure est conçue pour offrir un haut degré de précision et d'exactitude, permettant de mesurer avec précision la position et les dimensions des objets les plus petits. Grâce à des technologies de pointe telles que les lasers, les caméras et les sondes, les interfaces de mesure peuvent produire des données précises qui peuvent être utilisées pour analyser les propriétés et les caractéristiques des matériaux, détecter les défauts et assurer la qualité globale des produits.

Les interfaces de mesure sont souvent équipées de logiciels permettant une analyse et une visualisation avancées des données. Ces logiciels permettent aux chercheurs et aux ingénieurs de manipuler les mesures fournies par l'interface de mesure et d'extraire des informations précieuses d'ensemble de données complexes.

La Figure II.20 montre l'interface de mesure utilisée. Elle consiste en l'assemblage d'une image d'une MPC avec une image de l'objet à mesurer afin de créer une nouvelle image de l'objet qui occupe une position dans cette carte cryptée. De cette manière, nous pouvons effectuer des mesures directement, en spécifiant les dimensions à mesurer à l'aide de la souris, et nous pouvons également effectuer des mesures automatiques en transmettant l'image résultante à un programme indépendant qui traite automatiquement les images et extrait les informations nécessaires.

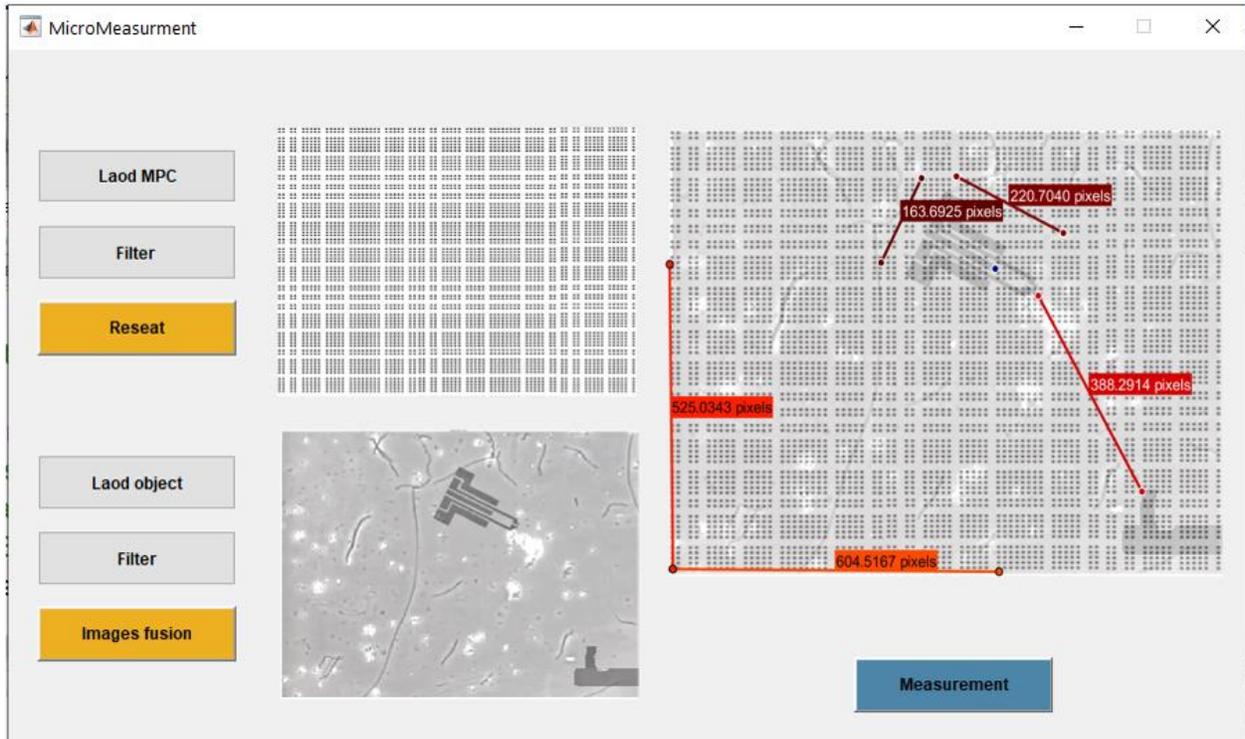


Figure II.20 : Interface de mesure par projection des mirens périodiques.

## II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié et détaillé la méthode de mesure microscopique à l'aide de mirens périodiques codées. Nous avons tenté de rapprocher la compréhension de cette méthode complexe, qui dépend d'un enchaînement précis de nombreuses étapes, comme la génération et la projection des mirens, passant aux étapes d'acquisition et de traitement des images obtenues afin d'extraire et de calculer les différentes dimensions et distances parcourues par le micro-objet.

Afin de répondre aux problématiques de justesse et de précision des mesures de ce système, nous devons effectuer une étude métrologique de ce système et de tous ses composants à la recherche des causes possibles pouvant affecter le résultat de la mesure. À travers de cette étude métrologique, nous éliminons certaines erreurs si possibles, et en corrigeons d'autres à l'aide de coefficients de correction et d'équations d'étalonnage.

# **Chapitre III : Étude métrologique des erreurs de mesure par un SMVM**

### III.1 Introduction

L'étude méthodologique qui suit vise dans un premier temps, à améliorer les performances et les qualités métrologiques de notre système de mesures. Sans une étude métrologique détaillée, nous ne pouvons être certains de la validité ou de l'exactitude des résultats de mesures obtenus à partir d'un système de mesures particulier. Sur cette base, nous avons réalisé dans ce chapitre cette étude pour évaluer et estimer les erreurs et les incertitudes commises dans le processus de mesure.

Pour identifier les différentes causes qui affectent la chaîne de mesure, on réalise un inventaire général sur les différentes causes à l'aide de la méthode d'Ichikawa, puis les deux méthodes A et B d'estimation des incertitudes, et enfin on a ciblé et basé sur quelques facteurs d'influence les plus dominants.

### III.2 L'erreur et l'incertitude de mesure

La métrologie est un domaine complexe et important qui utilise un ensemble de termes et de concepts spécifiques pour garantir la fiabilité, la précision et la justesse des mesures effectuées. La compréhension de ces termes est essentielle pour assurer des mesures fiables et précises dans de nombreux domaines.

les définitions des termes métrologiques ayant une relation avec cette thèse sont provenus du vocabulaire international des termes métrologique [65, 66]. Voici quelques définitions des termes les plus couramment utilisés :

1. **L'erreur de mesure** : « c'est la différence entre la valeur mesurée d'une grandeur et une valeur de référence », (Symbole :  $e$ ).
2. **L'erreur systématique** : « Composante de l'erreur de mesure qui, dans des mesurages répétés, demeure constante ou varie de façon prévisible », (symbolisé :  $e_S$ ).
  - La valeur de référence pour une erreur systématique est une valeur vraie, une valeur mesurée d'un étalon dont l'incertitude de mesure est négligeable,
  - L'erreur systématique et ses causes peuvent être connues ou inconnues. On peut appliquer une correction pour compenser une erreur systématique connue.
  - L'erreur systématique est égale à la différence entre l'erreur de mesure et l'erreur aléatoire ».
3. **L'erreur aléatoire** : « Composante de l'erreur de mesure qui, dans des mesurages répétés, varie de façon imprévisible (symbolisé :  $e_A$ ).
  - La valeur de référence pour une erreur aléatoire est la moyenne qui résulterait d'un nombre infini de mesurages répétés du même mesurande.
  - Les erreurs aléatoires d'un ensemble de mesurages répétés forment une distribution d'espérance mathématique nulle, qui peut être décrite par une variance.
  - L'erreur aléatoire est égale à la différence entre l'erreur de mesure et l'erreur systématique ».

4. **L'incertitude** : « paramètre qui caractérise la dispersion des valeurs attribuées à un mesurande, à partir des informations utilisées » [67], (symbolisé :  $I$ ).
5. **L'incertitude-type** : « incertitude de mesure exprimée sous la forme d'un écart-type ». Notant que chaque quantité ou chaque cause d'incertitude  $x_i$  associée à une incertitude-type  $u(x_i)$ .
6. **L'incertitude-type composée** : « incertitude-type obtenue à partir des résultats de mesure des grandeurs d'entrée dans un modèle de mesure », (symbolisé :  $u_c(y)$ ).

La loi de propagation des incertitudes permet ensuite de calculer la variance composée  $u_c(y)$  qui est la somme des variances de chaque cause d'incertitude :

$$u_c(y)^2 = \sum u(x_i) \quad (\text{III-1})$$

Et de cette relation on déduit l'écart-type composé :

$$u_c(y) = \sqrt{u_c(y)^2}. \quad (\text{III-2})$$

Alors, la multiplication d'écart-type composé par le facteur d'élargissement  $k$  donne l'incertitude élargie  $U$  :

$$U = k \cdot u_c(y). \quad (\text{III-3})$$

Enfin, l'incertitude de mesure  $I$  est définie comme suit :

$$I = \pm U = \pm k \cdot u_c(y) = 2 k \cdot u_c(y). \quad (\text{III-4})$$

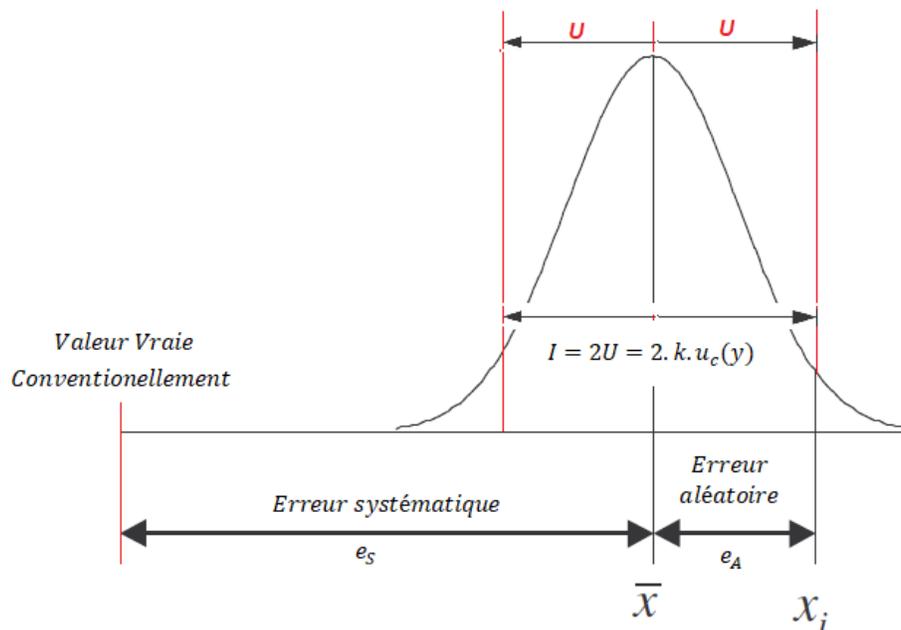


Figure III.1 : Relation entre les erreurs et l'incertitude de mesure.

### III.3 Présentation de la méthode d'Ichikawa

Afin de résoudre un problème, il est très important de connaître ses causes réelles, en utilisant le schéma la méthode d'Ichikawa pour orienter, collecter les données et les analyser afin de révéler la cause principale du problème.

La méthode d'Ichikawa, également appelée "carte d'Ichikawa" ou "diagramme d'Ichikawa", est un outil utilisé dans la gestion de la qualité et la résolution de problèmes. Elle a été développée par Kaoru Ishikawa, un expert japonais en qualité. Elle consiste à cartographier toutes les causes possibles d'un problème spécifique en utilisant une méthode de diagramme en arête de poisson. Le diagramme est divisé en plusieurs parties, chacune représentant un aspect différent du problème. Les causes possibles sont ensuite identifiées et reliées à chaque partie de la carte.

Le diagramme en arête de poisson est généralement divisé en six parties, qui sont : les méthodes, les machines, les matières, les milieux et les personnes impliquées dans le travail.

Une fois que toutes les causes possibles ont été identifiées et reliées aux différentes parties de la carte, il est alors possible d'analyser chaque cause pour déterminer la ou les causes principales du problème. Cela permet de comprendre les interactions entre les différents facteurs qui contribuent au problème ensuite de mettre en place des actions correctives pour résoudre le problème.

Pour préparer ce diagramme il faut suivre les quatre étapes suivantes :

#### Étape 01 : Constitution de groupe de travail ou le groupe de discussion

Le diagramme d'Ishikawa a utilisé en combinaison avec le remue-méninge qui veut dire rassembler une équipe pour réfléchir et analyser le problème ensemble.

#### Étape 02 : Poser le problème et récolter les idées

Les réflexions ou les commentaires sont classés et ordonnés dans un tableau récapitulatif ou sur un outil de gestion de projet.

Ensuite, on cherche les réponses sur la problématique des sources des erreurs commises par la technique de mesure de position par un système mire-vision.

Le problème de mesure est dessiné d'un côté sous forme d'un cadre, puis une large flèche est dessinée vers celui-ci, comme indiquée en noire sur la Figure III.2

#### Étape 03 : Structurer les idées sur l'une des cinq arrête

En cette étape, les principaux facteurs potentiels d'apparition du problème sont identifiés, et ces facteurs sont représentés en cinq groupes principaux : Matériel, Main-d'œuvre, Matière, méthodes et Milieu, chacun d'eux est relié par une flèche vers la flèche principale comme indiqué en rouge sur la Figure III.2.

Les cinq groupes des causes sont :

**Le milieu** ou les facteurs d'environnement entourés le dispositif et affectent la mesure.

**Les Moyens**, les outils et les instruments utilisés pour la mesure.

**Les méthodes** de mesure, dont on trouve par exemple les mesures directes et indirectes.  
**La main-d'œuvre** ou la personne qui effectue le processus de mesure.  
**La nature des matériaux** utilisés qui ont une capacité différente de dilatation thermique ou une grande sensibilité à la lumière.

Toutes les causes qui affectent la mesure doivent appartenir à l'un de ces cinq groupes (5M), qui commencent par la lettre M, et c'est pourquoi il a été nommé par ce nom (Voir le détail de chaque groupe dans la section III.4).

#### Étape 04 : Détermination les causes détaillées

À ce stade, nous recherchons les causes détaillées ou sous causes des groupes principaux précédents, elles sont également indiquées par des flèches vers leur cause principale, et ainsi de suite jusqu'à atteindre le plus grand détail possible, comme le montre en flèches bleus.

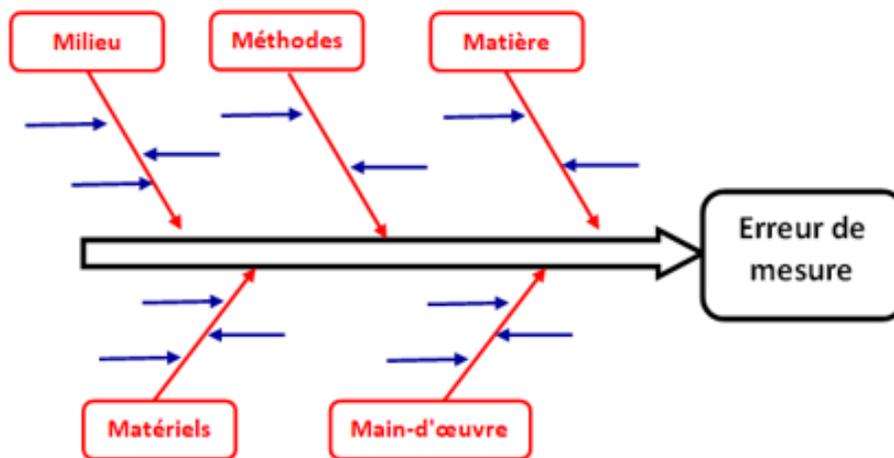


Figure III.2 : Diagramme cause-effet d'Ishikawa [68].

La simplification du diagramme 5M du processus de mesure représenté en détail sur l'annexe B, nous conduit au diagramme 5M simplifié obtenu est représenté au suivant sur la Figure III.3.

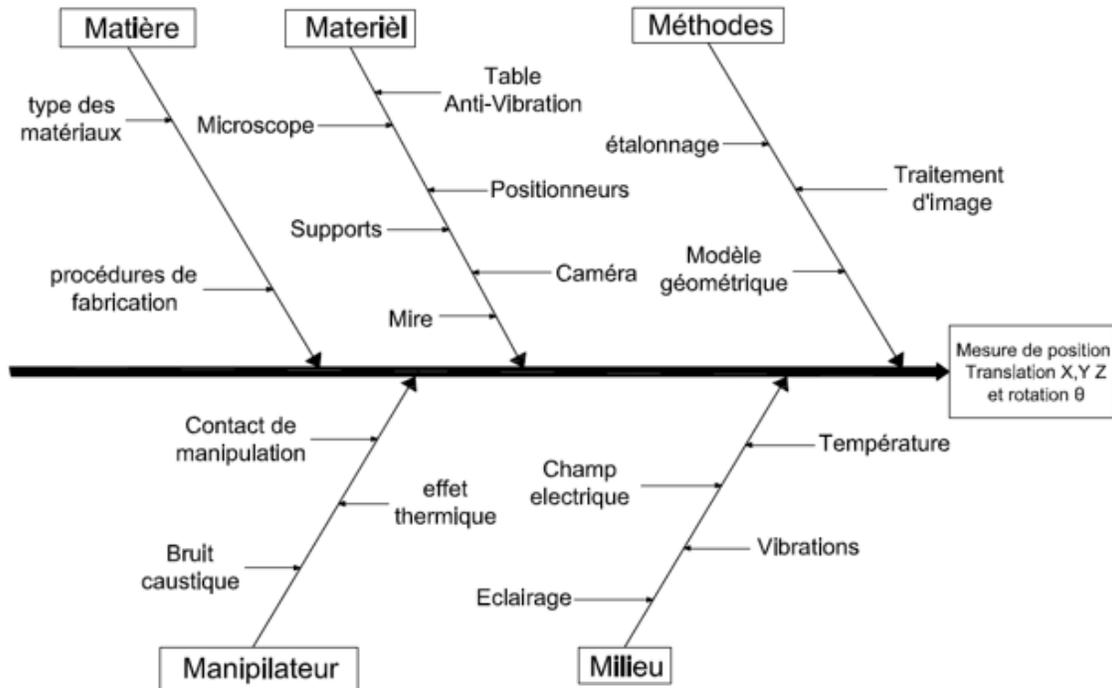


Figure III.3 : Diagramme simplifié d'Ishikawa des causes des erreurs de mesure par SMVM.

### III.4 Inventaire des sources d'incertitudes

La chaîne de mesure comprend toutes les étapes impliquées dans la réalisation d'une mesure, depuis la définition du besoin jusqu'à l'interprétation des résultats. Elle peut être influencée par de nombreux facteurs et les erreurs de mesure peuvent se produire à chaque étape de la chaîne. Il est donc essentiel d'identifier et de comprendre ces facteurs afin de minimiser les erreurs de mesure et d'assurer la précision et la fiabilité des résultats.

L'inventaire des sources d'incertitudes consiste à déterminer et de classer les différents facteurs influencés le résultat de la chaîne de mesure, tels que les conditions environnementales, les caractéristiques des instruments, la méthode de mesure, la calibration, les erreurs humaines, les interférences électromagnétiques, les effets thermiques, les erreurs de modélisation, les erreurs de traitement de données, les facteurs de vieillissement et autres.

Dans cette section, nous essayons d'énumérer et d'inventorier les causes possibles d'erreurs en détail et séparément dans chaque branche du diagramme cause-effet présenté sur la Figure III.2, ceci en utilisant la méthode de remue-méninge.

### III.4.1 Erreurs et incertitudes dues au milieu

Les conditions environnementales, telles que la température, l'humidité ou les vibrations, peuvent affecter les performances des instruments de mesure et donc la précision des résultats. La figure suivante illustre les différents facteurs environnementaux influents sur le résultat de mesure.

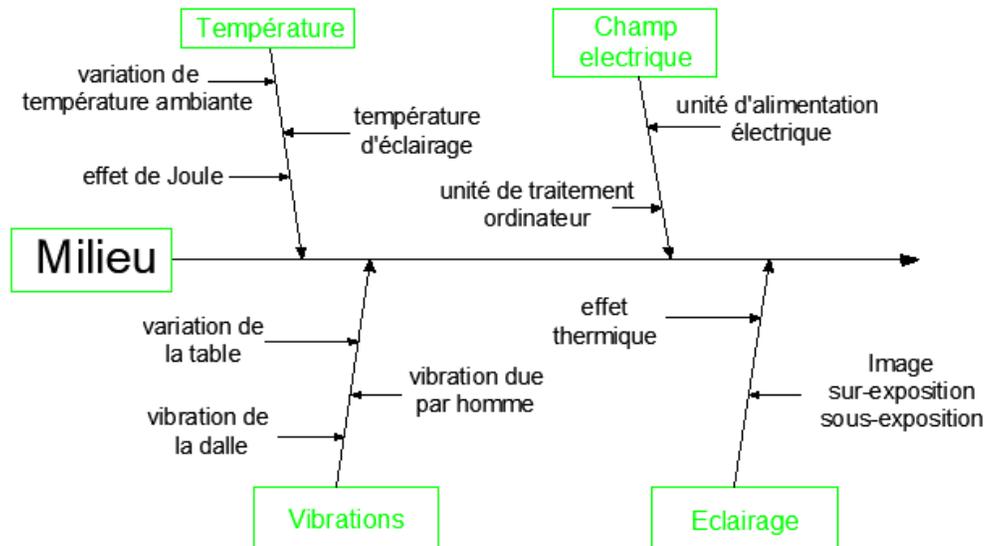


Figure III.4 : Facteurs d'influence de l'environnement sur la mesure de position par SMVM

#### III.4.1.1 Effet de la variation de la température

La variation de la température due de l'environnement et de l'éclairage provoque les effets suivants :

- La dilatation thermique de la mire provoque une dilatation de la longueur de la période  $\lambda$ , ce qui donne une dilatation de la distance mesurée comme suit :

$$d = \frac{(\lambda + \delta\lambda) \cdot \Delta\phi}{2\pi}$$

En fait, ce phénomène est de l'ordre de quelque micromètre sur toute la mire ce qui le rend négligeable sur la période.

- Dilatation différentielle des instruments : L'effet thermique différentiel sur les composantes du système de mesures se traduit par une différence de dilatation et de contraction, et c'est ce qui provoque un déséquilibre dans l'harmonie des composantes, notamment dans la déviation de la ligne optique entre la caméra, l'objectif et le projecteur.

En fait, ce problème peut être résolu par un réglage périodique de la ligne optique.

- L'effet de Joule due de la température interne des composantes électroniques est l'un des effets le plus influent sur le système de mesures, il provoque les deux bruits électroniques suivants :
  - Un bruit blanc  $V_{bruit}$  dans la caméra qui influe le contraste de l'image.

- Un bruit thermique  $V_{therm}$  au niveau du capteur photonique CMOS.

Le vecteur d'intensité lumineuse de l'image sera infecté par ces deux bruits comme suit :

$$I(x, y) = I_0 \left( 1 + \cos \left( \frac{2\pi}{PM} x + \phi_0 \right) \right) + V_{bruit} + V_{therm}$$

Le travail dans une salle métrologique bien conditionnée est la meilleure solution pour minimiser l'effet de la température.

### III.4.1.2 Effet de la vibration :

Les ondes vibratoires sont produites par les facteurs suivants :

- les ventilateurs électriques installés au niveau du projecteur et au niveau de l'unité de traitement,
- Vibrations terrestres qui influent la dalle et la table des essais,
- le mouvement humain.

Notant bien que l'installation du dispositif expérimental sur une table antivibrations, ça minimise la plupart de ces vibrations.

### III.4.2 Erreurs et incertitudes dues aux méthodes

La complexité du système de mesures et le nombre important de ses constituants exigent l'utilisation de plusieurs méthodes de calcul, de traitement, d'ajustement et d'approximation. La Figure III.5 présente les différentes méthodes utilisées au niveau de notre système de mesures.

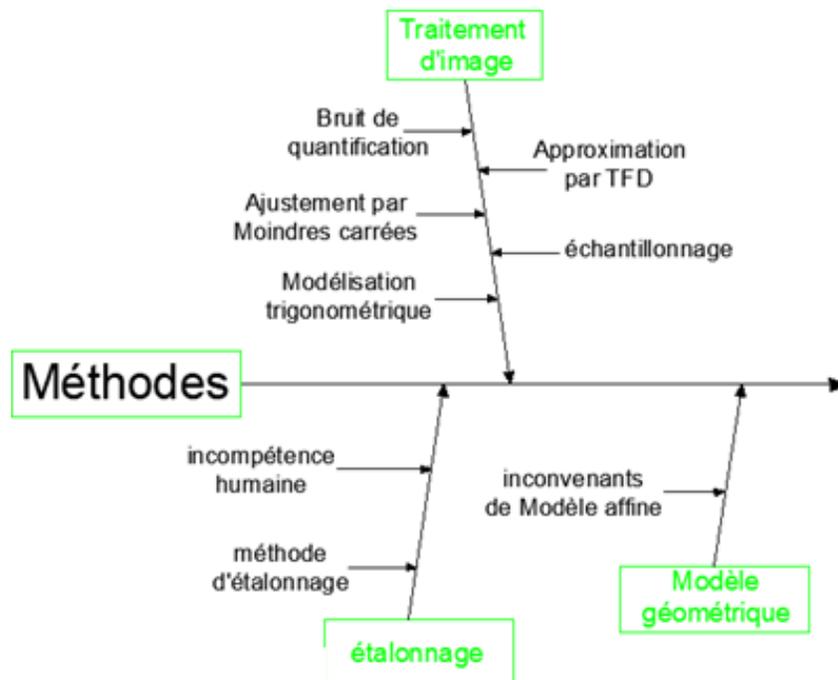


Figure III.5 : Facteurs d'influences des méthodes sur la mesure de position par SMVM.

En résumé, on peut classer ces méthodes comme suit :

- les méthodes de traitement d'images,
- les méthodes de quantification des données,
- les méthodes approximatives (TF et les moindres carrés, ...),
- les modèles et les méthodes d'étalonnage,
- le modèle géométrique de projection.

Généralement, les erreurs liées à différentes méthodes adaptées sont corrigées mathématiquement et avec des coefficients correcteurs.

### III.4.3 Erreurs et incertitudes dues aux mains d'œuvres

L'effet de la manipulation et l'intervention humaine est l'un des facteurs d'influence sur n'importe quel système de mesures. La main-d'œuvre s'influe de la manière suivante :

- le contact direct avec les instruments provoque des chocs et des vibrations indésirables,
- l'effet thermique dû à la température fournie par le corps humain,
- le bruit caustique sous forme des ondes vibratoires.

En fait, ces effets sont éliminés par l'automatisation de la plupart des tâches humaines et par insertion des protocoles d'asservissement et de mesure à distance, cela représente l'un des objectifs de cette thèse qui est l'inclusion d'un capteur d'image qui permette la manipulation à distance du système de mesures et de contrôle afin de réduire les erreurs résultant d'une intervention humaine directe.

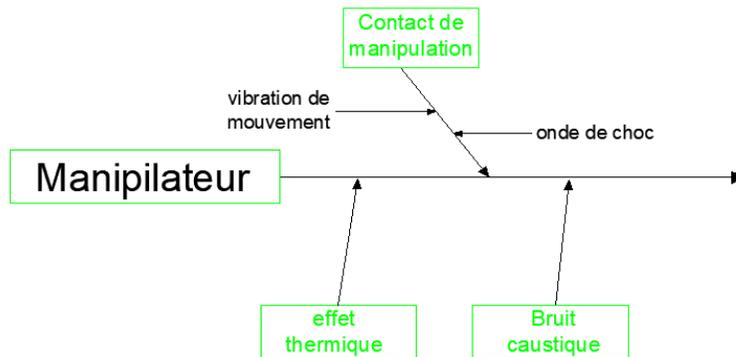


Figure III.6 : Facteurs d'influence des manipulateurs sur la mesure de position par SMVM

### III.4.4 Erreurs et incertitudes dues à la matière

Les matériaux utilisés jouent un rôle important dans la façon dont ils interagissent et se comportent avec les influences extérieures auxquelles ils sont exposés, comme la façon dont ils sont dilatés thermiquement ou la façon dont ils sont affectés par l'éclairage.

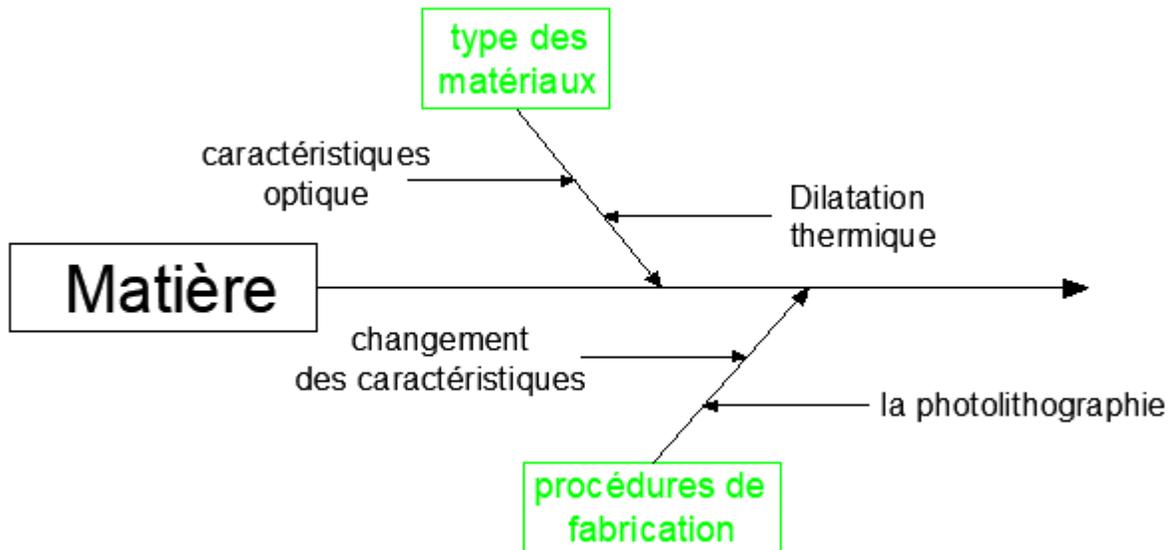


Figure III.7 : Facteurs d'influence de la matière sur la mesure de position par SMVM .

Résumant le comportement de la matière et la manière dont elle s'influe dans les points suivants :

- Les caractéristiques optiques de la mire et des lentilles de caméra ou des objectifs changent la qualité des images obtenues.
- La procédure de fabrication de la mire change également les caractéristiques optiques de la mire et donc change la qualité des images.
- La dilatation thermique déférente des matériaux provoque des problèmes de l'harmonisation entre les différentes composantes du système.

Ces imperfections et ces problèmes doivent être tenus en compte, surtout l'effet de la dilatation thermique qui exige une étude complète afin de la détermination de son degré d'influence.

### III.4.5 Erreurs et incertitudes dues aux matériels

La Figure III.7 présente les différents facteurs matériels qui affectent le résultat de mesures, dont on distingue les effets suivants liés :

- à la fabrication et à la position de la mire,
- à la caméra, son capteur et leurs paramètres intrinsèques,
- à la table antivibrations et aux supports de différentes composantes,
- au microscope, sa distance focale et son grossissement,
- aux micro-positionneurs ou à la platine,
- au projecteur.

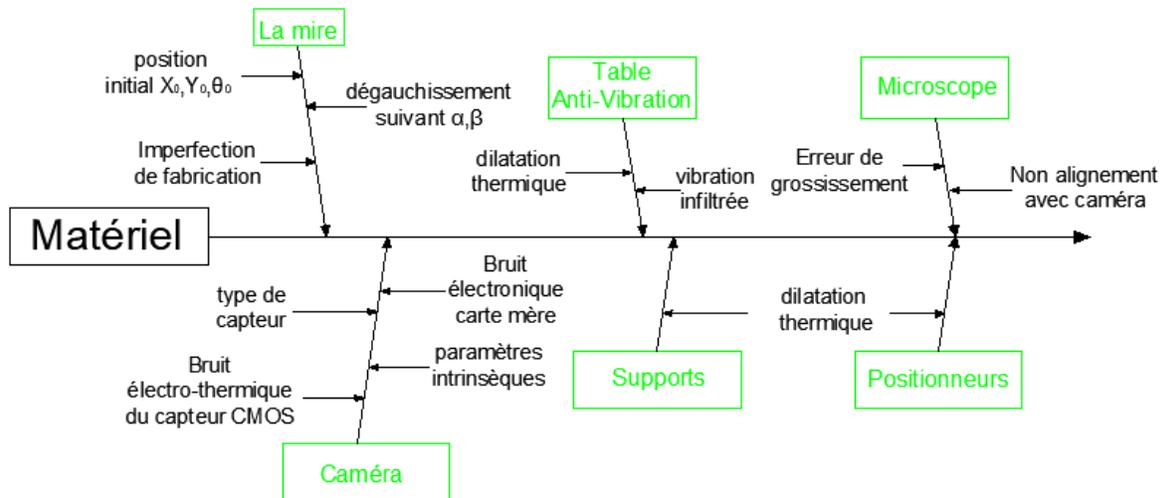


Figure III.8 : Facteurs d'influence des matériels sur la mesure de position par SMVM.

La plupart des effets précédents peuvent être négligés ou corrigés avec un ajustement spécial pour chaque composante ou avec un étalonnage global du système (Section V.3).

On base essentiellement dans cette section sur les effets liés à la mire, à la caméra et la platine.

#### a) Les effets liés à la mire :

La Figure III.9 présente les trois erreurs possibles dues au mauvais positionnement de la mire par rapport à la caméra, (a) erreur de positionnement initiale de centre de caméra sur un point de référence sur la mire. (b) déviation de la ligne optique de caméra (c) dégauchissement de la mire par un angle  $\theta$ .

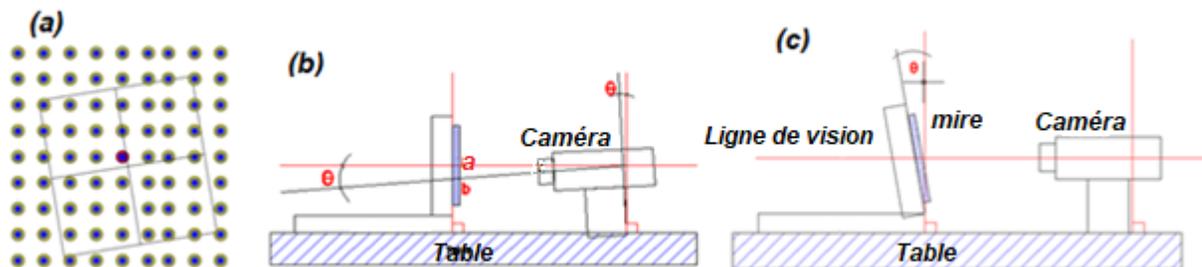


Figure III.9 : Erreur de positionnement de la mire par rapport à la caméra.

#### b) Les effets liés à la platine (le micro-positionneur) :

L'ajustement de la platine et l'élimination de ses erreurs exigent une étude spéciale et un étalonnage séparé. Nous citons parmi ses erreurs :

- Les erreurs d'étalonnage des micros-positionneurs,
- Les erreurs résultantes de l'effet de la dilatation thermique,

- Les erreurs de fixation,
- ...

Voir en détail l'étude des erreurs de la platine au Chapitre IV :

### c) Les effets liés à la caméra :

La caméra ou le système d'acquisition d'images est considéré comme la source principale des erreurs et des incertitudes dues de sa complexité et sa sensibilité aux effets externes. Donc, nous citons les erreurs suivantes liées à la caméra :

- Les paramètres intrinsèques et extrinsèques,
- Le bruit électronique et thermique,

## III.4.6 Inventaire récapitulatif

Comme on ne peut pas étudier toutes les causes liées au notre problème il va falloir choisir entre eux. Donc, il est nécessaire de hiérarchiser les causes pour maitre en place un plan d'activité. Nous nous sommes donc appuyés sur la méthode de remue-méninge afin de classer et d'ordonner les causes selon leurs influences et importances.

De nombreuses réunions ont eu lieu au laboratoire de l'institut universitaire de technologie Dijon-Auxerre (IUT), ainsi qu'au laboratoire d'automatismes et systèmes mécatroniques (AS2M) de l'institut FEMTO-ST en France. Le but était de discuter et d'identifier les facteurs causant les erreurs dans le système de mesures. Ces discussions ont abouti dans leur ensemble aux résultats suivants :

- la plupart des erreurs décrites ci-dessus relèvent des erreurs systématiques qui peuvent être corrigées en ajustant les caractéristiques des appareils et en y apportant quelques modifications,
- la plupart des facteurs d'influence sont d'importance secondaire et se situent à quelques nanomètres près, et leur effet est négligeable par rapport à d'autres facteurs, et donc ils peuvent être négligés dans cette étude.
- Les facteurs les plus influents peuvent être résumés et limités aux erreurs suivantes :
  - erreurs de répétabilité,
  - erreurs des facteurs de dilatations thermiques,
  - erreurs d'étalonnage du système de mesures (section V.3),
  - erreurs d'étalonnage de caméra (section V.2),
  - erreurs de platine de positionnement (Chapitre IV :).

L'étude étant limitée aux trois derniers types d'erreurs, due de la complexité du problème il n'a pas été possible d'étudier toutes les facteurs et sources d'erreurs .

## III.5 La méthode d'estimation du type A des incertitudes

L'évaluation des incertitudes selon la méthode d'estimation du type A est définie selon le guide pour l'expression de l'incertitude de mesure JCGM 100:2008(F) [67] comme suit :

« C'est l'évaluation d'une composante de l'incertitude de mesure par une analyse statistique des valeurs obtenues dans des conditions définies de fidélité ».

En fait, il existe trois types de conditions des essais de mesure :

- conditions de fidélité ou de répétabilité,
- condition de fidélité intermédiaire,
- condition de reproductibilité.

Cette méthode d'évaluation consiste à réaliser  $n$  testes de mesure et à calculer un écart-type expérimental :

$$u(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad \text{avec } n \geq 30 \quad (\text{III-5})$$

Notant que, le nombre  $n$  des mesures doit être supérieur ou égal à 30 testes.

En vue d'identifier les sources possibles d'incertitude dans une procédure de mesure, il est utile de décomposer l'analyse en un ensemble d'étapes génériques [69]:

- Définition de l'échantillonnage adapté (les étalons utilisés).
- Préparation des échantillons de référence (vérification et calibrage des étalons).
- Acquisition des données de l'étalonnage.
- Analyse et traitement des données.
- Présentation des résultats.
- Interprétation des résultats.

Nous adaptons cette méthode statistique pour notre problème afin d'estimer et d'évaluer les incertitudes et les erreurs provoquées par le processus d'étalonnage de la caméra et l'étalonnage du système de mesures (Voir sections V.2 et V.3).

### III.6 La méthode d'estimation du type B des incertitudes

L'évaluation des incertitudes selon la méthode d'estimation du type B est définie et selon le Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure JCGM 100:2008(F) [67] comme le suivant :

« Pour une estimation  $x_i$  d'une grandeur d'entrée  $X_i$  qui n'a pas été obtenue à partir d'observations répétées, la variance estimée associée  $u^2(x_i)$  ou l'incertitude-type  $u(x_i)$  est évaluée par un jugement scientifique fondé sur toutes les informations disponibles au sujet de la variabilité possible de  $X_i$ . L'ensemble d'informations accumulées peut comprendre :

- des résultats de mesures antérieures ,
- l'expérience ou la connaissance générale du comportement et des propriétés des matériaux et instruments utilisés ,
- les spécifications du fabricant,
- les données fournies par des certificats d'étalonnage ou autres certificats ,
- l'incertitude assignée à des valeurs de référence provenant d'ouvrages et manuels ».

Lors de l'évaluation des composantes de l'incertitude par la méthode type B, il est nécessaire de prendre en compte et d'inclure au moins les sources possibles suivantes [70] :

- l'incertitude d'étalonnage rapportée attribuée aux étalons de référence,
- l'étalonnage des équipements de mesure,
- la procédure opérationnelle,
- variabilité entre différents membres du personnel effectuant le même type de mesure,
- les effets des conditions environnementales sur tout ou partie des éléments ci-dessus.

Par conséquent, nous adaptons cette méthode pour notre problème afin d'estimer et d'évaluer les incertitudes et les erreurs provoquées par la mire et la platine de positionnement en raison de la difficulté d'application de processus statistique.

### III.6.1 Estimation type B des incertitudes dues aux caractéristiques de la mire

Antoine André et al. [71] ont réalisé une étude sur l'impact de la taille de la période physique sur la précision mesurée. Le motif est généré avec une séquence LFSR 8 bits et les périodes physiques utilisées vont de 1 pixel à 20 pixels, soit en équivalence de 9  $\mu\text{m}$  à 1,2 mm (1 pixel=10  $\mu\text{m}$ ). Les résultats de l'incertitude obtenus sur les trois degrés de liberté x, y et  $\theta$  sont présentés dans le tableau.

On admet pour notre étude le résultat d'incertitude la plus petite qui corresponde à la longueur de période 9  $\mu\text{m}$ , donc on écrit les résultats suivants :

$$\begin{cases} u_{\lambda}(x) = 0.96 \text{ nm} \\ u_{\lambda}(y) = 0.77 \text{ nm} \\ u_{\lambda}(\theta) = 1.07 \mu\text{rad} \end{cases}$$

$u_{\lambda}(x)$ ,  $u_{\lambda}(y)$  et  $u_{\lambda}(\theta)$ : Présentent l'incertitude de mesure due par l'impact de la longueur de période  $\lambda$  dans le sens x, y, et  $\theta$  respectivement. x, y et  $\theta$  sont les grandeurs d'entrée dans le modèle de la mesure.

Tableau III.1 : L'incertitude obtenue avec les différentes longueurs de la période [71].

Taille de la période ( $\mu\text{m}$ )	Incrtitude suivant l'axe x	Incrtitude suivant l'axe y	Incrtitude de l'angle de rotation $\theta$
9	0.96	0.77	1.07
60	7.11	6.88	1.11
180	10.92	9.15	1.33
300	14.84	11.12	1.61
600	18.97	14.28	1.76
1200	22.09	18.02	1.98

Le tableau suivant illustre la variation de l'incertitude selon la taille de l'image de la mire.

Tableau III.2 : L'incertitude obtenue avec les différentes tailles de l'image [71].

Taille de l'image	Incrtitude suivant l'axe x	Incrtitude suivant l'axe y	Incrtitude de l'angle de rotation $\theta$
1024 x 1024	10.09 nm	9.68 nm	1.13 $\mu$ rad
512 x 512	10.76 nm	12.14 nm	3.28 $\mu$ rad
256 x 256	14.02 nm	14.57 nm	10.06 $\mu$ rad

On admet les valeurs suivantes obtenues par des images d'une taille de 1024 x 1024 (taille adaptée dans cette thèse) :

$$\begin{cases} u_{taille}(x) = 10.09 \text{ nm} \\ u_{taille}(y) = 9.68 \text{ nm} \\ u_{taille}(\theta) = 1.13 \mu\text{rad} \end{cases}$$

### III.7 Conclusion

Dans cette partie de l'étude, nous avons extrait les causes les plus importantes d'erreurs qui affectent le résultat de la mesure, car nous avons fait un inventaire et une classification des causes et les avons incluses dans cinq sources différentes : les moyens, les méthodes, la main-d'œuvre, les matériaux et le milieu. Puis nous avons séparé chaque source et en avons extrait la cause la plus influente qui d'autre. Nous en sommes venus à énumérer les causes suivantes comme facteurs d'erreurs les plus importants :

- Effet du système de déplacement (platine de positionnement).
- L'effet d'étalonnage du système d'acquisition (la caméra).
- Effet de l'étalonnage du système de mesures dans son ensemble.
- L'effet de la qualité et les propriétés de la mire.

Dans notre étude, nous étions satisfaits de ces causes, bien qu'elles ne soient pas les seules qui affectent la précision de la mesure, et nous avons laissé d'autres causes pour d'autres études futures. Cependant, nous avons essayé de donner un exemple de la méthode qu'il convient d'adopter pour étudier ces causes.

Les points suivants seront étudiés en détail au niveau des chapitres suivants :

- Dans le troisième chapitre, nous étudierons les erreurs et les incertitudes de la platine ou du système de positionnement.
- Nous étudierons l'effet de l'étalonnage sur la précision des résultats du système d'acquisition ou la caméra dans le quatrième chapitre.
- Enfin nous étudierons l'étalonnage du système de mesures dans son ensemble pour trouver l'équation et la courbe d'étalonnage.

## **Chapitre IV : Erreurs et incertitudes liées à la platine de micro-positionnement.**

## IV.1 Introduction

La platine d'un microscope est la partie sur laquelle l'échantillon est placé et maintenu en place pour l'observation. Elle est généralement une plaque rectangulaire en métal ou en verre, parfois avec des clips pour maintenir les échantillons en place. Sur la platine, il peut également y avoir une commande pour déplacer l'échantillon horizontalement et verticalement, appelée mouvement XY. En outre, il peut y avoir des graduations pour mesurer les mouvements et permettre des observations précises.

La platine est souvent équipée d'un diaphragme pour régler la quantité de lumière qui atteint l'échantillon, ce qui peut être important pour améliorer la qualité de l'image observée. Certains microscopes ont également une platine motorisée, qui peut être contrôlée à distance pour faciliter l'observation de l'échantillon sous différents angles et pour créer des images plus complexes.

Dans cette partie de la thèse, nous avons essayé de proposer et d'étudier une platine en AMF, et nous avons essayé d'évaluer et d'estimer les erreurs possibles avec ce type de platine.

Par exemple, les microscopes à fluorescence ont souvent une platine chauffante pour maintenir l'échantillon à une température constante pendant l'observation.

Les microscopes électroniques ont également des platines spéciales qui sont conçues pour manipuler des échantillons à haute résolution et dans des conditions à vide.

En somme, la platine est un élément crucial du microscope qui permet de maintenir l'échantillon en place et de l'observer sous différents angles. Elle peut être équipée de différentes fonctionnalités pour améliorer la qualité de l'image et faciliter l'observation de l'échantillon.

### IV.1.1 Les différents types des platines

Il existe différents types de platines de microscope, qui varient en fonction de leur application, de leur conception, de leur taille et de leur capacité à manipuler différents types d'échantillons. Ils sont ainsi variés selon le type de microscope. Voici quelques exemples de types de platines de microscope :

- 1- **Platine manuelle** : il s'agit de la platine la plus courante et la plus simple, qui peut être déplacée manuellement à l'aide de vis ou de boutons. Cette platine est généralement utilisée pour des observations simples et des échantillons de petite taille.
- 2- **Platine motorisée** : ce type de platine est équipé d'un moteur qui permet de déplacer l'échantillon de manière automatique, à l'aide d'un ordinateur ou d'un système de contrôle à distance. Cela permet de faciliter l'observation de l'échantillon sous différents angles et d'obtenir des images plus complexes.
- 3- **Platine chauffante** : cette platine est équipée d'un système de chauffage pour maintenir l'échantillon à une température constante pendant l'observation. Elle est souvent utilisée pour les échantillons biologiques qui nécessitent une température spécifique pour rester en vie.
- 4- **Platine à vide** : ce type de platine est utilisé pour les microscopes électroniques, qui nécessitent des conditions à vide et des conditions particulières pour obtenir des images haute résolution.

- 5- **Platine à mouvement XY** : cette platine permet de déplacer l'échantillon horizontalement et verticalement pour l'observer sous différents angles. Elle est souvent équipée d'une graduation pour mesurer les mouvements et permettre des observations précises.
- 6- **Platine de grand format** : cette platine est plus grande que les platines standard et peut-être utilisée pour manipuler des échantillons plus volumineux ou pour des applications industrielles.

En somme, il existe de nombreux types de platines de microscope, chacune ayant ses propres caractéristiques et fonctionnalités. Le choix de la platine dépendra de l'application pour laquelle elle sera utilisée et de la nature de l'échantillon à observer.

## IV.2 États de l'art sur les platines

La platine de positionnement des micro-objets (spécimens biologiques, des robots miniatures, des micros-mires...) au-dessous d'un microscope optique ou électronique, c'est un système composé de plusieurs chariots déplace l'un par rapport à l'autre à l'aide des vis de guidage.

Cette platine sert à soutenir l'objet à examiner et consiste à positionner soit :

1. une mire ou un microrobot par rapport au spécimen,
2. un spécimen par rapport à la mire,
3. ou un spécimen par rapport au microrobot.

Généralement la platine se compose d'un assemblage des étages, jusqu'aux trois ou quatre étages selon le nombre des degrés de liberté désirés, on trouve donc :

- platine linéaire à une dimension suivant l'axe X ou Y,
- platine à deux dimensions dans le plan XY,
- platine à trois dimensions dans l'espace XYZ,
- platine rotative à trois degrés de liberté dans le plan  $XY\theta$ ,
- platine goniométrique.
- ...

Il existe aussi, des platines simples et d'autres complexes plus sophistiqués. L'utilisation de ces platines sophistiquées est accompagnée, toujours et dans la plupart des cas, avec l'utilisation de microscope photonique ou électronique pour assurer une multitude tâches dans le domaine scientifique et technologique. On cite à titre d'exemple :

- le balayage de plusieurs échantillons simultanément,
- assurer un positionnement très précis dans des environnements,
- positionnement des systèmes d'imagerie en espace,
- inspection de semi-conducteurs et des miroirs systèmes,
- automatisation de processus de micro-fabrication,
- etc....

La Figure IV.1, illustre l'un des principes de commande et d'orientation complexe d'un micro-objet dans l'espace par une grande précision grâce au mouvement précis d'une platine à 5 DDL.

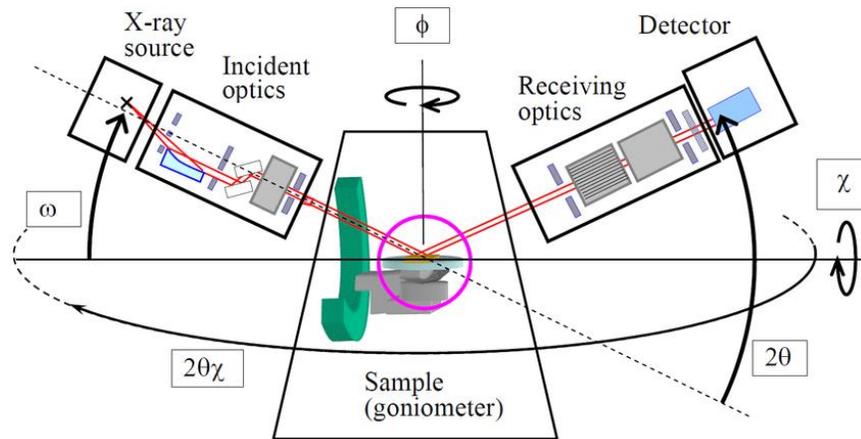


Figure IV.1 : Une illustration schématique d'une platine d'un système goniométrique [72].

Les platines d'échantillonnage fabriquées par le groupe Bruker [Int 3] sont un exemple de positionnement multi degrés de liberté. L'échantillon est placé dans un système goniomètre capable de faire des manipulations de haute précision. Notant que, les différentes composantes sont entièrement automatisées. Le spécimen est maintenu au centre de vision d'un goniomètre grâce au concept de mouvement universel même lorsque la platine qui contient le spécimen se déplace dans une myriade de directions. On utilise jusqu'aux cinq degrés de liberté, dont trois translations suivant la direction X, Y et Z, une rotation  $\phi$  et une inclinaison  $\psi$ .

La Figure IV.2 montre l'un des types des platines assemblée avec un microscope optique pour étudier le mouvement en espace ou en plan des microrobots et des micro-objets. Elle est fabriquée en alliage d'aluminium avec les caractéristiques suivantes :

- Une taille de 60x60 mm, avec graduation de la vis micrométrique d'ordre de 0,01 mm,
- Plage de mesure suivant les deux axes x et y 6,5 cm, avec une précision de déplacement d'ordre de 0.01 mm,
- Une portée angulaire de 360° avec une précision de rotation d'ordre de 10'.



Figure IV.2: Table panoramique linéaire sur l'axe XY avec plate-forme rotative [int 2].

On distingue ainsi, selon le type de commande, les platines automatiques ou manuelles avec des vis de positionnement micrométrique, les platines électriques, piézoélectriques ou d'autres technologies.

Yunsong, a fait l'analyse par éléments finis et l'expérimentation d'une platine automatique en micromouvements basés sur le phénomène de la flexion des poutres en 2 degrés de liberté (Figure IV.3).

La platine est composée de quatre éléments parallèles avec une configuration symétrique, et chaque élément est composé de deux articulations prismatiques connectées en série. Elle avait deux axes, et chaque axe était composé d'une poutre à double serrage. Des éléments en PZTs sont intégrés comme des actionneurs pour assurer le pilotage en micromouvements.

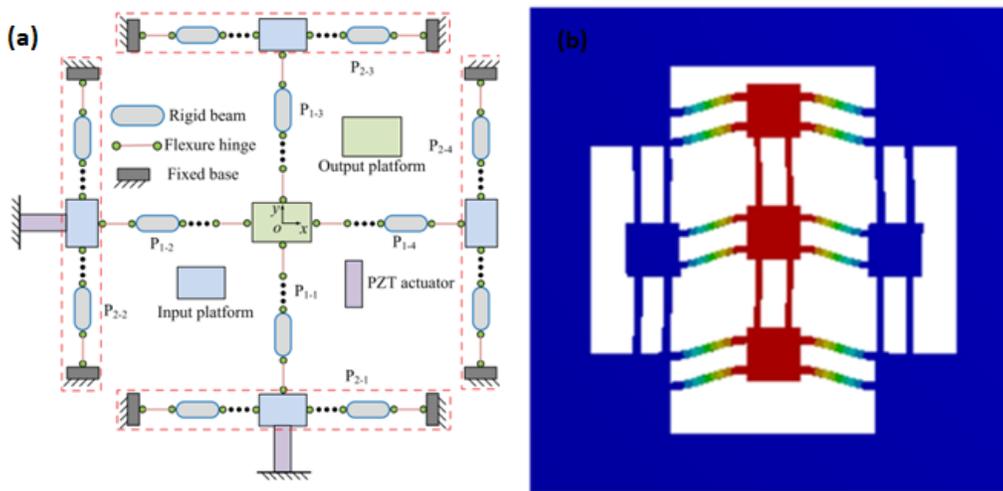


Figure IV.3 : Platine micrométrique en PZTs [73].

- (a) : détail des différents éléments constituant la platine.
- (b) : illustration de résultats de simulation en éléments finis d'un déplacement suivant l'axe y.

Les robots parallèles continus présentés par Benjamin et al (Figure IV.4) sont utilisés comme des plates-formes pour assurer une manipulation de haute précision. Grâce à cette structure mécanique sans joints et avec des tiges d'une flexibilité importante permettant une plage de déplacement large par rapport aux autres mécanismes. Les trois tiges élancées de cette conception fournissent des déplacements importants et continus. Ces tiges qui remplacent les maillons et les articulations conventionnels sont reliées à une plateforme rigide et mobile. Notant que cette conception est limitée seulement aux déplacements en trois degrés de liberté planaires  $XY\theta$ .

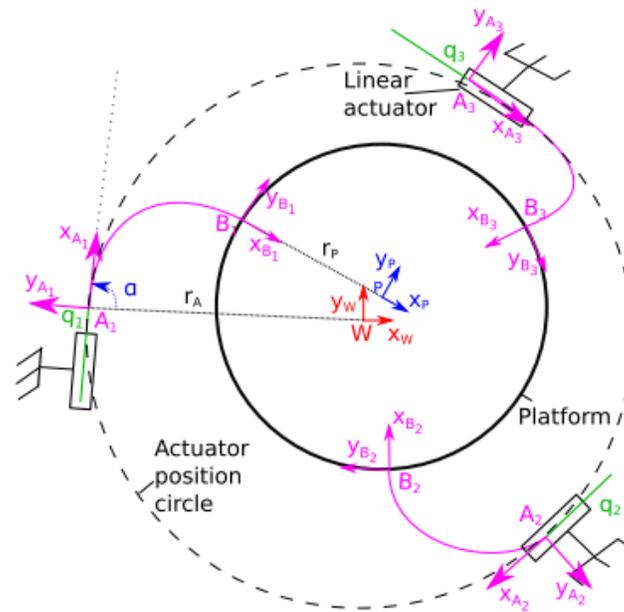


Figure IV.4 : Platine à 3 DDL sous forme d'un robot parallèle continu [74].

Autre technique a été utilisée et étudiée par Ashwin et al [75], dans la conception d'une plateforme rotative à l'aide de la transformation de l'allongement des câbles en AMF, et à l'aide des ressorts de rappel pour revenir à la position contraire.

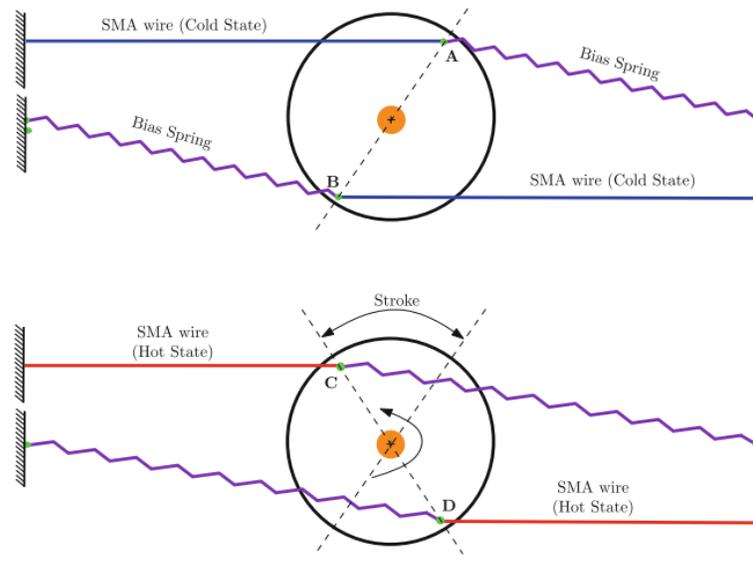


Figure IV.5 : Mécanisme d'un mouvement rotatif avec deux câbles d'AMF [75].

Un nouveau capteur  $\mu$ Force multiaxe avec un grand rapport plage/résolution est étudié et fabriqué par B. Tiwari et al.[76], ce dispositif de détection est très utile pour une large gamme d'application, il repose sur une stratégie de détection dans laquelle un micro-motif codé en 2D est crypté sur la partie mobile de la plate-forme conforme (Figure IV.6). Ce motif codé permet une détection visuelle multiaxes des déplacements sur une longue plage étendu. Le traitement

d'images dans l'espace de Fourier assure une interpolation sous pixel conduisant à la haute résolution. Le dispositif est fabriqué, dans une salle blanche, sur une plaquette de silicium pour répondre à la fois aux exigences d'encodage de précision et à un comportement mécanique fiable.

La conception doit conserver l'avantage de la symétrie et du comportement élastique. La taille globale du système proposé est de  $29,5 \text{ mm} \times 29,5 \text{ mm}$ , avec le corps rigide central de  $5,2 \text{ mm} \times 5,2 \text{ mm}$ , des poutres autour d'une largeur de  $50 \text{ }\mu\text{m}$  et d'une épaisseur de  $500 \text{ }\mu\text{m}$ .

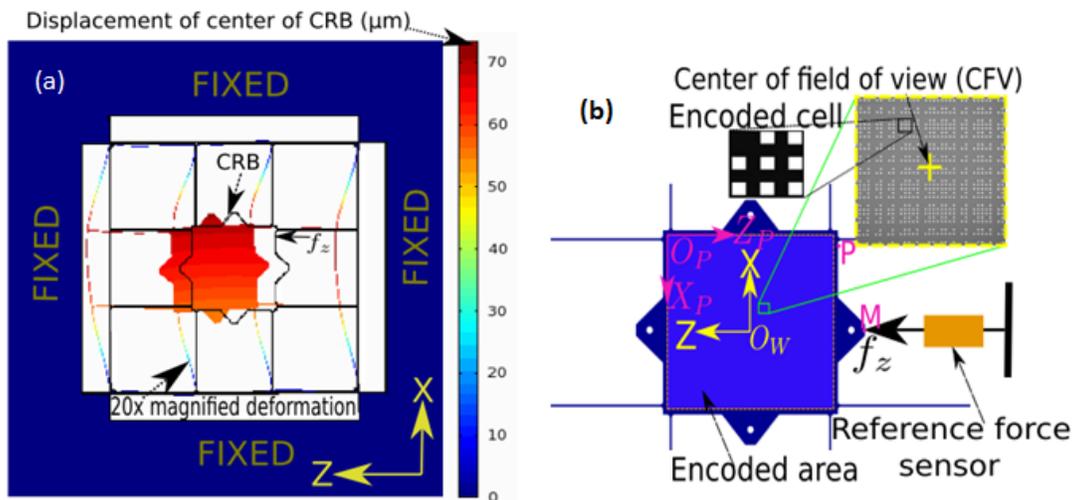


Figure IV.6 : Plateforme de détection de force [76].

(a) : Principe de déplacement en 2D,

(b) : Zoom sur une partie de la mire périodique codée

Cette plate-forme capable de détecter des micro-forces en deux dimensions planes et un couple autour du plan avec une résolution de détection inférieure à  $2 \text{ }\mu\text{N}$  et une plage de force de  $110 \text{ mN}$ .

### IV.3 Les causes des erreurs de positionnement par une platine

Les erreurs de positionnement de la platine peuvent être causées par plusieurs facteurs, tels que :

- 1- **Le jeu mécanique** : les mouvements de la platine sont généralement transmis par des vis, des engrenages ou des courroies. Si ces composants ne sont pas bien ajustés ou s'ils présentent un jeu mécanique, cela peut entraîner des erreurs de positionnement.
- 2- **Les vibrations** : les vibrations externes, telles que celles produites par les instruments voisins ou par les mouvements du sol, peuvent affecter la précision du positionnement de la platine.
- 3- **L'usure des composants** : les vis, les engrenages et les courroies peuvent s'user avec le temps et affecter la précision de la platine.
- 4- **La qualité de la surface de la platine** : si la surface de la platine n'est pas plane ou si elle présente des irrégularités, cela peut entraîner des erreurs de positionnement.
- 5- **La température** : les changements de température peuvent entraîner une dilatation ou une contraction des composants de la platine, ce qui peut affecter la précision du positionnement.
- 6- **Les erreurs de calibration** : si la platine n'est pas correctement calibrée, cela peut entraîner des erreurs de positionnement.

Pour minimiser ces erreurs, il est important d'entretenir régulièrement la platine et de s'assurer que les composants mécaniques sont bien ajustés. Il est également recommandé de placer la platine sur une surface stable et de minimiser les vibrations externes autant que possible. Enfin, il est important de calibrer la platine régulièrement pour garantir une précision maximale.

### IV.4 Étude d'une platine en AMF

Les platines en alliage à mémoire de forme sont des platines de microscope qui sont fabriquées à partir d'un alliage métallique spécial, appelé alliage à mémoire de forme. Cet alliage est constitué de métaux tels que le nickel, le titane ou le cuivre, et possède la capacité de retrouver sa forme d'origine après avoir été déformé par une contrainte mécanique.

Les platines en alliage à mémoire de forme offrent plusieurs avantages par rapport aux platines traditionnelles. Elles peuvent offrir une précision de positionnement accrue, car l'alliage à mémoire de forme peut être programmé pour revenir à une position précise après chaque mouvement.

De plus, les platines en AMF peuvent être utilisées dans des environnements à température variable, car l'alliage est capable de s'adapter à différentes températures sans se déformer. Elles peuvent également être utilisées pour manipuler des échantillons de formes complexes, car l'alliage à mémoire de forme peut être façonné dans des formes et des tailles variées.

Cependant, les platines en AMF peuvent être plus coûteuses que les platines traditionnelles, car l'alliage est plus cher et plus difficile à fabriquer. De plus, elles peuvent nécessiter une programmation et une calibration plus complexes pour garantir une précision maximale.

En outre, ces platines peuvent également présenter quelques inconvénients. Par exemple, elles peuvent être plus sensibles aux vibrations et aux perturbations externes que les platines traditionnelles en raison de leur sensibilité à la chaleur. Elles peuvent également nécessiter des

précautions particulières pour le stockage et la manipulation, car l'AMF peut être endommagé par des contraintes excessives ou des températures élevées.

#### IV.4.1 Conception et principe de fonctionnement

Par conséquent, dans les sections ci-dessus, nous avons présenté des exemples d'études relativement réussies dans lesquelles les auteurs ont tenté de proposer un modèle de platine pratique et efficace basé sur diverses techniques et moyens.

À la lumière de ces recherches, nous présentons dans cette section un modèle de platine basé sur le phénomène de mémoire de forme de l'alliage Nitinol.

La configuration proposée de la Figure IV.7 est se compose de trois parties essentielles :

- un support immobile : le cadre extérieur ou le support fixé qui contient les autres composantes ;
- un cadre intérieur mobile par rapport au cadre extérieur avec deux degrés de liberté suivant x et y ;
- un disque rotatif, avec un seul degré de liberté, fixé par son axe de rotation au milieu du cadre intérieur.

On a trois déplacements suivant les directions x, y et  $\theta$ , assurés de la manière suivante :

- la dilatation et la contraction des barres 1 et 2 provoquent un déplacement suivant y ;
- la dilatation et la contraction des barres 3 et 4 provoquent un déplacement suivant x ;
- la rotation  $\theta$  autour de l'axe du disque est assurée par la dilatation et la contraction de la barre 5.

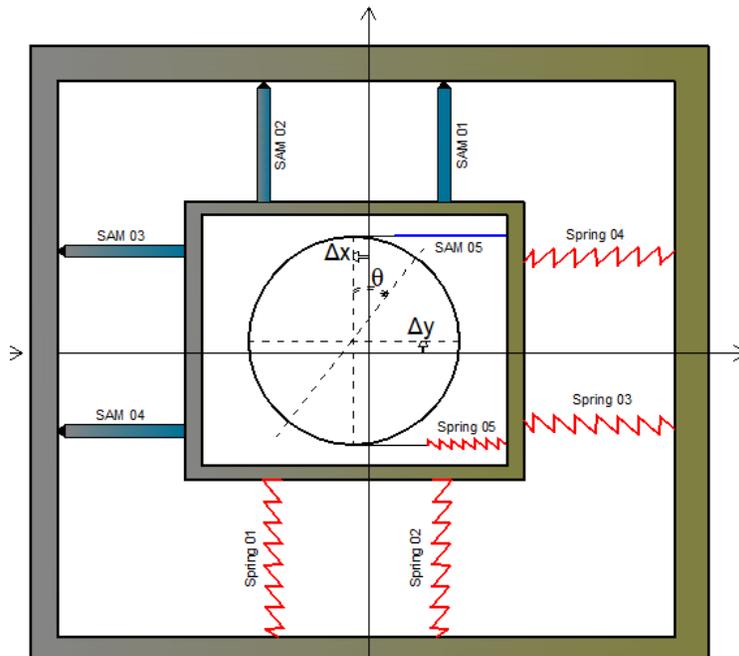


Figure IV.7 : Configuration d'une platine à la base l'allongement de quarts barres et l'allongement d'une corde en AMF.

Les différents cadres sont fabriqués en matériau à faible dilatation thermique pour éviter les déplacements dus aux changements brusques de température.

Les cinq ressorts représentés en rouge sur Figure IV.7 fournissent une force de rappel qui ramène la platine à sa position initiale.

Les barres de l'AMF sont fixées au support avec un appui double, ce qui élimine le moment de flexion.

Le principe de contrôle de cette platine est illustré à la Figure IV.8 qui présente la manipulation des six barres d'AMF de platine en utilisant les deux effets opposés, l'effet de joule, pour augmenter la température dans les barres et atteindre la dilatation requise, par contre, l'effet de Peltier est sert à abaisser la température des barres et provoque le retrait nécessaire.

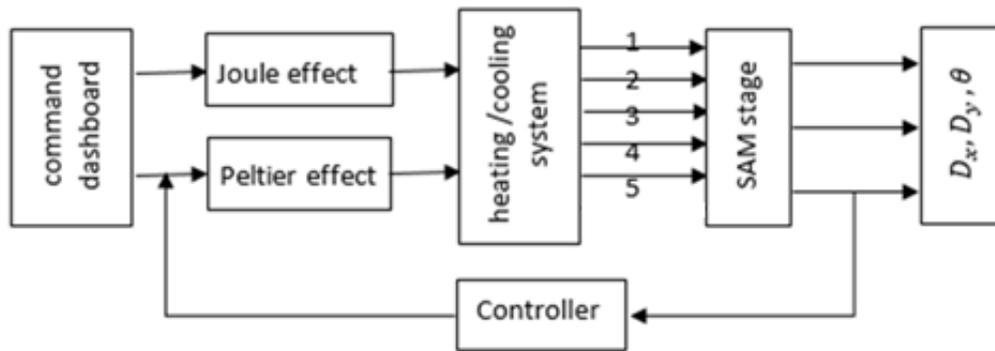


Figure IV.8 : Commande et contrôle d'une platine en AMF [77].

La difficulté technique d'obtention et de maîtrise de l'effet Peltier oblige à l'abandonner et à recourir à une autre méthode, qui consiste essentiellement à stopper le mécanisme à effet Joule et d'inverser l'action de dilatation par l'effet de ressorts montés en sens inverse.

On présente dans le tableau suivant le principe d'obtention d'un déplacement désiré en fonction de barres excitées.

Tableau IV.1: Principe d'obtention d'un déplacement désiré en fonction des barres excitées.

Déplacement désiré	Barres excités
$D_x, -D_x$	(3,4), $\overline{(3,4)}$
$D_y, -D_y$	(1,2), $\overline{(1,2)}$
$\theta, -\theta$	5, $\overline{5}$

## IV.4.2 Simulation de contrôle d'une barre en AMF

La manipulation et le contrôle de la platine ou des préhenseurs dépendent sur le changement de l'état physique d'un matériau sensible comme les matériaux piézoélectrique ou les AMF lorsqu'ils sont soumis à une excitation électrique, thermique ou magnétique.

La modélisation de comportement des AMF et les équations qui décrivent les différentes transformations dans cette section sont bien détaillées dans [78-84].

La Figure IV.9 présente le principe de fonctionnement d'un bloc de contrôle d'une barre en AMF. Ce bloc est constitué de :

- une source d'un courant électrique sous forme d'un potentielle ou d'une intensité électrique,
- un contrôleur proportionnel, intégral et dérivatif (contrôleur de type PID),
- un bloc d'excitation thermique,
- un bloc de comportement d'une barre en AMF,
- un oscilloscope d'affichage.

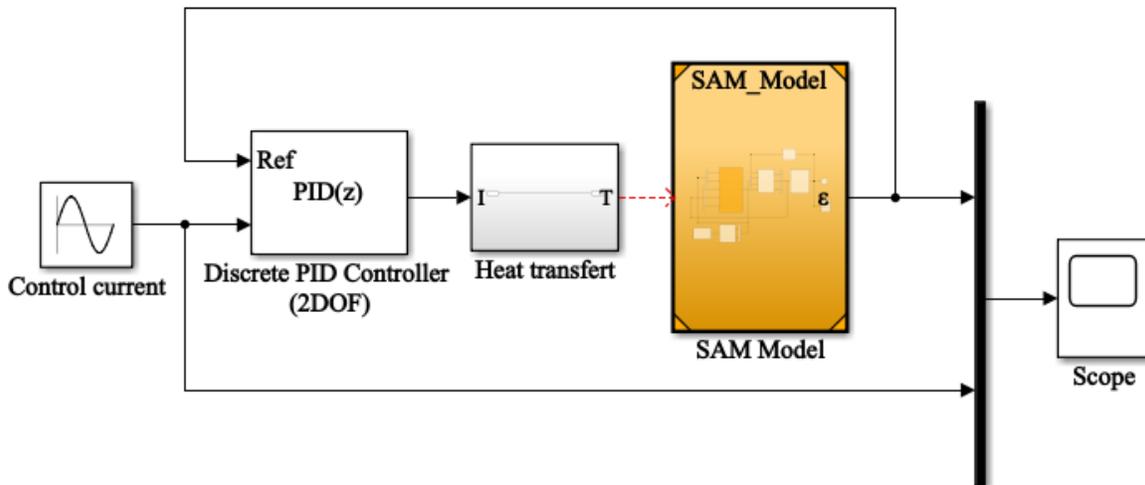


Figure IV.9 : Bloc de control d'un matériau en AMF par un courant électrique.

La Figure IV.10 présente en détail les différents modèles intervenir pour la simulation générale de comportement d'une barre en AMF sous l'effet d'une commande électrique et thermique.

On admet pour cette étude les paramètres des barres cités dans le tableau suivant :

Tableau IV.2 : description et valeurs des paramètres de simulation [75, 83].

<i>Paramètre</i>	<i>Description</i>	<i>Unité</i>	<i>Valeur</i>
$m$	La masse par unité de longueur de la barre	$kg/m^3$	6500
$A$	Section de profil de la barre	$m^2$	$3.14.10^{-8}$
$D$	Diamètre de la barre	m	0.002
$l_0$	Longueur initiale de la barre	$m$	0.03
$\varepsilon_0$	Déformation initial	%	0.04
$\sigma_0$	Contrainte initial	$Mpa$	75
$\xi_m$	Fraction volumique initial de la martensite	/	1
$E_a$	Module de Young d'austénite	$Gpa$	75
$E_m$	Module de Young de martensite	$Gpa$	28
$A_s$	Température initiale d'austénite	$^{\circ}C$	68
$A_f$	Température finale d'austénite	$^{\circ}C$	78
$M_s$	Température initiale de la martensite	$^{\circ}C$	52
$M_f$	Température finale de la martensite	$^{\circ}C$	42
$\theta_t$	Facteur de dilatation thermique	$1/k$	$6,6.10^{-6}$
$c_p$	Chaleur spécifique	$J/Kg. ^{\circ}C$	700
$R$	Résistance électrique par unité de longueur.	$\Omega.m$	$0,5.10^{-6}$
$h_0$	Coefficient de convection thermique	$W/m^2^{\circ}C$	120
$h_2$	Coefficient de convection thermique 2 <sup>e</sup> ordre	$W/m^2^{\circ}C$	0.001
$k$	Rigidité du ressort	$N/m$	3.871
$l_{0r}$	Longueur initiale de ressort	$m$	0.01

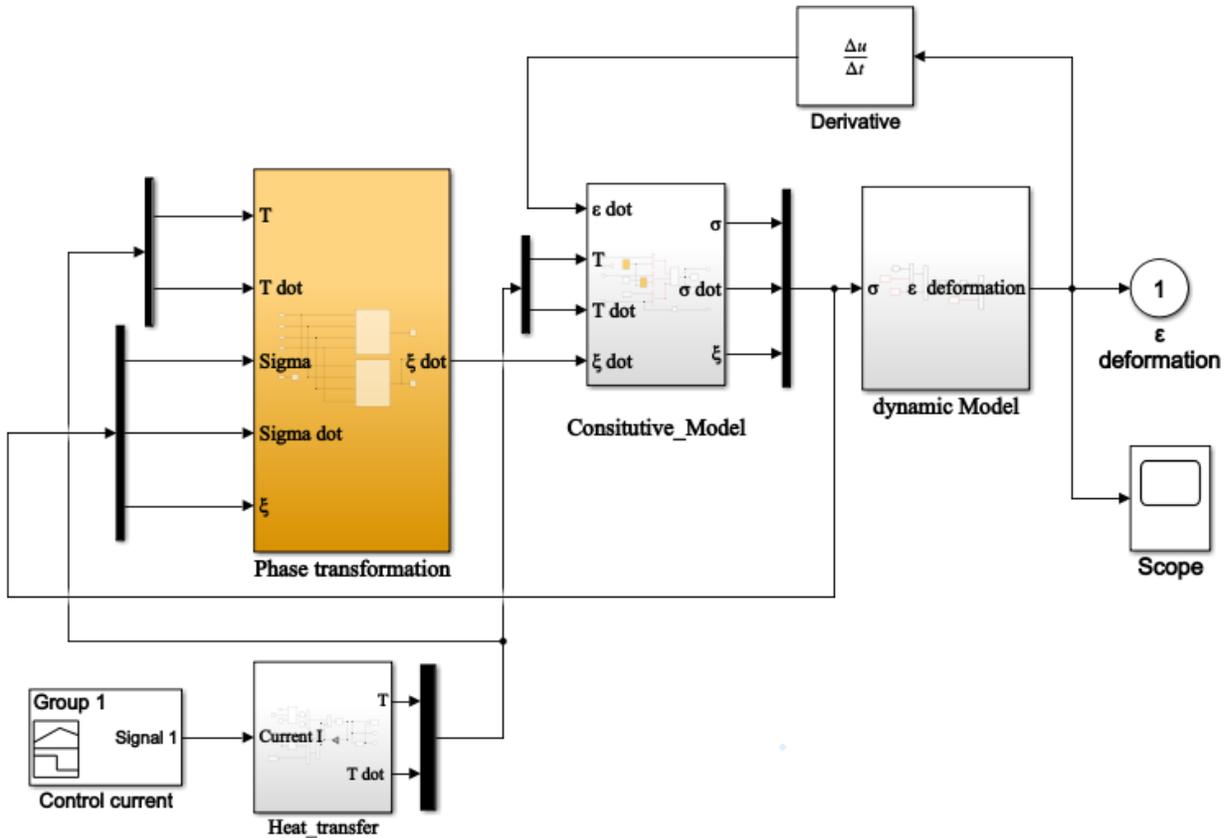


Figure IV.10 : Bloc générale de principe de commande d'une barre en AMF par une commande thermique et électrique (blocs sous MATLAB/Simulink).

### IV.4.3 Simulation de modèle dynamique de la platine

Nous avons deux modèles dynamiques décrivent le mouvement de la platine, un modèle de mouvement de translation et un modèle de mouvement de rotation (Figure IV.11 ).

#### a) Modèle dynamique du mouvement linéaire :

Ce modèle décrit les mouvements de translation résultant de la dilatation et de la contraction des barres en AMF (Figure IV.11-a), les mouvements rectilignes dans les directions x et y modélisés sous la forme :

$$F_{AMF} - F_R = m \cdot \ddot{y} \quad (IV-1)$$

$$F_{AMF} - K \cdot y = m \cdot \ddot{y} \quad (IV-2)$$

$F_{AMF}$  et  $F_R$  : Force résultante de l'effet de mémoire de forme dans la barre AMF, et force de rappel du ressort  $F_R$  avec  $k$  le raideur du ressort. Ce modèle dynamique doit être écrit en fonction des contraintes et des déformation [85] afin d'avoir une compatibilité avec le bloc générale de la Figure IV.10

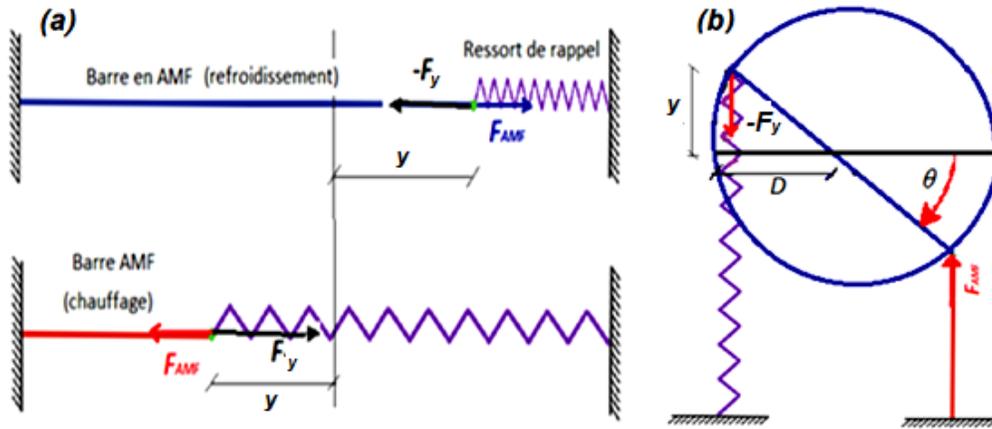


Figure IV.11 : Principe de fonctionnement d'un mécanisme en mouvement de rotation et de translation à la base des déformations des barres en AMF.

La force de l'effet mémoire de forme s'écrit en fonction de la contrainte  $\sigma$  et de l'aire  $A$  de la section droite de la barre en AMF :

$$F_{AMF} = \sigma \cdot A \quad (\text{IV-3})$$

La relation (IV-2) s'écrit alors :

$$\sigma \cdot A - K \cdot y = m \cdot \ddot{y} \quad (\text{IV-4})$$

La représentation d'état de ce système de seconde ordre ( $n=2$ ) est :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) \\ y(t) = C \cdot x(t) + D \cdot u(t) \end{cases} \quad (\text{IV-5})$$

Tel que :

- $u(t) = \sigma$  : c'est la variable d'entrée ;
- $y(t)$  : c'est la variable de sortie ;
- $x(t)$  : c'est la variable d'état avec deux composante ( $x_1, x_2$ ) ;
- A, B, C et D sont les paramètres du système.

La représentation finale de ce système s'écrit sous la forme vectorielle suivante :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{A}{m} \end{bmatrix} u \\ y = x_1 = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (\text{IV-6})$$

Le diagramme de simulation du système de l'équation (IV-6) sous Simulink est illustré à la figure suivante :

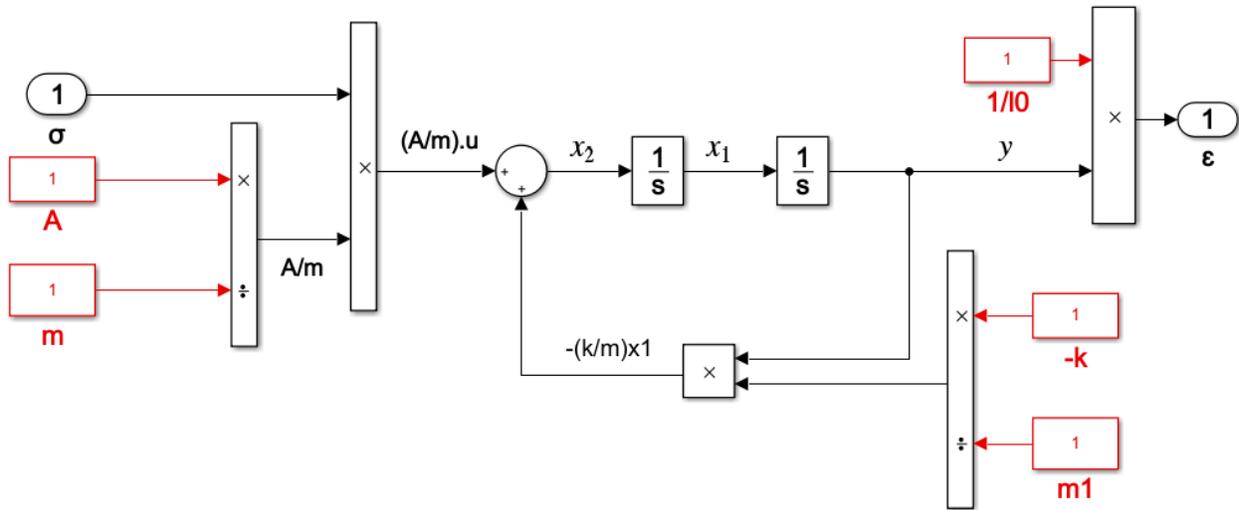


Figure IV.12 : Simulation de modèle dynamique de translation sous MATLAB/Simulink.

**b) Modèle dynamique du mouvement rotatif :**

Ce modèle décrit les mouvements de rotation du disque résultants de la dilatation et de la contraction de la barre en AMF (Figure IV.11-b). La rotation autour de l'axe du disque est modélisée en fonction du moment d'inertie  $J = \frac{R^2}{4} m$  du disque et de son rayon  $R$  sous la forme suivante :

$$F_{AMF} - F_R = \frac{J}{2.R} \cdot \ddot{\theta} \tag{IV-7}$$

On remplace l'expression (IV-3) de  $F_{AMF}$  dans l'équation (IV-7) :

$$\sigma.A - K.y = \frac{J}{2.R} \cdot \ddot{\theta} \tag{IV-8}$$

Pour les petits angles, la rotation  $\theta$  s'écrit en fonction de l'expansion  $y$  comme suit :

$$\theta = \frac{y}{2.R}$$

Donc, la relation (IV-8) prend alors la forme :

$$\sigma.A - 2.K.R.\theta = \frac{J}{2.R} \cdot \ddot{\theta} \tag{IV-9}$$

Tel que :

- $u(t) = \sigma$  : c'est la variable d'entrée ;
- $\theta(t)$  : c'est la variable de sortie ;
- $x(t)$  : c'est la variable d'état avec deux composante ( $x_1, x_2$ ) ;

La représentation finale de ce système s'écrit sous la forme vectorielle suivante :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{4.kR^2}{J} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2.R.A}{J} \end{bmatrix} \\ \theta = x_1 = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (\text{IV-10})$$

Le diagramme de simulation du système de l'équation (IV-10) sous Simulink est illustré à la figure suivante :

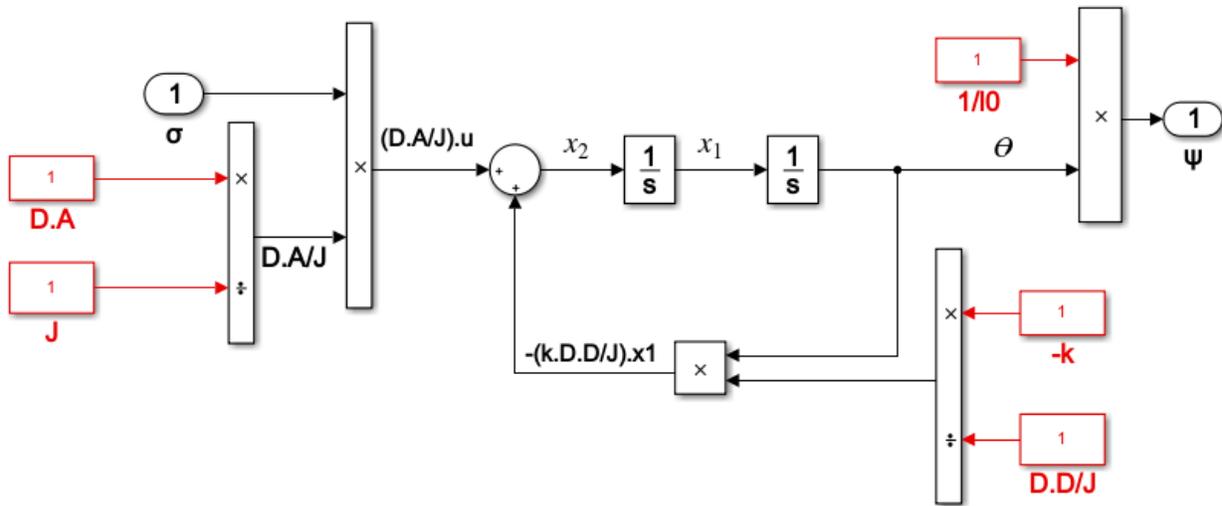


Figure IV.13 : Simulation de modèle dynamique de rotation sous MATLAB/Simulink.

#### IV.4.4 Simulation de la transformation de chaleur dans la barre

L'étude de transfert de chaleur de la barre a été réalisée à l'aide de l'équation de transfert de chaleur par convection. Le modèle de convection thermique détermine le taux de chauffage et de refroidissement dû à la variation d'un courant électrique passant dans une barre de Nitinol NiTi.

Le modèle de transfert thermique d'une barre en AMF [81, 86] s'écrit comme suit :

$$mC_p \frac{\partial T}{\partial t} = I^2 R(\xi) - h(T)A(T - T_a) - m\Delta H \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (\text{IV-11})$$

$m$  la masse de la barre en AMF,  $T$  la température de la surface de la barre,  $T_a$  la température ambiante,  $h$  le coefficient de transfert de chaleur,  $C_p$  la chaleur spécifique,  $A = 2\pi dl$  la surface de l'aire soumise à la convection,  $\Delta H$  la chaleur latente et  $\xi$  la fraction volumique de la martensite.

Le cycle de transformations thermique ramènera le système à son état d'origine, donc la variation d'enthalpie sera nulle  $\Delta H = 0$ , ce qui simplifie l'équation précédente sous la forme :

$$mC_p \frac{\partial T}{\partial t} = I^2 R(\xi) - h(T)A(T - T_a) \quad (\text{IV-12})$$

En raison de simplification de l'expression de transfert de chaleur ci-dessus, on suppose les hypothèses suivantes :

- l'effet est dans une seule direction,
- on admet que les effets de rayonnement sont négligeables par rapport au mode de conduction du transfert de chaleur,
- les changements de volume et de surface sont ainsi négligeables,
- la température ambiante  $T_a$  et le coefficient de convection thermique  $h_c$  sont constants,
- on suppose également que le champ de température de la barre est spatialement uniforme et que les températures de transition de phase sont également supposées constantes,
- l'effet du rayonnement thermique est négligé.

L'équation (IV-12) peut être réécrite pour le processus de chauffage et de refroidissement comme suit :

$$T - T_a = (T_0 - T_a)e^{-t/\tau} + \frac{vI}{h_c A_c} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (\text{IV-13})$$

la température initiale étant égale à la température ambiante  $T_0 = T_a$ , Alors l'équation (IV-13) devient :

$$T = \frac{vI}{h_c A_c} (1 - e^{-t/\tau}) + T_a \quad (\text{IV-14})$$

La température de la barre est contrôlée indirectement en faisant varier le courant qui la traverse. Le changement de forme correspondant commence dans la barre lorsque la température passe par  $A_s$  (température de début d'austénite) et se termine à  $A_f$  (température de fin d'austénite). Afin de maintenir la barre en phase austénitique, la température doit être maintenue juste au-dessus de  $A_f$  en appliquant une puissance électrique optimale. La température de la barre d'AMF est calculée à partir de l'équation (IV-14).

Les paramètres pris en compte dans les calculs sont :

- le courant et la tension électrique  $I=1-7$  Volt;
- le diamètre de la barre (2 mm) ;
- la longueur (30 mm) ;
- la chaleur spécifique (700 J/ (Kg. °C)) ;
- le coefficient de convection thermique  $h_c$  (120 W/ (m<sup>2</sup>.°C)).

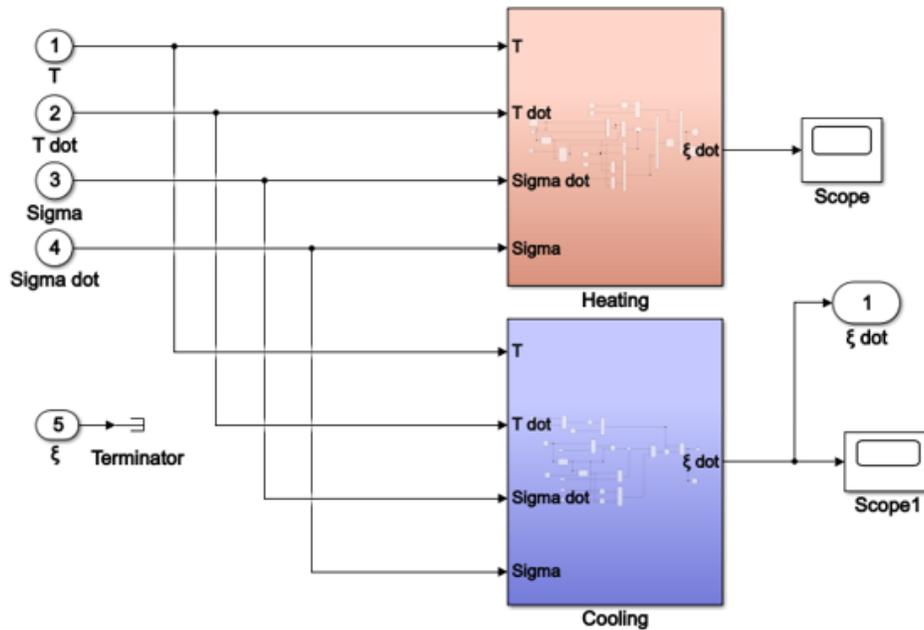


Figure IV.14 : Simulation des deux phases de transformation sous MATLAB/Simulink.

#### IV.4.5 Simulation de la loi constitutive de comportement des AMF

La loi constitutive décrivant le comportement thermomécanique d'un AMF [85, 87] est indiquée sur l'équation suivante :

$$d\sigma = E \cdot d\varepsilon + \theta_T \cdot dT + \Omega \cdot d\xi \quad (\text{IV-15})$$

$E$ ,  $\theta_T$  et  $\Omega$  : Représentent le module de Young, le facteur d'expansion thermique et le facteur de contribution de la phase de transformation.

On a :  $\Omega = -\varepsilon_L E$  tel que :  $\varepsilon_L$  est la déformation limite.

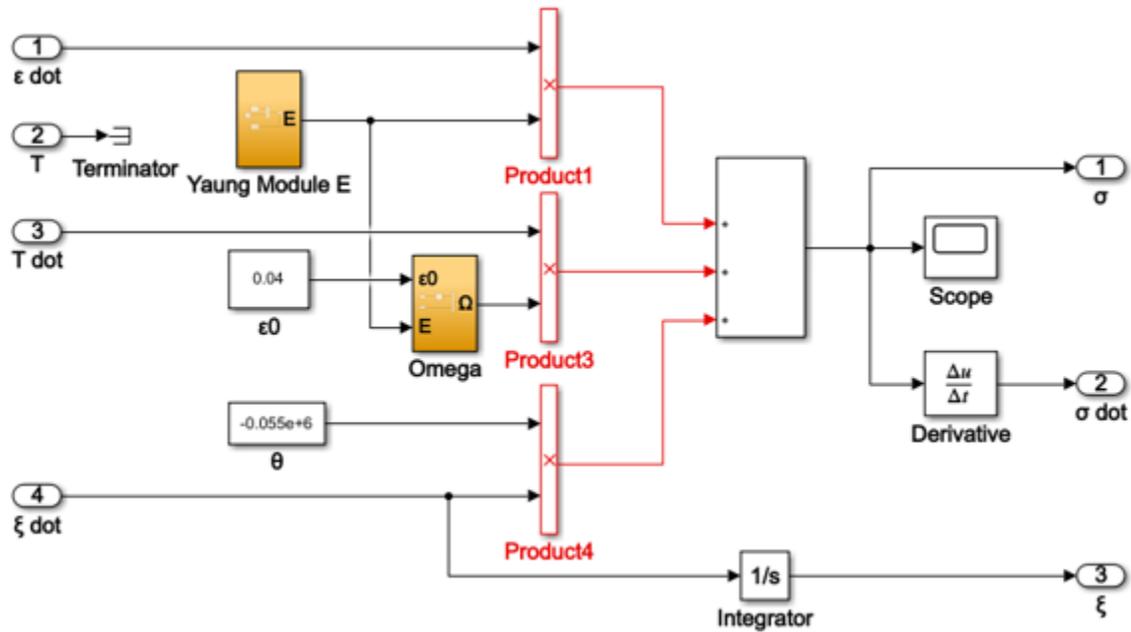


Figure IV.15 : Simulation de modèle constitutif sous MATLAB/Simulink.

#### IV.4.6 Résultats et erreurs d'une platine en AMF

L'exécution de bloc de la simulation illustré à la Figure IV.10 avec l'insertion des données du Tableau IV.2 donne les résultats suivants :

- La valeur maximale du potentiel nécessaire pour transformer la barre en martensite vers la phase d'austénite est  $V_{max} = 7.2 \text{ Volt}$  pour une barre de longueur  $L = 3.5 \text{ cm}$ . Elle est de  $2.3 \text{ Volt}$  pour une barre de longueur  $L = 0.70 \text{ cm}$ .
- On constate que le temps de refroidissement est plus long par rapport au temp de chauffage. Il est donc nécessaire de trouver un autre moyen de refroidissement plus rapide pour compenser cette différence.
- On trouve que la dilatation maximale  $\Delta L = 0.0022 \text{ mm}$  pour une barre de longueur  $L = 3.5 \text{ cm}$  est insuffisante. En effet, l'objectif recherché nécessite une large plage de déplacement allant jusqu'au 1 mm.

On constate ainsi, sur la même courbe que le temps de refroidissement est plus long par rapport au temp de chauffage. Il est donc nécessaire de trouver un autre moyen de refroidissement plus rapide pour compenser cette différence, surtout entre les deux barres de disque rotatif de la platine.

La variation de la dilatation des barres en fonction du temps est illustrée dans les deux figures ci-dessous, cas chauffage sur la Figure IV.17 .et le cas de refroidissement sur la Figure IV.18.

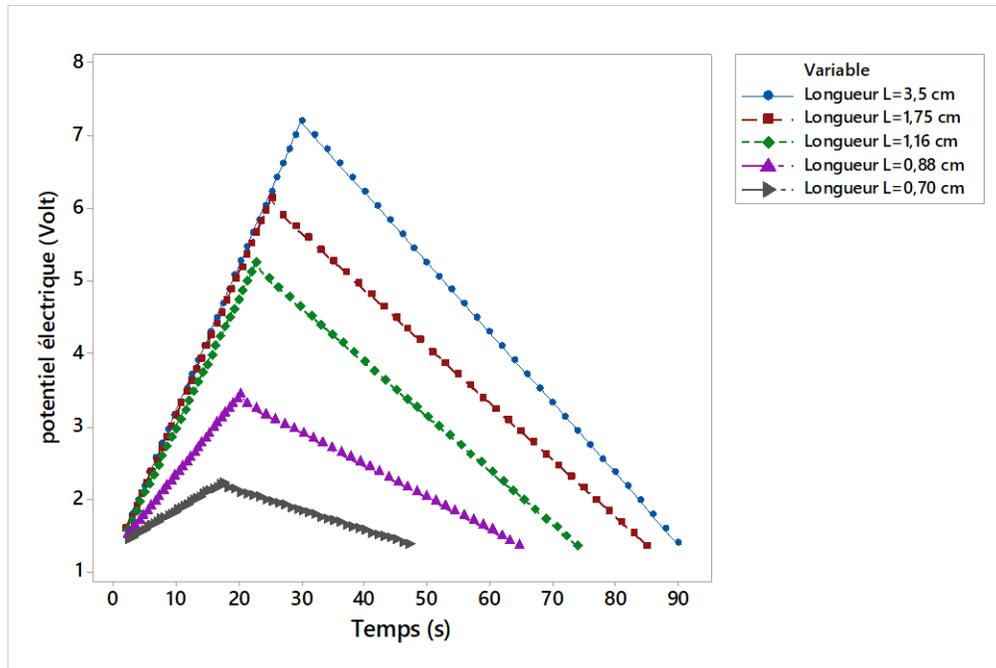


Figure IV.16 : Variation de potentiel électrique en fonction du temps pour les différentes longueurs de la barre en AMF.

Comme il est indiqué précédemment on remarque sur ces courbes que le temps de refroidissement est plus long que le temps nécessaire pour le refroidissement de la même barre et de la même dilatation. On constate ainsi que la dilatation maximale  $\Delta L = 0.0022 \text{ mm}$  pour une barre de longueur  $L = 3.5 \text{ cm}$ , cette valeur de  $2.2 \mu$  est insuffisante vis-à-vis aux exigences de l'objectif de cette thèse qui nécessite une large plage de déplacement (jusqu'au 10 mm pour les mires de large plage).

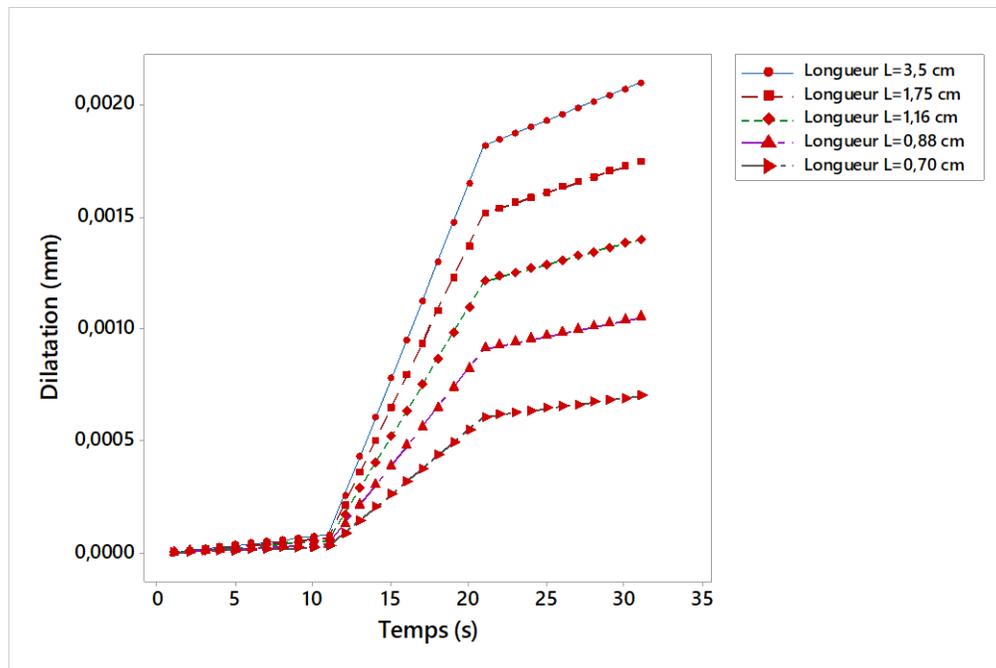


Figure IV.17 : Variation de la dilatation des barres d'AMF en cas de chauffage.

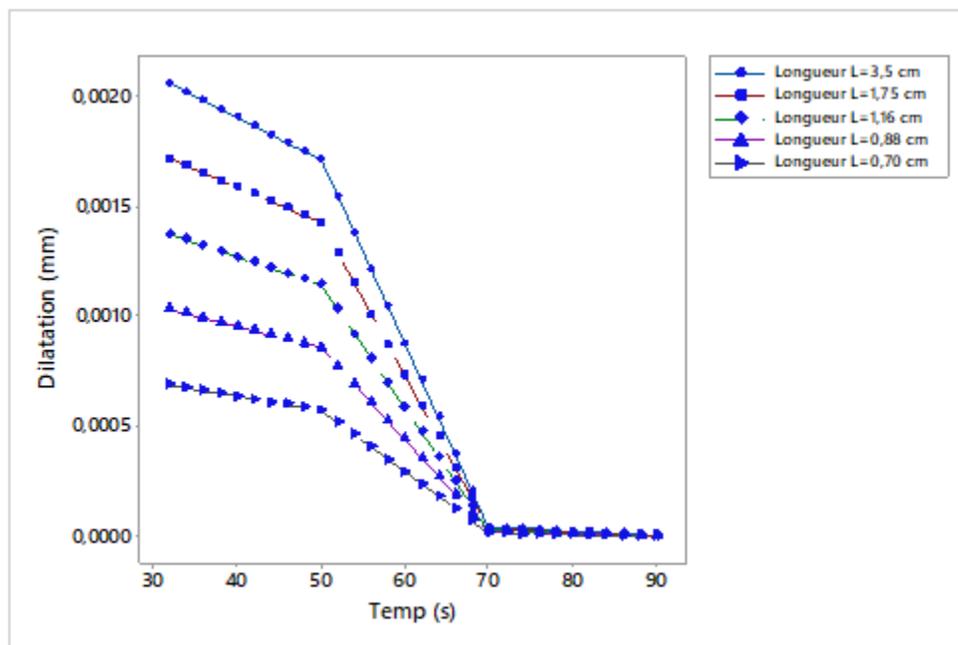


Figure IV.18 : Variation de la dilatation des barres d'AMF en cas de refroidissement.

## IV.5 Conclusion

La platine permet le positionnement de la mire ou de l'objet dans n'importe quelle position désirée. Dans ce chapitre, nous avons vu les différents types et technologies de fabrication de ces platines, nous avons également fait un recensement des erreurs et des incertitudes-type obtenus par certains auteurs avec des platines et des plateformes différentes.

D'autre part, nous avons constaté que la technologie des alliages à mémoire de forme ne pouvait pas fournir une platine suffisamment précise comme prévu. En raison des difficultés technologiques liées à la technologie de refroidissement, et de l'absence d'un moyen miniature et pratique pour refroidir les barres, contrairement au chauffage, il est assez simple et ne dépend que du passage d'un courant électrique.

L'utilisation de ce type des platines est donc limitée au monde visible et ne correspond pas à une utilisation dans le monde microscopique qui nécessite d'autres technologies plus puissantes.

Enfin, on utilise la méthode de type B pour l'évaluation de l'incertitude due au platine, basant sur les spécifications du fabricant [Int 2], et nous avons atteint la dépendance des valeurs des incertitudes suivantes :

- Une valeur de  $0.01 \text{ mm} = 10 \mu\text{m}$  pour les déplacements dans les deux sens  $x$  et  $y$ .
- Une valeur de  $10' = 0.167^\circ$  pour la rotation planaire.

Ces valeurs doivent être ajoutées à l'incertitude composée du SMVM à la section de récapitulation générale.

## **Chapitre V : Erreurs et incertitudes liées à l'étalonnage.**

## V.1 Introduction

Le manque d'étalonnage du système de mesures peut conduire à des résultats erronés ou imprécis dans l'analyse de données scientifiques. Il est donc essentiel de veiller régulièrement à l'étalonnage et à la maintenance de tous les systèmes de mesure utilisés, y compris les platines, le microscope et la caméra.

L'étalonnage présente, ainsi, l'avantage d'éliminer la partie uniforme de l'erreur particulièrement commise par les systèmes de mesure complexes. Cela permet de s'assurer que les résultats des mesures sont cohérents et conformes aux normes établies, ce qui est essentiel pour garantir la qualité et la fiabilité des mesures effectuées.

Le système de mesures SMVM est un système complexe composé de plusieurs sous-systèmes, où les erreurs peuvent avoir des causes multiples, notamment les variations de température, l'usure des matériaux, le mode d'éclairage ou les défauts de fabrication. Et donc nous avons dû recourir au processus d'étalonnage total et partiel comme suit :

En premier lieu, nous avons calibré la caméra, qui représente un sous-système appelé le système de vision, et c'est la principale source de la plupart des erreurs en raison de sa composition en plusieurs parties telles que l'objectif, le capteur optique et divers éléments électroniques qui affectent dans leur intégralité le résultat de la mesure.

Ensuite, nous avons calibré le système dans son ensemble afin d'obtenir une équation d'étalonnage à travers laquelle nous corrigeons les lectures données par ce système de mesures.

L'étalonnage est donc une étape cruciale pour corriger les erreurs de mesure et garantir l'exactitude des résultats conformément aux normes et spécifications de l'industrie. En outre, un étalonnage régulier permet d'identifier les problèmes potentiels de l'équipement avant qu'ils ne deviennent plus importants. Dans l'ensemble, l'étalonnage est un processus essentiel qui permet de garantir la qualité et la fiabilité des systèmes de mesure.

## V.2 Incertitudes liées à l'étalonnage du système de vision

On appelle le système de vision l'ensemble des composantes d'une caméra, tels que la lentille, le capteur photonique CCD ou CMOS et la carte des composantes électroniques. Alors, on appelle l'étalonnage d'un système de vision le processus d'estimation des paramètres intrinsèques et extrinsèques d'une caméra.

Cela signifie que nous avons toutes les informations (paramètres ou coefficients) sur la caméra, nécessaires pour déterminer une relation précise entre un point 3D dans le monde réel et sa projection 2D correspondante (pixel) dans l'image capturée par cette caméra calibrée.

### V.2.1 Projection d'un objet dans une image

La Figure V.1 présente la projection d'un point  $P_w$  dans le repère trois dimensions du monde réel dans le repère de caméra puis dans le repère deux dimensions de l'image.

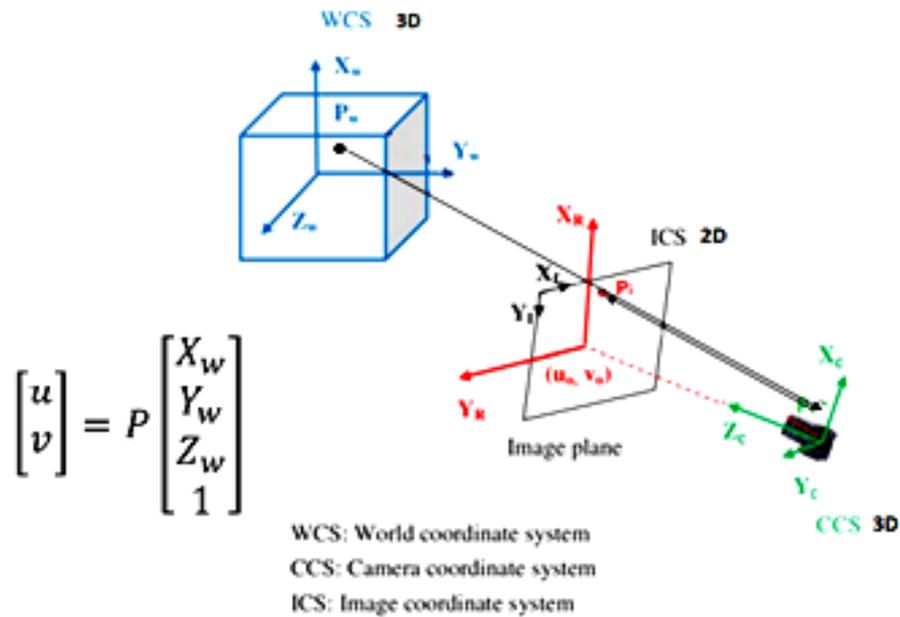


Figure V.1 : Projection des points en système des coordonnées mondiale 3D vers des points en système de coordonnées image 2D.

On distingue donc entre trois repères différents :

- Repère continu du monde réel dont le point a trois composantes  $P_m(X_m, Y_m, Z_m)$ .
- Repère continu de la caméra dont le point a deux composantes  $P_c(X_c, Y_c)$ .
- Repère discret de l'image dont le point a deux composantes  $P_i(u, v)$ .

### V.2.2 Transformation géométrique d'un système de vision

La figure suivante illustre la transformation d'un objet réel en trois dimensions vers une image pixelique en deux dimensions.

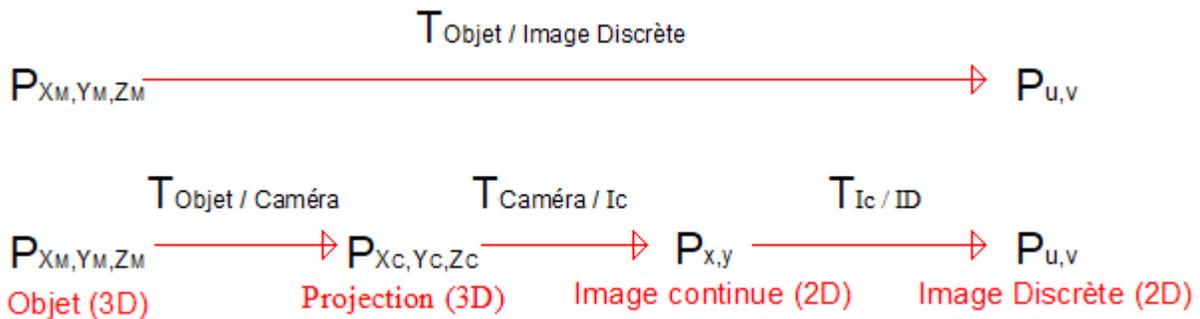


Figure V.2 : Décomposition de la transformation objet / image.

Sachant que :

$T_{\text{Objet} / \text{ID}}$  : présente la transformation d'un objet vers une image discrète.

$T_{\text{Objet} / \text{Caméra}}$  : présente la transformation d'un objet vers une image projetée sur caméra.

$T_{\text{Caméra} / \text{IC}}$  : présente la transformation de l'image projetée sur la lentille de caméra vers une image continue.

$T_{\text{IC} / \text{ID}}$  : présente la transformation de l'image continue vers une image discrète (phase de numérisation).

En fait, cette transformation géométrique est décomposée en trois sous transformations (comme illustré à la Figure V.3) qui assurent le passage d'un espace à un autre et d'un système des coordonnées à un autre système différent.

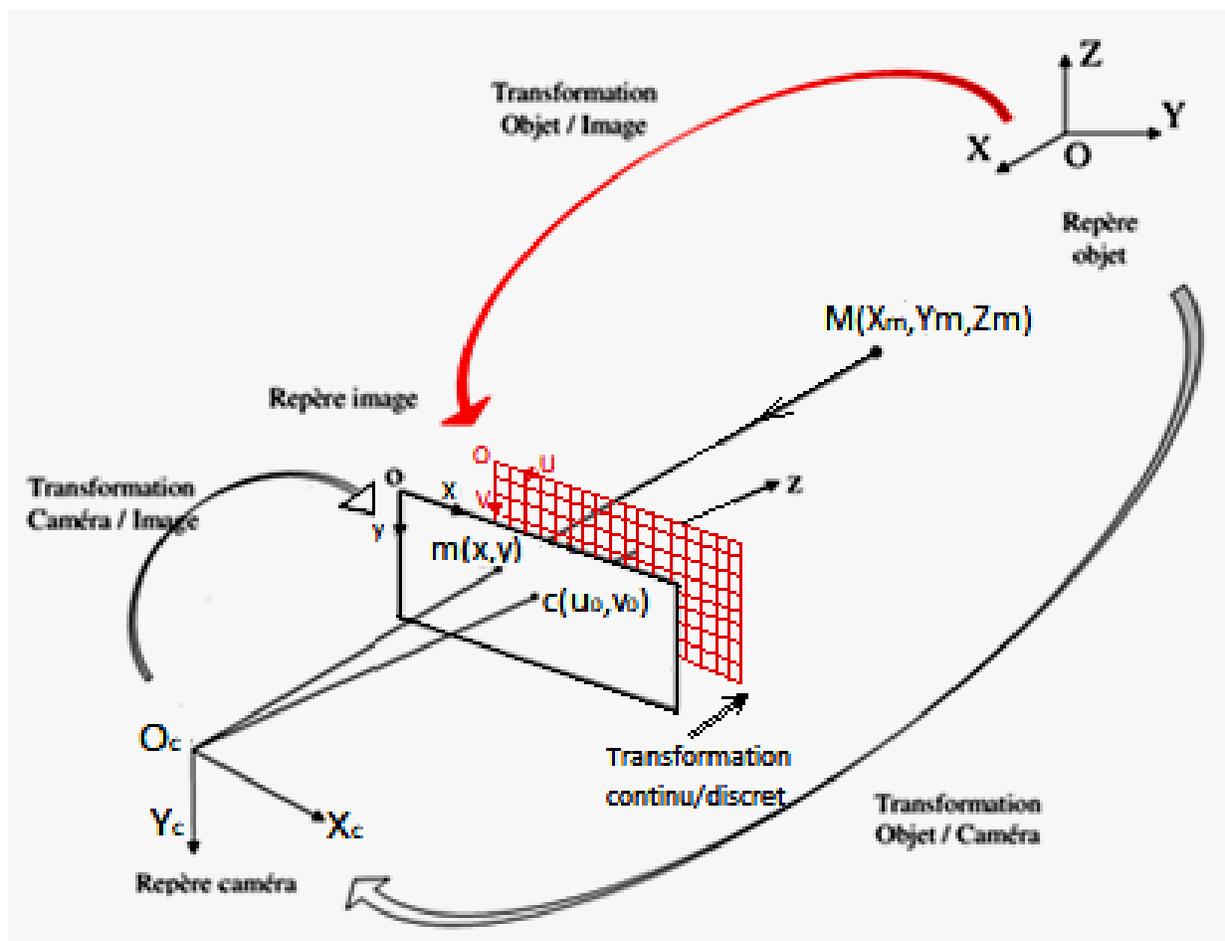


Figure V.3 : Les transformations de passage d'un espace Objet 3D vers un espace image 2D.

La transformation objet/image se décompose en trois sous transformations comme indiqué sur la figure suivante :

### V.2.2.1 Transformation objet/caméra :

La relation entre le système des coordonnées de caméra (SCC) et le système des coordonnées mondiale (SCM) de l'objet réel s'écrit sous la forme :

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{V-1})$$

Sachant que :  $M(X_m, Y_m, Z_m)$  c'est un point dans le repère objet (mondiale) et  $P_c(X_c, Y_c, Z_c)$  c'est la projection de ce point dans le repère caméra.

$M_1 = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$  : C'est la matrice de projection globale, se compose d'une matrice 3x3 de rotation d'Euler avec trois rotations possibles dans l'espace :

$$R = R_x R_y R_z \quad (\text{V-2})$$

$$R_x = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{V-3})$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (\text{V-4})$$

$$R_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \quad (\text{V-5})$$

L'autre composante de  $M_1$  est le vecteur de translation qui englobe les trois translations spatiales possibles :  $T(t_x, t_y, t_z)$ .

Finalement  $M_1$  s'écrit sous forme matricielle :

$$M_1 = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{V-6})$$

### V.2.2.2 Transformation caméra/image continue :

Cette transformation permet la transformation de l'image plane projetée sur les lentilles de la caméra vers une image continue sous forme des points réels ou bien sous forme d'un signal analogique.

Soit  $P_c(X_c, Y_c, Z_c)$  un point dans le repère caméra. Et  $P_{Ic}(x, y)$  la projection de ce point dans l'image continue qui est calculé par la relation suivante :

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{V-7})$$

$\begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$  : c'est la matrice des distances focales de la caméra. Pour la simplification des équations on prend  $f_x = f_y = f$ .

### V.2.2.3 Transformation image continue/ image discrète (pixelique) :

L'image continue projetée sur le capteur photographique de la caméra se transforme à une image discrète dans la phase de numérisation de la façon suivante :

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{V-8})$$

$P_{ID}(u, v)$  est le point transformé sur l'image discrète tel que :

$$u = \frac{x}{dx} + u_0 \quad (\text{V-9})$$

$$v = \frac{y}{dy} + v_0 \quad (\text{V-10})$$

Le retour inverse se fait par la relation :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx & 0 & -u_0 dx \\ 0 & dy & -v_0 dy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{V-11})$$

Donc on peut écrire la transformation synthétique global objet/ image discrète (pixelique) de la manière suivante :

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{V-12})$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 P_m = M P_m \quad (\text{V-13})$$

Sachant que  $\alpha_x$  et  $\alpha_y$  présentent l'un des paramètres intrinsèques de la caméra :

$$\alpha_x = \frac{f}{dx} \quad (\text{V-14})$$

$$\alpha_y = \frac{f}{dy} \quad (\text{V-15})$$

### V.2.3 Les étapes d'étalonnage d'une caméra

L'application Calibreur de caméra sous Matlab permet d'évaluer les paramètres intrinsèques, extrinsèques et de distorsion de l'objectif de la caméra. On utilise ces réglages de caméra pour différentes applications de vision informatique. Ces applications comprennent l'élimination de la distorsion de l'objectif d'une image, la mesure d'objets plans ou la reconstruction de scènes 3D à partir de plusieurs caméras.

Les étapes à suivre pour calibrer une caméra microscopique à l'aide de Matlab sont les suivantes :

1. La préparation des images.
2. La sélection du modèle de caméra.
3. L'exécution de l'étalonnage.
4. L'ajustement des paramètres de calibration.
5. L'obtention des paramètres intrinsèques et extrinsèques de la caméra.

### V.2.4 Résultats de l'étalonnage de la caméra

L'exécution de l'application de calibration ouvert l'interface montrée sur la Figure V.4.

Après l'acquisition de plusieurs images par la caméra microscopique, on choisit huit images pour le processus de l'étalonnage. Ces images doivent être de la même mire dans des différents positions.

La mire utilisée est une mire périodique sous forme des points ordonnées dans les deux sens x et y avec les caractéristiques suivantes :

- Nombre des points dans l'image : 288 points (18x16 points).
- La taille de chaque point est de 32x22 pixel, équivalent de 102.4x70.4  $\mu\text{m}$ .
- La taille de l'image est de 768x1024 pixel, équivalent de 2.46x3.28 mm.
- Le centre de l'image est  $(u, v) = (384, 512) \text{ pixel}$ .

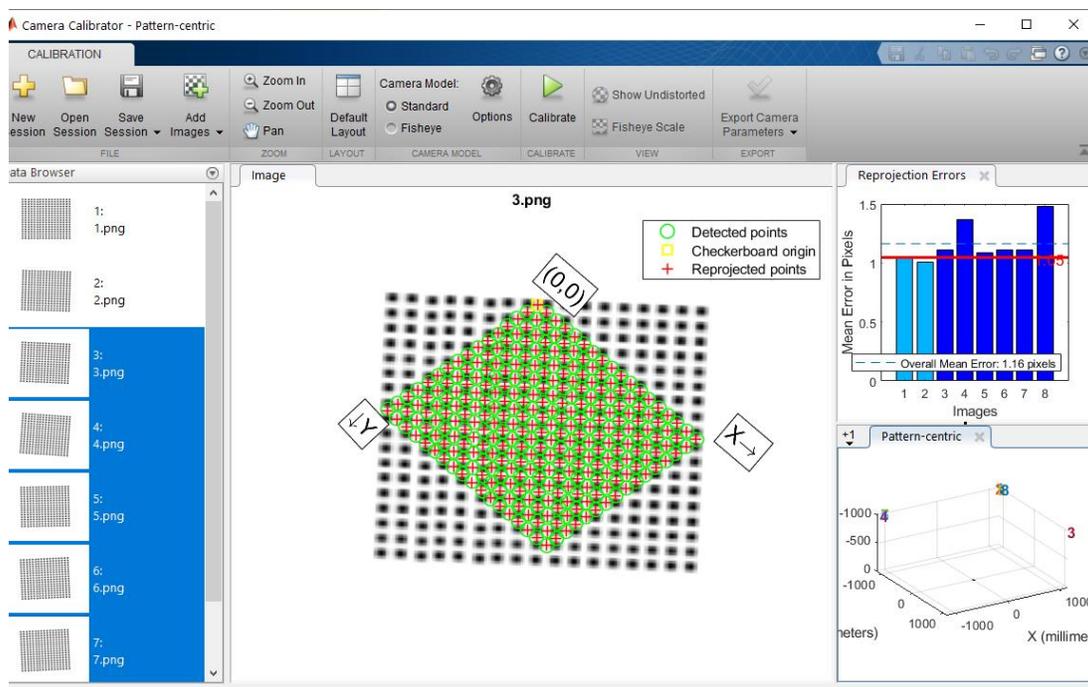


Figure V.4 : Interface de calibration de caméra sous Matlab.

L'introduction de ces images avec ces caractéristiques, permet l'exécution de l'opération d'étalonnage et fournit les résultats illustrés sur les figures ci-dessous.

Les erreurs liées aux paramètres intrinsèques de la caméra sont présentées sur la Figure V.5 et la Figure V.6. On remarque que l'erreur de translation  $t_1$  dans le sens x est constante et de la valeur de 2 pixels ( $6.4 \mu\text{m}$ ) pour les huit image. En revanche, l'erreur de translation  $t_2$  dans le sens y est variée d'une image à une autre et peut atteindre une valeur de 24 pixels ( $76.8 \mu\text{m}$ ). Cette erreur est importante et doit être prise en considération dans le calcul des incertitudes.

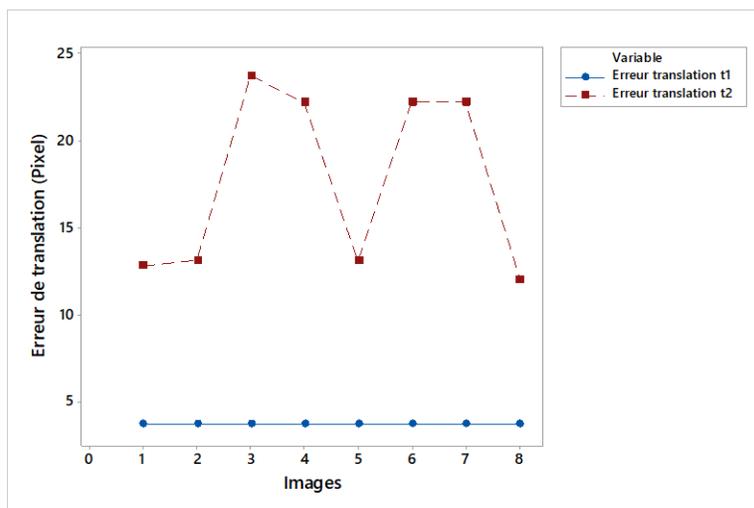


Figure V.5 : Erreur de translation de l'image dans les deux sens.

L'erreur de la rotation  $R_3$  ( $0.02^\circ$ ) est presque négligée par rapport aux autres rotations. Les rotations  $R_1$  et  $R_2$  ont une erreur importante varier entre  $0.02$  et  $0.10^\circ$ . On prend donc une valeur moyenne de  $0.06^\circ$  comme une incertitude de rotation qui doit être incluse dans le calcul de l'incertitude composée de la rotation.

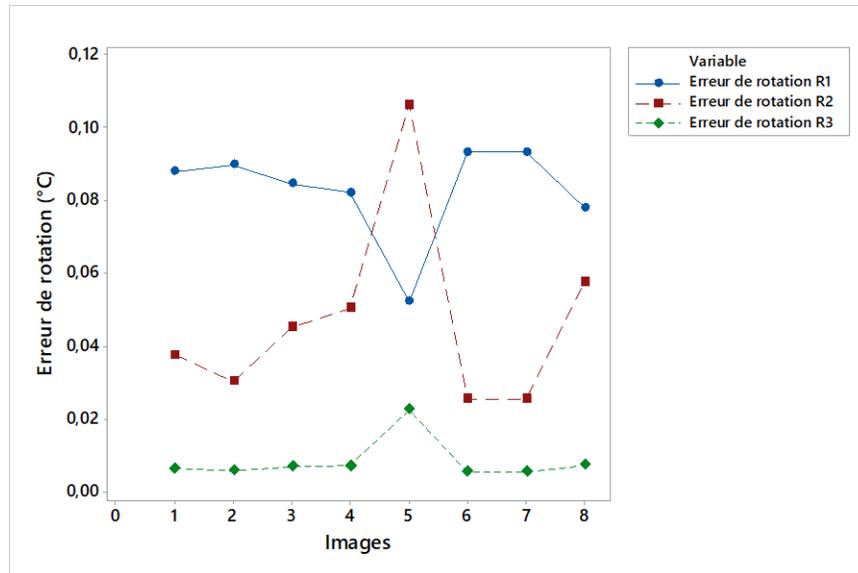


Figure V.6 : Erreur de rotation de l'image autour des trois axes.

L'erreur de projection de l'image commise par cette caméra à une valeur d'environ de 1.16 pixels, comme indiqué sur la Figure V.7. La conversion de cette valeur en micromètre donne la valeur de  $3.716 \mu\text{m}$ .

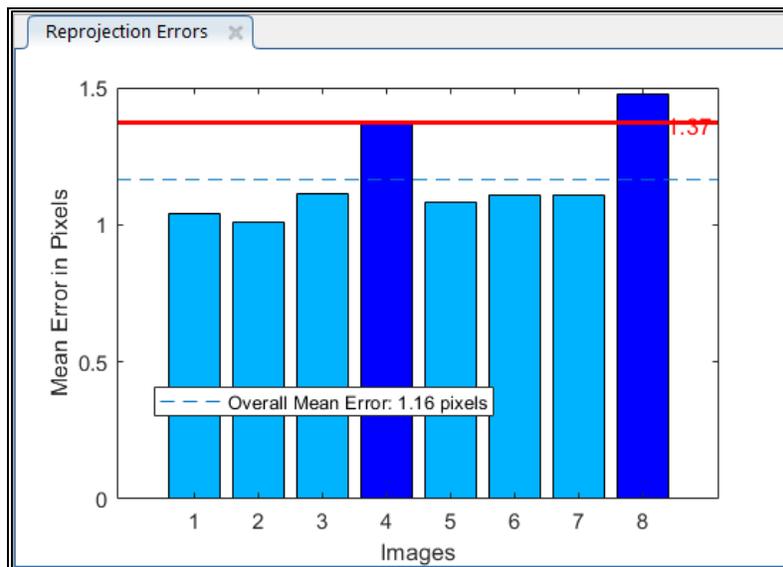


Figure V.7 : Erreur moyenne de la projection des images.

### V.3 Incertitudes liées à l'étalonnage du système de mesures

Selon le vocabulaire international de métrologie (VIM) [66] l'étalonnage d'un processus de mesure est défini comme suit « une opération qui, dans des conditions spécifiées, établit en une première étape une relation entre les valeurs et les incertitudes de mesure associées qui sont fournies par des étalons et les indications correspondantes avec les incertitudes associées, puis utilise en une seconde étape cette information pour établir une relation permettant d'obtenir un résultat de mesure à partir d'une indication ».

On peut exprimer l'étalonnage sous les formes suivantes :

1. un énoncé d'étalonnage,
2. une fonction d'étalonnage,
3. une courbe d'étalonnage,
4. un tableau d'étalonnage.

#### V.3.1 Règle de vérification des positions de références

La règle de calibrage utilisée dans cette étude a été soigneusement sélectionnée pour garantir une précision maximale des mesures effectuées. Le choix de la bonne règle de calibrage est nécessaire pour garantir que les résultats des mesures sont fiables et correspondent aux caractéristiques de performance de l'instrument utilisé. La règle de calibrage est utilisée pour la vérification et des positions de références utilisés pour l'étalonnages du système de mesure SMVM.

En choisissant la règle de calibrage Mico (Figure V.8) avec les caractéristiques suivantes :

1. 10 lp /mm à 1000 lp /mm,
2. Ø20 µm matrice de points 40x40 points, 100 µm grille,
3. points positifs, points négatifs et étoile Siemens,
4. angle de rodage 30° avec certificat,
5. échelle avec des échelons jusqu'à 10 µm.

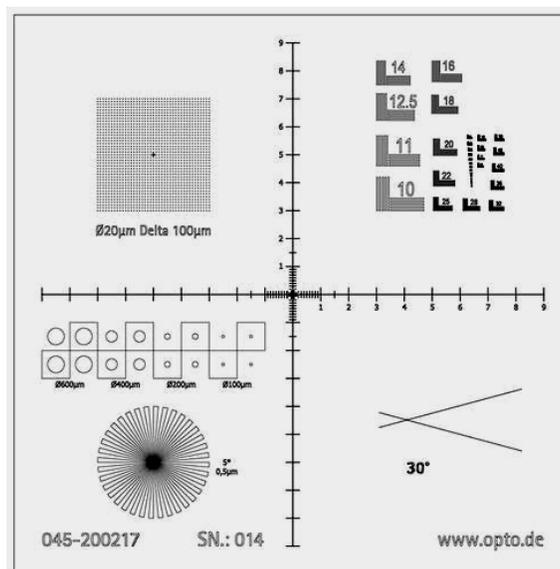
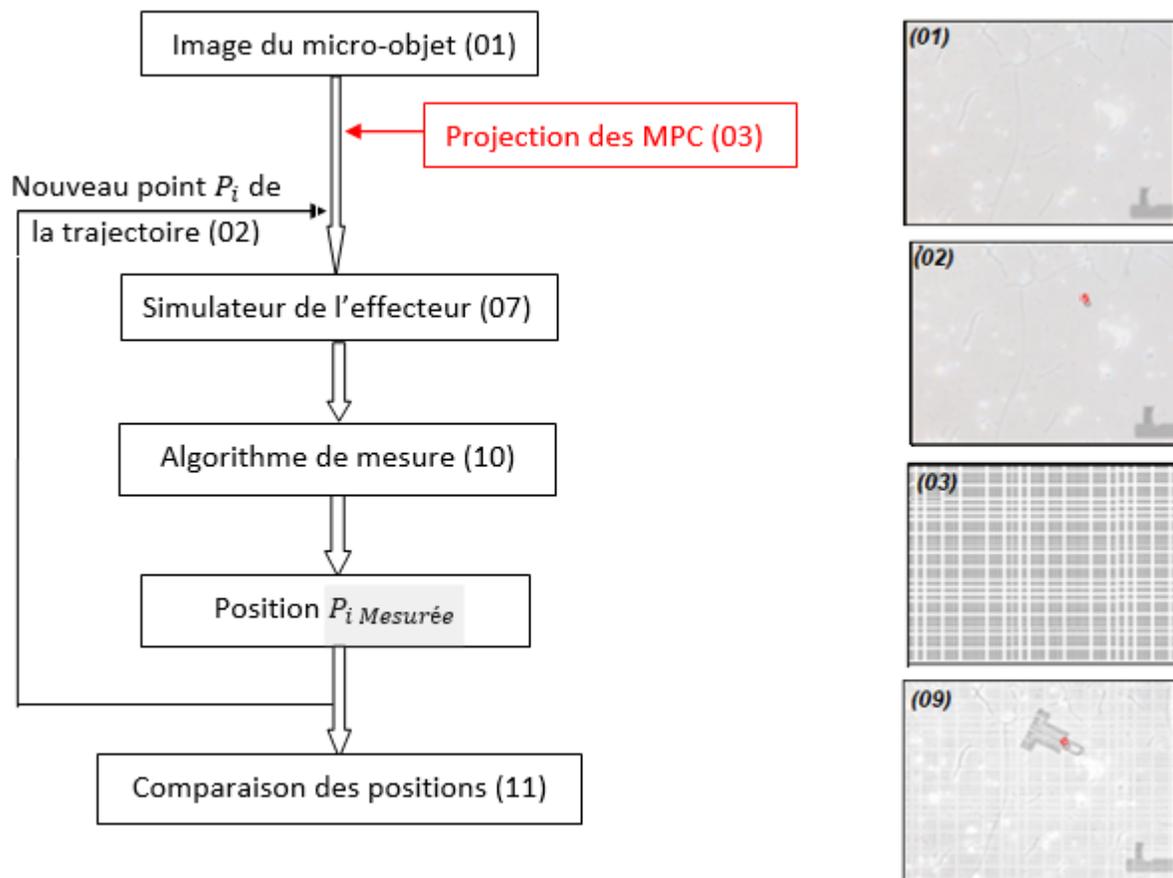


Figure V.8 : Règle microscopique de calibrage en trois dimensions X, Y et  $\theta$  [81].

### V.3.2 Procédure de l'étalonnage de la méthode de mesure par SMVM

L'étalonnage de la méthode de projection des MP dans cette section est effectué en deux manières afin de vérifier la performance de la méthode en déplacements relatifs et en déplacements absolus.

Le dispositif pratique utilisé dans les deux processus d'étalonnage est détaillé dans la section II.2.1. L'algorithme de traitement permet d'acquérir une série d'images capturées par la caméra et puis les traite afin d'obtenir les informations sur la position et le déplacement de l'effecteur par rapport à la carte codée.



La procédure d'étalonnage s'effectue selon les étapes illustrées sur la Figure V.9 et selon l'algorithme de mesure suivant :

### Algorithme d'étalonnage de SMVM

- 1- Déterminer la cible à atteindre par l'effecteur et prendre une image primaire de cette cible (image d'un micro-objet situé sur la lame de microscope optique).
- 2- Définir la trajectoire à suivre par l'effecteur pour atteindre la cible ( $P_i$  tel que  $i = 1:n$ ).
- 3- Projection de la mire périodique générée par l'algorithme de génération des mires.

#### **Faire pour chaque i :**

- 4- Projection d'un point de trajectoire  $P_i$  sur la lame microscopique.
- 5- Vérification des coordonnées du point  $P_i$  par la règle de calibrage fixée au-dessous de l'échantillon.
- 6- Acquérir par la caméra la nouvelle image (Cible + mire + point  $P_i$  de la trajectoire).
- 7- Insertion de l'image de l'effecteur dans le point correspondant à l'aide d'un simulateur spécial.
- 8- Projection de l'image finale obtenue (Cible + effecteur + mire) sur la platine de microscope.
- 9- Acquérir une autre fois cette image finale par la caméra.
- 10- Utilisation de l'algorithme de mesure pour déterminer les coordonnées de l'effecteur ( $P_{iMesurés}$ ).

**Répéter les étapes 4 à 10 jusqu'au  $i=n$**

- 11- Tracer la courbe d'étalonnage  $P_{iMesurés} = F(P_i)$ .

### V.3.3 Courbe et paramètres d'étalonnage

L'opération d'étalonnage consiste à mettre en équation une série de mesure  $X_i$  sous forme d'un nuage de points [88]. L'équation de la courbe d'étalonnage s'écrit comme suit :

$$Y_i = (a_0 + a_1 X_i) + e_i \quad (\text{V-16})$$

Les écarts  $e_i$  présentent la partie aléatoire de l'équation de la droite d'étalonnage, et l'expression  $(a_0 + a_1 X_i)$  présente la partie déterministe ou la meilleure équation de cette droite. Donc, à partir d'un plan d'essai de  $n$  couple  $(X_i, Y_i)$  on cherche de trouver la meilleure droite de régression qui minimise la contribution de la partie aléatoire. Le tableau suivant présente un plan d'essai permet de déterminer une équation d'étalonnage.

Nous avons un système de  $n$  équations avec  $n$  inconnus, il manque seulement les deux équations pour déterminer les deux paramètres  $a_0$  et  $a_1$ , ces équations sont traditionnellement apportées par la méthode des moindres carrés [89].

Tableau V.1 : Plan d'essai d'étalonnage d'un système de mesures.

Plan d'essai			Mise en équations	
Couple	Étalon	Indication (Valeur mesurée)	Partie déterministe	Partie aléatoire
$(X_1, Y_1)$	$X_1$	$Y_1$	$Y_1 = (a_0 + a_1 X_1)$	$+ e_1$
....	....	....	....	....
$(X_i, Y_i)$	$X_i$	$Y_i$	$Y_i = (a_0 + a_1 X_i)$	$+ e_i$
....	....	....	....	....
$(X_n, Y_n)$	$X_n$	$Y_n$	$Y_n = (a_0 + a_1 X_n)$	$+ e_n$

Par application des critères des résidus des moindres carrés, SCR (Somme carrées des résidus) on trouve :

$$SCR = \sum_{i=1}^n [Y_i - (a_0 + a_1 X_i)]^2 \quad (V-17)$$

$$SCR = \sum_{i=1}^n [Y_i^2 - 2Y_i(a_0 + a_1 X_i) + (a_0 + a_1 X_i)^2] \quad (V-18)$$

$$SCR = \sum_{i=1}^n [Y_i^2 - 2a_0 Y_i - 2a_1 X_i Y_i + a_0^2 + 2a_0 a_1 X_i + a_1^2 X_i^2] \quad (V-19)$$

$$SCR = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - 2a_0 \sum_{i=1}^n Y_i - 2a_1 \sum_{i=1}^n X_i Y_i + na_0^2 + 2a_0 a_1 \sum_{i=1}^n X_i + a_1^2 \sum_{i=1}^n X_i^2 \quad (V-20)$$

Tant que  $X_i, Y_i$  et  $n$  sont connus, alors ce critère sera un polynôme de deuxièmes degrés en fonction seulement de  $a_0$  et  $a_1$  :

$$SCR = P(a_0, a_1) \quad (V-21)$$

Pour déterminer les deux facteurs  $a_0, a_1$  on applique les conditions de la dérivée nulle et du point minimum :

$$\begin{cases} \frac{\partial SCR}{\partial a_0} = 0 \\ \frac{\partial SCR}{\partial a_1} = 0 \end{cases} \quad \text{Et} \quad \begin{cases} \frac{\partial^2 SCR}{\partial^2 a_0} = 0 \\ \frac{\partial^2 SCR}{\partial^2 a_1} = 0 \end{cases} \quad (V-22)$$

On obtient les deux équations suivantes :

$$\sum_{i=1}^n Y_i = na_0 + a_1 \sum_{i=1}^n X_i \quad (V-23)$$

$$\sum_{i=1}^n X_i Y_i = a_0 \sum_{i=1}^n X_i + a_1 \sum_{i=1}^n X_i^2 \quad (V-24)$$

La division des deux équations sur  $n$  donne le système des équations suivant :

$$\begin{cases} \bar{Y} = a_0 + a_1 \bar{X} \\ \bar{X}\bar{Y} = a_0 \bar{X} + a_1 \bar{X}^2 \end{cases} \quad (V-25)$$

On obtient finalement les coefficients de l'équation de la droite d'étalonnage  $a_0$  et  $a_1$  :

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (V-26)$$

$$a_0 = \bar{Y} - a_1 \bar{X} \quad (V-27)$$

Les valeurs  $\hat{Y}_i$  et  $\hat{X}_i$  prévus par le modèle sont déduire directement à partir de l'équation de régression en fonction des valeurs mesurés comme suit :

$$\hat{X}_i = \frac{Y_i - a_0}{a_1} \quad (V-28)$$

$$\hat{Y}_i = a_0 + a_1 X_i \quad (V-29)$$

D'autre part, les valeurs de la partie aléatoire de l'équation d'étalonnage peuvent être calculées aisément à partir de cette équation :

$$e_i = Y_i - \hat{Y}_i \tag{V-30}$$

Et la variance :

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 - a_i \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-2} \tag{V-31}$$

Ces formules statistiques seront appliquées dans les sections suivantes pour déterminer les paramètres d'étalonnage de SMVM en cas des déplacements relatifs et absolus.

### V.3.4 Résultats d'étalonnage de SMVM.

#### V.3.4.1 Résultats d'étalonnage des déplacements relatifs

Les essais de mesure sur les déplacements inférieurs ou égaux à une période spatial  $P_x$  ou  $P_y$  permettent la vérification de la fiabilité et la précision du système de mesure mire-vision. Nous procédons donc à des essais pour calibrer la technique dans l'intervalle d'une période, ou dans l'intervalle des déplacements relatifs.

Les coordonnées x des 20 points de références sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau V.2 : Les points de références pour l'étalonnage de la position relative par SMVM.

Points	$P_{r1}$	$P_{r2}$	$P_{r3}$	...	...	...	...	$P_{r18}$	$P_{r19}$	$P_{r20}$
Position suivant x	1	2	3	...	...	...	...	18	19	20

Les résultats obtenus par le système de mesure sont traités par le logiciel d'analyse et de statistiques Minitab 18 [Int 4]. Le traitement de ces données a fourni les courbes et les résultats suivants :

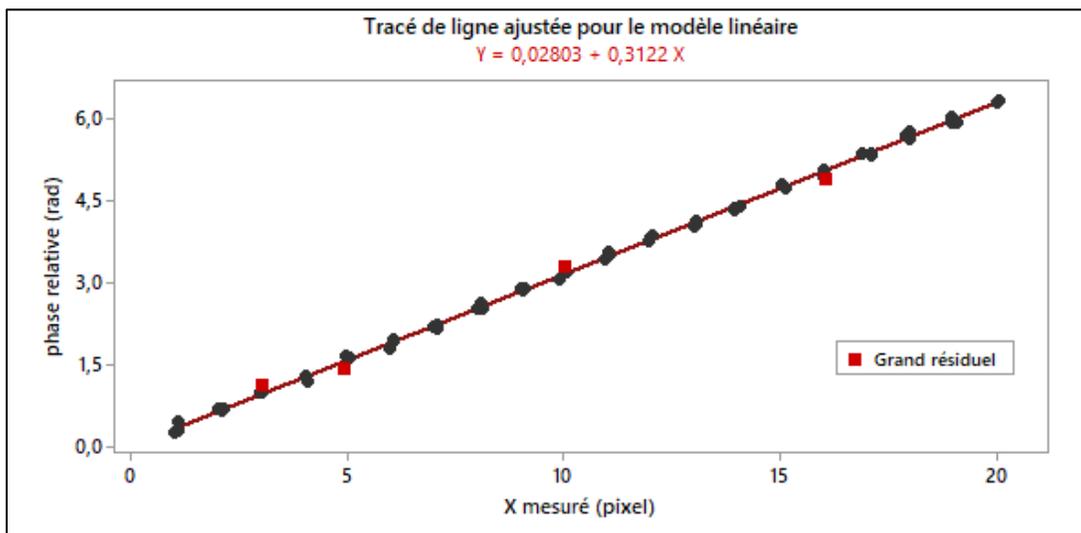


Figure V.10 : Courbe d'étalonnage avec ajustement par un modèle linéaire.

La Figure V.10 présente l'étalonnage de SMVM par le modèle linéaire :  $\phi = 0.02803 + 0.3122 X_r$ .  $\phi$  présente la réponse du modèle (la phase relative) et  $X_r$  c'est le déplacement relatif qui présente la variable d'entrée du modèle (les étalons mesurés).

Les points rouges correspondant aux valeurs maximales de résidus, dont les valeurs de mesure correspondantes ne sont pas correctement ajustées par le modèle d'étalonnage.

Le modèle d'étalonnage permet de prélever la valeur de déplacement en relation avec la phase relative et inversement. La ligne rouge ajustée dans la figure V.11 indique la phase relative prévue de toute valeur de déplacement relatif. En revanche, les lignes pointillées en bleu indiquent un intervalle de prédiction de 95 %. Le tableau ci-contre indique l'intervalle de prévision pour chaque valeur X de déplacement.

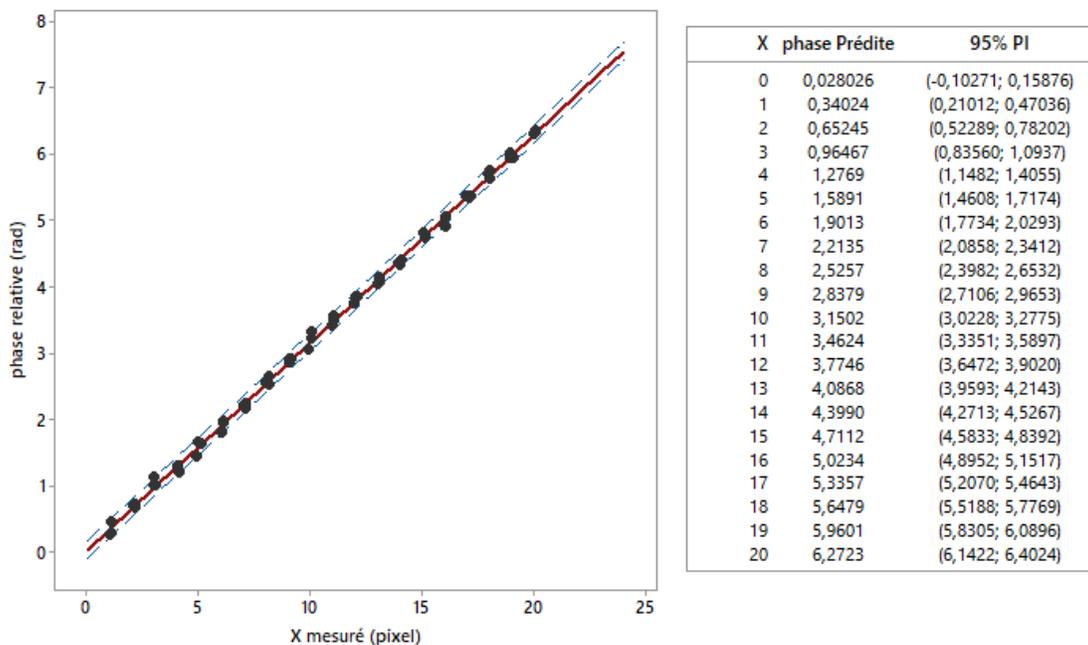


Figure V.11 : Rapport de prédiction et de régression linéaire de la phase relative avec le déplacement relatif mesuré.

Les courbes de la figure (V-12) montre la dispersion des valeurs résiduelles autour de la valeur moyenne, ce qui montre la nature aléatoire et normale de cette distribution.

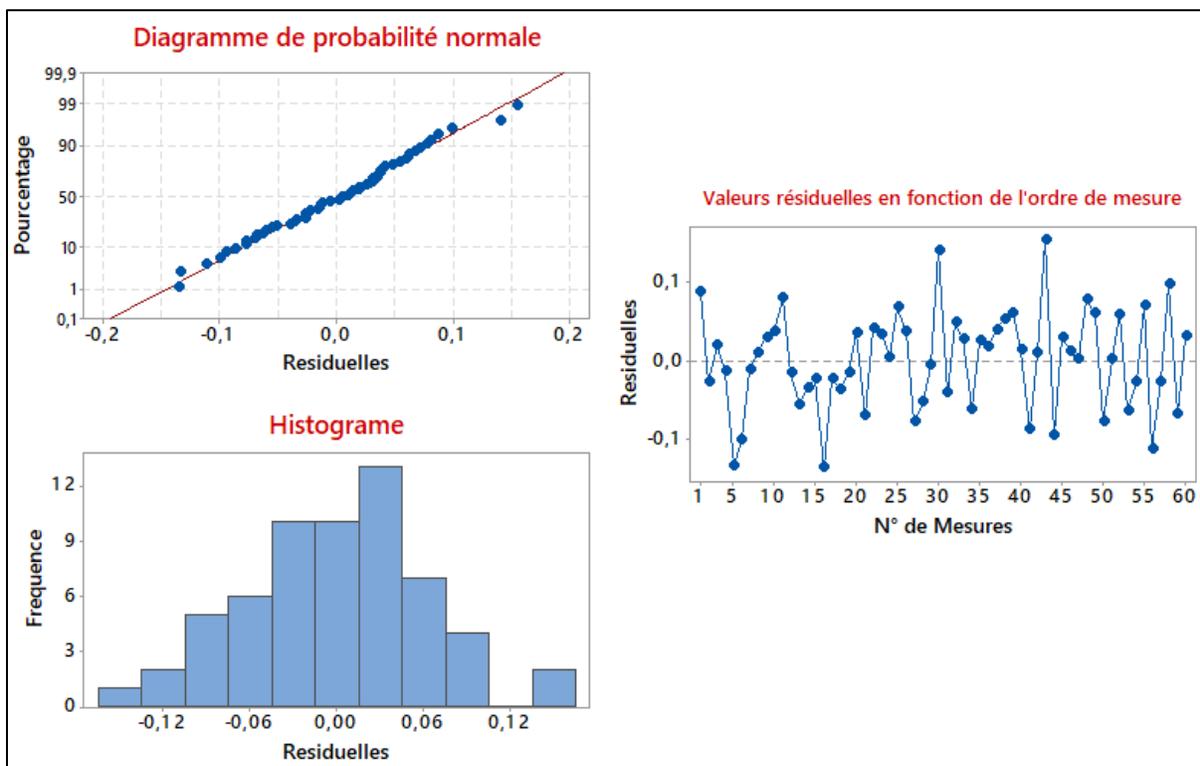


Figure V.12 : Distribution des résidus d'ajustement en moindres carrés des déplacements relatifs de l'effecteur.

Le calcul des paramètres de cette distribution a donné les résultats suivants :

Selon l'équation (III-1) nous avons la variance :

$$u_c(X_r)^2 = \sum u(x_i) = 0.251$$

Et l'écart-type composé donné par la relation (III-2) :

$$u_c(X_r) = \sqrt{u_c(y)^2} = 0.50 \text{ pixel (1.6 } \mu\text{m)}$$

### V.3.4.2 Résultats d'étalonnage des déplacements absolus

La position calculée  $P_c$  dans cette phase sera comparé avec la position de référence initiale  $P_r$ .

En fait, la comparaison de ces deux positions en plusieurs points (étalons) conduit à obtenir une courbe d'étalonnage. Les positions de références ou les points de trajectoire sont prédéfinis sur la carte codée de la Figure V.13 à l'aide de la règle de calibrage présentée sur la Figure V.8.

Les coordonnées de ces points sont indiquées dans le tableau suivant.

Tableau V.3 : Les points de références pour l'étalonnage de la position absolue par SMVM.

Points	$P_{r1}$	$P_{r2}$	$P_{r3}$	$P_{r4}$	$P_{r5}$	$P_{r6}$	$P_{r7}$	$P_{r8}$	$P_{r9}$	$P_{r10}$
Cordonnée	220	320	320	420	420	520	520	720	720	820
	660	660	560	560	460	460	360	360	260	260
Rotation	0	0	45	0	90	45	0	0	0	45

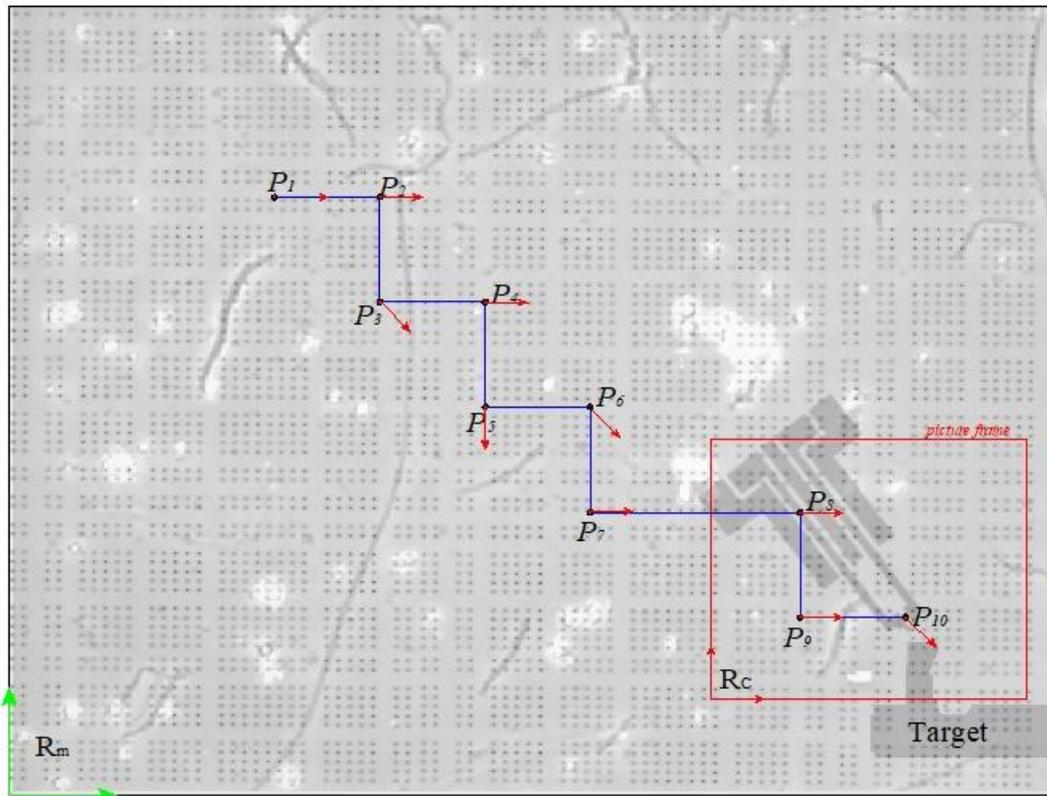


Figure V.13 : Trajectoire parcourue par l'effecteur durant un essai d'étalonnage.

La nature aléatoire et normale de la distribution des résidus d'ajustement en moindres carrés des déplacements absolus est illustrée sur la figure (V-14).

Le modèle linéaire d'étalonnage s'écrit :  $Y = 0.621 + 0.009 X$ .

Ou bien :  $\Phi = 0.621 + 0.009 X_a$ , tel que  $\Phi$  la réponse du système.  $X_a$  : c'est le déplacement absolu.

Le calcul des paramètres de cette distribution a donné les résultats suivants :  
Selon l'équation (III-1) nous avons la variance :

$$u_c(X_a)^2 = \sum u(x_i) = 0.271$$

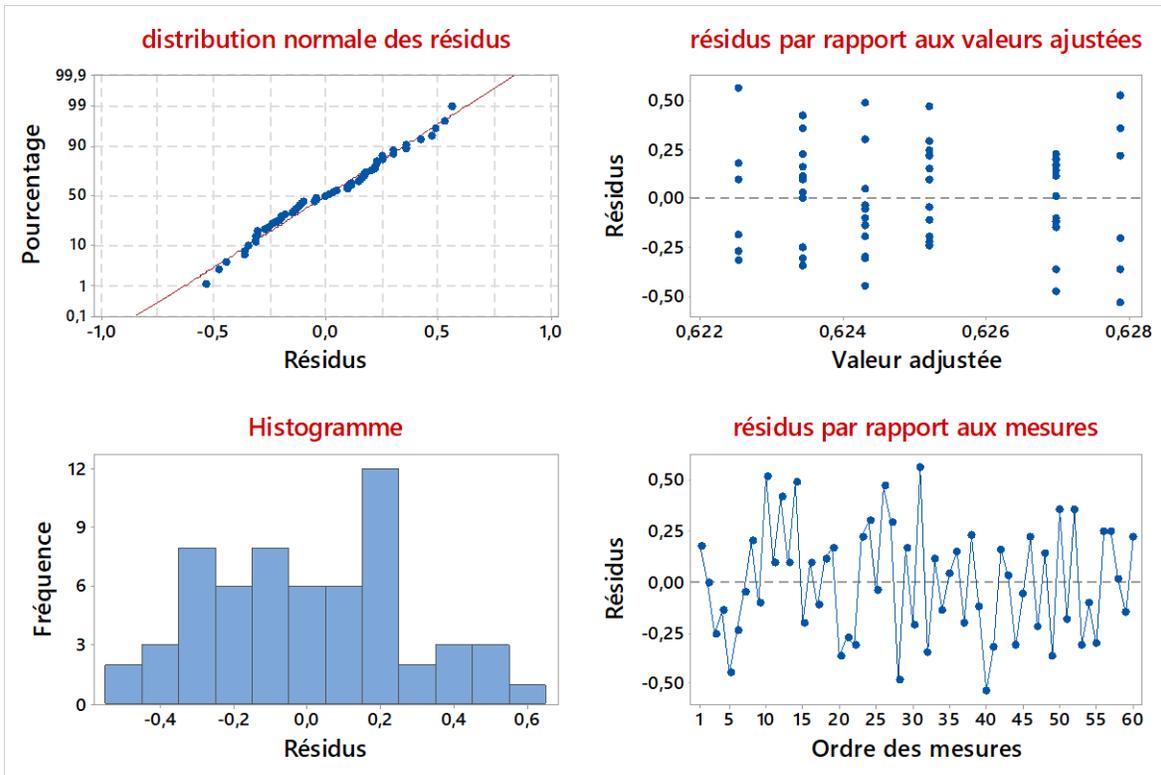


Figure V.14 : Distribution des résidus d'ajustement en moindres carrés des déplacements absolus de l'effecteur.

Et l'écart-type composé donné par la relation (III-2) :

$$u_c(X_a) = \sqrt{u_c(X_a)^2} = 0.520 \text{ pixel (1.664 } \mu\text{m)}$$

### V.3.4.3 Résultats d'étalonnage des rotations

L'étalonnage de SMVM en mesure des rotations s'effectue de la même façon que l'étalonnage des déplacements absolus et avec les mêmes points de référence du Tableau V.3.

La distribution normale des résidus d'ajustement en moindres carrés des rotations est montrée sur la figure (V-14). Le modèle linéaire d'étalonnage s'écrit :  $Y = 1.052 + 0.99 X$ .

Ou bien :  $\theta = 0.621 + 0.009 \theta_r$ .

$\theta$  : c'est l'angle de rotation de l'effecteur, elle présente la réponse du modèle.

$\theta_r$  : c'est la rotation de référence.

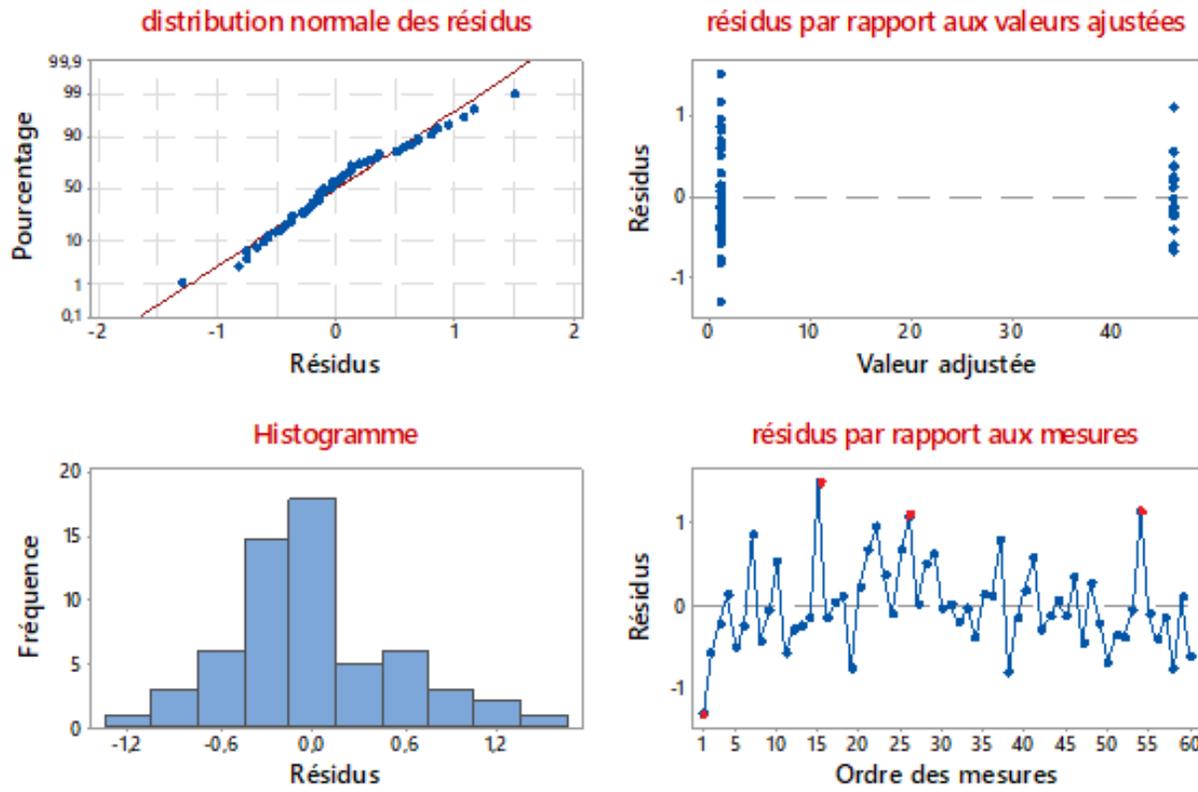


Figure V.15 : Distribution des résidus d'ajustement en moindres carrés des rotations de l'effecteur.

La variation des résidus à partir des mesures montre que quatre valeurs doivent être ajustées à partir du modèle linéaire, comme le montre le tableau ci-dessous.

Observation	$\theta_{référence}$	$\theta_{mesurée}$	Ajustement	Résidu
1	0	-0.248	-1.052	-1.300
15	0	2.543	1.491	1.491
26	45	47.111	1.074	1.074
54	0	2.204	1.151	1.151

À partir des courbes de la Figure V.15, on calcul la variance de cette distribution selon la relation suivante :

$$u_c(\theta)^2 = \sum u(x_i) = 0.0735$$

L'écart-type composé  $u_c(\theta)$  est donné par la relation (III-2) :

$$u_c(\theta) = \sqrt{u_c(y)^2} = 0.271 \text{ °}$$

## V.4 Récapitulation générale

Les résultats des calculs et des estimation obtenues sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau V.4 : récapitulation des résultats des estimations des incertitudes de SMVM.

Source d'incertitude		Symbole et valeur	Méthode d'évaluation
Étalonnage de caméra (SV) (Section V.2)	Incertitude de projection de l'image	$u_{reprojection}(x) = 3.712 \mu\text{m}$	Type A
	Incertitude de translation	$\begin{cases} u_{caméra}(x) = 76.8 \mu\text{m} \\ u_{caméra}(y) = 6.4 \mu\text{m} \end{cases}$	
	Incertitude de rotation	$u_{caméra}(\theta) = 0.06^\circ$	
Étalonnage de SMVM (Section V.3)	Incertitude de la position relative	$\begin{cases} u_{E\_Relative}(x) = 1.6 \mu\text{m} \\ u_{E\_Relative}(y) = 1.6 \mu\text{m} \end{cases}$	Type A
	Incertitude de la position absolue	$\begin{cases} u_{E\_Absolue}(x) = 1.664 \mu\text{m} \\ u_{E\_Absolue}(y) = 1.664 \mu\text{m} \end{cases}$	
	Incertitude de rotation	$u_{E\_rotation}(\theta) = 0.271^\circ$	
Platine de positionnement (Section IV.4.6)		$\begin{cases} u_{platine}(x) = 10 \mu\text{m} \\ u_{platine}(y) = 10 \mu\text{m} \\ u_{platine}(\theta) = 0.167^\circ \end{cases}$	Type B

La loi de propagation de l'incertitude (Section III.2) permet alors de calculer l'incertitude composée comme suit :

### a) Incertitude composée suivant x :

$$u_c(x) = \sum u(x_i) = u_{platine}(x) + u_{projection}(x) + u_{caméra}(x) + u_{E\_Relative}(x) + u_{E\_Absolue}(x)$$

$$u_c(x) = 93.776 \mu\text{m} \approx 94 \mu\text{m}$$

Sachant que le facteur d'élargissement  $k=2$ . Donc, l'incertitude de mesure globale du système de mesure SMVM suivant x est égale :

$$I_y = \pm U_x = \pm k \cdot u_c(x) = 2 \cdot k \cdot u_c(x) = 187.552 \mu\text{m} \approx 188 \mu\text{m} .$$

**b) Incertitude composée suivant y :**

$$u_c(y) = \sum u(x_i) = u_{\text{platine}}(y) + u_{\text{projection}}(y) + u_{\text{caméra}}(y) + u_{E_{\text{Relative}}}(y) + u_{E_{\text{Absolue}}}(y)$$

$$u_c(y) = 23.376 \mu\text{m} \approx 24 \mu\text{m}$$

Sachant que le facteur d'élargissement  $k=2$ . Donc, l'incertitude de mesure globale du système de mesure SMVM suivant y est égale :

$$I_y = \pm U_y = \pm k \cdot u_c(y) = 2 k \cdot u_c(y) = 46.752 \mu\text{m} \approx 47 \mu\text{m} .$$

**c) Incertitude composée de rotation :**

$$u_c(\theta) = \sum u(x_i) = u_{\text{platine}}(\theta) + u_{\text{caméra}}(\theta) + u_{E_{\text{Relative}}}(\theta)$$

$$u_c(\theta) = 0.498^\circ$$

Sachant que le facteur d'élargissement  $k=2$ . Donc, l'incertitude de mesure globale du système de mesure SMVM suivant en rotation est égale :

$$I_\theta = \pm U_\theta = \pm k \cdot u_c(\theta) = 2 k \cdot u_c(\theta) = 0.996^\circ \approx 1^\circ .$$

## V.5 Conclusion et perspectives

La mesure par vision-mire, une méthode de mesure optique non destructive, permet des mesures avec une grande précision, en particulier pour les micro-objets complexes. Elle permet d'obtenir des informations détaillées sur les propriétés optiques et géométriques des micro-objets, telles que leur mouvement, leur dimension et leur déformation.

La thèse porte sur l'étude des erreurs de positionnement de l'effecteur d'un robot miniature à l'aide d'un système de mesure vision-mire. Dans un premier temps, il s'agit de créer un algorithme à l'aide de Matlab pour traiter les images capturées par une caméra. L'algorithme est composé de deux parties : la première consiste à générer des mires codées et la deuxième consiste à traiter l'image d'une mire projetée sur un micro-objet afin d'obtenir des informations sur sa position. La validation de cet algorithme a été réalisée après cette étude.

On présente également une interface de mesure qui a été créée sous Matlab et qui est connectée à la caméra de microscope utilisée. La technique des mires périodiques projetées est utilisée par cette interface pour effectuer des mesures directes sur les images des micro-objets.

Une étude métrologique consiste à déterminer et à évaluer les erreurs et les incertitudes produites dans le processus de mesure afin d'étudier la performance du système proposé. On réalise un inventaire général à l'aide de la méthode d'Ichikawa pour identifier les causes qui affectent la chaîne de mesure.

Ce travail de thèse a permis de présenter l'influence de la platine de positionnement sur les résultats de mesure par utilisation de la méthode d'évaluation de type B.

Les mouvements planaires d'une platine en alliages à mémoire de forme et leur impact sur la mesure en domaine microscopique sont étudiés et simulés.

L'étalonnage de la caméra permet d'éliminer les incertitudes liées à la projection, à la translation et à la rotation des images. D'autre part, l'étalonnage de système de mesure par projection permet la détermination des courbes d'étalonnage linéaires dans différentes directions planaires afin de compenser les erreurs du processus de mesure.

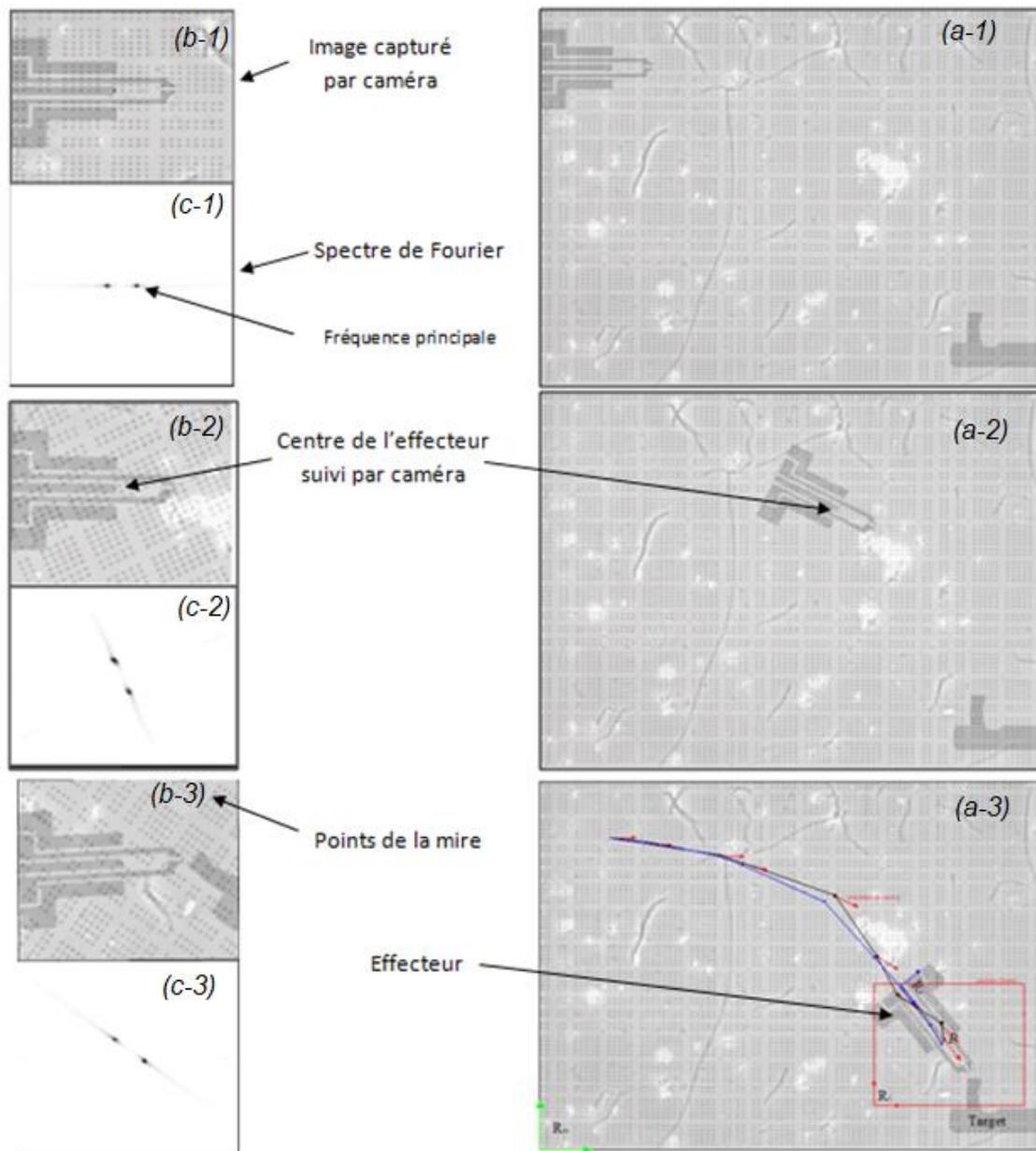
## Perspectives

En vue d'améliorer les performances de la mesure par vision-mire il est intéressant de :

- développer cette technique pour répondre aux besoins spécifiques des industries,
- développer des méthodes de traitement des données et de visualisation pour améliorer l'efficacité et la précision de la mesure,
- miniaturiser et concevoir des capteurs qui pourraient contribuer à une utilisation plus large de la micro-mesure par des mires périodiques dans des applications plus précises et plus spécialisées.

## **Les Annexes**

## Annexe A : Technique de suivis et de mesure de la trajectoire d'un effecteur par SMVM.



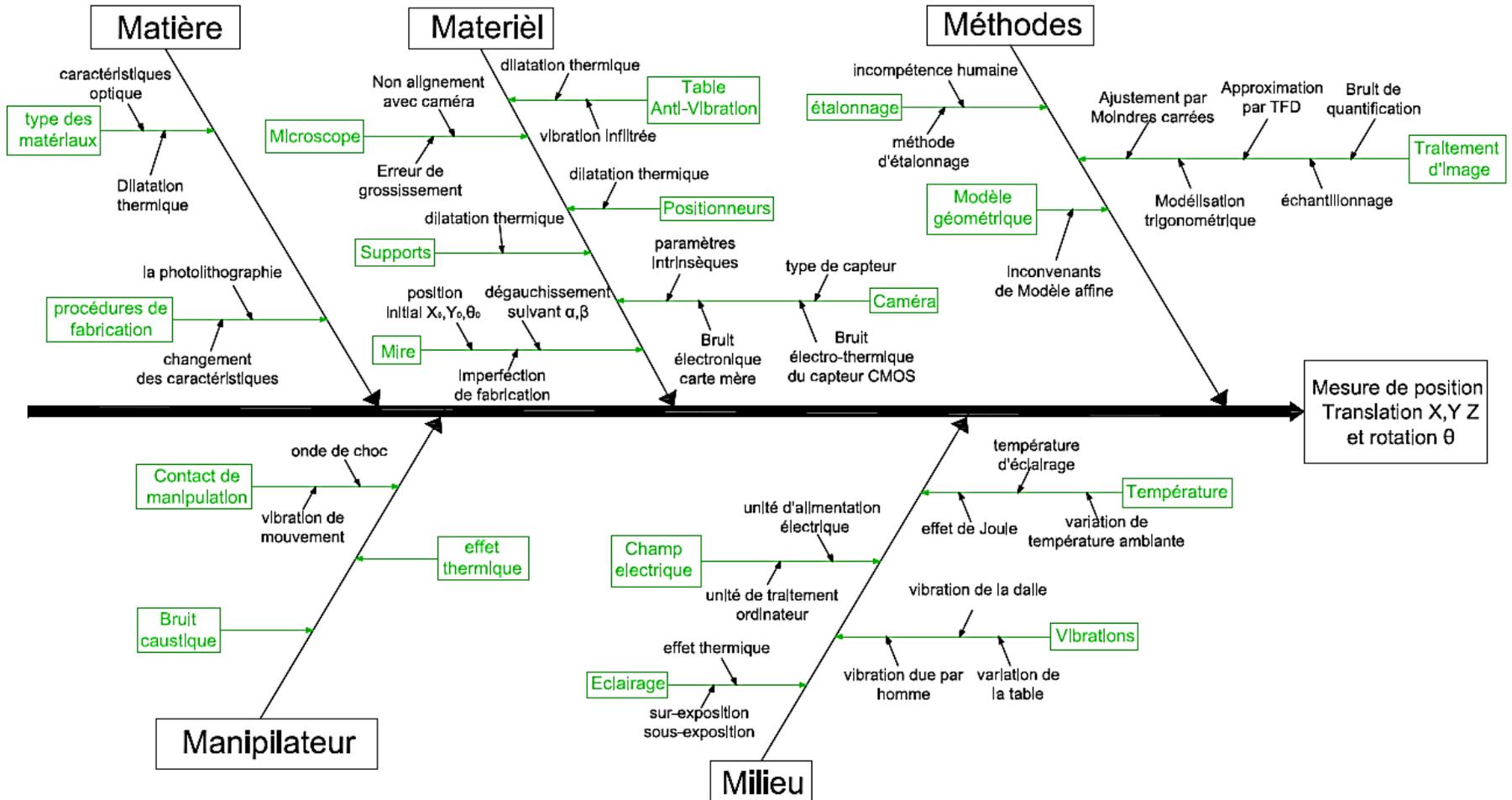
La technique de suivis et de mesure de la trajectoire d'un effecteur par SMVM.

(a-1 :3) : trois positions différentes de l'effecteur par rapport à une cible.

(b-1 :3) : les images des trois positions obtenues par caméra.

(c-1 :3) : spectre modulaire.

**Annexe B : diagramme d'Ichikawa des facteurs d'influences sur un SMVM.**



## Bibliographies

- [1] P. Sandoz and J. A. G. Zea, "Space-frequency analysis of pseudo-periodic patterns for subpixel position control," in *International Symposium on Optomechatronic Technologies*, 2009, pp. 16-21.
- [2] P. Sandoz, J. M. Friedt, and E. Carry, "In-plane rigid-body vibration mode characterization with a nanometer resolution by stroboscopic imaging of a microstructured pattern," *Rev Sci Instrum*, vol. 78, no. 2, p. 023706, Feb 2007.
- [3] S. Yin, R. Guo, N.-J. Cheng, S.-Y. Chen, and W.-H. Su, "Phase unwrapping using binary-encoded fringe pattern for phase-shifting projected fringe profilometry," presented at the Photonic Fiber and Crystal Devices: Advances in Materials and Innovations in Device Applications X, 2016.
- [4] J.-A. Galeano-Zea, P. Sandoz, E. Gaiffe, J.-L. Prétet, and C. Mougin, "Pseudo-Periodic Encryption of Extended 2-D Surfaces for High Accurate Recovery of any Random Zone by Vision," *International Journal of Optomechatronics*, vol. 4, no. 1, pp. 65-82, 2010.
- [5] V. r. GUELPA, "Mesure visuel de position par vision pour la microrobotique à l'aide de mires périodiques," Thèse de doctorat, Bourgogne Franche-Comté., 2017.
- [6] Sylvain PAINEAU, Philippe ANDREUCCI, Catherine SCHAFFNIT, and S. MAGATON, "Microsystèmes : applications et mise en œuvre," *techniques de l'ingénieur*, 2005.
- [7] G. CHABOUSSANT, "Nanostructures magnétiques," *Techniques Ingénieur*, 2005.
- [8] P. J. HARRIS, "Carbon nanotube composites," *International materials reviews* vol. 49, no. 1, pp. 31-43, 2004.
- [9] P. COSTA, "Introduction aux nanomatériaux et nanotechnologies," *Techniques Ingénieur*, 2006.
- [10] H.-H. JEONG, A. G. MARK, and T.-C. LEE, "Active nanorheology with plasmonics," *Nano letters*, vol. 16, no. 8, pp. 4887-4894, 2016.
- [11] M. Z. MISKIN, A. J. CORTESE, K. DORSEY, and e. al., "Electronically integrated, mass-manufactured, microscopic robots.," *Nature*, vol. 584, no. 7822, pp. 557-561, 2020.
- [12] N. Dechev, J. K. Mills, and W. L. Cleghorn, "Mechanical fastener designs for use in the microassembly of 3d microstructures," in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2004, vol. 47144, pp. 447-456.
- [13] Y. Haddab and Y. Le Gorrec, "Une étude sur les spécificités de la commande dans le micromonde," *journal européen des systèmes automatisés*, vol. 44, no. 6, pp. 577-601, 2010.

- [14] P. Steiner and S. M. Schwehr, "Future applications of microsystem technologies in automotive safety systems," *Advanced Microsystems for Automotive Applications* pp. 21-42, 1998.
- [15] J. Ramakrishnan, P. R. Gaurav, N. S. Chandar, and N. Sudharsan, "Structural design, analysis and DOE of MEMS-based capacitive accelerometer for automotive airbag application," *Microsystem Technologies*, vol. 27, pp. 763-777, 2021.
- [16] C. Zachäus and G. Meyer, *Intelligent System Solutions for Auto Mobility and Beyond: Advanced Microsystems for Automotive Applications* Cham, Springer, 2020.
- [17] B. J. Nelson, I. K. Kaliakatsos, and J. J. Abbott, "Microrobots for minimally invasive medicine," *Annual review of biomedical engineering*, vol. 12, pp. 55-85, 2010.
- [18] G. Dogangil *et al.*, "Toward targeted retinal drug delivery with wireless magnetic microrobots," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2008, pp. 1921-1926.
- [19] M. Sendoh, K. Ishiyama, K. I. Arai, M. Jojo, F. Sato, and H. Matsuki, "Fabrication of magnetic micromachine for local hyperthermia," *IEEE transactions on magnetics*, vol. 38, no. 5, pp. 3359-3361, 2002.
- [20] K. Ishiyama, M. Sendoh, A. Yamazaki, and K. Arai, "Swimming micro-machine driven by magnetic torque," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 91, no. 1-2, pp. 141-144, 2001.
- [21] L. s. Mellal, "Modélisation et commande de microrobots magnétiques pour le traitement ciblé du cancer," Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 2016.
- [22] S. Byun *et al.*, "Barbed micro-spikes for micro-scale biopsy," *Journal of Micromechanics Microengineering*, vol. 15, no. 6, p. 1279, 2005.
- [23] A. C. Jones *et al.*, "Analysis of 3D bone ingrowth into polymer scaffolds via micro-computed tomography imaging," *Biomaterials*, vol. 25, no. 20, pp. 4947-4954, 2004.
- [24] F. Ott, "Développement et optimisation d'endoprothèses vasculaires," Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes (ComUE), 2019.
- [25] O. Ergeneman, K. Vollmers, J. J. Abbott, and B. Nelson, "Magnetically controlled wireless optical oxygen sensor for intraocular measurements," 2013.
- [26] M. Fluckiger and B. Nelson, "Ultrasound emitter localization in heterogeneous media," in *29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2007, pp. 2867-2870.
- [27] G. M. Rebeiz, *RF MEMS: theory, design, and technology*. John Wiley & Sons, 2004.
- [28] S. Badilescu and M. Packirisamy, *BioMEMS: science and engineering perspectives*. CRC Press, 2016.

- [29] O. Solgaard, *Photonic microsystems: Micro and nanotechnology applied to optical devices and systems*. 2009.
- [30] Y. Song, D. Cheng, and L. Zhao, *Microfluidics: fundamentals, devices, and applications*. John Wiley & Sons, 2018.
- [31] D. BEYSSEN, "Conception, étude et réalisation de micro-capteurs et micro-actionneurs chimiques et biologiques à base de dispositifs à ondes acoustiques de surface," Thèse de doctorat., Nancy 1, 2006.
- [32] V. M. F. G. DEL CAMPO, "Contribution aux microsystèmes magnétiques: Micromoteur asynchrone à palier magnétique," Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 1999.
- [33] L. PETIT, "Antennes reconfigurables à base de MEMS RF," Thèse de doctorat, Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2007.
- [34] A. H. Zahr, "Optimisation et réalisation d'un package pour MEMS-RF," Thèse de doctorat, Université de Limoges, France, 2016.
- [35] H. MOUNSSI, "Etude sur la conception des filtres RF-MEMS," Thèse de doctorat., école nationale polytechnique d'Alger, 2013.
- [36] J. H. Fluitman, A. van den Berg, and T. S. Lammerink, "Micromechanical components for  $\mu$ TAS," in *Micro Total Analysis Systems: Proceedings of the  $\mu$ TAS'94 Workshop*, 1995, pp. 73-83: Springer.
- [37] A. Berg and P. Bergveld, "Micro Total Analysis Systems: Proceedings of the [micro] TAS'94 Workshop," MESA Research Institute, University of Twente, The Netherlands, 1995.
- [38] J. Branebjerg, B. Fabius, P. Gravesen, and M. Centret, "APPLICATION OF MINIATURE ANALYZERS: FROM MICROFLUIDIC COMPONENTS TO  $\mu$ TAS," in *Micro Total Analysis Systems: Proceedings of the [micro] TAS'94 Workshop*, MESA Research Institute, University of Twente, The Netherlands., 1995, p. 141: Springer Science & Business Media.
- [39] T. VILKNER, D. JANASEK, and A. MANZ, "Micro total analysis systems. Recent developments," *Analytical chemistry*, vol. 76, no. 12, pp. 3373-3386, 2004.
- [40] Y. SHAO and D. L. DICKENSHEETS, "MOEMS 3-D scan mirror for single-point control of beam deflection and focus," *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS*, vol. 4, no. 4, pp. 041502-041507, 2005.
- [41] G. M. Whitesides, "The origins and the future of microfluidics," *nature*, vol. 442, no. 7101, pp. 368-373, 2006.
- [42] J. Zhang *et al.*, "Fundamentals and applications of inertial microfluidics: A review," *Lab on a Chip*, vol. 16, no. 1, pp. 10-34, 2016.

- [43] B. López-Walle, M. Gauthier, and N. Chaillet, "Principle of a submerged freeze gripper for microassembly," *IEEE transactions on robotics*, vol. 24, no. 4, pp. 897-902, 2008.
- [44] P. Lutz, M. Gauthier, and S. Régnier, "Microrobotique pour composants micrométriques: les challenges pour leur manipulation et leur assemblage," in *7è Journées Nationales de la Recherche en Robotique, JNRR'09.*, 2009, pp. 1-14.
- [45] J. G. Zea, P. Sandoz, G. Laurent, L. L. Lemos, and C. Clevy, "Twin-scale vernier micro-pattern for visual measurement of 1-D in-plane absolute displacements with increased range-to-resolution ratio," *International Journal of Optomechatronics*, vol. 7, no. 3, pp. 222-234, 2013.
- [46] J. A. G. Zea, P. Sandoz, and L. Robert, "Position encryption of extended surfaces for subpixel localization of small-sized fields of observation," in *International Symposium on Optomechatronic Technologies*, 2009, pp. 22-27.
- [47] Y.-S. Kim, S. H. Yang, K. W. Yang, and N. G. Dagalakis, "Design of MEMS vision tracking system based on a micro fiducial marker," *Sensors Actuators A: Physical*, vol. 234, pp. 48-56, 2015.
- [48] H. Sugiura, S. Sakuma, M. Kaneko, and F. Arai, "On-chip method to measure mechanical characteristics of a single cell by using moiré fringe," *Micromachines*, vol. 6, no. 6, pp. 660-673, 2015.
- [49] C. Yamahata, E. Sarajlic, G. J. Krijnen, and M. A. Gijs, "Subnanometer translation of microelectromechanical systems measured by discrete Fourier analysis of CCD images," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 19, no. 5, pp. 1273-1275, 2010.
- [50] J. Salvi, J. Pages, and J. Batlle, "Pattern codification strategies in structured light systems," *Pattern recognition*, vol. 37, no. 4, pp. 827-849, 2004.
- [51] A. N. André, P. Sandoz, B. Mauzé, M. Jacquot, and G. J. Laurent, "Sensing one nanometer over ten centimeters: A microencoded target for visual in-plane position measurement," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 25, no. 3, pp. 1193-1201, 2020.
- [52] N. Tan, C. Clevy, G. J. Laurent, P. Sandoz, and N. Chaillet, "Accuracy Quantification and Improvement of Serial Micropositioning Robots for In-Plane Motions," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 31, no. 6, pp. 1497-1507, 2015.
- [53] N. Tan, C. Clévy, G. J. Laurent, P. Sandoz, and N. Chaillet, "Characterization and compensation of XY micropositioning robots using vision and pseudo-periodic encoded patterns," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2014, pp. 2819-2824.
- [54] J. A. G. Zea, P. Sandoz, L. Robert, E. Gaiffe, J.-L. Prétet, and C. Mougin, "Position-referenced microscopy: regions of interest localization and subpixel image comparison by means of pseudo-random patterns embedded in cell culture boxes," in *European Conference on Biomedical Optics*, 2009, p. 7367\_07.

- [55] N. Tan, C. Clévy, G. J. Laurent, P. Sandoz, and N. Chaillet, "Accuracy quantification and improvement of serial micropositioning robots for in-plane motions," *IEEE Transactions on robotics*, vol. 31, no. 6, pp. 1497-1507, 2015.
- [56] P. Sandoz, "Nanometric position and displacement measurement of the six degrees of freedom by means of a patterned surface element," *Applied optics*, vol. 44, no. 8, pp. 1449-1453, 2005.
- [57] J. Jaramillo, A. Zarzycki, J. Galeano, and P. Sandoz, "Performance characterization of an xy-stage applied to micrometric laser direct writing lithography," *Sensors (Basel)*, vol. 17, no. 2, p. 278, 2017.
- [58] V. Guelpa, P. Sandoz, M. A. Vergara, C. Clévy, N. Le Fort-Piat, and G. J. Laurent, "2D visual micro-position measurement based on intertwined twin-scale patterns," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 248, pp. 272-280, 2016.
- [59] M. Asmad Vergara, M. Jacquot, G. J. Laurent, and P. Sandoz, "Digital holography as computer vision position sensor with an extended range of working distances," *Sensors (Basel)*, vol. 18, no. 7, p. 2005, 2018.
- [60] A. N. André, P. Sandoz, B. Mauzé, M. Jacquot, and G. J. Laurent, "Robust phase-based decoding for absolute (X, Y,  $\Theta$ ) positioning by vision," *IEEE Transactions on Instrumentation Measurement*, vol. 70, pp. 1-12, 2020.
- [61] A. M. Grigoryan and M. M. Grigoryan, *Brief Notes in Advanced DSP, Fourier Analysis with MATLAB*. CRC Press, Taylor & Francis Group 2009.
- [62] R. L. and J. Easton, *Fourier Methods in Imaging*. John Wiley & Sons, Ltd, 2010.
- [63] S. E. UMBAUGH, "Digital Image Processing and Analysis Applications with MATLAB® and CVIP tools," *CRC press* 2018.
- [64] C. Zuo, L. Huang, M. Zhang, Q. Chen, and A. Asundi, "Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: A comparative review," *Optics lasers in engineering*, vol. 85, pp. 84-103, 2016.
- [65] V. OIML, "International Vocabulary of Metrology—Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM)," *OIML, Paris*, vol. V 2, 2007.
- [66] GUM, "International vocabulary of metrology—basic and general concepts and associated terms, VIM," *International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland*, 2007.
- [67] GUM, "Évaluation des données de mesure-guide pour l'expression de l'incertitude de mesure," ed: BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAP, IUPAC, OIML, 2008.
- [68] F. Grégis, "La valeur de l'incertitude: l'évaluation de la précision des mesures physiques et les limites de la connaissance expérimentale," Thèse de doctorat, Université Paris Diderot (Paris 7) Sorbonne Paris Cité, 2016.

- [69] S. L. Ellison and A. Williams, "EURACHEM/CITAC Guide : Quantifying uncertainty in analytical measurement," 2012.
- [70] U. K. A. Service, *The expression of uncertainty and confidence in measurement*. United Kingdom Accreditation Service, 1997.
- [71] A. N. André, P. Sandoz, M. Jacquot, and G. J. Laurent, "Robust, precise and scalable: A phase-encoded pattern for visual X, Y,  $\Theta$  positioning," in *international conference on manipulation, automation and robotics at small scales (MARSS)*, 2020, pp. 1-5.
- [72] K. Inaba, S. Kobayashi, K. Uehara, A. Okada, S. L. Reddy, and T. Endo, "High resolution X-ray diffraction analyses of (La, Sr) MnO<sub>3</sub>/ZnO/Sapphire (0001) double heteroepitaxial films," *Advances in Materials Physics and Chemistry*, vol. 3, pp. 72-89, 2013.
- [73] Y. Du, T. Li, Y. Jiang, and H. Wang, "Design and analysis of a 2-degree-of-freedom flexure-based micro-motion stage," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 1-13, 2016.
- [74] B. Mauzé *et al.*, "Nanometer precision with a planar parallel continuum robot," *IEEE Robotics Automation Letters*, vol. 5, no. 3, pp. 3806-3813, 2020.
- [75] A. Rao, A. R. Srinivasa, and J. N. Reddy, *Design of shape memory alloy (SMA) actuators*. Springer, 2015.
- [76] B. Tiwari *et al.*, "A High Range-to-Resolution Multiaxis  $\mu$  Force and Torque Sensing Platform," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 26, no. 4, pp. 1837-1845, 2021.
- [77] B. Hichem, B. Yacine, B. Mohamed, and F. Mamoun, "Micrometer Precision of Miniature Pattern with a Shape Memory Alloy Stage," in *Materials sciences And Engineering, (MSE'22)*, 2022, no. 9403: EasyChair.
- [78] D.-S. Copaci, D. Blanco, A. Martin-Clemente, and L. Moreno, "Flexible shape memory alloy actuators for soft robotics: Modelling and control," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 17, no. 1, pp. 1-15, 2020.
- [79] C. Liang and C. A. Rogers, "One-dimensional thermomechanical constitutive relations for shape memory materials," *Journal of intelligent material systems*, vol. 8, no. 4, pp. 285-302, 1997.
- [80] A. R. Mehrabian, S. V. Hashemi, E. Williams, and M. Elahinia, "A Study of Fuzzy Hysteresis Modeling and Control of A Shape Memory Wire Actuator," in *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2007, vol. 48027, pp. 1907-1914.
- [81] S. Szykowny and M. H. Elahinia, "Heat transfer analysis of shape memory alloy actuators," in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2006, vol. 47659, pp. 105-112.

- [82] M. Zhuo, "Timescale competition dictates thermo-mechanical responses of NiTi shape memory alloy bars," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 193, pp. 601-617, 2020.
- [83] M. H. Elahinia and H. Ashrafiuon, "Nonlinear control of a shape memory alloy actuated manipulator," *Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 124, no. 4, pp. 566-575, 2002.
- [84] T. W. Duerig, K. Melton, and D. Stöckel, *Engineering aspects of shape memory alloys*. Butterworth-heinemann, 2013.
- [85] M. H. Elahinia, *Shape memory alloy actuators: design, fabrication, and experimental evaluation*. John Wiley & Sons, 2016.
- [86] H. Bhargaw, M. Ahmed, and P. Sinha, "Thermo-electric behaviour of NiTi shape memory alloy," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 23, no. 8, pp. 2329-2335, 2013.
- [87] T. Yoneyama and S. Miyazaki, *Shape memory alloys for biomedical applications*. CRC Press LLC, 2008.
- [88] C. Yardin, "Estimer la droite d'étalonnage avec les moindres carrés généralisés et évaluer le résultat de mesure," *Revue française de métrologie*, no. 31, pp. 21-39, 2013.
- [89] Y. Aragon, "Régression linéaire par la méthode des moindres carrés," in *Séries temporelles avec R*: Springer-Verlag France, 2011, pp. 39-56.

## Sites Internet

- [int 1] <https://set-sas.fr/catalog/xf-applications/>
- [int 2] <https://www.tosag.ch/Table-panoramique-lineaire-sur-laxe-XY-avec-plate-forme-rotative>
- [int 3] <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/diffractometers-and-scattering-systems/x-ray-diffractometers/davinci-components/sample-stages-specimen-holders.html>
- [int 4] <https://www.minitab.com/fr-fr/products/minitab/free-trial/>