

THÈSE DE DOCTORAT DE L'ÉTABLISSEMENT
UNIVERSITÉ BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ
PRÉPARÉE À L'UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

ÉCOLE DOCTORALE N° 37
SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR ET MICROTECHNIQUES

Doctorat d'Automatique

PAR

Antoine N. F. ANDRÉ

Mesure visuelle robuste à grands rapports plage sur résolution de la pose 3D de mires périodiques codées : applications à la microrobotique

Soutenue à Besançon, le 8 Octobre 2021

Composition du Jury :

Youcef MEZOUAR	Professeur à Sigma-Clermont, Institut Pascal	Rapporteur
Peter STURM	Directeur de recherche à l'INRIA de Grenoble	Rapporteur
Eric MARCHAND	Professeur à l'Université de Rennes 1, IRISA	Examinateur,
Guillaume LAURENT	MCF HDR à l'ENSMM, Institut FEMTO-ST	Président du jury
Patrick SANDOZ	Chargé de recherche HDR CNRS, Institut FEMTO-ST	Directeur
Maxime JACQUOT	Professeur à l'Université de Franche-Comté, Institut FEMTO-ST	Codirecteur

Rapporteur
Examinateur,
Président du jury
Directeur
Codirecteur
Codirecteur

Remerciements

Avant d'entamer ce manuscrit de thèse, je souhaitais remercier toutes les personnes sans qui ce travail n'aurait pu aboutir. Bien que ce mémoire ait pour vocation de rendre compte d'une production scientifique réfléchie sur trois années, il n'en demeure pas moins important de considérer tout l'aspect humain qui se cache derrière.

Tout d'abord je tiens à remercier Messieurs Eric Marchand, Youcef Mezouar et Peter Sturm d'avoir accepté de participer au jury de thèse.

Je souhaite également adresser mes remerciements les plus sincères à mes encadrants de thèse qui ont toujours été bienveillants à mon égard, en me soutenant et en me donnant leur confiance tout au long de ma thèse. Guillaume, Patrick et Maxime, vos conseils toujours pertinents et vos remarques affûtées ont toujours été un plaisir à prendre en compte, permettant d'avancer avec un plan clair en tête tout au long de cette thèse. Avec vos horizons thématiques différents vous m'avez permis d'élargir le champ de vision de cette thèse en proposant différentes approches toutes pertinentes. Guillaume, je te remercie pour avoir dirigé cette thèse et pour toutes les discussions fructueuses desquelles ont découlé tellement d'idées à mettre en place pendant ces trois années. Patrick je tiens à te remercier pour tout le recul que tu m'as apporté sur ce sujet de thèse, en me montrant notamment que garder la tête baissée sur un clavier n'était pas toujours la meilleure solution. Maxime, je t'adresse également mes plus sincères remerciements pour les discussions que nous avons eues, et pour l'apport théorique que tu m'as permis d'acquérir.

Je tiens également à adresser ma reconnaissance la plus profonde à tous les membres du laboratoire AS2M de l'institut FEMTO-ST, qui maintiennent un cadre social agréable et propice à la production scientifique. Je tiens ainsi à remercier en particulier Philippe Lutz, directeur du département AS2M, pour aider à la conservation de cet environnement de travail sain et agréable. Ce travail de thèse fait état d'un outil de mesure qui a été largement employé au sein du laboratoire pour des applications très variées. Je tiens donc à remercier tous les collègues avec qui j'ai pu travailler, qui ont joué les bêta-testeurs et qui ont permis d'améliorer grandement cet outil.

Enfin, je tiens à remercier évidemment mes parents et mes sœurs qui m'ont épaulé tout au long de mes études, et qui m'ont permis de m'épanouir et de concrétiser mon parcours professionnel dans le domaine scientifique. Merci également à mes amis qui m'ont apporté tout le soutien et les encouragements dont j'avais besoin pendant cette période.

La science est l'auxiliaire de l'action, et l'action vise un résultat.

Henri Bergson

À ma famille et mes amis

Table des matières

Remerciements	iii
Table des matières	v
Glossaire	xi
Introduction générale.....	1
I Méthodes.....	5
1 Estimation de pose et microscopie.....	7
1.1 Estimation de pose par vision par ordinateur	8
1.1.1 Échelle macroscopique	8
1.1.2 Échelle microscopique.....	11
1.1.3 Marqueurs de repérage.....	13
1.2 Mires périodiques et méthodes associées pour l'estimation de pose	16
1.2.1 Mires à deux fréquences : méthode de Vernier	16
1.2.2 Méthode de Moiré	18
1.2.3 Mires périodiques 2D	18
1.3 Positionnement de la thèse	19
1.3.1 Sortir du plan imposé par la microscopie.....	19
1.3.2 Augmentation du facteur plage sur résolution	20
1.3.3 Robustesse de la mesure aux conditions d'imagerie...	20
1.3.4 Diffusion de la méthode de mesure	20
2 Méthode de mesure de pose 2D sous-pixellique basée sur la périodicité.....	23
2.1 Mesure de la position d'une mire périodique 1D	24
2.1.1 Définition d'une mire périodique 1D.....	24
2.1.2 Analyse de phase par étude spectrale.....	26

2.1.3	Impact du fenêtrage et de l'échantillonnage	27
2.1.4	Filtrage fréquentiel et analyse de phase	28
2.1.5	Performances de la mesure de phase 1D	31
2.2	Mesure de la pose planaire de mires périodiques 2D ..	33
2.2.1	Mire 2D unidirectionnelle	33
2.2.2	Généralisation de la mesure de pose à une mire 2D ..	34
2.2.3	Application de la méthode à la mesure sur une mire 2D échantillonnée	36
2.2.4	Hypothèses de conception des mires 2D.....	38
2.2.5	Performances atteignables de la mesure de pose 2D ..	38
2.3	Conclusion	40
3	Extension à une mesure de pose 3D	41
3.1	Mesure de pose 3D dans le cas d'une projection or- thographique	42
3.1.1	Utilité de la projection orthographique pour la me- sure de pose en microscopie	42
3.1.2	Définition de la projection d'une mire 2D dans le repère caméra.....	43
3.1.3	Méthode de résolution pour le calcul des angles β et γ	45
3.2	Mesure de pose 3D dans le cas d'une projection pers- pective	49
3.2.1	Approche intuitive du calcul de pose complet.....	49
3.2.2	Angles hors-plan sans ambiguïté : étude des dérivées de la phase	50
3.2.3	Mesure de pose complète.....	52
3.3	Performances numériques de mesure de pose 3D	53
3.3.1	Étude de la plage de mesure des angles hors-plan	53
3.3.2	Performances de la mesure de pose 3D.....	55
3.3.3	Comparaison avec une méthode de mesure de pose PnP	56
3.4	Conclusion	58
4	Extension robuste de la plage de mesure	61
4.1	Encodage univoque de la position	62
4.1.1	Choix de la séquence binaire.....	62
4.1.2	Méthode de codage de la séquence binaire	65
4.1.3	Pavage de la séquence codée sur la mire périodique ..	67

4.2	Décodage robuste de la position de la mire périodique encodée	69
4.2.1	Segmentation de l'image à partir de la phase	69
4.2.2	Transformation de l'image en imagettes de phase	72
4.2.3	Synchronisation de l'imagette de phase avec la séquence codée.....	74
4.2.4	Identification des séquences codées	76
4.3	Étude de la robustesse par simulation.....	78
4.3.1	Robustesse à différents types de bruits.....	78
4.3.2	Robustesse à l'occultation	80
4.4	Conclusion.....	82
II	Performances et applications.....	85
5	Validation expérimentale	87
5.1	Configuration des essais expérimentaux	88
5.1.1	Mires périodiques encodées	89
5.1.2	Dispositif d'acquisition d'images	89
5.1.3	Dispositifs mis en place	90
5.1.4	Environnement des essais expérimentaux	92
5.2	Étude de la résolution de la méthode	93
5.2.1	Présentation des essais expérimentaux de résolution..	94
5.2.2	Résolution de la pose planaire $xy\alpha$	94
5.2.3	Résolution des angles hors-plan	97
5.2.4	Résolution en profondeur z	98
5.3	Étude de la justesse et de la plage de mesure de la méthode	99
5.3.1	Présentation des essais expérimentaux de justesse....	100
5.3.2	Justesse de la pose planaire $xy\alpha$	100
5.3.3	Justesse de mesure de l'orientation $\beta\gamma$	101
5.3.4	Validation de la plage de mesure 6DDL.....	103
5.4	Étude de la robustesse de la mesure.....	105
5.4.1	Robustesse à la faible dynamique et au bruit	105
5.4.2	Étude de l'impact du défaut de mise au point sur la mesure	107
5.5	Conclusion.....	108
6	Bibliothèque logicielle Vernier	111

6.1	Objectifs de la bibliothèque logicielle	112
6.2	Fonctionnalités de la bibliothèque logicielle	113
6.3	Architecture de la bibliothèque logicielle	114
6.3.1	Hiérarchie des classes de mesure de pose	115
6.3.2	Hiérarchie des classes de génération des mires périodiques	117
6.3.3	Hiérarchie des classes de tests unitaires	117
6.4	Mires périodiques proposées par la bibliothèque logicielle	120
6.4.1	Définition des mires sous forme de fichier .json	120
6.4.2	Types de mires périodiques utilisables avec la bibliothèque logicielle	120
6.4.3	Performances du code	123
6.5	Conclusion	124
7	Applications	127
7.1	Application à l'étalonnage et à la métrologie robotique	128
7.1.1	Étude de justesse d'un robot sériel 6DDL	128
7.1.2	Étalonnage de robots souples	129
7.1.3	Étalonnage de machine à mesurer	135
7.2	Applications à la mesure de force	136
7.2.1	Capteur de micro-force unidirectionnel	136
7.2.2	Capteur de micro-force multi-axial à grand rapport plage sur résolution	139
7.3	Applications aux tâches de micro-assemblage	141
7.4	Conclusion	144
Conclusion et perspectives		145
Annexes		153
A	Détails sur les méthodes de mesure de pose par mires périodiques	155
A.1	Position des pics de Dirac en 1D	156
A.2	Mesure de phase en 2D	156

A.2.1	Position des pics de Dirac dans le cas de mires périodiques 2D unidirectionnelles.....	156
A.2.2	Position des pics de Dirac dans le cas de mires périodiques 2D bidirectionnelles.....	157
A.3	Étude des solutions pour la mesure de pose 3D	158
A.3.1	Non existence de la solution s_2	158
A.3.2	Existence de la solution s_1	159
A.4	Synchronisation de la séquence binaire avec l'image de phase	161
B	Détails sur la mise en pratique des méthodes de mesure de pose par mires périodiques	163
B.1	Évaluation du bruit de mesure de la méthode.....	164
B.2	Exemple de code utilisé par la bibliothèque Vernier ..	167
B.3	Détails de conception du HP Code.....	167
B.3.1	Méthode de mesure de pose des HP Code.....	167
B.3.2	Détermination du nombre minimal de périodes pour obtenir une résolution au millième de pixel.....	170
B.3.3	Validation expérimentale de la conception des HP Codes	170
Liste des publications	173	
Bibliographie.....	175	
Liste des Figures	183	
Liste des Tables.....	193	

Table des matières

Glossaire

NOTATIONS

Symbol	Notations
A	Signal périodique 1D
a, b, c	Coefficients d'un plan de phase d'équation $\phi = ax + by + c$
α, β, γ	Angles de rotation selon les angles d'Euler
δ	Fonction delta de Dirac
ϵ	Erreur de mesure
\mathcal{F}	Fonction de la transformée de Fourier
i	unité imaginaire d'un nombre complexe
f	Fréquence d'un signal périodique
I	Image
\hat{I}	Transformée de Fourier d'une image I
K_0	Matrice de projection d'une caméra
k_i	numéro d'une période d'une mire périodique 2D, selon la direction i
λ	Période d'un signal périodique
ϕ	Décalage de phase compris entre $-\pi$ et π
Φ	image de phase issue de l'analyse d'une mire périodique
Ψ	Dérivée première d'une image de phase de mire périodique
Υ	Dérivée seconde d'une image de phase de mire périodique
M, N	dimensions de la fenêtre échantillonnée d'une mire périodique 2D
q	numéro du quadrant de la mire (entre 0 et 3) indiquant son orientation absolue
R_m	Repère attaché à la mire
R_c	Repère attaché à la caméra
s	Facteur d'échelle d'une projection de caméra
σ	Écart-type, aussi noté std, d'un jeu de mesures
u, v	position dans le spectre fréquentiel
x, y, z	position en translation selon les axes $\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$

ACRONYMES

API	<i>Application Programming Interface</i> Interface de programmation applicative
DDL	Degré de Liberté
STD	<i>Standard Deviation</i> , écart-type d'un jeu de données
MEB	Microscope Électronique à Balayage
CAO	Conception Assistée par Ordinateur

Introduction générale

L'intégration progressive des systèmes micro-mécatroniques n'a cessé de faire évoluer notre quotidien depuis plusieurs décennies. En effet, ceux-ci se retrouvent maintenant dans nombre d'applications allant du domaine du médical, à celui de l'automobile, de l'aéronautique et même du spatial. Cependant la miniaturisation constante de ces systèmes soulève plusieurs problèmes concernant leur assemblage, leur fabrication ou encore leur caractérisation. Parmi ceux-ci se trouve également la question de leur bon contrôle en position. En effet, la miniaturisation de ces systèmes laisse de moins en moins de place pour insérer des capteurs qui doivent eux, être toujours plus performants. Ainsi, parallèlement à cette contrainte de réduction d'espace, ces systèmes ne cessent de gagner en résolution pour effectuer des tâches toujours plus précisément.

Ainsi les systèmes microrobotiques sont, de part leurs tailles, complexes à contrôler et offrent un espace très contraint limitant de fait l'intégration de capteurs sans compromettre leur efficacité. Par ailleurs, l'innovation constante dans le domaine de la microrobotique avec la proposition de structures innovantes basées sur des éléments continûment déformables vient également limiter l'insertion de capteurs physiques sur des zones d'intérêt, telles qu'en bout de plateforme par exemple, et présentent ainsi un défi majeur en matière de mesure sans contact.

La vision par ordinateur et l'observation de ces microrobots par le biais de microscopes offre un élément de réponse à cette problématique en proposant une mesure sans contact ne nécessitant que peu de matériel à intégrer autour des systèmes étudiés. Cette approche est d'autant plus pertinente à étudier que même monoculaire, elle offre une mesure possible selon les trois directions x , y et α . Cependant, avec la réduction d'échelle, des verrous physiques apparaissent et limitent la mesure de pose. En effet, la faible profondeur de champ des objectifs de microscope, leur courte distance de travail ou encore leur longueur focale importante contraignent la mesure de position à la fois en résolution et en 3D. Par ailleurs, cette mesure est limitée au champ de vision de la caméra alors que des plages de mesure plus importantes sont nécessaires dans le domaine de la microrobotique. Ce contraste entre le besoin d'une mesure à la fois résolue et disponible sur une grande plage est exprimé grâce au facteur plage sur résolution.

Pour répondre à ce besoin de mesure de pose à la fois grandement résolue et présentant une grande plage de mesure, cette thèse propose d'étudier les structures de mires périodiques ainsi que leur encodage pour augmenter la plage de mesure nécessaire à une polyvalence dans le domaine de la microrobotique. En effet, en

utilisant la redondance structurée d'informations disponibles sur ces motifs, il est alors possible d'effectuer une mesure de pose grandement résolue et résolvant une partie des problèmes inhérents à la mesure de pose en microscopie.

Ces travaux de thèse ont été menés à l'Institut FEMTO-ST au sein de l'équipe Micro et Nanorobotique du département d'Automatique et Systèmes Micro Mécatroniques (AS2M). Ils ont permis de développer une méthode de mesure de pose à six degrés de liberté à grand rapport plage sur résolution. Cette méthode a été intégrée sur divers systèmes microrobotiques de l'équipe de recherche pour répondre à des problématiques d'étalonnage, de micro-manipulation ou encore de micro-assemblage.

Ce manuscrit est composé de deux parties regroupant sept chapitres suivis d'une conclusion. La [partie I](#) présente l'aspect méthodologique de la mesure de pose par mire périodique et de l'agrandissement de sa plage de mesure. Le [chapitre 1](#) dresse un panorama des solutions existantes pour effectuer de la mesure de pose par vision orientée sur le domaine de la microscopie. Ce chapitre présente également les limitations des systèmes existants ainsi que les problématiques qui en émanent et qui sont à la base des réflexions développées dans le reste du manuscrit.

Le [chapitre 2](#) montre la construction des mires périodiques en détaillant leur fondements mathématiques à partir de signaux unidimensionnels ainsi que la méthode proposée pour extraire les informations de positions contenues dans le spectre fréquentiel de celles-ci. Ce chapitre étend ensuite cette étude en présentant la conception de mires périodiques bi-dimensionnelles et la méthode de mesure de pose dans le plan.

Dans le [chapitre 3](#), cette méthode de mesure planaire est étendue à la mesure de pose 3D en utilisant les informations spectrales présentées dans le chapitre précédent. Cette méthode est présentée en prenant en considération deux types de projection, orthographique et perspective.

Ces trois premiers chapitres montrent comment mesurer une pose de manière très résolue, mais en limitant celle-ci à une plage de mesure réduite à une période de la mire périodique. Le [chapitre 4](#) étend cette plage de mesure en insérant une séquence binaire codée au sein de la mire périodique. Cette intégration offre ainsi un agrandissement significatif de la plage de mesure tout en conservant les performances en résolution de la méthode.

La [partie II](#) est consacrée à l'étude expérimentale des performances atteignables par la méthode ainsi qu'aux applications qui ont été initiées durant la thèse.

Le [chapitre 5](#) présente les dispositifs expérimentaux et les essais mis en place pour quantifier les performances de la méthode en étudiant à la fois la résolution accessible ainsi que sa robustesse.

Le [chapitre 6](#) présente la bibliothèque logicielle qui intègre la méthode de mesure de position décrite dans ce mémoire. Son développement a notamment été motivé par le besoin de la réalisation d'essais expérimentaux, mais aussi de son besoin dans diverses applications microrobotiques de l'équipe de recherche.

Ces applications sont répertoriées et détaillées dans le [chapitre 7](#) qui présente la plus value de recourir à la méthode de mesure de pose par mire. L'intégration de la méthode dans diverses applications microrobotiques montre ainsi le caractère polyvalent de la méthode pour des usages aussi divers que des capteurs de micro-force ou l'étalonnage de microrobots parallèles continûment déformables.

La conclusion générale présente une synthèse des travaux de recherche menés pendant la thèse et des résultats obtenus. Elle est clôturée par des perspectives scientifiques et applicatives restant à explorer.

Première partie

Méthodes

Chapitre 1

Estimation de pose et microscopie

1.1	Estimation de pose par vision par ordinateur	8
1.1.1	Échelle macroscopique.	8
1.1.2	Échelle microscopique	11
1.1.3	Marqueurs de repérage	13
1.2	Mires périodiques et méthodes associées pour l'estimation de pose	16
1.2.1	Mires à deux fréquences : méthode de Vernier	16
1.2.2	Méthode de Moiré	18
1.2.3	Mires périodiques 2D.	18
1.3	Positionnement de la thèse	19
1.3.1	Sortir du plan imposé par la microscopie	19
1.3.2	Augmentation du facteur plage sur résolution	20
1.3.3	Robustesse de la mesure aux conditions d'imagerie.	20
1.3.4	Diffusion de la méthode de mesure	20

L'apport de la vision par ordinateur pour la compréhension d'environnements complexes ne cesse de croître en intérêt à mesure que les verrous scientifiques et technologiques se lèvent. Olivier Faugeras décrit la difficulté principale de ce domaine comme étant de «*permettre à des ordinateurs de voir*» dans la préface du livre didactique consacré à la vision par ordinateur écrit par Alex Andrew ([Andrew01]). Cette volonté de comprendre et d'analyser des scènes par le biais de l'outil informatique se retrouve dans nombre de domaines tels que la classification d'objets, la reconstruction de scènes 3D ou encore l'estimation de pose.

Ce champ applicatif est d'autant plus pertinent qu'il offre la possibilité de mesurer la pose d'un objet visé simplement par son observation, et ce sans interférer avec l'objet étudié. Cependant, là où le terme «*voir*» employé plus haut dénote la capacité à comprendre une scène de manière similaire à celle offerte par la vision humaine, cette conception change complètement à mesure que les objets visés réduisent en taille et là où même l'observation humaine devient limitée. C'est dans cette problématique de vision par ordinateur pour l'estimation de pose à l'échelle microscopique que s'inscrit ce travail de thèse.

Dans ce chapitre nous proposons d'étudier de manière générale l'estimation de pose dans le cadre de la microscopie pour mieux comprendre ses objectifs, méthodes et limites. Cette première étude des solutions existantes et des problématiques actuelles nous permettra de positionner le travail de thèse effectué.

1.1 ESTIMATION DE POSE PAR VISION PAR ORDINATEUR

De par sa simplicité de mise en œuvre, la mesure de pose par vision par ordinateur s'est imposée dans beaucoup d'applications, allant du médical, au spatial en passant par la microrobotique. La capacité de reconstruire une scène, ou d'extraire assez d'informations de celle-ci pour déterminer la pose d'objets observés, sans entrer en contact direct avec ceux-ci, présente un avantage conséquent. Pour remonter à ces informations, plusieurs approches classables en deux grandes familles ont été mises à l'étude depuis quelques décennies.

Une première famille de méthodes de mesure de pose consiste à utiliser l'information même de la scène, sans connaissance *a priori* des éléments contenus dans celle-ci. La seconde famille de méthodes utilise quant à elle la connaissance des objets contenus dans la scène observée pour extraire des informations de pose, par exemple à l'aide de marqueurs.

1.1.1 Échelle macroscopique

La vision par ordinateur regroupe plusieurs sous-domaines aux intérêts et applications variées et ce à des échelles diverses comme évoqué plus haut. Parmi les méthodes existantes pour effectuer de l'estimation de pose se trouve l'étude de la

sémantique d'images, qui vise à comprendre les objets présents dans une scène. L'apport des réseaux de neurones et de l'apprentissage automatique ou profond a en effet montré comment retrouver la position d'objets dans une scène tout en détectant leur sémantique [Borji19 ; Zhou18]. Cette approche connaît de plus en plus de succès grâce à l'augmentation constante de la capacité de calcul des ordinateurs [Zou19] et montre ainsi l'intérêt de poursuivre la recherche dans cette direction. Les applications de cette méthode montrent un fort potentiel d'intégration dans des applications courantes comme la conduite autonome [Janai20], la reconnaissance de visages, ou même l'analyse de situation complexe comme celles de foules [Sundararaman21 ; Junior10]. Au-delà de ces applications, l'estimation de pose par vision par ordinateur montre un intérêt croissant depuis plusieurs années dans d'autres domaines plus spécialisés.

Plutôt que de chercher des objets dans une scène à l'aide d'un seul point de vue, d'autres méthodes emploient plusieurs caméras (ou plusieurs prises de vue). En multipliant les points de vues, une reconstruction tridimensionnelle de la scène est réalisable, donnant ainsi accès à une foule d'informations 3D sur la position d'objets dans une scène. Par exemple la photogrammétrie vise à reconstruire une scène à partir de plusieurs clichés et permet de fournir des modèles 3D détaillés issus du monde réel pour des applications aussi variées que la préservation du patrimoine [Remondino11] ou encore le jeu vidéo [Statham20]. Cette méthode est aussi applicable à l'estimation de pose d'objets selon les six degrés de liberté dans une scène, comme l'a montré Luhman *et al.* dans le contexte automobile en étudiant l'évolution des roues par exemple [Luhmann09].

D'autres méthodes de reconstruction de scène, utilisant une ou plusieurs caméras en simultanée, montrent comment estimer la position d'objets observés selon les six degrés de liberté en utilisant des descripteurs communs aux deux images. Ces méthodes, dont le SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) est un grand représentant, utilisent des correspondances trouvées entre plusieurs images pour en reconstruire une scène 3D et estimer la pose des caméras. Cette mesure est rendue possible par la recherche de descripteurs robustes à l'aide de méthodes comme le SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*) [Zhou09] ou le SURF (*Speeded-Up Robust Features*) [Bay08]. Ces méthodes montrent des résultats particulièrement intéressants en matière d'estimation de pose 3D et d'asservissement visuel [Lukashovich11 ; Moreels07 ; Courbon09a].

La mesure de pose et la reconstruction de scènes 3D à l'aide de la vision a ainsi donné plusieurs éléments de réponses à des problèmes aussi variés que la sécurité routière en utilisant les données cartographiques couplées à un système de caméra odométrique [Floros13] ou encore pour effectuer du contrôle de position de véhicules aériens non habités [Courbon09b]. Ce dernier domaine ne cesse de gagner en intérêt [Kanellakis17 ; Al-Kaff18], ces véhicules offrant une clé pour répondre à des problématiques nouvelles allant de la livraison autonome à la supervision de plants en agriculture ou à l'exploration de milieux dangereux pour l'être humain. Au-delà des applications concernant les véhicules, la vision par ordinateur montre un certain nombre d'avantages pour estimer la position d'objets en médecine. En

effet, en proposant des méthodes de mesure de pose avec une interaction minimale avec le corps (comme c'est le cas pour la chirurgie minimalement invasive), la vision par ordinateur trouve un fort intérêt d'étude dans ce champ applicatif où l'insertion de capteurs est à la fois complexe et dangereuse. De ses prémisses avec l'étude d'images de cerveau issues d'IRM [Ayache95] aux dernières études présentant des méthodes de mesure de pose d'outils chirurgicaux [Hasan21], ce domaine ne cesse de croître. La connaissance de l'environnement de travail des chirurgiens et de la position de leurs outils dans des environnements confinés est en effet une clé pour la répétabilité de leurs actions qui requièrent une grande précision. Pour répondre à ces problèmes de visualisation de la pose des outils, la réalité augmentée, recréant une scène 3D à partir de la position de l'outil et de son environnement, gagne en intérêt depuis quelques années [Chen18].

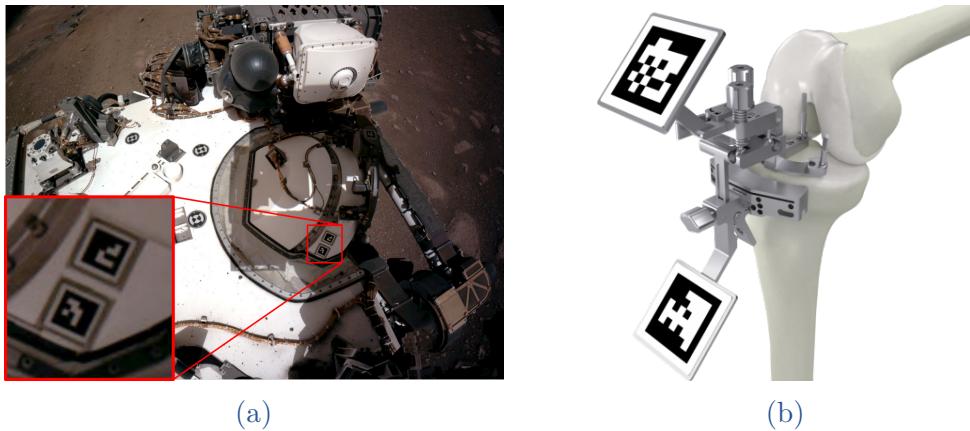


FIGURE 1.1 – (a) Marqueurs de repérage présents sur le rover martien Perseverance **(b)** Solution pour l'alignement par réalité augmentée de prothèse du genou, basée sur la mesure de pose par marqueurs de repérage et développée par l'entreprise Pixee medical

Bien que ces méthodes présentent des résultats marquants en reconstruction de scènes et d'estimation de la position d'objets inclus dans celles-ci, elles présentent des résolutions souvent limitées par la détermination de correspondances entre plusieurs images. Un élément de réponse à ce problème se trouve dans la structuration des objets observés. En effet, avec une connaissance *a priori* des objets se trouvant dans la scène, il est possible d'augmenter la résolution et la robustesse de la mesure de position. Comme illustré dans la figure 1.1.(a), appliquée au domaine spatial qui nécessite une grande résolution dans l'estimation de position, plusieurs marqueurs de repérage (tels que les ARTags [Fiala05] ou marqueurs ArUco [Garrido-Jurado14]) sont placés sur le châssis du rover martien Perseverance¹ par rapport à son châssis pour mieux appréhender l'angle d'observation de son environnement. D'autres méthodes utilisant des marqueurs de repérage pour effectuer l'alignement de prothèses du genou par réalité augmentée sont également à

1. <https://www.nasa.gov/perseverance>

l'étude², montrant d'une part l'intérêt porté à ce champ applicatif et d'autre part l'amélioration constante des résolutions atteignables par ces méthodes en structurant les objets observés.

1.1.2 Échelle microscopique

À une autre échelle, la vision par ordinateur permet d'assurer le bon positionnement de microrobots. Ces systèmes mécatroniques ne cessent de progresser et proposent un champ applicatif varié où la mesure de pose par vision et plus spécifiquement par microscopie est souvent employée. Parmi celles-ci se trouvent des applications électroniques avec l'alignement de puces pour l'assemblage de cartes avec des composants micro-électroniques. D'autres domaines applicatifs tels que la biologie sont également à l'étude et concernent l'assemblage de puces fluidiques visant à trier différentes cellules [Azizipour20 ; Huang21]. Enfin un autre champ de ce domaine vise la conception et la fabrication de microrobots aux structures innovantes, employant par exemple des articulations souples pour créer des plateformes robotiques innovantes [Till17].

Cependant la réduction d'échelle des objets observés vient contraindre la mesure de pose par vision avec des problématiques dues à l'observation en microscopie. Une des premières contraintes imposées par la microscopie provient de la taille même des échantillons. En effet, la réduction constante de leur taille couplée à l'emploi des objectifs de microscope rend complexe l'intégration de plusieurs caméras à cause notamment des courtes distances de travail (de l'ordre du centimètre ou moins) imposées par ces objectifs. Cette intégration est d'autant plus complexe que les profondeurs de champ offertes par les objectifs de microscopes sont limitées à quelques dizaines de micromètres.

Par ailleurs les longues distances focales de ces objectifs (plusieurs centaines de millimètres) fournissent une projection quasi orthographique, de laquelle il est difficile d'obtenir une mesure de position en 3D. Certaines études contournent ce problème en utilisant les modèles 3D ou 2D des objets observés pour effectuer une mesure de position en étudiant la correspondance entre ce modèle et la scène observée [Marchand99]. Cette détection d'objets connus dans la scène utilise souvent des méthodes de détection de contours comme illustré dans la figure 1.2.(a). Ici Tamadazte *et al.* ont par exemple montré comment évaluer la pose d'éléments (de taille 400 µm) en macroscopie (à l'aide d'un objectif de focale 50 mm) selon six degrés de liberté à l'aide d'un modèle 3D connu [Tamadazte10] et de l'outil VISP ([Marchand05]). Cependant, ces méthodes sont difficiles à transposer à la microscopie à cause du flou introduit par les objectifs de microscope, limitant la bonne détection des contours, et à cause du problème de détermination de la distance entre la caméra et l'objet avec l'emploi des projections orthographiques des objec-

2. <https://www.pixee-medical.com/en/>

tifs utilisés. Cette projection orthographique donne également une mesure ambiguë des angles hors-plan, qui sont mesurés au signe près et limitent la mesure de pose 3D à cette échelle.

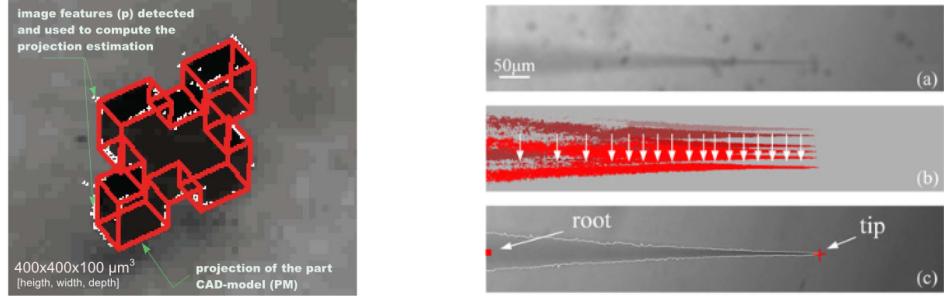


FIGURE 1.2 – Méthode de positionnement par détection d’éléments structurels sur l’image. (a) Détection de contours d’une pièce de micro-assemblage et estimation de sa position à l’aide du modèle 3D de la pièce [Tamadazte10]. (b) Détection de contours appliquée à l’étude de position d’aiguille de positionnement sous MEB [Liu13]

Une autre limitation de la mesure de position 3D en microscopie provient des profondeurs de champ très courtes que fournissent ces objectifs. Ceux-ci étant physiquement limités à quelques micromètres, comme le montre l’équation (1.1), la mesure des angles hors-plan ainsi que de la profondeur des objets observés devient fortement limitée.

$$\Delta z = \frac{\lambda}{O.N^2} \quad (1.1)$$

où Δz représente la profondeur de champ accessible par un objectif de microscope d’ouverture numérique $O.N$, utilisant une lumière de longueur d’onde λ . Les objectifs de microscope ont une ouverture numérique de l’ordre de 0.3 et effectuent pour la plupart des observations dans le domaine du visible (avec une longueur d’onde moyenne de $\lambda = 550$ nm), donnant accès à une profondeur de champ de 6 µm. Cette limitation physique montre l’environnement contraint dans lequel évoluent les systèmes micro-mécatroniques étudiés.

Au-delà de cette limitation pour l’observation tridimensionnelle de ces systèmes, la microscopie présente par définition des champs de vision très réduits. Les systèmes ayant des courses plus grandes que ce champ de vision deviennent donc difficilement mesurables. Ainsi, les méthodes telles que la corrélation d’image se basant sur un noyau prédéfini posent problème pour effectuer de la mesure de position sur de grandes plages. Bien que limitée par le champ de vision disponible, l’apport d’une structuration des objets en étudiant directement leur texture a démontré des résultats intéressants en termes de résolution dans le milieu de la microrobotique. Cette méthode effectue une mesure de position relative entre un noyau de référence positionné dans les images acquises en étudiant le pic de corrélation issu de la densité spectrale de la convolution entre ce noyau et l’image complète. La figure 1.3 présente ce principe de fonctionnement appliquée à l’étude de position via l’observation de motifs aléatoires [Bomarito17].

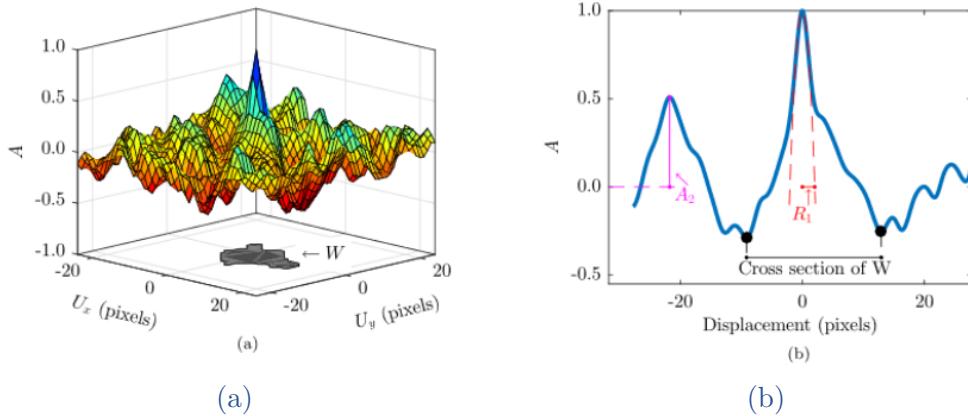


FIGURE 1.3 – Principe de mesure par corrélation d’images montrant les fonctions d’inter-corrélation entre deux images, issu de [Bomarito17].

L’emploi de cette méthode dans le cadre de la microrobotique a démontré des performances en résolution de l’ordre subnanométrique [Kokorian14]. Le développement de cette méthode à l’étude de textures déjà présentes sur le système observé ont quant à eux montré des résolutions de l’ordre du nanomètre [Li19 ; Yoshimizu10]. Cependant, ces méthodes sont soumises à l’hypothèse que le noyau défini pour faire la mesure de position ne change pas au cours de la mesure.

Cette hypothèse, portée sur l’observation des objets est cependant rarement respectée, notamment à cause des difficultés à éclairer la scène de manière uniforme ou encore à cause d’images présentant un flou trop important. D’autres problèmes tels que l’occultation d’une partie de l’image causée par des défauts de fabrication ou des poussières viennent également perturber ces méthodes de mesure. Pour pallier ce problème, l’utilisation d’objets structurés de manière redondante pour effectuer la mesure de position est particulièrement pertinente car elle apporte une meilleure robustesse à la mesure. En effet cette redondance apporte un moyen d’effectuer la mesure de position de multiples fois, la rendant robuste à l’occultation. L’emploi de ces structures vient également répondre au problème du bruit présent sur les images acquises en effectuant une réjection du bruit grâce à la redondance d’informations présente sur les objets observés.

1.1.3 Marqueurs de repérage

Un exemple de structuration des objets observés est visible avec l’emploi des mires d’étalonnage réalisée à l’aide de damiers par exemple. En effet, de par la connaissance *a priori* de l’espacement entre chaque carré et grâce à une détection de contour facilitée par un fort contraste entre chaque carré blanc ou noir, il devient aisément d’avoir assez d’information sur l’objet observé. Bien que ces mires servent souvent pour effectuer l’étalonnage de caméra [Bouguet04 ; Liu16], il est possible d’utiliser ces informations pour obtenir une résolution sous-pixellique de la pose de la caméra dans la scène [Yang18].

Ce besoin de structurer les objets observés pour effectuer de la mesure de pose avec de meilleures résolutions a également fait naître des marqueurs de repérage, n'occupant qu'une partie du champ de vision et détectés par des méthodes de recherche de contour ou de corrélation. Ainsi, dès le début des années 2000, Brucken-stein *et al.* envisagèrent différents motifs de marqueurs de repérage pour répondre à cette problématique en proposant des conceptions plus structurées et riches en informations (nombre d'intersections, répartition de l'information pertinente au sein des marqueur etc.) [Bruckstein99 ; Bruckstein00]. Depuis ces recherches, un nombre conséquent de conceptions variées ont émané comme l'illustre la figure 1.4 qui en présente quelques-uns ([Fiala05 ; Romero-Ramirez18 ; Naimark02 ; Basiratzadeh19]) dont les plus répandus sont certainement les marqueurs ArUco [Garrido-Jurado14] et se retrouvent aujourd’hui dans nombre d’applications comme sur le rover martien Perseverance présenté plus tôt dans ce chapitre (figure 1.1). Cette diversité applicative concerne en effet toutes les échelles et va de l'estimation de pose de pelle de tractopelle [Azar15] à la microrobotique [Kim15].

Cette diversité a ainsi amené les chercheurs à améliorer de plus en plus la détection rapide de ces marqueurs pour obtenir des performances en résolution et en robustesse toujours plus importantes [Didier08 ; Collins14 ; Zhong19].

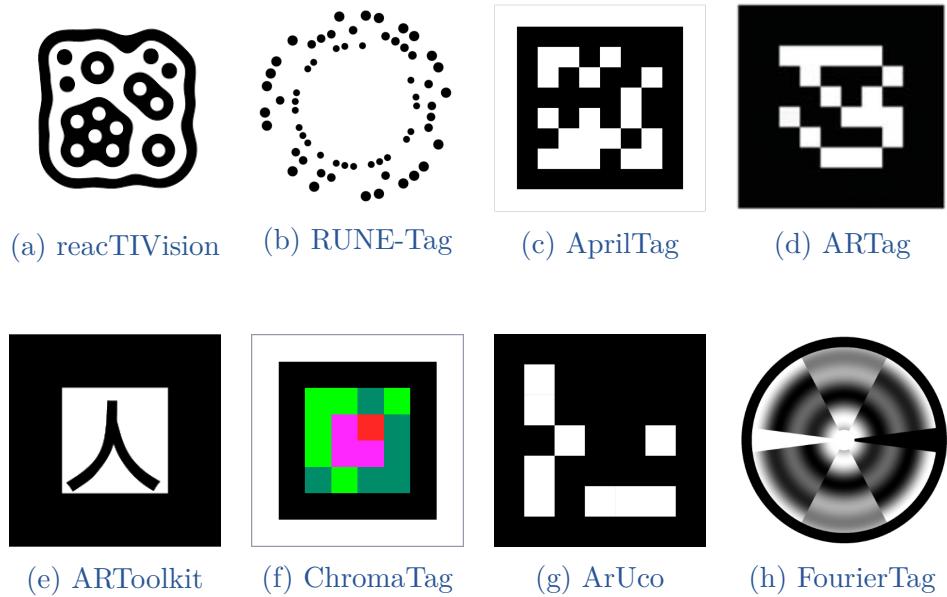


FIGURE 1.4 – Différents types de marqueurs de repérage, issu de [Basiratzadeh19]

Cependant, et bien que ces méthodes proposent des performances en résolution de plus en plus importantes, ces marqueurs de repérage offrent une mesure de position limitée au champ de vision de la caméra, faisant apparaître un nouveau compromis pour l'étude de position en microscopie. Ce compromis entre plage de mesure et résolution offerte par le grandissement des objectifs de microscope

utilisés est quantifiable à l'aide du rapport plage sur résolution. Ce rapport a notamment été utilisé par Yao *et al.* pour ordonner les différentes méthodes de mesure de pose en microscopie.

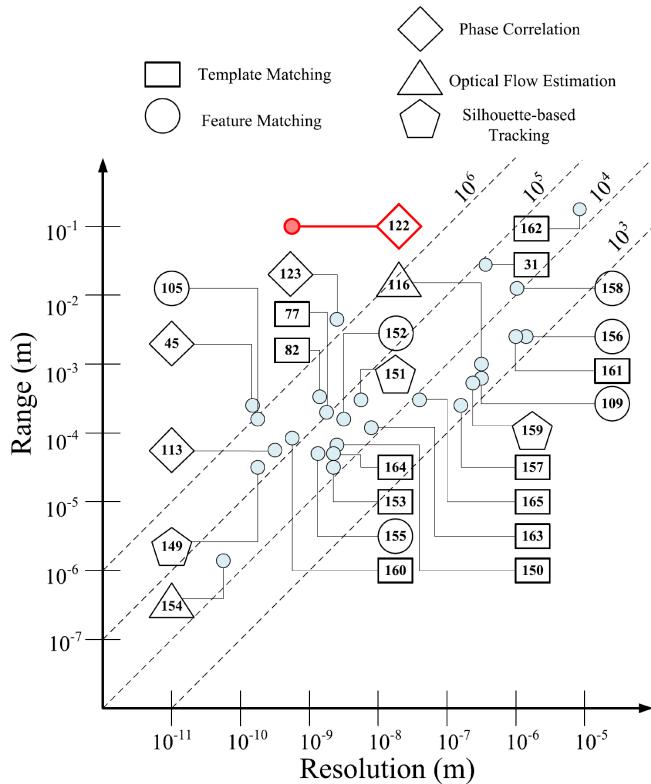


FIGURE 1.5 – Graphique en échelle log. log. présentant les résolutions et plages de mesures atteignables de différentes méthodes de mesure de pose par microscopie issu de [Yao21]. La méthode n°122 encadrée en rouge est la cible de ce manuscrit.

Cette étude montre ainsi que l'augmentation du rapport plage sur résolution passe par une meilleure structuration des objets observés. La figure 1.5 montre ainsi que les méthodes de détection de contours présentent un rapport plage sur résolution allant jusqu'à 10^5 . En structurant un peu plus les objets observés et en utilisant des méthodes telles que la corrélation de phase, ce rapport atteint un facteur 10^6 . Ce graphique illustre ainsi le besoin de structurer au mieux les objets observés pour augmenter ce rapport plage sur résolution en utilisant par exemple des motifs pavant tout le champ de vision. La méthode de corrélation de phase fait ainsi usage de cette structuration en employant des objets structurés de manière périodique, permettant ainsi d'étudier la phase des objets observés avec une grande robustesse et une grande résolution.

1.2 MIRES PÉRIODIQUES ET MÉTHODES ASSOCIÉES POUR L'ESTIMATION DE POSE

Pour répondre à ces problématiques d'augmentation de la résolution en microscopie, le choix de structurer au mieux les objets observés semble être pertinent, comme le montre le diagramme plage sur résolution présenté en [figure 1.5](#). Pour répondre à ce besoin, d'autres conceptions de marqueurs, employant des structures présentant une information périodiquement redondante ont été étudiées. En traitant cette redondance d'information en analysant non plus directement la position des pixels dans l'image mais la phase de ces marqueurs dans le plan spectral, il devient possible d'obtenir des résolutions bien plus importantes grâce à l'augmentation significative du rapport signal sur bruit et grâce à un meilleur filtrage du bruit.

La méthode de mesure de pose par mires périodiques emploie l'étude de la phase de ces motifs (analysés entre $-\pi$ et π) dans leur globalité en utilisant les outils d'analyse spectrale. Cette étude non plus dans le domaine spatial, mais dans le domaine spectral de la mire périodique permet en effet d'étudier son décalage de phase qui est directement lié à son déplacement de manière robuste et résolue au millième de pixel en translation [[Yamahata10](#)]. Cependant, en l'état, ces structures périodiques ne présentent qu'une plage de mesure d'une seule période, le motif observé étant le même modulo une période. Bien qu'il soit possible d'étudier un déplacement sur une plage plus grande en ajoutant une période à la mesure à chaque saut de phase du motif, cette méthode ne permet pas d'offrir un repérage absolu. Cependant, certains domaines tels que l'étalonnage de caméras ne nécessitent pas d'avoir un repérage absolu et utilisent donc les motifs de mires périodiques tels quels. Par exemple, Chen *et al.* emploient l'information de phase pour assurer un étalonnage grandement résolu à l'aide d'une mire affichée sur une tablette [[Chen20](#)]. Cette méthode présente néanmoins une grande limite dans le cadre de l'étude de la position de la mire, contrainte par sa faible plage de mesure. Pour augmenter la plage de mesure en conservant cette redondance structurée et fournir une méthode de mesure palliant les problèmes évoqués dans la section précédente, plusieurs types de marqueurs périodiques, également appelés mires périodiques, ont été étudiés.

1.2.1 Mires à deux fréquences : méthode de Vernier

Cette problématique a notamment été étudiée par Guelpa *et al.* qui a utilisé cette information périodique pour étudier la phase du motif périodique imaginé, aboutissant à des résolutions de l'ordre du millième de pixel [[Guelpa14](#)] selon une direction. La [figure 1.6](#) présente la méthode de mesure de pose employant ce type de mires périodiques. Cette figure montre que l'emploi de deux motifs parallèles aux périodes légèrement différentes donne accès à une plage de mesure plus importante.

Comme cette information redondante occupe la majeure partie de l'image, il est possible de la traiter dans sa globalité en faisant appel à l'étude de son spectre fréquentiel qui regroupe toute l'information pertinente de période et de phase du motif observé. Il en résulte une amélioration des performances de résolution tout en augmentant la plage de mesure accessible (à 168 µm dans le cas présenté en utilisant deux mires de périodes respectives 8 µm et 8.4 µm).

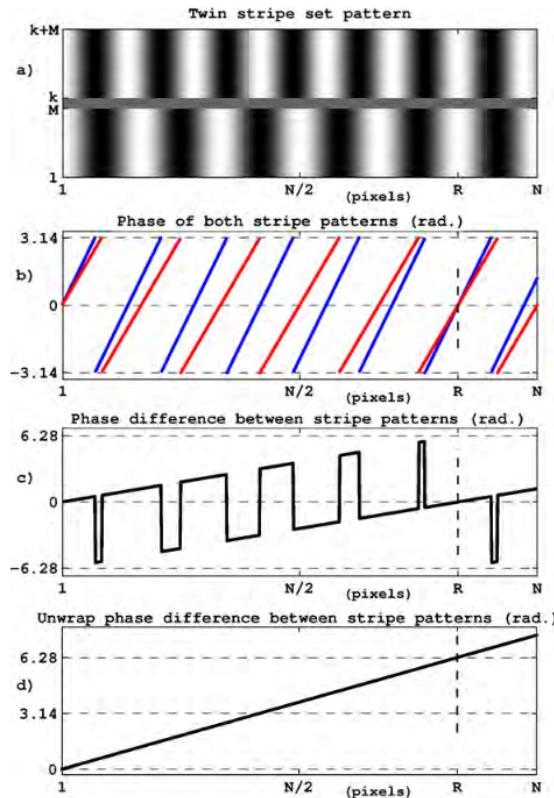


FIGURE 1.6 – Utilisation de mires périodiques avec la méthode de Vernier, employant deux périodes légèrement différentes pour effectuer une étude de phase sur une plage étendue. (a) présente les deux motifs périodiques étudiés, (b) la phase de chacun des motifs, (c) la différence de phase issue de chaque système de franges et (d) la phase déroulée du système de frange (issu de [Guelpa14])

L'étude de ce système de frange étend ainsi la plage de mesure à $\Lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$, où λ_1 et λ_2 représentent les périodes respectives de chaque motif périodique et Λ représente la période globale du couplage des deux périodes du motif. Cette méthode a ensuite été étendue à un motif 2D, rendant la mesure selon x et y accessible avec une grande résolution (0.5 nm) sur une plage de 221 µm [Guelpa16].

1.2.2 Méthode de Moiré

Une autre méthode utilisant deux motifs périodiques, appelée Moiré, a été employée pour effectuer de la mesure de position. Originalement, ce principe utilise deux motifs de franges avec des périodes différentes qui, une fois superposées créent un nouveau motif de franges. Sugiura *et al.* ont employé cette méthode pour effectuer une superposition entre un motif de frange périodique acquis par une caméra, dont les pixels forment le deuxième réseau de franges périodiques [Sugiura15 ; Ri14]. Grâce à cette méthode, ils ont démontré une résolution de l'ordre du millième de pixel. La figure 1.7 présente l'emploi de ce type de motif périodique en montrant les deux systèmes de frange employés et l'information de phase résultant de l'étude de ce type de marqueur.

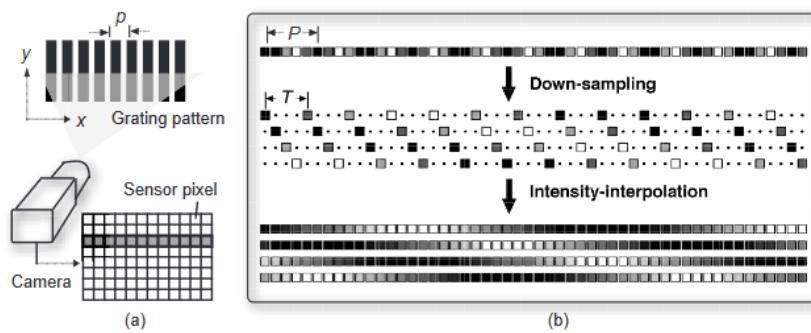


FIGURE 1.7 – Méthode de mesure de pose par étude de Moiré entre un réseau de franges observé et la période physique de la caméra, produisant un système à deux périodes étendant la résolution accessible (issu de [Ri14])

Cependant ces méthodes d'étude de franges présentent également l'inconvénient de ne fournir une mesure que selon un seul degré de liberté. Bien que des méthodes aient été explorées pour augmenter cette mesure à une étude de pose planaire ([Guelpa16 ; Wang16]), leur construction à partir de deux systèmes de franges rend ce portage difficile à réaliser et à étudier.

1.2.3 Mires périodiques 2D

Pour répondre à ce problème d'augmentation de la plage de mesure en conservant une grande résolution, une solution utilisant deux mires périodiques couplées ensemble pour créer un motif 2D a été étudiée. Cette méthode a ainsi montré des résultats avec des résolutions grandement sous-pixelliques selon les deux translations x et y et de l'ordre du microradian en orientation, résultant ainsi en un système de mesure 3DDL grandement résolu [Sandoz00 ; Sandoz02 ; Chen16]. La problématique de l'augmentation de la plage de mesure en utilisant ces mires périodiques 2D a également été étudiée en effaçant certains points pour y insérer une méthode de repérage absolu pour compter le numéro des périodes. Plusieurs méthodes ont pu émerger pour intégrer un repère absolu dans des mires périodiques.

Parmi celles-ci, l'insertion d'un encodage binaire au sein de la mire est sans doute le plus commun, car n'ajoutant pas d'information parasite au motif de la mire puisque ce type d'intégration se base sur le retrait de certains points de la mire périodique comme illustré dans la figure 1.8. Ainsi des conceptions comme celles de Galeano *et al.* ou de Kim *et al.* [Zea09 ; Kim15] ont émergées pour aboutir à un marqueur assurant une résolution de l'ordre du millième de pixel avec une plage de l'ordre du centimètre carré.

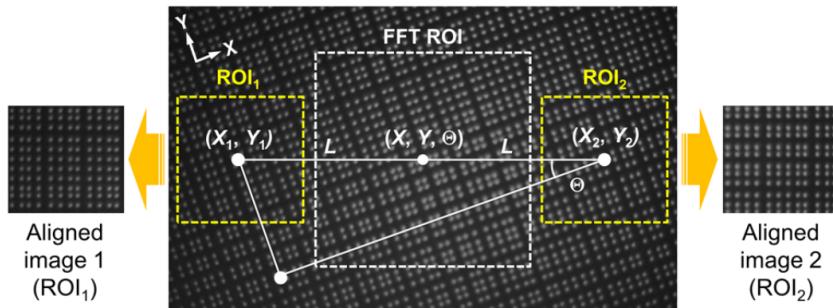


FIGURE 1.8 – Mire périodique 2D augmentée d'un encodage binaire assurant un repérage grandement résolu sur une grande plage de mesure, tiré de [Kim18b]

Ainsi l'emploi de mire périodique augmentée d'un repérage absolu semble être une réponse pertinente pour effectuer une mesure de pose 2D à grand rapport plage sur résolution. Ce système de mesure semble donc adapté à un emploi dans le domaine de la microrobotique, bien que plusieurs problèmes restent encore ouverts.

1.3 POSITIONNEMENT DE LA THÈSE

Cette étude des différentes méthodes disponibles pour effectuer de la mesure de pose en microscopie a montré en quoi les mires périodiques 2D répondraient à plusieurs problématiques inhérentes à ce domaine de la vision par ordinateur. Appliquées à la mesure en microrobotique, celles-ci offrent en effet un certain nombre d'avantages, mais ne résolvent pas tous les problèmes tels que la mesure de pose 3D, l'augmentation significative de la plage de mesure ou encore la robustesse aux différents problèmes d'acquisition d'images en microscopie.

1.3.1 Sortir du plan imposé par la microscopie

L'application de la mesure de pose à l'échelle microscopique comporte une forte contrainte sur l'espace observable par vision. En effet, là où l'emploi d'objectifs à l'échelle macroscopique assure un champ de vision large et une profondeur de champ importante, celle-ci est drastiquement réduite avec l'utilisation des objectifs de microscopie. Ceux-ci présentent par construction physique des profondeurs

de champ d'au plus quelques micromètres, limitant de fait l'étude d'objets selon les six degrés de liberté. Par ailleurs, la projection quasi orthographique conférée par ces objectifs rend la mesure de la profondeur difficile à réaliser. Par ailleurs, cette projection ne donne pas la possibilité de déterminer sans ambiguïté le signe des angles hors-plan de l'objet observé.

Ce travail de thèse propose d'étudier comment exploiter l'information spectrale des mires pour remonter à six paramètres indépendants. À l'aide d'une projection orthographique, ces six paramètres donnent une mesure de pose selon cinq degrés de liberté (le dernier paramètre n'étant pas lié à la profondeur) et avec une ambiguïté sur le signe des angles hors-plan. Cette ambiguïté et la mesure de cette profondeur sont résolues en utilisant une projection perspective que nous proposons d'étudier.

1.3.2 Augmentation du facteur plage sur résolution

Les études précédemment menées sur les mires périodiques ont montré comment étendre leur plage de mesure en conservant une grande résolution. Cependant, ces plages sont encore trop limitées et entravent l'étude de certains systèmes comme les robots à grande course et grande résolution. En employant des séquences binaires à intégrer directement sur ces motifs périodiques, il est possible d'étendre considérablement la plage de mesure autorisée par la méthode. Cette intégration présente néanmoins un compromis en une redondance périodique des points suffisante pour assurer un positionnement grandement résolu et le retrait de certains points pour assurer l'encodage de la mire. Cette volonté d'étendre la plage de mesure en trouvant une méthode effectuant le meilleur compromis entre redondance et codage est également l'objet de cette thèse. Le but de celle-ci étant d'atteindre un rapport plage sur résolution de l'ordre de 10^8 .

1.3.3 Robustesse de la mesure aux conditions d'imagerie

Ce travail de thèse propose également d'étudier les difficultés à acquérir des images bien contrastées et employant toute la plage dynamique des capteurs pour aboutir à une mesure aussi résolue que possible. Ces altérations des images acquises constituées de bruit, d'illumination inégale de l'image ou encore d'occultation constituent en effet un obstacle aux résolutions atteignables par ces méthodes de mesure. Au-delà des altérations possibles des images, cette thèse propose d'étudier comment effectuer une mesure de pose en prenant en compte les faibles profondeurs de champ que proposent les objectifs de microscope et en proposant ainsi une méthode robuste aux défauts de mise au point.

1.3.4 Diffusion de la méthode de mesure

Les recherches menées précédemment et montrant à la fois de grandes résolutions et des plages de mesures importantes ne sont pas systématiquement portées vers les applications pour lesquelles elles sont étudiées, constituant ainsi plus une preuve de concept qu'un réel outil. Un exemple vient contredire cette affirmation

avec le portage des marqueurs de repérage ArUco qui, comme montré plus haut, ont su s'imposer dans un panel de domaines très variés. Cependant aucune méthode de mesure à haute résolution et montrant une plage *a minima* centimétrique n'a fait l'objet d'un portage logiciel assurant la diffusion de cette méthode de mesure. Ce dernier objectif, plus applicatif, trouve tout son sens dans la mesure de pose en microrobotique où le besoin d'un tel système de mesure est de plus en plus important.

En conclusion nous proposons d'étudier comment effectuer une mesure de pose 3D par mire périodique, assurant à la fois une grande résolution de la mesure, et ce sur une grande plage accessible. Au-delà de l'étude de l'augmentation du facteur plage sur résolution, nous étudierons comment rendre cette mesure robuste et facile d'utilisation dans diverses applications microrobotiques.

Chapitre 2

Méthode de mesure de pose 2D sous-pixellique basée sur la périodicité

2.1	Mesure de la position d'une mire périodique 1D	24
2.1.1	Définition d'une mire périodique 1D	24
2.1.2	Analyse de phase par étude spectrale	26
2.1.3	Impact du fenêtrage et de l'échantillonnage	27
2.1.4	Filtrage fréquentiel et analyse de phase	28
2.1.5	Performances de la mesure de phase 1D	31
2.2	Mesure de la pose planaire de mires périodiques 2D	33
2.2.1	Mire 2D unidirectionnelle	33
2.2.2	Généralisation de la mesure de pose à une mire 2D.	34
2.2.3	Application de la méthode à la mesure sur une mire 2D échantillonnée.	36
2.2.4	Hypothèses de conception des mires 2D	38
2.2.5	Performances atteignables de la mesure de pose 2D	38
2.3	Conclusion	40

Comme présenté dans le chapitre précédent, il est intéressant de considérer des structures périodiques pour effectuer de la mesure de position notamment grâce à la redondance des informations présentes dans l'image.

Nous allons à présent nous intéresser aux fondements théoriques de cette méthode de mesure pendant les deux prochains chapitres. Avant de montrer la méthode de mesure de position selon les six degrés de liberté, nous nous intéressons à l'explication du principe de fonctionnement en considérant des signaux continus 1D puis 2D. Nous montrerons en particulier comment effectuer la mesure de pose sur des signaux continus puis échantillonnés tout en étudiant les performances atteignables avec cette méthode.

Ce chapitre montre ainsi comment exploiter cette redondance, en présentant le cas d'étude théorique de signaux périodiques pavant toute l'image. La première section est consacrée à la méthode de mesure de pose sur des mires périodiques 1D, continues puis échantillonnées. La seconde section s'intéresse à l'extension de cette méthode à des mires périodiques 2D en détaillant notamment leur conception.

2.1 MESURE DE LA POSITION D'UNE MIRE PÉRIODIQUE 1D

2.1.1 Définition d'une mire périodique 1D

Avant de présenter la méthode de mesure de pose dans le cas continu, commençons par définir le type de signal que nous traitons. Une mire périodique 1D est ainsi définie comme étant un signal sinusoïdal selon l'équation présentée ci-dessous :

$$A(x) = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos(2\pi f_0(x - x_0))) \quad (2.1)$$

définie $\forall x \in \mathbb{R}$, où f_0 représente la fréquence du signal et x_0 son décalage spatial inconnu *a priori*. Ce décalage spatial x_0 est visible sur les figure 2.1.(a) et (b) qui montrent respectivement sa version imagée en niveaux de gris et le signal sinusoïdal $A(x)$ correspondant. x_0 est défini comme étant la distance entre le point de phase nulle du signal sinusoïdal (*i.e.* le centre de la crête la plus proche où $A(x) = 1$ représenté en magenta) et l'origine de la mire (*i.e.* $x = 0$ représenté en rouge).

La période de la mire périodique est notée $\lambda = \frac{1}{f_0}$. Le choix d'utiliser cette représentation sinusoïdale qui assure que $\forall x \in \mathbb{R}$, $A(x) \geq 0$ est notamment motivé par la représentation sous forme d'image avec une intensité des pixels toujours positive comme illustré dans la première figure 2.1.(a). Cette représentation se rapprochant ainsi de la réalité des images acquises pour la mesure de pose réelle (qui sera présentée dans le chapitre dédié à la validation expérimentale de la méthode, chapitre 5).

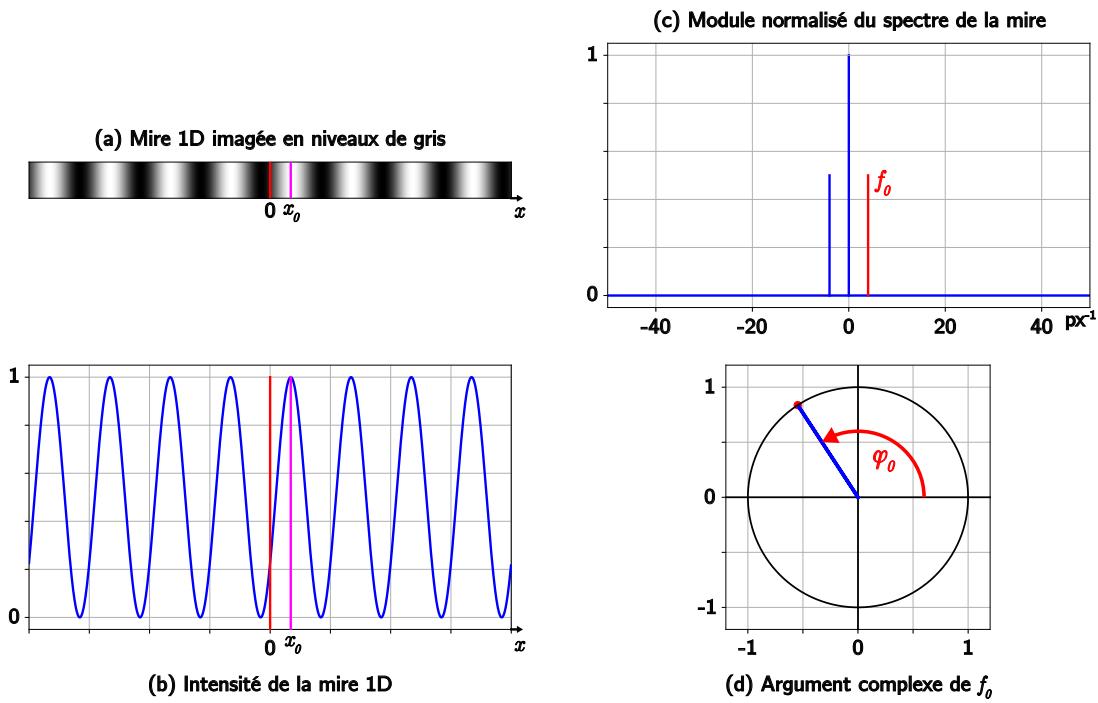


FIGURE 2.1 – Mire 1D avec (a) sa représentation sous forme d'image en niveaux de gris, (b) l'intensité du signal sinusoïdal $A(x)$, (c) le module du spectre fréquentiel et (d) l'angle du pic fréquentiel f_0

La méthode présentée ici repose sur la mesure de la phase associée à x_0 , notée ϕ_0 . Le passage d'une représentation à l'autre s'écrit comme suit :

$$\begin{aligned} A(x) &= \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos(2\pi f_0(x - x_0))) \\ &= \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos(2\pi f_0 x - 2\pi f_0 x_0)) \\ &= \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos(2\pi f_0 x - \phi_0)) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Ce qui définit le passage du décalage spatial de la mire x_0 à son décalage de phase ϕ_0 :

$$x_0 = \frac{\phi_0}{2\pi f_0} \quad (2.3)$$

Ainsi, étudier le déplacement d'un signal sinusoïdal revient à en étudier sa phase ϕ_0 . Cependant, plutôt que de la mesurer en un point précis de l'espace (à l'origine de la mire en $x = 0$ par exemple), il est plus intéressant d'utiliser la transformée de Fourier pour effectuer cette mesure. Cette transformation du domaine spatial au domaine fréquentiel du signal de la mire exploite pleinement la redondance d'information liée à la périodicité du signal étudié.

L'exploitation groupée de toutes les périodes de la mire sous forme fréquentielle assure ainsi d'une part une meilleure résolution de la mesure et d'autre part une

meilleure robustesse aux altérations possibles du signal (en augmentant le rapport signal à bruit).

2.1.2 Analyse de phase par étude spectrale

Pour effectuer l'analyse du déphasage de la mire ϕ_0 , la transformée de Fourier qui prend un signal spatial en entrée et donne sa représentation fréquentielle en sortie est utilisée. Au-delà de la représentation des fréquences présentes dans le signal d'origine, la transformée de Fourier contient également les informations de phase du signal d'entrée sous forme complexe.

Cette transformation est définie comme suit :

$$\mathcal{F}\{f(x)\} : f \mapsto \hat{f}(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-2\pi i u x} dx \quad (2.4)$$

où $\hat{f}(u)$ est la représentation fréquentielle du signal $f(x)$. De cette définition de la transformée de Fourier découle une propriété de correspondance entre décalage de phase du signal d'entrée et de son impact sur le signal spectral de sortie :

$$\mathcal{F}\{f(x - x_0)\} = e^{-2\pi i u x_0} \hat{f}(u) \quad (2.5)$$

Montrons à présent comment extraire la phase de ce signal spectral obtenu par transformée de Fourier. En appliquant la transformée de Fourier au signal $A(x)$ défini [équation \(2.1\)](#), il vient :

$$\mathcal{F}\{A(x)\} = \mathcal{F}\left\{\frac{1}{2} \cdot (1 + \cos(2\pi f_0(x - x_0)))\right\} \quad (2.6)$$

Puis en utilisant la propriété de décalage [2.5](#) :

$$\mathcal{F}\{\tilde{A}(x - x_0)\} = e^{-2\pi i u x_0} \cdot \mathcal{F}\left\{\frac{1}{2} (1 + \cos(2\pi f_0 x))\right\} \quad (2.7)$$

Enfin, en décomposant le cosinus sous forme exponentielle nous avons :

$$\mathcal{F}\{\tilde{A}(x - x_0)\} = \frac{1}{2} \cdot \left(e^{-i \frac{\phi_0}{f_0}} \delta(u) + \frac{1}{2} e^{-i \frac{\phi_0}{f_0}} \delta(u - f_0) + \frac{1}{2} e^{-i \frac{\phi_0}{f_0}} \delta(u + f_0) \right) \quad (2.8)$$

où δ est la fonction delta de Dirac qui représente un pic fréquentiel associé à la fréquence considérée. Dans notre cas, trois pics principaux sont observés : un en $u = 0$, et deux symétriques en $-f_0$ et $+f_0$ qui sont visibles dans la [figure 2.1.\(c\)](#). Le premier correspond au fond continu du signal alors que les deux autres sont le reflet direct de l'évolution périodique de la mire, transposée en leur représentation fréquentielle et résultant en deux pics conjugués.

Par ailleurs, l'information de décalage spatial x_0 est contenue par le décalage de phase ϕ_0 , qui est porté par ses pics sous forme d'exponentielle complexe.

De fait, le décalage de phase présent dans la sinusoïde apparaît directement dans la transformée de Fourier en étudiant un des deux pics $\delta(u - f_0)$ ou $\delta(u + f_0)$. Comme ces deux pics sont conjugués, étudier l'un où l'autre n'aura aucun impact sur la mesure de phase. Nous choisissons par convention d'utiliser le pic de fréquence positive $\delta(u - f_0)$. Retrouver la phase de ce pic revient alors à calculer l'argument du pic complexe qui renseigne sur le décalage de phase à l'origine ϕ_0 , menant au décalage spatial x_0 en utilisant l'équation (2.3).

$$\arg e^{i\phi_0} \equiv \phi_0 \mod 2\pi \quad (2.9)$$

Ce déphasage angulaire issu de l'exponentielle complexe qui évolue sur le cercle unité est visible dans la dernière partie de la figure 2.1.(d). Cette figure ainsi que l'équation précédente montrent que la phase est déterminée à un facteur 2π près. Ce résultat est en cohérence avec l'aspect périodique de la mire qui présente le même décalage de phase modulo 2π et limite la plage de mesure à une période.

2.1.3 Impact du fenêtrage et de l'échantillonnage

La suite de cette étude sur les signaux périodiques 1D est ensuite évaluée en les considérant à la fois échantillonnes et fenêtrés. Cette considération rend ainsi mieux compte des données acquises de manière pratique. L'échantillonnage du signal implique de passer de l'utilisation de la transformée de Fourier continue à sa version discrète qui est définie comme suit :

$$\mathcal{F}\{f(n)\} : f \mapsto \hat{f}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n)e^{-2\pi i kn} \quad (2.10)$$

Ce cas d'étude étant centré sur l'analyse d'image, un échantillonnage des valeurs du signal avec un pas de 1 (pour conserver le cas d'un échantillon par pixel) est effectué. L'impact de la discréétisation du signal sur le spectre est visible dans la figure 2.2 qui montre l'étalement des pics de Dirac à partir d'une mire de période 20.54 pixels. Dans le cas présenté, la position exacte du pic dans le spectre fréquentiel calculé est de $f_0 = 0.048 \text{ pixel}^{-1}$ comme présenté dans la sous-figure 2.2.(c).

Pour effectuer cette étude sur la phase des signaux acquis (fenêtrés et échantillonnes), l'équation (2.8) est réévaluée sur une fenêtre rectangle $[-\frac{N}{2}, \frac{N}{2}]$, définie alors comme suit :

$$A(n) = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos(2\pi f_0(n - x_0))) \quad (2.11)$$

qui donne alors des pics fréquentiels sous forme de sinus cardinaux positionnés respectivement en $u = -N \cdot f_0$ et $u = N \cdot f_0$.

Ces pics dont l'intensité dépend à présent de la taille de la fenêtre ont une position facile à déterminer sur le signal spectral car échantillonné, et donnent accès à une mesure de f_0 .

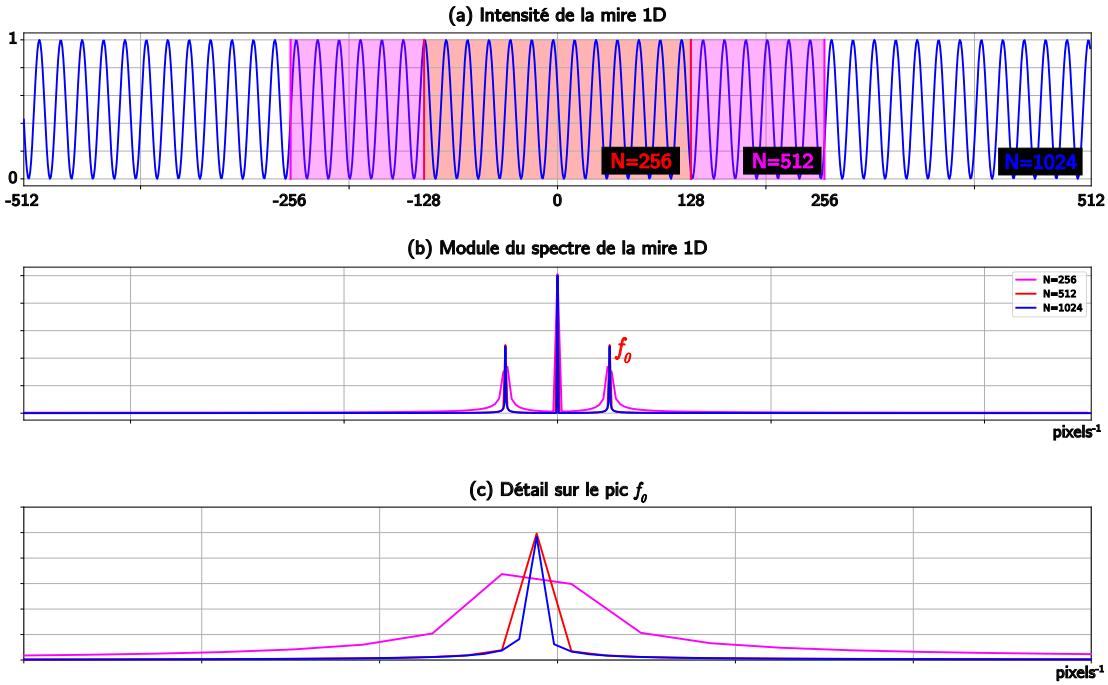


FIGURE 2.2 – Mire 1D échantillonnée sur différentes tailles de fenêtres. (a) montre la taille des fenêtres considérées pour étudier la transformée de Fourier discrète présentée en (b). (c) présente une vue en détail du pic $+f_0$

Cet étalement limite cependant la détermination de la position du pic fréquentiel sur lequel est effectué la mesure de phase car ce pic n'est (sauf exception) pas présent dans ce spectre fréquentiel discret. En effet comme illustré sur la portion de détail de la figure 2.2.(c), la mesure de la position du pic est alors associée à une valeur discrète de fréquence qui respecte une évolution selon un sinus cardinal, ne reflétant pas la position exacte f_0 du pic. Cette incertitude sur la position du pic implique dès lors une détermination erronée de la phase de ce même pic et donc de la position spatiale de la mire.

2.1.4 Filtrage fréquentiel et analyse de phase

Pour remédier à ce problème de mesure du pic fréquentiel (de sa position et de sa phase), une mesure en plusieurs étapes effectuées sur le spectre fréquentiel est mise en place. Le but de ce processus est d'effectuer la mesure sur la phase spatiale complète de la mire et non sur un seul point du spectre fréquentiel (soumis au problème d'échantillonnage soulevé plus haut) pour étudier de manière plus résolue la phase de la mire.

La figure 2.3 décrit ce processus d'analyse de la phase en prenant pour base une mire 1D de période 10.54 pixels, échantillonnée sur une fenêtre de 256 valeurs.

La première étape de ce processus consiste à sélectionner le pic fréquentiel représentatif de l'évolution périodique de la mire et ainsi englober sa position exacte. La seconde étape de ce processus consiste à appliquer un filtre gaussien centré sur

le pic sélectionné, comme présenté dans la [figure 2.3.\(b\)](#) avec la formule suivante :

$$g(u) = e^{-(\frac{u-u_c}{\sigma})^2} \quad (2.12)$$

où u_c est la fréquence du pic considéré (fréquence centrée au milieu du sinus cardinal), et σ représente l'écart type de la fonction gaussienne. Le signal spectral $\mathcal{F}\{f(n)\}$ de la mire est ensuite multiplié avec cette fonction gaussienne, donnant une version tronquée du spectre qui ne présente plus qu'un seul pic fréquentiel. Cette méthode de filtrage est par ailleurs assez proche du fonctionnement des ondelettes de Morlet en considérant ici une enveloppe gaussienne fixe et non glissante [[Combes87](#); [Sandoz97](#)]. Cette sélection du pic agit ainsi tel un filtre passe-bande qui ne conserve que l'information pertinente à l'étude, à savoir l'information relative à la périodicité du signal ainsi que la phase du pic fréquentiel. Ce filtre assure également une réjection du bruit en ne considérant que l'information pertinente contenue sur le pic fréquentiel.

Une fois ce pic fréquentiel filtré, une troisième étape impliquant la transformée de Fourier inverse appliquée sur le signal spectral tronqué est effectuée. Cette opération visant à repasser d'un signal fréquentiel à un signal spatial présente deux avantages majeurs. Le premier concerne le filtre en lui-même, car comme expliqué plus haut, seules les fréquences filtrées sont conservées lors de la transformée inverse.

Le second avantage réside dans la forme complexe du signal obtenu après transformation inverse. Cette transformation inverse utilisant l'[équation \(2.13\)](#) conserve en effet toute l'information de phase comprise dans le pic spectral filtré à l'aide de la fonction gaussienne comme illustré dans la [figure 2.3.\(c\)](#).

$$f(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \hat{f}(k) e^{-2\pi i k n / N} \quad (2.13)$$

La sous-[figure 2.3.\(c\)](#) montre également que la phase de la transformée de Fourier inverse évolue linéairement sur $[-\pi; \pi]$ avec un saut de phase tous les 2π selon l'équation.

$$\phi(x) = 2\pi \cdot f_0(x - x_0) \mod 2\pi \quad (2.14)$$

La rapidité de ces sauts de phase observés renseigne ainsi sur la fréquence de la mire avec sa pente f_0 . Le décalage de phase à l'origine de ce signal renseigne lui sur le décalage spatial de la mire avec son ordonnée à l'origine située en $x = x_0$.

Pour quantifier précisément la fréquence à laquelle les sauts de phase apparaissent et le décalage de phase mentionnés ci-dessus, ce signal de phase est dans un premier temps déroulé en ajoutant 2π à chaque saut de phase observé pour créer un signal continu. Le résultat de ce déroulage de phase est visible dans la [figure 2.3.\(d\)](#) qui montre une droite évoluant entre 0 et 160 radians dans le cas présenté.

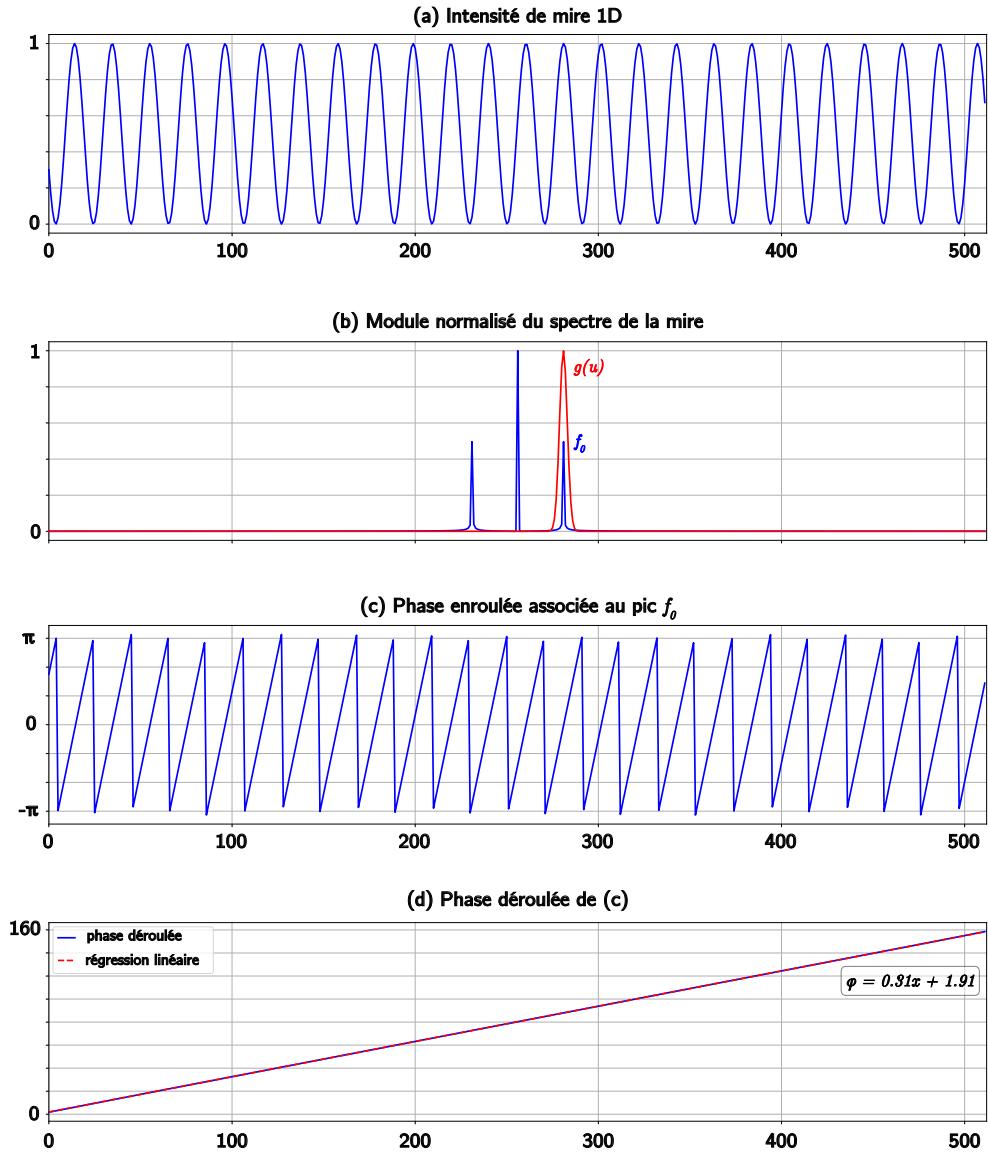


FIGURE 2.3 – Processus d’analyse de phase d’une mire 1D (ici de période 20.54 et échantillonnée sur 512 valeurs). (a) intensité de la mire, (b) spectre fréquentiel issu de la transformée de Fourier appliquée à la mire. (c) phase de la transformée de Fourier inverse appliquée sur le pic sélectionné grâce au filtrage Gaussien présenté en rouge dans (b). (d) phase déroulée de (c).

Pour la dernière étape d’étude de la phase de la mire, une régression linéaire est effectuée sur cette phase déroulée pour évaluer son coefficient directeur ainsi que son ordonnée à l’origine. Une droite d’équation $\phi(x) = ax + b$ est alors obtenue, où ϕ dénote la valeur de la phase $\forall x \in \left[\frac{-N}{2}, \frac{N}{2} \right]$ et où a et b dénotent les coefficients de cette droite (visibles en rouge dans la dernière sous-figure 2.3.(d)). Cette linéarisation de la phase observée sous forme d’équation continue permet d’identifier les paramètres f_0 et x_0 présentés dans l’équation (2.14).

Ainsi la pente de la phase, représentative de sa fréquence est identifiée avec l'équation suivante :

$$f_0 = \frac{a}{2\pi} \quad (2.15)$$

L'ordonnée à l'origine, représentative du décalage de phase de la mire et de sa position est elle identifiée en utilisant :

$$x_0 = \frac{\phi_0}{2\pi f_0} = \frac{b}{2\pi f_0} \quad (2.16)$$

Les performances de cette méthode de mesure sont évaluées numériquement dans la sous-section suivante.

2.1.5 Performances de la mesure de phase 1D

Pour évaluer les performances de cette méthode, une étude numérique visant à simuler des signaux périodiques 1D échantillonnés et fenêtrés est mise en place. Cette simulation vise à présenter à la fois les performances atteignables par cette méthode, mais aussi les avantages qu'elle confère par rapport à d'autres méthodes usuelles de mesure de phase utilisant l'information spectrale pour effectuer la mesure de pose.

La première méthode utilisée consiste à effectuer la transformée de Fourier de la mire périodique 1D et d'effectuer l'analyse de phase et de période directement sur le pic fréquentiel comme présenté brièvement dans la section [section 2.1.3](#). Cette méthode de mesure de phase effectuée à même le pic fréquentiel avait été écartée à cause de sa difficulté à déterminer la position et la valeur exacte de celui-ci dans le cas de signaux échantillonnés.

La seconde méthode comparée utilise le bourrage de zéros pour diminuer l'impact du sinus cardinal résultant de la transformée de Fourier discrète en réalisant ainsi une interpolation du pic, conférant une meilleure résolution à la méthode. Dans le cas présenté, un bourrage de zéros de dix fois la taille du signal considéré est utilisé. La suite de la méthode de mesure de la phase reprend ensuite celle de la première méthode, à savoir effectuer la mesure à même le pic fréquentiel.

La troisième méthode étudiée dans cette comparaison utilise une interpolation quadratique du pic fréquentiel. Cette méthode a notamment été utilisée par Guelpa *et al.* [[Guelpa15](#)] pour mieux estimer la position du pic dans le spectre fréquentiel. La suite de cette méthode emploie ensuite un recalcul de la phase à partir de la fréquence déterminée par cette interpolation. Les méthodes présentées lors de cette étude comparative sont disponibles sur internet en accès libre sous forme d'un dépôt [github](#)¹.

Pour comparer au mieux les performances de ces quatre méthodes, une simulation générant 1000 mires périodiques 1D sur une fenêtre de 1024 pixels est mise en place. Chaque mire périodique est par ailleurs simulée avec une période variant

1. https://github.com/AntoineAndre/1D_phase_measurement

aléatoirement entre 10 et 100 pixels et avec un décalage de phase à l'origine aléatoire variant sur l'intervalle $]-\pi; \pi]$. L'intensité du signal des mires est ensuite stockée sur des nombres flottants à 64 bits pour que l'étude ne soit portée que sur des résultats numériquement atteignables.

La figure 2.4 présente les résultats de cette simulation en montrant l'erreur entre les phases et périodes générées et celles calculées par les différentes méthodes.

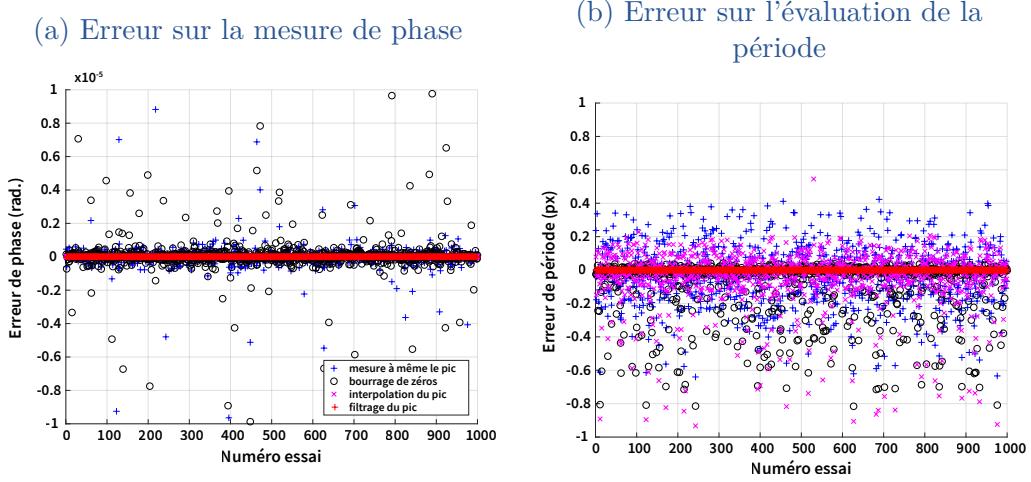


FIGURE 2.4 – Comparaison du taux d'erreur de différentes méthodes de mesure de phase et de période de mires 1D. (a) erreur sur l'évaluation de la phase, (b) erreur sur l'évaluation de la période pixélique.

Cette simulation montre que les méthodes mesurant directement la phase à même le pic fréquentiel sélectionné possèdent des résolutions moindres par rapport à celles effectuant un recalcul de celle-ci. Cette grande différence est mise en avant dans le tableau 2.1 montrant un écart type sur l'erreur de phase de l'ordre de 10^{-6} rad. pour les premières et de 10^{-13} pour les secondes, s'approchant plus du bruit numérique de calcul que d'une erreur représentative.

Méthode employée	$\bar{\epsilon}$ phase	σ phase	$\bar{\epsilon}$ période	σ période
Mesure sur le pic	$1.75 \cdot 10^{-6}$	$5.14 \cdot 10^{-5}$	$3.78 \cdot 10^{-3}$	$1.79 \cdot 10^{-1}$
Bourrage de zéros	$-9.8 \cdot 10^{-8}$	$3.06 \cdot 10^{-6}$	$-8.01 \cdot 10^{-3}$	$1.71 \cdot 10^{-1}$
Interpolation du pic	$1.58 \cdot 10^{-15}$	$5.92 \cdot 10^{-14}$	$4.60 \cdot 10^{-3}$	$2.69 \cdot 10^{-1}$
Filtrage gaussien	$3.28 \cdot 10^{-15}$	$1.74 \cdot 10^{-13}$	$-8.76 \cdot 10^{-14}$	$6.79 \cdot 10^{-13}$

TABLE 2.1 – Tableau comparatif d'erreurs de mesures de phase et de période effectuées sur 1000 échantillons analysés avec différentes méthodes. $\bar{\epsilon}$ notant l'erreur moyenne et σ l'écart type de l'erreur (en radians pour la phase et en pixels pour la période)

Cette figure ainsi que les résultats associés dans le tableau 2.1 montrent également qu'effectuer l'évaluation de la période en considérant juste la position du pic dans le spectre fréquentiel aboutit à une erreur de mesure de l'ordre de la dixième

de pixel. Cependant en considérant la méthode par filtrage fréquentiel suivi d'un recalcul de phase grâce à la régression présentée dans la section précédente montre des résultats avec une erreur elle aussi de l'ordre du bruit numérique.

Contrairement à la méthode d'interpolation, la méthode présentée dans ce chapitre montre à la fois une grande résolution pour la mesure de la phase et pour celle de la période. Cette étude comparative montre ainsi que la méthode de mesure de phase présentée ici s'avère très performante tant au niveau de la résolution qu'au niveau de la justesse.

Après avoir étudié comment mesurer les informations de phase et de période d'une mire à une dimension, la suite de ce chapitre porte sur l'extension de cette mesure dans le plan en considérant des mires bidirectionnelles.

2.2 MESURE DE LA POSE PLANAIRE DE MIRES PÉRIODIQUES 2D

En reprenant les calculs menés dans le début de chapitre, cette section présente la construction de mires 2D à deux directions ainsi que la méthode de mesure de pose planaire liée à celles-ci.

2.2.1 Mire 2D unidirectionnelle

Pour construire une mire périodique 2D dans un premier temps à une seule direction, une mire périodique 1D définie sur \mathbb{R} et étendue à un pavage sur le plan \mathbb{R}^2 est considérée. Montrons qu'en considérant une mire périodique 2D mais à une seule direction, il est possible d'obtenir trois informations que sont le décalage de phase x_1 , l'orientation de la mire α_1 et la fréquence f_1 .

Ainsi le signal de mire 1D défini dans l'équation (2.1) est à présent défini sur tout le plan $(x, y) \in \mathbb{R}^2$ comme suit :

$$A(x, y) = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos(2\pi f_1(x - x_1))) \quad (2.17)$$

Ce signal qui pave le plan est interprété comme la mire périodique présentée dans la figure 2.1.(a) qui est étendue selon la direction y . Une rotation de la mire, notée α_1 et *a priori* inconnue et également intégrée à cette construction. Cette rotation de mire 2D à une seule direction est visible dans la première sous-figure 2.5.(a₁) qui montre l'impact de la rotation sur la représentation de la mire 2D.

Cette rotation α_1 est intégrée à la définition de la mire périodique 2D comme suit :

$$M_1(x, y) = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos(2\pi f_1(\cos(\alpha_1)x - \sin(\alpha_1)y) + \phi_1)) \quad (2.18)$$

où M_1 représente la mire 2D d'orientation α_1 et de décalage de phase ϕ_1 . Pour alléger les équations présentées, la mire est définie en fonction de son décalage de phase ϕ_1 plutôt qu'en fonction de son décalage spatial x_1 .

Similairement à l'étude du cas 1D, la transformée de Fourier 2D est utilisée pour étudier le spectre de la mire. Cette transformation 2D est notée ainsi :

$$\mathcal{F}\{f(x, y)\} : f \mapsto \hat{f}(u, v) = \iint_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-2\pi i(ux+vy)} dx dy \quad (2.19)$$

Cette transformée est ensuite appliquée au signal 2D de la mire unidirectionnelle M_1 .

$$\mathcal{F}\{M_1(x, y)\} = \frac{1}{2}\mathcal{F}(1) + \frac{1}{2}\hat{G}(u, v) \quad (2.20)$$

où $\hat{G}(u, v)$ représente la transformée de Fourier du signal sinusoïdal de M_1 . Les détails du découpage en deux parties de cette transformée de Fourier sont présentés en [annexe A.2.1](#). Cette transformée de Fourier est ainsi scindée en deux parties, la première correspondant à la moyenne du signal $\mathcal{F}(1)$. La seconde partie de cette transformée de Fourier, notée $\hat{G}(u, v)$ est étudiée en utilisant la représentation exponentielle du cosinus, comme présenté dans la première partie sur l'étude de mire 1D (voir [équation \(2.8\)](#)). Cette représentation en deux exponentielles distinctes scinde ainsi $\hat{G}(u, v)$ en deux transformées de Fourier $\hat{G}_1(u, v)$ et $\hat{G}_2(u, v)$ traitables indépendamment. Ces équations sont détaillées en [annexe A.2.2](#).

Chaque partie \hat{G}_1 et \hat{G}_2 de la transformée de Fourier donne deux pics de Dirac positionnés respectivement en $(-f_1 \cos(\alpha_1), f_1 \sin(\alpha_1))$ et $(f_1 \cos(\alpha_1), -f_1 \sin(\alpha_1))$ dont les arguments sont conjugués avec $\arg e^{i\phi_1} \equiv \phi_1 \bmod 2\pi$. Ces deux pics, qui sont positionnés en fonction de l'orientation de la mire α_1 sont visibles dans la [figure 2.5.\(a₂\)](#).

Ainsi une mire 2D unidirectionnelle donne bien accès aux trois informations (ϕ_1 , f_1 et α_1) mesurables directement dans le spectre fréquentiel en étudiant la position et l'argument d'un des deux pics de Dirac conjugués.

2.2.2 Généralisation de la mesure de pose à une mire 2D

Pour créer une mire bidirectionnelle assurant une mesure de pose, deux mires unidirectionnelles sont couplées. Cette opération est visible dans la [figure 2.5](#) où une mire M_1 et une mire M_2 ([figure 2.5.\(a₁\),\(b₁\)](#)) sont couplées et donnent la mire présentée [figure 2.5.\(c₁\)](#) qui est notée M_t . Par ailleurs, cette figure souligne le fait que les deux mires unidirectionnelles n'ont pas forcément le même angle ni la même fréquence. Le couplage de ces deux mires permet ainsi de créer un repère défini par la longueur des périodes de chacune des mires couplées ainsi que par leur direction principale (la définition de ce repère est visible dans la [figure 2.5.\(c₁\)](#)).

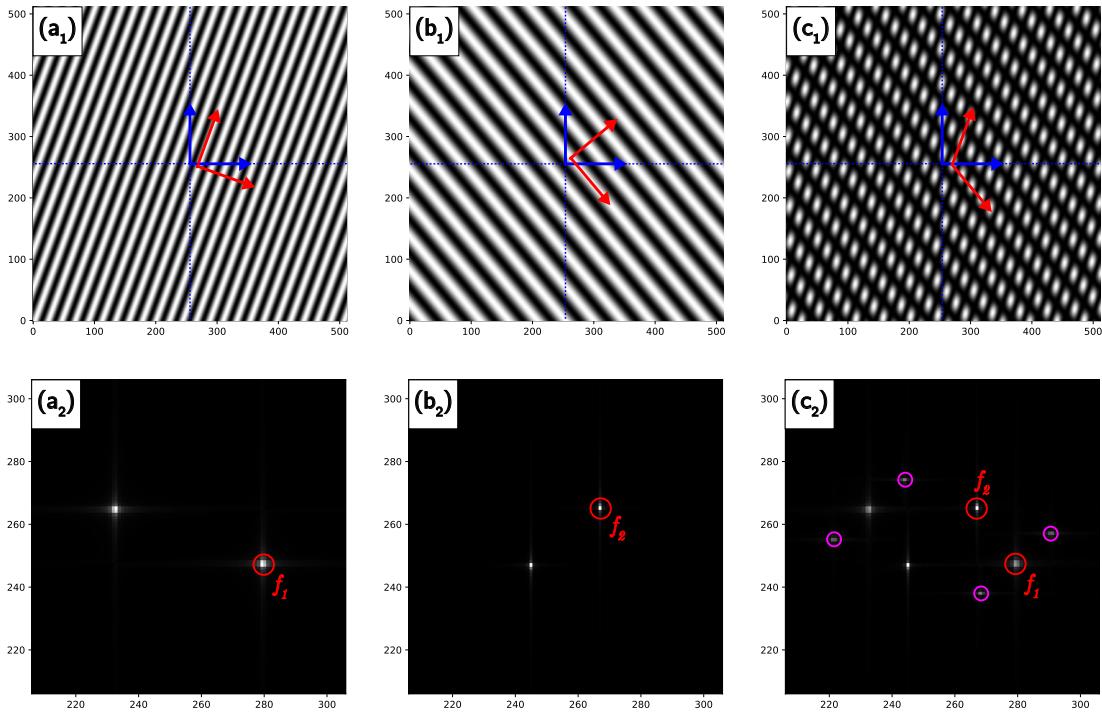


FIGURE 2.5 – Définition des mires périodiques 2D selon une direction (a_1), son autre direction (b_1) et le couplage des deux directions (c_1) qui constituent une mire 2D bidirectionnelle. Les spectres fréquentiels associés à chaque mire sont visibles en (a_2), (b_2) et (c_2)

Ce couplage de deux mires est effectué via une multiplication des deux mires périodiques unidirectionnelles M_1 et M_2 :

$$M_t(x, y) = M_1(x, y) \cdot M_2(x, y)$$

$$M_t(x, y) = \frac{1}{2}(1 + \cos(2\pi f_1(\cos(\alpha_1)x - \sin(\alpha_1)y) + \phi_1)) \cdot \frac{1}{2}(1 + \cos(2\pi f_2(\sin(\alpha_2)x + \cos(\alpha_2)y) + \phi_2)) \quad (2.21)$$

où f_1 et f_2 dénotent les fréquences de chacune des mires, ϕ_1 , ϕ_2 leurs décalages de phase respectifs et α_1 , α_2 l'orientation de chacune des mires mentionnées plus haut.

Afin de mener à bien la mesure de ces six informations à partir du spectre fréquentiel, la transformée de Fourier appliquée à M_t en utilisant un scindage en sous-fonctions tel que présenté plus haut est mis en œuvre. Le détail montrant la démarche d'obtention de la position des pics de Dirac est présentée en annexe A.2.2.

Ces quatre pics fréquentiels sont visibles dans la figure 2.5.(c₂) et contiennent les six inconnues de la mire 2D présentée plus haut. Leurs positions sont notées comme suit :

$$\begin{cases} P_1 & (u - f_1 \cos(\alpha_1), v + f_1 \sin(\alpha_1)) \\ P_2 & (u + f_1 \sin(\alpha_1), v - f_1 \cos(\alpha_1)) \\ P_3 & (u - f_2 \cos(\alpha_2), v + f_2 \sin(\alpha_2)) \\ P_4 & (u + f_2 \sin(\alpha_2), v - f_2 \cos(\alpha_2)) \end{cases} \quad (2.22)$$

Les pics associés respectivement à $\hat{G}_1(u, v)$ et $\hat{G}_2(u, v)$ donnent les mesures sur f_1 , ϕ_1 et α par leurs positions dans le spectre. Les deux pics associés à $\hat{H}_1(u, v)$ et $\hat{H}_2(u, v)$ donnent f_2 , ϕ_2 et α . Cette figure montre également quatre autres pics d'intensité plus faible qui proviennent de la transformée de Fourier du produit des mires M_1 et M_2 . Le détail de l'obtention de ces positions est effectué en [annexe A.2.2](#).

Ainsi les six informations définissant une mire 2D bidirectionnelle sont exploitables de manières indépendantes pour effectuer une mesure de pose planaire. Cependant, avant de montrer comment les exploiter pour remonter à une information de pose 3D, une étude sur leur portage échantillonné est menée. Cette étude montre ainsi comment effectuer une mesure de pose planaire dans le cas d'images acquises.

2.2.3 Application de la méthode à la mesure sur une mire 2D échantillonnée

La première partie de ce chapitre a montré comment exploiter l'information spectrale pour obtenir une pose résolue au bruit numérique près en considérant une mire échantillonnée et fenêtrée. Cette section présente comment effectuer un filtrage similaire à celui présenté en une dimension, mais porté ici sur le cas des mires périodiques 2D bidirectionnelles.

La première étape de cette étude consiste à définir une mire 2D échantillonnée d'[équation \(2.21\)](#) sur une fenêtre $[0, M] \times [0, N]$ avec $(M, N) \in \mathbb{N}^2$. La transformée de Fourier discrète à deux dimensions est donnée par la formule suivante :

$$\mathcal{F}(m, n) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} f(u, v) e^{-2\pi i (\frac{um}{M} + \frac{vn}{N})} \quad (2.23)$$

Les pics fréquentiels théoriques représentatifs de la mire périodique avant échantillonnage, contenant les informations de pose sont alors positionnés comme suit :

$$\begin{cases} P_1 & (u - M \cdot f_1 \cos(\alpha_1), v + N \cdot f_1 \sin(\alpha_1)) \\ P_2 & (u + M \cdot f_1 \sin(\alpha_1), v - N \cdot f_1 \cos(\alpha_1)) \\ P_3 & (u - M \cdot f_2 \cos(\alpha_2), v + N \cdot f_2 \sin(\alpha_2)) \\ P_4 & (u + M \cdot f_2 \sin(\alpha_2), v - N \cdot f_2 \cos(\alpha_2)) \end{cases} \quad (2.24)$$

Comme les pics sont conjugués deux à deux, un seul pic représentatif de chacune des directions de la mire est conservé pour les étapes suivantes (P_1 et P_3) comme montré dans la figure 2.5.(c₂). Ces pics sont ensuite filtrés à l'aide d'une fonction Gaussienne d'équation :

$$g(u, v) = e^{-\left(\frac{(u-u_c)^2+(v-v_c)^2}{\sigma^2}\right)^2} \quad (2.25)$$

La transformée de Fourier discrète inverse est ensuite appliquée sur chacun des spectres filtrés, et l'analyse est ensuite effectuée sur l'angle des plans de phase ainsi obtenus. Le résultat de cette opération est visible dans la figure 2.6.(a₁),(b₁) qui montrent les phases enroulées modulo 2π pour chaque direction de la mire.

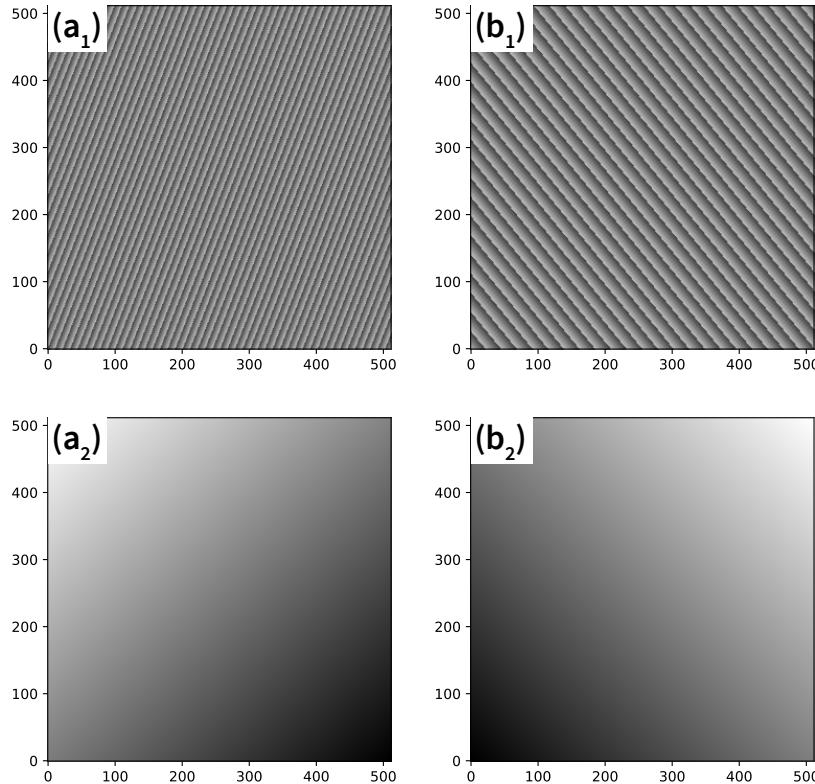


FIGURE 2.6 – (a₁), (b₁) présentent les images de phase de la transformée de Fourier inverse appliquée à chacun des pics f_1 et f_2 . (a₂), (b₂) montrent les phases déroulées correspondantes

Similairement à la méthode portée sur les mires 1D, les deux plans de phase (voir figure 2.6.(a₂),(b₂)) sont déroulés et une régression linéaire selon une équation de plan est effectuée pour obtenir cette fois-ci deux équations de plans de phase (et non plus une droite de phase). Ces équations résultant de la régression linéaire se présentent sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \phi_1(x, y) = a_1x + b_1y + c_1 \\ \phi_2(x, y) = a_2x + b_2y + c_2 \end{cases} \quad (2.26)$$

Avec les coefficients directeurs de chaque plan de phase, la fréquence de chaque direction de la mire est mesurable :

$$\begin{cases} f_1 &= \frac{\sqrt{a_1^2+b_1^2}}{2\pi} \\ f_2 &= \frac{\sqrt{a_2^2+b_2^2}}{2\pi} \end{cases} \quad (2.27)$$

Les deux ordonnées à l'origine de ces plans de phase c_1 et c_2 renseignent directement sur le décalage de phase de chacune des directions de la mire, et par extension, de son décalage spatial selon chacune de ces directions :

$$\begin{cases} x_1 &= \frac{c_1}{2\pi f_1} \\ y_2 &= \frac{c_2}{2\pi f_2} \end{cases} \quad (2.28)$$

enfin l'angle de la mire est mesuré avec l'orientation du vecteur directeur des plans de phase :

$$\begin{cases} \alpha_1 &= \text{atan2}(b_1, a_1) \\ \alpha_2 &= \text{atan2}(b_2, a_2) \end{cases} \quad (2.29)$$

Grâce à cette méthode de filtrage et de régression linéaire appliquée sur la phase des deux directions de la mire, il est alors possible de mesurer de manière grandement résolue les six paramètres de la mire périodique 2D, à savoir les fréquences f_1 , f_2 , les translations x , y ainsi que les orientations α_1 et α_2 .

2.2.4 Hypothèses de conception des mires 2D

Cette étude visant à réaliser expérimentalement les mires présentées dans ce chapitre, plusieurs hypothèses simplifiant leur processus de fabrication sont mises en place. La première consiste à orienter les deux mires unidirectionnelles couplées ensemble perpendiculairement avec $\alpha_2 = \alpha_1 + \frac{\pi}{2}$. Pour la suite de l'étude nous considérons ainsi une seule orientation des mires périodiques 2D bidirectionnelles, notée $\alpha = \alpha_1$.

Par ailleurs, il est plus simple de fabriquer ces mires en employant la même fréquence et en définissant $f = f_1 = f_2$. Au-delà de simplifier le processus de fabrication, cette hypothèse supplémentaire rend le traitement algorithmique plus simple à mettre en place. Une mire 2D générée selon ces hypothèses est présentée figure 2.7.

2.2.5 Performances atteignables de la mesure de pose 2D

Pour confirmer la validité de la méthode de mesure 2D, une simulation visant à évaluer les performances atteignables numériquement est mise en place. Pour cela des mires d'une taille de 1024×1024 pixels (représentatif de ce qui peut être acquis en conditions réelles) sont générées avec une période arbitraire de 20.123 pixels.

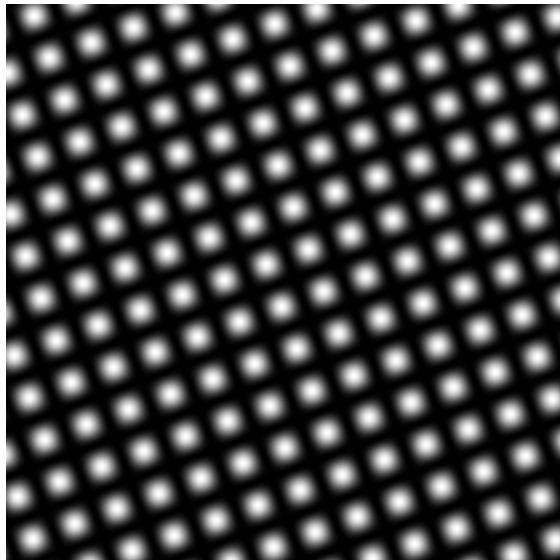


FIGURE 2.7 – Mire 2D avec chacune des directions perpendiculaires entre elles et présentant la même fréquence selon chaque direction.

Afin d'étudier au mieux les performances de la méthode, les valeurs des pixels de la mire générée sont stockées sur des flottants 64 bits comme dans la première simulation présentée afin d'étudier seulement les performances théoriques de la méthode.

En générant 200 poses aléatoires selon les trois degrés de liberté x, y, α , il est possible d'étudier l'erreur entre la pose à laquelle la mire est générée et la pose calculée par la méthode décrite ci-dessus. Ces poses sont générées sur la plage de mesure $[0, 11 \cdot 10^3]$ pour les translations x, y et sur la plage $[0, 2\pi]$ pour l'orientation α . Le [chapitre 4](#) consacré à l'extension de la plage de mesure détaille comment augmenter cette plage limitée pour l'instant à une seule période comme montré dans ce chapitre. Cependant cette plage de mesure n'impacte pas les résultats de cette simulation, la mesure grande plage et celle sous-pixellique présentée dans ce chapitre étant indépendantes.

Comme le montre la [figure 2.8](#), l'erreur entre les deux poses n'excède pas les 10^{-7} pixel en translation et montre une résolution angulaire de l'ordre de 10^{-9} radian. Ce niveau d'erreur est proche du bruit numérique et montre à quel point, en conservant un échantillonnage discret (image) pour stocker des valeurs continues (signal écrit avec des flottants sur chacun des pixels), il est possible d'obtenir un niveau de bruit proche de celui du numérique et ainsi garantir une résolution hautement sous-pixellique de la méthode. Les histogrammes d'erreurs présentés dans la [figure 2.8.\(a₂\),\(c₂\),\(c₂\)](#) confirment le caractère gaussien de l'erreur de mesure.

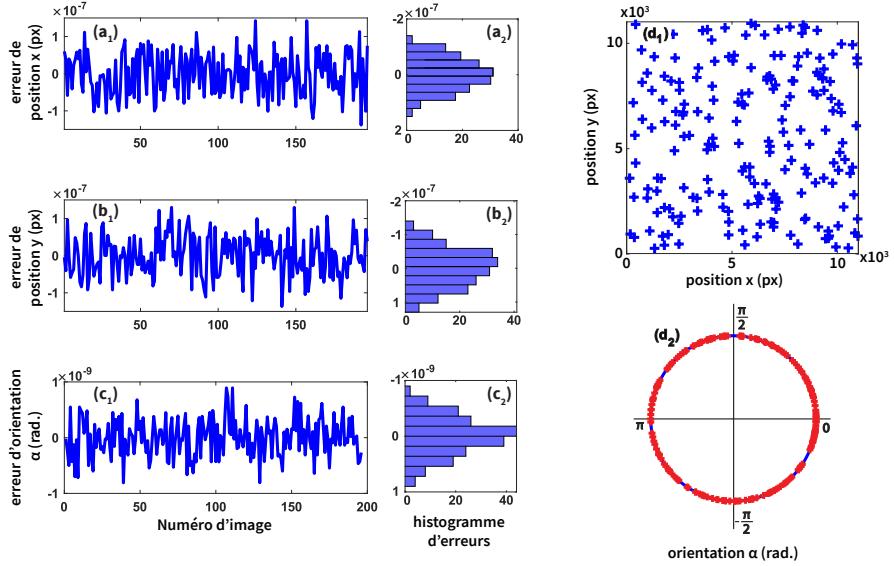


FIGURE 2.8 – Analyse de l’erreur de mesure de pose à partir de 200 mires simulées à des positions aléatoires. (a_1), (b_1), (c_1) présentent ces erreurs de mesure selon les degrés de liberté x , y et α . (a_2), (b_2), (c_2) présentent la répartition de ces erreurs sous forme d’histogrammes. (d_1) et (d_2) montrent les positions et orientations où sont générées les mires (respectivement sur $[0, 11 \cdot 10^3]$ px et sur $[0, 2\pi]$).

2.3 CONCLUSION

Ce chapitre dédié à la méthode de conception des mires périodiques à la fois en 1D et en 2D, montre comment l’exploitation de la phase offre une mesure de pose planaire comprenant les deux translations et l’orientation de la mire.

Par ailleurs la méthode présentée pour effectuer une mesure de pose sur des signaux fenêtrés et échantillonnés a permis de montrer comment exploiter pleinement l’information spectrale et la redondance d’information des mires périodiques. Cette méthode, testée à la fois avec des simulations sur des mires périodiques 1D et 2D a ainsi montré des performances grandement sous-pixellique, proches du bruit numérique sur des mires simulées.

Ce chapitre a également montré la richesse du spectre des mires périodiques, donnant accès à six informations indépendantes que sont la position du pic dans le spectre, son orientation et sa phase mesurable selon chacune des directions de la mire.

Le chapitre suivant s’intéresse à l’exploitation de ces six informations qui sont mesurables avec une grande résolution pour établir une méthode de mesure de pose 3D. Nous montrerons ainsi comment lever en partie les problèmes de mesure des angles hors-plan en microscopie à l’aide de cette information spectrale.

Chapitre 3

Extension à une mesure de pose 3D

3.1	Mesure de pose 3D dans le cas d'une projection orthographique	42
3.1.1	Utilité de la projection orthographique pour la mesure de pose en microscopie	42
3.1.2	Définition de la projection d'une mire 2D dans le repère caméra	43
3.1.3	Méthode de résolution pour le calcul des angles β et γ	45
3.2	Mesure de pose 3D dans le cas d'une projection perspective	49
3.2.1	Approche intuitive du calcul de pose complet	49
3.2.2	Angles hors-plan sans ambiguïté : étude des dérivées de la phase	50
3.2.3	Mesure de pose complète	52
3.3	Performances numériques de mesure de pose 3D	53
3.3.1	Étude de la plage de mesure des angles hors-plan	53
3.3.2	Performances de la mesure de pose 3D	55
3.3.3	Comparaison avec une méthode de mesure de pose PnP	56
3.4	Conclusion	58

Après avoir montré comment effectuer une mesure de pose planaire grâce aux informations contenues dans le spectre fréquentiel de mires périodiques 2D, et montré ses capacités à effectuer une mesure hautement sous-pixellique, montrons à présent comment étendre celle-ci à une mesure de pose 3D.

Ce chapitre présente ainsi la méthode de mesure de pose 3D utilisant les mires périodiques 2D bidirectionnelles définies dans le chapitre précédent et observées à l'aide de différentes projections. Nous montrerons également comment effectuer cette mesure de pose dans le cadre de deux projections différentes à savoir orthographique et perspective.

3.1 MESURE DE POSE 3D DANS LE CAS D'UNE PROJECTION ORTHOGRAPHIQUE

3.1.1 Utilité de la projection orthographique pour la mesure de pose en microscopie

La définition des mires 2D présentées dans le chapitre précédent utilisait une projection orthographique par construction. En effet, portée à une vision plus pratique, ces mires périodiques 2D sont définies dans un plan parallèle à celui de la caméra. Comme seule la mesure de la position des pics dans le domaine spectral est pertinente pour notre étude (comme montré dans le chapitre précédent), il est naturel de s'y référer pour effectuer l'étude théorique de la méthode de mesure de pose 3D. De plus ce modèle de projection est, à un facteur d'échelle près, très proche de celui utilisé en microscopie. Se rapporter à ce cas d'étude est donc loin d'être anodin, car il est celui qui se rapproche le plus du cas d'étude présenté dans cette thèse.

Cependant de par sa nature de projection parallèle, les différences de profondeur de l'objet observé ne peuvent être restituées car étant tous sur le même plan comme discuté dans le chapitre d'introduction. Le modèle utilisé ici repose sur une projection orthographique mise à l'échelle, via un facteur noté s , qui n'est pas lié à la profondeur de l'objet dans ce cas.

Ainsi la projection orthographique utilisée ici emploie la définition suivante :

$$K_o = \begin{bmatrix} s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

où s représente le facteur de grandissement discuté plus haut.

Pour obtenir ce lien entre facteur d'échelle et mesure de la profondeur de la mire selon l'axe z , une projection orthographique n'est pas suffisante comme expliqué plus haut. En employant une projection perspective, il devient possible de lier

le facteur d'échelle à une mesure de la profondeur. La deuxième partie de ce chapitre traite de la méthode de mesure de pose 3D employant ce type de projection d'équation :

$$K_p = \begin{bmatrix} f & 0 & p_x & 0 \\ 0 & f & p_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

où f représente alors la focale équivalente du système optique en px/m et p_x, p_y les coordonnées du point principal de la caméra. En utilisant ce modèle de projection et la méthode de mesure de pose 3D menées sur la projection orthographique, nous montrerons comment effectuer une mesure de pose complète 6DDL sans ambiguïté.

3.1.2 Définition de la projection d'une mire 2D dans le repère caméra

L'extension de la méthode de mesure de pose 3D implique d'établir un lien entre le référentiel de la mire dans lequel est effectuée la mesure et le référentiel de la caméra, effectuant l'acquisition de la mire où est appliquée la méthode présentée ici. Ce passage du référentiel caméra à celui de la mire est illustré à l'aide de la figure 3.1 présentant les différents repères employés.

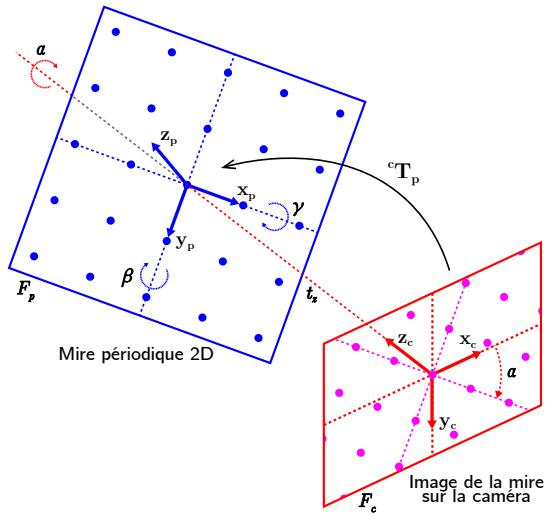


FIGURE 3.1 – Convention de référentiel et de projection 6DDL d'une mire vers la caméra

Cette projection est alors définie à l'aide de l'équation suivante, faisant intervenir la matrice de projection orthographique présentée plus haut :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix} &= K_o \cdot {}^c\mathbf{T}_m \cdot \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot {}^c\mathbf{T}_m \cdot \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.3)$$

où $[x_c, y_c]^T$ représente le point projeté sur le capteur de la caméra du point observé $[P_x, P_y, P_z]^T$ dans le repère de la mire. s représente le facteur d'échelle donné par les caractéristiques physiques de l'objectif utilisé. Enfin, ${}^c\mathbf{T}_m$ représente la matrice de projection du repère de la mire vers le repère caméra. La figure 3.1 montre tous les éléments de cette projection avec les référentiels \mathcal{F}_c et \mathcal{F}_m qui représentent respectivement les référentiels caméra et mire. La figure 3.2 présente le résultat de cette projection de la mire sur la caméra et de son spectre fréquentiel.

En considérant ainsi la procédure de projection de la mire vers la caméra, la position du point $[x_c, y_c]^T$ s'écrit alors :

$${}^c\mathbf{T}_m = \text{transl}(0, 0, z) \cdot \text{rotz}(\alpha) \cdot \text{roty}(\beta) \cdot \text{rotx}(\gamma) \cdot \text{transl}(x, y, 0) \quad (3.4)$$

Cette forme de projection a été choisie pour faciliter les calculs de la pose 3D du point projeté dans le domaine fréquentiel.

(a) Schéma d'une mire périodique 2D dans le domaine spatial (b) Schéma d'une mire périodique 2D dans le domaine spectral

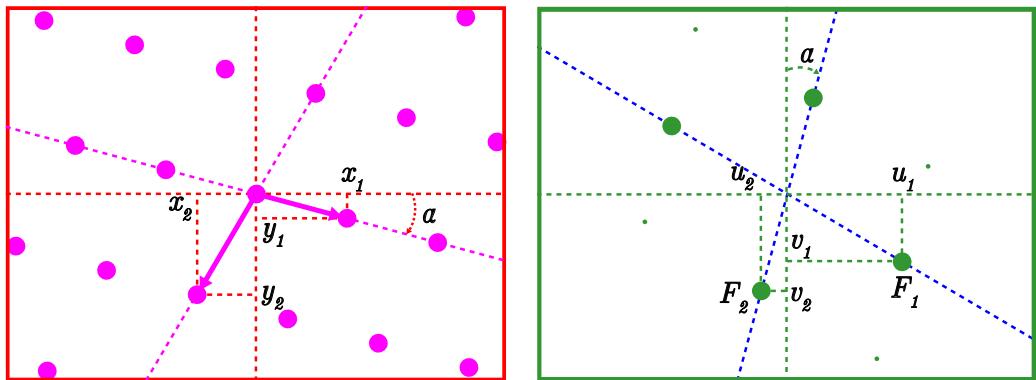


FIGURE 3.2 – (a) Vue de face de la projection orthographique de la mire sur le capteur caméra et (b) Lobes principaux de la transformée de Fourier de la mire avec les pics F_1 en (m_1, n_1) et F_2 en (m_2, n_2) .

3.1.3 Méthode de résolution pour le calcul des angles β et γ

L'analyse de la position des pics dans le spectre de la mire périodique est à nouveau utilisée pour mesurer les deux angles hors-plan β et γ en plus du facteur d'échelle donné par la projection orthographique. En effet, ces deux pics et leurs vecteurs associés $\mathbf{h}_1 = [x_1, y_1]^T$ et $\mathbf{h}_2 = [x_2, y_2]^T$ sont directement liés au référentiel objet de la mire périodique. La figure 3.3 présente ces deux vecteurs de phase issus des équations des plans de phase obtenus après régression linéaire sur chacune des phases déroulées. Le lien entre la position des points $[x_1, y_1]^T$ et $[x_2, y_2]^T$ définissant le repère utilisé pour la suite des calculs et les équations des deux plans de phase $\phi_1(x, y)$ et $\phi_2(x, y)$ est réalisé à l'aide des équations suivantes :

$$\begin{cases} x_1 &= \frac{b_1 \cdot c_2 - (c_1 - 2\pi) \cdot b_2}{a_1 \cdot b_2 - a_2 \cdot b_1} \\ y_1 &= \frac{a_2 \cdot (c_1 - 2\pi) - a_1 \cdot c_2}{a_1 \cdot b_2 - a_2 \cdot b_1} \end{cases} \quad (3.5)$$

et

$$\begin{cases} x_2 &= \frac{b_1 \cdot (c_2 - 2\pi) - c_1 \cdot b_2}{a_1 \cdot b_2 - a_2 \cdot b_1} \\ y_2 &= \frac{a_2 \cdot c_1 - a_1 \cdot (c_2 - 2\pi)}{a_1 \cdot b_2 - a_2 \cdot b_1} \end{cases} \quad (3.6)$$

Grâce à la détermination très résolue de ces vecteurs, il est possible de calculer la position de chaque point de la mire périodique. L'orientation hors-plan de la mire périodique induit un changement sur la période apparente à l'image et implique donc une variation de ces vecteurs \mathbf{h}_1 et \mathbf{h}_2 . C'est grâce à ce phénomène qu'il est possible de mesurer l'orientation hors-plan selon chacune des directions de la mire périodique.

En projetant les points définissant le repère orthonormé d'une longueur d'une période $\lambda \mathbf{x}_m = [\lambda, 0, 0]^T$ et $\lambda \mathbf{y}_m = [0, \lambda, 0]^T$ avec la matrice de projection ${}^c\mathbf{T}_p$, un lien direct entre les angles de la mire périodique et ces vecteurs directeurs est ainsi visible.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot {}^c\mathbf{T}_p \cdot \begin{bmatrix} \lambda \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = s\lambda \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta \\ \sin \alpha \cos \beta \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

La projection du second vecteur directeur $\lambda \mathbf{y}_p = [0; \lambda; 0]$ donne :

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot {}^c\mathbf{T}_p \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \lambda \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

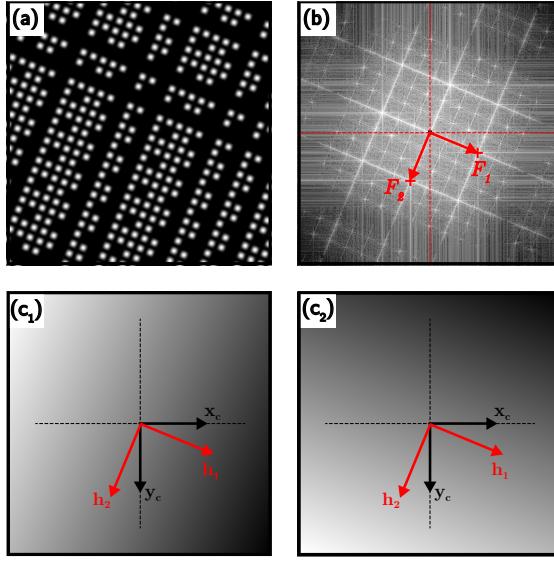


FIGURE 3.3 – Principe de mesure de pose résumé avec (a) image de la mire acquise, (b) spectre fréquentiel issu de la transformée de Fourier de l'image montrant les pics F_1 et F_2 , (c) plans de phases montrant les vecteurs directeurs du référentiel de la mire \mathbf{h}_1 et \mathbf{h}_2 (non mis à l'échelle).

qui donne

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = s\lambda \begin{bmatrix} \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma \\ \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma \end{bmatrix} \\ = s\lambda \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \beta \sin \gamma \\ \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Pouvant être réarrangé sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = s\lambda \begin{bmatrix} \sin \beta \sin \gamma \\ \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Les coordonnées du pic spectral eux donnent :

$$\begin{aligned} x_1^2 + y_1^2 &= s^2 \lambda^2 (\cos^2 \alpha \cos^2 \beta + \sin^2 \alpha \cos^2 \beta) \\ &= s^2 \lambda^2 \cos^2 \beta \end{aligned} \quad (3.11)$$

Puis,

$$\cos^2 \beta = \frac{x_1^2 + y_1^2}{s^2 \lambda^2} = \frac{b}{s^2} \quad \text{avec } b = \frac{x_1^2 + y_1^2}{\lambda^2} \quad (3.12)$$

De manière analogue avec l'équation (3.10), il vient :

$$\begin{aligned} \cos^2 \gamma &= \frac{(-x_2 \sin \alpha + y_2 \cos \alpha)^2}{s^2 \lambda^2} = \frac{g}{s^2} \\ \text{avec } g &= \frac{(-x_2 \sin \alpha + y_2 \cos \alpha)^2}{\lambda^2} \end{aligned} \quad (3.13)$$

3.1. Mesure de pose 3D dans le cas d'une projection orthographique

et

$$\begin{aligned} \sin^2 \beta \sin^2 \gamma &= \frac{(x_2 \cos \alpha + y_2 \sin \alpha)^2}{s^2 \lambda^2} = \frac{d}{s^2} \\ \text{avec } d &= \frac{(x_2 \cos \alpha + y_2 \sin \alpha)^2}{\lambda^2} \end{aligned} \quad (3.14)$$

donnant :

$$(1 - \cos^2 \beta)(1 - \cos^2 \gamma) = \frac{d}{s^2} \quad (3.15)$$

En remplaçant $\cos^2 \beta$ et $\cos^2 \gamma$ dans l'équation ci-dessus, une équation du second ordre est déduite :

$$s^4 - (b + g + d)s^2 + bg = 0 \quad (3.16)$$

La résolution de cette équation du second ordre donne deux solutions pour le facteur d'échelle s , exprimées ainsi :

$$s_1 = \sqrt{\frac{(b + g + d) + \sqrt{(b + g + d)^2 - 4bg}}{2}} \quad (3.17)$$

$$s_2 = \sqrt{\frac{(b + g + d) - \sqrt{(b + g + d)^2 - 4bg}}{2}} \quad (3.18)$$

Deux groupes de quatre solutions symétriques pour β et γ sont déduites de l'équation (3.12) et de l'équation (3.13) :

$$\left\{ \begin{array}{lcl} \beta_1 & = & \pm \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{b}}{s_1} \right) & ; & \gamma_1 & = & \pm \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{g}}{s_1} \right) \\ \beta_2 & = & \pm \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{b}}{s_2} \right) & ; & \gamma_2 & = & \pm \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{g}}{s_2} \right) \end{array} \right. \quad (3.19)$$

Parmi ces solutions, plusieurs sont à écarter. C'est le cas de celles données par le second facteur d'échelle s_2 . En effet, comme $\frac{\sqrt{b}}{s_2}$ doit être compris entre -1 et 1 pour donner un sens à l'arccosinus considéré pour la mesure des angles, l'annexe A.3.1 détaille en quoi cette seconde solution ne respecte pas cette condition.

Ainsi un nouveau jeu de solutions réduit est obtenu en écartant celles contenant s_2 :

$$\left\{ \begin{array}{lcl} \beta_1 & = & \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{b}}{s_1} \right) & ; & \gamma_1 & = & \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{g}}{s_1} \right) \\ \beta_2 & = & -\cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{b}}{s_1} \right) & ; & \gamma_2 & = & \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{g}}{s_1} \right) \\ \beta_3 & = & \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{b}}{s_1} \right) & ; & \gamma_3 & = & -\cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{g}}{s_1} \right) \\ \beta_4 & = & -\cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{b}}{s_1} \right) & ; & \gamma_4 & = & -\cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{g}}{s_1} \right) \end{array} \right. \quad (3.20)$$

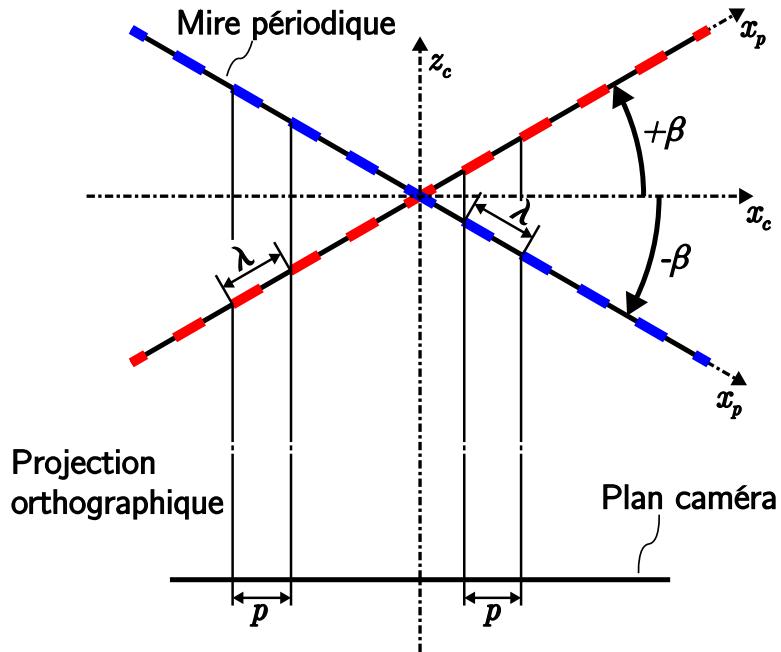


FIGURE 3.4 – Ambiguïté de la mesure causée par la projection orthographique

Bien que ce jeu de solutions soit réduit de moitié en éliminant celles faisant appel au second facteur d'échelle s_2 , une ambiguïté est présente sur le signe de l'angle mesuré. Celle-ci correspond à la symétrie de la projection orthographique telle que définie ici et illustrée dans la figure 3.4.

Cependant, en considérant une acquisition continue d'image en image, il est possible de lever cette ambiguïté en supposant que la mesure de ces angles varie continûment. Bien que cette hypothèse assure un suivi continu de la mesure, il n'est en aucun cas possible de déterminer le signe de l'angle sans connaissance *a priori* de celui-ci et de son sens de déplacement. Cette hypothèse de continuité pour lever l'ambiguïté ne propose donc qu'une partie de solution de mesure de pose absolue.

Cette méthode de mesure utilisant une projection orthographique fournit une information sur cinq degrés de liberté ainsi que sur le facteur d'échelle s . Comme expliqué en introduction de ce chapitre, en employant une projection perspective, ce facteur s dépend directement de la profondeur z de l'objet. La suite de ce chapitre propose donc d'étudier comment étendre cette méthode de mesure à six degrés de liberté, fournissant ainsi une pose complète de la mire périodique en considérant à présent une projection perspective.

3.2 MESURE DE POSE 3D DANS LE CAS D'UNE PROJECTION PERSPECTIVE

3.2.1 Approche intuitive du calcul de pose complet

Comme expliqué dans la section précédente, la projection orthographique offre une conservation du ratio entre la scène observée (et imagée) sans prendre en compte la distance de ces points par rapport au capteur caméra (comme présenté dans la figure 3.4). En considérant à présent une projection perspective, les points de la scène sont à présent projetés conformément à la distance focale, tel que le modèle sténopé le définit et tel qu'illustré dans la figure 3.5. Cette figure montre que les périodes d'une mire acquise avec une inclinaison hors-plan se projettent sur le capteur caméra avec une taille dépendante de la profondeur locale de la mire. Cette figure présente également les périodes p_1 et p_2 changeant en fonction de leur distance au capteur.

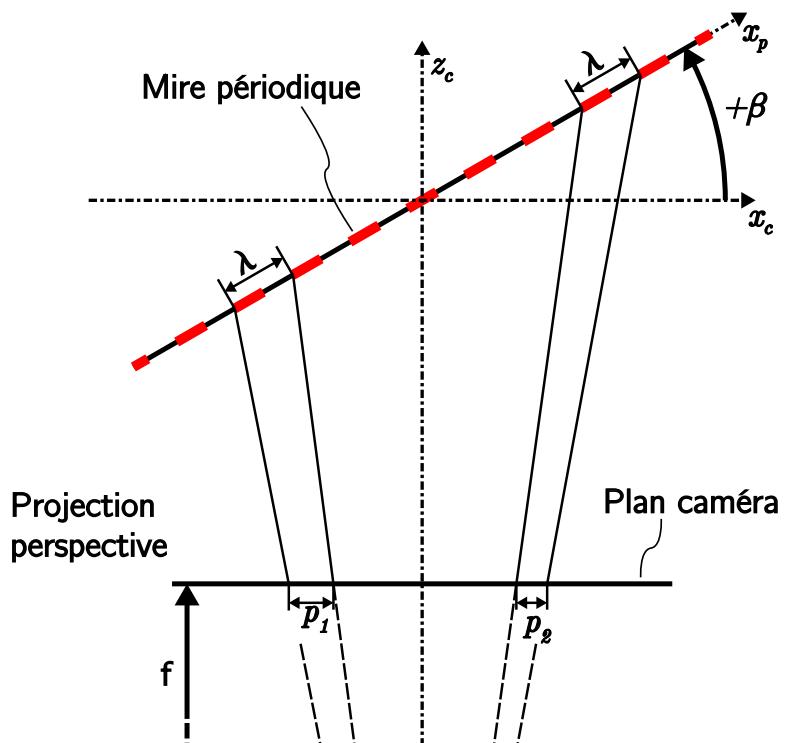


FIGURE 3.5 – Résolution de l'ambiguïté du signe des angles hors-plan et de la mesure de profondeur en utilisant une projection perspective

Pour déterminer le signe des angles hors-plan, une approche intuitive consiste à étudier l'évolution de la période de la mire selon chacune de ses directions. Cette projection affecte ainsi les points de la mire en rendant les périodes locales plus ou moins grandes en fonction de leur distance au capteur. L'exploitation de

cette information offre un moyen de mesurer la distance et l'inclinaison de la mire sans ambiguïté. Par exemple, une mire d'angle β positif (tel qu'illustré dans la figure 3.5) présentera une période locale p_1 plus courte, car étant plus proche du capteur. En menant le même raisonnement sur la période locale p_2 il est alors possible de déterminer le signe de l'orientation hors-plan β . La suite de cette section propose d'étudier cette approche au travers des dérivées successives de la phase, qui reflètent cette évolution locale des périodes.

3.2.2 Angles hors-plan sans ambiguïté : étude des dérivées de la phase

En considérant que les deux plans de phase évoluent selon l'équation suivante :

$$\Phi_i = a_i x_c + b_i y_c + \phi_i \quad (3.21)$$

où i dénote ici le numéro (1 ou 2) du plan de phase considéré. Ces équations de plans et leurs coefficients donnent le vecteur directeur principal de l'évolution de la phase selon chacune des directions $\mathbf{h}_1 = [x_1, y_1]^T$ et $\mathbf{h}_2 = [x_2, y_2]^T$ qui sont présentés dans la figure 3.3(c_1) et (c_2). Comme illustré également dans la figure 3.6.(b), dans le cas d'une projection orthographique, la dérivée de la phase est une constante qui représente l'évolution de la période au sein de la mire, selon la direction considérée (la première dans le cas présenté en figure 3.6). Cependant, en considérant le cas d'une projection perspective, et comme cela a été décrit dans le préambule à cette mesure de pose non ambiguë, l'évolution de la période n'est ni constante ni linéaire et dépend de l'orientation hors-plan de la mire.

L'évolution spatiale selon chacun des vecteurs directeurs ($\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2$) et son augmentation reflètent directement l'orientation de la mire vers la caméra. À l'inverse, une évolution décroissante dénote une orientation de la mire s'éloignant de la caméra.

La figure 3.6 montre également une évolution non linéaire de la phase. Comme la période de la mire est donnée par la première dérivée de la phase (que nous noterons Ψ_i), en étudiant la seconde dérivée de la phase, donc la dérivée de la période (que nous noterons Υ_i), il est alors possible d'accéder à cette mesure absolue d'orientation de la mire.

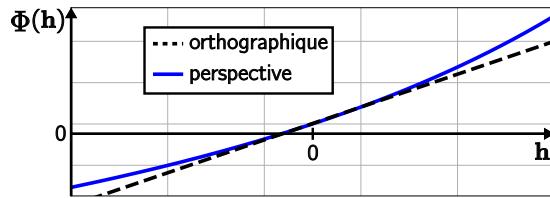
Ces différentes explications sont résumées au travers des équations suivantes qui montrent l'évolution des dérivées successives de la phase de la mire :

$$\begin{cases} \Psi_i &= \frac{d\Phi_i}{dh_i} \\ \Upsilon_1 &= \frac{d\Psi_1}{du} = \frac{d^2\Phi_1}{du^2} \end{cases} \quad (3.22)$$

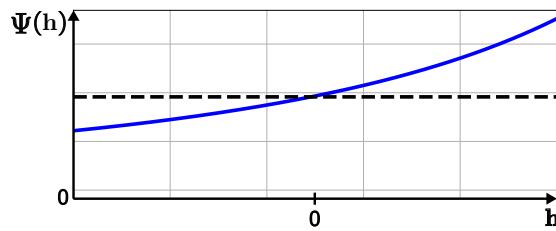
En étudiant le signe de l'évolution de la période (autrement dit son gradient), il est alors possible de lever l'ambiguïté du signe des deux angles hors-plan β et γ .

$$\begin{cases} \Upsilon_1 > 0 &\Leftrightarrow \beta > 0 \\ \Upsilon_2 > 0 &\Leftrightarrow \gamma > 0 \end{cases} \quad (3.23)$$

(a) Plan de phase présenté sous projection orthographique et perspective



(b) Dérivée première du plan de phase sous projection perspective



(c) Dérivée seconde du plan de phase sous projection perspective

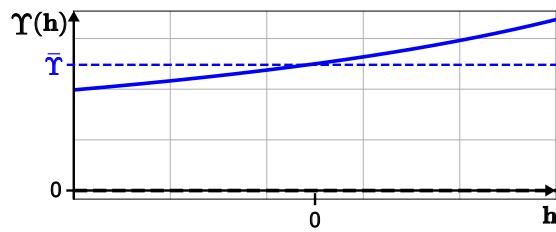


FIGURE 3.6 – Dérivées successives de la phase pour lever l'ambiguïté d'orientation à l'aide d'une projection perspective

Afin de mesurer ces dérivées de phase successives selon chacune des directions privilégiées de la mire, un changement de référentiel est nécessaire pour passer du référentiel image vers le référentiel mire, noté $(\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2)$. Ce référentiel des plans de phase dans le repère mire est également présenté dans la figure 3.3.(c₁),(c₂).

Ce changement de repère du gradient depuis le référentiel image vers le référentiel $(\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2)$ est effectué en utilisant la formule suivante :

$$\Psi_i = \frac{d\Phi_i}{dh_i} = \frac{\partial\Phi_i}{\partial x_c} \cdot \frac{\partial x_c}{\partial h_i} + \frac{\partial\Phi_i}{\partial y_c} \cdot \frac{\partial y_c}{\partial h_i} \quad (3.24)$$

où $\frac{\partial\Phi_i}{\partial x_c}$ et $\frac{\partial\Phi_i}{\partial y_c}$ sont calculés en utilisant une méthode de gradient par produit de convolution entre un noyau et l'image de phase. Cette méthode est classique en vision, notamment pour effectuer de la détection et de l'extraction de contours par

exemple. Ici un filtre de Sobel est utilisé pour effectuer ce calcul de dérivées :

$$\frac{\partial \Phi_i}{dx_c} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \otimes \Phi_i \quad (3.25)$$

et

$$\frac{\partial \Phi_i}{dy_c} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \otimes \Phi_i \quad (3.26)$$

où \otimes désigne le produit de convolution. Le calcul de ce premier gradient présente une double fonction de calcul de dérivée et de changement de repère. Les calculs de dérivées suivants sont donc effectués à même les images résultantes de ce premier calcul.

Pour obtenir le sens d'inclinaison hors-plan de la mire selon chacune des directions \mathbf{h}_1 pour β et \mathbf{h}_2 pour γ , une étude du gradient selon chacune des directions est effectuée :

$$\frac{\partial \Psi_1}{dh_1} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \otimes \Psi_1 \quad (3.27)$$

et

$$\frac{\partial \Psi_2}{dh_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \otimes \Psi_2 \quad (3.28)$$

Finalement, le signe de chaque image des dérivées secondes obtenu en calculant leur moyenne $\bar{\Psi}_i$ donne le signe de chacun des angles hors-plan β et γ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{sign}(\beta) = \text{sign}(\bar{\Psi}_1) = \text{sign} \left(\frac{1}{w \cdot h} \sum_{i=0}^{w-1} \sum_{j=0}^{h-1} \Psi_1 \right) \\ \text{sign}(\gamma) = \text{sign}(\bar{\Psi}_2) = \text{sign} \left(\frac{1}{w \cdot h} \sum_{i=0}^{w-1} \sum_{j=0}^{h-1} \Psi_2 \right) \end{array} \right. \quad (3.29)$$

3.2.3 Mesure de pose complète

Étudier le signe de l'évolution de la période donne ainsi accès à une information non ambiguë sur les angles hors-plan β et γ . Pour obtenir une mesure de pose complète, il reste à déterminer la profondeur z de la mire observée par rapport au capteur de la caméra.

Cette profondeur est calculée directement en utilisant les propriétés de la projection perspective, appliquée au centre de l'image avec :

$$z = \frac{f}{s} \quad (3.30)$$

où f est la focale équivalente de la caméra exprimée en pixels/m et s est le facteur d'échelle présenté dans la section 3.1.3.

Cependant, comme expliqué au début de cette partie, cette méthode de mesure non ambiguë des angles hors-plan se base sur les non-linéarités de l'évolution des images de phase. Cependant, le calcul des coefficients des équations des plans de phase se base quant à lui sur l'hypothèse d'une évolution linéaire de la phase. Ainsi, à mesure que la distance focale utilisée tend à diminuer, les distorsions des images de phase causées par l'étalement des pics spectraux tendent à réduire la résolution de la mesure obtenue. De ce fait, un juste compromis entre une grande résolution de la mesure souhaitée et l'emploi de focales courtes amenuisant cette même résolution est à étudier. La dernière simulation mise en œuvre dans ce chapitre vise à étudier ce compromis et les limites de la méthode dans le cadre d'une projection perspective.

À travers ce chapitre sur la mesure de pose 3D, nous avons montré qu'il était ainsi possible d'obtenir les informations des angles hors-plan en étudiant directement les plans de phase extraits de l'analyse du spectre fréquentiel des images de mires acquises.

Tout comme pour la validation de cette méthode par le biais de simulations effectuées dans le chapitre 2, nous allons à présent étudier les capacités de la méthode pour évaluer la résolution accessible ainsi que la plage de mesure autorisée pour les angles hors-plan.

3.3 PERFORMANCES NUMÉRIQUES DE MESURE DE POSE 3D

Tout comme pour les simulations numériques effectuées pour étudier les performances de mesure de pose planaire, nous allons étudier les performances de mesure de pose 6DDL en simulant plusieurs jeux d'images de mires à des poses différentes.

La première étude de performances concerne l'évaluation du domaine accessible de mesure des angles hors-plan β et γ . Une seconde étude sur l'impact des angles hors-plan sur la résolution de mesure des autres degrés de liberté est effectuée dans un second temps pour compléter cette analyse par simulation.

3.3.1 Étude de la plage de mesure des angles hors-plan

Pour mener à bien cette première étude sur la plage de mesure accessible, un intervalle de $[0, \frac{\pi}{2}]$ rad. est considéré pour effectuer la génération des mires périodiques. Cette plage de mesure étudiant seulement une orientation positive de la mire est motivée par la symétrie de la méthode de calcul des angles hors-plan. Comme cette étude vise à étudier la plage de mesure accessible par la méthode,

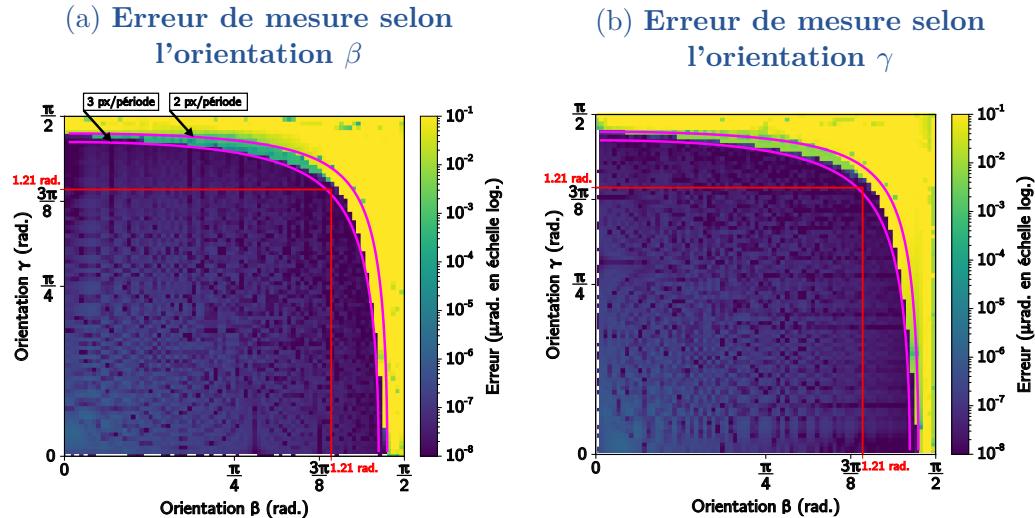


FIGURE 3.7 – Carte d'erreur de mesure des angles hors-plan en considérant une mire périodique à l'orientation hors-plan variant dans l'intervalle $[0, \pi/2]$. (a) présente l'erreur de mesure de l'angle β et (b) l'erreur de l'angle γ . La zone dans laquelle l'erreur de mesure des deux angles hors-plan n'excède pas 1 μrad . est dénotée en rouge. Les lignes magenta montrent la limite angulaire pour laquelle les mires observées présentent une période apparente de 2 et 3 px respectivement.

les mires sont générées centrées par rapport à l'axe optique avec un angle α nul et une période de 25 px. Les poses ainsi générées respectent le formalisme suivant : $[0, 0, 0, 0, \beta, \gamma]$ avec β et γ compris dans l'intervalle $[0, \frac{\pi}{2}]$. Les mires sont ensuite générées avec un pas de 0.01 rad. pour balayer tout l'espace accessible dans la plage $[0, \frac{\pi}{2}]$.

Pour connaître la plage accessible à la mesure, l'erreur entre la pose envoyée et la pose calculée est ensuite étudiée et ce résultat est traité comme deux cartes, une pour chaque angle hors-plan. Ces cartes d'erreur en fonction des angles β et γ sont présentées dans la [figure 3.7](#).

Sur cette figure, l'angle β évolue selon l'axe des abscisses et l'angle γ selon l'axe des ordonnées. L'erreur entre la pose mesurée et celle générée est représentée en échelle logarithmique avec un gradient de couleur. Ces deux cartes renseignent sur la plage accessible pour la mesure des angles hors-plan en présentant l'évolution de l'erreur en fonction des angles considérés.

Lorsque les deux angles sont sollicités conjointement, une plage de $[0, 1.21]$ rad. est accessible, tel que dénoté par le carré rouge sur les deux sous-figures. Au sein de ce carré, une résolution inférieure au microradian est alors accessible. Par ailleurs, l'écart type calculé sur cette plage de mesure pour les deux angles hors-plan est de $1.71 \cdot 10^{-7}$ rad., montrant la grande sensibilité de la méthode.

La première ligne en magenta présentée sur ces deux sous-figures représente la frontière au-delà de laquelle la mesure des angles hors-plan n'est plus possible et correspond à une période visible de 3 px. La seconde ligne magenta représente

quant à elle une période visible des mires périodiques de 2 px. Cette limite correspond au critère de Shannon-Nyquist et montre que la mesure des angles hors-plan est assurée avec une grande résolution jusqu'à cette limite.

Cette plage de mesure à grande résolution dépend néanmoins de la période initiale de la mire. En effet, plus celle-ci est initialement faible, plus cette limite de période visible de 2 px sera atteinte rapidement. De manière similaire, plus la période initiale est grande, plus cette plage de mesure sera repoussée vers la limite physique de $\pi/2$.

Pour des raisons pratiques de notation, une borne pour la plage de mesure des angles hors-plan est décidée à $3\pi/8$. La période initiale correspondant à cette plage de mesure est alors calculée à l'aide de la formule suivante :

$$s \cdot \lambda_{px} = \frac{\lambda_{lim}}{\cos(\beta_{max}) \cdot \cos(\gamma_{max})} \quad (3.31)$$

avec λ_{lim} la période visible de la mire maximale avant que la mesure ne soit plus possible. Dans le cas présenté, et avec l'appui de la figure 3.7, cette période est fixée à 3 px. En fixant β_{max} et γ_{max} à une valeur de $3\pi/8$, il est alors possible de calculer la période initiale correspondant à cette plage de mesure. Ce calcul révèle alors une période initiale $s \cdot \lambda_{px} = 20.48$ px.

Cette période initiale de la mire se trouve être assez proche de celle observée lors des différentes expérimentations, tel que présenté dans la suite de ce mémoire, chapitre 5. C'est pourquoi la plage de mesure des angles hors-plan de $[0, 3\pi/8]$ est retenue par la suite.

3.3.2 Performances de la mesure de pose 3D

Après avoir affiné la plage de mesure des angles hors-plan et montré que la plage $[0, \frac{3\pi}{8}]$ assurait une mesure avec une résolution inférieure au microradian, nous nous intéressons à la validité de cette résolution quand tous les degrés de liberté sont sollicités.

Pour cela une autre simulation visant à générer un jeu de 1000 poses selon les six degrés de liberté est mise en situation avec l'étude de l'erreur entre la pose générée et la pose calculée.

Les 1000 poses sont générées comme suit :

- $(x, y) \in [0, 10^4]$ px.
- $\alpha \in [0, 2\pi]$ rad.
- $(\beta, \gamma) \in [0, \frac{3\pi}{8}]$ rad.
- $\lambda \cdot s$ est représenté ici par la période pixellique de la mire $\in [8, 12]$.

Les résultats de cette simulation sont présentés dans la figure 3.8 sous forme d'histogrammes. Ceux-ci révèlent que les angles hors-plan n'impactent la mesure que dans une faible proportion puisque l'écart type de l'erreur selon les axes (x, y) reste en dessous du millième de pixel. De même la mesure d'orientation conserve une résolution de l'ordre du micro radian et le facteur d'échelle (associé à la mesure de la période pixellique) montre lui aussi une résolution inférieure au millième de pixel.

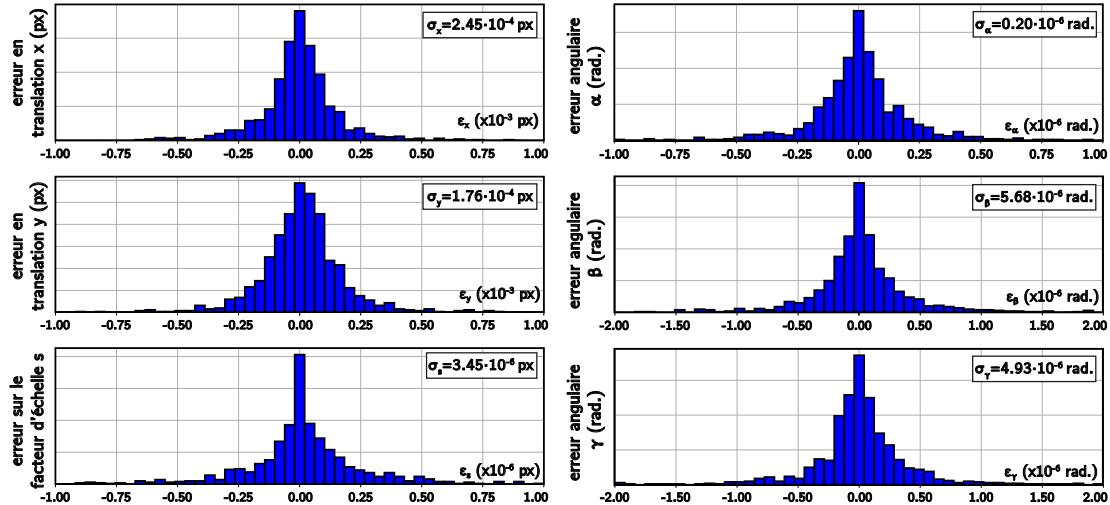


FIGURE 3.8 – Répartition de l'erreur de mesure entre les poses envoyées et celles calculées avec un jeu de 1000 poses aléatoires sollicitant les six degrés de liberté

Cependant, au regard de la simulation menée en fin de chapitre précédent montrant les performances numériques de la méthode pour la pose planaire, une dégradation de la mesure de l'ordre d'un facteur 1000 est visible. Ce résultat s'explique par le décalage des pics fréquentiels ainsi que par leur étalement, produisant une mesure légèrement moins résolue.

Cela dit, cette simulation sur un grand jeu de données valide la méthode de mesure et assure également une résolution hautement sous-pixellique selon les six degrés de liberté accessibles en se basant seulement sur l'étude du spectre fréquentiel de la mire.

3.3.3 Comparaison avec une méthode de mesure de pose PnP

Comme expliqué à la fin de la section portant sur la mesure non ambiguë des angles hors-plan, la réduction des distances focales utilisées influence le spectre fréquentiel et résulte en une augmentation des non linéarités des images de phase. Une dernière simulation est ainsi mise en place afin d'étudier l'impact de la longueur focale sur la résolution de la mesure des angles hors-plan. Cette étude est complétée par une comparaison avec une méthode classique d'estimation de pose

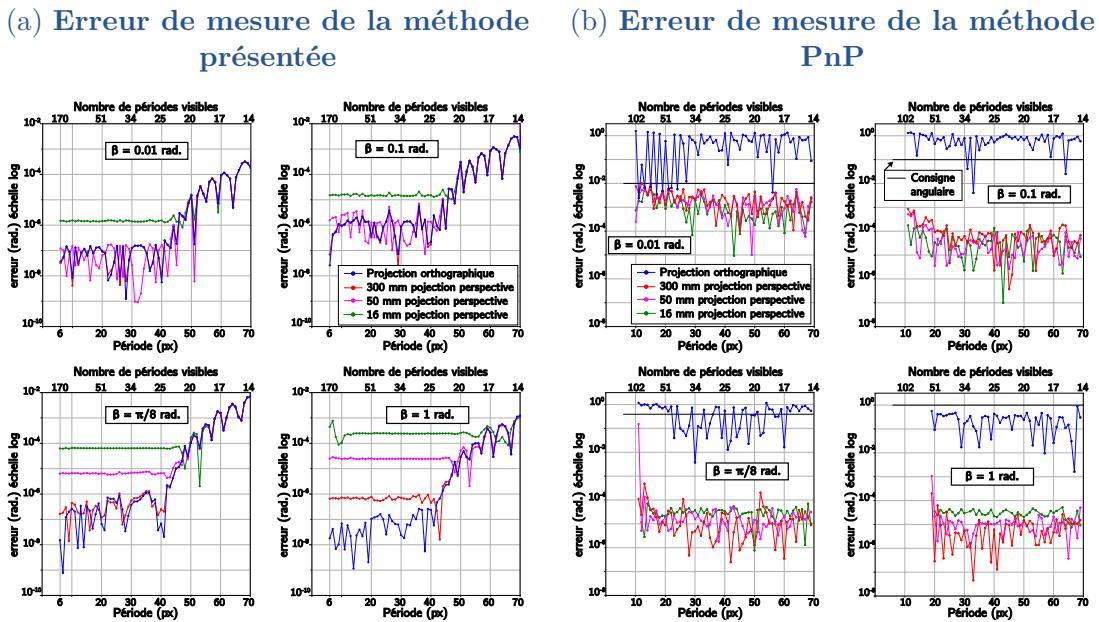


FIGURE 3.9 – Erreur de mesure angulaire en fonction de la période de la mire périodique (en pixels) pour un jeu de quatre longueurs focales et de quatre angles hors-plan considérés. (a) méthode présentée et (b) méthode PnP de la bibliothèque OpenCV.

basée sur la résolution du problème Perspective-n-Points (PnP).

Afin d'utiliser les mêmes images de mires générées et éviter l'introduction de biais résultant de différentes méthodes de génération d'images, la méthode PnP choisie se base sur l'algorithme de détection de grilles circulaires disponible dans la bibliothèque logicielle OpenCV (à l'aide des commandes `findCircleGrid` et `solvePnp`). Cette simulation explore également l'impact de la période pixélique des mires périodiques. Les paramètres pour effectuer la génération des mires périodiques sont les suivants :

- Période pixélique $s\lambda \in [6, 70]\text{px}$
- 4 différentes longueurs focales utilisées : orthographique, 300, 50 et 16 mm
- 4 différents angles hors-plan envoyés en consigne : $0.01, 0.1, \pi/8$ et 1 rad.

Les images de mires périodiques générées selon ces paramètres sont mises librement à disposition sur internet¹.

La figure 3.9 présente les résultats de cette simulation sous forme de huit graphes répartis en deux catégories, une pour la méthode présentée ici et une autre pour les résultats de la méthode PnP d'OpenCV.

Les résultats présentés dans la figure 3.9.(a) confirment que la résolution atteinte par la méthode dépend du nombre de périodes visibles dans l'image. Ainsi, avec

1. <https://sourcesup.renater.fr/www/vernierlibrary/data/>

toutes les configurations angulaires présentées sur chacune des sous-figures, cette figure montre qu'en-deçà de 25 périodes visibles (ou au-delà d'une période pixélique de 40 px), une baisse significative de la résolution est observée. Cependant, lorsque le nombre de périodes visibles est supérieur à 25, une résolution dans la gamme de celle montrée à l'aide des précédentes simulations est observée (de l'ordre de 1 µrad.). Cette résolution dépend également de la longueur focale utilisée, et, comme le montrent les sous-figures de la [figure 3.9.\(a\)](#), la résolution de la mesure décroît avec la réduction de la longueur focale utilisée. Cet impact de la longueur focale sur la résolution est également visible à mesure que l'angle hors-plan considéré augmente. En comparaison, comme le montre la [figure 3.9.\(b\)](#), la méthode classique PnP d'OpenCv n'est pas impacté par cette réduction des longueurs focales ni par l'augmentation de l'inclinaison hors-plan de la mire. Ainsi, les résolutions proposées par la méthode PnP restent toujours dans une bande d'erreur de l'ordre de 10^{-4} rad., excepté dans le cadre d'une projection orthographique. En effet, comme cette méthode emploie toutes les informations du modèle de projection perspective pour estimer la pose de la mire, il est normal d'observer une très faible résolution avec une projection orthographique. D'autres méthodes d'estimations de pose pourraient être employées pour mener cette comparaison, telles que les méthodes OnP (Orthographique-n-Points). Cependant, le but premier de cette simulation est d'étudier l'évolution de la résolution de la méthode dans le cadre d'une projection perspective.

Cette comparaison montre également une meilleure sensibilité de la méthode de mesure de pose basée sur la phase. Comme le montre la première sous-[figure 3.9.\(a\)](#), une résolution de 10^{-7} rad. est atteinte avec des angles hors-plan de 0.01 rad. En comparaison, la méthode PnP montre une résolution de l'ordre de 10^{-3} rad. pour ce cas de figure. Cette meilleure sensibilité s'explique notamment du fait que la méthode présentée utilise toute l'information contenue dans l'image et non pas seulement les centres des points, comme le fait la méthode PnP.

3.4 CONCLUSION

Après avoir montré la méthode de mesure de pose 2D dans le [chapitre 2](#), ce chapitre s'est intéressé à l'étude de l'extension de la méthode de mesure en 3D. Pour effectuer celle-ci, les outils présentés dans le chapitre précédent faisant usage des équations des plans de phase obtenus après filtrage du spectre ont été utilisés. Ainsi, en étudiant les équations des plans de phase qui rendent compte des six informations contenues sur les deux pics fréquentiels, nous avons montré comment effectuer une mesure de pose 3D.

La première partie de ce chapitre a montré comment employer une projection orthographique, représentative de l'étude à l'échelle microscopique, pour aboutir à une mesure de pose 3D comprenant les deux translations x , y ainsi que les trois orientations de la mire α , β et γ . L'emploi de cette projection offre également un moyen de mesure du facteur d'échelle s . Cependant cette mesure est limitée par

la présence de quatre solutions pour les angles hors-plan qui rendent compte des symétries présentes dans le cas d'une projection orthographique. Par ailleurs, cette projection ne permet pas de lier le facteur d'échelle s avec la profondeur de la mire périodique acquise.

La seconde partie de ce chapitre a montré comment aboutir à une pose complète en utilisant une projection perspective et en exploitant le lien entre ce facteur d'échelle et la profondeur selon l'axe z . Au-delà de cette mesure de pose complète, l'étude de mires périodiques en utilisant une projection perspective a également montré comment lever l'ambiguité sur le signe des angles hors-plan.

Finalement, des simulations ont été mises en place pour étudier la plage de mesure accessible pour les angles hors-plan. Ainsi une plage de mesure de $[0, \frac{3\pi}{8}]$ garantissant une erreur inférieure à 1 µrad. a été démontrée en utilisant une projection orthographique. Cette étude de plage a été complétée par une validation de la mesure en sollicitant des mires simulées selon les six degrés de liberté. Celle-ci a ainsi montré que la méthode conservait une mesure grandement sous-pixellique même lorsque les mires périodiques présentent des orientations hors-plan. Finalement, la méthode a été comparée avec une méthode d'estimation de pose PnP classique, et a montré que la méthode de mesure de pose par analyse spectrale était largement plus résolue que la méthode PnP, notamment dans le cadre d'une projection orthographique.

Cette approche originale de la mesure de pose 3D en exploitant l'information de phase des mires périodiques a fait l'objet d'une soumission récente dans la revue *International Journal of Computer Vision*. Cet article fait ainsi état du fort potentiel des mires périodiques dans le domaine de la microrobotique en présentant la méthode de mesure de pose 3D exposée dans ce chapitre.

À travers ces deux derniers chapitres, nous avons donc montré comment exploiter l'information de phase à l'aide du spectre des images acquises pour effectuer une mesure grandement sous-pixellique. Bien que cette méthode offre une mesure de pose 3D, le pavage périodique de la mire limite la plage de mesure en translation à seulement une période et en orientation planaire α à seulement $\pi/2$. Cette plage de mesure fortement limitée contraint son emploi dans le domaine de la microrobotique où une grande plage de mesure est attendue.

Dans le chapitre suivant, nous verrons donc comment étendre cette plage de mesure tout en conservant une résolution de mesure grandement sous-pixellique démontrée dans ces deux chapitres.

Chapitre 4

Extension robuste de la plage de mesure

4.1	Encodage univoque de la position	62
4.1.1	Choix de la séquence binaire	62
4.1.2	Méthode de codage de la séquence binaire	65
4.1.3	Pavage de la séquence codée sur la mire périodique	67
4.2	Décodage robuste de la position de la mire périodique encodée	69
4.2.1	Segmentation de l'image à partir de la phase	69
4.2.2	Transformation de l'image en imagettes de phase	72
4.2.3	Synchronisation de l'imagette de phase avec la séquence codée	74
4.2.4	Identification des séquences codées	76
4.3	Étude de la robustesse par simulation	78
4.3.1	Robustesse à différents types de bruits	78
4.3.2	Robustesse à l'occultation	80
4.4	Conclusion	82

Dans ce chapitre nous nous intéressons à l'extension de la plage de mesure, limitée alors à une seule période en translation et à un quadrant de $\pi/2$ en orientation. Les chapitres précédents montraient comment exploiter l'information spectrale des mires périodiques pour aboutir à une mesure de pose grandement résolue. Ainsi la méthode d'extension de la plage présentée ici emploie les mêmes outils que ceux présentés dans les deux chapitres précédents, à savoir l'exploitation de la phase pour effectuer l'extension de la plage de mesure.

Pour effectuer cet agrandissement de la plage de mesure, nous choisissons d'intégrer une séquence binaire au sein de la mire, offrant ainsi un moyen d'accéder au numéro des périodes, résultant en un repérage absolu de la mire. Pour cela nous allons intégrer à la mire une séquence binaire qui décrira de manière absolue le numéro (et par extension la position) de chaque période observée. De plus nous allons également insérer un détrompeur d'angle qui lèvera l'ambiguïté d'orientation.

Ce comptage de périodes et de quadrant reprend l'équation (2.26) :

$$\begin{cases} x &= \frac{\phi_1}{2\pi}\lambda + k_x\lambda \\ y &= \frac{\phi_2}{2\pi}\lambda + k_y\lambda \\ \alpha &= \text{atan2}(b_1, a_1) + q\frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (4.1)$$

où k_x et k_y dénotent le nombre entier de périodes où la mire est observée respectivement selon les directions x et y de la mire et q dénote le numéro du quadrant, compris entre 0 et 3 représentant l'orientation absolue de la mire.

Ainsi ce chapitre s'intéresse à la méthode d'insertion du codage absolu des périodes et de l'orientation de la mire tout en respectant la méthode de mesure de pose haute résolution décrite plus haut. Nous étudierons également comment rendre cette méthode d'encodage et de décodage robuste aux perturbations de l'image en nous basant sur la phase de la mire observée.

4.1 ENCODAGE UNIVOQUE DE LA POSITION

4.1.1 Choix de la séquence binaire

Pour numérotter les périodes de la mire, nous allons utiliser un encodage par séquence binaire qui, à partir d'un nombre de bits n choisi, permet de générer 2^n mots uniques. Afin de mieux comprendre les choix effectués en matière de codage absolu de la mire, nous allons dans un premier temps en établir le cahier des charges.

Comme souligné dans les chapitres précédents, la résolution de la méthode de mesure provient de l'analyse fréquentielle de la phase de la mire qui utilise la forte redondance d'information de la mire. Ainsi la méthode d'encodage binaire devra fournir une séquence avec une trame suffisamment dense pour conserver une intensité du pic spectral aussi fort que possible. Par ailleurs, la mesure de pose est

effectuée en considérant un champ de vision réduit à une partie de la mire. De fait la séquence codée choisie doit rendre compte de cette contrainte et assurer une localisation à partir d'une vue locale minimale.

Le troisième point de ce cahier des charges concerne le détrompage angulaire. Comme la séquence est couplée selon les deux directions x et y de la mire périodique, un détrompeur pour lever l'ambiguïté modulo $\pi/2$ est inséré en comptant le numéro du quadrant observé (qui sera ensuite injecté dans l'équation (4.1) décrite plus haut).

Comme il n'est pas toujours possible de maîtriser la qualité des images acquises en vision par ordinateur telles que le contraste, la focalisation de l'objet observé ou encore l'illumination de la scène, la méthode d'encodage choisie devra être robuste à ce genre de perturbations. Pour cela un dernier point à ce cahier des charges est ajouté pour que la mesure de pose absolue reste possible même en conditions d'imagerie dégradées.

Les différents points de ce cahier des charges sont résumés comme suit :

- La densité de la séquence codée est suffisante pour assurer une bonne résolution de la mesure
- Le repérage absolu dans la mire nécessitera un nombre minimal de bits à observer
- La séquence codée, une fois couplée selon les directions x et y assurera un repérage angulaire absolu
- Les méthodes d'encodage et de décodage de la mire seront robustes aux différentes perturbations possibles de l'image

Une fois ce cahier des charges établi, intéressons-nous au type d'encodage binaire choisi pour pavier la mire périodique. Ainsi la première étape d'encodage absolu du numéro des périodes de la mire consiste à générer la séquence binaire représentant ces mêmes numéros. Une méthode intuitive d'encodage de la séquence consiste à aligner les mots binaires selon leur représentation décimale. La figure 4.1 illustre cette possibilité d'encodage en présentant une séquence codée générée à partir de $n = 3$ bits, montrant l'organisation selon une représentation décimale croissante avec leur représentation binaire associée. Cependant, et comme le souligne la sous-figure 4.1.(e), chaque mot de 3 bits de long se retrouve visible à plusieurs endroits de la séquence générée. Cette méthode d'encodage va donc à l'encontre du cahier des charges stipulant plus haut une nécessité de repérer la position observée à partir d'une faible portion de la séquence totale.

Pour pallier ce problème, un encodage généré à l'aide de registres à décalage à rétroaction linéaire est utilisé. Cette méthode assure une génération de la séquence telle que chaque mot de n bits partage $n - 1$ bits avec le mot suivant comme illustré dans la figure 4.2.(b). Cette méthode de génération assure ainsi également que chaque mot n'est présent qu'une seule fois dans toute la séquence générée, résolvant le problème soulevé plus haut avec une génération plus intuitive. Le

a)	1	2	3	4	5	6	7	8
b)	1	2	3	4	5	6	7	8
c)	0	0	0	0	1	0	1	1
d)	0	0	0	0	1	0	1	1

FIGURE 4.1 – Génération d’une séquence binaire sur 3 bits par alignement successif de chaque mot. a) numéro du mot considéré suivant une évolution décimale b) numéro de chaque bit codant de la séquence, c) séquence binaire générée, d) présente en surbrillance l’exemple d’un mot de 3 bits se retrouvant à plusieurs endroits dans la séquence

positionnement dans la séquence emploie ensuite la connaissance du numéro de chaque mot binaire (organisé pour respecter l’imbrication de chaque mot) pour en déduire une position linéaire comme présenté dans les sous-figure 4.2.(c) et (d).

(a ₁)	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1
(a ₂)	-	-	-	1111	1110	1101	1010	0101	1011	0110	1100	1001	0010	0100	1000	0001
(a ₃)	-	-	-	15	14	13	10	5	11	6	12	9	2	4	8	1
(a ₄)	-	-	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

FIGURE 4.2 – Génération de séquence binaire par méthode de décalage de registre avec $n = 4$ bits. (a) séquence binaire résultante, (b) mots binaires de 4 bits imbriqués dans la séquence, (c) numéro décimal correspondant à chaque mot binaire et (d) position linéaire correspondante

De fait cette méthode d’encodage respecte le cahier des charges établi plus haut en assurant un repérage absolu via un nombre minimal de bits à décoder. En connaissant le sens de lecture *a priori* de la séquence codée, seuls n bits (à savoir un mot) sont nécessaires pour décoder la position absolue dans la globalité de la séquence. Cependant, ce sens de lecture n’est pas toujours connu *a priori*, la mire pouvant être retournée pendant son observation. La lecture absolue de la position dans la séquence ne nécessite alors plus un seul mot, mais un mot et un bit pour lever cette ambiguïté de direction. Cependant cette contrainte d’effectuer le repérage dans la séquence à l’aide d’un mot et un bit n’est pas vraiment problématique, au regard du contraste entre le nombre de bits à observer pour effectuer ce repérage et la taille totale de la séquence. En effet, à mesure que le nombre de bits augmente linéairement, la taille de la séquence évolue exponentiellement, celle-ci faisant $2^n + n - 2$ bits de long. Ainsi, en considérant une séquence générée à partir de $n = 12$ bits, résultant en une séquence de taille $2^n + n - 2 = 4106$ bits, une observation de seulement 0.3% est nécessaire pour effectuer un repérage absolu dans cette séquence.

4.1.2 Méthode de codage de la séquence binaire

Après l'étude de la méthode de génération de la séquence codée assurant un positionnement absolu, intéressons-nous à l'intégration de cette séquence dans la mire périodique en veillant à respecter le cahier des charges établi en début de chapitre.

Pour intégrer cette séquence sans dégrader l'information de phase (avec l'ajout de marqueurs par exemple), nous considérons que chaque point de la mire représente un bit allumé '1' et chaque point absent de la mire un '0' binaire. Cette méthode a déjà été étudiée dans plusieurs recherches de positionnement par mire périodiques telles que celles de Galeano *et al.* ou encore de Kim *et al.* par exemple [Galeano-Zea10 ; Kim12]. Cependant intégrer une séquence codée sur une mire périodique en utilisant cette méthode soulève un compromis entre préservation de la phase et repérage absolu. En effet pour assurer la meilleure résolution possible, un pavage complet de la mire observée à l'aide de points toujours présents est souhaitable, car impliquant une meilleure densité spectrale de l'information périodique de la mire. Cette volonté de préserver la phase en conservant une intensité du pic fréquentiel aussi fort que possible va donc à l'encontre même du principe d'insérer une séquence en enlevant certains points de la mire périodique. Pour répondre à cette question d'intégration d'une séquence au sein d'une mire périodique en altérant le moins possible la densité de la fréquence porteuse plusieurs méthodes ont été étudiées.

La figure 4.3 présente ainsi différentes solutions existantes pour intégrer une séquence codée sur une structure binaire. Ainsi une forte présence de '0' dans la séquence intégrée implique une plus grande disparité de la périodicité de la mire résultante (donnant une intensité spectral du pic plus faible). *A contrario*, une forte présence de '1' dans ces séquences souligne une meilleure préservation de la périodicité, et donc de l'information spectrale de la mire. Une solution apportée par le codage de Manchester et utilisée par Stevenson *et al.* [Stevenson88] consiste à subdiviser chaque bit en deux pour que chaque valeur binaire ait toujours une partie à '0' et une autre à '1'. Cette solution présentée dans la figure 4.3.c) assure une plus grande présence de l'information périodique et a été adaptée pour la mesure par mire périodique par Kim *et al.* [Kim13] qui ont démontré une résolution de 15 nm utilisant cette méthode de pavage de séquence binaire.

Cependant le codage de Manchester et son adaptation en subdivisant chaque valeur binaire en 3 (tel que présenté par [Kim13]) ajoute la présence de non-linéarités causées par la différentiation des bits '0' et '1'.

Pour assurer la présence d'un maximum d'informations périodique tout en minimisant le nombre de bits nécessaires à la lecture du code, la méthode proposée consiste à subdiviser chaque valeur binaire en trois, comme illustré dans la figure 4.3.d). Contrairement au codage de Manchester où l'emplacement des bits allumés au sein des subdivisions change en fonction des valeurs binaires, cette méthode implique de conserver deux des trois subdivisions toujours allumées.

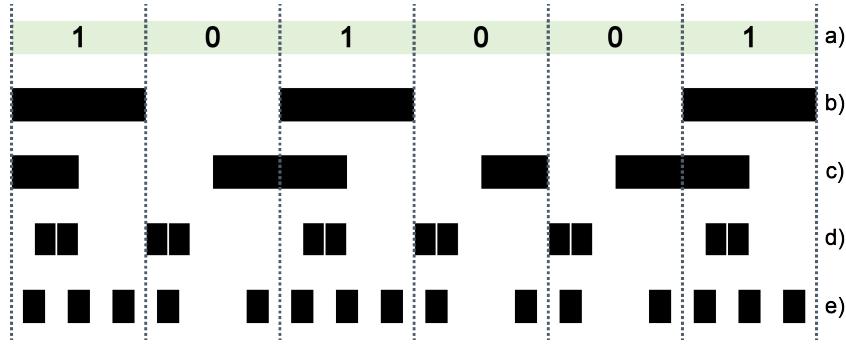


FIGURE 4.3 – Différentes méthodes d’insertion de séquence codée avec a) un échantillon d’une séquence binaire, b) codage simple, c) code de Manchester, d) solution proposée par [Kim13] et e) solution proposée pour conserver la linéarité de la phase

Ainsi seule la subdivision centrale est variable ('0' ou '1') selon la valeur du bit considéré de la séquence codée. Cette méthode assure ainsi une préservation maximale de densité de la fréquence porteuse puisque seul un tiers (au maximum) du codage de la séquence est impacté par les valeurs binaires. Ainsi le premier point du cahier des charges fixé est respecté en utilisant cette méthode d’insertion de la séquence codée dans la mire périodique.

La longueur de la séquence après avoir entouré chaque bit codant de '1' présente alors une longueur de $3 \cdot (2^n + n - 2)$ bits. Grâce au choix de la période physique de la mire ainsi que du nombre de bits utilisés lors de la génération de la séquence par registre à décalage, il est alors possible d’adapter la taille résultante de la mire en fonction des applications choisies. Comme le montre le tableau 4.1, en choisissant des jeux de valeurs différents pour le couple nombre de bits de la séquence n et taille physique des périodes λ plusieurs conceptions de mires périodiques encodées sont réalisables, offrant ainsi une gamme de plage allant du micromètre au centimètre.

Nombre de bits n pour la génération de séquence	Longueur de la séquence	Taille de la mire générée		
		$\lambda = 3\mu\text{m}$	$\lambda = 9\mu\text{m}$	$\lambda = 25\mu\text{m}$
3 bits	24	72 μm	216 μm	600 μm
6 bits	192	1.15 mm	1.7 mm	4.8 mm
8 bits	768	2.3 mm	6.9 mm	19.2 mm
10 bits	3072	0.92 cm	2.76 cm	7.68 cm
12 bits	12288	3.68 cm	11.06 cm	30.72 cm

TABLE 4.1 – Tableau de conception de mire codée en fonction du nombre de bits n choisi pour la génération de la séquence codée et de la période physique λ de la mire.

Cette gamme de choix offre une grande adaptabilité de la méthode de positionnement par mire que nous pouvons utiliser tant pour des applications avec une limitation de l'espace disponible que pour des applications nécessitant une grande plage tout en conservant la résolution de la mesure. Une fois la méthode d'intégration de la séquence binaire déterminée selon une direction de la mire périodique, un couplage de celle-ci selon chacune des directions de la mire périodique est effectué, pour pavier complètement celle-ci selon les directions x et y .

4.1.3 Pavage de la séquence codée sur la mire périodique

La figure 4.4 présente la méthode d'insertion et de pavage de la mire avec la séquence codée en prenant pour base une séquence générée par registre à décalage linéaire sur 4 bits. La séquence binaire présentée dans la figure 4.2.(a) se retrouve ainsi dupliquée selon chacune des directions (figure 4.4.(b₁), (b₂)) où chaque bit est entouré de deux bits toujours présents.

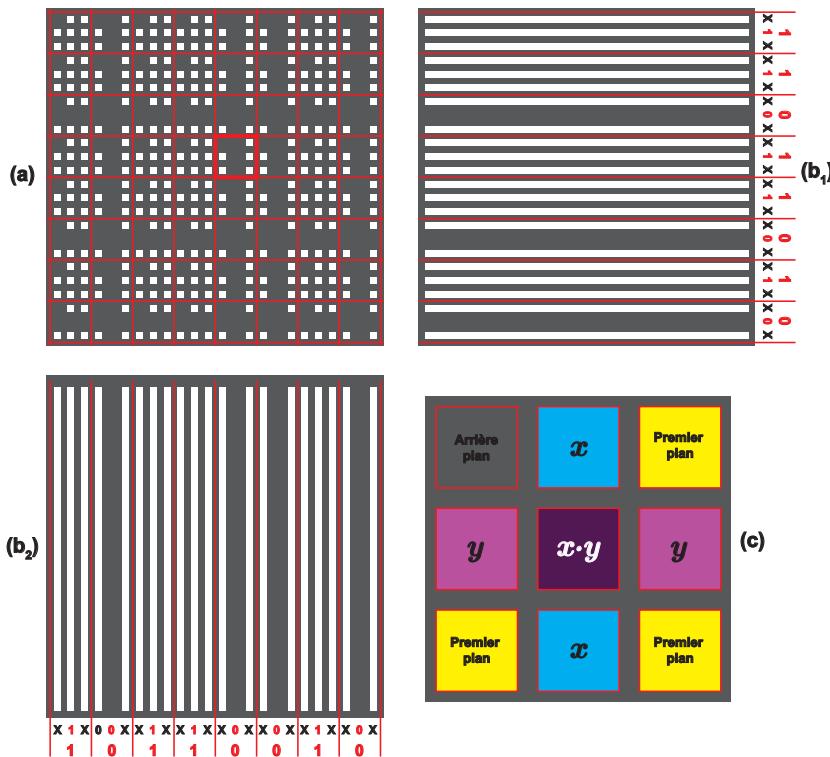


FIGURE 4.4 – Principe d'encodage bidirectionnel absolu de la mire présentée en (a). (b₁) encodage linéaire de la mire selon la direction x et (b₂) selon la direction y . (c) cellule codante 3×3 issue du multiplexage des deux séquences x et y montrant les points toujours présents (jaune), le point toujours absent (fond) effectuant le détrompage angulaire et les valeurs binaires x et y respectivement en bleu et magenta ainsi que leur multiplexage logique ET au centre de la cellule en magenta foncé.

Le couplage de ces deux séquences binaires, identiques selon chacune des deux directions est effectué en appliquant un produit logique *ET* entre chaque bit des deux séquences. En résulte une mire où la séquence codée reste visible selon chacune des directions tel que montré dans la figure 4.4.(c₁). Dans la suite du manuscrit, ces mires périodiques seront appelées indifféremment **mire périodique encodée** ou **mire Megarena**¹

Cette figure 4.4 montre également que les groupes de trois périodes présentes sur les séquences des deux directions deviennent des carrés de 3×3 périodes qui respectent toutes la même organisation présentée dans la figure 4.4.(c).

Nous nommons ces sous-matrices 3×3 issues du multiplexage des deux séquences **cellules codantes**. Parmi les neuf points de chacune des cellules codantes, le multiplexage logique des deux points extérieurs de chaque direction donne quatre points extérieurs qui sont indépendants du codage (et donc par défaut toujours présents). Un de ces quatre points est utilisé pour y insérer un détrompeur d'angle en l'effaçant. Ainsi chaque cellule codante porte avec elle un repère de rotation absolu comme montré dans la figure 4.4.(c).

De fait, le troisième point du cahier des charges portant sur le repérage absolu de l'orientation de la mire est respecté, car l'absence du point dans la matrice codante 3×3 nous renseigne sur l'orientation de la mire en nous donnant son quadrant *q* tel que défini dans l'équation (4.1).

Le reste de la cellule codante contient les informations binaires de la séquence codée selon chacune des directions *x* et *y*. Ainsi deux des neufs points de la cellule codante représentent la valeur binaire selon la direction *x* et il en va de même pour la direction *y*. Le point central est quant à lui fonction des valeurs binaires des directions *x ET y*.

La robustesse aux altérations de l'image spécifiée dans le dernier point du cahier des charges provient de la redondance des informations binaires présentes dans la mire. En effet, cette méthode de multiplexage et de représentation par cellule codante implique que chaque cellule porte avec elle deux points qui représentent la valeur binaire selon une direction (et deux points pour l'autre direction).

De plus, comme cette information binaire d'une direction se propage sur l'intégralité de l'autre direction, si une partie de la mire est occultée, l'information codante se retrouve toujours sur une autre ligne, augmentant ainsi la robustesse.

Cette condition de décodage des valeurs binaires se basant sur les cellules codantes implique que la séquence soit déchiffrable tant qu'au moins une cellule codante représentant chaque valeur binaire de la séquence est visible. Cette condition offre ainsi une grande robustesse à la méthode qui utilise cette redondance comme moyen de confirmation des valeurs binaires en réduisant l'impact des cellules codantes altérées sur l'ensemble du code.

1. Megarena provenant du grec *mega* et *arena*, dont la contraction donne une grande place d'intérêt.

4.2 DÉCODAGE ROBUSTE DE LA POSITION DE LA MIRE PÉRIODIQUE ENCODÉE

Après avoir étudié comment insérer une séquence codée dans une mire périodique 2D et avoir montré comment étendre la plage de mesure grâce à la numérotation des périodes, la suite de ce chapitre s'intéresse au décodage de ces informations de positionnement absolu contenues dans la mire.

Pour décoder le numéro de la période observée et par extension la position absolue de la mire, une séquence codée observée d'au moins $n + 1$ bits de long est extraite comme expliqué dans la [section 4.1.1](#) et assure le repérage absolu dans la totalité de la séquence.

Une fois cette séquence obtenue pour chacune des directions un produit de convolution est réalisé entre cet échantillon de la séquence et la séquence complète pour retrouver sa position dans le code en donnant accès aux numéros de période k_1 et k_2 selon chacune des directions.

Enfin ces numéros de période et quadrant sont injectés dans l'[équation \(4.1\)](#), donnant ainsi accès à un positionnement à la fois absolu et haute résolution de la mire.

4.2.1 Segmentation de l'image à partir de la phase

Pour effectuer le décodage de la séquence binaire intégrée directement sur les périodes de la mire, les outils présentés dans les chapitres précédents montrant comment exploiter l'information de phase des mires périodiques sont mis à profit. En effet cette méthode a montré une grande résolution sur l'obtention des plans de phase $\Phi_1(i, j)$ et $\Phi_2(i, j)$ grâce à la régression linéaire effectuée sur les plans de phase déroulés de la transformée de Fourier inverse filtrée sur chacun des pics fréquentiels f_1 et f_2 (voir [chapitre 2](#)).

Comme illustré avec la bande rouge présente sur la [figure 4.5.\(a\),\(c₁\) et \(d₁\)](#), ces équations des plans de phase renseignent également directement sur la position des lignes périodiques de la mire.

Cette information correspond aux pixels de l'image qui possèdent tous la même constante de phase selon une direction, tel qu'illustré avec la phase enroulée présentant les constantes de phase de l'angle de la transformée de Fourier inverse ([figure 4.5.\(c₁\)](#)). Ainsi tous ces pixels respectent l'information de phase suivante : $2k_1\pi - \pi < \Phi(i, j) \leq 2k_1\pi + \pi$. Dans l'exemple présenté dans cette figure, tous les pixels de la bande rouge ont une constante de phase $k_1 = 22$.

Comme montré dans cette même figure, cette information de constance de la phase modulo 2π se retrouve dans la phase déroulée ([figure 4.5.\(d₁\)](#)), et par extension il est possible de l'exploiter en utilisant les équations des plans de phase $\Phi_1(i, j)$ et $\Phi_2(i, j)$.

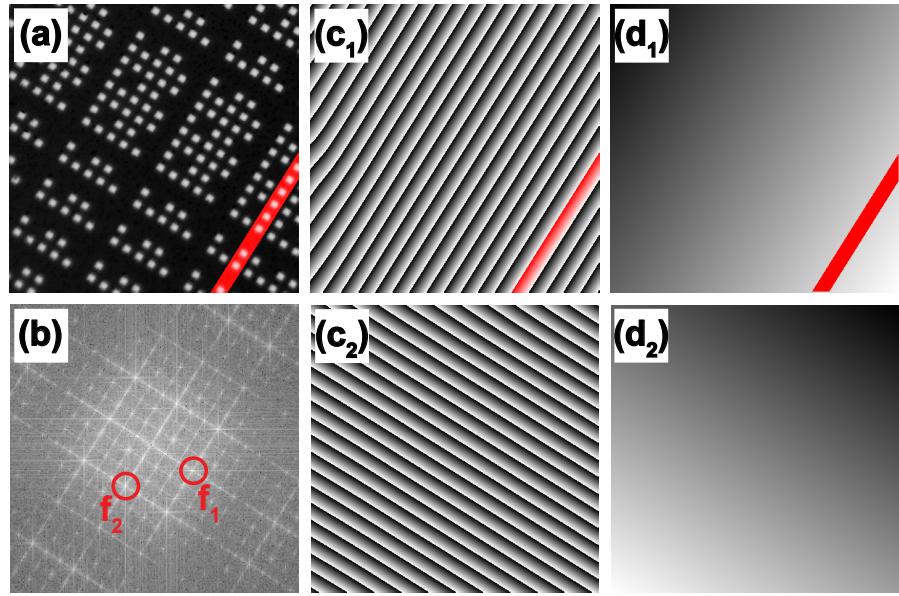


FIGURE 4.5 – Processus de traitement de la phase d'une mire pseudo-périodique.
 (a) image de la mire encodée, (b) transformée de Fourier discrète avec les pics fréquentiels f_1 et f_2 , c_1, c_2 phase enroulée selon chaque direction résultant de la transformée de Fourier inverse appliquée en f_1 et f_2 et (d₁), (d₂) phase déroulée selon chacune des directions.

Cette méthode de traitement des constantes de phase assure également une certaine robustesse au regard des perturbations de l'image de phase qui peuvent apparaître, notamment aux bords de celle-ci comme présenté sur la figure 4.5.(c₁). La régression linéaire offre ici un filtrage de ces effets de bords en plus de laisser la possibilité de traiter l'information de phase de manière continue en ayant recours aux équations de celles-ci. C'est grâce à cette information que l'extraction des informations codantes de l'image est effectuée. En couplant l'information de phase donnant la position des points de la mire avec l'image de départ de la mire, un lien direct entre point présent ou absent est alors réalisable.

De ces plans de phase, deux sous-images $K_1(i, j) = \lfloor (\Phi_1(i, j) + \pi)/2\pi \rfloor$ et $K_2(i, j) = \lfloor (\Phi_2(i, j) + \pi)/2\pi \rfloor$, utilisant la valeur entière de la phase de chaque pixel et correspondant aux numéros des constantes de phase selon chacune des directions de la mire sont créées. Dans ces sous-images, chaque ligne de K_1 correspond ainsi à une constante de phase k_1 et chaque colonne de K_2 correspond à une constante de phase k_2 . Comme expliqué plus haut, l'information de phase est alors utilisée pour déterminer la position des points de la mire et plus spécifiquement de leurs centre et entourage.

De cette information de phase, il devient possible d'extraire la position des centres de tous les points de la mire ainsi que la position des pourtours de chaque point. En effet, chaque centre de point de la mire respecte la condition d'avoir une phase absolue selon chacune des directions plus petite que $\pi/3$ (figure 4.6.(b))

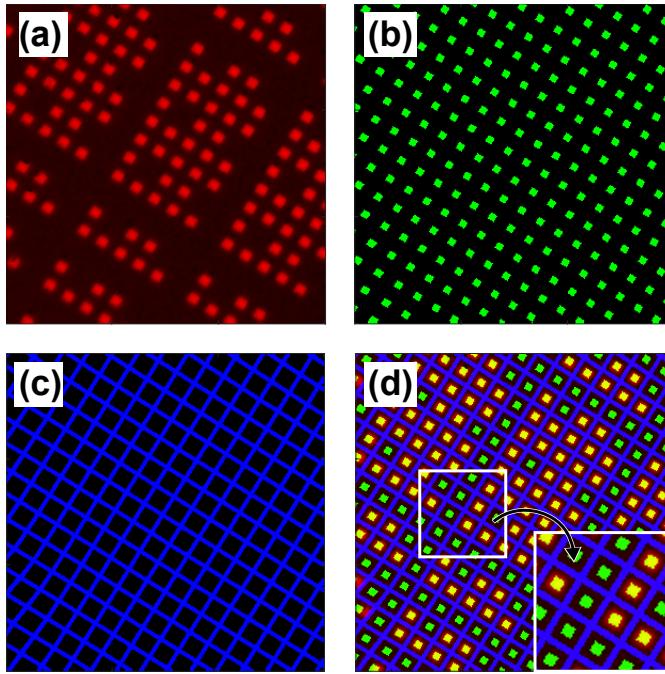


FIGURE 4.6 – Extraction des positions des points de la mire grâce à l’information de phase. (a) image acquise de la mire en rouge, (b) zones où chaque direction de la phase est proche de zéro (centre des points), (c) zones où une des deux directions des phases est proche de $\pm\pi$ (pourtour des points) et (d) Assemblage RVB des trois précédentes sous-figures (a,b et c)

alors que chaque zone périphérique des points présente une phase en valeur absolue selon chaque direction plus grande que $3\pi/4$ ([figure 4.6.\(c\)](#)).

La condition booléenne menant à la création de l’image de la position des centres des points comme présentée [figure 4.6.\(b\)](#) est exprimée ainsi :

$$B_p(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{si } |\phi_1(i, j)| < \frac{\pi}{3} \text{ et } |\phi_2(i, j)| < \frac{\pi}{3} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.2)$$

L’imagette de phase booléenne résultante, nommée $B_p(i, j)$ représente ainsi tous les centres des points de la mire. Une opération similaire est effectuée pour extraire la position des zones périphériques de chaque point de la mire (tel que présenté dans la [figure 4.6.\(c\)](#)) en créant une image booléenne $B_a(i, j)$. Cette image est obtenue en effectuant une opération similaire à l’obtention de $B_p(i, j)$ mais cette fois-ci en considérant les parties périphériques de l’information de phase :

$$B_a(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{si } |\phi_1(i, j)| \geq \frac{3\pi}{4} \text{ ou } |\phi_2(i, j)| \geq \frac{3\pi}{4} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.3)$$

Cette image complémentaire $B_a(i, j)$ montre la position de la périphérie des points de la mire, et par extension son arrière-plan. Grâce à ces deux images indiquant la position du centre et du pourtour des points de la mire, il devient

possible d'étudier avec précision si un point est présent ou absent. La dernière image de la [figure 4.6.\(c\)](#) résultant de la superposition des trois images précédentes montre ainsi en jaune les points présents alors que les points absents restent eux en vert.

Grâce à cette localisation qui traite chaque point (centre et pourtour) de manière indépendante (selon chaque constante de phase k_1 et k_2), un seuillage adaptatif de l'intensité prélevée sur l'image de la mire entre le centre et l'extérieur de chaque point est alors réalisable pour en déterminer sa présence ou non.

Une fois la connaissance établie de la position des points et de la possibilité d'étudier leur intensité sur l'image, la suite de ce chapitre s'intéresse à la binarisation de l'image de mire périodique pour déterminer la séquence codée intégrée à celle-ci.

4.2.2 Transformation de l'image en imagettes de phase

Cette section vise à regrouper tous les pixels de l'image de la mire périodique selon leurs propriétés de phase respectives à savoir les pixels présents au centre de chaque point et ceux à la périphérie de chaque point sous forme d'imagettes de phase.

Le processus de création de ces imagettes résumant l'information de chaque point de la mire est présenté dans la [figure 4.7.\(a\)](#) et (b) qui montre une image de mire encodée et son imagette correspondante. Cette nouvelle image créée est définie selon le numéro des colonnes k_1 et k_2 (et donc des constantes de phase) et qui apparaît comme redressée par rapport à l'orientation actuelle de la mire. En effet, comme les données sont à présent organisées selon le numéro des constantes de phases, l'image résultante est indépendante de l'angle α de la mire. Les flèches des [sous-figure 4.7.\(b\)](#) et (c) illustrent cette ordonnancement des constantes de phase par rapport à l'orientation de la mire.

Grâce à la numérotation de ces constantes de phase au travers des images K_1 et K_2 et de l'étude menée sur la position des intérieurs / extérieurs des points de la mire, quatre imagettes rassemblant ces différentes informations sont ainsi créées. Les images des numéros des constantes de phases K_1 et K_2 ainsi que les images des intérieurs et pourtours de points $B_p(i, j)$ et $B_a(i, j)$ sont ainsi combinées quatre imagettes. Celles-ci contiendront les informations suivantes : T_p et T_a rassembleront l'intensité totale de chaque point de la mire (respectivement sa zone intérieure et extérieure) et N_p et N_a rassembleront le nombre total de pixels compris respectivement au centre et sur le pourtour de chaque point.

Les équations suivantes décrivent l'obtention de ces quatre imagettes :

$$T_p(k_1, k_2) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (K_1(i, j) = k_1) \cdot (K_2(i, j) = k_2) \cdot (B_p(i, j)) \cdot I(i, j) \quad (4.4)$$

$$T_a(k_1, k_2) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (K_1(i, j) = k_1) \cdot (K_2(i, j) = k_2) \cdot (B_a(i, j)) \cdot I(i, j) \quad (4.5)$$

$$N_p(k_1, k_2) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (K_1(i, j) = k_1) \cdot (K_2(i, j) = k_2) \cdot (B_p(i, j)) \quad (4.6)$$

$$N_a(k_1, k_2) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (K_1(i, j) = k_1) \cdot (K_2(i, j) = k_2) \cdot (B_a(i, j)) \quad (4.7)$$

Ces quatre imagettes qui présentent l'accumulation totale de chaque point ainsi que le nombre de pixels total contenu dans chaque point de l'image de la mire encodée sont ensuite réduites à leur moyenne pour créer deux nouvelles imagettes \bar{T}_p et \bar{T}_a :

$$\bar{T}_p(k_1, k_2) = T_p(k_1, k_2) / N_p(k_1, k_2) \quad (4.8)$$

$$\bar{T}_a(k_1, k_2) = T_a(k_1, k_2) / N_a(k_1, k_2) \quad (4.9)$$

Ces nouvelles imagettes représentent l'intensité moyenne de chaque centre et de chaque pourtour des points de la mire. De ces dernières nous déduisons le ratio entre l'intensité moyenne des centres par rapport à l'intensité moyenne des pourtours de chaque point :

$$R(k_1, k_2) = \bar{T}_p(k_1, k_2) / \bar{T}_a(k_1, k_2) \quad (4.10)$$

Cette imagette de ratio est présentée dans la [figure 4.7.\(b\)](#) et montre comment cette imagette de ratio permet de représenter le codage de la mire. En effet, lorsque la valeur moyenne du centre des points est similaire à celle de sa zone extérieure, le ratio $r(k_1, k_2)$ est proche de 1. En revanche lorsque l'intensité moyenne du centre du point est plus élevée que celle de sa zone extérieure, ce ratio augmente, révélant ainsi la présence d'un point de la mire.

La [figure 4.7.\(b\)](#) présente également un aperçu de la robustesse attendue pour la méthode. Celle-ci montre en effet une forte disparité dans les valeurs de l'imagette (avec un ratio évoluant entre 6 et 12) qui ne perturbe pas la lecture de la présence ou absence de points de la mire.

Enfin, cette réduction d'image offre de meilleures capacités calculatoires, car les opérations ne sont plus effectuées sur des centaines de milliers de pixels (comme c'est le cas pour les images de mires acquises, de taille typique 1024 x 1024). En effet l'organisation des données pertinentes au décodage binaire de la mire sont désormais contenues dans des imagettes ordonnées par numéro de phase (menant à des imagettes de taille 40 x 40 éléments typiquement).

Une fois ces imagettes obtenues et préparées pour le décodage binaire de la mire, l'étape suivante de décodage de la mire consiste à extraire la séquence binaire observée sur l'image de la mire pour en déterminer la position absolue.

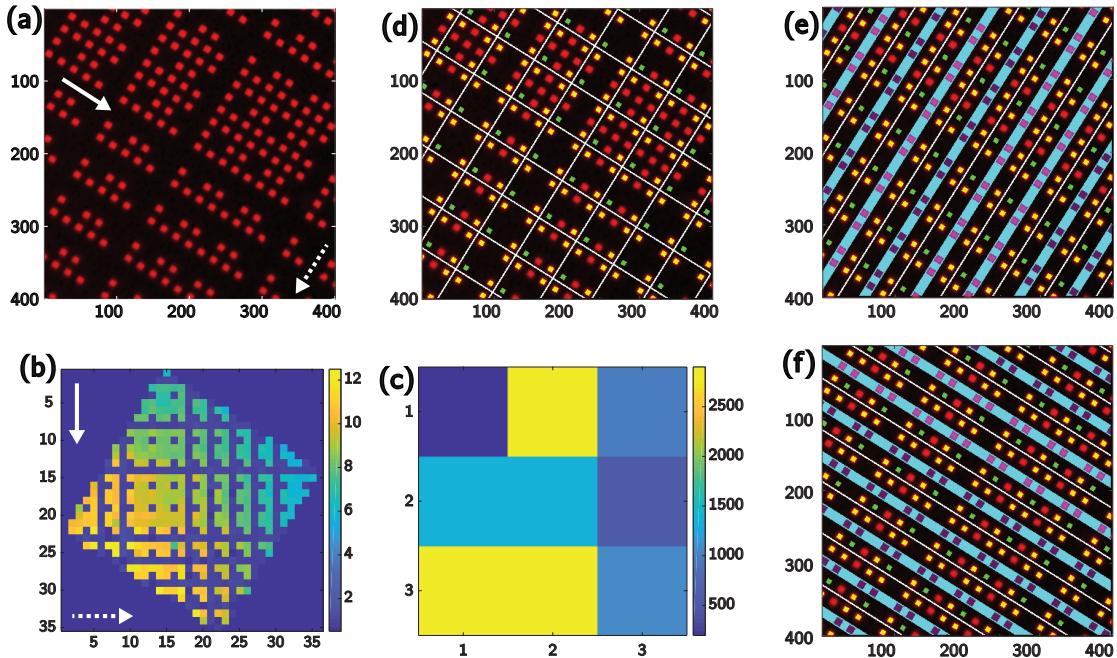


FIGURE 4.7 – Processus de création et de décodage de l'imagette de la mire. (a) image de la mire en pixels, (b) imagette de la mire avec le seuillage adaptatif effectué entre le centre de chaque point et sa zone extérieure. (c) cellule globale. (d) image de la mire avec en juxtaposition les cellules codantes. (e) et (f) décodage binaire selon chacune des directions de la mire. Seuls les points en magenta (clairs et foncés) sont utilisés pour effectuer le décodage des valeurs binaires.

4.2.3 Synchronisation de l'imagette de phase avec la séquence codée

Le début de ce chapitre présentait l'insertion de la séquence codée dans la mire périodique (section 4.1.3) en utilisant le multiplexage des séquences selon chacune des directions donnant lieu à la création de cellules codantes de taille 3×3 points. Ces cellules contiennent chacune toute l'information codante d'un bit vertical et d'un bit horizontal de la séquence ainsi que le détrompeur d'angle dans un des coins.

Cette partie vise à présent à étudier comment utiliser les imagettes créées précédemment pour retrouver les bits codants et remonter à la séquence codée. La première opération consiste à synchroniser la séquence codée avec l'imagette de phase en utilisant la position des cellules codantes dans ces imagettes de phase.

Pour cela une **cellule globale** contenant la somme de toutes les cellules 3×3 est créée pour synchroniser les imagettes de phase avec la séquence codée. Celle-ci est notée $\bar{G}(u, v)$ et est obtenue en agrégant modulo 3 les informations des imagettes d'intensité T_p et T_a des points de la mire :

$$G(u, v) = \sum_{k_1} \sum_{k_2} T_p(k_1, k_2) \cdot (k_1 \equiv u) \cdot (k_2 \equiv v) \quad (4.11)$$

$$N_G(u, v) = \sum_{k_1} \sum_{k_2} N_p(k_1, k_2) \cdot (k_1 \equiv u) \cdot (k_2 \equiv v) \quad (4.12)$$

$$\bar{G}(u, v) = G(u, v) / N_G(u, v) \quad (4.13)$$

avec u et v des entiers variant entre 1 et 3. Le résultat de cette agrégation de cellules 3×3 est illustré dans la [figure 4.7.\(c\)](#). Cette cellule 3×3 montre également le point présentant l'intensité minimale qui correspond au point manquant utilisé pour le détrompeur d'angle (illustré en violet foncé). De même les trois points présentant une intensité maximale (en jaune sur la figure) correspondent aux points toujours présents des cellules codantes. Les cinq points restants représentent les valeurs binaires de la séquence codée. Parmi ceux-ci deux groupes (en bleu clair et bleu foncé) correspondent respectivement à chacune des valeurs binaires x et y . Le dernier point (de coordonnée (2,3) sur la figure) montre l'opération logique entre les deux bits $x \cdot y$.

Grâce à cette classification des éléments de la cellule globale, il est possible de synchroniser les cellules codantes décrites dans la génération de la mire ([section 4.1.3](#)) avec les imagettes de constantes de phase.

Pour effectuer cette synchronisation, un produit de convolution est effectué entre la cellule globale obtenue et toutes les dispositions possibles que peuvent prendre les cellules codantes modulo 3. Pour chaque orientation la cellule codante peut en effet prendre neuf dispositions différentes (voir liste en [annexe A.4](#)). Nous écrivons donc les 36 dispositions possibles de ces cellules, correspondant aux neuf dispositions par orientation multipliée par le nombre d'orientations possibles (à savoir quatre).

Cette opération donne ainsi accès aux valeurs de k_1 et k_2 qui sont synchronisées avec la cellule codante telle que définie [section 4.1.3](#). La synchronisation de ces cellules avec la mire périodique est visible sur la [figure 4.7.\(d\)](#) où nous voyons les lignes blanches délimitant les cellules codantes, les points verts correspondant aux points toujours absents, les points jaunes ceux toujours présents et les points codants laissés en rouge.

La synchronisation de la cellule globale donne également accès à l'orientation de la mire via le quadrant de la mire q qui est directement utilisable dans l'[équation \(4.1\)](#). Grâce à la connaissance de ce quadrant, la détermination non ambiguë de l'angle de la mire est alors assurée.

Pour extraire les séquences codées selon chacune des directions, la position des points codants de chaque cellule codante est alors agrégée selon chaque ligne, tel qu'illustré dans la [figure 4.7.\(e\)](#) et [\(f\)](#). Sur ces sous-figures, les bandes codantes issues de l'analyse de la cellule globale et de sa synchronisation sur l'imagette de ratio $R(k_1, k_2)$ sont mises en surbrillance cyan et les points codants de chaque cellule sont présentés en magenta clair ou foncé selon leur intensité moyenne.

4.2.4 Identification des séquences codées

Les valeurs binaires représentatives de chacun des bits de la séquence codée sont extraites en utilisant pleinement les informations présentes dans chacune des cellules codantes. Par ailleurs le seuillage adaptatif défini plus haut et effectué sur chacun des points de la mire avec les imagettes a montré comment retrouver le ratio entre l'intensité de la zone centrale du point et de son pourtour.

Un choix possible pour retrouver les valeurs binaires est d'utiliser directement ce ratio et d'étudier s'il est proche de 1 (*i.e.* le point est absent) ou supérieur à 1 (*i.e.* point présent). Cependant cette méthode n'assure pas une grande robustesse aux changements de contraste ou de dynamique qui peuvent apparaître lors de l'acquisition de l'image.

Pour remédier à ce problème, un contraste local à partir de chaque point de la mire définit par l'intensité des points toujours présents et par l'intensité locale de l'arrière-plan. De ce fait deux niveaux de seuillage adaptatif local sont visibles. Le premier est celui que décrit plus haut qui s'intéresse individuellement à chacun des points tandis que le second utilise chaque cellule codante. Cette cellule codante utilise également le premier seuillage local pour effectuer la détermination des valeurs binaires selon chacune des deux directions.

Ce second seuillage local est visible sur la [figure 4.7.\(e\),\(f\)](#) où chaque bande codante est subdivisée en groupe de cellules codantes pour émettre le critère de détermination de la valeur binaire, noté c_r :

$$c_{r_i} = c_{intensité}(k_i)/c_{dynamique}(k_i) \quad (4.14)$$

où i dénote la direction considérée (0 ou 1). Les niveaux $c_{intensité}(k_i)$ et $c_{dynamique}(k_i)$ sont présentés dans la [figure 4.8.\(a₁\), \(a₂\)](#) et détaillés dans la sous-[figure 4.8.\(b₂\)](#). Ainsi $c_{intensité}(k_i)$ représente l'intensité moyenne des valeurs binaires des cellules associées à la ligne numéro k selon la direction i par rapport à l'intensité moyenne de l'arrière-plan. $c_{dynamique}(k_i)$ représente quant à lui la plage dynamique des cellules considérées en calculant l'étendue moyenne entre l'intensité des points toujours présents et celle de l'arrière-plan.

Ce critère c_r est calculé pour toutes les lignes (respectivement colonnes) de l'imagette et tend vers 1 lorsque la ligne codante a une valeur binaire de '1' et vers 0 lorsque la valeur binaire de la ligne codante est à '0'.

Finalement la valeur binaire de la ligne examinée au travers de cette méthode est calculée avec l'équation suivante :

$$V_i(k_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } c_{r_i} > 0.5 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.15)$$

où $V_i(k_i)$ est le vecteur recevant les valeurs binaires extraites de la mire par la méthode présentée et i dénote la direction du vecteur considéré. Ces deux vecteurs résultants contiennent donc toute l'information binaire qui a été codée par la méthode présentée plus tôt dans la [section 4.1](#).

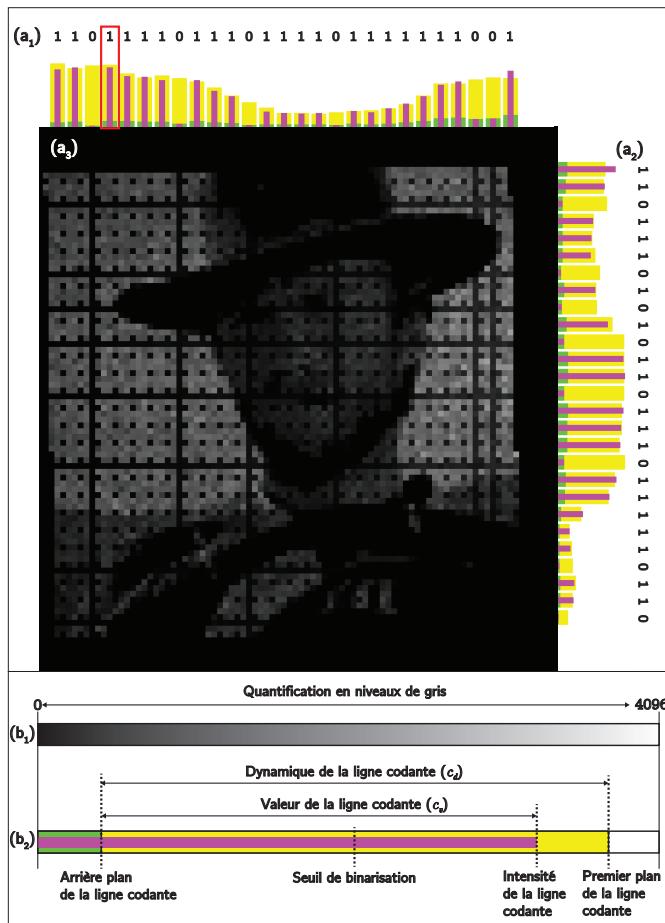


FIGURE 4.8 – Détermination des valeurs binaires de la séquence codée intégrée à la mire. (a₃) imagette provenant d'une mire altérée avec une image superposée. (a₁) et (a₂) moyennes des valeurs binaires codantes (magenta) par rapport aux intensités des points toujours présents (jaune) et de l'arrière-plan (vert). (b₁) dynamique en niveau de gris autorisée par une quantification de l'acquisition sur 12 bits. (b₂) reprend une des lignes codantes de (a₁) en explicitant les différents niveaux des seuils de décision de la valeur binaire.

La figure 4.8 montre également la grande robustesse de la méthode en considérant une image fortement altérée, mais dont la séquence extraite avec la méthode présentée est toujours visible et correcte.

Enfin, pour retrouver le numéro des périodes observées sur l'image de la mire acquise, un produit de convolution est effectué entre cette séquence extraite et la séquence par registre à décalage complète qui a été intégrée dans la mire. Cette synchronisation de la séquence observée sur l'image de la mire avec la séquence complète donne ainsi accès aux valeurs k_x et k_y qui sont ensuite injectées dans l'équation (4.1) et donnent accès à la translation absolue de la mire sur la plage déterminée par le nombre de bits de la séquence et de la taille des périodes tel que discuté dans la section 4.1.3.

Au travers de cette étude sur l'extension de la plage de mesure alors limitée à une période en translation et $\pi/2$ en orientation, nous avons montré comment générer et intégrer une séquence codée dans la mire. Cette méthode de génération de mire codée respecte complètement le cahier des charges fixé en début de chapitre stipulant notamment la préservation de l'information de phase et une densité de points suffisante pour effectuer le positionnement haute résolution montré dans les [chapitre 2 et 3](#).

Nous avons également vu comment extraire ces informations de codage en étudiant la binarisation robuste de la mire utilisant les outils d'analyse de phase présentés dans le [chapitre 2](#). Nous allons à présent nous intéresser à l'étude de la robustesse de cette méthode à travers plusieurs simulations.

4.3 ÉTUDE DE LA ROBUSTESSE PAR SIMULATION

Pour couvrir un maximum d'altérations possibles sur les images acquises et étudier la robustesse de la méthode de décodage, nous mettons en place plusieurs simulations.

4.3.1 Robustesse à différents types de bruits

La première étude de robustesse de la méthode porte sur l'ajout de bruit aux images de mires simulées pour examiner jusqu'où les séquences binaires sont extraites correctement.

Pour cela le protocole suivant est mis en place : une mire parfaite de taille 1024×1024 pixels est générée à une position aléatoire comprise dans la plage de mesure autorisée par la séquence codée. Une séquence générée sur 12 bits est utilisée en simulant les mires périodiques encodées avec une période de 20.123 pixels. La plage de mesure résultant de ce jeu de valeurs donne une mire codée de $12\,318 \times 12\,318$ périodes, résultant en une plage de $2.478 \cdot 10^5 \times 2.478 \cdot 10^5$ pixels. La séquence codée appliquée sur la mire est ensuite enregistrée et sert de référence pour la suite de l'expérience. Les images ainsi générées de mires périodiques encodées sont ensuite altérées avec différentes méthodes qui sont listées ci-dessous :

- ajout progressif de bruit blanc
- ajout d'une illumination inhomogène
- Superposition avec une vidéo

Un bruit blanc aléatoire uniforme est ajouté aux images de mires périodiques simulées pour étudier son influence sur la mesure de position. La borne supérieure de ce bruit blanc évolue de manière synchrone avec la simulation, de telle sorte qu'à la fin de celle-ci, le bruit blanc généré se situe dans l'intervalle $[0, 1]$.

L'illumination inhomogène est calculée à partir de l'équation d'un plan dont les coefficients directeurs augmentent avec l'avancement de la simulation. Ce plan lumineux est ensuite ajouté aux images de mires générées.

Cet ajout est effectué sur 100 images par type de bruit et toutes les informations pertinentes pour l'étude de l'extraction des séquences binaires sont enregistrées. Ces informations enregistrées sont visibles sur la [figure 4.8](#), et l'étude est plus particulièrement portée sur le critère c_r qui représente ici l'indice de confiance sur la détermination de la valeur binaire. En effet plus l'image est dégradée plus ce critère tendra vers la valeur de basculement du seuil à 0.5.

Ces résultats sont ensuite représentés sous la forme d'un histogramme 2D avec en abscisse la plage dynamique de chaque ligne codante avec la variable c_d telle que définie dans l'[équation \(4.14\)](#). Cet histogramme, visible dans la [figure 4.9](#) montre que sur les 14500 valeurs binaires comparées issues des 300 images altérées, seulement 43 d'entre elles ont été mal décodées (affichées en magenta sur la [figure 4.9](#)).

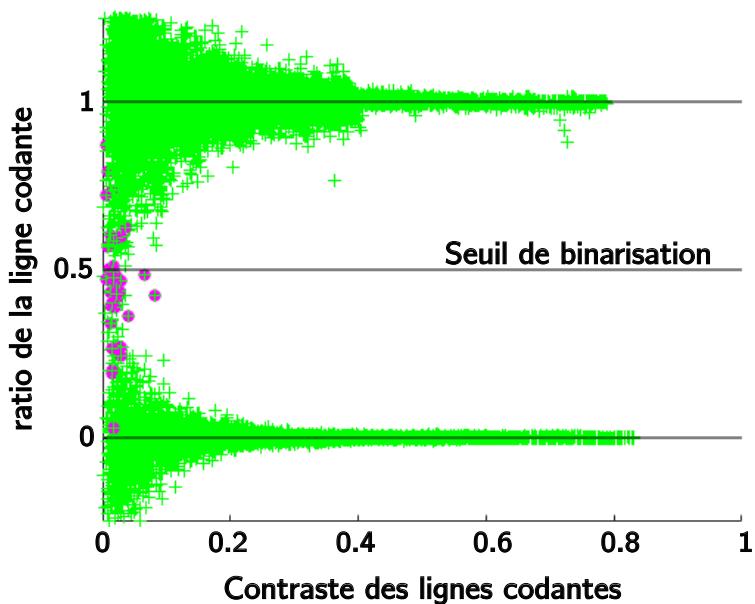


FIGURE 4.9 – Histogramme 2D des ratios de codage c_r issus de l'extraction des séquences codées de mires altérées en fonction de la plage dynamique disponible pour chaque ligne codante. En vert sont représentées les valeurs binaires correctement décodées et en magenta celles qui ont été mal interprétées.

Cette étude montre également que les erreurs de binarisation des valeurs codantes apparaissent lorsque la plage dynamique disponible est en deçà de 0.05. Balayer toute la plage d'altération de l'image par bruit montre également que la méthode est adaptable même dans des conditions qui impliquent un fort taux de bruit dans l'image ou encore une grande disparité de l'illumination de la mire.

Le cahier des charges établi en début de chapitre motivait un décodage de la séquence binaire à l'aide d'un nombre minimal de mots à observer. Ainsi la méthode de génération choisie pour remplir ce point a montré comment assurer un repérage absolu de la mire à l'aide d'un mot et un bit. Cependant lorsque plus d'informations codantes que nécessaire sont présentes dans la mire, la détermination de la position devient plus robuste en rendant possible l'indétermination de quelques valeurs binaires. Dans le cas de cette étude, cette augmentation de la robustesse se traduit par la bonne détermination de la position globale de la séquence extraite pour toutes les images utilisées dans cette étude numérique.

4.3.2 Robustesse à l'occultation

En effectuant la binarisation de la séquence codée présente sur l'image de la mire encodée à l'aide de cellules codantes évaluées sur chaque ligne et colonne de la mire, la méthode offre une certaine tolérance aux erreurs d'évaluation d'une ou plusieurs valeurs binaires. Pour quantifier cette tolérance, une étude mettant directement en lien l'absence d'information binaire et le bon décodage des séquences binaires est mise en place. Cette étude vise donc à évaluer la robustesse à l'occultation de la mire et à étudier jusqu'à quel seuil d'occultation les séquences codées sont extraites correctement. Pour cela, le même protocole de départ que celui employé dans la simulation précédente est utilisé, à savoir une mire périodique encodée générée à une position aléatoire de taille 1024×1024 pixels en utilisant une séquence codée sur 12 bits. Ici seules les valeurs des bits codants sont enregistrées en tant que référence de l'étude.

L'image de mire est ensuite progressivement occultée avec des disques noirs de diamètre variant de 20 à 75 pixels placés de manière aléatoire. L'image de la mire est ensuite traitée en effectuant le décodage de la séquence et les valeurs binaires extraites sont comparées avec celles de l'image de référence. Le processus est répété en ajoutant un nouveau disque d'occultation par image traitée jusqu'à occultation complète de l'image. La [figure 4.10.\(a₁\)](#) et [\(a₂\)](#) montre ainsi des images intermédiaires prises pendant l'essai à différents niveaux d'occultation.

Ce processus est répété 300 fois afin d'obtenir un nombre de données assez significatif pour évaluer la robustesse de la méthode face à ce genre d'altération de l'image. Les résultats de cette étude sont présentés dans l'histogramme 2D visible dans la [figure 4.10.\(b\)](#) et montrent que 100 % des valeurs binaires sont correctement décodées jusqu'à un taux d'occultation de 15 %. Au-delà de ce seuil et jusqu'à 55 % d'occultation, 90 % des valeurs binaires sont correctement extraites. Cette robustesse est par ailleurs variable en fonction du nombre de bits codants présents sur l'image de la mire. En effet, et comme décrit plus haut, la présence d'un mot et un bit est suffisante pour effectuer un positionnement absolu de la mire encodée. Cependant l'ajout de bits codants visibles dans l'image via l'utilisation d'un champ de vision plus large vient améliorer la robustesse en offrant une séquence codée visible plus longue. Le produit de convolution avec la séquence

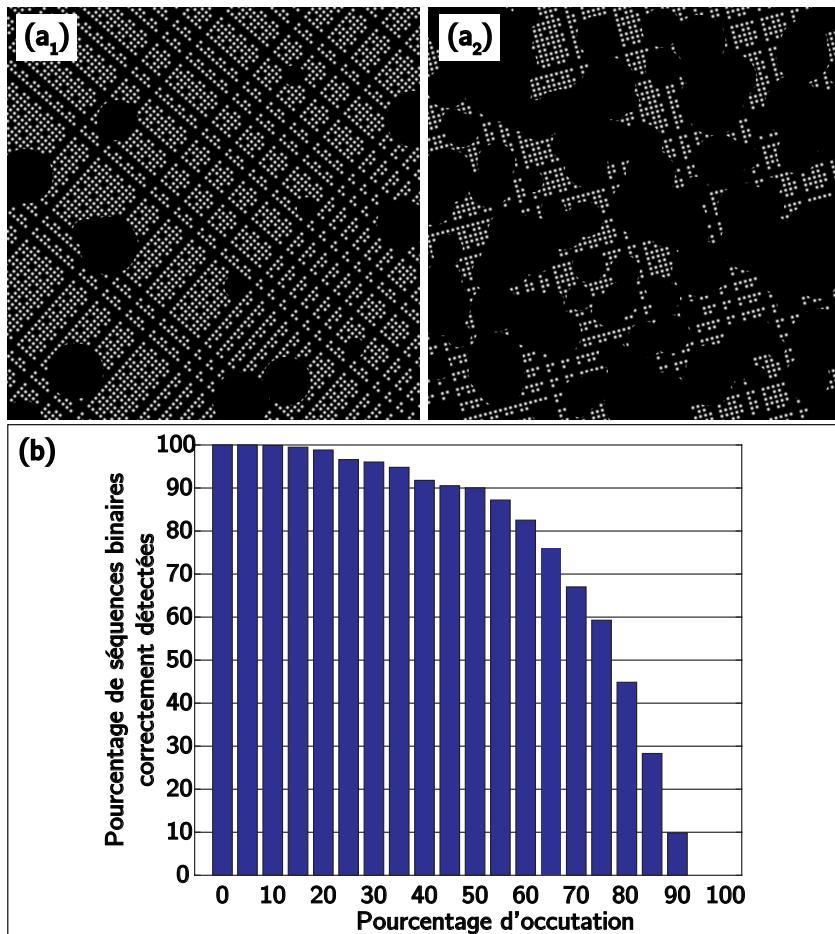


FIGURE 4.10 – Robustesse de la méthode de décodage des séquences binaires à l'occultation de l'image. (a₁) présente une mire occultée à 15 % et (a₂) une occultation à 65 %. (b) présente l'histogramme des valeurs binaires correctement décodées en fonction de l'occultation de la mire.

complète est donc rendu plus robuste aux erreurs de détermination de certains bits.

De plus ce niveau de performances et de robustesse à l'occultation peut être amélioré en réduisant la taille du filtre passe-bande appliqué sur les pics fréquentiels f_1 et f_2 utilisés pour effectuer l'analyse de phase de l'image. Ce rétrécissement du filtre passe-bande spectral implique alors une meilleure résolution fréquentielle menant à une meilleure détermination des franges de l'image de phase en éliminant les fréquences parasites comme discuté dans la section portant sur l'échantillonnage de la mire ([chapitre 2](#)). Cependant l'amélioration de la résolution fréquentielle se fait au détriment de la résolution spatiale comme nous l'avons vu. C'est pourquoi concernant la robustesse à l'occultation de la méthode, ce compromis est à prendre en compte en fonction de chaque application et du taux d'occultation attendu pendant l'acquisition des images.

Ainsi les deux simulations présentées ici rendent compte de la grande robustesse de la méthode de décodage des séquences binaires intégrées à la mire en exploitant complètement l'information de phase à l'aide de plusieurs seuillages locaux. Bien que ces deux simulations numériques ne présentent pas exhaustivement tous les cas possibles d'altération d'image, elles constituent un éventail assez représentatif des problèmes couramment rencontrés pendant l'acquisition d'image, et plus particulièrement en microscopie.

Un dernier cas de figure traitant de la robustesse au défaut de mise au point, qui est un verrou majeur de la vision en microscopie est étudié dans le chapitre suivant à travers la mise en place d'un dispositif expérimental.

4.4 CONCLUSION

Ce chapitre a montré comment étendre la plage de mesure des mires périodiques qui était alors limitée à une période en translation et un quadrant de $\pi/2$ en orientation. Pour ce faire, une première étude concernant la génération de la séquence codée, réalisée à partir d'une méthode à décalage de registre linéaire a été menée. Cette méthode assure un repérage absolu à l'aide d'un seul mot visible dans toute la séquence codée et exclut toute répétition de ces mots binaires dans toute la séquence générée. Cette séquence a ensuite été intégrée aux mires périodiques 2D en effaçant les points de la mire correspondant à une valeur binaire '0' et en conservant les points de la mire dont la valeur binaire est '1'. Cette intégration a également été effectuée en veillant à conserver au maximum la linéarité de la phase qui est rendue possible grâce à l'encodage d'une période sur trois de la mire périodique.

Dans la seconde partie de ce chapitre nous avons montré comment extraire cette séquence codée et intégrée à la mire à l'aide des outils étudiés dans les chapitres précédents. En effectuant une segmentation de l'image en ne considérant plus un repérage en fonction des pixels, mais en regroupant l'information de chaque point de la mire via l'étude de leur phase, nous avons montré comment étudier la mire sous un nouvel angle. Grâce à cette représentation de la mire en fonction des constantes de phase, nous avons montré comment effectuer un seuillage local assurant une binarisation robuste de la mire pour en extraire la partie de la séquence codée observée.

Cette extension significative du rapport plage sur résolution apportée par la méthode décrite dans ce chapitre a fait l'objet d'une publication dans le journal *Transactions on Instrumentation and Measurement*, montrant ainsi l'apport de cette méthode en termes de plage de mesure et de robustesse aux altérations possibles des images en microscopie [André20a].

Cette méthode a enfin été mise en pratique par le biais de simulations visant à démontrer la grande robustesse à différents types d'altération d'image. La méthode de décodage s'est ainsi révélée grandement robuste au bruit, à l'illumination

variable ou encore à l'occultation. Cette grande robustesse, nécessaire dans le milieu de la vision en microrobotique vient ainsi renforcer l'intérêt applicatif de la méthode de mesure de pose par mires périodiques.

Cette première partie a ainsi montré comment concevoir des mires périodiques, en partant du cas unidimensionnel à courte plage, pour l'étendre à une conception bidimensionnelle avant d'effectuer une étude sur l'extension de la plage de mesure disponible pour cette conception. En parallèle de cette étude de conception, nous avons montré dans cette partie comment effectuer une mesure de pose grandement résolue en présentant les outils nécessaires pour effectuer cette mesure de pose. Pour cela une première étude sur la pose planaire a été menée dans le [chapitre 2](#) avant d'être étendue à une étude de pose complète ([chapitre 3](#)). Pour compléter cette méthode de mesure de pose, nous avons vu comment mesurer de manière absolue la position d'une mire périodique à l'aide d'un encodage binaire de celle-ci. Le marqueur périodique résultant de cette étude de conception et de méthodologie de la mesure de pose offre ainsi un excellent rapport plage sur résolution, avec une résolution de l'ordre de 10^{-7} pixels sur une plage de 10^4 périodes avec une détermination absolue de l'angle α de la mire sur une rotation complète. Couplé aux performances de mesure des angles hors-plan β et γ de l'ordre du dixième de milliradian, ce marqueur structuré périodiquement offre nombre d'avantages pour l'étude de pose en microrobotique.

La suite de ce manuscrit s'intéresse donc à ce portage de la méthode vers la réalisation d'essais pratiques visant dans un premier temps à valider les performances avancées dans ces premiers chapitres et dans un second à étudier différentes applications en microrobotique où ce capteur de position a été intégré.

Deuxième partie

Performances et applications

Chapitre 5

Validation expérimentale

5.1	Configuration des essais expérimentaux	88
5.1.1	Mires périodiques encodées	89
5.1.2	Dispositif d'acquisition d'images	89
5.1.3	Dispositifs mis en place	90
5.1.4	Environnement des essais expérimentaux	92
5.2	Étude de la résolution de la méthode	93
5.2.1	Présentation des essais expérimentaux de résolution	94
5.2.2	Résolution de la pose planaire $xy\alpha$	94
5.2.3	Résolution des angles hors-plan	97
5.2.4	Résolution en profondeur z	98
5.3	Étude de la justesse et de la plage de mesure de la méthode	99
5.3.1	Présentation des essais expérimentaux de justesse	100
5.3.2	Justesse de la pose planaire $xy\alpha$	100
5.3.3	Justesse de mesure de l'orientation $\beta\gamma$	101
5.3.4	Validation de la plage de mesure 6DDL	103
5.4	Étude de la robustesse de la mesure	105
5.4.1	Robustesse à la faible dynamique et au bruit	105
5.4.2	Étude de l'impact du défaut de mise au point sur la mesure	107
5.5	Conclusion	108

La première partie de ce manuscrit a montré comment exploiter l'information de phase de mires périodiques pour mesurer une pose selon trois puis six degrés de liberté. Cette méthode de mesure dont la plage était alors limitée à une période en translation x,y et à $\pi/2$ en orientation selon l'axe optique a ensuite été étendue à une plage de l'ordre de 10^4 périodes et à une détermination absolue de l'orientation grâce à un encodage binaire de la mire.

Plusieurs validations ont été présentées à l'aide de simulations numériques pour montrer les performances en résolution et en justesse de cette méthode ainsi que la grande robustesse offerte par la méthode d'encodage et de décodage.

Ce chapitre s'intéresse à la mise en place expérimentale de la méthode et de la validation pratique de celle-ci en montrant les résolutions et plages de mesure atteignables expérimentalement selon les différents degrés de liberté. La dernière partie de ce chapitre est consacrée à l'étude et la validation de la robustesse de la méthode face à différentes altérations sur les images acquises.

5.1 CONFIGURATION DES ESSAIS EXPÉRIMENTAUX

Les dispositifs expérimentaux présentés ici utilisent tous la même chaîne d'actionnement à savoir une mire périodique fixée sur un actionneur qui envoie une pose déterminée (nommée *valeur vraie*). Cet actionneur est considéré comme étant une vérité terrain, car ceux-ci emploient des capteurs internes plus résolus et plus répétables que la méthode présentée ici (jusqu'à 0.1 nm pour les actionneurs piezo-électriques). Les mires périodiques sont ensuite imagées à l'aide d'un système optique constitué d'un objectif et d'une caméra. Les images sont alors traitées pour mesurer la pose de la mire et par voie de conséquence de l'actionneur (nommée *mesurande*). Cette chaîne de mesure est présentée dans la figure 5.1 qui résume les principaux éléments communs aux différents dispositifs expérimentaux décrits dans ce chapitre.

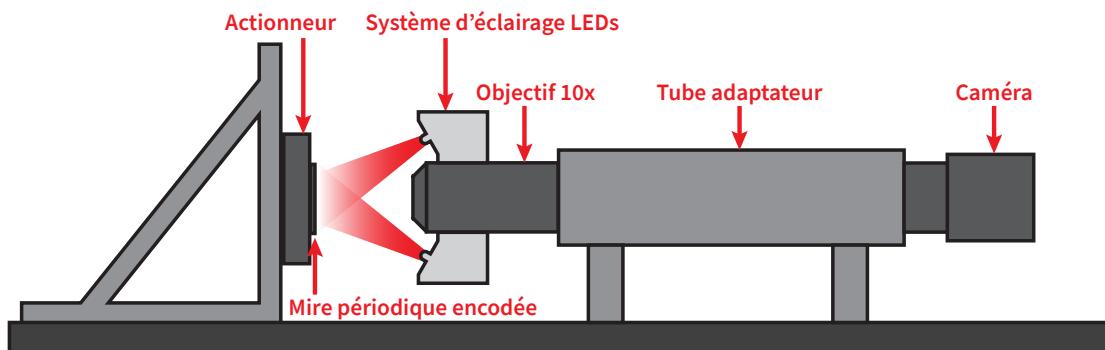


FIGURE 5.1 – Configuration expérimentale de mesure de pose en microscopie à l'aide de mires périodiques

5.1.1 Mires périodiques encodées

L'élément central des validations expérimentales de mesure de pose concerne la mire périodique fixée à la partie d'actionnement. Le dimensionnement de celle-ci par sa période physique impacte en effet directement le champ applicatif visé. Le thème de cette thèse étant axé sur la mesure de pose en microrobotique, nous concentrons notre étude sur la démonstration de la résolution maximale atteignable expérimentalement. La mire périodique est ainsi imprimée avec une période physique présentant le meilleur compromis entre taille des points et justesse de leur impression.

La mire codée générée à l'aide de la méthode présentée dans la [section 4.1.3](#) et utilisant ici un code de 12 bits est ainsi imprimée avec une période physique de $9 \mu\text{m}$ en salle blanche grâce à un générateur de masque (Heidelberg DWL200) par ablation d'une couche de chrome sur un masque en verre de 3 mm d'épaisseur. Avec ces paramètres, la mire résultante présente une taille totale de $11 \times 11 \text{ cm}^2$.

Ces paramètres de fabrication de la mire renseignent également sur le champ de vision nécessaire à la mesure de pose. La méthode d'encodage et de décodage des mires codées avec ces paramètres a montré que 13 périodes codantes visibles étaient *a minima* nécessaires pour réaliser la mesure de pose absolue (*i.e.* $3 \times 13 = 39$ périodes totales). Transposée à la mire fabriquée, ce champ de vision minimal représente donc un carré de $39 \times 3 = 351 \mu\text{m}$ de côté.

Pour les essais de résolution qui ne nécessitent pas de solliciter toute la plage de mesure de $11 \times 11 \text{ cm}^2$, seule une partie de cette mire est utilisée en la découplant arbitrairement à une dimension de $2 \times 2 \text{ cm}^2$. Cette petite portion de mire est largement suffisante pour assurer dans tous les cas une bonne mesure de la pose (en présentant assez de périodes) et présente l'avantage d'être facilement implémentable sur nombre de systèmes.

Une mire périodique codée de période physique plus large ($140 \mu\text{m}$) est également réalisée selon la même méthode de fabrication. La séquence codée insérée sur cette mire est fixée à 8 bits, donnant ainsi une mire de taille $10.7 \times 10.7 \text{ cm}^2$. Le champ de vision nécessaire à la bonne mesure de pose de cette mire est donc de $5.45 \times 5.45 \text{ mm}^2$. Ce choix de jeu de valeurs donne accès à une mire plus macroscopique qui est utilisée sur des systèmes à plus grande échelle.

5.1.2 Dispositif d'acquisition d'images

Les deux mires ainsi réalisées dimensionnent directement le système optique d'acquisition d'images en imposant un champ de vision minimal à acquérir. La caméra choisie pour effectuer ces acquisitions (IDS uEye 3280) présente une matrice de 2048×2048 pixels de $3.45 \mu\text{m}$ de côté avec un échantillonnage sur 12 bits (4096 valeurs de gris). La taille de son capteur est de $2/3$ de pouce et effectue des acquisitions en obturation globale à une fréquence maximale de 36 images par seconde.

Le choix de la caméra et de la période physique de la mire donne ainsi accès à une valeur du grossissement optimal nécessaire à la bonne mesure de pose. Avec le jeu de valeurs choisi pour la mire de période $9\text{ }\mu\text{m}$, le grossissement maximal est alors de $20\times$. Cependant, et pour donner un peu de marge au nombre de périodes imaginées, un système optique constitué d'un objectif de grossissement $10\times$ (Mitutoyo $10\times$ APO Plan) couplé à un tube optique de grossissement $1.5\times$ (Optem mini 1.5×300 FL) est choisi. Le grossissement équivalent de ce couplage est de $15\times$ et donne accès à une fenêtre visible de $471\text{ }\mu\text{m}$, laissant apparaître 52 périodes à l'image à la distance de travail de l'objectif.

Le même raisonnement est mené pour la mire macroscopique fabriquée avec une période physique de $140\text{ }\mu\text{m}$, nécessitant un grossissement de $1.3\times$ qui est assuré avec un objectif 50 mm standard. Les objectifs de cette gamme assurent un grossissement d'environ 1 sur des capteurs $2/3''$, offrant ainsi un champ de vision de $7 \times 7\text{ mm}^2$ sur la mire avec 50 périodes visibles.

Finalement, un éclairage épiscopique est placé autour de l'objectif pour éclairer au mieux la scène et garantir ainsi un temps d'exposition minimal. En effet plus le temps d'obturation est long pour capturer un maximum de lumière, plus le flou de bougé causé par les micro-vibrations inhérentes au dispositif expérimental est important.

Cet éclairage a été conçu spécialement pour observer avec le meilleur contraste les mires fabriquées avec un dépôt de chrome sur verre qui sont utilisées ici. La puissance de l'éclairage est réglée en couplage avec le temps d'exposition pour garantir une dynamique de l'image la plus complète possible en exploitant ainsi au mieux les 4096 valeurs de gris allouées par la caméra.

5.1.3 Dispositifs mis en place

La figure 5.2 présente le diagramme de mesure utilisé pour les essais expérimentaux. Une position est envoyée à l'actionneur qui donne avec son capteur interne une mesure de référence notée x . La pose mesurée par le système de vision couplé à la mire donne quant à elle la pose perçue du système, notée \hat{x} .

L'étude de la différence de pose entre celle envoyée et celle perçue est ensuite étudiée en tant que résultat de mesure pour évaluer les performances de la méthode.

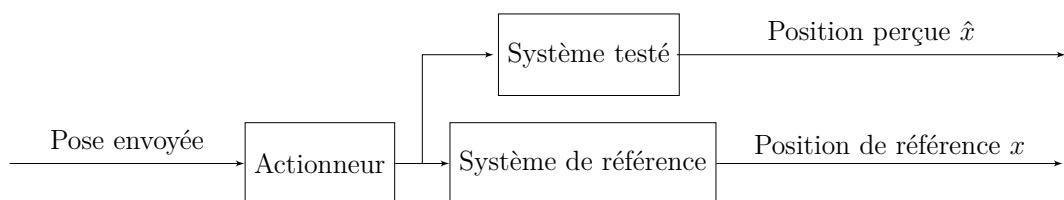


FIGURE 5.2 – Schéma bloc du dispositif expérimental de mesure de résolution

Ainsi plusieurs dispositifs expérimentaux mettant en œuvre ce diagramme de fonctionnement sont mis en place. Comme présenté dans la figure 5.1, la mire est fixée sur un actionneur qui est envoyé à différentes positions en fonction de l'essai. Les essais expérimentaux présentés dans la suite de ce chapitre emploient différents types d'actionneurs et différentes configurations, créant ainsi plusieurs dispositifs expérimentaux possibles en fonction des essais à réaliser.

Dispositif A

Le premier dispositif expérimental, noté **dispositif A** est consacré à l'étude en translation hautement résolue sur une courte plage. Pour cela, l'actionneur piezoélectrique *Nano-MET10* de Mad City Lab est choisi car bien que présentant une course limitée à 10 µm, il possède une répétabilité en boucle fermée de 0.01 nm assurée par un contrôle en boucle fermé.

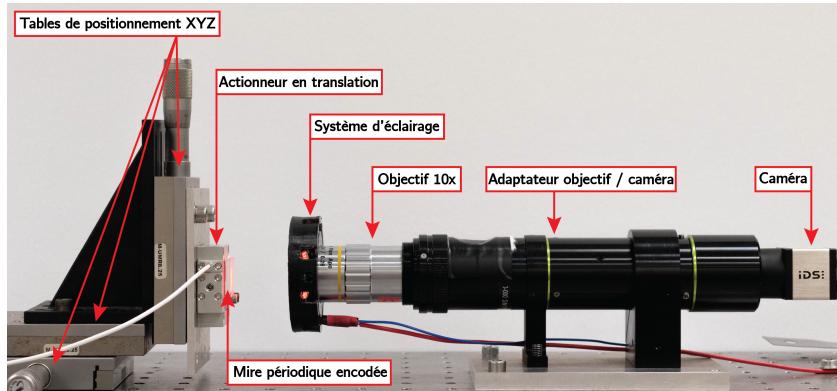


FIGURE 5.3 – Dispositif d'étude de la résolution et de la justesse de la méthode en translation

La figure 5.3 présente ainsi l'intégration de cet actionneur, suivant le schéma de principe présenté en début de chapitre et employant ici une mire périodique encodée de période 9 µm. Cette figure présente également l'ajout de platines de translations à vis micrométriques, qui sont utilisées ici pour effectuer un pré-positionnement *XYZ* de la mire périodique face à l'objectif.

Dispositif B

Le second dispositif, noté **dispositif B** vise à étudier la méthode en rotation, et emploie un actionneur rotatif résolu à 70 nrad. sur une plage de 2π (*SR-2013* de Smaract). La figure 5.4 présente l'agencement des différents éléments du dispositif. Dans le cas présenté, l'axe de l'actionneur rotatif est orienté de 90° par rapport à l'axe optique pour effectuer les essais impliquant l'angle hors-plan β . Un système

similaire est également mis en place, avec cette fois-ci l'axe de l'actionneur rotatif et l'axe optique colinéaires pour effectuer les essais de caractérisation selon l'angle α .

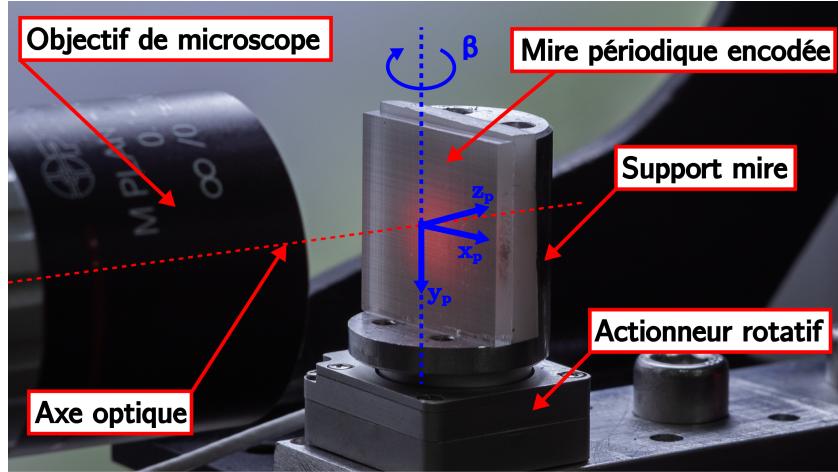


FIGURE 5.4 – Dispositif expérimental de mesure de résolution et de plage pour l'angle hors-plan β

Dispositif C

Le dernier dispositif mis en place, noté **dispositif C**, vise à qualifier la méthode de mesure en la sollicitant à la fois sur des grandes plages et selon les six degrés de liberté. Pour cela un robot 6DDL réalisé à partir de six actionneurs 1DDL Smaract est utilisé (trois pour les translations xyz et trois pour les orientations $\alpha\beta\gamma$). Une fois contrôlés en boucle fermée, les actionneurs piezo-électriques individuels offrent une répétabilité de l'ordre du nanomètre [Rauch18]. Cependant la mise en série des six actionneurs résulte en une justesse et une répétabilité qui n'ont pas été quantifiées et ne sont donc pas utilisables pour constituer une référence à laquelle comparer les résolutions de mesure de pose.

La [figure 5.5](#) présente ce dispositif expérimental avec dans le cas présenté une mire de période 140 μm placée sur l'effecteur du robot ainsi qu'un objectif 50 mm pour effectuer les acquisitions d'images.

5.1.4 Environnement des essais expérimentaux

Le dernier point commun aux dispositifs expérimentaux présentés ici concerne l'assemblage mécanique des éléments cités ci-dessus. Ceux-ci sont fixés sur une table anti-vibrations pour garantir la meilleure stabilité possible pendant les essais expérimentaux.

De plus, pour garantir cette stabilité requise pour mesurer des déplacements nanométriques, les essais expérimentaux sont réalisés dans des salles contrôlées à la fois en pression (8 Pa au-dessus de la pression extérieure) et en température (22.4°C).

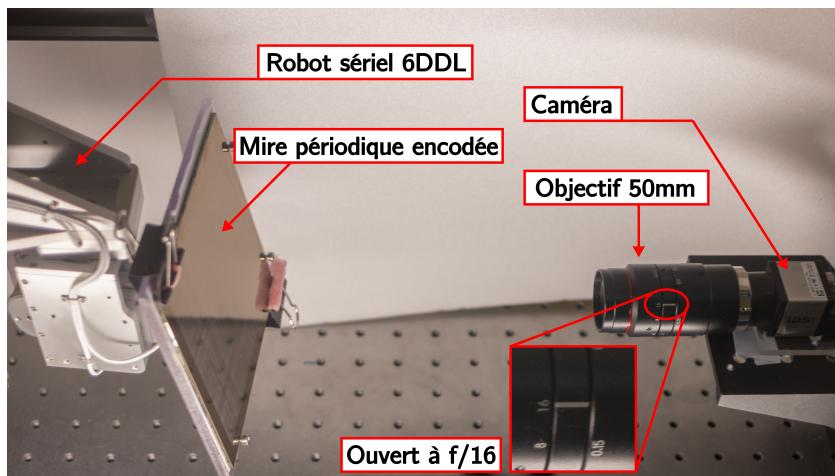


FIGURE 5.5 – Dispositif expérimental utilisé pour la validation des grands déplacements sous projection perspective

Ces salles sont construites sur des dalles indépendantes pour les découpler des bâtiments principaux auxquelles elles sont rattachées et ainsi réduire les vibrations basses fréquences. Ces précautions garantissent une grande réduction des perturbations extérieures, donnant ainsi accès à de meilleures conditions expérimentales.

Enfin, les différents dispositifs présentés plus haut sont assemblés la veille des campagnes de mesure pour assurer un temps de relaxation mécanique et ainsi réduire les éventuelles dérives causées par des vis encore en court d'ajustement. La caméra et l'éclairage sont également mis en route en avance (typiquement une heure avant d'effectuer l'essai expérimental) pour minimiser les phénomènes de dérive thermique. Ces considérations sur les temps de relaxation et de chauffage des différents éléments ont notamment été discutées par Mauzé *et al.*, qui a montré l'importance du soin porté à la préparation expérimentale en décrivant l'impact de celle-ci sur des mesures nanométriques [Mauzé20b].

5.2 ÉTUDE DE LA RÉSOLUTION DE LA MÉTHODE

Les expériences décrites dans cette section visent à évaluer les performances atteignables en résolution dans les conditions expérimentales présentées ci-dessus. Cette étude de résolution est ainsi menée sur chacun des degrés de liberté de la mesure de manière indépendante.

5.2.1 Présentation des essais expérimentaux de résolution

Pour quantifier au mieux la résolution selon chacun des axes, deux expériences visant à quantifier le bruit statique ainsi que la variation minimale (de distance ou d'angle) détectée par la méthode sont mises en place.

Le bruit statique est quantifié en maintenant l'actionneur à une position fixe et en mesurant à l'aide de la méthode présentée la pose de la mire observée. Les écarts de mesure indiquent ainsi le niveau de bruit ambiant et donnent accès à une valeur *a priori* de la résolution maximale atteignable qui ne sera pas inférieure à ce niveau de bruit. Ce niveau de bruit fixe ainsi une limite de résolution propre à l'environnement dans lequel sont menées les expériences.

La résolution est elle définie comme étant la plus petite variation perceptible de la grande mesurée. Pour effectuer cette quantification, des créneaux de taille décroissants sont envoyés à l'actionneur jusqu'à ce que la méthode de mesure de pose ne permette plus de distinguer les créneaux du bruit.

5.2.2 Résolution de la pose planaire $xy\alpha$

Cette méthode de mesure de résolution est tout d'abord appliquée aux translations planaires x, y ainsi qu'à l'orientation atour de l'axe optique α . Le premier essai expérimental vise tout d'abord à étudier le bruit de mesure en utilisant le **dispositif expérimental A** et en maintenant l'actionneur à une position fixe.

La [figure 5.6](#) présente tout d'abord les résultats de l'étude du bruit de mesure (essai statique) qui a été menée sur 40 images acquises à 20 images par seconde. Les deux courbes montrent une amplitude maximale de la mesure de 4 nm en translation selon les axes x et y et de 10 μrad selon l'orientation α sur la durée de l'essai. L'écart type des mesures montre quant à lui un niveau de bruit inférieur au nanomètre en translation et de l'ordre de 4 μrad en orientation comme présenté dans le [tableau 5.1](#).

Ce bruit de mesure inclut cependant toutes les perturbations qui agissent sur le système. Bien que l'environnement expérimental ait été préparé avec le plus grand soin (comme discuté dans la [section 5.1.4](#)), l'impact de celui-ci reste non négligeable. L'[annexe B.1](#) présente une étude sur la quantification de l'impact environnemental sur la mesure, et montre que celui-ci représente plus de 90 % du bruit total mesuré.

La méthode de détermination de la résolution maximale atteignable présentée précédemment est ensuite appliquée à la mesure de translation en envoyant des créneaux de plus en plus faibles, à une fréquence fixée de 5 Hz. La [figure 5.7](#) présente les résultats des poses mesurées une fois les créneaux abaissés à une amplitude de 1 nm.

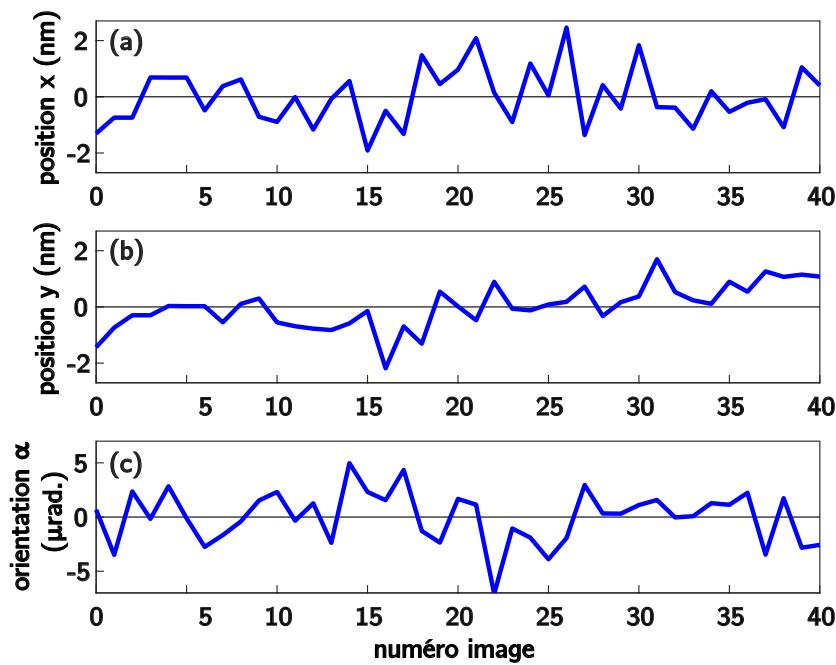


FIGURE 5.6 – Mesure du bruit statique sur 40 images selon les trois degrés de liberté x , y et α

Axe	Bruit de mesure (écart type)	unité
x	0.96	nm
y	0.77	nm
α	$4.07 \cdot 10^{-6}$	rad.

TABLE 5.1 – Analyse du bruit statique de mesure effectué avec les courbes présentées figure 5.6

L'essai est réalisé sur 30 secondes et un échantillon de la courbe de déplacement sur une seconde est présenté dans la figure 5.7.(c). Cette courbe montre que les créneaux envoyés à l'actionneur sont toujours visibles malgré un bruit et une dérive importante, démontrant ainsi une résolution de la méthode de 1 nm en translation. Cette mesure de résolution est ensuite approfondie en appliquant une transformée de Fourier au signal temporel total, montrant ainsi que ce signal de 5Hz d'amplitude 1 nm est clairement visible, comme le montre la figure 5.7.(b). Le bruit présent sur le spectre fréquentiel de la mesure provient du bruit temporel variable visible sur l'essai de 30 secondes et explique ainsi l'intensité assez faible du lobe à 5 Hz par rapport à l'intensité globale du spectre.

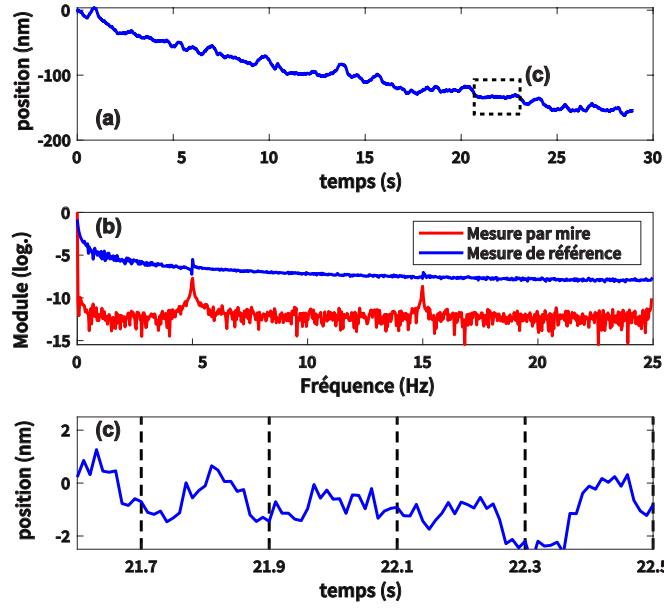


FIGURE 5.7 – (a) Créneau en translation de 1 nm (envoyés à une fréquence de 5 Hz et imagés à 100 Hz) pendant 30 s. (b) Spectre fréquentiel des poses mesurées (en rouge) et des poses envoyées (en bleu). (c) Détail sur 1 s du créneau mesuré en (a)

Un essai similaire est mis en place à l'aide du **dispositif expérimental B** pour évaluer la résolution de la méthode de mesure selon l'orientation α . L'axe de l'actionneur sur lequel la mire est positionné colinéairement à l'axe optique de l'objectif pour réaliser cet essai. Un créneau de 10 μrad . est ensuite envoyé à l'actionneur rotatif à une fréquence de 2 Hz comme illustré dans la figure 5.8.

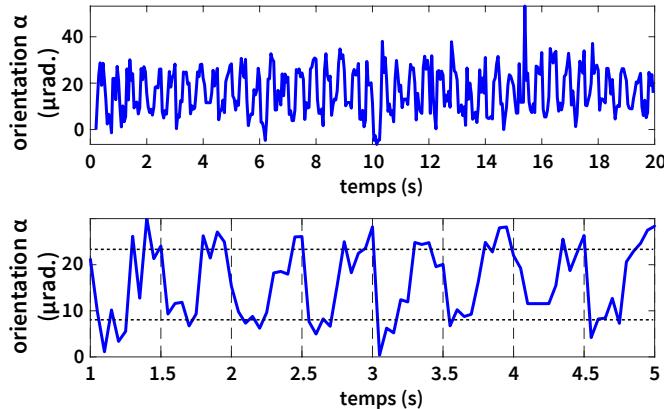


FIGURE 5.8 – (a) créneaux angulaires de 10 μrad . envoyés à l'actionneur à une fréquence de 2 Hz sur une durée de 20 s. (b) présente le détail de cet essai sur une durée de 5 s.

Cette figure montre ainsi que les créneaux envoyés sont toujours bien visibles une fois traités par la méthode de mesure et démontrent ainsi une résolution angulaire selon l'angle α d'au moins $10 \mu\text{rad}$.

5.2.3 Résolution des angles hors-plan

Une fois cette étude menée démontrant les performances de la méthode à mesurer des déplacements de l'ordre du nanomètre en translation et de la dizaine de micro radians en orientation α , le **dispositif B** est utilisé pour les angles hors-plan β et γ . Cependant, et pour des raisons pratiques d'organisation, ces essais sont menés dans une salle à l'environnement non contrôlé. Hormis le changement de salle, les essais effectués ici respectent l'environnement expérimental décrit en section 5.1.4.

La première mesure effectuée avec ce dispositif concerne l'écart type du bruit de mesure qui est présenté dans le tableau 5.2. L'impact de l'absence de contrôle environnemental sur la mesure est directement visible sur le bruit de mesure en translation de l'ordre de la dizaine de nanomètres.

Axe	Bruit de mesure (écart type)	unité
x	8.07	nm
y	16.02	nm
s	$0.42 \cdot 10^{-6}$	px/mm
α	3.25	$\mu\text{rad.}$
β	0.1205	mrad.
γ	0.1181	mrad.

TABLE 5.2 – Écart type du bruit de mesure statique selon chacun des six degrés de liberté effectué sur un essai de 40 s (800 images)

Bien que ce bruit dégrade la résolution accessible par la méthode, un niveau de bruit avec un écart type de l'ordre du dixième de milliradian est observé sur la mesure des orientations hors-plan.

Pour compléter l'essai de résolution des orientations hors-plan, un signal carré d'amplitude 0.2 mrad est envoyé à l'actionneur rotatif à 0.25 Hz. En diminuant la fréquence du signal crénelé, le système constitué de l'actionneur et de la mire est plus à même de se stabiliser et offre ainsi une meilleure plage d'étude (de 40 images par créneaux). Le résultat de cette expérience est présenté dans la figure 5.9 qui montre le signal carré envoyé à l'actionneur (en bleu) et l'orientation β mesurée (en rouge) sur une fenêtre de 18 secondes.

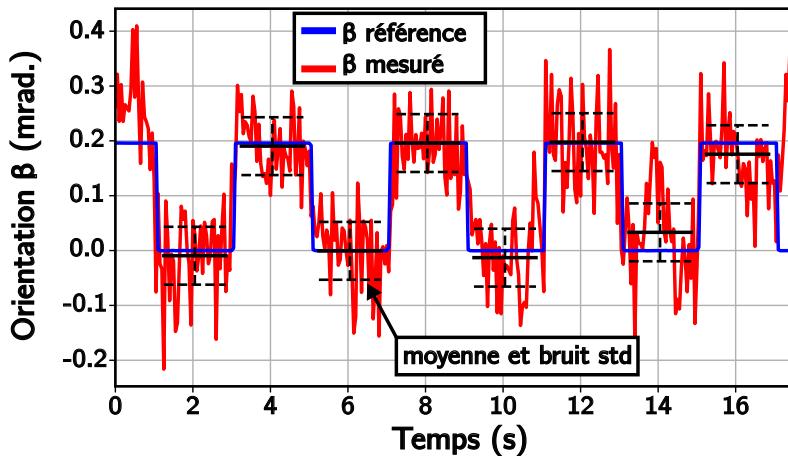


FIGURE 5.9 – Mesure angulaire hors-plan β réalisée à partir de créneaux de 0.2 mrad. envoyés sur une durée de 18 s

Cet essai montre que la résolution de la mesure se situe en dessous de 0.2 mrad car les créneaux mesurés sont très clairement distinguables. Cette figure montre également la valeur moyenne mesurée sur chacun des créneaux (en noir sur la figure) ainsi que les barres d'écart type issues de l'essai statique (en pointillés noirs sur la figure).

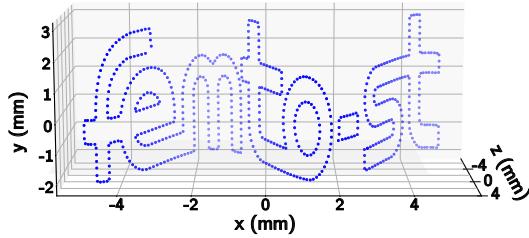
5.2.4 Résolution en profondeur z

Comme expliqué dans le chapitre 3 dédié à la méthode de mesure de pose complète, la profondeur z de la mire selon l'axe optique n'est mesurable qu'avec une projection perspective. Cette expérience emploie donc le **dispositif expérimental C** pour effectuer l'étude de la mesure de pose selon l'axe z .

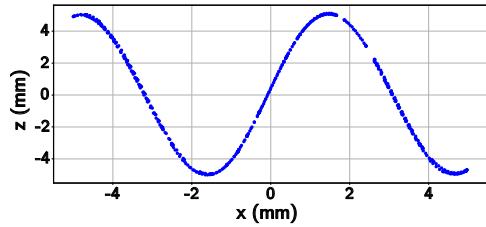
Le robot utilisé étant moins résolu que la mesure, l'étude de résolution selon cet axe est seulement qualitatif et vise surtout à montrer la validité de la mesure en profondeur et l'absence d'impact sur la mesure des autres degrés de liberté. Pour cela un signal sinusoïdal est envoyé en translation selon l'axe z pendant que les deux autres axes de translation x et y sont sollicités selon un motif arbitraire (suivant un chemin représentant le logo FEMTO), comme présenté dans la figure 5.10. L'ouverture de l'objectif est fixée à $f : 1/16$ pour garantir la plus grande profondeur de champ accessible par l'objectif. Avec ces réglages, la plage de mesure où l'image de la mire reste bien nette est de ± 5 mm. C'est donc sur cette fenêtre qu'évolue le signal sinusoïdal présenté dans la figure 5.10. Cette plage de mesure est arbitraire et dépend de l'objectif choisi qui, selon son ouverture, donne accès à une plage plus ou moins grande en profondeur.

Le résultat de cette expérience, présenté dans la figure 5.10, montre que sur la plage considérée de 10 mm, une résolution d'au moins 0.1 mm peut être établie, grâce à l'évolution lisse de la pose mesurée. Cette expérience montre également

(a) Vue 3D selon les axes x, y, z



(b) Vue du dessus x, z



(c) Vue de face x, y

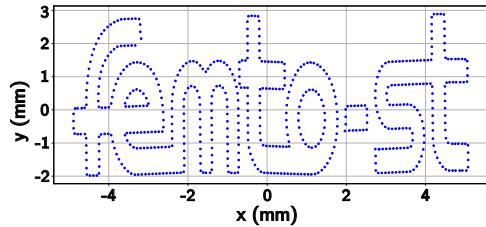


FIGURE 5.10 – Trajectoires x, y, z envoyées au robot. (a) Vue globale de l'évolution de la mire dans l'espace 3D, (b) vue de dessus montrant l'évolution de la mire en profondeur selon l'axe z et (c) vue de face montrant l'évolution x, y

l'absence d'impact de la mesure en profondeur lorsque les deux autres axes x et y sont sollicités dans l'espace balayé. En parcourant une plage de 10 mm cet essai présente finalement une évaluation qualitative de la justesse de la méthode en garantissant une erreur inférieure à 0.1 mm sur cette plage.

5.3 ÉTUDE DE LA JUSTESSE ET DE LA PLAGE DE MESURE DE LA MÉTHODE

Afin de quantifier la justesse de la méthode de mesure selon chacun des axes, une autre série d'essais expérimentaux est mise en place. Ces essais visent ainsi à montrer les plages accessibles selon chacun des axes tout en quantifiant la justesse de la mesure au sein de celles-ci.

5.3.1 Présentation des essais expérimentaux de justesse

Pour mettre en place les essais de justesse et d'évaluation des plages de mesures accessibles, nous reprenons le dispositif expérimental décrit pour les essais de résolutions et l'adaptions en envoyant une trajectoire non plus crénelée entre deux bornes mais incrémental. La figure 5.11 montre le signal envoyé à l'actionneur selon des paliers d'une durée variable et sur une plage déterminée au préalable. Par convention (voir norme ISO 5725-1), le nombre de paliers est fixé à 30. Grâce à ce type de trajectoire, toute la course de l'actionneur est sollicitée, donnant ainsi accès à une mesure quantitative de l'erreur entre la pose mesurée par le dispositif de vision et la pose de référence mesurée par l'actionneur. La mesure est réalisée avant chaque nouveau palier effectué, une fois l'actionneur bien stabilisé. Une droite de régression entre la position envoyée et la position mesurée est ensuite calculée avec la méthode des moindres carrés, donnant ainsi accès à une mesure de la justesse, comme montré dans la figure 5.11.

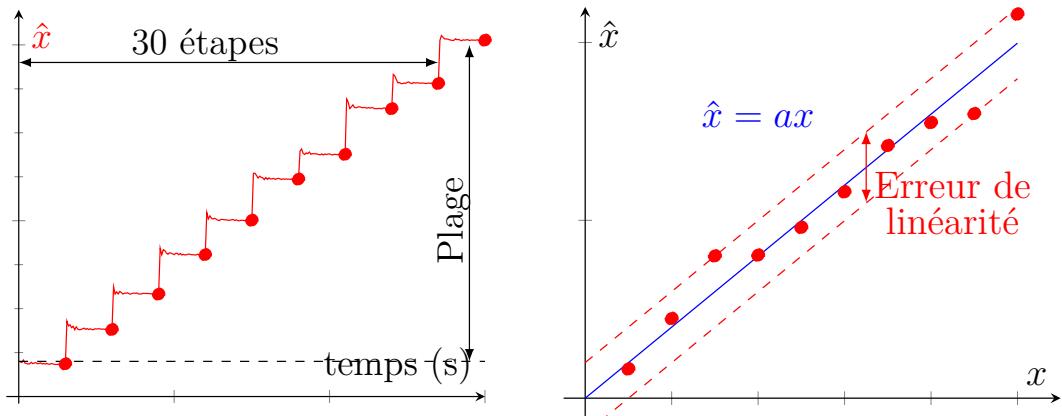


FIGURE 5.11 – Dispositif expérimental pour la caractérisation de la linéarité de la mesure avec à gauche (a), les paliers envoyés à l'actionneur et à droite (b), la courbe mettant en regard position envoyée (x) et position mesurée (\hat{x})

5.3.2 Justesse de la pose planaire $xy\alpha$

Le premier essai de justesse est porté sur l'étude de pose planaire $xy\alpha$. Comme la méthode de mesure selon les deux axes en translation x et y est la même, un seul des deux est étudié à l'aide du **dispositif A**. La course de l'actionneur étant limitée à 10 µm, une plage d'une période de mire physique (*i.e.* 9 µm) est considérée. La figure 5.12.(a₁) montre le résultat de cet essai en présentant notamment la courbe résultant de la régression linéaire effectuée sur les points mesurés. Cette droite montre un coefficient directeur de 1.011 et un écart maximal de l'erreur de l'ordre de 39 nanomètres comme montré dans la figure 5.12.(a₃). L'analyse de la justesse, présentée dans le tableau 5.3 montre ainsi une linéarité de 0.4 % pour la mesure en translation.

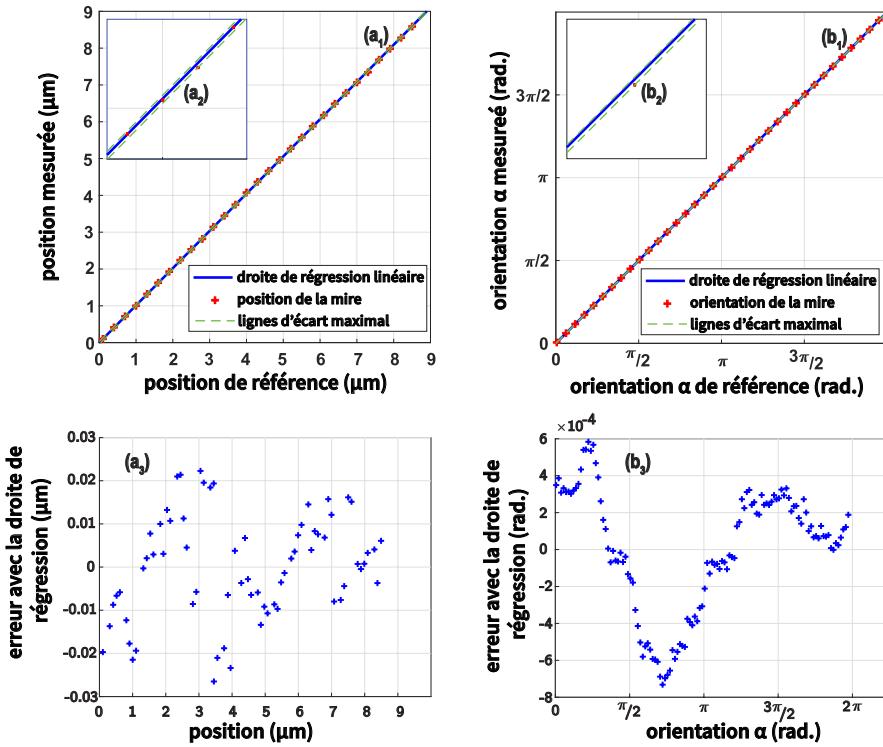


FIGURE 5.12 – Résultats des essais de justesse en translation et rotation planaire. (a₁) justesse en translation $\hat{x} = 1.01148x$, (b₁) justesse en rotation $\hat{\alpha} = 0.999961\alpha$. (a₂) et (b₂) présentent une vue en détail de l'erreur de justesse. (a₃) et (b₃) présentent l'erreur par rapport à la courbe de régression linéaire selon chacun des axes testés (respectivement x et α)

Cette erreur de linéarité de l'ordre de 0.4 % correspond ainsi à une erreur de 36 nm sur la plage de 9 μm étudiée, qui n'est pas très loin du bruit mesuré en condition statique. Ce défaut de linéarité pourrait également provenir d'un défaut d'alignement de la mire par rapport à la caméra ou encore d'un défaut d'impression de la mire, dont la période physique ne serait pas exactement de 9 μm.

La figure 5.12.(b) montre quant à elle le résultat de l'essai de justesse de l'angle α réalisé avec le **dispositif B** sur une plage de 2π rad. avec l'axe de l'actionneur colinéaire à l'axe optique. La droite de régression linéaire entre angle envoyé et angle perçu montre un coefficient de 0.999961 sur cette plage. Ce coefficient montre l'excellente justesse de la mesure angulaire donnée par la méthode avec une erreur de quelque 10^{-5} rad. sur une rotation complète, comme le montre le tableau 5.3.

5.3.3 Justesse de mesure de l'orientation $\beta\gamma$

Pour étudier la justesse ainsi que la plage de mesure selon l'orientation hors-plan de la mire, le **dispositif expérimental B** est à nouveau mis à contribution. De manière similaire à l'étude en translation qui n'était effectuée que pour un des deux axes, l'expérience est menée ici seulement selon l'orientation β , la méthode

Axe	Linéarité	Erreur de justesse
x	0.4%	1.15%
y	-	-
θ	0.00024%	< 0.004%

TABLE 5.3 – Justesse et linéarité de la mesure sur une plage de 9 μm en translation et sur une plage de 2π en orientation

de mesure étant la même pour l'orientation γ . Ici la faible profondeur de champ donnée par l'objectif utilisé (Mitutoyo 10x Apo Plan) contraint cependant la plage de mesure de l'orientation des angles hors-plan à une plage de 0.039 rad.

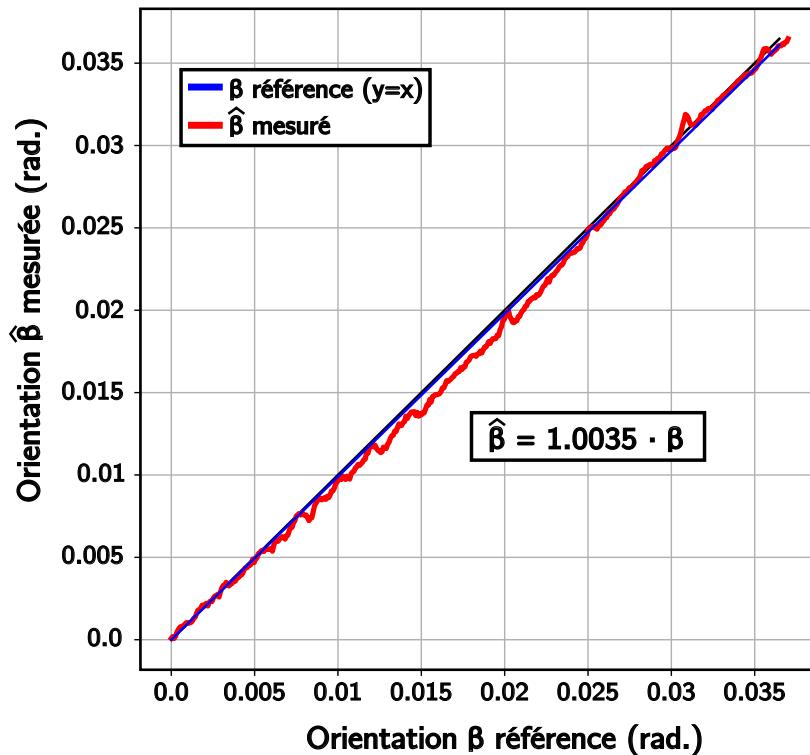


FIGURE 5.13 – Linéarité de la mesure de l'orientation hors-plan β sur une plage de 0.035 rad.

Le résultat de cette expérience est visible dans la figure 5.13 et montre un facteur d'erreur de l'ordre de 0.35 % sur la plage considérée (*i.e.* 136 μrad . sur la plage de 0.039 mrad. testée). Cette erreur est donc cohérente avec la résolution mesurée plus tôt. Cette erreur de linéarité pourrait être améliorée en revoyant l'assemblage du **dispositif expérimental B**. En effet, celui-ci implique un positionnement perpendiculaire de l'axe de l'actionneur par rapport à l'axe optique, qui n'est pas aisé

à mettre en place *a priori*. Par ailleurs, cette erreur de justesse remet en cause la bonne rotation de l'actionneur, celui-ci n'étant pas assuré d'effectuer une rotation parfaitement plane.

5.3.4 Validation de la plage de mesure 6DDL

Pour valider complètement la plage de mesure selon les six degrés de liberté, une dernière expérience est mise en œuvre, visant à comparer différents types de marqueurs utilisés dans le positionnement multi-DDL. Pour cela, le **dispositif expérimental C** avec la mire encodée de période 140 μm ainsi que l'objectif 50 mm sont à nouveau utilisés.

Pour générer une trajectoire évoluant dans toute la plage de mesure accessible, chaque degré de liberté est sollicité selon une sinusoïde d'amplitude, de fréquence et de déphasage différents qui sont visibles dans la figure 5.15 (en suivant des courbes de Lissajou). Cette méthode de génération de trajectoire garantit d'une part que la plupart de la zone de travail est balayée et d'autre part que les résultats de poses calculés sont bien homogènes dans toute cette plage.

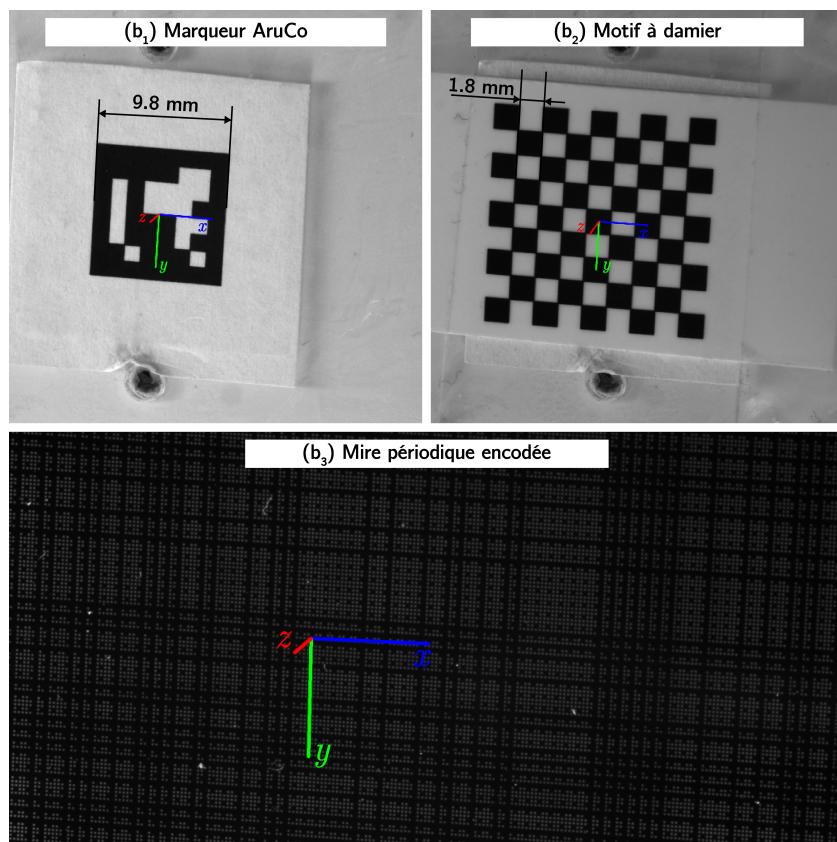


FIGURE 5.14 – Marqueurs utilisés pour l'essai de comparaison 6DDL avec (a₁) et (a₂) montrant les marqueurs ArUco et Damiers et (a₃) la mire de période 140 μm

La méthode présentée ici est comparée avec deux autres méthodes classiques de mesure de pose à savoir avec un marqueur de repérage ArUco (de taille totale de 9.8 mm) ainsi qu'avec un motif à damiers (dont les carrés font 1.8 mm de côté). Finalement, la mire périodique choisie est celle de période 140 µm. Une vue de la mise en place de ces différents marqueurs est visible dans la figure 5.14.

La plage de mesure balayée par les signaux sinusoïdaux est choisie pour conserver les marqueurs utilisés dans le champ de vision de la caméra. Ainsi, les translations selon les axes x, y et z sont fixées pour évoluer dans la plage $[-5, 5]$ mm, et les rotations sont fixées dans une plage de $[-10^\circ, 10^\circ]$ ($[-0.17, 0.17]$ rad.).

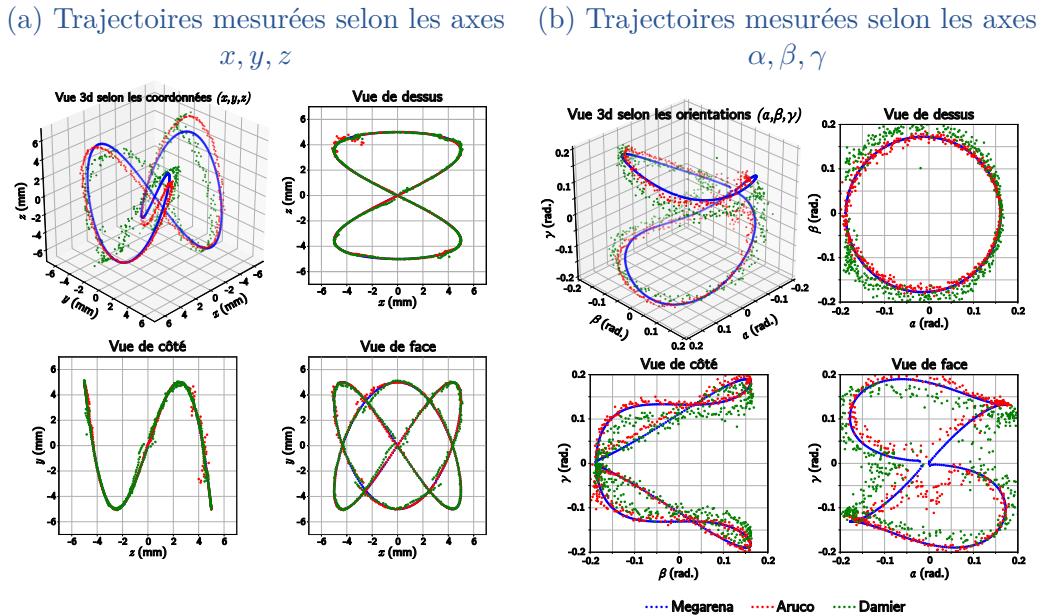


FIGURE 5.15 – Évaluation de la méthode de mesure de pose complète avec différentes sinusoïdes envoyées selon chaque axe. L’expérience est répétée avec une mire périodique encodée, un damier et un marqueur de repérage ArUco. Les deux sous-figures montrent les résultats en présentant une vue de l’évolution des marqueurs en translations (a) et en orientations (b).

Les résultats de cette expérience sont visibles dans la figure 5.15 qui présente différentes vues pour aider à la lecture de l’évolution du robot selon les six degrés de liberté.

La validation de la méthode proposée et sa capacité à mesurer correctement une pose 6DDL provient de la comparaison avec les autres méthodes. En comparant celles-ci entre elles, nous constatons que la méthode de mesure de pose par damier ainsi que celle par marqueur ArUco présentent un niveau de bruit élevé, là où la méthode de mesure par mire présente une courbe bien moins bruitée, en particulier pour la mesure des angles hors-plan β et γ .

Cependant ces résultats sont à mettre en perspective, la taille et le pavage de la mire périodique étant bien plus favorables à une mesure à grande résolution que les deux autres marqueurs employés.

Cette dernière expérience, plus qualitative, montre particulièrement la capacité de la méthode à être implantée dans divers environnements tout en garantissant une mesure de pose complète fidèle sur une grande plage de mesure.

5.4 ÉTUDE DE LA ROUSTESSE DE LA MESURE

Afin de compléter l'analyse expérimentale des performances de la méthode de mesure de pose, plusieurs essais, complémentaires aux simulations menées dans le [chapitre 4](#) sont mis en place, visant à éprouver la robustesse de celle-ci face à différents types de dégradations d'image.

5.4.1 Robustesse à la faible dynamique et au bruit

Un premier essai est effectué en conditions nominales, donc sans aucune dégradation des images acquises et en exploitant au maximum la dynamique de 4096 niveaux de gris alloués par la quantification de la caméra. Un premier essai étudiant le bruit de mesure ainsi que la résolution atteignable en translation est ainsi effectué et rejoint celui effectué dans la [section 5.2.2](#). Cet essai en conditions optimales sert de référence aux essais suivants, impliquant une dégradation des conditions d'acquisition d'images.

Le **dispositif expérimental A** est ainsi employé pour mener cette campagne expérimentale de robustesse de la méthode de mesure. La [figure 5.16.\(a₁\),\(a₂\)](#) montre cette utilisation optimale de la plage dynamique en présentant l'histogramme typique des images traitées en condition nominale ainsi qu'une partie de mire codée observée sous ces conditions (temps d'exposition de 10.5 ms à 20 images par seconde).

Le [tableau 5.4](#) présente les résultats de cette étude statique et montrent un niveau de bruit similaire à celui démontré plus haut (0.5 nm). Sous ces conditions un essai en résolution impliquant un signal carré de 1 nm envoyé par l'actionneur est également effectué, et un échantillon de ce créneau mesuré est présenté dans la [figure 5.16.\(a₃\)](#). Cette résolution mesurée de 1 nm ainsi que le bruit de mesure viennent appuyer la reproductibilité de la méthode de mesure de pose.

Afin d'éprouver au mieux la robustesse en conditions défavorables d'imagerie, un essai impliquant la plus faible dynamique de l'image est mis en place en représentant la démarche expérimentale décrite en condition nominale.

Pour effectuer cet essai, le temps d'obturation de la caméra est fixé à 0.5 ms, réduisant drastiquement la plage dynamique de l'image à 20 niveaux de gris. En comparaison avec l'essai effectué en conditions nominales impliquant environ 4000

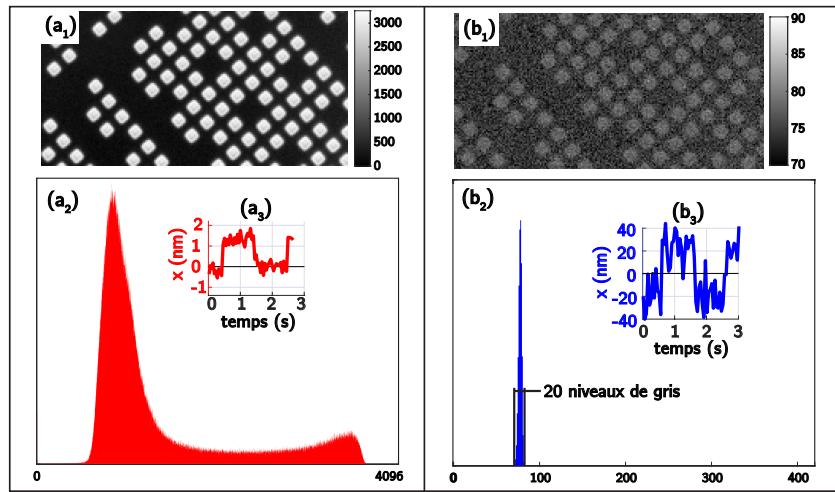


FIGURE 5.16 – Comparaison de la robustesse à différentes conditions d'éclairage.
 A gauche les essais réalisés en conditions nominales et à droite en faible éclairage.
 (a₁), (b₁) vues en détail des mires acquises, (a₂), (b₂) histogramme montrant la dynamique des images acquises. (a₃), (b₃) montrent les résolutions accessibles en fonction des différents paramètres d'éclairage

	Dynamique de l'image	STD selon l'axe x	STD selon l'axe y	STD selon l'orientation α
Conditions nominales	0 – 3754	0.57 nm	0.51 nm	1.43 µrad.
Conditions en éclairage faible	70 – 90	13.29 nm	13.85 nm	99.84 µrad.

TABLE 5.4 – Écart type de la mesure de position en configuration statique avec deux types d'éclairage, réalisés sur 20 s avec une fréquence d'acquisition d'images de 20 images/s

niveaux de gris où la mire est imagée, ces 20 niveaux de gris n'utilisent que 0.5 % de la plage allouée.

La figure 5.16.(b₁) montre qu'une fois l'image normalisée sur ces 20 niveaux de gris la mire est toujours observable. Comme la méthode de mesure de pose se base sur la périodicité des points et non sur leur contraste, cette faible plage dynamique impacte peu la méthode de mesure.

Cependant, et comme le montre le tableau 5.4 qui présente le bruit statique relevé dans ces conditions, un écart type de la mesure vingt fois plus important par rapport aux conditions nominales est mesuré. Dans ces conditions, une résolution de l'ordre de 40 nm est mesurée, comme présenté dans la sous-figure 5.16.(c₁).

5.4.2 Étude de l'impact du défaut de mise au point sur la mesure

La dernière expérience menée sur la robustesse de la méthode concerne l'étude du flou de profondeur de champ. L'utilisation de la microscopie dans le domaine de la microrobotique constraint les systèmes optiques utilisés en allouant des profondeurs de champ très faibles. L'objectif utilisé tout au long de ces expériences (Mitutoyo 10× APO Plan) possède ainsi un nombre d'ouverture de 0.28 avec une profondeur de champ de 3.5 µm annoncée par le constructeur. Cette faible profondeur de champ réduit les possibilités d'étude de systèmes microrobotiques, puisque ceux-ci doivent évoluer dans des plages de profondeur fortement réduites.

Pour évaluer la robustesse aux variations de mise au point de la méthode de positionnement, le **dispositif C** est utilisé avec une mire périodique codée de période physique 9 µm et l'objectif 10× Mitutoyo mentionné plus haut. Le robot série est utilisé en effectuant une translation de la mire sur une plage de 180 µm en configurant la caméra pour une acquisition d'image tous les 3 µm.

Une fois les images acquises, celles-ci sont post-traitées en étudiant l'indice de focalisation des images ainsi que la pose mesurée. Cette mesure de focalisation est réalisée en utilisant un indice de variation de niveaux de gris, présenté par [Krotkov88] et encore largement utilisé aujourd'hui ([Pertuz13]). L'équation utilisée pour mener ce calcul utilise la variance de l'intensité des pixels comme suit :

$$\sigma^2 = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (I(i, j) - \mu)^2 \quad (5.1)$$

où μ est la valeur moyenne de toute l'image, et $I(i, j)$ est l'intensité du pixel considéré. Plus l'image est contrastée et donc dans le plan focal, plus la variance calculée avec cette équation augmente. La figure 5.17 montre le résultat de cette étude en présentant la variance normalisée des images acquises en fonction de la distance de la mire par rapport au plan focal.

Cette figure montre en vert la plage où la pose de la mire a été mesurée avec succès. Cette plage, de 120 µm, montre la robustesse de la méthode à ce genre de problème d'acquisition d'image et étend grandement la plage de positionnement en profondeur de la mire par rapport aux 3.5 µm données par l'objectif. Cette robustesse offre ainsi plus de souplesse sur le positionnement d'actionneurs ou de robots le long de l'axe optique en garantissant une mesure fidèle sur une plage 30 fois plus grande que celle prévue par construction de l'objectif.

Cette extension de la profondeur de champ reste néanmoins variable et dépend de plusieurs facteurs. Parmi ceux-ci, la fonction de transfert de modulation (MTF) de l'objectif par rapport à la fréquence spatiale de la mire joue un rôle prédominant en donnant la limite à partir de laquelle deux points de la mire se chevauchent.

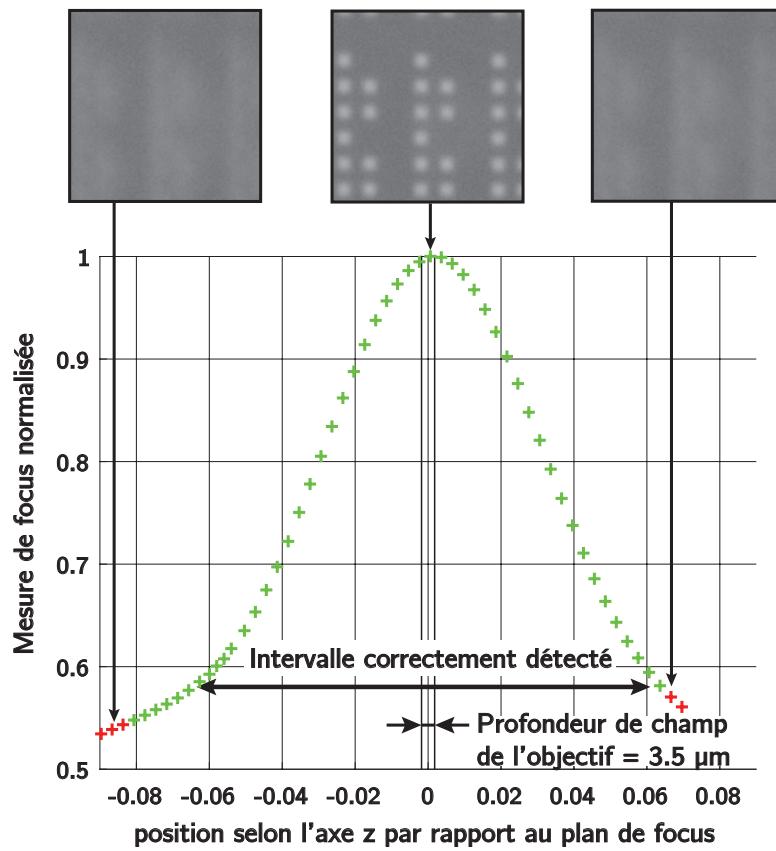


FIGURE 5.17 – Variance normalisée de l'image calculée en fonction de la translation de la mire le long de l'axe optique. Vues de détail des mires acquises à différentes positions selon l'axe optique

5.5 CONCLUSION

Ce chapitre a montré les performances expérimentales de la méthode de mesure de pose présentée pendant la première partie de ce manuscrit. En mettant en place trois dispositifs expérimentaux, nous avons montré que la méthode présente une grande résolution de mesure, notamment en translation en démontrant une résolution de 1 nm. La mesure de l'orientation planaire α a quant à elle montré une mesure résolue à 4.5 μ rad. Cette étude de mesure de pose planaire a ensuite été étendue à la mesure de pose complète et a ainsi montré une résolution en orientation hors-plan de l'ordre de 100 μ rad. Enfin, une étude qualitative de la méthode de mesure portée selon l'axe z a été effectuée, montrant une résolution d'au moins un dixième de millimètre.

Au-delà de l'étude de résolution de la mesure, une étude selon chaque degré de liberté de la justesse de la méthode de mesure a également été menée. Celle-ci a ainsi montré une erreur de linéarité de l'ordre de 0.4 % en translation planaire (sur une plage de 9 μ m), de 0.004 % pour l'orientation α (sur une plage de 2π rad.)

et de 0.35 % pour les orientations hors-plan (sur une plage de 39 mrad.). Cette étude de justesse et de plage de mesure accessible a été étendue à une étude 6DDL en mettant en place une comparaison avec d'autres marqueurs de repérage. Cette étude a ainsi montré la grande justesse et la grande résolution fournie par la méthode par rapport à d'autres marqueurs couramment employés.

La validation de la méthode de mesure à l'aide des mires Megarena a fait l'objet d'une publication dans la revue *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, qui présente la méthode de mesure de pose planaire à grand rapport plage sur résolution ainsi que la validation expérimentale exposée dans ce chapitre [André20b].

Finalement, et pour compléter les simulations numériques menées sur la robustesse de la méthode, deux expériences visant respectivement à montrer la robustesse de la méthode au bruit et au défaut de mise au point ont été effectuées. Ces expériences ont ainsi montré que la méthode était grandement robuste aux défauts d'éclairage (en assurant une mesure même sur une dynamique de 20 niveaux de gris) et au bruit causé par ces défauts d'acquisition d'image. La méthode a également montré sa résilience aux défauts de mise au point, en montrant une plage de mesure robuste à des défauts de positionnement en profondeur trente fois plus importante que la profondeur de champ des objectifs de microscope.

Cette campagne expérimentale menée sur la méthode de mesure de pose par mires périodiques a été réalisée grâce à un outil logiciel permettant d'effectuer facilement toutes ces études. Le chapitre suivant s'intéresse ainsi à la présentation de cet outil logiciel permettant à la fois de réaliser les essais expérimentaux présentés ici et d'être déployé pour effectuer l'étude de divers systèmes microrobotiques.

Chapitre 6

Bibliothèque logicielle Vernier

6.1	Objectifs de la bibliothèque logicielle	112
6.2	Fonctionnalités de la bibliothèque logicielle	113
6.3	Architecture de la bibliothèque logicielle	114
6.3.1	Hiérarchie des classes de mesure de pose	115
6.3.2	Hiérarchie des classes de génération des mires périodiques	117
6.3.3	Hiérarchie des classes de tests unitaires	117
6.4	Mires périodiques proposées par la bibliothèque logicielle	120
6.4.1	Définition des mires sous forme de fichier .json	120
6.4.2	Types de mires périodiques utilisables avec la bibliothèque logicielle	120
6.4.3	Performances du code	123
6.5	Conclusion	124

La création d'un logiciel dédié à la mesure de pose par mires périodiques est motivée par plusieurs éléments tels que l'étude et la validation systématique des méthodes présentées dans la première partie, la réduction du temps de calcul nécessaire au traitement des données expérimentales ou encore les applications de la méthode que nous verrons dans le chapitre suivant.

La première partie de ce chapitre présente ainsi les différents objectifs motivant la création d'une bibliothèque logicielle dédiée. La suite de ce chapitre décrit le cahier des charges établi avant de montrer son application à la création de la bibliothèque logicielle. La fin de ce chapitre traite de l'implémentation des différentes conceptions de mires périodiques étudiées.

6.1 OBJECTIFS DE LA BIBLIOTHÈQUE LOGICIELLE

La création d'une bibliothèque logicielle dédiée à la mesure de pose par mires périodiques est motivée par des besoins différents, répondant également à des objectifs différents.

Parmi ces objectifs, le premier est d'effectuer la validation des performances des mires périodiques. En effet, le chapitre précédent traitant de l'étude des performances des mires périodiques sur plusieurs dispositifs a mis en avant le besoin de créer un outil facilement intégrable dans des projets logiciels de contrôle de systèmes. Les différents chapitres méthodologiques de la première partie de ce manuscrit ont quant à eux mis en avant le besoin de créer un outil assurant une génération la plus exacte possible de mires périodiques pour effectuer des simulations. Ainsi ces besoins de validation de la méthode par le biais de simulations et d'expérimentations motivent la création d'un outil unique de génération et de mesure de pose de mires périodiques.

Un autre besoin motivant cette création provient de la diversité des mires périodiques. Le [chapitre 4](#) montrait la diversité possible des mires périodiques encodées en fonction du choix de la séquence binaire intégrée. Couplée aux mires périodiques simples (définies seulement par leur période physique), cette diversité montre la nécessité de créer un outil rassemblant ces différentes conceptions de mires périodiques.

Sur le plan applicatif, la mesure de pose par mire périodique ainsi que son emploi approprié au domaine de la microrobotique soulèvent d'autres besoins tels qu'une intégration facile et transparente dans d'autres projets logiciels. Par exemple, les projets d'asservissement visuel requièrent une boucle fermée entre différents éléments tels que des actionneurs, des caméras et la méthode de mesure de pose. L'effort porté sur la création de bibliothèques logicielles a montré qu'il s'agissait d'une clé pour répondre à ces besoins applicatifs. Par exemple, la bibliothèque C++ des marqueurs ArUco [[Romero-Ramirez18](#)] a montré en quoi le portage logiciel d'une méthode était pertinent pour son déploiement dans de multiples applications. De même la bibliothèque logicielle VISP [[Marchand05](#)] a montré comment intégrer facilement l'asservissement visuel dans diverses appli-

cations. Ainsi la bibliothèque logicielle consacrée aux mires périodiques tente de répondre à ce besoin de mesure de pose à l'échelle microscopique en fournissant un outil facile d'intégration pour les applications en microrobotique.

Bien que le [chapitre 4](#) ait montré comment effectuer une mesure de pose avec un rapport plage sur résolution de l'ordre de 10^8 , son utilisation implique que la mire pave tout le champ de vision de la caméra. Cependant certaines applications offrent trop peu d'espace pour intégrer une mire encodée complète, motivant la conception d'autres motifs de mires périodiques n'occupant qu'une partie du champ de vision. Ce nouveau type de mires périodiques vient ainsi renforcer ce besoin de rassembler toutes ces conceptions dans un même outil logiciel.

6.2 FONCTIONNALITÉS DE LA BIBLIOTHÈQUE LOGICIELLE

L'analyse des besoins de cette bibliothèque logicielle met en avant deux fonctionnalités principales, à savoir d'une part la mesure de pose de mires périodiques et d'autre part la génération d'images de synthèse de mires périodiques à des poses déterminées. Une dernière fonctionnalité essentielle de la bibliothèque logicielle est sa capacité à fournir des résultats aussi précis que possible. À partir de ces trois fonctionnalités principales, il est dès lors possible d'établir un cahier des charges simplifié en étudiant les différentes fonctionnalités techniques à partir des fonctionnalités principales. Après formulation de ces fonctions, celles-ci sont mises en forme dans le [tableau 6.1](#).

L'élaboration de ce cahier des charges montre ainsi quelle direction prendre pour programmer la bibliothèque logicielle et laisse entrevoir une hiérarchie possible pour ce projet. En effet, les trois fonctions principales font apparaître deux grandes classes, à savoir une pour la mesure de pose et l'autre pour la génération de mires périodiques. La dernière fonction principale fait quant à elle apparaître une agrégation des deux fonctions principales précédentes, celle-ci utilisant une boucle de génération et de mesure pour valider le bon fonctionnement du code. À partir de ce cahier des charges montrant les fonctionnalités attendues de la bibliothèque logicielle, il est dès lors possible d'effectuer la programmation de celle-ci.

Pour identifier cette bibliothèque logicielle dédiée à la mesure par mires périodiques, nous choisissons de lui donner le nom de bibliothèque logicielle Vernier, en référence à l'inventeur franc-comtois Pierre Vernier qui découvrit au XVII^{ème} siècle comment augmenter la résolution des instruments de mesure de son époque. La suite de ce manuscrit emploie ainsi indifféremment les termes bibliothèque logicielle ou bibliothèque Vernier pour désigner cet outil.

FP1	Obtenir la pose de mires périodiques placées sur un système à étudier
FT1.1	La mesure de pose doit s'effectuer simplement pour l'utilisateur en un nombre minimal de lignes de code à partir d'une image
FT1.2	La mesure de pose doit être possible avec toutes les conceptions de mires périodiques
FT1.3	La bibliothèque logicielle doit être intégrable en tant qu'outil dans un projet logiciel plus grand
FT1.4	L'utilisateur doit avoir un accès possible aux résultats intermédiaires de la mesure de pose (imagettes, plans de phase etc.)
FP2	Générer des fichiers de définition des mires périodiques
FT2.1	Toutes les conceptions de mires périodiques doivent être générables
FT2.2	Les mires générées doivent être réutilisables facilement pour en vue de leur fabrication ou impression
FP3	Synthétiser des images de mires périodiques à une pose déterminée
FT3.1	Toutes les conceptions de mires périodiques doivent être synthétisables à une pose déterminée pour assurer la validité des résultats de la méthode de mesure de pose
FT3.2	Chaque élément de la bibliothèque logicielle doit être testé et validé indépendamment

TABLE 6.1 – Analyse fonctionnelle de la bibliothèque dédiée à l'emploi des mires périodiques

6.3 ARCHITECTURE DE LA BIBLIOTHÈQUE LOGICIELLE

Cette bibliothèque logicielle fait ainsi apparaître trois classes assez distinctes à travers les trois fonctions principales dégagées de l'étude fonctionnelle. Cette section s'intéresse à la hiérarchie de la bibliothèque logicielle programmée et répondant à ce cahier des charges.

Pour programmer celle-ci, nous choisissons d'utiliser le langage compilé C++ car offrant une grande modularité grâce à sa structuration en objets. Ce langage de programmation implique par ailleurs une compilation au préalable du code, rendant celui-ci plus performant que ses homologues interprétés (comme c'est le cas pour les langages Python ou Matlab).

6.3.1 Hiérarchie des classes de mesure de pose

Ainsi la première famille de classes de cette bibliothèque logicielle répond à la première fonction principale du cahier des charges, à savoir effectuer une mesure de pose à partir d'une image de mire périodique quelconque de manière aisée pour l'utilisateur.

Pour répondre à la première fonction technique indiquant un nombre minimal de lignes de codes pour effectuer la mesure de pose, nous choisissons de structurer le code en trois étapes :

1. Création d'un objet de mesure de pose
2. Calcul de la pose à partir d'une image d'entrée
3. Récupération de la pose (ou d'autres éléments intermédiaires, *cf.* FT1.4)

La figure 6.1 présente l'implémentation de cette structure en trois étapes. La création de l'objet de mesure de pose est effectuée à partir d'une classe mère `PatternDetector` et d'un fichier de configuration. La deuxième étape de ce processus est remplie par la méthode `compute` qui prend en entrée une image de mire périodique à traiter. La récupération de la pose mesurée est réalisée à l'aide de la classe `Pose` qui contient toutes les informations relatives à l'image de mire traitée.

```
Vernier::PatternDetector* detector;
detector = Vernier::Detector::loadFromJSON("config.json");
detector->compute(imageMire);
Vernier::Pose pose = detector->getPatternPoseInCamera()
pose.getCameraPatternTransformation();
```

FIGURE 6.1 – Code minimal présentant l'utilisation de la bibliothèque logicielle pour effectuer la mesure de pose d'une image de mire périodique à partir d'un fichier de configuration

Au-delà de rendre la mesure de pose par mire périodique plus facilement accessible, cette structuration en trois étapes répond également à la fonction technique FT1.3. En effet, la création au préalable de l'objet utilisé pour effectuer la mesure de pose offre un gain de performances notable, car tous les éléments utiles à la mesure de pose sont mis en mémoire pendant cette création. Ainsi l'utilisateur peut effectuer la mesure de pose en donnant en entrée simplement une image dans une autre partie du code, minimisant ainsi le temps de calcul de pose. Cette structuration en trois étapes offre également la possibilité de stocker toutes les informations utiles à la mesure de pose effectuée dans la deuxième étape qui restent accessibles dans la dernière étape en fonction des besoins de l'utilisateur (à l'aide de la classe `Pose` par exemple, comme présenté dans la figure 6.1).

La seconde fonction technique de cette classe implique d'implémenter toutes les conceptions de mires périodiques étudiées jusqu'à présent dans cette thèse. Par ailleurs, un nouveau type de mire n'occupant plus tout le champ de vision de la

caméra est créée. Cette nouvelle conception est motivée par le besoin d'intégrer un système de mesure grandement résolu dans des espaces très contraints. Certains systèmes microrobotiques requièrent également une mesure de pose de plusieurs éléments d'intérêt inclus dans une même image. Ce besoin motive ainsi la création d'un nouveau type de mires périodiques, à la fois compactes et résolues. De ce point du cahier des charges émane ainsi deux nouveaux types de mires périodiques, nommés respectivement *HP Codes* et *Mires périodiques Bitmap*. La section 6.4 ainsi que l'annexe B.3 présentent plus en détail ce nouveau type de mires périodiques.

Pour implémenter tous ces motifs de mires dans la bibliothèque logicielle, nous mettons en place une hiérarchie des différentes classes de mires périodiques. Celle-ci fait appel au concept de fabrique qui emploie le polymorphisme autorisé par le C++. L'utilisateur renseigne ainsi simplement le type de mire employé en utilisant une classe mère **Detector** qui appelle ensuite la bonne classe fille selon le type de mire, comme illustré dans la figure 6.2. Cette hiérarchie est suivie par une classe fille **PeriodicPatternDetector**, qui contient toutes les méthodes nécessaires pour effectuer une mesure de pose simple (telle que décrite chapitre 2), de laquelle découle les autres classes filles utilisant à la fois ces méthodes de mesure de pose ainsi que celles spécifiques à chaque type de mire (comme les imagettes de phase ou les cellules codantes pour les mires Megarena). Cette hiérarchie basée sur une classe mère englobant toutes les méthodes de mesure offre ainsi la possibilité d'utiliser la bibliothèque avec très faible nombre de lignes de code, comme illustré dans la figure 6.1.

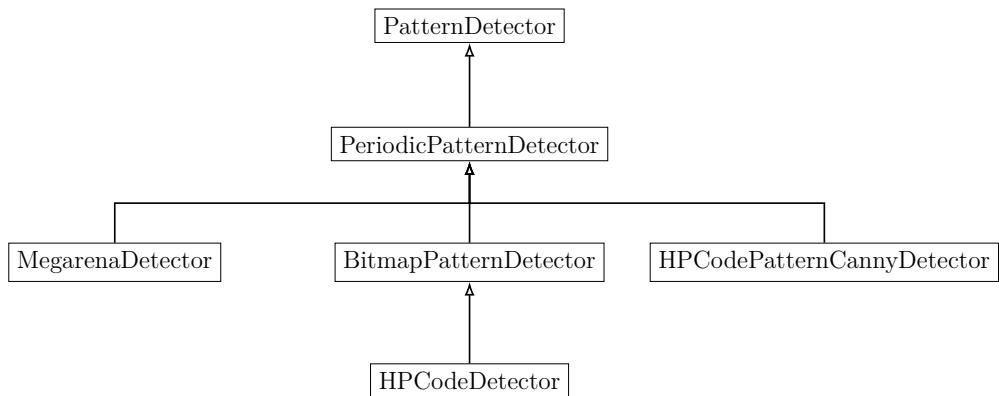


FIGURE 6.2 – Hiérarchie des deux branches principales de la bibliothèque Vernier

Enfin, la fonction technique FT1.4 implique la création de méthodes appelables facilement pour récupérer la pose ou toute autre information pertinente à la mesure telles que les séquences codées, les équations des plans de phase ou encore les imagettes de phase utilisées pendant la mesure de pose.

Toutes ces fonctions techniques motivent d'autant plus la programmation de cette bibliothèque logicielle en utilisant l'avantage du découpage en classes offerte par la programmation en C++. La figure 6.3 décrit le cheminement algorithmique de calcul de pose effectué par la bibliothèque Vernier, en prenant pour exemple une

mire périodique Megarena. Ce cheminement montre ainsi l'intérêt de l'encapsulation du code en classes distinctes, celles-ci étant appelées plusieurs fois au cours du calcul de pose.

Cette figure montre également l'utilité de hiérarchiser les différentes méthodes de calcul de poses dépendantes du type de mire employé. Dans le cas présenté, la classe de mesure de pose de mire encodée Megarena constitue un ajout par rapport à sa classe mère dont elle dérive, à savoir celle de mesure de pose de mires périodiques simples.

6.3.2 Hiérarchie des classes de génération des mires périodiques

La seconde fonction principale de la bibliothèque logicielle fait apparaître le besoin de générer des mires périodiques en vue de leur fabrication. Ces mires périodiques ayant vocation à être imprimées sur des matériaux divers tels que des plaques de verre, de silicium ou sur du papier, il est nécessaire de fournir les définitions de ces mires sous forme de plan.

Afin de répondre à la fonction technique FT2.1 indiquant la possibilité de générer toutes les conceptions de mires périodiques étudiées ici, une hiérarchie avec une classe mère similaire à celle décrite pour la mesure de pose est mise en place en utilisant à nouveau le concept de fabrique. Ainsi l'utilisateur doit simplement fournir le type de mire à générer et ses paramètres au moment de la création de cette classe mère appelée `Layout`.

La [figure 6.4](#) présente la hiérarchie de cette branche, avec notamment la classe `PeriodicPatternLayout` qui embarque avec elle toutes les méthodes nécessaires à la génération des mires périodiques. De cette classe mère découlent ensuite toutes les autres conceptions de mires périodiques avec leurs méthodes associées telles que la taille du code binaire à intégrer par exemple pour les mires Megarena.

À cette hiérarchie de classes de génération se rajoute une classe dédiée à l'enregistrement des mires générées, pour répondre au point FT2.2 du cahier des charges. Cette classe, indépendante de la hiérarchie de génération, offre la possibilité d'enregistrer les définitions des mires générées sous forme de fichiers facilement réutilisables dans des logiciels de CAO (sous forme de fichier `.svg` par exemple). L'intégration de cette fonction technique assure ainsi à l'utilisateur une fabrication facilitée des mires périodiques qui sont alors intégrables dans des projets plus larges.

6.3.3 Hiérarchie des classes de tests unitaires

La dernière fonction principale de la bibliothèque logicielle implique de générer des mires périodiques à une pose déterminée et de renvoyer le résultat sous forme d'images. En effet c'est grâce à cette synthèse d'images de mires que sont effectuées toutes les simulations présentées dans les chapitres de la première partie

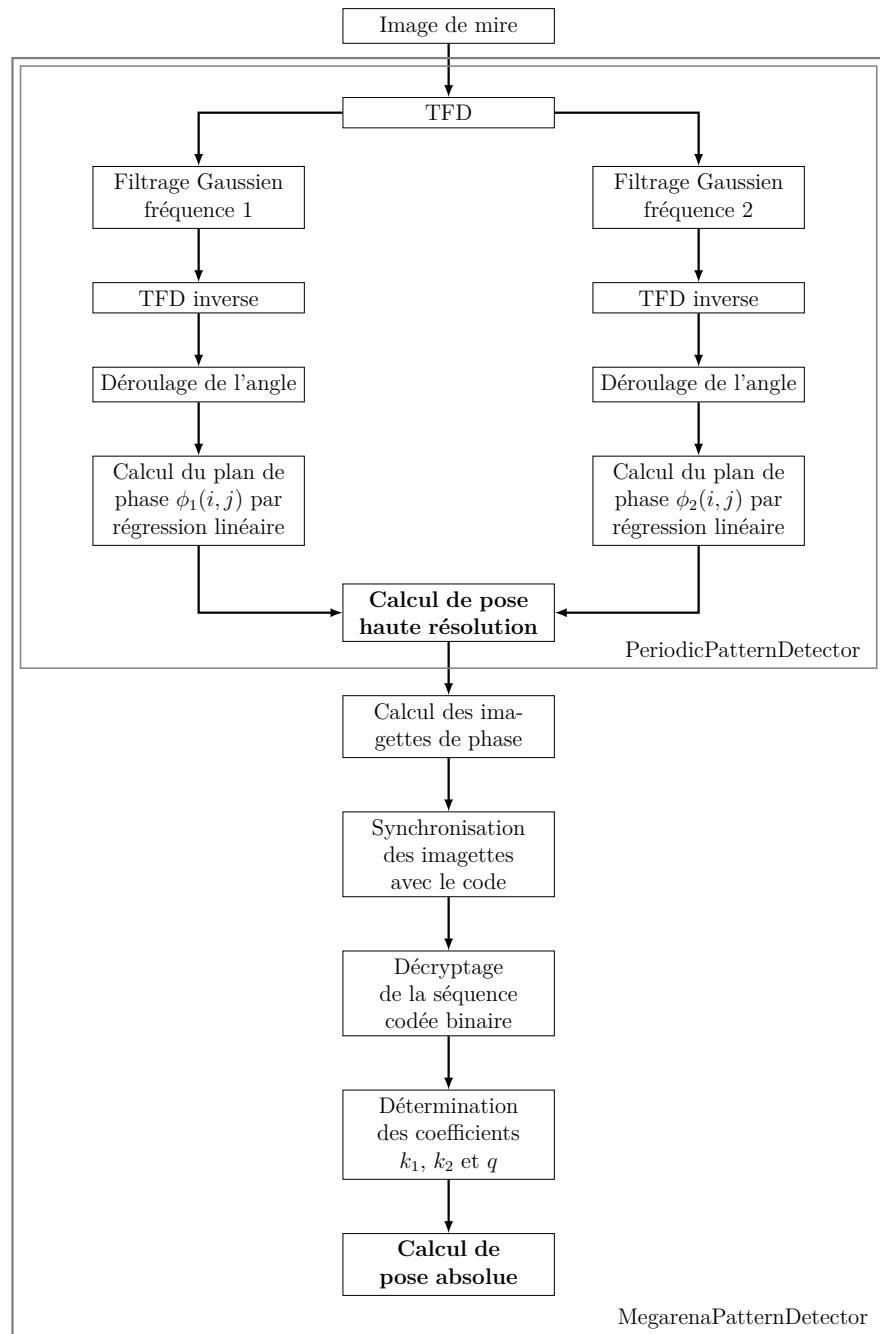


FIGURE 6.3 – Déroulement algorithmique du calcul de pose absolue par mire Megarena, montrant les différentes classes implémentées et utilisées pour mener à bien la mesure de pose.

de ce manuscrit. Au-delà d'offrir un outil de simulation, cette hiérarchie de classe offre la possibilité d'effectuer des tests automatiques avec les classes associées à la mesure de pose pour assurer la validité des résultats.

Pour répondre à la première fonction technique FT3.1, les mires sont simulées en suivant la méthode décrite section 2.2.2 à l'aide de l'équation (2.21). La hiérarchie

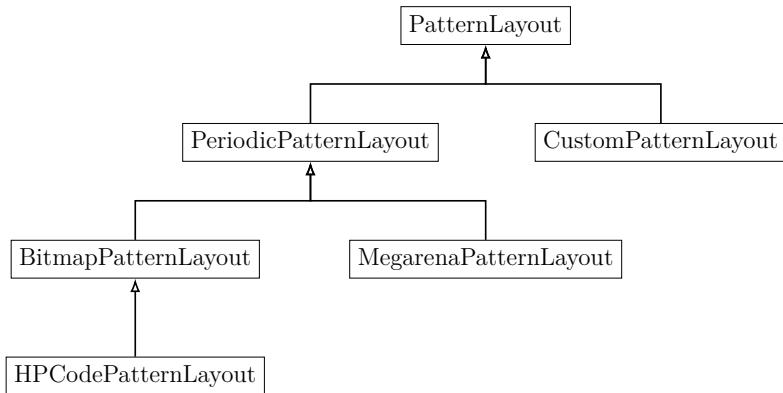


FIGURE 6.4 – Hiérarchie de la branche de génération de mires de la bibliothèque Vernier

de classes présentées dans la section précédent, `PatternLayout` est à nouveau utilisée, car fournissant une définition des mires périodiques à générer. Cependant, au lieu de faire appel à la classe d'enregistrement de la position des points, une autre classe indépendante est créée. Cette classe, nommée `PatternRenderer`, embarque avec elle toutes les équations de génération d'images de synthèse de mires périodiques. Le résultat de cette fonction de création de mires périodiques est ensuite stocké dans un tableau sous forme de flottants à 64 bits afin de minimiser l'impact de l'échantillonnage.

La dernière fonction technique de ce cahier des charges implique de vérifier les résultats annoncés par le code. Cette étape de vérification est primordiale en programmation et fait notamment appel au concept de TDD (pour *Test Driven Development*, ou Développement Piloté par les Tests). Cette philosophie de programmation implique qu'à chaque classe créée, un test unitaire correspondant et vérifiant le bon fonctionnement de la classe est rédigé. Pour cela, les deux grandes classes décrites précédemment de génération et de mesure de pose sont utilisées conjointement pour fournir une mesure exacte (au bruit numérique près). La figure 6.5 présente le cheminement d'un de ces essais unitaires, effectué ici sur une classe de mesure de pose. Une pose aléatoire est envoyée à la branche de génération de mire qui la simule avant d'être mesurée par la classe testée. La différence de pose entre celle envoyée et celle mesurée indique directement si la méthode a bien fonctionné via l'erreur entre ces deux poses. Si celle-ci est de l'ordre du bruit numérique, l'implémentation de la classe est considérée valide.

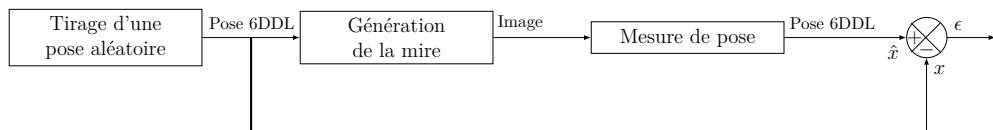


FIGURE 6.5 – Test unitaire pour la fonction de mesure de pose d'une mire périodique

Au-delà de la vérification du bon fonctionnement de chacune des méthodes de mesure de pose comme présenté dans l'exemple de la [figure 6.5](#), ces tests unitaires sont également effectués sur chacune des classes utilisées dans la méthode de détection en ayant recours le plus possible à des tirages aléatoires pour éviter de tester une configuration favorable à l'algorithme.

6.4 MIRES PÉRIODIQUES PROPOSÉES PAR LA BIBLIOTHÈQUE LOGICIELLE

6.4.1 Définition des mires sous forme de fichier .json

Pour rendre l'accès à la mesure de pose par mires périodiques aussi facile que possible aux différents utilisateurs, et rendre également le code aussi compact que possible, nous avons choisi de déporter les paramètres des mires périodiques dans des fichiers tiers, écrits au format `.json` qui sont appelés au moment de la création des différentes fabriques (mesure de pose ou génération). Cette définition des mires en dehors du code permet d'appeler une seule classe au début de celui-ci et de lui donner en entrée ce fichier de définition (comme illustré dans la [figure 6.1](#)). Tous ces fichiers sont formatés de la même manière, de telle sorte que la suite du programme utilise la bonne classe de mire périodique associée à ce fichier `.json`. Ce format utilisé par la bibliothèque logicielle est présenté en [annexe B.2](#), donnant plus de détails sur le contenu de ces fichiers de configuration qui font apparaître notamment le type de mire employé, une courte description, la période physique de la mire ou encore la taille de la séquence binaire pour le cas des mires Megarena. Ces fichiers au format `.json` permettent ainsi de stocker des informations propres à chaque type de mire périodique.

6.4.2 Types de mires périodiques utilisables avec la bibliothèque logicielle

Les fonctions techniques FT1.2 et FT2.1 impliquent de pouvoir utiliser tous les types de mires périodiques conçues tout au long du manuscrit. Par ailleurs, le début de ce chapitre faisait apparaître le besoin de créer un nouveau type de mires périodiques qui ne pave plus tout le champ de vision de la caméra. Grâce au formatage des caractéristiques de chaque mire sous forme de fichier `.json`, la bibliothèque logicielle assure de pouvoir employer toutes ces conceptions. La suite de ce chapitre résume ainsi tous les types de mires périodiques utilisables avec la bibliothèque logicielle.

Mires périodiques simples

La bibliothèque Vernier propose ainsi de mesurer et de générer dans un premier temps des mires périodiques simples, qui ne sont définies que par leur période physique λ . Comme expliqué dans la première partie de ce manuscrit, ce type de mires et surtout employée comme base de calcul pour effectuer la mesure de pose grandement sous-pixellique ou pour de l'étalonnage de caméra.

Mires périodiques encodées Megarena

De cette classe de mires périodiques simples découle la classe fille des mires périodiques encodées telles que définies dans le [chapitre 4](#). La bibliothèque logicielle propose ainsi d'effectuer à la fois leur génération et leur mesure de pose à partir d'un nombre minimal d'informations à rentrer pour l'utilisateur dans le code. Celles-ci sont donc définissables simplement à partir de leur période physique et du nombre de bits utilisés pour générer la séquence binaire intégrée à la mire (comme illustré plus haut à travers le formatage `.json`)

Mires HP Codes

Pour répondre au besoin de créer un nouveau type de mires périodiques compact, une nouvelle conception reprenant les avantages des marqueurs de repérage est étudiée. Cette conception reprend ainsi les avantages des marqueurs QR Codes [Soon08] qui sont formés de carrés blancs et noirs entourés de 3 sous-marqueurs de localisation. Dans le cas des QR Codes, la matrice binaire au centre de ces sous-marqueurs embarque avec elle une information codée comme un lien vers un site web par exemple. Ce type de conception de marqueurs est notamment choisi grâce à l'évolution constante des performances des algorithmes de décodage dédiés à ces types de marqueurs [Belussi11 ; Gu11 ; Klimek13]. Leur détection et leur décodage se font en deux étapes avec tout d'abord la mesure de pose du QR Code dans l'image grâce aux trois marqueurs de localisation, avant d'effectuer une binarisation pour décoder la matrice embarquée au centre du marqueur. Dans cet état d'esprit d'utiliser deux types d'information sur un même marqueur de repérage, un nouveau type de marqueur à haute résolution, nommé HP Code (pour *High Precision Code*) a été développé.

La [figure 6.6](#) montre le résultat de cette conception qui reprend les trois marqueurs de localisation des QR Codes pour effectuer la mesure de pose grossière du marqueur dans l'image en le couplant à une mire périodique à grande résolution intégrée à la place des matrices binaires utilisées dans les QR Codes.

Le système de mesure résultant offre ainsi une grande versatilité en pouvant être intégré sur diverses applications où il n'est pas possible d'utiliser une mire périodique codée comme présentée dans le [chapitre 4](#), qui utiliserait une surface bien plus grande que le champ de vision offert par la caméra. De par leur faible taille, il est également possible de placer plusieurs HP Codes dans le champ de vision d'une seule caméra, répondant ainsi au besoin de mesurer la pose de plusieurs éléments d'intérêt à partir d'une seule image.

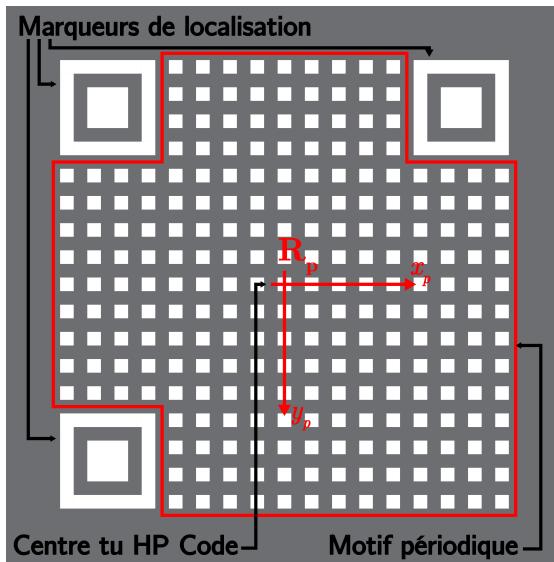


FIGURE 6.6 – Conception d'un marqueur de repérage grande précision, nommé HP Code avec ses 3 marqueurs de localisation formant un repère orthonormé ainsi que le motif périodique embarqué sur le HP Code

Comme présenté sur la figure 6.6, le motif périodique présente 17 périodes qui assurent une mesure de la pose résolue au millième de pixel tout en offrant une compacité du HP Code et un repérage absolu dans le champ de vision de la caméra grâce au repère créé par les trois marqueurs de localisation. L'annexe B.3 détaille les étapes de conception ainsi que la méthode de mesure de pose dédiée à ce type de mires périodiques.

Cependant, là où la détection des marqueurs de localisation des QR Codes s'effectue en ayant recours à la détection des contours des carrés imbriqués, la méthode utilisée ici fait appel au concept d'imagettes de phase présenté dans le chapitre 4 pour positionner de manière robuste le HP Code dans l'image complète. L'annexe B.3 présente en détail la conception, la méthode de mesure de pose à partir du concept d'imagettes de phase ainsi que les performances de ce type de mires périodiques.

Mires périodiques Bitmap

Un dernier type de mires périodiques dérivé du HP Code, présentant une plus grande modularité sur sa conception est ajouté à cette famille de mires périodiques. Ce nouveau type de mires, généré à partir d'un fichier bitmap indiquant la position des points absents de la mire périodique se passe ainsi des marqueurs de localisation utilisés sur les HP Codes. La mesure de la position absolue de ces mires sans marqueurs de localisation emploie alors pleinement le concept d'imagettes de phase pour effectuer la mesure. La figure 6.6 montre en comparaison du HP Code présenté plus haut ce nouveau motif de marqueur périodique. Certains points de cette mire sont retirés de manière arbitraire (en veillant à conserver une densité des points

suffisamment importante pour garantir une mesure résolue) en suivant un motif fixé au préalable. Ainsi les HP Codes sont un cas dérivé de mire bitmap car suivant un motif fixé au préalable, ce qui justifie leur place dans la hiérarchie du code présentée dans la [figure 6.2](#) et la [figure 6.4](#).

6.4.3 Performances du code

Grâce à la partie du code dédiée aux tests unitaires, il est possible de caractériser les performances du code en matière de temps de calcul, étant donné que les performances en termes de résolution ont déjà été discutées au travers des simulations effectuées dans les chapitres précédents.

L'implémentation logicielle a été pensée pour utiliser autant que possible une complexité en $O(n \log n)$ et limiter le temps de calcul en s'alignant sur la complexité de la bibliothèque FFTW qui effectue les transformées de Fourier discrètes rapides selon cette complexité. Cette architecture n'emploie cependant pas le principe de *multi-threading* ou d'exploitation de la carte graphique qui sont des pistes d'amélioration de la bibliothèque actuelle.

L'étude des performances de la bibliothèque montre une fréquence de calcul suffisamment importante pour que la bibliothèque soit utilisée à des fins d'asservissement visuel en considérant des images de taille 512×512 comme le montre le [tableau 6.2](#). En effet, en considérant l'emploi d'une mire codée de type Megarena de taille imagée 512×512 , une fréquence de 25 images par seconde est atteinte.

Taille de l'image	256×256	512×512	1024×1024	2048×2048
Méthode employée				
Mire périodique	6.4	22.97	110.78	416.4
Mire Megarena	10.32	38.44	173.59	697.53
Mire Bitmap	27.19	109.07	467.81	1833.28
Mire HP Code	29.07	117.18	478.59	1887.5

TABLE 6.2 – Temps de calcul nécessaire (en ms) pour mesurer la pose d'une image de mire en fonction de son type et de sa taille, en millisecondes.

Par ailleurs ce tableau montre que la robustesse et la résolution de détection des mires bitmaps et HP Codes s'effectuent au détriment du temps de calcul de pose. En effet, comme précisé plus haut, cette méthode requiert de calculer l'imagette de la mire avec un filtre spectral très serré, augmentant la robustesse de détection de la mire dans l'image, avant d'effectuer à nouveau le calcul de pose sur l'imagette acquise avec un filtre spectral moins sélectif afin d'obtenir la meilleure résolution possible (voir [annexe B.3](#)).

6.5 CONCLUSION

Une fois ces essais en performances réalisés et les tests unitaires validés, la bibliothèque est compilée sous forme de fichier .dll qui est implantable facilement dans toutes les applications utilisant du C++ ou pouvant appeler ce type de fichier. Ainsi un portage Matlab a été effectué pour rendre plus accessible cette bibliothèque logicielle. Un autre portage pour le langage Python a également été réalisé récemment via l'encadrement d'un stage de Master 1 (Valeria Leush). Cette stagiaire impliquée dans le portage de la bibliothèque vers d'autres langages de programmation a également réalisé un utilitaire sous forme d'interface graphique permettant à la fois de générer des mires à des poses données et d'effectuer le calcul de pose de mires en chargeant des images comme le montre la figure 6.7.

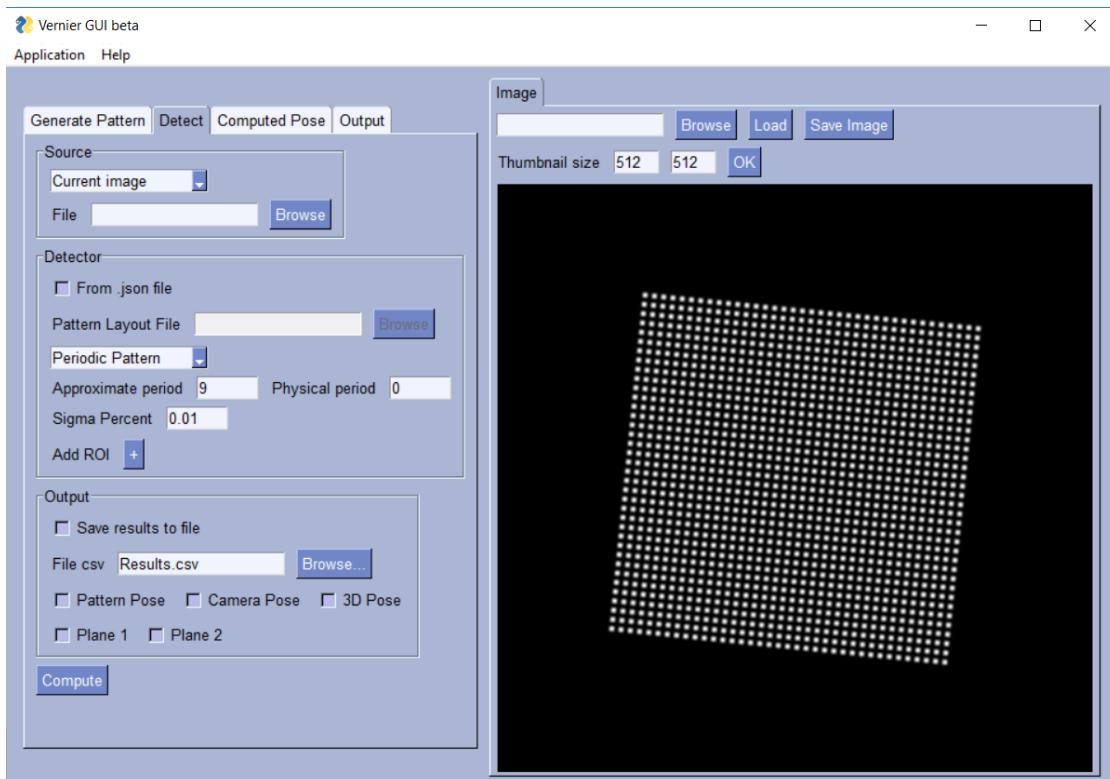


FIGURE 6.7 – Utilitaire graphique réalisé pour effectuer la génération et la mesure de pose de mires périodiques

La version C++ de la bibliothèque **Vernier**, agrémentée d'exemples d'utilisation et d'une documentation exhaustive est disponible en libre accès¹. Cette bibliothèque a par ailleurs fait l'objet d'un dépôt de propriété intellectuelle

1. <https://projects.femto-st.fr/vernier/en>

auprès de l'Agence de Protection des Programmes (APP), garantissant ainsi une plus grande sécurité pour sa valorisation.

Dans ce chapitre, nous avons montré comment programmer une bibliothèque logicielle répondant aux différents besoins de mesure de pose par mires périodiques. Ces besoins ont déjà été en partie éprouvés dans les chapitres précédents pour effectuer des simulations ainsi que pour la validation de la méthode de mesure. Le chapitre suivant traite de la réponse au besoin applicatif en montrant l'intégration de cette méthode de mesure de pose avec la bibliothèque logicielle Vernier dans le domaine de la microrobotique.

Chapitre 7

Applications

7.1	Application à l'étalonnage et à la métrologie robotique	128
7.1.1	Étude de justesse d'un robot sériel 6DDL	128
7.1.2	Étalonnage de robots souples	129
7.1.2.a	Mesure de performances du robot parallèle continu Triskèle-Bot	130
7.1.2.b	Robot parallèle 6DDL à articulations continûment déformables	133
7.1.3	Étalonnage de machine à mesurer	135
7.2	Applications à la mesure de force	136
7.2.1	Capteur de micro-force unidirectionnel	136
7.2.2	Capteur de micro-force multi-axial à grand rapport plage sur résolution	139
7.3	Applications aux tâches de micro-assemblage	141
7.4	Conclusion	144

Nous avons vu dans l'introduction de ce travail de thèse le besoin de mesure de pose sans contact à grande résolution pour différentes applications, de l'échelle macroscopique à la microscopique. Grâce à la validation des performances de la méthode de mesure de pose par mires périodiques effectuée dans le [chapitre 5](#), ce chapitre s'intéresse à la mise en pratique applicative de la méthode. À l'aide également de la bibliothèque logicielle présentée dans le chapitre précédent, ce chapitre présente ainsi plusieurs applications clés de la microrobotique telles que la caractérisation de microrobots, le micro-assemblage ou encore la caractérisation mécanique impliquant des capteurs de micro-force.

7.1 APPLICATION À L'ÉTALONNAGE ET À LA MÉTROLOGIE ROBOTIQUE

Grâce aux résolutions atteignables par la méthode de mesure de pose par mires périodiques, celle-ci peut être utilisée à des fins d'étalonnage et d'étude de grandeurs métrologiques comme la justesse ou la résolution d'autres systèmes robotiques.

7.1.1 Étude de justesse d'un robot sériel 6DDL

Dans le [chapitre 5](#), nous avons présenté un dispositif expérimental constitué d'un robot sériel 6DDL qui nous a permis de montrer les plages accessibles selon les différents degrés de liberté fournis par la méthode (**dispositif C**). Cependant cette étude n'avait qu'un impact qualitatif, la méthode de mesure étant plus résolue que le robot lui-même. En effet, pour effectuer leurs mesures, ces robots sériels utilisent des capteurs sur chaque actionneur, dont l'erreur se cumule à mesure que la chaîne d'actionnement approche de l'effecteur de celui-ci.

C'est pourquoi nous nous intéressons dans un premier temps à l'étude de la justesse de ce robot. Pour quantifier celle-ci, la mire encodée Megarena de période $9\text{ }\mu\text{m}$ sert de référence de position en étant fixée sur le robot et observée à l'aide de l'objectif $10\times$. La trajectoire envoyée au robot consiste en un quadrillage de $10 \times 10\text{ cm}^2$ avec un pas de 1 cm, comme présenté dans la [figure 7.1.\(a\)](#). Pour éviter l'intégration d'une erreur causée par un mauvais alignement du robot par rapport à la caméra, celui-ci est recalé pour que la mire reste perpendiculaire à l'axe optique tout au long de son mouvement afin d'étudier seulement l'erreur de positionnement selon les axes x et y .

L'étude de la différence entre la pose mesurée du robot et celle perçue par les capteurs de ses actionneurs montre une justesse de l'ordre de la centaine de micromètres comme illustré dans la [figure 7.1.\(b\)](#). Cette figure présente également en surbrillance rouge l'erreur de trajectoire mesurée lors d'un déplacement vertical effectué de bas en haut ([figure 7.1.\(b₁\)](#)). L'évolution de cette erreur présente ainsi directement l'erreur de justesse en montrant un écart de 200 μm sur 10 cm.

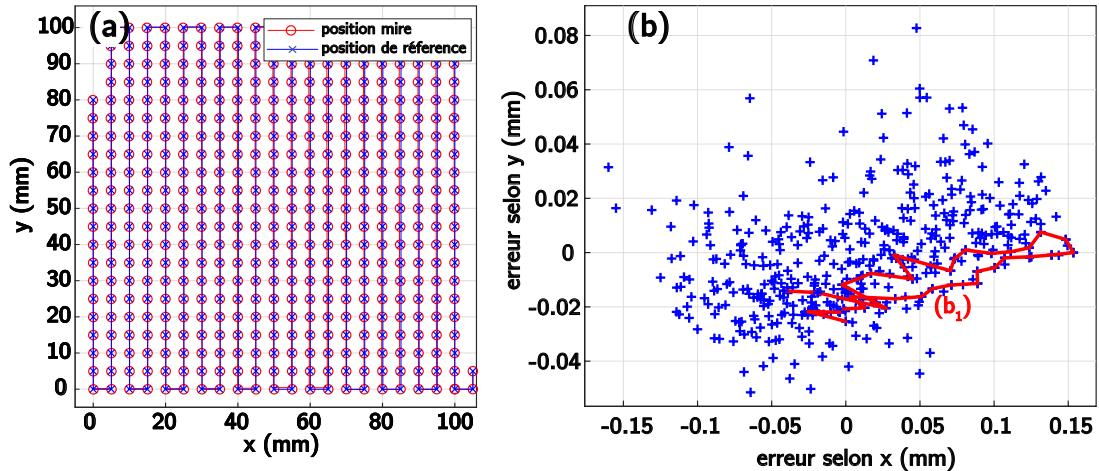


FIGURE 7.1 – Résultats de l'analyse de justesse sur une plage de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ en translation xy . (a) poses envoyées au robot (en bleu) et mesurées (en rouge). (b) erreur entre les poses envoyées et mesurées pendant toute la durée de l'essai. La courbe rouge (b_1) montre en détail l'évolution de l'erreur pendant une trajectoire balayant 10 cm selon l'axe y .

Cette étude montre ainsi l'intérêt d'utiliser ce système de mesure pour effectuer des mesures métrologiques pour des robots dont la justesse ou la résolution sont difficiles à quantifier.

7.1.2 Étalonnage de robots souples

La mesure par mire périodique trouve également son intérêt dans l'étude de robots à articulations souples. En effet, l'intégration de capteurs physiques sur ceux-ci est difficile à réaliser de par la souplesse de leurs éléments d'actionnement et ce d'autant plus dans le domaine de la microrobotique.

En effet, plutôt que d'utiliser des articulations mécaniques rigides difficiles à miniaturiser, les robots souples s'appuient sur des structures continûment déformables pour réaliser ces articulations. Celles-ci nécessitent alors moins de pièces à fabriquer et assembler, et se prêtent donc mieux à la miniaturisation. Par ailleurs, l'utilisation d'un faible nombre de pièces pour réaliser ces articulations par rapport aux robots à articulations rigides ne réduit pas le nombre de degrés de liberté de la structure robotique résultante.

Cependant la nature de ces robots les rend difficiles à modéliser et commander pour anticiper les trajectoires réalisables ainsi que l'espace de travail atteignable par ceux-ci. Différentes conceptions de robots souples ont émergé au fil des dernières années et sont classables par typologie de la même manière que les robots à articulations rigides comme le montre la figure 7.2.

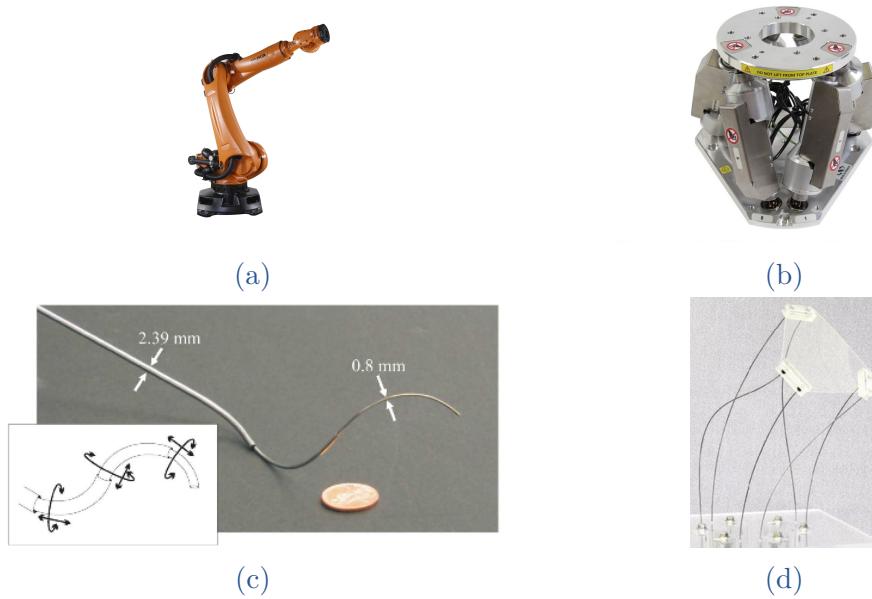


FIGURE 7.2 – Différentes architectures robotiques à articulations rigides et souples. (a) Robot sériel 6DDL industriel Kuka, (b) Robot parallèle 6DDL à plateforme de Stewart-Gough (Newport), (c) Robot souple continu [Webster08] et (d) Robot parallèle à jambes souples inspiré d'une plateforme de Stewart-Gough [Till17]

De par la difficulté d'implantation de capteurs sur ces robots souples, peu d'études ont réussi à mettre en avant les performances en termes de résolution, d'espace de travail, de répétabilité, etc. [Kim18a]. Pour répondre à ces questions de conception de robots souples et de la validation de leurs performances autrement que par simulations informatiques, Benjamin Mauzé a montré comment réaliser un robot parallèle souple à grand espace de travail sur trois degrés de liberté tout en validant ses performances grâce à la mesure par mires périodiques [Mauzé20a]. Ce travail de conception et de validation dans ce domaine applicatif de la microrobotique souple a fait l'objet d'une thèse, soutenue le 11 Janvier 2021 et encadrée par Guillaume Laurent, Redwan Dahmouche et Cédric Clévy.

7.1.2.a Mesure de performances du robot parallèle continu Triskèle-Bot

Le robot parallèle continu ainsi développé par [Mauzé21] montre les enjeux liés à la création et au contrôle de position en robotique souple. La conception de ce robot, appelé *Triskèle-Bot*, montre comment créer un robot avec une répétabilité attendue de l'ordre de la dizaine de nanomètres dans un espace de travail de l'ordre de la dizaine de millimètres.

La [figure 7.3](#) montre ainsi le schéma cinématique employé pour réaliser cette plateforme à haute résolution et grand espace de travail.

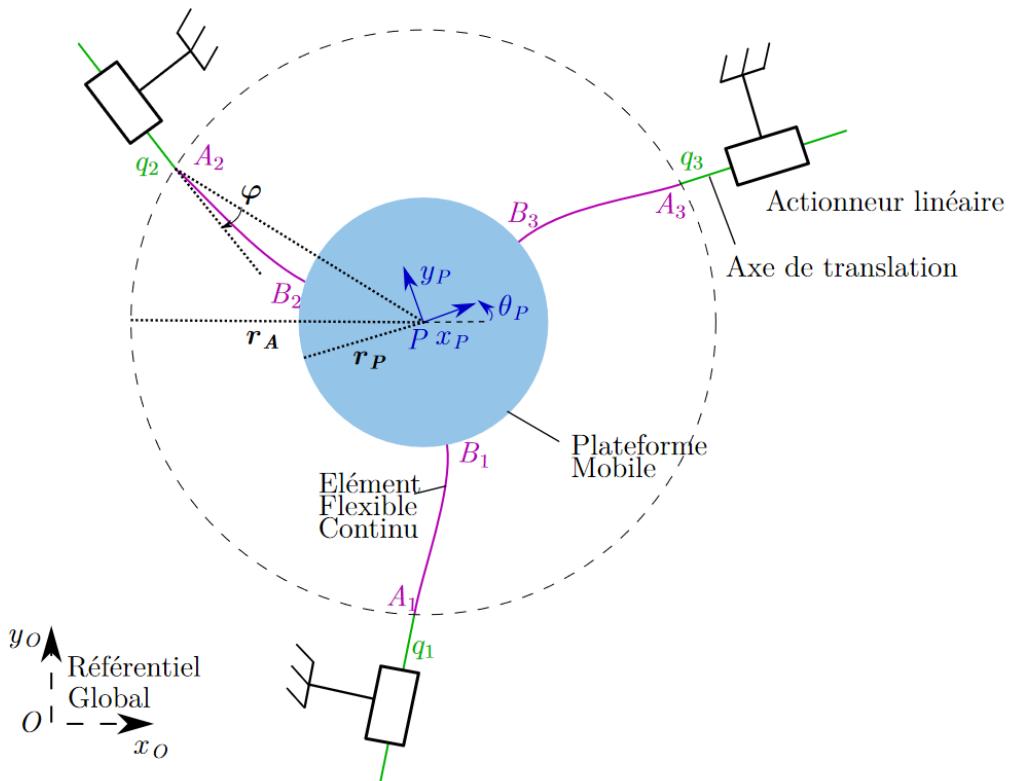


FIGURE 7.3 – Modèle cinématique de la plateforme 3DDL Triskèle-Bot avec en magenta les poutres continûment déformables

La mesure des performances de ce robot requiert donc une méthode de mesure sans contact, car aucun capteur physique ne peut être fixé sur la plateforme centrale sans en dégrader les performances. Par ailleurs, effectuer la mesure au niveau des actionneurs linéaires (notés q_1 , q_2 et q_3 sur la figure 7.3.(a)) fournirait une mesure seulement approximative de la position de la plateforme à cause de la difficulté à estimer la déformation précise des poutres (en magenta sur la figure 7.3.(a)) et des différents paramètres du modèle.

Pour évaluer les performances du robot sur tout son espace de travail, le système de mesure choisi doit présenter une meilleure résolution que celle attendue par simulation (de l'ordre de la dizaine de nanomètres en translation et du microradian en orientation) sur une plage d'*a minima* $10 \times 10 \text{ mm}^2$.

Pour ces raisons, le choix du système de mesure s'est orienté sur une mire codée Megarena présentée ici car répondant au cahier des charges du système de mesure à intégrer. La figure 7.4 présente l'intégration de la mire sur le Triskèle-Bot en montrant également la présence de six HP Codes disposés à chaque extrémité des jambes flexibles.

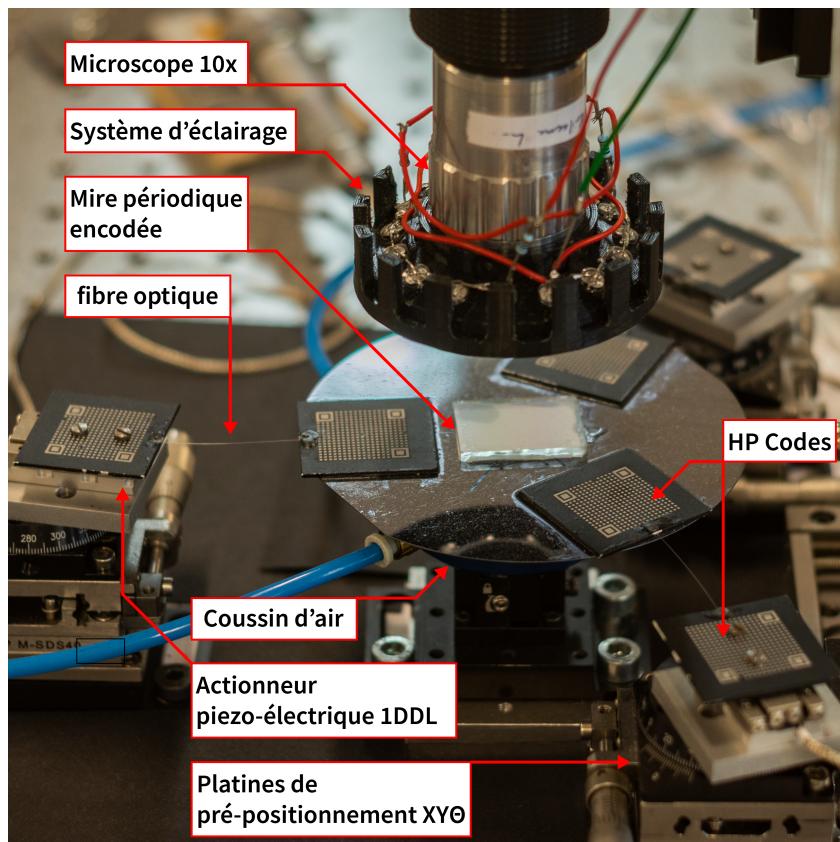


FIGURE 7.4 – Dispositif expérimental de validation des performances du Triskèle-Bot montrant la plateforme actionnée par les 3 poutres continûment déformables (fibres optiques), la mire périodique encodée ainsi que 6 HP Codes (en bout de chaque poutre)

Ces HP Codes sont utilisés pour identifier les paramètres intrinsèques du robot (position des actionneurs et des encastrements des jambes). Une fois celui-ci étalonné, plusieurs essais de répétabilité et de justesse sont effectués pour valider d'une part le modèle de simulation et d'autre part le bon fonctionnement du robot.

La première mesure expérimentale menée sur le robot concerne son écart-type de positionnement dans le cas statique. Celui-ci est mesuré sur 90 secondes alors que le robot est maintenu fixe. Cette mesure révèle un écart-type de 6.6 nm en translation et de 1.85 μ rad en orientation. Une fois cette étude de résolution atteignable menée par le biais de l'étude du bruit statique, un essai de répétabilité du robot est effectué. Celle-ci est mesurée expérimentalement en envoyant la plateforme centrale du robot à la même pose trente fois consécutives. La distance choisie pour effectuer cet essai est de 100 μ m et la [figure 7.5](#) présente les résultats de cette étude de répétabilité.

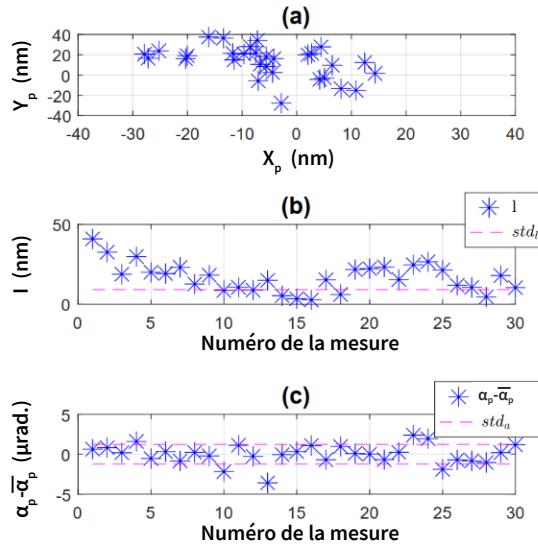


FIGURE 7.5 – Résultats expérimentaux de répétabilité du *Triskele-Bot*, tiré de [Mauzé21] en sollicitant le robot sur une course en translation de 100 μm au cours de 30 essais. (a) présente les positions mesurées de la plateforme centrale, (b) les distances à la moyenne des positions mesurées par la plateforme et (c) l'écart à la moyenne des orientations mesurées du robot.

Les différentes positions mesurées pendant cet essai sont ensuite traitées sous forme d'écart-type par rapport à la moyenne des 30 positions mesurées. Celle-ci est de 8.2 nm en translation (x et y) et de 2.6 μrad . en orientation, confirmant la grande répétabilité atteignable par le robot.

Cette étude de mesure de pose par mire appliquée à la robotique souple a ainsi permis de montrer expérimentalement des résultats jusqu'alors théoriques sur la conception d'un robot à grand espace de travail avec une grande résolution. Après avoir effectué l'étude de ce robot dans le cas quasi-statique, l'encadrement d'un stage de Master 2 (Nicola Lombardi) par Benjamin Mauzé a exploré comment se comportait ce robot dans le cas dynamique. Cette étude a ainsi permis de montrer comment employer la mesure de pose par mires périodiques pour valider des modèles théoriques de dynamique des structures continûment déformables appliqués à la microrobotique.

7.1.2.b Robot parallèle 6DDL à articulations continûment déformables

Conjointement au développement du Triskèle-Bot et de sa caractérisation planaire, un autre robot parallèle à articulations continûment déformables, basé lui sur une architecture robotique à trois actionneurs avec deux jambes par actionneur (autrement appelée 3-PPSR¹) a été développé. Ce développement est le fruit

1. 3-PPSR signifiant 3 groupes d'actionnement glissières à 2DDL, avec une articulation composée d'une liaison rotule et d'une pivot par groupe.

d'un travail collaboratif entre Benjamin Mauzé et un stagiaire, Oscar Gallardo qui se sont associés pour explorer ce type de robot à articulations continûment déformables. Son homologue à articulations rigides est couramment employée pour effectuer des mouvements selon les six degrés de liberté et son adaptation aux articulations continues gagne en intérêt depuis plusieurs années [Till17 ; Black17]. Chaque jambe de cette plateforme, usuellement constituée d'une liaison pivot et d'une rotule est alors remplacée ici par une tige en acier de 1 mm de diamètre. Ces jambes sont ensuite fixées deux à deux à des actionneurs linéaires 2 DDL (x , y) pour effectuer le positionnement 6DDL de la plateforme comme résumé dans la figure 7.6, résultant en une architecture robotique appelée 3-PP2F².

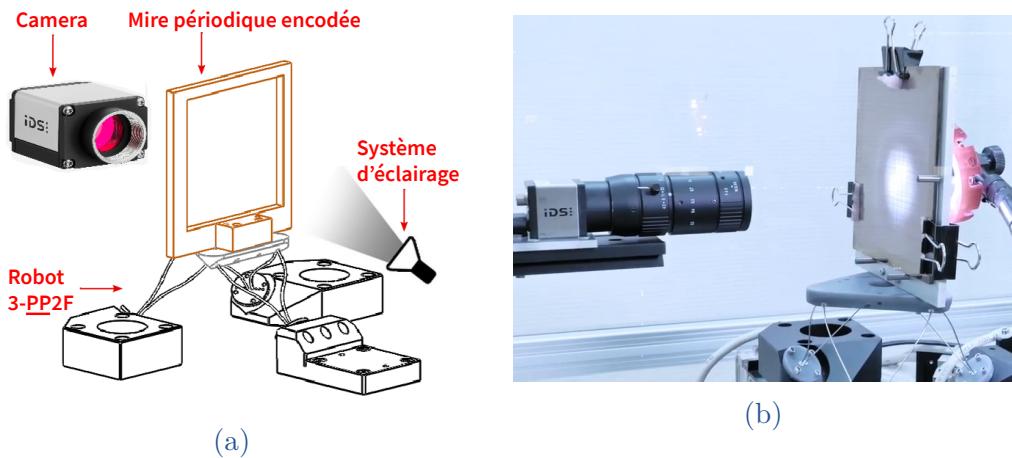


FIGURE 7.6 – (a) Schéma et (b) photo du robot parallèle à articulations continûment déformables basé sur une structure 3-PPSR avec visibles notamment les six jambes faites en tiges d'acier ainsi que le support pour mire périodique encodée fixée à la plateforme centrale

La méthode de mesure de pose par mire trouve ici également un grand intérêt, car tout comme pour la plateforme 3DDL Triskèle-Bot, il est difficile d'intégrer un capteur physique en bout de plateforme mobile.

Pour effectuer la validation de cette plateforme, une mire périodique Megarena, encodée sur 8 bits avec une période de 140 µm est utilisée.

Une étude préliminaire des capacités du robot sur sa répétabilité et son espace de travail a été menée et sera présentée lors de la conférence IROS (*International Conference on Intelligent Robots and Systems*) en Octobre 2021.

Cette étude a ainsi démontré que cette architecture robotique offrait un espace de travail de plusieurs dizaines de millimètres en translation et de 10° en rotation. L'étude de répétabilité est effectuée en considérant un déplacement de 37 mm selon l'axe x , 57 mm selon y et en fixant les autres degrés de liberté.

La figure 7.7 montre les résultats de cette étude où seuls les trois degrés de liberté

2. 3-PP2F indiquant la présence de deux jambes flexible par groupe d'actionnement.

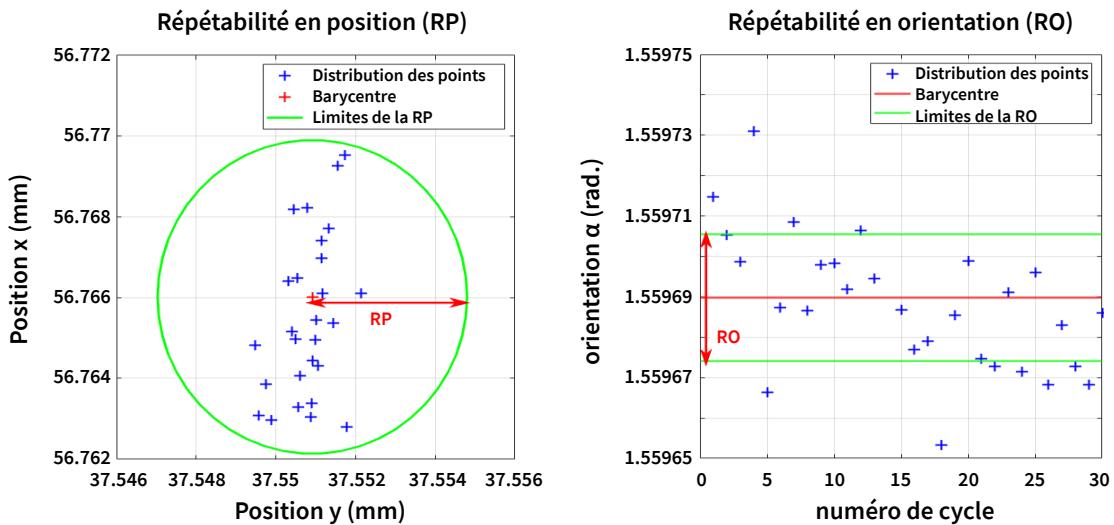


FIGURE 7.7 – Évaluation de la répétabilité selon les trois degrés de liberté x , y et α de la plateforme

x , y et α ont été mesurés. Ainsi le robot montre une répétabilité de 3.41 μm en translation et de 14.31 μrad . en orientation autour de l'axe α .

Cette application au monde de la microrobotique souple montre ainsi l'intérêt de la mesure par mires périodiques qui assure des résultats d'une grande résolution sans avoir d'interaction physique directe avec le système observé et limitant donc les perturbations de la mesure sur le système robotique.

7.1.3 Étalonnage de machine à mesurer

Une dernière application liée à l'étalonnage en robotique a été mise en œuvre et emploie la grande justesse conférée par la méthode de mesure ainsi que par le processus de fabrication du masque périodique. Cette application concerne l'étude même de la mire à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle. En effet son processus de réalisation assurant une justesse de l'espacement des points avec une erreur de l'ordre de la centaine de nanomètres sur les 10 cm que comprennent le masque offre une mesure métrologique plus résolue que la plupart des machines à mesurer tridimensionnelles couramment utilisées. Cette question sur la justesse et la résolution des machines à mesurer et constamment éprouvée grâce à des routines de vérification de ces machines, impliquant des batteries de tests longues et fastidieuses à réaliser [El Asmai20]. Ces vérifications garantissent le bon usage de ces machines à mesurer ainsi que la véracité de leur mesure et sont donc primordiales. En partenariat avec le groupe de recherche en métrologie de l'université de Bourgogne Franche-Comté, et avec l'aide de François Hennebelle ainsi que du Cetim (laboratoire de métrologie situé à Senlis), une étude en lien avec la mesure de machine tridimensionnelle pour la métrologie en ayant recours aux capacités de mesure des mires périodiques encodées est à l'étude.

Cette étude est toujours en cours de réalisation et vise à quantifier les erreurs de mesure d'une machine à mesurer Werth qui garantit une erreur de justesse de 1.5 μm sur l'ensemble de son espace de travail de $20 \times 20 \text{ cm}^2$.

7.2 APPLICATIONS À LA MESURE DE FORCE

Au-delà de la quantification des erreurs de positionnement de différentes structures robotiques (à articulation rigide ou souple, sérielle ou parallèle), la mesure de pose par mire périodique peut être employée en tant que capteur de force grâce à la mesure du déplacement d'une structure élastique dont les paramètres mécaniques sont connus. Ce champ applicatif a déjà fait l'objet de nombreuses études en employant des méthodes de mesure de position sous-pixelles pour effectuer des mesures de forces résolues au mN, voire au μN [Guelpa15 ; Sugiura15]. Ce champ applicatif est d'autant plus pertinent à l'échelle microscopique pour mieux comprendre les efforts impliqués dans des tâches de micro assemblage, ou encore de caractérisation d'éléments mécaniques.

7.2.1 Capteur de micro-force unidirectionnel

Dans cette optique de mesure de force à grande résolution, une structure composée de poutres en silicium agencées comme présenté dans la figure 7.9 avec deux marqueurs HP Code a été conçue par Hamdi Saadana lors de son stage de Master (encadré par Cédric Clévy). Cette conception a ensuite été améliorée successivement par Melissa Blot (ingénieur CDD) puis par Jason Govilas (en thèse depuis 2019, encadré par Vincent Placet, Cédric Clévy et Johnny Beaugrand). Cette structure, scindée en deux parties avec l'une fixée au bâti et l'autre fixée grâce à l'agencement de poutres aux caractéristiques mécaniques connues fonctionne en compression. Lorsqu'un effort est appliqué en bout de structure, celle-ci se déforme et induit un déplacement d'un des HP Code. En mesurant la différence de position entre les deux HP Codes, une mesure très résolue de la force appliquée sur le capteur est déterminable grâce à la formule suivante :

$$\hat{F} = k \cdot \delta_y \quad (7.1)$$

où k est la raideur du capteur selon son axe privilégié (y dans le cas présenté figure 7.9) et δ_y représente le déplacement relatif du HP Code mobile par rapport à celui fixe. La raideur k est connue *a priori*, soit en utilisant une modélisation de la structure compliante, soit en mesurant directement sa raideur à l'aide d'un système étalonné. Le schéma bloc présenté dans la figure 7.8 résume ce processus de mesure de force basé sur l'étude conjointe des positions des HP codes.

L'étalonnage de ce capteur ainsi que l'évaluation de sa résolution sont réalisés en utilisant un capteur de référence TEI FSB101. Le dispositif expérimental utilisé pour effectuer cet étalonnage est présenté dans la figure 7.10.(ii) montrant l'agen-

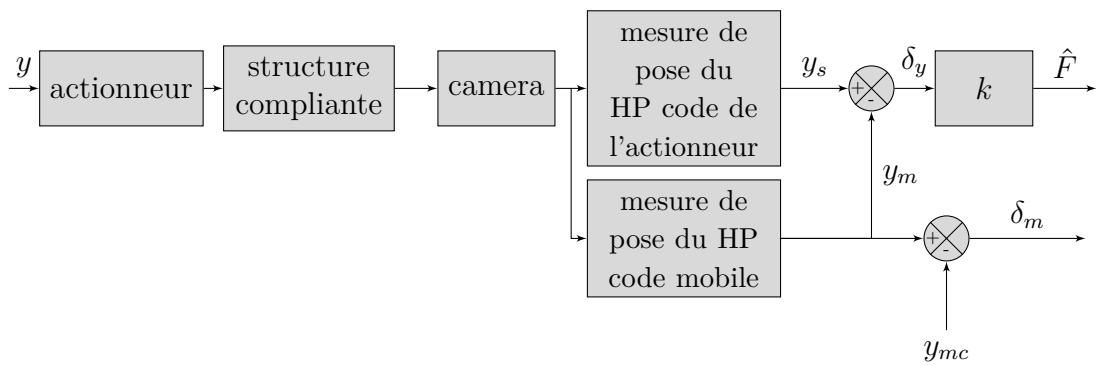


FIGURE 7.8 – Schéma bloc du capteur de force unidirectionnel

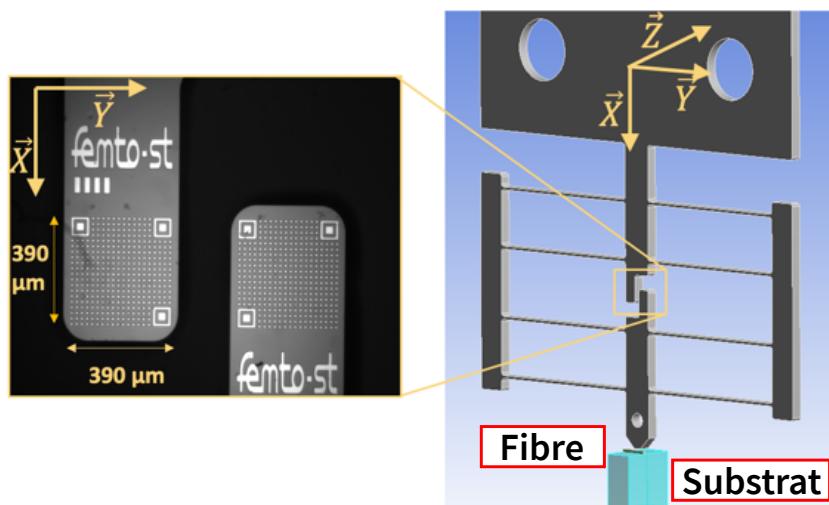


FIGURE 7.9 – Capteur de micro-force utilisant une structure compliante avec deux HP Codes (un mobile et l'autre fixe) assurant la mesure force-déplacement

cement du capteur de force compliant présenté ici, monté en bout d'un actionneur linéaire (PI PIHERA 629.1) couplé à un actionneur rotatif assurant la mise en position bien perpendiculaire du capteur par rapport à sa surface de contact. L'étalonnage est ensuite effectué en sollicitant le capteur de référence positionné en dessous de la structure compliant.

Les résultats de cette étude montrent une plage du capteur conçu de 200 mN (la plage d'étude étant limitée par celle du capteur de référence). Cette étude est ensuite complétée par une quantification de la résolution atteignable dans l'environnement présenté des capteurs de déplacement utilisant les HP codes. Pour cela, une batterie de 10 essais visant à solliciter le capteur contre un support rigide de manière répétée sur une course de 200 μm est mise en place. Au-delà de la quantification de la résolution de mesure le long de l'axe du capteur y , l'étude du couplage des autres degrés de liberté x et α est rendue possible par l'utilisation des HP Codes.

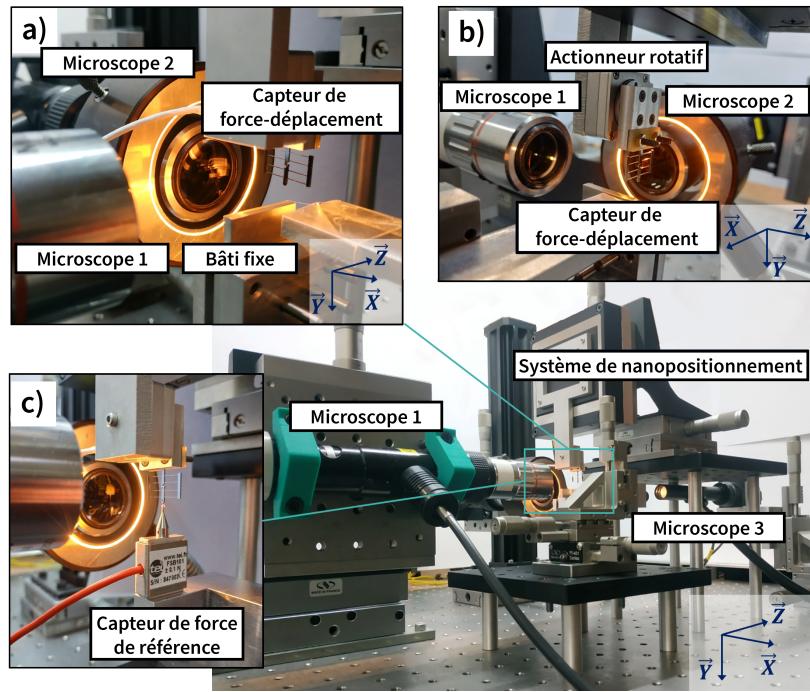


FIGURE 7.10 – Dispositif expérimental de mesure de micro-force à l'aide d'un capteur compliant couplé à deux HP Codes avec en (a) le dispositif de caractérisation de fibre et en (b) le dispositif d'étalonnage du capteur.

La figure 7.11 présente les résultats de cette étude de résolution en montrant l'évolution des deux HP Codes en fonction du temps, moyennée sur les dix essais effectués. Cette figure montre plus spécifiquement le fonctionnement du capteur à travers trois temps dont le premier est le mouvement coordonné des deux HP Codes jusqu'à ce que le bout du capteur entre en contact avec la surface rigide. La seconde partie des courbes, et plus spécifiquement celle selon l'axe y (figure 7.11a), montre le HP Code mobile dont la position n'évolue pas car en contact avec la partie rigide testée tandis que la partie fixée à l'actionneur continue son évolution. La dernière partie visible sur cette figure montre à nouveau l'évolution coordonnée des deux HP-codes qui commence lorsque le bout du capteur n'est plus en contact avec la partie rigide testée.

La résolution du capteur est ensuite déduite en calculant l'écart type de chaque essai par rapport à l'évolution moyenne des dix essais. Cette résolution de positionnement est de 41 nm selon l'axe x , 111 nm selon l'axe y et 69 μrad . selon α . Transposée à la mesure de force-déplacement donnée par l'équation (7.1), une résolution du capteur de 2 μN est déduite.

Une fois ce capteur étalonné et sa résolution connue, celui-ci peut être utilisé dans différentes tâches nécessitant une fine connaissance des forces impliquées. Une des applications étudiées consiste à quantifier les caractéristiques mécaniques tel

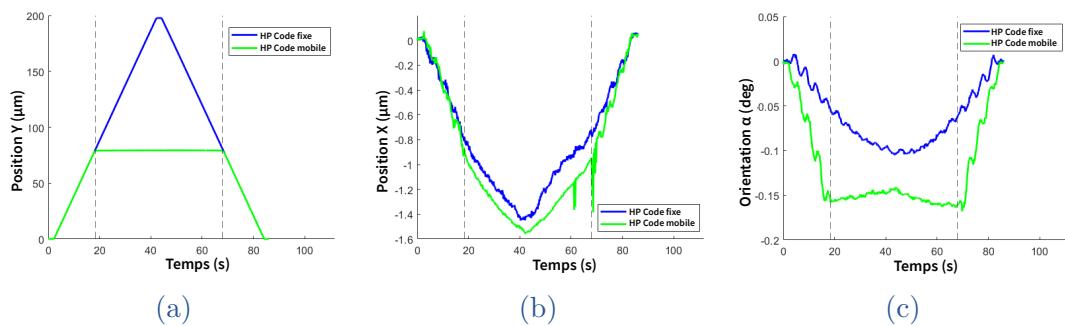


FIGURE 7.11 – Moyenne des mesures effectuées par le capteur de force contre un support rigide selon les axes x , y et α

que le module d'Young des fibres naturelles. Celles-ci présentent en effet un fort intérêt de par leur caractère renouvelable et facile d'intégration dans divers processus de fabrication de matériaux ou textiles à fort potentiel renouvelable.

L'étude de cette grandeur en compression est un vrai défi à cette échelle et peu de méthodes possèdent une résolution assez fine pour être utilisées sur ce type de caractérisation. La figure 7.12 montre les échelles impliquées dans ce type d'essai en compression en présentant une fibre de polyamide 11 compressée. Le choix de ce matériau est notamment motivé par une meilleure connaissance et une meilleure stabilité de ses caractéristiques par rapport à des fibres naturelles. Cette connaissance *a priori* de quelques propriétés de ce matériau de synthèse offre ainsi une validation de la méthode de mesure de force avant d'être appliquée à des fibres aux caractéristiques inconnues.

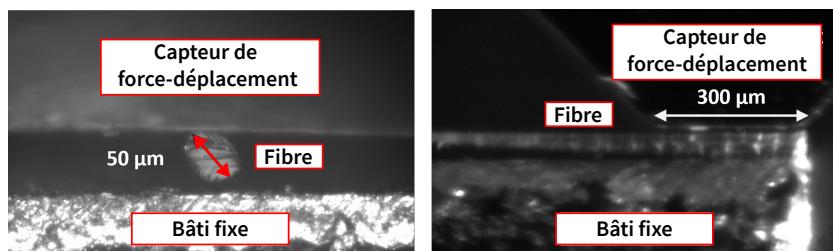


FIGURE 7.12 – Fibre de polyamide de 50 µm de diamètre pendant un essai de compression réalisé grâce au capteur de micro-force

7.2.2 Capteur de micro-force multi-axial à grand rapport plage sur résolution

Un second capteur de force a également été conçu pour toutes les applications nécessitant de connaître avec précision les efforts impliqués comme dans des tâches de micro-guidage ou de caractérisation mécanique comme présenté avec le capteur unidirectionnel précédent.

Ce capteur, présenté dans la [figure 7.13](#) fonctionne de manière similaire à celui présenté précédemment à savoir par mesure du déplacement d'une plateforme par rapport à un bâti fixe. Cette plateforme a été initialement conçue par Melissa Blot avant d'être reprise et étudiée par Bhawnath Tiwari pendant sa thèse (encadrée par Cédric Clévy et Philippe Lutz, soutenue le 14 janvier 2021). Ce capteur de force multi-axial fonctionne en étudiant la plateforme centrale qui est fixée au bâti à l'aide de tiges souples. L'application d'une force ou d'un couple sur la plateforme conduit à un déplacement de celle-ci, qui est alors mesuré grâce à une mire codée Megarena. Cette mire, de période $6 \mu\text{m}$ et encodée avec une séquence binaire de 8 bits et assure une plage de mesure de $4.716 \times 4.716 \text{ mm}^2$.

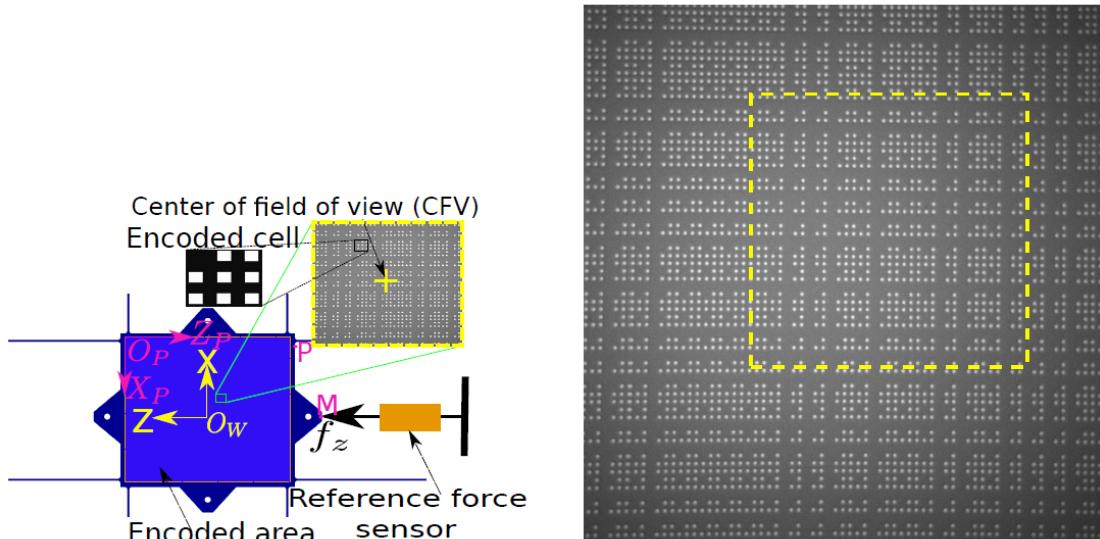


FIGURE 7.13 – Capteur de force multi-axial basé sur une structure compliant avec une mire périodique encodée intégrée sur la partie mobile, issu de [Tiwari21]

La conception de ce capteur montre que grâce à l'emploi d'une mire codée intégrée à ce capteur multi-axial, une plage de 110 mN est accessible avec une résolution de $2 \mu\text{N}$. Le développement de ce capteur montre le fort intérêt dans l'étude multi-axiale des efforts impliqués dans divers systèmes microrobotiques et biologiques comme pour l'étude de cellules par exemple. La mesure donne un accès très résolu aux efforts en translation, mais également aux moments appliqués sur la structure. Cette étude de conception et de validation expérimentale a par ailleurs fait l'objet d'une publication, via les travaux de recherche menés par Bhawnath Tiwari [[Tiwari21](#)].

7.3 APPLICATIONS AUX TÂCHES DE MICRO-ASSEMBLAGE

Une dernière application mise à l'étude des mires périodiques consiste en l'asservissement visuel dédié aux tâches de micro-assemblage. Ce domaine ne cesse de gagner en intérêt depuis quelques années, d'autant plus pour des applications biologiques telles que l'étude de cellules ou encore leur triage [Azizipour20 ; Huang21]. Le projet de création d'entreprise Cell-Select, porté par Vladimir Gauthier dans le cadre de sa thèse de Docteur-Entrepreneur (encadrée par Aude Bolopion et Michaël Gauthier) a ainsi étudié ces problématiques de puces fluidiques pour le tri de cellules humaines. Les systèmes utilisés pour effectuer ces tâches de tri sont constitués de deux puces en verre où de la résine (SU 8) a été déposée selon un masque pour créer des canaux de quelques micromètres de hauteur. Ces deux puces sont ensuite assemblées pour créer des canaux fermés, assurant un déplacement fluide des cellules à étudier. Cependant, l'assemblage de ces deux parties requiert une grande précision (inférieure au micromètre) pour assurer un bon alignement des électrodes mises en correspondance (le tri étant réalisé par diélectrophorèse).

La figure 7.14.(a) montre l'intrication de ces différents canaux et des électrodes une fois la puce fluidique assemblée et montre ainsi la grande résolution nécessaire pour effectuer un bon assemblage de cette puce. Une fois les deux parties de la puce fluidique alignées, une résine photo-sensible appliquée sur chaque partie de la puce est illuminée, fixant ainsi l'assemblage. La seconde partie de cette figure présente le dispositif global dédié à l'alignement et la fixation réalisée par insolation UV des puces fluidiques.

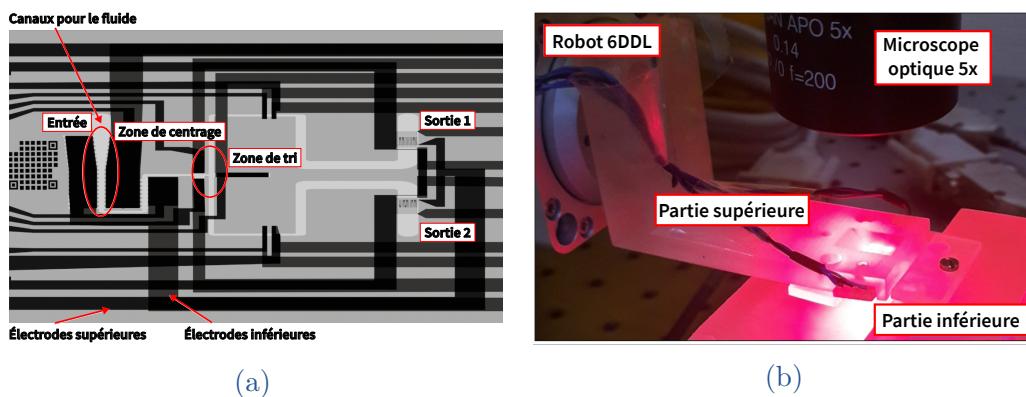


FIGURE 7.14 – (a) Vue détaillée de la puce fluidique dédiée au tri cellulaire montrant la zone d'entrée des cellules, la zone de tri se basant sur un jeu d'électrodes et les deux zones de sortie des cellules une fois triées. **(b)** Vue globale du dispositif d'assemblage de puce fluidique comprenant le robot série 6DDL ainsi que la caméra utilisée pour effectuer l'asservissement visuel d'alignement

Pour assurer la bonne mise en position de ces deux parties de la puce avant fixation, deux HP Codes sont intégrés à chaque partie de la puce. En observant la position de ces deux mires l'une part rapport à l'autre, il est possible de pré-

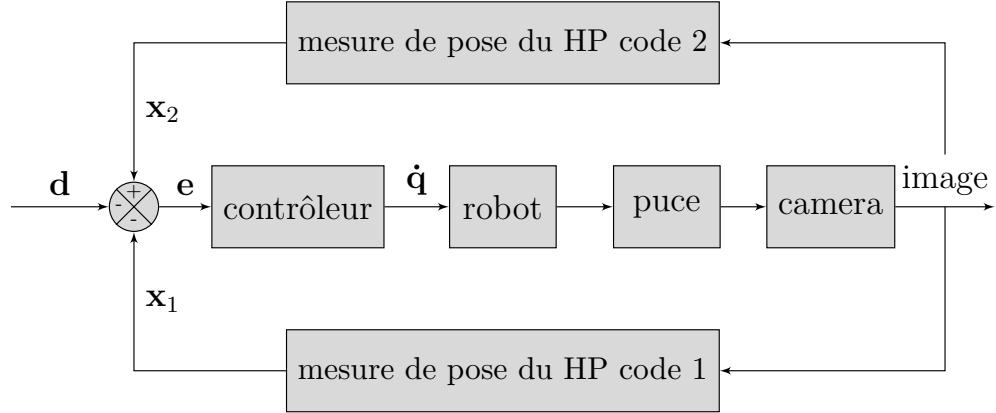


FIGURE 7.15 – Schéma bloc utilisé pour l’assemblage des puces micro-fluidiques.

positionner avec une grande résolution les deux parties de la puce.

La figure 7.16 présente l’intégration de ces deux mires HP Codes intégrées sur chacune des parties de la puce fluidique à aligner.

Le contrôle du robot est réalisé en suivant un schéma classique d’asservissement visuel, visible sous forme d’un schéma bloc dans la figure 7.15, tel que proposé par Marchand *et al.* [Marchand02]. L’erreur de position relative \mathbf{e} qui est nulle dans le cas d’un assemblage parfait est définie comme suit :

$$\mathbf{e} = \mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1 - \mathbf{d} \quad (7.2)$$

avec $\mathbf{x}_1 = (x_1; y_1; \theta_1)$ et $\mathbf{x}_2 = (x_2; y_2; \theta_2)$ la pose des deux HP codes. \mathbf{d} représente la distance désirée entre les deux HP codes. La vitesse de l’effecteur du robot est donnée par :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} = -\gamma \mathbf{L}_e^+ \mathbf{e} \quad (7.3)$$

avec \mathbf{L}_e^+ la pseudo-inverse de la matrice d’interaction et γ un coefficient proportionnel.

Finalement, les vitesses des articulations sont calculées en utilisant la matrice Jacobienne $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ du robot ainsi :

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}) \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

Cette stratégie d’asservissement assure une décroissance exponentielle de l’erreur et agit comme un système du premier ordre découplé.

Les résultats de cet asservissement sont rendus possibles grâce à la grande résolution des mires HP Codes et sont présentés dans la figure 7.17 qui montre l’évolution au cours du temps de l’erreur entre les deux HP Codes. Cette figure

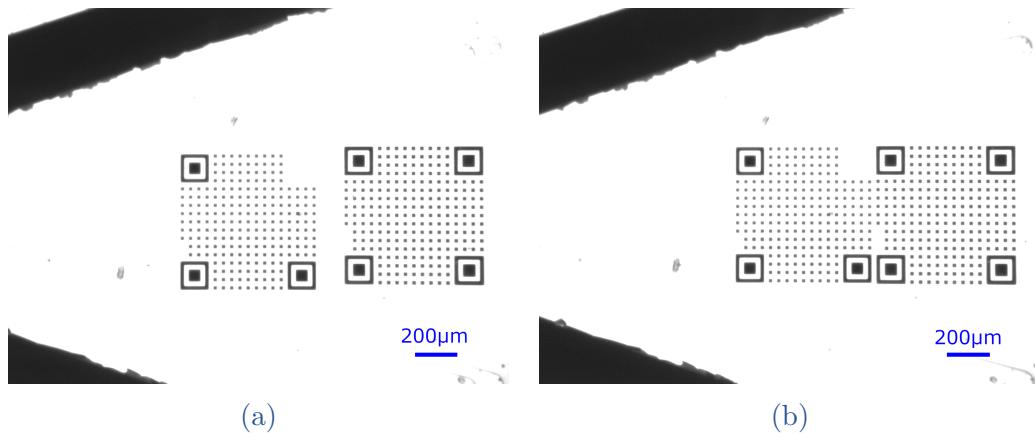


FIGURE 7.16 – Étapes de départ (a) et d’arrivée (b) des deux parties de la puce fluidique mises en position par asservissement visuel grâce aux deux HP Codes.

montre qu’une durée de deux minutes environ est nécessaire pour effectuer un alignement avec une erreur en translation de l’ordre de 10.8 nm et en orientation de 0.31 mrad.

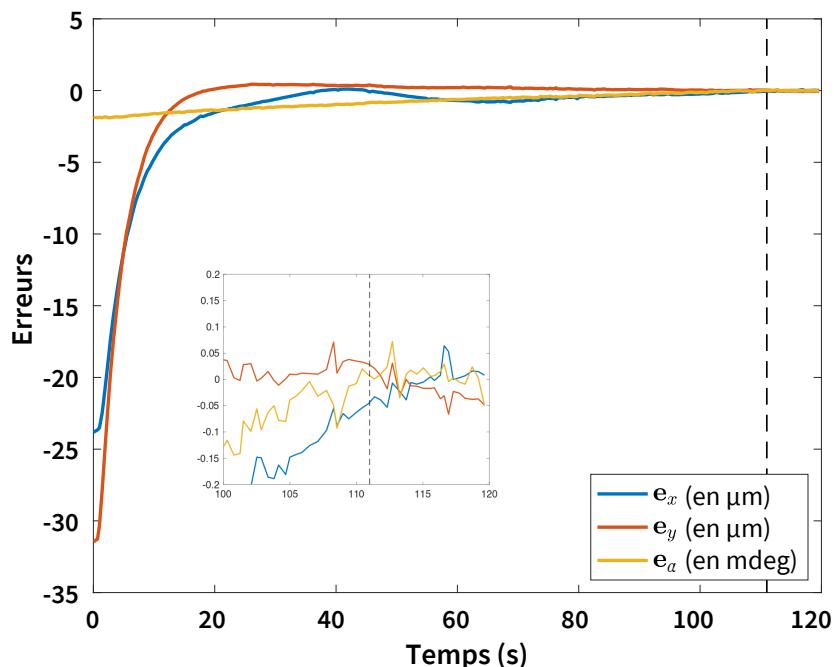


FIGURE 7.17 – Évolution de l’erreur de positionnement entre les deux HP Codes selon les trois degrés de liberté x , y et α .

Cette application montre ainsi le grand intérêt à utiliser des mires périodiques pour effectuer de l’asservissement visuel hautement résolu de par leur caractère versatile et facile d’implémentation même dans des environnements fortement contraints.

Une dernière application de micro-assemblage a également été étudiée pour répondre à des problématiques d'alignement de plaques en silicium. Cette application a fait l'objet d'une prestation pour l'entreprise Percipio Robotics qui demandait un alignement de ces plaques avec une erreur de 50 nm tout au plus. Cette prestation démontre une nouvelle fois la grande adaptabilité de la méthode de mesure par mires périodiques pour d'autres applications de micro-assemblage nécessitant une grande résolution.

7.4 CONCLUSION

En présentant les nombreuses applications qui ont été concrétisées grâce aux mires périodiques, nous avons montré le fort intérêt à employer une telle méthode dans le domaine de la microrobotique. En effet, grâce à sa capacité à fournir une mesure grandement résolue sur une grande plage de mesure, cette méthode est particulièrement adaptée pour des tâches telles que l'étude en microrobotique souple ou encore pour la mesure de micro-forces. Ces différentes applications ont notamment montré le fort potentiel des mires Megarena pour effectuer des mesures de poses robustes et grandement résolues sur des plages centimétriques.

Par ailleurs, les HP Codes conçus pour n'occuper qu'une partie du champ de vision ont également montré leur grande utilité dans ce domaine car étant plus facilement intégrables sur des systèmes fortement contraints en espace disponible comme c'est le cas pour les poutres des capteurs de micro-force unidirectionnels ou les puces fluidiques. Ces HP Codes ont également montré leur fort potentiel pour effectuer une mesure de pose relative en étudiant deux zones d'intérêt incluses dans une même image. De plus, comme cette méthode est par essence étalonnée par son processus de fabrication et qu'elle ne nécessite que peu de matériel pour être mise en œuvre, son déploiement dans diverses applications nécessitant une grande résolution couplée à une plage importante ne cesse de gagner en intérêt.

L'application des HP Codes à l'assemblage de puces micro-fluidiques, ainsi qu'à la création du capteur de force-déplacement pour la caractérisation de fibre naturelle a fait l'objet d'une soumission d'un article pour la revue *IEEE Transactions on Automation, Science and Engineering* en Juillet 2021.

Ces divers résultats témoignent de la maturité de la méthode et des capacités applicatives de celle-ci, rendues possibles notamment grâce au déploiement logiciel de la bibliothèque présentée dans le chapitre 6.

Conclusion et perspectives

Les méthodes de mesure de pose utilisant la vision par ordinateur sont de plus en plus utilisées dans nombre de domaines et la microrobotique en est un exemple flagrant. De par la difficulté à insérer des capteurs physiques sur les systèmes observés, la vision par ordinateur offre la possibilité de déterminer la position d'un objet en se basant sur son observation sans intéragir physiquement avec celui-ci. Par ailleurs, cette branche de la vision par ordinateur dédiée à la mesure de pose rend la mesure monoculaire possible selon trois degrés de liberté. Cependant les méthodes existantes et disponibles facilement par le biais de bibliothèques déployées sur internet ne permettent pas d'obtenir des résolutions inférieures au centième de pixel, limitant leurs potentielles intégrations dans des applications nécessitant une grande résolution. Bien que d'autres méthodes plus résolues existent, aucune ne présente une robustesse assez élevée pour être utilisée dans des applications microrobotiques tout en présentant une plage de mesure suffisante pour étudier des déplacements conséquents.

Ce travail de thèse adresse cette problématique de mesure de pose par vision conférant à la fois une grande plage de mesure, une grande résolution et une grande robustesse en ayant recours aux mires périodiques. Celles-ci offrent en effet le grand avantage de présenter une très grande résolution grâce à l'étude de la phase des images de mires acquises. Cependant, cette résolution est un choix effectué au détriment de la plage de mesure allouée par cette méthode de mesure de pose, limitée à une seule période de la mire. Cette thèse traite ce problème en proposant une manière innovante de mesurer la pose d'une mire périodique augmentée d'un code binaire inséré en enlevant certains points de celles-ci. Les mires résultantes possèdent à la fois les avantages des mires périodiques à savoir leur grande résolution (1 nanomètre en translation et 4 μ rad. en orientation) tout en embarquant avec elles un repérage absolu d'une plage centimétrique ainsi que d'un détrompeur angulaire, offrant ainsi une mesure absolue en rotation.

La première partie de ce travail mené sur les mires périodiques concerne leur étude théorique et montre d'une part comment mesurer avec une grande résolution une pose en utilisant l'information de phase des mires, et d'autre part comment utiliser cette information pour insérer un repérage absolu de celles-ci. La combinaison de la mesure hautement résolue et de l'augmentation de la plage de mesure résultent en un système de mesure résolu au nanomètre sur une plage de 10 cm².

Au travers du premier chapitre, nous avons défini le contexte dans lequel s'inscrit ce travail de thèse en étudiant les différentes solutions existantes pour effectuer une mesure de pose 3D à grande plage et grande résolution en microscopie. Cette

étude a notamment montré les différents verrous existants limitant la résolution de la mesure de pose en microscopie causée par les contraintes appliquées à ce domaine de la vision par ordinateur. La piste retenue après étude de ces différentes pistes possibles s'est orientée sur l'utilisation de motifs périodiques, intrinsèquement hautement résolus, mais présentant l'inconvénient majeur d'avoir une plage de mesure très limitée. C'est dans cette optique de mesure de pose 3D grandement résolue, d'augmentation de plage de mesure et d'amélioration de la robustesse face à différents problèmes d'acquisitions d'images que s'inscrit cette thèse.

Le second chapitre a présenté la méthode de mesure de pose de mires périodiques en démontrant à l'aide de motifs sinusoïdaux parfaits l'intérêt d'employer la transformée de Fourier pour effectuer une mesure de pose planaire. L'étude a ensuite été portée sur des mires quantifiées en niveaux de gris, représentatifs des échantillons acquis expérimentalement. Cette étude a notamment montré le grand intérêt de la méthode à utiliser la phase des images de mires pour assurer un positionnement résolu en deçà du millième de pixel.

Après avoir montré la richesse des informations contenues dans le spectre fréquentiel des mires périodiques, nous avons étudié dans le troisième chapitre comment exploiter ces informations pour effectuer une mesure de pose 3D. Cette méthode, basée sur une approche originale utilisant la phase des mires périodiques, a ainsi montré comment lever le problème de mesure de pose 3D en microscopie, en fournissant une mesure des angles hors-plan. Cette méthode a par la suite été comparée avec une méthode d'estimation de pose PnP. Cette comparaison a notamment démontré une plus grande sensibilité de la mesure grâce à l'information structurée des mires périodiques, traitées dans leur globalité grâce à l'étude du spectre. Cette étude a été élargie à l'échelle macroscopique pour montrer comment effectuer une mesure de pose complète et grandement résolue à l'aide des mires périodiques.

Le chapitre quatre a ensuite étudié le problème de la plage de mesure jusqu'alors limitée à une seule période en cherchant une méthode pour augmenter celle-ci. Cette question a été abordée en intégrant une séquence binaire assurant un repérage absolu sur une plage dépendant du nombre de bits choisi pour générer ladite séquence. Cette séquence binaire est ensuite insérée en enlevant ou en conservant les points selon chacune des directions de la mire. Le motif pseudo-périodique résultant conserve assez de redondance dans la présence des points pour assurer la grande résolution de la méthode, tout en offrant un repérage absolu de la mire. La méthode étudiée pour mesurer la position absolue de la mire utilise également pleinement l'information de phase pour effectuer une segmentation point par point. Cette segmentation permet ainsi d'étudier directement la présence ou non des points de la mire et de remonter à la séquence codée donnant ce repérage absolu, tout en résolvant les problèmes de robustesse liés à la qualité d'acquisition des images.

La seconde partie de ce manuscrit concerne la mise en pratique de la partie méthodologique en montrant les performances de cette méthode, ainsi qu'en présentant diverses applications étudiées par différents chercheurs ayant recours à la mesure de pose par mires périodiques en microrobotique.

Ainsi le chapitre cinq présente les performances atteignables par la méthode en étudiant à la fois la résolution et la linéarité selon les différents degrés de liberté mesurables. À l'issue de cette étude, une résolution en translation planaire de 1 nanomètre en translation et de quelques microradians en orientation est démontrée. Il est à noter que ces performances sont limitées par l'environnement de mesure, qui représente plus de 90 % de la variance du bruit de mesure. En résolvant ce problème à l'aide d'une enceinte de mesure isolée, un gain substantiel en résolution pourrait être obtenu. Les angles hors-plans mesurables par la méthode sont également mis à l'étude et montrent une résolution d'une centaine de microradians sur une plage de mesure de $3\pi/8$ rad. Cette étude de performances est clôturée par la comparaison de la méthode de mesure présentée avec d'autres méthodes de mesure de pose couramment employées en vision par ordinateur comme les marqueurs AruCo. Cette étude a montré qualitativement en quoi la méthode de mesure de pose par mires périodiques était bien plus résolue que les autres méthodes mises à l'épreuve.

Le chapitre six présente l'implémentation logicielle de la méthode de mesure présentée. La bibliothèque logicielle ainsi programmée a déjà été largement employée dans les chapitres précédents, car c'est grâce à celle-ci que sont effectuées les validations par simulations numériques ainsi que les essais expérimentaux. Le logiciel permet ainsi de mesurer la pose de mires mais aussi de les générer à des poses déterminées au préalable. Ce chapitre montre également la diversité des mires conçues tout au long de ce travail de thèse, à savoir les mires périodiques simples (définies par leur période), les mires périodiques encodées Megarena (définies par leur période et la séquence binaire intégrée à la mire), les mires HP Codes (avec un fonctionnement similaire aux QR Codes, en intégrant une mire périodique en place de la matrice binaire utilisée par les QR Codes) et les mires bitmap (définies par leur période et le motif des points à afficher ou non).

Le dernier chapitre de ce mémoire concerne les diverses applications étudiées tout au long de la thèse par différents chercheurs ayant besoin d'un système de mesure grandement résolu et avec une grande plage de mesure accessible telle que les mires périodiques présentées ici. Ces applications inscrites dans le contexte de la microrobotique couvrent plusieurs domaines tels que l'étalonnage de robots continûment déformables, la création de capteurs de force-déplacement résolus au μN ou encore l'asservissement visuel à haute résolution pour l'assemblage de puces microfluidiques.

Ce travail de thèse a ainsi démontré à la fois de manière théorique et pratique l'intérêt de la mesure de pose par mires périodiques et répondant notamment à trois questions qui limitaient jusqu'alors leur démocratisation à savoir la mesure

de pose 3D, la plage limitée à une période et la robustesse de la mesure. Cependant certaines questions restent ouvertes et la suite de cette conclusion détaille quelques aspects à fort potentiel d'étude.

LA MESURE DE POSE PAR MIRES PÉRIODIQUES EN HOLOGRAPHIE NUMÉRIQUE

Intérêt de la méthode pour augmenter la résolution hors-plan

Le premier verrou scientifique relevé pendant l'étude de mesure de pose par mires périodiques est la limitation de la résolution accessible pour les angles hors-plans ainsi que l'incapacité à déterminer la profondeur de la mire dans le cas d'une projection orthographique. Cette problématique est d'autant plus pertinente que l'observation en microrobotique utilise des objectifs à fort grandissement et se rapproche donc d'une projection orthographique. Ce problème peut être adressé en étudiant la mire non plus via une observation classique mais en holographie numérique.

Le principe d'observation employé tout au long de cette thèse se sert simplement de l'enregistrement de l'intensité lumineuse réfléchie par la mire via une caméra. Ce dispositif ne permet donc pas de remonter à l'information de phase associée à la propagation de l'onde lumineuse incidente. Cependant, cette phase dépend directement du trajet optique emprunté par chaque faisceau lumineux et permettrait donc de remonter à une information de profondeur locale en tout point de la mire observée. L'holographie numérique permet de répondre à cette problématique en offrant une méthode de restitution à la fois de l'intensité de l'onde lumineuse acquise, mais aussi de sa phase.

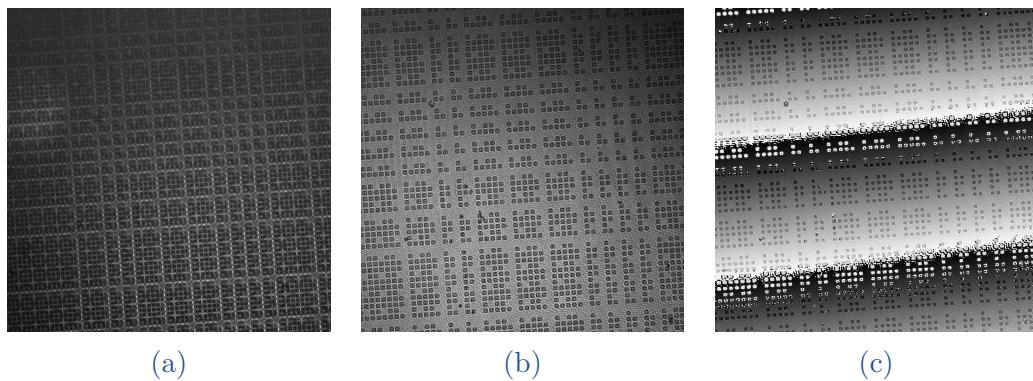


FIGURE 7.18 – (a) hologramme de mire périodique, (b) sa reconstruction en intensité et (c) en phase

Le fonctionnement de l'holographie numérique se base sur l'enregistrement interférentiel d'une onde cohérente diffractée et de sa reconstruction donnant accès à sa phase et à son intensité, décrivant ainsi complètement l'objet observé comme illustré dans la [figure 7.18](#). La résolution en profondeur de cette méthode est fonction de la longueur d'onde utilisée étant donné que c'est la phase de cette onde incidente qui assure la mesure le long de cet axe. Cette résolution en profondeur accordée par cette méthode de mesure est de l'ordre du nanomètre et montre le fort potentiel que présente cette méthode et l'intérêt croissant porté sur celle-ci. De même, la plage de mesure offerte par cette méthode est de l'ordre de la centaine de micromètres, fournissant une grande extension par rapport aux méthodes de microscopie classique. Cependant cette grande résolution en profondeur est contrebalancée par une résolution planaire dépendant de l'objectif et de la caméra utilisés. C'est pourquoi, couplé à la méthode de mesure de pose par mires périodiques garantissant une résolution nanométrique selon ces axes plus faiblement résolus en holographie numérique, une méthode de mesure de pose absolue et résolue au nanomètre et au microradian selon les six degrés de liberté pourrait émerger.

Le champ applicatif visé est à nouveau varié et permettrait d'effectuer avec une grande résolution l'étalonnage de structures complexes ciblant le domaine de la microrobotique avec une grande résolution selon les six degrés de liberté.

Approche par apprentissage automatique de l'holographie numérique

Bien que fortement résolue en profondeur, l'holographie numérique, de par son principe de fonctionnement, requiert de connaître *a priori* la distance entre l'objet et l'objectif pour effectuer une reconstruction la plus nette possible. Cette distance de reconstruction peut être retrouvée en étudiant le contraste de l'image d'intensité ou de phase résultant de la reconstruction de l'image diffractée, mais reste actuellement un défi scientifique majeur. Pour tenter de répondre à ce problème, un projet récemment lancé³ vise à employer l'apprentissage profond multi-couches en proposant d'entraîner un réseau de neurones pour retrouver cette distance de reconstruction sur la plage de 100 µm autorisée par le dispositif expérimental mis en place (présenté [figure 7.19](#)). Ainsi, plus qu'une perspective, cette étude est en cours de réalisation et a déjà montré des résultats encourageants qui ont été soumis pour une présentation à la conférence ISOT (*International Symposium on Optomechatronic Technology*).

3. Projet I-SITE Holonet (2020-2023) et projet ANR Holo-Control (accepté en 2021)

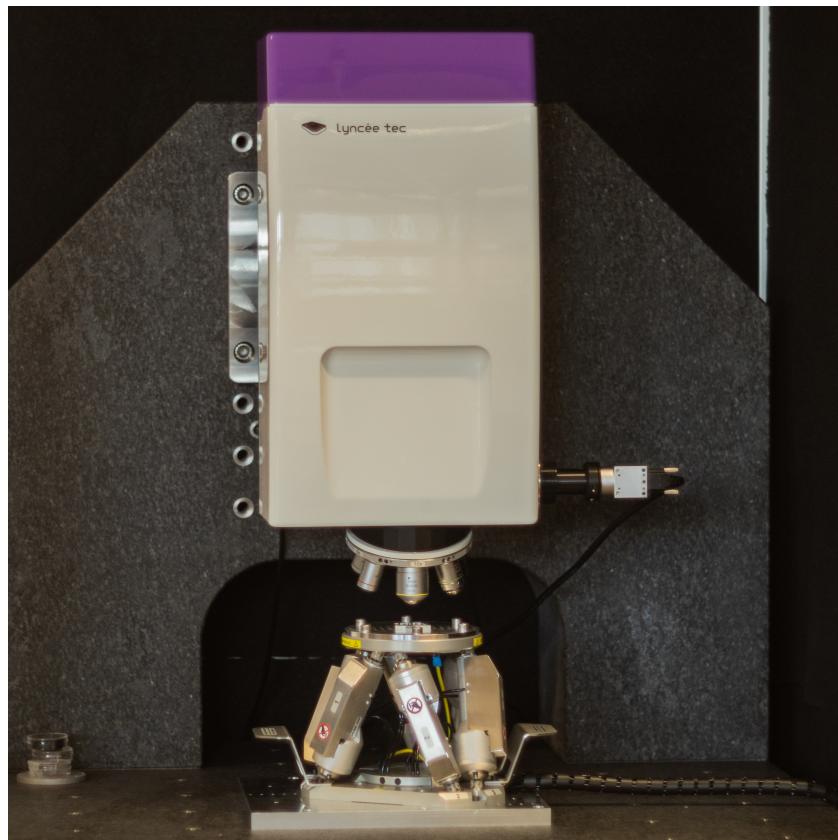


FIGURE 7.19 – Microscope à holographie numérique LynceeeTec couplé à un hexapode Newport HXP50-Meca

EMPLOI DES MIRES PÉRIODIQUES POUR DE L'ASSER-VISSEMENT VISUEL

Approche logicielle

L'implémentation logicielle de la méthode de mesure de pose par mire a montré des performances autorisant du temps réel à 25 images par seconde en considérant des images de taille 512×512 , cependant la réduction de ce temps de calcul se fait au prix d'une moins bonne résolution. Pour pallier ce problème, une programmation en unité de processeur graphique (GPU) de la bibliothèque Vernier est envisageable. Ce type de programmation offre en effet la possibilité d'intéragir directement avec la carte graphique qui traite les données en parallèle, permettant de réduire fortement le temps de calcul de pose.

Approche méthodologique

Pour réduire le temps de calcul de pose, une approche en deux temps pour effectuer la mesure de pose peut également être étudiée. Cette approche viserait à retrouver le plus simplement (à l'aide d'une détection de contours de points par exemple) et avec la plus grande fréquence de calcul possible la séquence binaire intégrée à la mire pour effectuer un pré-positionnement à une période près, avant d'employer la méthode de mesure de pose hautement résolue pour finaliser la mesure. Cette méthode trouverait son intérêt dans l'asservissement visuel où il est pertinent d'effectuer une mesure grossière avant de positionner finement le système étudié.

Une autre solution pour réduire le temps de calcul de pose serait d'étudier directement les pics de la transformée de Fourier des images acquises. Cette méthode se passerait de la mesure de phase grandement résolue, mais permettrait de trouver un compromis entre vitesse de calcul et résolution.

EXTENSION DE LA PLAGE DE MESURE DES MIRES PÉRIODIQUES

Étude de mires périodiques multi-échelles

L'emploi de l'holographie numérique offre ainsi un moyen d'augmenter la plage de mesure selon l'axe z tout en conservant une très haute résolution, et ce sur une plage de 100 µm. Pour augmenter encore cette plage de mesure et assurer un positionnement multi-échelles beaucoup employé en microrobotique afin d'étudier à la fois l'évolution macroscopique et microscopique d'un système, une mire observable avec plusieurs objectifs peut-être mise à l'étude. Par exemple l'application du Triskèle-Bot montrait ce besoin à travers l'étude macroscopique du robot (en plaçant des HP Codes au bout de chaque bras) et microscopique de la plateforme centrale (à l'aide d'une mire Megarena).

Cette nouvelle conception permettrait ainsi de s'affranchir des problèmes de recalage de référentiels parfois difficiles à résoudre. Imbriquer une mire de période très faible (typiquement observable avec un objectif 10 \times) dans une mire macroscopique (observable avec un objectif 50 mm par exemple) semble être une piste d'étude pertinente pour une étude multi-échelles à grande résolution.

Extension de la plage de mesure des angles hors-plan

Le chapitre 4 a montré comment étendre la plage de mesure pour accéder à une information de pose absolue selon les axes en translation x , y et en orientation α . Cependant cette étude d'extension de plage ne concerne que trois des six degrés de liberté accessibles par la méthode. Les angles hors-plan restent eux limités par la faible profondeur de champ donnée par les objectifs utilisés en microscopie.

Une piste pour répondre à cette problématique d'extension de la plage de mesure des angles hors-plan serait d'utiliser des mires non plus planes, mais sphériques. En effet, si une surface nette est toujours observable et ce peu importe l'angle de vue alors il devient possible de mesurer la position de la mire dans tout l'espace, levant cette contrainte de plage limitée par une faible profondeur de champ.

Extension de la profondeur de champ en microscopie

Une autre approche possible pour augmenter la profondeur de champ en microscopie sans avoir recours à l'holographie numérique consisterait à graver une mire périodique sur une surface plane avec une hauteur variable. Ainsi l'observation de la mire serait toujours nette. Cette méthode de conception de mire permettrait également de remonter à une information de la profondeur de la mire, et ce même en employant une projection orthographique.

Amélioration de la résolution de la mesure de phase

Les régressions linéaires effectuées sur chaque plan de phase déroulé ont montré comment passer d'une information échantillonnée (avec un pas pixellique) à une information de phase continue, représentée sous forme d'équation de plan. Cependant cette régression est effectuée sous l'hypothèse que l'évolution de la phase soit linéaire, ce qui n'est pas forcément le cas. En effet, certaines distorsions causées par les objectifs utilisés ou plus simplement les effets de bords peuvent perturber cette linéarité. Pour pallier ce problème, une régression plus fine en utilisant le second ordre de la phase déroulée pourrait mener à des résultats encore plus résolus.

Annexes

Annexe A

Détails sur les méthodes de mesure de pose par mires périodiques

A.1	Position des pics de Dirac en 1D	156
A.2	Mesure de phase en 2D	156
A.2.1	Position des pics de Dirac dans le cas de mires périodiques 2D unidirectionnelles	156
A.2.2	Position des pics de Dirac dans le cas de mires périodiques 2D bidirectionnelles	157
A.3	Étude des solutions pour la mesure de pose 3D	158
A.3.1	Non existence de la solution s_2	158
A.3.2	Existence de la solution s_1	159
A.4	Synchronisation de la séquence binaire avec l'imagette de phase	161

A.1 POSITION DES PICS DE DIRAC EN 1D

La position des pics de Dirac de la fonction $A(x) = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos(2\pi f_0(x - x_0)))$ sont calculés ainsi :

$$\begin{aligned}
 \mathcal{F}\{\tilde{A}(x - x_0)\} &= e^{-2\pi i u x_0} \cdot \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} (1 + \cos(2\pi f_0(x - x_0))) e^{-2\pi i u x} dx \\
 &= \frac{1}{2} e^{-iu\frac{\phi_0}{f_0}} \cdot \left(\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-2\pi i u x} dx + \int_{-\infty+\infty}^{+\infty} (e^{i2\pi f_0 x} + e^{-i2\pi f_0 x}) e^{-2\pi i u x} dx \right) \\
 &= \frac{1}{2} e^{-iu\frac{\phi_0}{f_0}} \cdot \left(\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-2\pi i u x} dx + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-2\pi i(u-f_0)x} dx + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-2\pi i(u+f_0)x} dx \right) \\
 &= \frac{1}{2} e^{-iu\frac{\phi_0}{f_0}} \cdot \left(\delta(0) + \frac{1}{2} \delta(u - f_0) + \frac{1}{2} \delta(u + f_0) \right) \\
 &= \frac{1}{2} \cdot \left(e^{-i\frac{\phi_0}{f_0}} \delta(0) + \frac{1}{2} e^{-i\frac{\phi_0}{f_0}} \delta(u - f_0) + \frac{1}{2} e^{-i\frac{\phi_0}{f_0}} \delta(u + f_0) \right)
 \end{aligned} \tag{A.1}$$

L'expression de cette transformée donne bien les pics de Dirac positionnés sur le spectre en $\delta(u - f_0)$ et $\delta(u + f_0)$

A.2 MESURE DE PHASE EN 2D

A.2.1 Position des pics de Dirac dans le cas de mires périodiques 2D unidirectionnelles

Le découpage en deux parties de la transformée de Fourier d'une mire périodique 2D à une seule direction d'équation :

$$M_1(x, y) = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos(2\pi f_1(\cos(\alpha_1)x - \sin(\alpha_1)y) + \phi_1)) \tag{A.2}$$

est donnée par le calcul suivant :

$$\begin{aligned}
 \mathcal{F}\{M_1(x, y)\} &= \iint_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2} (1 + \cos(2\pi f_1(\cos(\alpha_1)x - \sin(\alpha_1)y) + \phi_1)) e^{-2\pi i(ux+vy)} dx dy \\
 &= \frac{1}{2} \iint_{-\infty}^{+\infty} e^{-2\pi i(ux+vy)} dx dy \\
 &\quad + \frac{1}{2} \iint_{-\infty}^{+\infty} \cos(2\pi f_1(\cos(\alpha_1)x - \sin(\alpha_1)y) + \phi_1) e^{-2\pi i(ux+vy)} dx dy \\
 &= \frac{1}{2} \mathcal{F}(1) + \frac{1}{2} \hat{G}(u, v)
 \end{aligned} \tag{A.3}$$

où $\hat{G}(u, v)$ contient bien l'information sinusoïdale de la mire 2D à une direction. En utilisant la forme exponentielle du cosinus, $\hat{G}(u, v)$ est à nouveau scindé en deux transformées de Fourier indépendantes $\hat{G}_1(u, v)$ et $\hat{G}_2(u, v)$:

$$\begin{aligned}
\hat{G}(u, v) &= \frac{1}{4} \iint_{-\infty}^{+\infty} \left(e^{i2\pi f_1(\cos(\alpha_1)x - \sin(\alpha_1)y) + \phi_1} + e^{-i2\pi f_1(\cos(\alpha_1)x - \sin(\alpha_1)y) + \phi_1} \right) e^{-2\pi i(ux + vy)} dx dy \\
&= \frac{1}{4} \iint_{-\infty}^{+\infty} e^{i2\pi f_1(\cos(\alpha_1)x - \sin(\alpha_1)y) + \phi_1} e^{-2\pi i(ux + vy)} dx dy \\
&\quad + \frac{1}{4} \iint_{-\infty}^{+\infty} e^{-i2\pi f_1(\cos(\alpha_1)x - \sin(\alpha_1)y) + \phi_1} e^{-2\pi i(ux + vy)} dx dy \\
&= \hat{G}_1(u, v) + \hat{G}_2(u, v)
\end{aligned} \tag{A.4}$$

En étudiant la partie de la transformée $\hat{G}_1(u, v)$, il vient :

$$\begin{aligned}
\hat{G}_1(u, v) &= \frac{1}{4} \iint_{-\infty}^{+\infty} e^{i2\pi f_1(\cos(\alpha_1)x - \sin(\alpha_1)y) + \phi_1} e^{-2\pi i(ux + vy)} dx dy \\
&= \frac{1}{4} e^{i\phi_1} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i2\pi f_1 \cos(\alpha_1)x} e^{-2\pi iux} dx \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i2\pi f_1 \sin(\alpha_1)y} e^{-2\pi ivy} dy \\
&= \frac{1}{4} e^{i\phi_1} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i2\pi x(u - f_1 \cos(\alpha_1))} dx \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i2\pi(v + f_1 \sin(\alpha_1))} dy \\
&= \frac{1}{4} e^{i\phi_1} (\delta(u - f_1 \cos(\alpha_1)) \delta(v + f_1 \sin(\alpha_1)))
\end{aligned} \tag{A.5}$$

De même pour \hat{G}_2 :

$$\hat{G}_2(u, v) = \frac{1}{4} e^{i\phi_1} (\delta(u - f_1 \sin(\alpha_1), v - f_1 \cos(\alpha_1))) \tag{A.6}$$

Donnant la position du pic fréquentiel dans le spectre en $(-f_1 \sin(\alpha_1), -f_1 \cos(\alpha_1))$.

A.2.2 Position des pics de Dirac dans le cas de mires périodiques 2D bidirectionnelles

En reprenant l'équation de mire périodique 2D à deux directions M_t (voir équation (2.21)), il vient que :

$$\begin{aligned}
M_t(x, y) &= M_1 \cdot M_2 \\
&= \frac{1}{4} \cdot ((1 + \cos(2\pi f_1(\cos(\alpha_1)x - \sin(\alpha_1)y) + \phi_1)) \\
&\quad \cdot (1 + \cos(2\pi f_2(\sin(\alpha_2)x + \cos(\alpha_2)y) + \phi_2))) \\
&= \frac{1}{4} \cdot (1 + \cos(2\pi f_1(\cos(\alpha_1)x - \sin(\alpha_1)y) + \phi_1) \\
&\quad + \cos(2\pi f_2(\sin(\alpha_2)x + \cos(\alpha_2)y) + \phi_2) \\
&\quad + \cos(2\pi f_1(\cos(\alpha_1)x - \sin(\alpha_1)y) + \phi_1) \cdot \cos(2\pi f_2(\sin(\alpha_2)x + \cos(\alpha_2)y) + \phi_2)) \\
&= \frac{1}{4} \cdot (1 + G(x, y) + H(x, y) + G(x, y) \cdot H(x, y))
\end{aligned} \tag{A.7}$$

La transformée de Fourier de ce signal est donnée par :

$$\begin{aligned}
 \mathcal{F}\{M_t(x, y)\} &= \iint_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{4} \cdot (1 + G(x, y) + H(x, y) + G(x, y) \cdot H(x, y)) e^{-2\pi i(ux+vy)} dx dy \\
 &= \frac{1}{4} \iint_{-\infty}^{+\infty} e^{-2\pi i(ux+vy)} dx dy + \frac{1}{4} \iint_{-\infty}^{+\infty} G(x, y) e^{-2\pi i(ux+vy)} dx dy \\
 &\quad + \frac{1}{4} \iint_{-\infty}^{+\infty} H(x, y) e^{-2\pi i(ux+vy)} dx dy \\
 &\quad + \frac{1}{4} \iint_{-\infty}^{+\infty} G(x, y) \cdot H(x, y) e^{-2\pi i(ux+vy)} dx dy \\
 &= \frac{1}{4} \mathcal{F}(1) + \hat{G}(u, v) + \hat{H}(u, v) + \hat{G}(u, v) \cdot \hat{H}(u, v)
 \end{aligned} \tag{A.8}$$

La démonstration effectuée sur une mire 2D à une direction, a déjà montré que la transformée de Fourier $\hat{G}(u, v)$ donnait deux pics de Dirac conjugués (avec le découpage de $\hat{G}(u, v)$ en $\hat{G}_1(u, v)$ et $\hat{G}_2(u, v)$, [équation \(A.5\)](#) et [équation \(A.6\)](#)). De la même manière, la transformée de Fourier $\hat{H}(u, v)$ donne les pics de Dirac suivants :

$$\begin{aligned}
 \hat{H}_1(u, v) &= \frac{1}{4} e^{i\phi_2} (\delta(u - f_2 \cos(\alpha_2), v + f_2 \sin(\alpha_2))) \\
 \hat{H}_2(u, v) &= \frac{1}{4} e^{i\phi_2} (\delta(u - f_2 \sin(\alpha_2), v - f_2 \cos(\alpha_2)))
 \end{aligned} \tag{A.9}$$

Cette équation montre ainsi la position des pics de Dirac dans le spectre :

$$\left\{
 \begin{array}{ll}
 P_1 & (u - f_1 \cos(\alpha_1), v + f_1 \sin(\alpha_1)) \\
 P_2 & (u + f_1 \sin(\alpha_1), v - f_1 \cos(\alpha_1)) \\
 P_3 & (u - f_2 \cos(\alpha_2), v + f_2 \sin(\alpha_2)) \\
 P_4 & (u + f_2 \sin(\alpha_2), v - f_2 \cos(\alpha_2))
 \end{array}
 \right. \tag{A.10}$$

A.3 ÉTUDE DES SOLUTIONS POUR LA MESURE DE POSE 3D

A.3.1 Non existence de la solution s_2

Le calcul de pose 3D à l'aide de la projection orthographique a montré l'existence de deux solutions, issues de la résolution d'une équation du second ordre. Cette annexe présente en quoi une de ces solutions ne peut exister. L'[équation \(3.12\)](#) présentait comment lier la position du pic fréquentiel à l'angle hors plan β à l'aide du facteur d'échelle s . En montrant que la seconde solution calculée pour ce facteur d'échelle sort du domaine de définition du cosinus (*i.e.* $\cos(\beta) > 1$), il devient alors possible de l'écartier.

Ainsi, en partant de l'hypothèse que cette solution s_2 ne peut exister et à partir de l'inéquation suivante,

$$\cos(\beta) > 1 \tag{A.11}$$

il vient :

$$\frac{b}{s_2^2} > 1 \quad (\text{A.12})$$

$$\begin{aligned} &\Leftrightarrow 2b > b + g + d - \sqrt{(b + g + d)^2 - 4bg} \\ &\Leftrightarrow b - g - d > -\sqrt{(b + g + d)^2 - 4bg} \\ &\Leftrightarrow -b + g + d < \sqrt{(b + g + d)^2 - 4bg} \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

En considérant le carré de cette inéquation, il vient :

$$\begin{aligned} &(-b + g + d)^2 < (b + g + d)^2 - 4bg \\ &\Leftrightarrow b^2 + g^2 + d^2 - 2bg + 2gd - 2bd < b^2 + g^2 + d^2 + 2bg + 2gd + 2bd - 4bg \\ &\Leftrightarrow -4bd < 0 \end{aligned} \quad (\text{A.14})$$

Or, en utilisant les expressions de b et d , cette inéquation devient :

$$-4 \cdot \frac{u_1^2 + v_1^2}{\lambda^2} \cdot \frac{(u_2 \cos \alpha + v_2 \sin \alpha)^2}{\lambda^2} < 0 \quad (\text{A.15})$$

Comme $\lambda^2 > 0 \forall \lambda$, cette expression devient :

$$4 \cdot (u_1^2 + v_1^2) \cdot (u_2 \cos \alpha + v_2 \sin \alpha)^2 > 0 \quad (\text{A.16})$$

qui est vrai en toute condition, montrant ainsi qu'avec la solution s_2 , le cosinus de l'angle β ne peut exister, prouvant ainsi l'invalidité de la solution s_2 .

A.3.2 Existence de la solution s_1

Après avoir montré que la solution s_2 ne pouvait exister, une étude sur la solution s_1 et sur son existence est menée. Pour effectuer celle-ci, une approche similaire à celle employée pour montrer la non-existence de s_2 est mise en place. Vérifions donc qu'avec la solution s_2 , $\cos(\beta)$ et $\cos(\gamma)$ existent.

Dans un premier temps, considérons l'orientation β et montrons que $-1 \leq \frac{\sqrt{b}}{s_1} \leq 1$.

Ainsi, en considérant tout d'abord la borne inférieure, il vient :

$$\begin{aligned} &\Leftrightarrow \frac{b}{s_1^2} \geq -1 \\ &\Leftrightarrow b \geq -s_1^2 \\ &\Leftrightarrow 2b \geq -b + g + d + \sqrt{(b + g + d)^2 - 4bg} \\ &\Leftrightarrow 3b + g + d \geq -\sqrt{(b + g + d)^2 - 4bg} \\ &\Leftrightarrow -3b - g - d \leq \sqrt{(b + g + d)^2 - 4bg} \\ &\Rightarrow (-3b - g - d)^2 \geq (b + g + d)^2 - 4bg \\ &\Leftrightarrow 9b^2 + g^2 + d^2 + 6bg + 2gd + 6bd \geq b^2 + g^2 + d^2 + 2bg + 2gd + 2bd - 4bg \\ &\Leftrightarrow 8b^2 + 8bg + 4bd \geq 0 \end{aligned} \quad (\text{A.17})$$

Or, avec les expressions de bg et de bd , qui sont toujours positives :

$$bg = \frac{u_1^2 + v_1^2}{\lambda^2} \cdot \frac{(u_2 \cos \alpha + v_2 \sin \alpha)^2}{\lambda^2} \geq 0 \quad (\text{A.18})$$

et

$$bd = \frac{u_1^2 + v_1^2}{\lambda^2} \cdot \frac{(-u_2 \sin \alpha + v_2 \cos \alpha)^2}{\lambda^2} \geq 0 \quad (\text{A.19})$$

il vient que cette inéquation est toujours vraie. De manière similaire pour l'étude de la borne supérieure, nous montrons que :

$$\begin{aligned} &\Leftrightarrow \frac{b}{s_1^2} \leq 1 \\ &\Leftrightarrow b \leq s_1^2 \\ &\Leftrightarrow 2b \leq b + g + d + \sqrt{(b + g + d)^2 - 4bg} \\ &\Leftrightarrow b - g - d \leq \sqrt{(b + g + d)^2 - 4bg} \\ &\Rightarrow (b - g - d)^2 \leq (b + g + d)^2 - 4bg \\ &\Leftrightarrow b^2 + g^2 + d^2 - 2bg + 2gd - 2bd \leq b^2 + g^2 + d^2 + 2bg + 2gd + 2bd - 4bg \\ &\Leftrightarrow -4bd \leq 0 \end{aligned} \quad (\text{A.20})$$

qui est à nouveau valide, comme $bd \geq 0$.

Ainsi en considérant la solution s_1 , le cosinus de l'angle β existe bien car compris entre les bornes -1 et 1 . En continuant cette étude avec les expressions de $\cos^2(\gamma)$ et de $\sin^2(\beta) \sin^2(\gamma)$, l'existence complète de cette solution est démontrable.

A.4 SYNCHRONISATION DE LA SÉQUENCE BINAIRE AVEC L'IMAGETTE DE PHASE

La synchronisation de l'imagette de phase avec la séquence codée est effectuée en faisant appel à la dispositions des différentes valeurs identifiées de la cellule globale. Ainsi ces cellules globales de taille 3×3 peuvent se présenter selon un total de neuf dispositions qui sont listées ci-dessous dans la figure A.1. Cependant ces neuf dispositions ne reflètent pas l'absence du point codant de la cellule codante. L'intégration de celui-ci dans les dispositions possibles pour effectuer cette synchronisation résulte en quatre variantes, donnant ainsi lieu à 36 dispositions possibles.

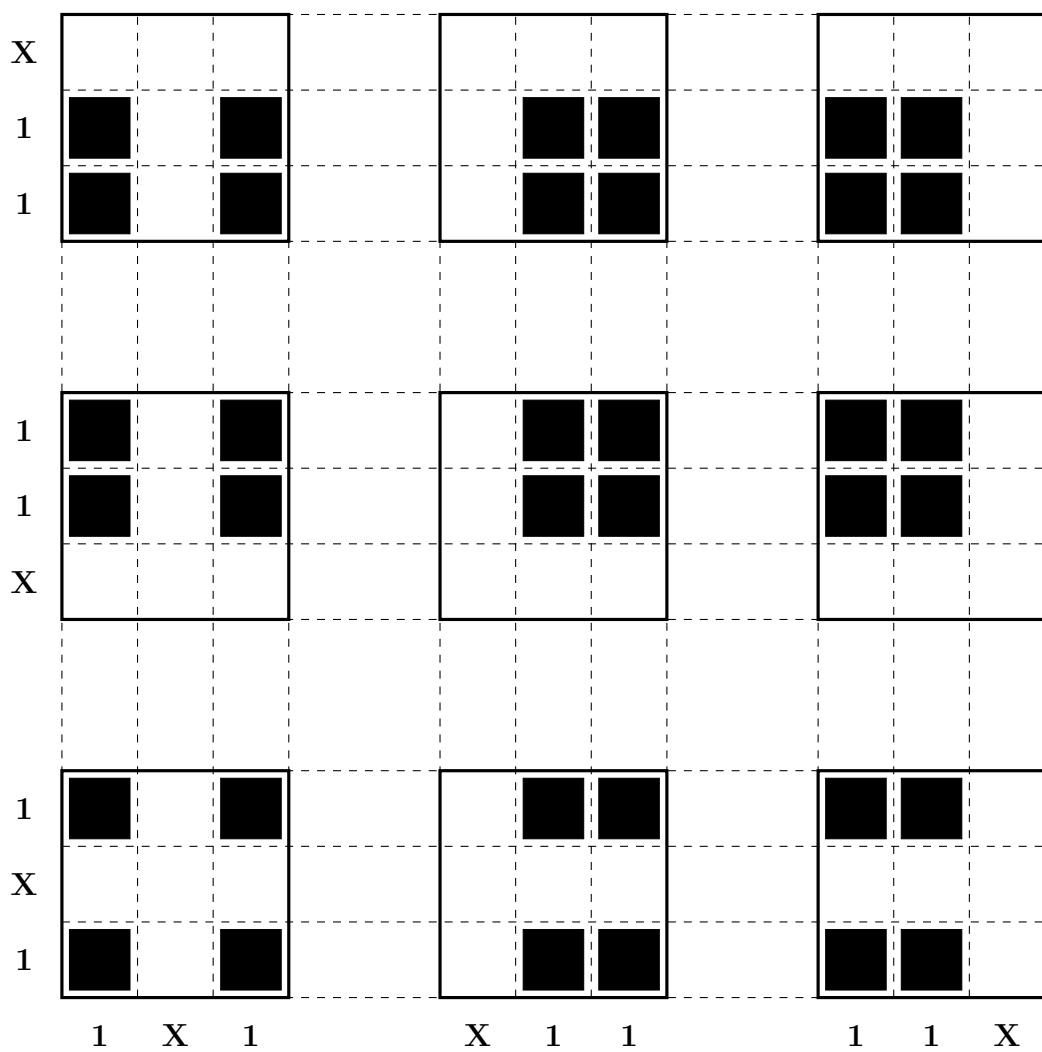


FIGURE A.1 – Dispositions possibles de la cellule codante dans l'imagette de phase. **X** dénote ici la valeur codante du bit, indéterminée et les carrés noirs représentent les points toujours présents, utilisés pour effectuer cette synchronisation.

Annexe A. Détails sur les méthodes de mesure de pose par mires périodiques

Annexe B

Détails sur la mise en pratique des méthodes de mesure de pose par mires périodiques

B.1	Évaluation du bruit de mesure de la méthode.....	164
B.2	Exemple de code utilisé par la bibliothèque Vernier	167
B.3	Détails de conception du HP Code	167
B.3.1	Méthode de mesure de pose des HP Code	167
B.3.2	Détermination du nombre minimal de périodes pour obtenir une résolution au millième de pixel	170
B.3.3	Validation expérimentale de la conception des HP Codes.	170

B.1 ÉVALUATION DU BRUIT DE MESURE DE LA MÉTHODE

Le bruit de mesure présenté avec un écart type inférieur au nanomètre en translation x,y englobe avec lui plusieurs incertitudes sur la mesure qui sont quantifiées ici. Parmi ces incertitudes nous identifions celles provenant de la méthode de mesure, l'impact de l'environnement ainsi que l'incertitude liée au processus d'acquisition d'images.

La première source majeure d'incertitude explorée concerne la stabilité environnementale qui comprend les vibrations, changements de température ainsi que le bruit acoustique. Pour identifier ce bruit indépendamment du processus d'imagerie, les images acquises pendant l'expérience de bruit statique (voir [figure 5.6](#)) sont traitées en divisant chaque image en deux sous images de taille 1024×1024 pixels. Comme chaque moitié de ces images traitées ont été exposées aux mêmes perturbations environnementales, en étudiant la pose mesurée entre chaque centre, une mesure du bruit statique de la mesure découpée de son environnement est réalisée (englobant le bruit de la mesure et le bruit de l'acquisition des images). La [figure B.1](#) montre en bleu la courbe de bruit statique sur une image entière et en rouge la courbe de bruit statique résultant de l'analyse de chaque moitié d'image.

Ce bruit passe alors de 0.96 nm à 0.24 nm en x et de 0.77 nm à 0.19 nm en y . Ce résultat montre que le bruit environnemental est responsable à plus de 93 % de la variance totale de l'erreur mesurée comme présenté dans le [tableau B.1](#).

	x (mètres)	y (mètres)	α (rad.)
σ^2 total	$9.22 \cdot 10^{-7}$	$5.93 \cdot 10^{-7}$	$1.66 \cdot 10^{-11}$
Pourcentage	100 %	100 %	100 %
σ^2 environnement	$8.66 \cdot 10^{-7}$	$5.56 \cdot 10^{-7}$	$1.51 \cdot 10^{-11}$
Pourcentage	93.92 %	93.75 %	91.28 %
σ^2 image	$2.14 \cdot 10^{-8}$	$2.69 \cdot 10^{-8}$	$1.06 \cdot 10^{-12}$
Pourcentage	2.32 %	4.53 %	6.42 %
σ^2 arrondi	$3.34 \cdot 10^{-15}$	$3.05 \cdot 10^{-15}$	$1.16 \cdot 10^{-19}$
Pourcentage	0.00 %	0.00 %	0.00 %
σ^2 non expliqué	$3.47 \cdot 10^{-8}$	$1.02 \cdot 10^{-8}$	$3.8 \cdot 10^{-13}$
Pourcentage	3.76 %	1.72 %	2.30 %
σ^2 différentiel	$6.61 \cdot 10^{-8}$	$3.7 \cdot 10^{-8}$	$1.44 \cdot 10^{-12}$

TABLE B.1 – Evaluation des parts d'incertitudes sur la mesure

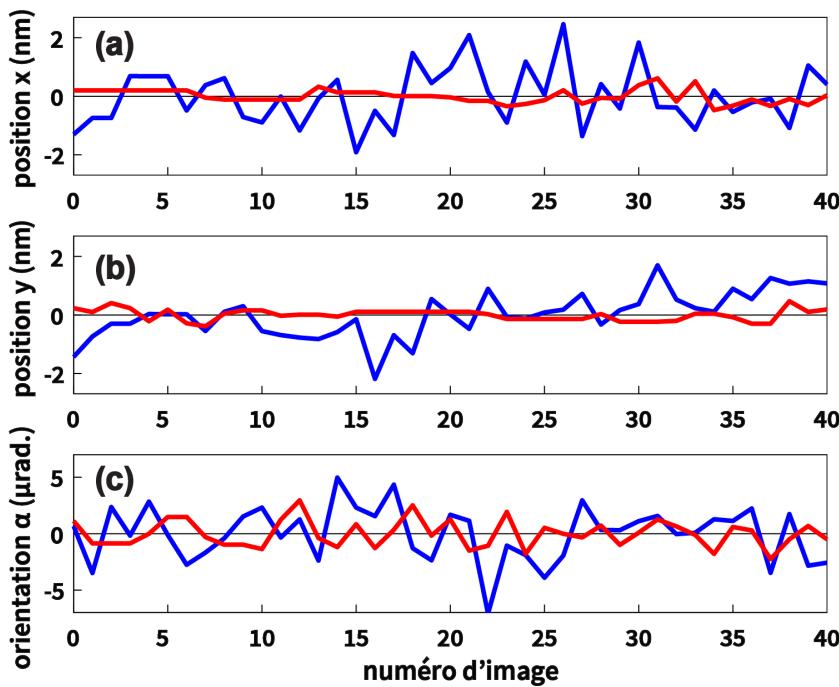


FIGURE B.1 – Ecart relatif entre le centre de chaque partie de mire considérée (gauche et droite) présenté en rouge, par rapport à la mesure effectuée sur toute la mire (en bleu).

Le second facteur d’incertitude relevé concerne l’acquisition des images de la mire. Les trous de la mire sont réalisés par ablation d’une couche de chrome qui pave initialement toute la surface en verre. Cette couche est opaque à la lumière UV, mais partiellement transparente à la lumière rouge utilisée pour éclairer le dispositif. Le choix d’éclairer la mire avec une lumière rouge est justifié par la meilleure réponse du capteur CMOS de la caméra pour ces longueurs d’onde. Combiné avec la dispersion des rayons lumineux à travers la surface en verre de 3 mm d’épaisseur, cette configuration produit un bruit de fond présent sur les images acquises.

Usuellement cette lumière parasite de la scène est fixée à 18 % (valeur donnée par la norme ISO 2720) alors que celle du chrome à presque 100 %. Une fois remis à l’échelle des 4096 niveaux de gris alloués par la caméra, cette lumière parasite causée par la réflectivité de l’arrière-plan de la scène se traduit par un niveau de gris de l’ordre de 650 niveaux de gris, ce qui se retrouve dans l’histogramme présenté plus bas en [figure B.2](#).

La [figure B.2](#) montre ce niveau de bruit de l’arrière-plan mesuré sur une image acquise pendant les essais expérimentaux. L’histogramme de l’arrière-plan montre une répartition sur 110 niveaux de gris, correspondant à 3 % de la dynamique totale allouée sur les 12 bits d’encodage de niveaux de gris.

Pour quantifier ce bruit d’acquisition, une simulation effectuée sur 100 images de mires altérées d’un bruit Gaussien et générées à la même pose est mise en oeuvre.

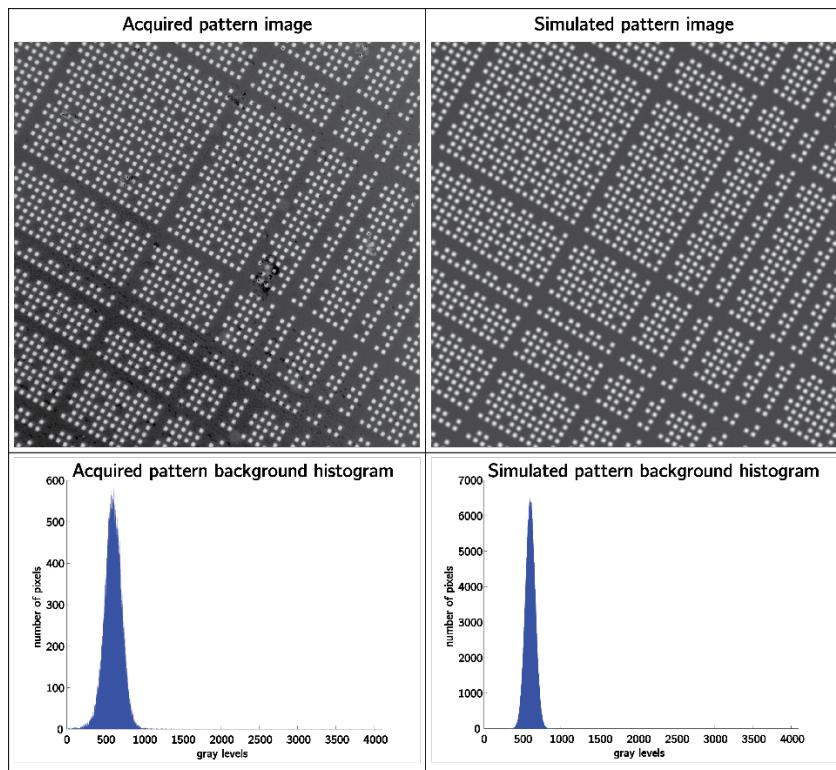


FIGURE B.2 – Comparaison du bruit présent pendant l’acquisition de mires avec (a) une mire acquise expérimentalement et (b) une mire générée avec le même niveau de bruit ambiant.

L’écart type de ce bruit Gaussien est calculé pour correspondre au mieux à la réalité des images acquises, comme montré dans la seconde sous-figure B.2. L’analyse de la pose des 100 images générées montre une erreur de positionnement d’écart type 0.15 nm selon x et de 0.16 nm selon l’axe y .

Le bruit présent pendant l’acquisition des images joue donc pour plus de 5 % du bruit total quantifié pendant la mesure expérimentale.

Les 2 % restants d’incertitude impactant la mesure sont plus durs à sourcer, et comprennent entre autres les distorsions optiques, la fabrication de la mire ou encore l’échantillonnage de l’image.

B.2 EXEMPLE DE CODE UTILISÉ PAR LA BIBLIOTHÈQUE VERNIER

L'emploi de fichiers tiers au format .json ainsi que la hiérarchie de classes sous forme de fabrique est conçue pour rendre l'utilisation de la bibliothèque Vernier facile pour les utilisateurs souhaitant intégrer cette méthode dans diverses applications. Le code suivant met en avant cette facilité d'emploi de la bibliothèque logicielle en présentant un exemple pour effectuer une mesure de pose à partir d'une mire périodique définie dans le fichier "config.json". Dans le cas présenté, ce fichier de configuration fait apparaître l'emploi d'une mire périodique de type Megarena, encodée sur 12 bits et de période physique 10 µm par exemple.

```
{
    "MegarenaPattern": {
        "description": "Megarena pattern config file used
for the experiment [...], using the 12 bits version etc.",
        "date": "Jan 2021",
        "author": "FEMTO-ST",
        "unit": "micrometers",
        "period": 10.0,
        "codeSize": 12, // 8 or 12
    }
}
```

FIGURE B.3 – Organisation du fichier de définition des paramètres des mires périodiques, appliquée dans le cas présenté à une mire Megarena

B.3 DÉTAILS DE CONCEPTION DU HP CODE

Comme évoqué dans la section présentant les mires HP Codes, ces marqueurs possèdent deux types d'information, à savoir d'une part trois motifs assurant la détection *a priori* du marqueur dans l'image et d'autre part l'affinement de cette mesure en utilisant la phase du motif périodique inséré dans le marqueur.

B.3.1 Méthode de mesure de pose des HP Code

La détection de ces marqueurs est réalisée soit en faisant appel à un algorithme de détection de contours, soit en utilisant directement la transformée de Fourier de l'image et en utilisant les imagettes décrites dans le chapitre 4. La figure B.4 présente les différentes étapes effectuées pour mesurer la pose du HP Code en uti-

lisant une détection des contours des sous-marqueurs pour évaluer le centre du HP Code et recadrer celui-ci.

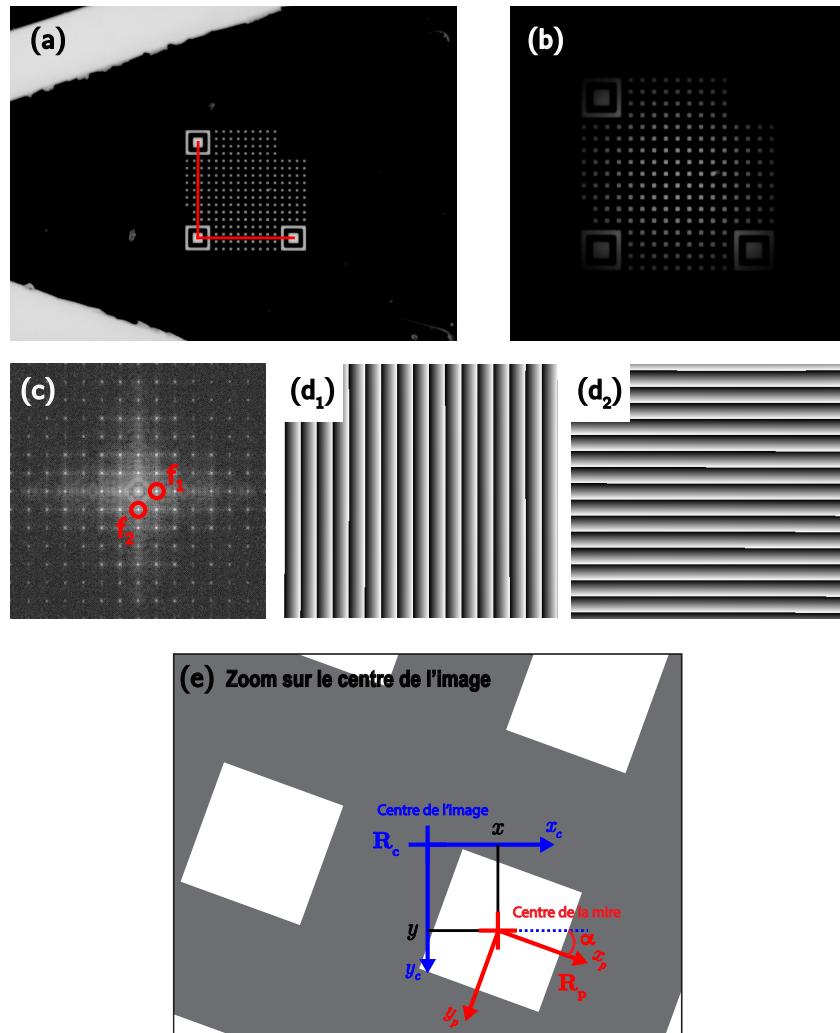


FIGURE B.4 – Étapes de mesure de pose basée sur une mire HP Code avec (a) le HP Code acquis par la caméra, (b) HP Code recadré et centré grâce à la détection préalable de son centre avec les trois sous marqueurs (c) transformée de Fourier du HP Code recadré (d_1) et (d_2) phases unidirectionnelles obtenues après transformée de Fourier inverse appliquée selon chacun des lobes f_1 et f_2 et (e) schéma présentant le lien entre pose du HP Code et référentiel caméra.

Cependant la détection des contours est très sensible au bruit de l'image, aux conditions d'éclairage ou encore à l'occultation partielle des marqueurs. Pour pallier ce problème, une deuxième méthode de détection des sous-marqueurs emploie la mesure de phase en effectuant une première transformée de Fourier sur toute l'image, avant de filtrer les deux lobes représentatifs de chaque direction à l'aide d'un filtre gaussien très serré (laissant donc de côté toute résolution spatiale pour

avoir la meilleure résolution spectrale possible). Une fois les deux images de phase obtenues par transformée de Fourier inverse effectuée sur chacun des lobes filtrés, l'imagette de phase est calculée selon la méthode présentée section 4.2.2. De là une convolution entre le HP Code binaire et cette imagette de phase donne le centre (à une période près) du centre du HP Code dans l'image par rapport au centre de celle-ci (centre compté en constante de phase), comme présenté figure B.5. Une fois la position de ce centre connue, les étapes suivantes reprennent celles décrites figure B.4.

Bien que plus robuste, cette méthode est bien plus lente que celle utilisant la détection des contours des sous-marqueurs car la méthode de mesure de pose est répétée deux fois avec des filtres spectraux différents.

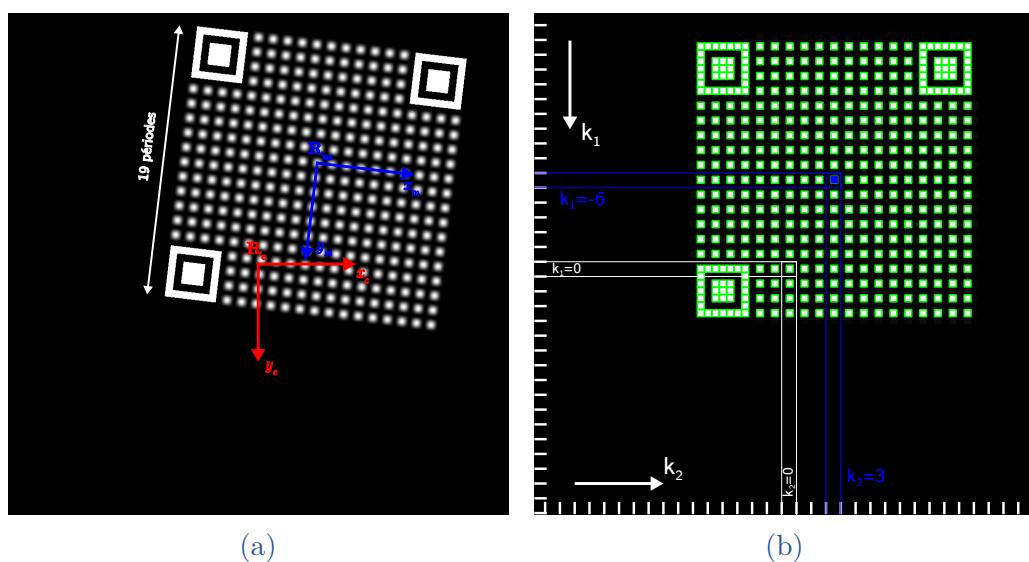


FIGURE B.5 – Processus de mesure de pose de HP Code en utilisant la segmentation en imagette de constante de phases avec (a) HP Code dans une image avec en rouge le repère caméra R_c . (b) montre la segmentation en imagette de phase avec un repère gradué en constantes de phase, permettant après convolution avec le marqueur binaire de déterminer la position du centre du HP Code.

Une fois la position du centre du HP Code dans l'image connue, les équations suivantes faisant intervenir les régressions linéaires de chaque plan de phase assurent la mesure de pose hautement résolue du HP Code dans l'image :

$$\begin{cases} -\pi < a_1 x_{rough} + b_1 y_{rough} + c_1 + 2k_1\pi < \pi \\ -\pi < a_2 x_{rough} + b_2 y_{rough} + c_2 + 2k_2\pi < \pi \end{cases} \quad (\text{B.1})$$

où x_{rough} et y_{rough} représentent la position centrale du HP Code résolue au pixel près, donnée soit par la mesure du centre en utilisant la détection des contours des sous-marqueurs soit en utilisant la segmentation en imagette de phase (voir

section 4.2.2). La pose est ainsi calculée en utilisant les équations des plans de phase, mais non plus dans le repère de la mire mais dans celui de l'image à l'aide de l'expression suivante :

$$\begin{cases} x_{pattern} = \frac{b_1 c'_2 - c'_1 b_2}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \\ y_{pattern} = \frac{a_2 c'_1 - a_1 c'_2}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \end{cases} \quad (\text{B.2})$$

avec $c'_1 = c_1 + 2k_1\pi$ et $c'_2 = c_2 + 2k_2\pi$.

B.3.2 Détermination du nombre minimal de périodes pour obtenir une résolution au millième de pixel

La particularité de la conception de ces HP Code est qu'elle permet de choisir combien de périodes insérer dans le marqueur. Cependant trouver un compromis entre un nombre de périodes réduit assurant un fort potentiel d'intégration sur diverses applications et une bonne préservation de l'information de phase assurée par la redondance des points n'est pas aisé.

Pour répondre à cette question, une simulation étudiant la résolution accessible en fonction du nombre de périodes comprises dans le HP Code a été mise en place. Cette simulation numérique génère 100 mires à des poses aléatoires et calcule l'écart-type de l'erreur moyenne entre la pose envoyée et celle mesurée par la méthode décrite plus haut. L'essai est répété deux fois pour des HP Codes comprenant entre 7 et 29 périodes. Le premier essai est effectué sur des images simulées parfaites alors que le second est mené avec des images quantifiées sur 12 bits et altérées par un bruit d'une magnitude de 650 niveaux de gris (représentatif du niveau de gris présent sur l'arrière-plan des images acquises expérimentalement). Les résultats présentés dans la figure B.6 montrent qu'au-delà de 17 périodes une résolution d'un millième de pixel est atteinte, et qu'au-delà de cette valeur le gain en résolution n'est pas significatif. Ainsi intégrer 17 périodes dans les HP Codes semble fournir un bon compromis entre taille globale du marqueur et résolution atteignable.

B.3.3 Validation expérimentale de la conception des HP Codes

Pour s'assurer du bon fonctionnement en conditions expérimentales de cette conception, le **dispositif expérimental A** présenté section 5.1 est utilisé en employant ici un objectif 5× (Optem M Plan Apo) au lieu du 10× utilisé précédemment. En effet le HP Code mis à l'épreuve dans cette batterie d'essais expérimentaux est fabriqué avec une période de 40 µm, résultant en un HP Code de 680 µm de côté. Le premier essai réalisé vise à étudier le bruit statique de la mesure de pose. Cet essai est effectué sur 100 images acquises à une fréquence de 20 images par seconde. Le tableau B.2 présente les résultats de cette étude et montre la grande résolution accessible par cette méthode dont le bruit de mesure n'excède pas les 2.4 nm en translation et 4.56 µrad. en orientation.

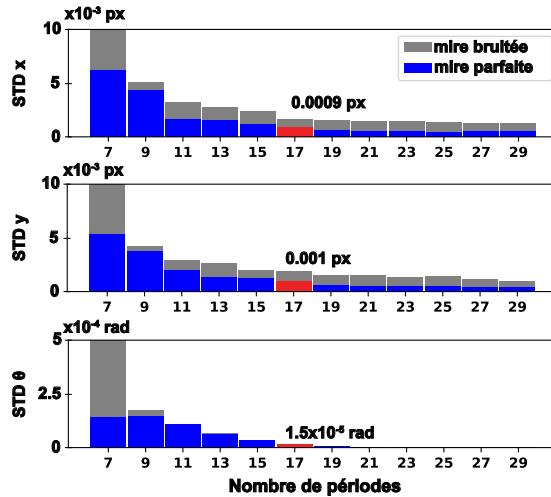


FIGURE B.6 – Évolution de l'écart-type de l'erreur de pose en fonction du nombre de périodes comprises dans le HP Code effectué à la fois sur des images simulées parfaites et bruitées.

Axe	bruit statique (STD)	erreur de linéarité
x	1.8 nm	0.09 %
y	2.4 nm	Non testé
α	4.56 μ rad.	0.005 %

TABLE B.2 – Mesure expérimentale du bruit de mesure en configuration statique et de la linéarité des HP Codes

Le second essai mené vise à vérifier la linéarité de la méthode en utilisant le **dispositif expérimental A** avec l'actionneur linéaire sollicité sur une course de 10 μ m et le dispositif **B** avec l'actionneur rotatif sollicité sur 2π . Le tableau B.2 montre le résultat de cette expérience en présentant un taux d'erreur de linéarité inférieur à 0.1 % en translation et inférieur à 0.005 % en orientation.

Le dernier essai mené concerne l'étude de la résolution expérimentale accessible par la mesure. Pour cela, les deux **dispositifs A** et **B** sont utilisés en envoyant des créneaux respectifs de 5 nm et de 10 μ rad. sont respectivement envoyés à chacun des actionneurs à une fréquence de 0.5 Hz avec la caméra configurée à une fréquence d'acquisition de 20 images par seconde.

La figure B.7 montre les résultats de cette expérience en présentant la validation expérimentale de cet essai de résolution, les créneaux envoyés à chacun des actionneurs étant toujours visibles. Cette étude démontre la grande résolution des HP Codes conçus, rendant ainsi leur utilisation dans des systèmes microrobotiques très intéressante, ceux-ci ne nécessitant que peu de surface pour être intégrés.

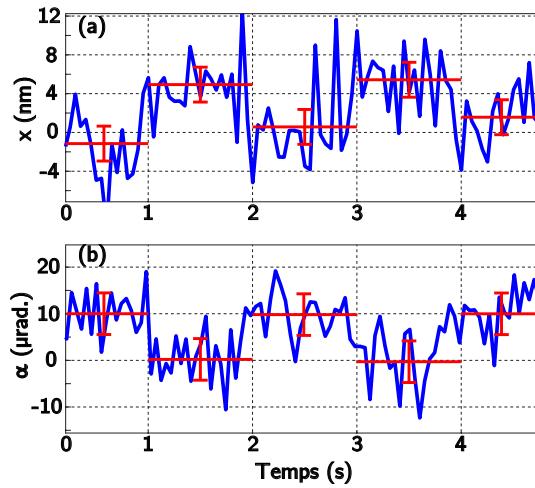


FIGURE B.7 – Essai de résolution mené sur les HP Codes en translation et en orientation avec des créneaux respectifs de 5 nm et de 10 $\mu\text{rad.}$ envoyés à chacun des actionneurs à une fréquence de 0.5 Hz. Les barres horizontales rouges dénotent la valeur moyenne calculée sur chaque créneau tandis que les barres verticales représentent l'écart-type mesuré en condition statique (tableau B.2)

Liste des publications

REVUES INTERNATIONALES À COMITÉ DE LECTURE

Articles Parus

- André, A. N., Sandoz, P., Mauzé, B., Jacquot, M., & Laurent, G. J. (2020). **Sensing one nanometer over ten centimeters : A microencoded target for visual in-plane position measurement.** *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 25(3), 1193-1201.
- Mauzé, B., Dahmouche, R., Laurent, G. J., André, A. N., Rougeot, P., Sandoz, P., & Clévy, C. (2020). **Nanometer precision with a planar parallel continuum robot.** *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(3), 3806-3813.
- André, A. N., Sandoz, P., Mauzé, B., Jacquot, M., & Laurent, G. J. (2020). **Robust phase-based decoding for absolute (X, Y, Θ) positioning by vision.** *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, 1-12.

Articles soumis

- Avril 2021 : André, A. N., Sandoz, P., Mauzé, B., Jacquot, M., & Laurent, G. J. **Pose Measurement at Small Scale by Spectral Analysis of Periodic Patterns.** *International Journal of Computer Vision*
- Juillet 2021 : André, A. N., Lehmann, O., Govilas, J., Laurent, G. J., Saadana, H., Sandoz, P., Gauthier, V., Lefevre, A., Bolopion, A., Agnus, J., Placet, V., & Clévy, C. **Robotic Micro-Assembly of Fluidic Chips and Single Fiber Compression Test Based-on $XY\Theta$ Visual Measurement with High-Precision Fiducial Markers.** *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*

CONFÉRENCES INTERNATIONALES AVEC COMITÉ DE LECTURE ET ÉDITION DES ACTES

Articles de conférence parus

- André, A. N., Sandoz, P., Jacquot, M., & Laurent, G. J. (2020, July). **Robust, precise and scalable : A phase-encoded pattern for visual X, Y, Θ positioning.** In *2020 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)* (pp. 1-5). IEEE.
- Juillet 2021 : Cuenat, S., André, A. N., Sandoz, P., Couturier, R., Laurent, G. J., & Jacquot, M., **Self-Autofocusing using Deep Learning for Digital Holography and Applied to Position Measurement.** *International Symposium on Optomechatronic Technology (ISOT)*
- Juillet 2021 : André, A. N., Sandoz, P., Mauzé, B., Jacquot, M., & Laurent, G. J., **Encoded pseudo-periodic patterns for robust visual pose determination at the microscale.** *International Symposium on Optomechatronic Technology (ISOT)*

Articles de conférence soumis

- Juillet 2021 : Andreoli, L., Cuenat, S., André, A. N., Sandoz, P., Couturier, R., Laurent, G. J., & Jacquot, M. **Extended machine vision control capabilities using digital holography and transformer neural networks.** *SPIE Photonics West 2022*

CONFÉRENCES INTERNATIONALES AVEC COMITÉ DE LECTURE SANS ACTES

- André, A. N., Sandoz, P., Mauzé, B., Jacquot, M., & Laurent, G. J. (2020). **Sensing one nanometer over ten centimeters : A microencoded target for visual in-plane position measurement.** *IEEE/ASME 2020 International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics.*

DÉPÔT LOGICIEL

- André, A. N., Sandoz, P., & Laurent, G. J., Logiciel **Vernier Library** déposé à l'Agence pour la Protection des Programmes (APP), identifiant IDDN.FR.001.510013.000.S.P.2020.000.41100, Dec. 2020.

Bibliographie

- [Al-Kaff18] Abdulla AL-KAFF et al. « Survey of computer vision algorithms and applications for unmanned aerial vehicles ». *Expert Systems with Applications* 92 (2018), p. 447-463.
- [André20a] Antoine N ANDRÉ et al. « Robust phase-based decoding for absolute (X, Y, Θ) positioning by vision ». *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 70 (2020), p. 1-12.
- [André20b] Antoine N ANDRÉ et al. « Sensing one nanometer over ten centimeters : A microencoded target for visual in-plane position measurement ». *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 25.3 (2020), p. 1193-1201.
- [Andrew01] Alex M ANDREW. « Multiple view geometry in computer vision ». *Kybernetes* (2001).
- [Ayache95] Nicholas AYACHE. « Medical computer vision, virtual reality and robotics ». *Image and vision computing* 13.4 (1995), p. 295-313.
- [Azar15] Ehsan Rezazadeh AZAR, Chen FENG et Vineet R KAMAT. « Feasibility of in-plane articulation monitoring of excavator arm using planar marker tracking ». *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)* 20.15 (2015), p. 213-229.
- [Azizipour20] Neda AZIZIPOUR et al. « Evolution of biochip technology : A review from lab-on-a-chip to organ-on-a-chip ». *Micro-machines* 11.6 (2020), p. 599.
- [Basiratzadeh19] Shahin BASIRATZADEH et al. « Fiducial marker approach for biomechanical smartphone-based measurements ». *2019 3rd International Conference on Bio-engineering for Smart Technologies (BioSMART)*. IEEE. 2019, p. 1-4.
- [Bay08] Herbert BAY et al. « Speeded-up robust features (SURF) ». *Computer vision and image understanding* 110.3 (2008), p. 346-359.
- [Belussi11] Luiz BELUSSI et Nina HIRATA. « Fast QR code detection in arbitrarily acquired images ». *2011 24th SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images*. IEEE. 2011, p. 281-288.

- [Black17] Caroline B BLACK, John TILL et D Caleb RUCKER. « Parallel continuum robots : Modeling, analysis, and actuation-based force sensing ». *IEEE Transactions on Robotics* 34.1 (2017), p. 29-47.
- [Bomarito17] GF BOMARITO et al. « Increasing accuracy and precision of digital image correlation through pattern optimization ». *Optics and Lasers in Engineering* 91 (2017), p. 73-85.
- [Borji19] Ali BORJI et al. « Salient object detection : A survey ». *Computational visual media* 5.2 (2019), p. 117-150.
- [Bouguet04] J-Y BOUGUET. « Camera calibration toolbox for matlab ». http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html (2004).
- [Bruckstein00] Alfred M BRUCKSTEIN et al. « New devices for 3D pose estimation : Mantis eyes, Agam paintings, sundials, and other space fiducials ». *International Journal of Computer Vision* 39.2 (2000), p. 131-139.
- [Bruckstein99] Alfred M BRUCKSTEIN et al. « Optimum fiducials under weak perspective projection ». *International Journal of Computer Vision* 35.3 (1999), p. 223-244.
- [Chen16] Zong-Hao CHEN et Peisen S HUANG. « A vision-based method for planar position measurement ». *Measurement Science and Technology* 27.12 (2016), p. 125018.
- [Chen18] Long CHEN et al. « SLAM-based dense surface reconstruction in monocular minimally invasive surgery and its application to augmented reality ». *Computer methods and programs in biomedicine* 158 (2018), p. 135-146.
- [Chen20] Xiangcheng CHEN et al. « Fourier-transform-based two-stage camera calibration method with simple periodical pattern ». *Optics and Lasers in Engineering* 133 (2020), p. 106121.
- [Collins14] Toby COLLINS et Adrien BARTOLI. « Infinitesimal plane-based pose estimation ». *International journal of computer vision* 109.3 (2014), p. 252-286.
- [Combes87] Jean-Michel COMBES, Alexander GROSSMANN et Philippe TCHAMITCHIAN. *Wavelets : Time-Frequency Methods and Phase Space Proceedings of the International Conference, Marseille, France, December 14–18, 1987*. Springer Science & Business Media, 1987.
- [Courbon09a] Jonathan COURBON, Youcef MEZOUAR et Philippe MARTINET. « Autonomous navigation of vehicles from a visual memory using a generic camera model ». *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 10.3 (2009), p. 392-402.

- [Courbon09b] Jonathan COURBON et al. « Visual navigation of a quadrotor aerial vehicle ». *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE. 2009, p. 5315-5320.
- [Didier08] Jean-Yves DIDIER, Fakhr-Eddine ABABSA et Malik MALLEM. « Hybrid camera pose estimation combining square fiducials localization technique and orthogonal iteration algorithm ». *International Journal of Image and Graphics* 8.01 (2008), p. 169-188.
- [El Asmai20] Salma EL ASMAI et al. « Proposition of a periodic verification test for Articulated Arm Coordinate Measuring Machines using a small 3D artefact ». *Measurement* 154 (2020), p. 107472.
- [Fiala05] Mark FIALA. « ARTag, a fiducial marker system using digital techniques ». *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*. T. 2. IEEE. 2005, p. 590-596.
- [Floros13] Georgios FLOROS, Benito VAN DER ZANDER et Bastian LEIBE. « Openstreetslam : Global vehicle localization using openstreetmaps ». *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE. 2013, p. 1054-1059.
- [Galeano-Zea10] July-Andrea GALEANO-ZEA et al. « Pseudo-periodic encryption of extended 2-D surfaces for high accurate recovery of any random zone by vision ». *International Journal of Optomechatronics* 4.1 (2010), p. 65-82.
- [Garrido-Jurado14] Sergio GARRIDO-JURADO et al. « Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion ». *Pattern Recognition* 47.6 (2014), p. 2280-2292.
- [Gu11] Yunhua GU et Weixiang ZHANG. « QR code recognition based on image processing ». *international conference on information science and technology*. IEEE. 2011, p. 733-736.
- [Guelpa14] Valérian GUELPA et al. « Subpixelic measurement of large 1D displacements : Principle, processing algorithms, performances and software ». *Sensors* 14.3 (2014), p. 5056-5073.
- [Guelpa15] Valérian GUELPA et al. « Vision-based microforce measurement with a large range-to-resolution ratio using a twin-scale pattern ». *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 20.6 (2015), p. 3148-3156.
- [Guelpa16] Valérian GUELPA et al. « 2D visual micro-position measurement based on intertwined twin-scale patterns ». *Sensors and Actuators A : Physical* 248 (2016), p. 272-280.

- [Hasan21] Md Kamrul HASAN et al. « Detection, segmentation, and 3D pose estimation of surgical tools using convolutional neural networks and algebraic geometry ». *Medical Image Analysis* 70 (2021), p. 101994.
- [Huang21] XuHai HUANG et al. « Self-aligned sequential lateral field non-uniformities over channel depth for high throughput dielectrophoretic cell deflection ». *Lab on a Chip* 21.5 (2021), p. 835-843.
- [Janai20] Joel JANAI et al. « Computer vision for autonomous vehicles : Problems, datasets and state of the art ». *Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision* 12.1–3 (2020), p. 1-308.
- [Junior10] Julio Cezar Silveira Jacques JUNIOR, Soraia Raupp MUSSE et Claudio Rosito JUNG. « Crowd analysis using computer vision techniques ». *IEEE Signal Processing Magazine* 27.5 (2010), p. 66-77.
- [Kanellakis17] Christoforos KANELAKIS et George NIKOLAKOPOULOS. « Survey on computer vision for UAVs : Current developments and trends ». *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 87.1 (2017), p. 141-168.
- [Kim12] Jong-Ahn KIM et al. « An optical absolute position measurement method using a phase-encoded single track binary code ». *Review of Scientific Instruments* 83.11 (2012), p. 115115.
- [Kim13] Jong-Ahn KIM et al. « Note : Nonlinearity error compensated absolute planar position measurement using a two-dimensional phase-encoded binary grating ». *Review of Scientific Instruments* 84.5 (2013), p. 056102.
- [Kim15] Yong-Sik KIM et al. « Design of MEMS vision tracking system based on a micro fiducial marker ». *Sensors and Actuators A : Physical* 234 (2015), p. 48-56.
- [Kim18a] Hye-Jong KIM et al. « Mechanical design and control of inflatable robotic arms for high positioning accuracy ». *Advanced Robotics* 32.2 (2018), p. 89-104.
- [Kim18b] Jong-Ahn KIM et al. « Note : An absolute XY-Θ position sensor using a two-dimensional phase-encoded binary scale ». *Review of Scientific Instruments* 89.4 (2018), p. 046105.
- [Klimek13] Gabriel KLIMEK et Zoltan VAMOSSY. « QR code detection using parallel lines ». *2013 IEEE 14th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI)*. IEEE. 2013, p. 477-481.

- [Kokorian14] Jaap KOKORIAN, Federico BUJA et Willem Merlijn van SPENGEN. « In-plane displacement detection with picometer accuracy on a conventional microscope ». *Journal of Microelectromechanical Systems* 24.3 (2014), p. 618-625.
- [Krotkov88] Eric KROTKOV. « Focusing ». *International Journal of Computer Vision* 1.3 (1988), p. 223-237.
- [Li19] Hai LI et al. « Realtime in-plane displacements tracking of the precision positioning stage based on computer micro-vision ». *Mechanical Systems and Signal Processing* 124 (2019), p. 111-123.
- [Liu13] Jun LIU et al. « Locating end-effector tips in automated micromanipulation ». *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE. 2013, p. 1724-1729.
- [Liu16] Albert LIU, Steve MARSCHNER et Noah SNAVELY. « Caliber : Camera localization and calibration using rigidity constraints ». *International Journal of Computer Vision* 118.1 (2016), p. 1-21.
- [Luhmann09] Thomas LUHMANN. « Precision potential of photogrammetric 6DOF pose estimation with a single camera ». *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64.3 (2009), p. 275-284.
- [Lukashevich11] PV LUKASHEVICH, BA ZALESKY et SV ABLAMEYKO. « Medical image registration based on SURF detector ». *Pattern Recognition and Image Analysis* 21.3 (2011), p. 519-521.
- [Marchand02] E. MARCHAND et al. « Controlling an uninstrumented manipulator by visual servoing ». *The International Journal of Robotics Research* 21.7 (2002), p. 635-647.
- [Marchand05] Éric MARCHAND, Fabien SPINDLER et François CHAUMETTE. « ViSP for visual servoing : a generic software platform with a wide class of robot control skills ». *IEEE Robotics & Automation Magazine* 12.4 (2005), p. 40-52.
- [Marchand99] Eric MARCHAND et al. « Robust real-time visual tracking using a 2D-3D model-based approach ». *Proceedings of the seventh IEEE international conference on computer vision*. T. 1. IEEE. 1999, p. 262-268.
- [Mauzé20a] Benjamin MAUZÉ et al. « Nanometer precision with a planar parallel continuum robot ». *IEEE Robotics and Automation Letters* 5.3 (2020), p. 3806-3813.

- [Mauzé20b] Benjamin MAUZÉ et al. « Visual Measurements at Small Scales : Guidelines to Reduce Uncertainties down to a Few Nanometers ». *2020 International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*. IEEE. 2020, p. 1-6.
- [Mauzé21] Benjamin MAUZÉ. « Triskèle-Bot : étude et développement d'un robot parallèle continu pour le micro-positionnement ». Thèse de doct. Université Bourgogne Franche-Comté, 2021.
- [Moreels07] Pierre MOREELS et Pietro PERONA. « Evaluation of features detectors and descriptors based on 3d objects ». *International journal of computer vision* 73.3 (2007), p. 263-284.
- [Naimark02] Leonid NAIMARK et Eric FOXLIN. « Circular data matrix fiducial system and robust image processing for a wearable vision-inertial self-tracker ». *Proceedings. International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. IEEE. 2002, p. 27-36.
- [Pertuz13] Said PERTUZ, Domenec PUIG et Miguel Angel GARCIA. « Analysis of focus measure operators for shape-from-focus ». *Pattern Recognition* 46.5 (2013), p. 1415-1432.
- [Rauch18] Jean-Yves RAUCH et al. « Smallest microhouse in the world, assembled on the facet of an optical fiber by origami and welded in the μ Robotex nanofactory ». *Journal of Vacuum Science & Technology A : Vacuum, Surfaces, and Films* 36.4 (2018), p. 041601.
- [Remondino11] Fabio REMONDINO. « Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning ». *Remote sensing* 3.6 (2011), p. 1104-1138.
- [Ri14] Shien RI et al. « Accurate full-field optical displacement measurement technique using a digital camera and repeated patterns ». *Optics express* 22.8 (2014), p. 9693-9706.
- [Romero-Ramirez18] Francisco J ROMERO-RAMIREZ, Rafael MUÑOZ-SALINAS et Rafael MEDINA-CARNICER. « Speeded up detection of squared fiducial markers ». *Image and vision Computing* 76 (2018), p. 38-47.
- [Sandoz00] Patrick SANDOZ et al. « Phase-sensitive vision technique for high accuracy position measurement of moving targets ». *IEEE Transactions on instrumentation and measurement* 49.4 (2000), p. 867-872.

- [Sandoz02] Patrick SANDOZ, Vincent BONNANS et Tijani GHARBI. « High-accuracy position and orientation measurement of extended two-dimensional surfaces by a phase-sensitive vision method ». *Applied optics* 41.26 (2002), p. 5503-5511.
- [Sandoz97] Patrick SANDOZ. « Wavelet transform as a processing tool in white-light interferometry ». *Optics letters* 22.14 (1997), p. 1065-1067.
- [Soon08] Tan Jin SOON. « QR code ». *Synthesis Journal* 2008 (2008), p. 59-78.
- [Statham20] Nataska STATHAM. « Use of photogrammetry in video games : a historical overview ». *Games and Culture* 15.3 (2020), p. 289-307.
- [Stevenson88] JTM STEVENSON et JR JORDAN. « Absolute position measurement using optical detection of coded patterns ». *Journal of Physics E : Scientific Instruments* 21.12 (1988), p. 1140.
- [Sugiura15] Hirotaka SUGIURA et al. « On-chip method to measure mechanical characteristics of a single cell by using moiré fringe ». *Micromachines* 6.6 (2015), p. 660-673.
- [Sundararaman21] Ramana SUNDARAMAN et al. « Tracking Pedestrian Heads in Dense Crowd ». *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2021, p. 3865-3875.
- [Tamadazte10] Brahim TAMADAZTE et al. « CAD model-based tracking and 3D visual-based control for MEMS microassembly ». *The International Journal of Robotics Research* 29.11 (2010), p. 1416-1434.
- [Till17] John TILL et D Caleb RUCKER. « Elastic stability of cosserat rods and parallel continuum robots ». *IEEE Transactions on Robotics* 33.3 (2017), p. 718-733.
- [Tiwari21] Bhawnath TIWARI et al. « A High Range-to-Resolution Multi-axis Force and Torque Sensing Platform ». *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* (2021).
- [Wang16] Qinghua WANG, Shien RI et Hiroshi TSUDA. « Digital sampling Moiré as a substitute for microscope scanning Moiré for high-sensitivity and full-field deformation measurement at micron/nano scales ». *Applied optics* 55.25 (2016), p. 6858-6865.
- [Webster08] Robert J WEBSTER, Joseph M ROMANO et Noah J COWAN. « Mechanics of precurved-tube continuum robots ». *IEEE Transactions on Robotics* 25.1 (2008), p. 67-78.

- [Yamahata10] Christophe YAMAHATA et al. « Subnanometer translation of microelectromechanical systems measured by discrete Fourier analysis of CCD images ». *Journal of Microelectromechanical Systems* 19.5 (2010), p. 1273-1275.
- [Yang18] Tianlong YANG et al. « Sub-pixel chessboard corner localization for camera calibration and pose estimation ». *Applied Sciences* 8.11 (2018), p. 2118.
- [Yao21] Sheng YAO et al. « A Review of Computer Microvision-Based Precision Motion Measurement : Principles, Characteristics, and Applications ». *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 70 (2021), p. 1-28.
- [Yoshimizu10] Norimasa YOSHIMIZU, Amit LAL et Clifford R POLLOCK. « Nanometrology optical ruler imaging system using diffraction from a quasiperiodic structure ». *Optics express* 18.20 (2010), p. 20827-20838.
- [Zea09] July A Galeano ZEA, Patrick SANDOZ et Laurent ROBERT. « Position encryption of extended surfaces for subpixel localization of small-sized fields of observation ». *2009 International Symposium on Optomechatronic Technologies*. IEEE. 2009, p. 22-27.
- [Zhong19] Leisheng ZHONG et Li ZHANG. « A robust monocular 3D object tracking method combining statistical and photometric constraints ». *International Journal of Computer Vision* 127.8 (2019), p. 973-992.
- [Zhou09] Huiyu ZHOU, Yuan YUAN et Chunmei SHI. « Object tracking using SIFT features and mean shift ». *Computer vision and image understanding* 113.3 (2009), p. 345-352.
- [Zhou18] Peng ZHOU et al. « Scale-transferrable object detection ». *proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2018, p. 528-537.
- [Zou19] Zhengxia ZOU et al. « Object detection in 20 years : A survey ». *arXiv preprint arXiv :1905.05055* (2019).

Liste des Figures

1.1	(a) Marqueurs de repérage présents sur le rover martien Perseverance (b) Solution pour l'alignement par réalité augmentée de prothèse du genou, basée sur la mesure de pose par marqueurs de repérage et développée par l'entreprise Pixee medical	10
1.2	Méthode de positionnement par détection d'éléments structurels sur l'image. (a) Détection de contours d'une pièce de micro-assemblage et estimation de sa position à l'aide du modèle 3D de la pièce [Tamadazte10]. (b) Détection de contours appliquée à l'étude de position d'aiguille de positionnement sous MEB [Liu13]	12
1.3	Principe de mesure par corrélation d'images montrant les fonctions d'inter-corrélation entre deux images, issu de [Bomarito17].	13
1.4	Différents types de marqueurs de repérage, issu de [Basiratzadeh19] .	14
1.5	Graphique en échelle log. log. présentant les résolutions et plages de mesures atteignables de différentes méthodes de mesure de pose par microscopie issu de [Yao21]. La méthode n°122 encadrée en rouge est la cible de ce manuscrit.	15
1.6	Utilisation de mires périodiques avec la méthode de Vernier, employant deux périodes légèrement différentes pour effectuer une étude de phase sur une plage étendue. (a) présente les deux motifs périodiques étudiés, (b) la phase de chacun des motifs, (c) la différence de phase issue de chaque système de franges et (d) la phase déroulée du système de frange (issu de [Guelpa14])	17
1.7	Méthode de mesure de pose par étude de Moiré entre un réseau de franges observé et la période physique de la caméra, produisant un système à deux périodes étendant la résolution accessible (issu de [Ri14])	18
1.8	Mire périodique 2D augmentée d'un encodage binaire assurant un repérage grandement résolu sur une grande plage de mesure, tiré de [Kim18b]	19
2.1	Mire 1D avec (a) sa représentation sous forme d'image en niveaux de gris, (b) l'intensité du signal sinusoïdal $A(x)$, (c) le module du spectre fréquentiel et (d) l'angle du pic fréquentiel f_0	25

2.2	Mire 1D échantillonnée sur différentes tailles de fenêtres. (a) montre la taille des fenêtres considérées pour étudier la transformée de Fourier discrète présentée en (b). (c) présente une vue en détail du pic $+f_0$	28
2.3	Processus d'analyse de phase d'une mire 1D (ici de période 20.54 et échantillonnée sur 512 valeurs). (a) intensité de la mire, (b) spectre fréquentiel issu de la transformée de Fourier appliquée à la mire. (c) phase de la transformée de Fourier inverse appliquée sur le pic sélectionné grâce au filtrage Gaussien présenté en rouge dans (b). (d) phase déroulée de (c).	30
2.4	Comparaison du taux d'erreur de différentes méthodes de mesure de phase et de période de mires 1D. (a) erreur sur l'évaluation de la phase, (b) erreur sur l'évaluation de la période pixélique.	32
2.5	Définition des mires périodiques 2D selon une direction (a_1), son autre direction (b_1) et le couplage des deux directions (c_1) qui constituent une mire 2D bidirectionnelle. Les spectres fréquentiels associés à chaque mire sont visibles en (a_2), (b_2) et (c_2)	35
2.6	(a_1), (b_1) présentent les images de phase de la transformée de Fourier inverse appliquée à chacun des pics f_1 et f_2 . (a_2), (b_2) montrent les phases déroulées correspondantes	37
2.7	Mire 2D avec chacune des directions perpendiculaires entre elles et présentant la même fréquence selon chaque direction.	39
2.8	Analyse de l'erreur de mesure de pose à partir de 200 mires simulées à des positions aléatoires. (a_1), (b_1), (c_1) présentent ces erreurs de mesure selon les degrés de liberté x , y et α . (a_2), (b_2), (c_2) présentent la répartition de ces erreurs sous forme d'histogrammes. (d_1) et (d_2) montrent les positions et orientations où sont générées les mires (respectivement sur $[0, 11 \cdot 10^3]$ px et sur $[0, 2\pi]$).	40
3.1	Convention de référentiel et de projection 6DDL d'une mire vers la caméra	43
3.2	(a) Vue de face de la projection orthographique de la mire sur le capteur caméra et (b) Lobes principaux de la transformée de Fourier de la mire avec les pics F_1 en (m_1, n_1) et F_2 en (m_2, n_2)	44
3.3	Principe de mesure de pose résumé avec (a) image de la mire acquise, (b) spectre fréquentiel issu de la transformée de Fourier de l'image montrant les pics F_1 et F_2 , (c) plans de phases de montrant les vecteurs directeurs du référentiel de la mire \mathbf{h}_1 et \mathbf{h}_2 (non mis à l'échelle).	46
3.4	Ambiguïté de la mesure causée par la projection orthographique	48

3.5	Résolution de l'ambiguïté du signe des angles hors-plan et de la mesure de profondeur en utilisant une projection perspective.....	49
3.6	Dérivées successives de la phase pour lever l'ambiguïté d'orientation à l'aide d'une projection perspective.....	51
3.7	Carte d'erreur de mesure des angles hors-plan en considérant une mire périodique à l'orientation hors-plan variant dans l'intervalle $[0, \pi/2]$. (a) présente l'erreur de mesure de l'angle β et (b) l'erreur de l'angle γ . La zone dans laquelle l'erreur de mesure des deux angles hors-plan n'excède pas 1 μrad . est dénotée en rouge. Les lignes magenta montrent la limite angulaire pour laquelle les mires observées présentent une période apparente de 2 et 3 px respectivement.	54
3.8	Répartition de l'erreur de mesure entre les poses envoyées et celles calculées avec un jeu de 1000 poses aléatoires sollicitant les six degrés de liberté	56
3.9	Erreur de mesure angulaire en fonction de la période de la mire périodique (en pixels) pour un jeu de quatre longueurs focales et de quatre angles hors-plan considérés. (a) méthode présentée et (b) méthode PnP de la bibliothèque OpenCV.....	57
4.1	Génération d'une séquence binaire sur 3 bits par alignement successif de chaque mot. a) numéro du mot considéré suivant une évolution décimale b) numéro de chaque bit codant de la séquence, c) séquence binaire générée, d) présente en surbrillance l'exemple d'un mot de 3 bits se retrouvant à plusieurs endroits dans la séquence.....	64
4.2	Génération de séquence binaire par méthode de décalage de registre avec $n = 4$ bits. (a) séquence binaire résultante, (b) mots binaires de 4 bits imbriqués dans la séquence, (c) numéro décimal correspondant à chaque mot binaire et (d) position linéaire correspondante	64
4.3	Différentes méthodes d'insertion de séquence codée avec a) un échantillon d'une séquence binaire, b) codage simple, c) code de Manchester, d) solution proposée par [Kim13] et e) solution proposée pour conserver la linéarité de la phase	66
4.4	Principe d'encodage bidirectionnel absolu de la mire présentée en (a). (b ₁) encodage linéaire de la mire selon la direction x et (b ₂) selon la direction y . (c) cellule codante 3×3 issue du multiplexage des deux séquences x et y montrant les points toujours présents (jaune), le point toujours absent (fond) effectuant le détrompage angulaire et les valeurs binaires x et y respectivement en bleu et magenta ainsi que leur multiplexage logique <i>ET</i> au centre de la cellule en magenta foncé.	67

4.5	Processus de traitement de la phase d'une mire pseudo-périodique. (a) image de la mire encodée, (b) transformée de Fourier discrète avec les pics fréquentiels f_1 et f_2 , c_1, c_2 phase enroulée selon chaque direction résultant de la transformée de Fourier inverse appliquée en f_1 et f_2 et (d ₁), (d ₂) phase déroulée selon chacune des directions.....	70
4.6	Extraction des positions des points de la mire grâce à l'information de phase. (a) image acquise de la mire en rouge, (b) zones où chaque direction de la phase est proche de zéro (centre des points), (c) zones où une des deux directions des phases est proche de $\pm\pi$ (pourtour des points) et (d) Assemblage RVB des trois précédentes sous-figures (a,b et c)	71
4.7	Processus de création et de décodage de l'imagette de la mire. (a) image de la mire en pixels, (b) imagette de la mire avec le seuillage adaptatif effectué entre le centre de chaque point et sa zone extérieure. (c) cellule globale. (d) image de la mire avec en juxtaposition les cellules codantes. (e) et (f) décodage binaire selon chacune des directions de la mire. Seuls les points en magenta (clairs et foncés) sont utilisés pour effectuer le décodage des valeurs binaires.....	74
4.8	Détermination des valeurs binaires de la séquence codée intégrée à la mire. (a ₃) imagette provenant d'une mire altérée avec une image superposée. (a ₁) et (a ₂) moyennes des valeurs binaires codantes (magenta) par rapport aux intensités des points toujours présents (jaune) et de l'arrière-plan (vert). (b ₁) dynamique en niveau de gris autorisée par une quantification de l'acquisition sur 12 bits. (b ₂) reprend une des lignes codantes de (a ₁) en explicitant les différents niveaux des seuils de décision de la valeur binaire.	77
4.9	Histogramme 2D des ratios de codage c_r issus de l'extraction des séquences codées de mires altérées en fonction de la plage dynamique disponible pour chaque ligne codante. En vert sont représentées les valeurs binaires correctement décodées et en magenta celles qui ont été mal interprétées.	79
4.10	Robustesse de la méthode de décodage des séquences binaires à l'occultation de l'image. (a ₁) présente une mire occultée à 15 % et (a ₂) une occultation à 65 %. (b) présente l'histogramme des valeurs binaires correctement décodées en fonction de l'occultation de la mire.	
	81	
5.1	Configuration expérimentale de mesure de pose en microscopie à l'aide de mires périodiques	88
5.2	Schéma bloc du dispositif expérimental de mesure de résolution	90

5.3	Dispositif d'étude de la résolution et de la justesse de la méthode en translation.....	91
5.4	Dispositif expérimental de mesure de résolution et de plage pour l'angle hors-plan β	92
5.5	Dispositif expérimental utilisé pour la validation des grands déplacements sous projection perspective	93
5.6	Mesure du bruit statique sur 40 images selon les trois degrés de liberté x , y et α	95
5.7	(a) Créneau en translation de 1 nm (envoyés à une fréquence de 5 Hz et imagés à 100 Hz) pendant 30 s. (b) Spectre fréquentiel des poses mesurées (en rouge) et des poses envoyées (en bleu. (c) Détail sur 1 s du créneau mesuré en (a)	96
5.8	(a) créneaux angulaires de 10 µrad. envoyés à l'actionneur à une fréquence de 2 Hz sur une durée de 20 s. (b) présente le détail de cet essai sur une durée de 5 s.	96
5.9	Mesure angulaire hors-plan β réalisée à partir de créneaux de 0.2 mrad. envoyés sur une durée de 18 s.....	98
5.10	Trajectoires x, y, z envoyées au robot. (a) Vue globale de l'évolution de la mire dans l'espace 3D, (b) vue de dessus montrant l'évolution de la mire en profondeur selon l'axe z et (c) vue de face montrant l'évolution x, y	99
5.11	Dispositif expérimental pour la caractérisation de la linéarité de la mesure avec à gauche (a), les paliers envoyés à l'actionneur et à droite (b), la courbe mettant en regard position envoyée (x) et position mesurée (\hat{x})	100
5.12	Résultats des essais de justesse en translation et rotation planaire. (a_1) justesse en translation $\hat{x} = 1.01148x$, (b_1) justesse en rotation $\hat{\alpha} = 0.999961\alpha$. (a_2) et (b_2) présentent une vue en détail de l'erreur de justesse. (a_3) et (b_3) présentent l'erreur par rapport à la courbe de régression linéaire selon chacun des axes testés (respectivement x et α)	101
5.13	Linéarité de la mesure de l'orientation hors-plan β sur une plage de 0.035 rad.	102
5.14	Marqueurs utilisés pour l'essai de comparaison 6DDL avec (a_1) et (a_2) montrant les marqueurs ArUco et Damiers et (a_3) la mire de période 140 µm	103

5.15	Évaluation de la méthode de mesure de pose complète avec différentes sinusoïdes envoyées selon chaque axe. L'expérience est répétée avec une mire périodique encodée, un damier et un marqueur de repérage ArUco. Les deux sous-figures montrent les résultats en présentant une vue de l'évolution des marqueurs en translations (a) et en orientations (b).....	104
5.16	Comparaison de la robustesse à différentes conditions d'éclairage. A gauche les essais réalisés en conditions nominales et à droite en faible éclairage. (a_1), (b_1) vues en détail des mires acquises, (a_2), (b_2) histogramme montrant la dynamique des images acquises. (a_3), (b_3) montrent les résolutions accessibles en fonction des différents paramètres d'éclairage	106
5.17	Variance normalisée de l'image calculée en fonction de la translation de la mire le long de l'axe optique. Vues de détail des mires acquises à différentes positions selon l'axe optique	108
6.1	Code minimal présentant l'utilisation de la bibliothèque logicielle pour effectuer la mesure de pose d'une image de mire périodique à partir d'un fichier de configuration	115
6.2	Hiérarchie des deux branches principales de la bibliothèque Vernier ..	116
6.3	Déroulement algorithmique du calcul de pose absolue par mire Mégarena, montrant les différentes classes implémentées et utilisées pour mener à bien la mesure de pose.....	118
6.4	Hiérarchie de la branche de génération de mires de la bibliothèque Vernier	119
6.5	Test unitaire pour la fonction de mesure de pose d'une mire périodique.....	119
6.6	Conception d'un marqueur de repérage grande précision, nommé HP Code avec ses 3 marqueurs de localisation formant un repère orthonormé ainsi que le motif périodique embarqué sur le HP Code..	122
6.7	Utilitaire graphique réalisé pour effectuer la génération et la mesure de pose de mires périodiques	124
7.1	Résultats de l'analyse de justesse sur une plage de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ en translation xy . (a) poses envoyées au robot (en bleu) et mesurées (en rouge). (b) erreur entre les poses envoyées et mesurées pendant toute la durée de l'essai. La courbe rouge (b_1) montre en détail l'évolution de l'erreur pendant une trajectoire balayant 10 cm selon l'axe y	129

7.2	Différentes architectures robotiques à articulations rigides et souples. (a) Robot sériel 6DDL industriel Kuka, (b) Robot parallèle 6DDL à plateforme de Stewart-Gough (Newport), (c) Robot souple continu [Webster08] et (d) Robot parallèle à jambes souples inspiré d'une plateforme de Stewart-Gough [Till17]	130
7.3	Modèle cinématique de la plateforme 3DDL Triskèle-Bot avec en magenta les poutres continûment déformables	131
7.4	Dispositif expérimental de validation des performances du Triskèle-Bot montrant la plateforme actionnée par les 3 poutres continûment déformables (fibres optiques), la mire périodique encodée ainsi que 6 HP Codes (en bout de chaque poutre)	132
7.5	Résultats expérimentaux de répétabilité du <i>Triskele-Bot</i> , tiré de [Mauzé21] en sollicitant le robot sur une course en translation de 100 μm au cours de 30 essais. (a) présente les positions mesurées de la plateforme centrale, (b) les distances à la moyenne des positions mesurées par la plateforme et (c) l'écart à la moyenne des orientations mesurées du robot.....	133
7.6	(a) Schéma et (b) photo du robot parallèle à articulations continûment déformables basé sur une structure 3- <u>PPSR</u> avec visibles notamment les six jambes faites en tiges d'acier ainsi que le support pour mire périodique encodée fixée à la plateforme	134
7.7	Évaluation de la répétabilité selon les trois degrés de liberté x , y et α de la plateforme.....	135
7.8	Schéma bloc du capteur de force unidirectionnel	137
7.9	Capteur de micro-force utilisant une structure compliant avec deux HP Codes (un mobile et l'autre fixe) assurant la mesure force-déplacement	
7.10	137	
7.11	Dispositif expérimental de mesure de micro-force à l'aide d'un capteur compliant couplé à deux HP Codes avec en (a) le dispositif de caractérisation de fibre et en (b) le dispositif d'étalonnage du capteur.....	138
7.12	Moyenne des mesures effectuées par le capteur de force contre un support rigide selon les axes x , y et α	139
7.13	Fibre de polyamide de 50 μm de diamètre pendant un essai de compression réalisé grâce au capteur de micro-force.....	139
7.13	Capteur de force multi-axial basé sur une structure compliant avec une mire périodique encodée intégrée sur la partie mobile, issu de [Tiwari21]	140

7.14	(a) Vue détaillée de la puce fluidique dédiée au tri cellulaire montrant la zone d'entrée des cellules, la zone de tri se basant sur un jeu d'électrodes et les deux zones de sortie des cellules une fois triées. (b) Vue globale du dispositif d'assemblage de puce fluidique comprenant le robot sériel 6DDL ainsi que la caméra utilisée pour effectuer l'asservissement visuel d'alignement	141
7.15	Schéma bloc utilisé pour l'assemblage des puces micro-fluidiques.....	142
7.16	Étapes de départ (a) et d'arrivée (b) des deux parties de la puce fluidique mises en position par asservissement visuel grâce aux deux HP Codes.....	143
7.17	Évolution de l'erreur de positionnement entre les deux HP Codes selon les trois degrés de liberté x , y et α	143
7.18	(a) hologramme de mire périodique, (b) sa reconstruction en intensité et (c) en phase	148
7.19	Microscope à holographie numérique LynceeTec couplé à un hexapode Newport HXP50-Meca	150
A.1	Dispositions possible de la cellule codante dans l'imagette de phase. X dénote ici la valeur codante du bit, indéterminée et les carrés noirs représentent les points toujours présents, utilisés pour effectuer cette synchronisation.....	161
B.1	Ecart relatif entre le centre de chaque partie de mire considérée (gauche et droite) présenté en rouge, par rapport à la mesure effectuée sur toute la mire (en bleu).	165
B.2	Comparaison du bruit présent pendant l'acquisition de mires avec (a) une mire acquise expérimentalement et (b) une mire générée avec le même niveau de bruit ambiant.....	166
B.3	Organisation du fichier de définition des paramètres des mires périodiques, appliquée dans le cas présenté à une mire Megarena	167
B.4	Étapes de mesure de pose basée sur une mire HP Code avec (a) le HP Code acquis par la caméra, (b) HP Code recadré et centré grâce à la détection préalable de son centre avec les trois sous marqueurs (c) transformée de Fourier du HP Code recadré (d_1) et (d_2) phases unidirectionnelles obtenues après transformée de Fourier inverse appliquée selon chacun des lobes f_1 et f_2 et (e) schéma présentant le lien entre pose du HP Code et référentiel caméra.....	168

- B.5 Processus de mesure de pose de HP Code en utilisant la segmentation en imagette de constante de phases avec (a) HP Code dans une image avec en rouge le repère caméra R_c . (b) montre la segmentation en imagette de phase avec un repère gradué en constantes de phase, permettant après convolution avec le marqueur binaire de déterminer la position du centre du HP Code..... 169
- B.6 Évolution de l'écart-type de l'erreur de pose en fonction du nombre de périodes comprises dans le HP Code effectué à la fois sur des images simulées parfaites et bruitées. 171
- B.7 Essai de résolution mené sur les HP Codes en translation et en orientation avec des créneaux respectifs de 5 nm et de 10 μrad . envoyés à chacun des actionneurs à une fréquence de 0.5 Hz. Les barres horizontales rouges dénotent la valeur moyenne calculée sur chaque créneau tandis que les barres verticales représentent l'écart-type mesuré en condition statique (tableau B.2) 172

Liste des Figures

Liste des Tables

2.1	Tableau comparatif d'erreurs de mesures de phase et de période effectuées sur 1000 échantillons analysés avec différentes méthodes. $\bar{\epsilon}$ notant l'erreur moyenne et σ l'écart type de l'erreur (en radians pour la phase et en pixels pour la période)	32
4.1	Tableau de conception de mire codée en fonction du nombre de bits n choisi pour la génération de la séquence codée et de la période physique λ de la mire.	66
5.1	Analyse du bruit statique de mesure effectué avec les courbes présentées figure 5.6	95
5.2	Écart type du bruit de mesure statique selon chacun des six degrés de liberté effectué sur un essai de 40 s (800 images)	97
5.3	Justesse et linéarité de la mesure sur une plage de 9 μm en translation et sur une plage de 2π en orientation	102
5.4	Écart type de la mesure de position en configuration statique avec deux types d'éclairage, réalisés sur 20 s avec une fréquence d'acquisition d'images de 20 images/s	106
6.1	Analyse fonctionnelle de la bibliothèque dédiée à l'emploi des mires périodiques	114
6.2	Temps de calcul nécessaire (en ms) pour mesurer la pose d'une image de mire en fonction de son type et de sa taille, en millisecondes	123
B.1	Evaluation des parts d'incertitudes sur la mesure	164
B.2	Mesure expérimentale du bruit de mesure en configuration statique et de la linéarité des HP Codes	171

Titre : Mesure visuelle robuste à grands rapports plage sur résolution de la pose 3D de mires périodiques codées : applications à la microrobotique

Mots clefs: Vision par ordinateur, Estimation de pose, microscopie, mire de repérage, Mesure de phase, Microrobotique

Résumé : La mesure de pose à l'échelle microscopique est un défi majeur avec de nombreuses applications en microrobotique. À l'échelle macroscopique, la vision par ordinateur permet de mesurer la pose 3D d'objets de manière précise et robuste. Cependant, à mesure que l'échelle se réduit, les problèmes inhérents à la microscopie, tels que la faible profondeur de champ, un champ de vision réduit ou encore la projection orthographique des objets de microscopes, impliquent une meilleure structuration de l'objet d'intérêt.

Cette thèse aborde cette problématique en utilisant des mires à motifs périodiques. La redondance structurée d'information contenue dans celles-ci permet d'atteindre des résolutions de l'ordre du millième de pixel par la mesure de phase. Le problème inhérent de la plage de mesure réduite au champ de vision du microscope est résolu en insérant une séquence binaire, sans perturbation de

phase pour conserver la résolution de la méthode. La mire pseudo-périodique résultante fournit ainsi une mesure sur une plage de $10^5 \times 10^5 \text{ px}^2$. En utilisant un seuillage adaptatif local basé sur l'information de phase, la méthode démontre une grande robustesse au bruit, à l'occultation ainsi qu'aux défauts de mise au point, rendant ainsi la méthode adaptée pour un emploi en microrobotique.

Cette méthode a été validée par plusieurs expériences démontrant une résolution planaire de 1 nm en translation sur une plage de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ et 4.5 μrad en orientation sur une rotation de 2π . La mesure des angles hors-plan atteint une résolution de 100 μrad . sur une plage de $[-3\pi/8; 3\pi/8]$ rad. Finalement, le mémoire présente l'utilisation de la méthode de mesure dans plusieurs applications de microrobotique où une mesure de pose résolue et sans contact est nécessaire.

Title : Robust visual measurement with large range to resolution ratio of 3D pose of encoded periodic patterns : applications to microrobotics

Keywords : Computer Vision, Microscopy pose measurement, Periodic patterns, Phase-based measurement, Microrobotics

Abstract : Pose measurement at the microscale is a key challenge with multiple applications in microrobotics where high resolution sensors are expected. At a macroscopic scale, computer vision allows the 3D pose measurement of objects with great resolution and robustness.

However, as the size of observed objects decreases, the problems inherent to microscopy such as short depth of focus, small field of view or microscope objectives orthographic projection imply a better structuration of objects of interest.

This thesis tackles this problematic with the use of periodic patterns. The structured redundancy of information contained in these ones allow resolution up to one thousands of a pixel by using the phase of these patterns. The inherent problem of the range of measure reduced to the microscope's field of view is solved by integrating a binary se-

quence without inducing phase disturbances, preserving the resolution capabilities of the method. Resulting pseudo-periodic pattern provides a range of measure of $10^5 \times 10^5 \text{ px}^2$.

By relying on local phase-based thresholds, the method demonstrates a great robustness against various noises, occultations, defocus and makes this method appropriate for the microrobotics field of application.

this method has been validated by multiple experiments showing a planar resolution of 1 nm in translation on a $10 \times 10 \text{ cm}^2$ range and 4.5 μrad in orientation over 2π rad. Measure of out-of-plane orientations show a resolution of 100 μrad . in a $[-3\pi/8; 3\pi/8]$ rad. range. Finally, this work presents the use of this pose measurement method in multiple microrobotics applications where a resolute and contactless method is required.