

THÈSE DE DOCTORAT
DE L'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE PARIS VI

Spécialité : SMAER Sciences Mécanique Acoustique Electronique Robotique

présentée par

FLORENT SOUVESTRE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE

Sujet de la thèse :

Mesure laser de trajectoire par décomposition de la mesure locale et globale

préparée à

L'INSTITUT DES SYSTÈMES INTELLIGENTS ET DE ROBOTIQUE (CNRS UMR7222)

LABORATOIRE DES INTERFACES SENSORIELLES ET AMBIANTES (CEA, LIST)

Soutenue le 28 juin 2010 devant le jury composé de :

Thomas SIDLER	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne	Rapporteur
Yves BELLOUARD	Professeur, Université de Technologie de Eindhoven	Rapporteur
Jean-Luc ZARADER	Professeur, Université Pierre et Marie Curie	Examineur
Pierre BLAZEVIC	Professeur, Université de Versailles-St-Quentin-en-Yvelines	Examineur
Moustapha HAFEZ	Directeur de recherche, CEA LIST	Encadrant CEA
Stéphane RÉGNIER	Professeur, Université Pierre et Marie Curie	Directeur de thèse

A ma famille...,

Et mes amis.....

Résumé

Les dispositifs de numérisation de trajectoire font progressivement leurs apparitions afin de permettre la quantification de la trajectoire d'un mouvement dans une scène afin de répondre à différents besoins pour des applications variées. Elles sont potentiellement nombreuses et peuvent être déclinées en 5 familles : loisirs, simulation pour l'industrie, applications médicales, applications liées aux sports et la robotique.

Parmi les axes de progression, la suppression des phases de réglages et d'équipement ainsi que la limitation de l'usage de marqueurs actifs contraignants, constituent un nouveau challenge. Les techniques optiques offrent l'opportunité de réaliser des mesures sans contacts. La mesure de lumière est rendue possible à l'aide d'un transducteur électronique qui convertit une énergie ou une puissance optique absorbée en une grandeur électrique. A l'aide d'un traitement approprié, la distance peut être évaluée. Pour l'application recherchée, c'est-à-dire pour des interactions sur plusieurs mètres avec une précision inférieure au centimètre, les méthodes de télémétrie les plus adéquates sont la triangulation, la mesure de phase et éventuellement, la mesure par temps de vol à lumière pulsée constituant un autre compromis intéressant entre complexité et précision.

Le concept exploré en détail dans un premier temps, consiste à remplacer les moteurs galvanométriques, onéreux et impliquant des éléments mécaniques à haute dynamiques, par un dispositif de scrutation local basé sur un réseau de sources lasers. Cette approche multi-faisceaux donne une première mesure de position de la cible sans la nécessité de générer un mouvement à cet organe. Afin d'élargir le champ de mesure, un second dispositif prend le relai permettant d'atteindre un volume sphérique. C'est le concept de combinaison mesure locale et mesure globale que nous proposons dans ces travaux de thèse.

Cette approche hybride contribue à l'effort de coût avec cependant une dégradation de la précision mais une simplification du dispositif et de ses cibles. Au-delà de cet exemple, différentes autres possibilités de combinaison de mesures globales et locales sont envisageables en fonction des choix technologiques. Chacune d'entre elles possède des spécificités qui vont se traduire sous forme de forces et de faiblesses en fonction des besoins. L'usage d'une matrice de micro-miroir DMD ainsi que d'autres procédés de micro-fabrication représentent des voies d'innovation prometteuses afin de réduire les difficiles compromis entre performances, coût et facilité d'utilisation.

Abstract

The devices dedicated to trajectory digitalization are arising a lot of interest the last few years for different applications that can be divided into 5 families : entertainment, simulation for the industry, medical applications, robotics and sports applications.

Among the axes of progress, the elimination of both the calibration steps and equipments with complex active markers, constitute a real challenge. The optical techniques allows non contact measurements. Light measurements are carried out using transducer which converts energy or optical power absorbed into an electric signal. The distance can then be estimated through signal processing. Our interest lies in tracking application in the range of several meters with a precision of few millimeters. The most appropriate methods of telemetry are triangulation, phase shifting and time of flight methods.

The concept investigated in this works consists of replacing galvanometric scanners which requiring mechanical elements in high dynamics, by a static scanning device based on a network of laser sources. The multi-beam approach allows a first measure of the target position without the need to move. To widen the field of measure, a second device allows to reach a spherical volume. It is the concept of local and global measure combination.

This hybrid approach is a cost effective solution. However, the precision could suffer from a reduction. In this work, we present different possibilities for combining global and local measurements. Each set-up will exhibit some disadvantages and weaknesses according to the needs. The use of micro-mirror matrices (DMD), and microfabrication processes offer promising novel approaches toward performant, efficient cost and ease to use.

Table des matières

Introduction générale	1
1 Problématique de la capture de mouvement	3
1.1 Objectifs, challenges et applications	5
1.1.1 Objectifs	5
1.1.2 Challenges	5
1.1.3 Applications	6
1.1.3.1 Cinéma, jeux vidéo, attraction ludique	6
1.1.3.2 Industrie	7
1.1.3.3 Applications médicales et sportives	8
1.1.3.4 Robotique	9
1.2 Etat de l’art des dispositifs de mesure de trajectoire	11
1.2.1 Dispositifs à mesure mécanique	11
1.2.1.1 Déportée	11
1.2.1.2 Embarquée	12
1.2.2 Dispositifs à mesure magnétique	14
1.2.2.1 Champ électromagnétique	14
1.2.3 Dispositifs à mesure ultrasonique	15
1.2.4 Dispositifs à imagerie	16
1.2.4.1 Caméra colorimétrique	16
1.2.4.2 Caméra infrarouge	16
1.2.4.3 Caméra à mesure de temps de vol	18

1.2.5	Dispositifs lasers	19
1.2.5.1	Introduction sur la lumière laser	19
1.2.5.2	Déviaton de faisceaux collimatés	20
1.2.6	Figures des performances et conclusion	26
2	Etat de l'art de la photodétection	29
2.1	Les contraintes de la Photodétection	30
2.1.1	Grandeurs usuelles	30
2.1.1.1	Photodétection	30
2.1.1.2	Rapport signal sur bruit	32
2.1.2	Milieu de propagation	34
2.1.2.1	La capacité d'absorption	34
2.1.2.2	Sources lumineuses environnementales	36
2.1.2.3	Sécurité Laser	38
2.1.3	Influence de la nature des cibles sur la détection	40
2.1.3.1	Cible diffusante	40
2.1.3.2	Cible spéculaire	42
2.1.3.3	Cible rétro-réflexive	43
2.1.4	Photo-détecteurs	44
2.1.4.1	Photodiode PN	44
2.1.4.2	Photodiode PIN	45
2.1.4.3	Photodiode avalanche	46
2.1.4.4	Photomultiplicateur	47
2.1.4.5	Photo-détecteurs dérivés : SIPM et MCP	48
2.1.5	Figures des performances	48
2.2	Etat de l'art des méthodes de télémétrie laser	49
2.2.1	Triangulation	49
2.2.2	Interférométrie	50
2.2.3	Différence de phases	50
2.2.4	Temps de vol	52

2.2.5	Différence de fréquences	53
2.2.6	Figure des performances et conclusion	54
3	Dispositif de mesure de trajectoire mono-cible à grand champ	57
3.1	Modèle géométrique et grandeurs	58
3.2	Découplage de la mesure locale et globale	65
3.2.1	Mesure locale	67
3.2.1.1	Approche générique	67
3.2.1.2	Exemple d'implémentation d'une matrice de sources lasers 8 points	71
3.2.1.3	Photodétection	73
3.2.2	Mesure globale	81
3.2.2.1	Approche générique	82
3.2.2.2	Exemple d'implémentation à l'aide de moto-réducteur	86
3.3	Mesure couplée et performances	95
3.3.1	Evaluation de la précision statique	95
3.3.2	Evaluation des performances dynamiques	97
3.3.2.1	Précision dynamique	97
3.3.2.2	Vitesse et accélération de décrochage	99
3.3.3	Bilan de l'évaluation	101
3.4	Positionnement à l'état de l'art et perspective d'application	101
4	Alternatives de mesure globale et locale	103
4.1	Mesure locale par imageur laser DMD	104
4.1.1	Principe de la formation d'une empreinte laser par matrice DMD	104
4.1.2	Solution technologique testée expérimentalement	106
4.1.3	Expérimentations à l'aide d'une source laser	107
4.1.4	Bilan préliminaire et perspectives	109
4.2	Mesure globale par double prismes	109
4.2.1	Modèle géométrique du montage "prisme de Risley"	109
4.2.2	Solution technologique proposée	115

4.2.3	Validations et performances du système	118
4.2.3.1	Validation du modèle géométrique direct	118
4.2.3.2	Performances dynamiques	120
4.2.4	Conclusion et perspectives	125
4.3	Exemples de combinaisons	126
4.3.1	Matrice de sources lasers et robot série	126
4.3.2	Matrice sources lasers et prismes	127
4.3.3	Imageur laser DMD et prismes	129
4.3.4	Imageur laser DMD et prismes pour la mesure de plusieurs cibles	130
4.3.5	Imageur laser DMD et robot série	132
4.3.6	Bilan et figure de performances	132
Conclusion générale		135
Bibliographie		137

Table des figures

1.1	Les challenges pour la démocratisation des technologies de capture de mouvement	6
1.2	Utilisation de la capture de mouvement pour le film "Pirates des Caraïbes"	7
1.3	Interface pour jeux vidéo	7
1.4	Application de réalité augmentée pour le Futuroscope [Fut08]	8
1.5	La réalité virtuelle au service de l'industrie automobile (CEA-LIST)	8
1.6	Capture de mouvement pour la rééducation [Bio05]	9
1.7	Enregistrement du geste de la course pour l'athlétisme	9
1.8	Localisation "extérieur vers l'intérieur" pour le concours de robotique Robocup [Rob99]	10
1.9	Localisation embarquée "intérieur vers extérieur" pour le concours Robocup [Rob99]	10
1.10	Le spidar [HS92]	11
1.11	Virtuose [Hap09]	12
1.12	Le CyberGlove [cyb09]	12
1.13	Centrale inertielle miniature [RLP09]	13
1.14	La souris Gyration Air Mouse [Mov08]	14
1.15	Un marqueur et le récepteur du Polemus Lyberty Latus	15
1.16	Le système Cricket de localisation ultrasonique [BP05]	15
1.17	Suivi d'objets sans marqueur par caméra [CBSSF09]	16
1.18	Système Fingertracking par ART Tracking [Tra06]	17
1.19	Cibles rétro-réfléchissantes [vic09]	17
1.20	Camera 3D SR4000 [Ima08]	19
1.21	Image 3D [Ima08]	19
1.22	Capture de trajectoire par scanner galvanométrique [SPI04]	20

1.23	Scanner laser à base de moteur galvanométrique [SPI03]	21
1.24	Dispositif de suivi de cible par LEICA [LG09]	22
1.25	Micro-miroir MEMS [VM08]	22
1.26	Dispositif de mesure à 3 dimensions [VM08]	23
1.27	Principe de fonctionnement de la matrice de micro-miroir [Ins09]	23
1.28	Matrice de micro-miroir au microscope électronique [Ins09]	24
1.29	Constitution d'un projecteur laser selon [RJJST07]	24
1.30	Prisme à coin [Tho09]	25
1.31	Montage de Risley [Tho09]	25
1.32	Exemple de montage de Risley [Sch06]	26
1.33	Figure de performances des technologies de capture	27
1.34	Figure de performance des technologies de poursuite laser	27
2.1	Réponse spectrale de photo-détecteur silicium Hamamatsu [Pho09]	31
2.2	Efficacité quantique des matériaux utilisés pour les photo-détecteurs [Cor06]	31
2.3	Spectre électromagnétique [Sha07]	32
2.4	Notion de rapport signal à bruit [JL07]	32
2.5	Variation de P_d en fonction du rapport $\frac{S}{B}$ (détection directe) pour différentes valeurs de P_{FA} [JL98]	33
2.6	Coefficient d'absorption dans l'eau en fonction de la longueur d'onde [HQ73]	35
2.7	Transmission à travers l'atmosphère terrestre en fonction de la longueur d'onde pour un trajet horizontal de 1800 m [Hud69]	36
2.8	spectre solaire [AST09]	37
2.9	Spectre lumière artificielle [dG10]	37
2.10	Courbe d'absorption en fonction de la longueur d'onde [C.V]	40
2.11	Loi du cosinus de Lambert [Cor09]	41
2.12	Paramètre géométrique dans le modèle [SPI04]	41
2.13	Réflectance de la peau en fonction de la longueur d'onde [C.V]	42
2.14	Réflexion spéculaire	42
2.15	Courbe de réflectance pour des miroirs en aluminium (Al), argent (Ag), et or à incidence normale [M.B94]	43

2.16	Rétro-rélecteurs de type coin de cube et sphérique.	43
2.17	Section d'une photodiode [pKSSD04]	44
2.18	Jonction P-N d'une photodiode [pKSSD04]	45
2.19	Schéma électrique équivalent d'une photodiode [pKSSD04]	45
2.20	Photodiode PIN avec tension de polarisation [pKSSD04]	46
2.21	Gain interne de l'APD et sensibilité à la température [pKSSD04]	46
2.22	Schéma interne d'un Photomultiplicateur	47
2.23	Comparaison des SNR des photo-détecteurs pour 10 Hz [Kau05]	48
2.24	Commpparaison des SNR des photo-détecteurs pour 2000 Hz [Kau05]	49
2.25	Principe de la triangulation laser [TC06]	49
2.26	Interféromètre de Michelson [sku08]	51
2.27	Figure d'interférences [sku08]	51
2.28	Principe et schéma bloc d'un télémètre par mesure temps de vol [PP05]	52
2.29	Télémétrie par mesure d'écart de fréquence [Sid03]	53
2.30	Représentation distance-précision des méthodes de télémétrie [Del00]	54
3.1	Cinématique 3 DDL	58
3.2	Modèle géométrique 3R 2T	59
3.3	Modèle géométrique	59
3.4	Mesure de position locale	60
3.5	Influence des paramètres d_1 et d_2 sur le champ de mesure	62
3.6	Les deux postures admissibles	64
3.7	Variation du déterminant en fonction du champ de mesure	64
3.8	Vue d'ensemble du prototype	66
3.9	Organigramme du traitement des signaux	66
3.10	Description de la tête optique	67
3.11	Mesure de la position locale	67
3.12	Mesure du capteur locale pour 8 diodes réparties sur un cercle	69
3.13	Mesure du capteur locale pour 16 diodes réparties sur un cercle	69
3.14	Mesure du capteur local pour 16 diodes réparties sur un cercle + zone morte	70

3.15	Diodes lasers émettrices par la tranche et par la surface (VCSEL).	71
3.16	Caractéristiques de la diode VCSEL PM67-F1P0N	72
3.17	Répartition en puissance optique des diodes lasers	73
3.18	Banc de mesure de réflexion de la cible	74
3.19	Répartition en puissance en réception	75
3.20	Réponse de la cible en fonction de sa distance	75
3.21	Coefficient de réflexion en fonction de l'angle de la cible	77
3.22	Montage transimpédance	77
3.23	Spectre de sensibilité équivalent de la photodiode avec filtres optiques	78
3.24	Modèle géométrique du filtre spatial	78
3.25	Conditions expérimentales pour la mesure de bruit	80
3.26	Puissance optique mesurée par la photodiode	81
3.27	Schéma de bouclage	83
3.28	Erreur de trainage tolérée pour $\alpha = 1$	84
3.29	Erreur de traînage non tolérée pour $\alpha = 1$	84
3.30	Erreur de trainage non tolérée pour $\alpha = 2$	85
3.31	Erreur de traînage de rupture de fonctionnement en fonction de la distance	86
3.32	Schéma de bouclage réduit et consigne locale de position nulle	87
3.33	Configuration de la mesure.	88
3.34	Diagramme fréquentiel de gain en boucle ouverte.	89
3.35	Diagramme fréquentiel de phase en boucle ouverte.	89
3.36	Fixation de la tête optique	90
3.37	Réponse en vitesse du moto-réducteur bas à une tension sinusoïdale	91
3.38	Réponse à un échelon de vitesse en boucle ouverte	91
3.39	Réponse à un échelon de vitesse en boucle fermée	92
3.40	Réponse en vitesse du moto-réducteur en boucle fermée	93
3.41	Diagramme fréquentiel de gain en boucle fermée	94
3.42	Diagramme fréquentiel de phase en boucle fermée	94
3.43	Protocole de mesure de la précision statique	95

3.44 Réponse en position à 500 mm de distance	96
3.45 Erreur de position pour une réponse à 500 mm de distance.	96
3.46 Précision statique en fonction du rayon coopératif et distance.	97
3.47 Banc de mesure pour l'animation circulaire	98
3.48 Mesure à 55 mm/s	98
3.49 Erreur Mesure à 55 mm/s	99
3.50 Chute libre d'une cible en photographie pause longue dans l'obscurité	99
3.51 Erreur dynamique en fonction de la vitesse	100
3.52 Accélération et vitesse de décrochage de la cible	100
3.53 Positionnement du dispositif par rapport à l'état de l'art	102
4.1 Principe de fonctionnement de la matrice de micro-miroirs [Ins09]	105
4.2 Principe de la formation d'image laser par DMD	105
4.3 Montage expérimental de l'imageur DMD	106
4.4 Matrice de micro-miroirs observée au microscope électronique [Ins09]	107
4.5 Kit de développement D4000	107
4.6 Figure de diffraction à la sortie du DMD	108
4.7 Franges d'interférences	108
4.8 Montage de Risley [Tho09]	110
4.9 Modèle géométrique du montage de Risley	110
4.10 Réfraction élémentaire d'un rayon incident	111
4.11 Calcul de la norme du rayon réfracté	112
4.12 Composition du montage de Risley développé	116
4.13 Commande en position indépendante des 2 primes	117
4.14 Photos de face et de côté du prototype d'orientation par prismes	118
4.15 Configuration pour la validation du modèle géométrique	119
4.16 Centrage de la figure Matlab et de la figure laser	119
4.17 Superposition de l'empreinte laser et de l'empreinte calculée	120
4.18 Diagramme fréquentiel de gain en boucle ouverte	121
4.19 Diagramme fréquentiel de phase en boucle ouverte	121

4.20 Réponse à un échelon en boucle ouverte	122
4.21 Réponse à un échelon en boucle fermée	122
4.22 Réponse sinusoïdale en boucle ouverte	123
4.23 Réponse sinusoïdale en boucle fermée	123
4.24 Diagramme fréquentiel de gain en boucle fermée	124
4.25 Diagramme fréquentiel de phase en boucle fermée	124
4.26 Vue d'ensemble du prototype	126
4.27 Montage sources lasers + double prismes	127
4.28 Distorsion pour un prisme de 25° à déviation latérale maximale	128
4.29 Taux de compression de l'empreinte en fonction de l'angle du prisme	128
4.30 Relation entre les distorsions optiques et la plage de mesure	129
4.31 Montage imageur DMD + double prismes	129
4.32 Correction des défauts à l'aide de l'imageur laser DMD	130
4.33 Contrôle de l'image laser en fonction de la trajectoire globale	131
4.34 Interaction de l'empreinte laser avec une cible	131
4.35 Comparatif des performances des combinaisons de couplage mesure locale/globale .	133

Liste des tableaux

1.1	Résolution du Liberty Latus de Polehmus [Pol09]	14
1.2	Comparaison entre les types de marqueurs d'ARTracking	18
2.1	Les différentes sources de bruit d'après [JL98]	34
2.2	Description de la classification des lasers [C.V]	38
2.3	Table des Expositions Maximales Permisses	39
3.1	Table de Denavit Hartenberg	60
3.2	Table de Denavit Hartenberg	61
3.3	Mesure de la puissance des diodes laser	72
3.4	Répartition en puissance en réception	74
3.5	Influence des méthodes de filtrage optique en éclairage intérieur	80
3.6	Erreur statique et dynamique en fonction de la classe du système et du type d'entrée	85
3.7	Tableau récapitulatif en boucle ouverte	90
3.8	spécification de l'étage de poursuite global	94
3.9	spécification du prototype de capture mono-cible	101
4.1	Caractéristiques du Kit D4000	106
4.2	Tableau récapitulatif en boucle ouverte	121
4.3	Spécification des scanners OPTRA et CEA	125

Introduction générale

Depuis l'avancée des technologies de numérisation ces trente dernières années, capturer de l'information devient de plus en plus populaire et engendre de nouveaux usages. L'appareil photo est un exemple dont l'arrivée de la numérisation a repoussé de nombreuses limites comme la facilité d'utilisation et la réduction des coûts pour un public non expert. En suivant cette même dynamique, les dispositifs de numérisation de trajectoire font progressivement leur apparition afin de quantifier la trajectoire d'un mouvement choisi.

Mesurer une trajectoire présente plusieurs contraintes. La première est la mise en œuvre de moyens d'identification des points d'intérêt dans la scène où se déroule l'action à capturer. Une autre contrainte est la nature du mouvement des cibles et l'espace dans lequel elles vont évoluer. A l'heure actuelle, les dispositifs existants sont soit très performants mais très complexes et très coûteux, soit au contraire, très peu coûteux mais souffrant de problèmes d'immunité aux perturbations ou aux dérives. Les progrès doivent se concentrer sur l'ergonomie, la robustesse et bien entendu les coûts dont la baisse sera l'élément crucial pour démocratiser l'usage de ces appareils tout en prenant soin de garder des performances exploitables.

La démarche proposée dans cette étude propose des compromis en combinant deux approches. L'approche "locale", se consacre à la mesure de la position d'une cible passive dans un espace réduit. Elle repose sur des techniques de balayages à haute dynamique sans pièces mécaniques en mouvement. La seconde approche combinée est la mesure "globale". Sa fonction est d'apporter une extension du champ de mesure. Elle est assurée par des technologies dont les performances dynamiques deviennent moins déterminantes et moins onéreuses. Associée à cette stratégie de découplage, l'usage de la technologie laser constitue un bon outil de mesure optique sans contact et robuste face aux conditions environnementales. L'usage du laser est d'autant plus intéressant que cette technologie devient de plus en plus abordable grâce aux efforts de développement initialement dédiés au marché de la fibre optique.

L'exploration de cette problématique se décompose en 4 chapitres. Le chapitre 1 aborde la problématique liée à la capture de mouvement. Les enjeux sont abordés au travers d'un descriptif des applications. La problématique scientifique et technique est proposée à partir de l'exploration des différentes technologies existantes. Pour chacune d'entre-elles, un état des lieux des forces et des faiblesses est dressé. Le chapitre 2 rappelle la théorie nécessaire à la compréhension et à la conception des dispositifs optiques reposant sur la technologie du laser. Le système présenté dans

le chapitre 3, propose une approche technologique reposant sur deux sous-systèmes. Le premier sous-système est dédié à une mesure locale à l'aide d'une matrice de sources lasers commutées indépendamment. Le second sous-système, composé de deux moteurs montés en série, offre un espace de mesure à grand champ. Une fois détaillés les principes théoriques mis en œuvre, les résultats expérimentaux obtenus sur ce prototype sont confrontés à l'état de l'art dressé dans le chapitre 1.

A l'issue du bilan du dispositif présenté dans le chapitre 3, le chapitre 4 propose une alternative à la mesure globale à base de prismes rotatifs puis une seconde alternative, à la mesure locale à l'aide d'une matrice de micro-miroirs. Enfin, la seconde partie du chapitre 4 évalue la pertinence de la décomposition en deux sous-modules de mesure "locale" et "globale" en fonction des spécifications de la trajectoire à mesurer.

Les résultats obtenus démontrent la possibilité de répondre à plusieurs types de besoins en influant sur les choix des dispositifs de mesure locale accouplés aux modules de mesure globale.

Chapitre 1

Problématique de la capture de mouvement

Sommaire

1.1	Objectifs, challenges et applications	5
1.1.1	Objectifs	5
1.1.2	Challenges	5
1.1.3	Applications	6
1.1.3.1	Cinéma, jeux vidéo, attraction ludique	6
1.1.3.2	Industrie	7
1.1.3.3	Applications médicales et sportives	8
1.1.3.4	Robotique	9
1.2	Etat de l'art des dispositifs de mesure de trajectoire	11
1.2.1	Dispositifs à mesure mécanique	11
1.2.1.1	Déportée	11
1.2.1.2	Embarquée	12
	Bandes résistives déformables	12
	Technologies inertielles	12
1.2.2	Dispositifs à mesure magnétique	14
1.2.2.1	Champ électromagnétique	14
1.2.3	Dispositifs à mesure ultrasonique	15
1.2.4	Dispositifs à imagerie	16
1.2.4.1	Caméra colorimétrique	16
1.2.4.2	Caméra infrarouge	16
	Cible lumineuse active	16
	Cible lumineuse passive	17
1.2.4.3	Caméra à mesure de temps de vol	18
1.2.5	Dispositifs lasers	19
1.2.5.1	Introduction sur la lumière laser	19

1.2.5.2	Déviatiion de faisceaux collimatés	20
	Scanner galvanométrique	20
	Scanner à miroir orienté	21
	Scanner à miroir miniature	22
	Scanner à matrice de miroirs miniatures à orientation binaire . . .	22
	Scanner à prismes	25
1.2.6	Figures des performances et conclusion	26

1.1 Objectifs, challenges et applications

1.1.1 Objectifs

En observant nos habitudes au quotidien, nous pouvons constater que l'homme a constamment besoin de se localiser dans l'espace afin de lui permettre d'engendrer des déplacements fonctionnels. Nous observons également que les outils et méthodes mis en place dépendent de paramètres tels que la plage de déplacement, la connaissance de cet espace et de la possibilité d'intervenir matériellement sur cet environnement. Ainsi, la couturière va utiliser son propre tissu pour localiser les zones d'intervention millimétrique des mouvements liés à sa main, l'automobiliste va utiliser les panneaux routiers pour déplacer son véhicule dans un espace kilométrique, le pilote d'avion va utiliser les informations fournis par les satellites de géo-localisation dans un espace aéronautique via son GPS en l'absence de repère au dessus de la mer et les premiers cosmonautes qui ont foulé le sol de la lune ont dû s'appuyer sur des repères visuels basiques en l'absence de satellite et de panneau, faute d'une intervention humaine antérieur.

Ces quelques exemples permettent d'introduire les notions fondamentales à prendre en compte lorsque l'on cherche à satisfaire un besoin de mesure de localisation. La première notion commune et fondamentale est la notion de plage de mesure. Il convient donc de spécifier un volume utile de mesure dans un premier temps ainsi que la précision attendue souvent en proportion de cette plage. La seconde notion fondamentale est la connaissance du lieu. Cette donnée va déboucher sur la possibilité, d'exploiter des repères naturels connus, ou de placer des repères artificiels si le contexte le permet.

Les satellites, les phares sur les côtes maritimes, les panneaux routiers ou encore les cases d'un échiquier sont autant de repères artificiels exploités par l'homme pour l'aider dans son repérage et donc satisfaire un besoin de mouvement quelle que soit l'échelle.

Ces repères artificiels appelés "marqueurs" peuvent être sous-divisés en deux familles. Les marqueurs "actifs" génèrent des signaux de diverses natures physiques (ex : les satellites, les phares maritimes...) et les marqueurs "passifs" (ex : un panneau routier, la forme d'un objet, une couleur etc...).

Enfin, il convient aussi d'identifier par convention si le dispositif de localisation repose sur une méthode dite "intérieur vers l'extérieur" comme c'est le cas de l'automobiliste avec les panneaux ou si le système est de type "extérieur vers intérieur" comme c'est le cas d'une caméra de surveillance qui suit le déplacement d'un piéton suspect.

1.1.2 Challenges

L'un des challenges majeurs pour les développeurs de solutions de localisation est la notion de robustesse. La robustesse peut être définie comme étant la faculté du système à s'affranchir des conditions environnementales pour fonctionner sans conditions et sans mesures erronées.

Un autre challenge important concerne le degré d'intrusivité de l'espace de mesure et de sa cible. D'une part, il n'est pas toujours possible de modifier le milieu et d'autre part, rendre le dispositif facile à utiliser permet d'élargir l'accessibilité à de nouveaux publics non experts. Un des axes de travail à privilégier est donc la suppression des phases de réglages et d'équipement et surtout la limitation de l'usage de marqueurs actifs contraignants en raison des câbles ou de la dépendance avec l'autonomie électrique dans le cas de l'usage de batterie.

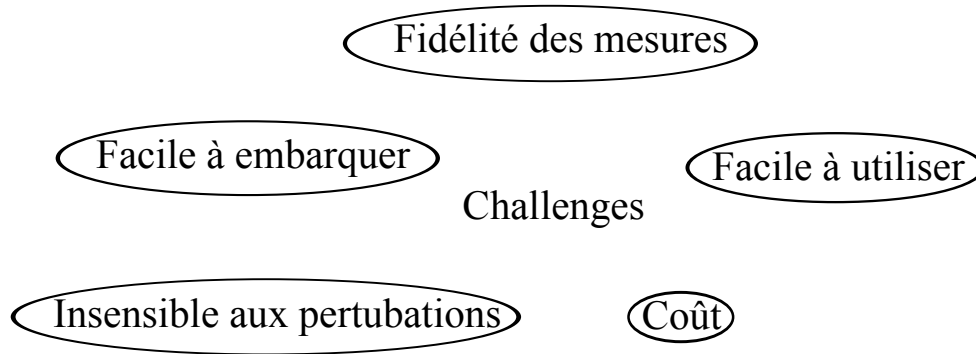


FIGURE 1.1 – Les challenges pour la démocratisation des technologies de capture de mouvement

Enfin et toujours dans le but de démocratiser les technologies de mesure de trajectoire, un des challenges est celui de travailler sur les coûts tout en conservant une relative fidélité des mesures comme le résume la figure 1.1.

1.1.3 Applications

Les applications sont nombreuses et peuvent être déclinées en 5 familles : loisirs, simulation pour l'industrie, applications médicales, applications liées aux sports et finalement la robotique.

1.1.3.1 Cinéma, jeux vidéo, attraction ludique

La capture de mouvement pour la réalisation d'effets spéciaux permet de calquer des mouvements capturés sur des acteurs réels pour l'animation de personnages virtuels. L'usage de cette méthode possède le double avantage de donner une dimension réaliste aux films d'animations tout en diminuant les coûts et les délais de production. La figure 1.2 met en évidence la transposition du jeu des acteurs réels dans la scène qui sera finalement diffusée.

Pour les jeux vidéo, l'enjeu global est relativement simple. Il consiste à remplacer les traditionnels boutons poussoirs par des dispositifs permettant de mesurer les gestes réels et de les restituer fidèlement dans le jeu de manière instantanée. Le challenge consiste donc à mieux immerger le joueur tout en trouvant des solutions financièrement abordables pour le grand public. Outre la contrainte économique, le challenge est aussi technologique et ergonomique puisque l'utilisateur doit pouvoir interagir instantanément, simplement et sans subir un dispositif contraignant ainsi



FIGURE 1.2 – Utilisation de la capture de mouvement pour le film "Pirates des Caraïbes"

que les éventuelles étapes préliminaires de calibration, le tout sans dépendre des conditions environnementales.

A titre d'exemple, la société Nintendo est la première à avoir proposé un dispositif relativement simple de mesure de mouvement pour le jeu vidéo grand public avec la Wii (Figure 1.3) donnant ainsi une nouvelle dimension réaliste dans le domaine du jeu vidéo. La présence de vibreurs dans les manettes introduit également la notion de stimulation mécanique.



FIGURE 1.3 – Interface pour jeux vidéo

Dans un registre voisin du jeu vidéo mais avec cette fois-ci une dimension encore plus réaliste, les techniques de "réalité augmentée" incrustent un objet ou un personnage virtuel animé dans une scène réelle. Dans certaines applications, il est possible d'interagir avec cet élément virtuel grâce aux technologies de capture de mouvement. Ce type d'application se développe et son usage commence à se démocratiser comme en témoigne l'attraction "Les animaux du futur" présentée au Futuroscope de Poitiers depuis Avril 2008 (figure 1.4).

1.1.3.2 Industrie

La conception assistée par ordinateur est maintenant l'outil incontournable des professionnels des bureaux d'études pour les applications industrielles. Il s'agissait dans un premier temps de



FIGURE 1.4 – Application de réalité augmentée pour le Futuroscope [Fut08]

faciliter le dessin mais aussi de vérifier que les pièces qui constituent un assemblage soient bien cohérentes les unes avec les autres. Ce maquettage numérique évite de longues et onéreuses étapes de prototypage matériel. Cette notion de maquettage numérique comprend désormais couramment des étapes de simulations des déformations des matériaux, des comportements thermiques, des notions de dynamique mais également, et cela grâce aux technologies de capture de mouvement, de simuler les gestes liés au montage par un ouvrier et de vérifier ainsi que le poste de travail est adapté. Avec l'exemple de la figure 1.5, l'ergonomie d'un poste de soudure pour l'industrie automobile peut-être vérifiée.

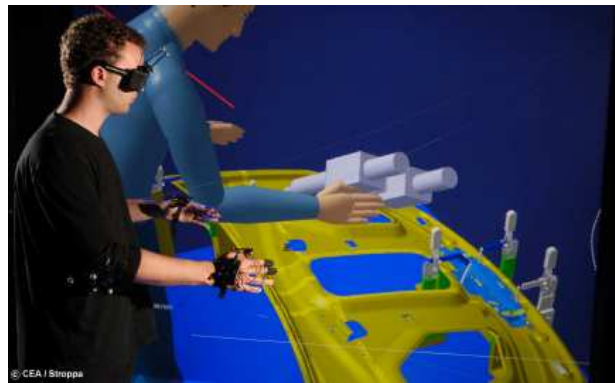


FIGURE 1.5 – La réalité virtuelle au service de l'industrie automobile (CEA-LIST)

1.1.3.3 Applications médicales et sportives

Cette section aborde la question du rôle des techniques de captures de mouvement à des fins médicales mais également à des fins de performances sportives.

En effet, dans le cas de la rééducation d'un membre (figure 1.6), la mesure du geste à différents moments met en évidence une progression ou une régression des capacités. Un autre domaine prometteur est celui de la formation. En effet, la capitalisation, le transfert et le contrôle du savoir-faire représentent un enjeu de taille dans un contexte où la santé entre en ligne de compte. Ce type d'applications fait aujourd'hui l'objet de travaux Européens visant à mieux former les chirurgiens pour les opérations délicates.



FIGURE 1.6 – Capture de mouvement pour la rééducation [Bio05]

Cette notion de gestes experts intéressent bien entendu de manière significative les acteurs de la performance sportive qui peuvent enregistrer et qualifier leur prestation et la comparer dans le temps pour quantifier et valoriser leurs progrès. Au-delà de la mesure de sa propre performance, avec la numérisation du geste, des comparaisons avec d'autres sportifs sont possibles. La figure 1.7 illustre le potentiel qu'offre la capture de mouvement pour l'étude de la mise en place des premières foulées qui sont primordiales pour la réussite de la course de sprint. Le modèle visuel généré se concentre sur l'essentiel, à savoir la position des articulations. Ces propriétés seraient plus difficiles à obtenir avec l'aide d'un simple enregistrement issu d'une caméra vidéo.

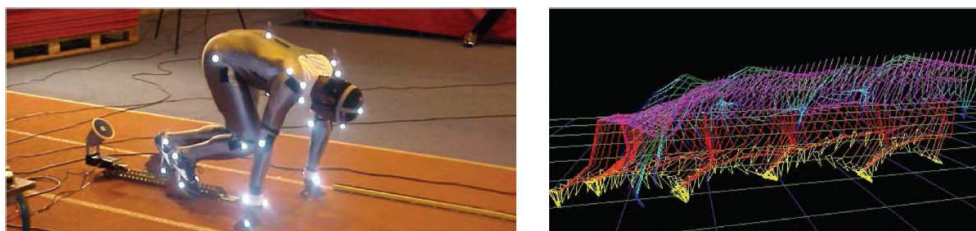


FIGURE 1.7 – Enregistrement du geste de la course pour l'athlétisme

1.1.3.4 Robotique

Au delà des applications évoquées précédemment qui représentent un marché parfois à large public, les dispositifs de captures de mouvement peuvent également être utilisés comme dispositifs de localisation pour l'assistance à la navigation ou bien l'automatisation d'un système en déplacement. En effet, indépendamment de l'application, la fonction d'un dispositif de capture de mouvement est de fournir à des moments donnés, la position des cibles dans un espace délimité.

En partant de ce constat, les applications en robotique sont nombreuses tant pour localiser une cible dans une repère fixe (de l'extérieur vers l'intérieur) que pour aider un engin mobile à percevoir son environnement et favoriser ainsi son déplacement en autonomie. Cette dernière

approche implique une contrainte forte, mais aussi un challenge, il s'agit de la faculté à être embarqué (de l'intérieur vers l'extérieur).

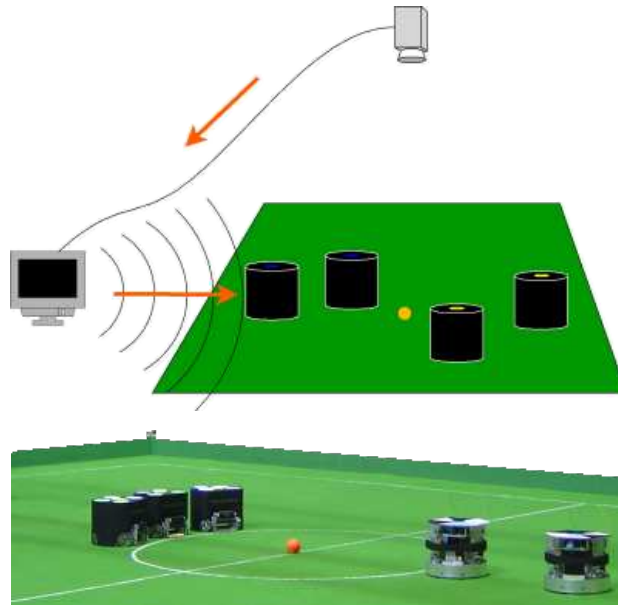


FIGURE 1.8 – Localisation "extérieur vers l'intérieur" pour le concours de robotique Robocup [Rob99]

Dans le cas de la figure 1.8, les robots mobiles répartis en deux équipes jouent au football. Une caméra est fixée au plafond et fournit des informations sur les cibles passives colorées disposées sur le dessus des robots. Ensuite, un ordinateur déporté ordonne les déplacements des machines au sein de l'espace de travail délimité : un terrain de football miniature.



FIGURE 1.9 – Localisation embarquée "intérieur vers extérieur" pour le concours Robocup [Rob99]

La seconde méthode implique de pouvoir embarquer le dispositif de localisation. Dans le cas de l'exemple illustré par la figure 1.9, la balle de couleur représente la cible dont la position doit être mesurée à partir du robot mobile.

1.2 Etat de l'art des dispositifs de mesure de trajectoire

Les performances et les spécifications des dispositifs de mesure de trajectoires reposent sur des choix technologiques qui, eux-mêmes, exploitent des propriétés physiques. Cette section propose un état des lieux de ces technologies en fonction des principes mécaniques, magnétiques, ultrasoniques et optiques. L'objet de cette section est de proposer à son issue, une figure récapitulative qui permette de mettre en évidence les forces et les faiblesses des technologies actuelles.

1.2.1 Dispositifs à mesure mécanique

1.2.1.1 Déportée

L'haptique qui vient du mot grec "haptomai" désigne la science du toucher. Ce type de capture implique un contact mécanique avec l'élément dont l'utilisateur souhaite mesurer les déplacements. Un mouvement de la cible engendre les déplacements des éléments mécaniques articulés dont les positions articulaires sont mesurées à l'aide de capteurs angulaires. Ainsi le Spidar (figure 1.10) est constitué de câbles enroulés autour de l'axe d'un moto-réducteur-codeur. La longueur de câble ainsi déroulée mesure des longueurs. Grâce à plusieurs de ces dispositifs, la position de la cible est calculée.

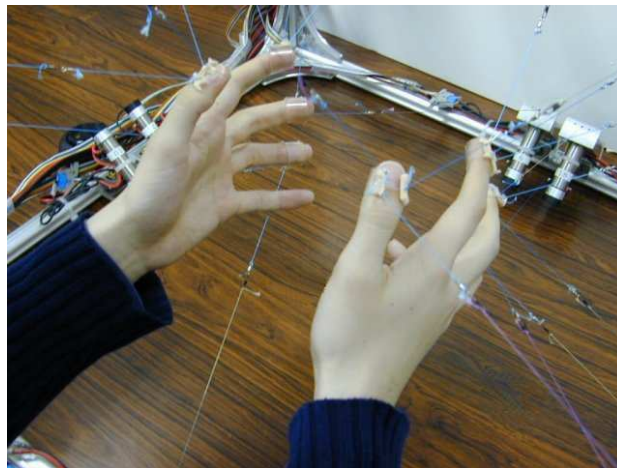


FIGURE 1.10 – Le spidar [HS92]

Le virtuose 6D 35-45 de la figure 1.11 est un autre exemple de dispositif de capture mécanique. Il s'agit d'une structure articulée avec des encodeurs angulaires. Outre la faculté d'engendrer un retour d'efforts sur les 6 degrés de liberté qui ne fait pas l'objet de cette étude, son volume de travail utile est assimilable à un cube de 45 cm de côté pour une résolution de 6 μm . Le taux de rafraîchissement donné est de 10 KHz. Les principaux avantages sont la précision et la robustesse face aux perturbations lumineuses et électromagnétiques. De plus, cette solution ne pose pas de problème d'occultation et offre la possibilité de générer un retour d'efforts grâce aux moteurs

électriques qui apportent de l'énergie. En revanche, ces interfaces sont onéreuses, intrusives dans le champ de vision et leurs plages de déplacement sont limitées.

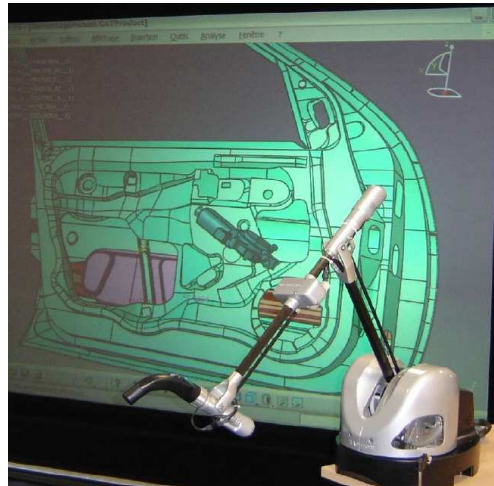


FIGURE 1.11 – Virtuose [Hap09]

1.2.1.2 Embarquée

Bandes résistives déformables Le Cyberglove (figure 1.12) capture la position des extrémités des cinq doigts par rapport au poignet. Ce gant est équipé de 18 capteurs minces et flexibles les rendant non intrusifs et offrant un gant élastique et léger pour l'utilisateur. La résolution annoncée est inférieure à 1° pour une répétabilité de 3° . Le taux d'enregistrement est donné pour 90 rafraîchissements par seconde. La technologie Wifi employée permet une liberté de mouvement dans un rayon de 15 mètres avec une autonomie des batteries de 3 heures.



FIGURE 1.12 – Le CyberGlove [cyb09]

Technologies inertielles Les interfaces inertielles sont légitimement rattachées à la famille des dispositifs utilisant la physique de la mécanique. Au lieu de mesurer des distances, il s'agit ici de mesurer des accélérations linéaires et des vitesses angulaires afin de déterminer une position relative dans l'espace. La position est obtenue par double intégration de l'accélération et simple intégration de la vitesse angulaire mesurée. Ce type de capteur basé sur des technologies MEMS¹

1. MEMS : Micro Electro Mechanical System

offre une bonne intégration en terme de dimension mais le principe physique retenu implique la prise en compte d'une dégradation des données fournies en raison de l'intégration des grandeurs. A ces constantes s'ajoute le fait qu'une accélération en dehors des capacités de mesure provoque une saturation et augmente l'erreur de positionnement. En pratique, ce type de saturation est souvent provoqué par un choc.

Pour obtenir la mesure des 6 degrés de liberté d'un point dans l'espace, il est nécessaire de combiner les grandeurs mesurées par ces deux technologies inertielles. La société XSens commercialise le système MOVEN (figure 1.13) qui combine un gyroscope, un accéléromètre mais également un compas permettant de donner une référence absolue nécessaire au rattrapage de la dérive des autres instruments. Cette cellule propose une mesure relative autour de 6 degrés de liberté avec une précision angulaire de 0.1° et un taux de rafraîchissement de 120 Hz. Les points forts de cette technologie résident dans la plage de mouvement quasi illimitée et l'absence de risques d'occultation.



FIGURE 1.13 – Centrale inertielle miniature [RLP09]

Reposant sur des objectifs moins métrologique, la start-up Movea propose depuis 2008 le système Air Mouse Gyration qui est une souris capable de mesurer les déplacements dans l'espace et non plus seulement sur un plan. C'est également une technologie inertielle qui est employée avec 2 gyroscopes et 3 accéléromètres offrant ainsi 5 degrés de liberté.



FIGURE 1.14 – La souris Gyratation Air Mouse [Mov08]

1.2.2 Dispositifs à mesure magnétique

1.2.2.1 Champ électromagnétique

Cette technologie est constituée d'un ensemble de trois bobines émettrices qui propagent des champs électromagnétiques dans une sphère environnante de quelques mètres. Le récepteur est composé de trois bobines réceptrices qui recueillent les flux magnétiques en fonction de la position de celles-ci par rapport à l'émetteur. Le système "Liberty Latus" de Polhemus (figure 1.15) est capable de fournir la position de 1 à 12 récepteurs actifs sans fil à un taux de rafraîchissement jusqu'à 188 Hz en fonction du nombre de cibles à poursuivre. La précision angulaire est linéaire et dépend de la plage de travail désirée comme le montre le tableau 1.2.2.1.

Distance du marqueur (mm)	Résolution angulaire (°)	Résolution en position (mm)
619	0.02	0.127
1219	0.046	0.381
1829	0.248	3.6576
2438	0.355	6.6548
3048	1.239	26.7208
3658	2.106	59.6138
4267	4.235	102.2858

TABLE 1.1 – Résolution du Liberty Latus de Polehmus [Pol09]

La force de cette approche est son indépendance vis à vis des problèmes d'occultation puisque les ondes électromagnétiques se propagent à travers le corps humain. Cependant, la présence d'objets métalliques peut perturber le champ généré par la source. Cette particularité explique que les



FIGURE 1.15 – Un marqueur et le récepteur du Polemus Lyberty Latus

salles immersives de réalité virtuelle sont souvent constituées d'une structure principalement en bois.

Les instruments KMZ51 et KMZ52 développés par Philips Semiconductors [Phi00] sont des capteurs de champs magnétiques dédiés à la fonction de compas. Le principe physique utilisé ici est l'effet magnéto-résistif permettant de mesurer l'orientation du champ magnétique terrestre. Ce type de mesure offre l'avantage d'une mesure absolue naturelle par rapport au référentiel terrestre. Cependant, son défaut majeur réside dans sa sensibilité aux champs perturbateurs et notamment aux masses métalliques génératrices de champs magnétiques. D'autres types d'erreurs et de calibrations peuvent être nécessaires en fonction de la précision requise pour l'application.

1.2.3 Dispositifs à mesure ultrasonique

Dans la thèse [BP05], le principe exploité consiste à mesurer le temps de transit entre un émetteur et un récepteur d'une onde ultrasonore se propageant dans l'espace. Dans le contexte de cette étude, dédiée à la localisation dans un champ, la précision obtenue est de 10 cm sur la position et 3° sur l'orientation. Pour cette approche, il est nécessaire d'équiper l'environnement et la cible en équipements électroniques actifs ce qui constitue un inconvénient. Outre les problèmes d'interférence et de la dérive des propriétés de transmission dans l'air en fonction de la température et de l'humidité, cette technologie se démarque souvent par son faible coût.

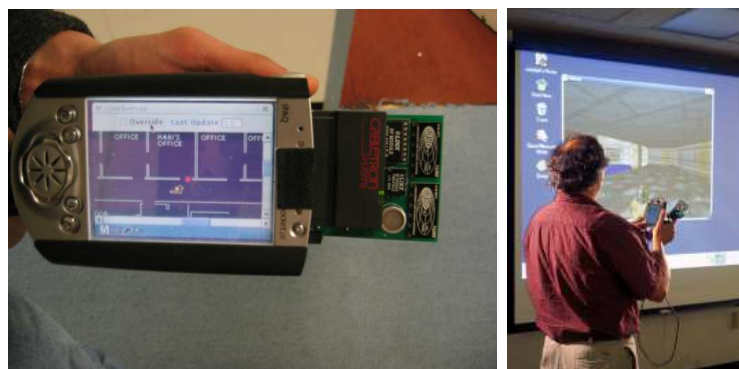


FIGURE 1.16 – Le système Cricket de localisation ultrasonique [BP05]

1.2.4 Dispositifs à imagerie

1.2.4.1 Caméra colorimétrique

Dans cette approche, à l'image de celle de l'œil humain et la faculté du cerveau à reconnaître les objets, un capteur de lumière visible à deux dimensions permet d'obtenir une image. Dans l'application proposée par [CBSSF09] et illustrée par la figure 1.17, les objets d'intérêts sont reconnus puis leurs positions sont identifiées permettant ainsi à un bras mécanique d'attraper les objets quelle que soit la position du robot mobile. Etant donnée la démocratisation des capteurs vidéo que l'on retrouve désormais sur les téléphones portables, cette méthode présente un intérêt économique mais elle est également non intrusive car elle s'appuie sur les formes et les couleurs naturelles des cibles. Les contreparties de cette approche sont : la dépendance aux conditions ambiantes comme la lumière, ou la texture globale de la scène. Une meilleure robustesse est obtenue grâce aux avancées significatives de la puissance des algorithmes, mais nécessite malgré tout une puissance de calcul adaptée.



FIGURE 1.17 – Suivi d'objets sans marqueur par caméra [CBSSF09]

1.2.4.2 Caméra infrarouge

Cible lumineuse active Le principe physique utilisé consiste à mesurer une quantité de lumière sur un capteur à deux dimensions. La différence fondamentale avec l'approche basée sur des caméras vidéo classiques réside dans le fait que la caméra est configurée pour être sensible uniquement à la lumière générée dans le domaine de l'infrarouge par les cibles actives. Cette stratégie rend

plus simple et plus robuste l'identification des cibles. Dans l'exemple du système développé par ART Tracking (figure 1.18), les marqueurs sont composés de diodes électroluminescentes générant de la lumière infrarouge à l'extrémité de chaque doigt.



FIGURE 1.18 – Système Fingertracking par ART Tracking [Tra06]

Cible lumineuse passive Le principe utilisé ici repose sur une camera sensible à la lumière infrarouge. Cette lumière est produite par une source éclairant la scène contenant des marqueurs rétro-réfléchissants. Ces marqueurs ont la spécificité de renvoyer la lumière dans le même axe optique que l'axe incident. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet d'embarquer des cibles passives qui se comportent quasiment comme des cibles actives mais sans les inconvénients (batteries, câbles...) comme le montre la figure 1.19 avec une photographie traditionnelle prise avec un flash.



FIGURE 1.19 – Cibles rétro-réfléchissantes [vic09]

Le tableau 1.2 confronte les avantages et les inconvénients de chaque type de marqueurs actifs et passifs de la gamme de produit ARTracking [Tra06]. Dans les paramètres importants, il apparaît tout de suite une notion de plage de mesure. Les meilleures performances sont obtenues par les marqueurs actifs mais au détriment de la complexité technique. En effet, ces marqueurs nécessitent d'embarquer de l'électronique et de l'énergie avec les coûts que cela engendre.

Type de marqueur	Visibilité	Plage de mesure	Commentaires
Passif sphérique	Continue	4-10 m en fonction du type de caméra et de la taille de la cible	Surface fragile
Passif plat	Limitée à $\pm 45^\circ$	4-10 m en fonction du type de caméra et de la taille de la cible	Economique, surface moins fragile
Actif, simple source	Limitée à $\pm 60^\circ$	>10 m	Electronique et alimentation embarquée nécessaire
Actif, Source avec diffuseur sphérique	Au moins 1/2 sphère en fonction du montage de la source	$\approx 4\text{m}$	Electronique et alimentation embarquée nécessaire
Actif grande taille	continue	jusqu'à 30 m	Grande et coûteuse, électronique et alimentation embarquée nécessaire

TABLE 1.2 – Comparaison entre les types de marqueurs d'ARTracking

1.2.4.3 Caméra à mesure de temps de vol

Dans le cas de l'usage de système à imagerie, il persiste la problématique de la mesure de la profondeur. Pour pallier à cela, l'usage de plusieurs caméras augmente, d'une part, l'étendue du champ de vision, mais surtout permet le calcul par triangulation de la distance des cibles. Cette approche bien que performante engendre des ressources algorithmiques importantes et nécessite une calibration. Cette dernière représente alors une étape préparatoire.

Depuis quelques années, un axe de recherche est orienté vers les caméras capables de mesurer la profondeur. Elles sont basées sur le temps de transit d'une onde lumineuse projetée. Cette approche repose sur la capacité de chaque pixel de capteur à deux dimensions de fournir non plus une couleur ou une intensité de lumière mais une distance (figure 1.21). Cette simplification a donc pour conséquence une meilleure intégration du système et une réduction des coûts. D'autre part, le dispositif étant capable de fournir à lui seul des informations en trois dimensions, il devient plus facile à exploiter en réduisant les étapes de calibration. En revanche c'est un système qui est

encore sensible aux ambiances lumineuses trop intenses, aux effets liés à des "rebonds" de lumière parasite ainsi qu'à la nature réfléchive des objets présent dans la scène [Ima08].



FIGURE 1.20 – Camera 3D SR4000 [Ima08]



FIGURE 1.21 – Image 3D [Ima08]

1.2.5 Dispositifs lasers

1.2.5.1 Introduction sur la lumière laser

Avant d'aborder un état de l'art des dispositifs de mesure utilisant les propriétés de la lumière laser, il convient d'en introduire les propriétés. L'usage courant du laser date d'une trentaine d'années. Il s'agit donc d'une technologie relativement récente. Les dates ci-après situent les étapes clés dans l'histoire de cette technologie.

- **1917** : Le principe de l'émission stimulée (ou émission induite) est décrit par Albert Einstein [Sci08]
- **1960** : le physicien américain Théodore Maiman obtient pour la première fois une émission laser au moyen d'un cristal de rubis [Net09]
- **1965** : Invention du disque compact [Bel10c]
- **1971** : Photocopieur laser [Bel10b]
- **1974** : Premier lecteur de code-barres dans un supermarché [Bel10a]

Parmi ses particularités, la lumière laser est unidirectionnelle grâce à sa cohérence temporelle et spatiale. Cela signifie que le faisceau se dirige dans une direction unique avec une faible divergence.

Cette dernière est liée à la taille de la source ainsi qu'à la longueur d'onde utilisée. Contrairement à la lumière émise par le Soleil ou par une ampoule à incandescence qui est polychromatique, la lumière produite par un laser est monochromatique. Cette particularité permet de concentrer la puissance sur une largeur de bande étroite permettant d'améliorer la sélectivité par un filtrage adéquat dans un environnement bruité.

1.2.5.2 Déviation de faisceaux collimatés

Afin d'exploiter la propriété de collimation et à la fois de couvrir un champ de mesure fonctionnel, il devient nécessaire d'orienter le faisceau.

Scanner galvanométrique La façon la plus intuitive de modifier l'orientation d'un faisceau est d'utiliser un miroir. En combinant deux miroirs, il devient alors possible de couvrir un volume en deux dimensions. Le dispositif le plus couramment utilisé pour cet usage est le scanner galvanométrique. Le terme galvanométrique fait référence aux actionneurs électromagnétiques utilisés.

Ainsi le scanner galvanométrique implémenté par [SPI04] est utilisé pour balayer une zone d'intérêt local aux alentours de la cible comme l'illustre la figure 1.22. En fonction de la quantité de lumière reçue par le photo-détecteur, le dispositif est capable de corriger sa position globale de scrutation et de fournir la position d'une cible dépourvue de marqueurs.

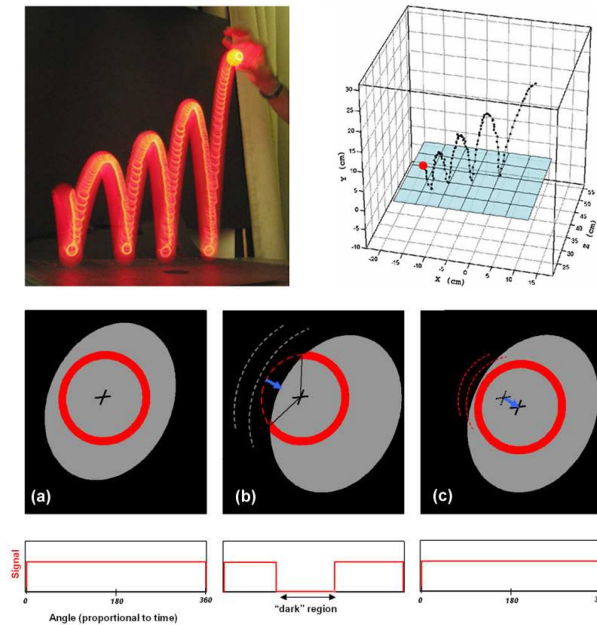


FIGURE 1.22 – Capture de trajectoire par scanner galvanométrique [SPI04]

Cette approche se démarque par la simplicité de son fonctionnement et la faculté à fonctionner sans marqueur. En effet, l'usage d'une source laser orientable concentre toute l'énergie sur la zone d'intérêt contrairement aux caméras actives dont la source de lumière diverge. Un autre point fort

réside dans l'usage d'un photo-détecteur unidimensionnel à la place d'un capteur matriciel. L'exploitation d'un capteur unitaire réduit ainsi les besoins en puissance de calcul. En contrepartie, l'usage de moteur galvanométrique représente un organe critique du dispositif [SPI03] puisqu'il s'agit d'animer des masses en mouvement avec des fortes accélérations. Cette mécanique en mouvement doit donc être véloce, précise et apte à subir des vibrations. Cette contrainte se traduit par des dispositifs gourmands en énergie et coûteux en raison des contraintes de fabrication. D'autre part, les distorsions optiques causées par la configuration géométrique des miroirs nécessitent de s'interroger sur les éventuelles corrections à implémenter [Haf00].

La figure 1.23 illustre les trois organes principaux constituant le dispositif. Il se compose d'une source de lumière laser collimatée, d'un bloc d'orientation du faisceau (scanner galvanométrique) et d'un ensemble photo-détecteur associé à une optique de collection de lumière.

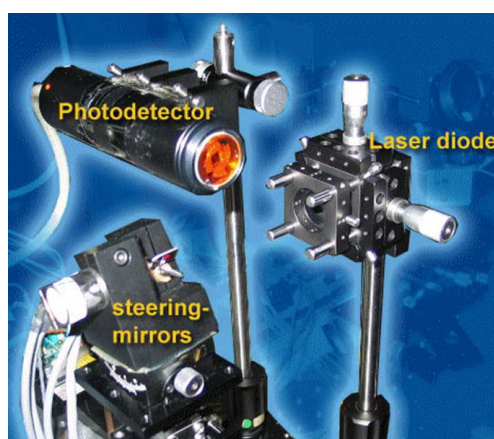


FIGURE 1.23 – Scanner laser à base de moteur galvanométrique [SPI03]

Scanner à miroir orienté Dans le domaine de la métrologie, le constructeur Leica Geosystem a mis au point un dispositif de suivi de cibles. Ce dispositif repose sur un système générant un faisceau laser collimaté qui est réfléchi à l'aide d'une cible de type "coin de cube". Ce type de cible renvoie le rayon incident dans la même direction mais en sens contraire à destination d'une capture de la mesure de déviation. Ce capteur mesure l'erreur de position de la tête mobile qui est responsable de l'orientation du faisceau. Cette erreur doit être rectifiée afin d'être toujours en collision avec la cible le plus au centre possible. Avec la connaissance de l'orientation de cette tête mobile et la télémétrie, le dispositif est capable de donner la position de la cible en trois dimensions (figure 1.24). Mis à part le coût important de ce dispositif lié à son contexte métrologique, le principe de fonctionnement est assez simple mais nécessite une cible onéreuse, fragile et qui possède un angle de fonctionnement limité en raison de sa géométrie "coin de cube". De part son principe de poursuite, ce système n'est pas dédié au suivi de plusieurs cibles à grand taux de rafraîchissement.

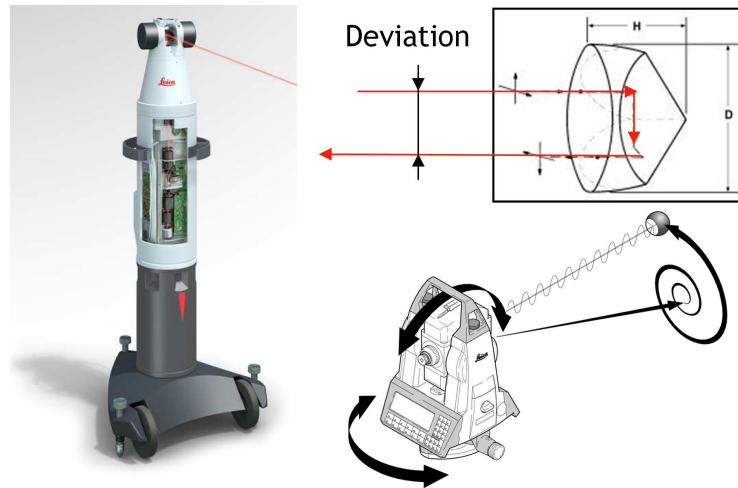


FIGURE 1.24 – Dispositif de suivi de cible par LEICA [LG09]

Scanner à miroir miniature Basées sur la déviation de faisceau par réflexion, les avancées en matière de microsystemes mécaniques à actionnement électrostatique MOEMS², commencent à laisser entrevoir la possibilité de réaliser des scanners miniaturisés à faible coût. A titre d'illustration, le micro-miroir de la figure 1.25 mesure 2 mm de diamètre et possède 2 degrés de liberté et un débattement maximum de $\pm 8^\circ$.

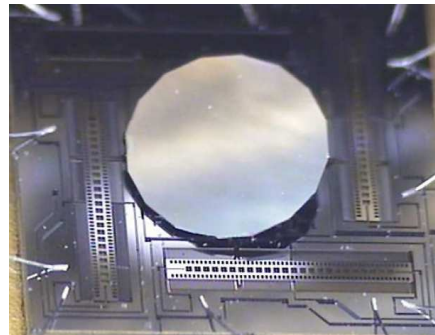


FIGURE 1.25 – Micro-miroir MEMS [VM08]

L'exemple d'application développée par [VM08] démontre le potentiel des micro-miroirs MEMS pour la capture de mouvement laser avec une architecture simplifiée. Ce montage démontre la possibilité de capturer en trois dimensions la position d'une cible en utilisant deux dispositifs de micro-miroirs MEMS. La figure 1.26 illustre le montage à deux micro-miroirs ainsi que le principe de triangulation permettant la mesure de la profondeur.

Scanner à matrice de miroirs miniatures à orientation binaire Outre la possibilité d'orienter de manière variable un micro-miroir selon 2 degrés de liberté, une autre approche consiste à exploiter de manière binaire le basculement de minuscules micro-miroirs implantés au sein d'une matrice (figure 1.28). Aujourd'hui, la référence en matière de matrice de micro-miroirs est Texas

2. MOEMS : Micro Opto-Electro Mechanical System

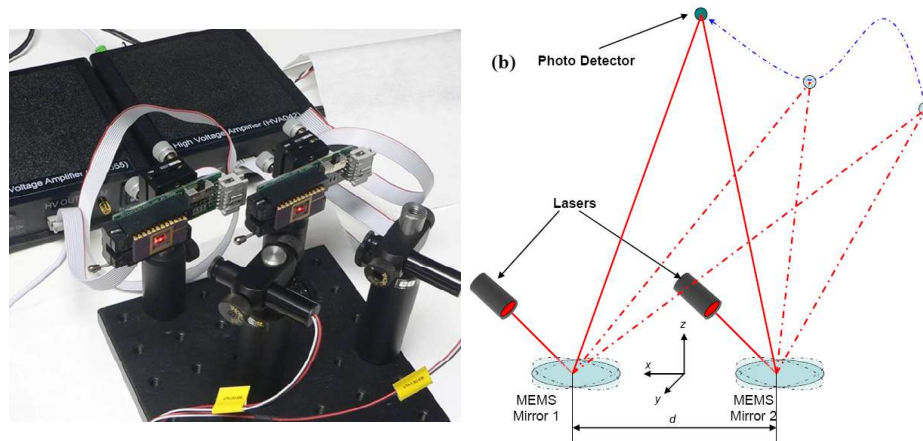


FIGURE 1.26 – Dispositif de mesure à 3 dimensions [VM08]

Instrument avec son produit DLP³. Le principe de fonctionnement repose sur l'actionnement d'un micro-miroir de manière à réfléchir la lumière incidente à destination de la zone d'intérêt ou bien de la neutraliser à destination d'un absorbeur optique (figure 1.27).

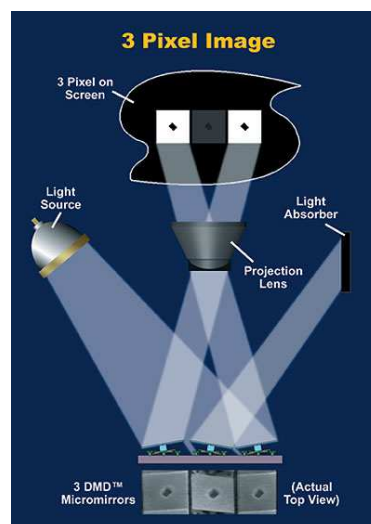


FIGURE 1.27 – Principe de fonctionnement de la matrice de micro-miroir [Ins09]

Ce dispositif est désormais très répandu dans les applications de vidéo-projection. Dans le cas présenté par [RJJST07], la matrice de micro-miroir est utilisée afin de projeter une source laser. Dans cette approche, il ne s'agit plus véritablement de contrôler l'orientation d'un faisceau laser unique mais d'agir sur la forme de la source laser comme le montre le schéma de la configuration optique de la figure 1.29.

Cette approche montre des qualités telles que le contrôle digital de la lumière qui contribue à la robustesse des procédés. D'autre part, le faible temps de réponse, le niveau d'intégration et la méthode de fabrication collective permettent d'allier performances et réductions des coûts. Le

3. DLP : Digital Light Processing

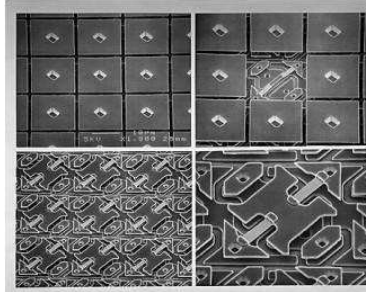


FIGURE 1.28 – Matrice de micro-miroir au microscope électronique [Ins09]

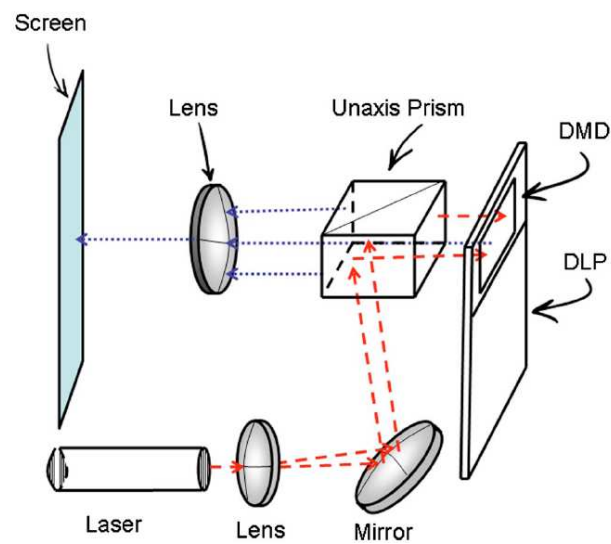


FIGURE 1.29 – Constitution d'un projecteur laser selon [RJJST07]

point faible en terme énergétique réside dans le fait qu'il est nécessaire d'irradier l'intégralité de la surface de la matrice de micro-miroir qui agit comme un masque.

Scanner à prismes Outre le miroir, une autre méthode pour dévier un faisceau de lumière est le prisme. Un prisme est un élément optique transparent dont le phénomène de réfraction est exploité selon les lois de Snell-Descartes (Figure 1.30).

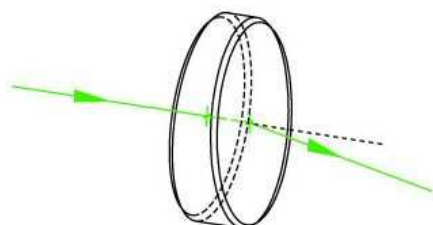


FIGURE 1.30 – Prisme à coin [Tho09]

Etant donné qu'un prisme dévie la lumière dans une direction, il suffit de présenter sur le chemin optique un second prisme afin d'obtenir un dispositif de déviation de lumière selon 2 degrés de libertés (figure 1.31). D'après la figure 1.32, cette approche également appelée "Risley prisms" répond à un besoin grandissant de systèmes compacts, robustes et économiques. Les avantages évoqués pour ce montage sont la compacité, la relative insensibilité aux vibrations, le faible moment d'inertie, l'indépendance des axes de rotation, la vitesse et la robustesse. Ce type de système est particulièrement adapté lorsque l'application requiert un balayage systématique sous forme de spirale ou de rosace [TJ08]. En effet, ce type de figure est obtenu en contrôlant la rotation à vitesse constante des prismes. Pour effectuer de telles figures, un scanner galvanométrique doit assumer des variations de vitesse importantes qui font entrer en ligne de compte l'inertie des parties mécaniques en mouvement. Ces fortes accélérations ont pour conséquence une augmentation de la consommation, l'apparition de vibrations et parfois même des distorsions des miroirs [Haf00].

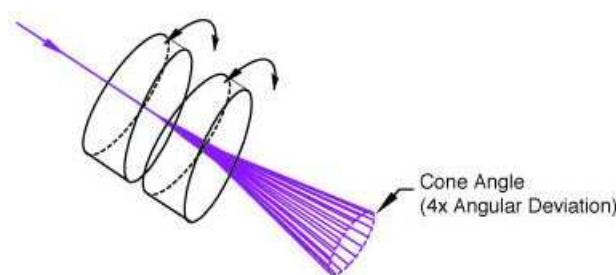


FIGURE 1.31 – Montage de Risley [Tho09]

Cependant, cette approche ne présente pas que des avantages, puisque la réalisation mécanique peut s'avérer complexe (figure 1.32). De plus, la relation entre l'angle de déviation de la lumière et les positions angulaires des prismes présentent des non-linéarités qui peuvent également conduire à des singularités lorsque la région abordée se situe près du centre du cône décrivant la plage de balayage.

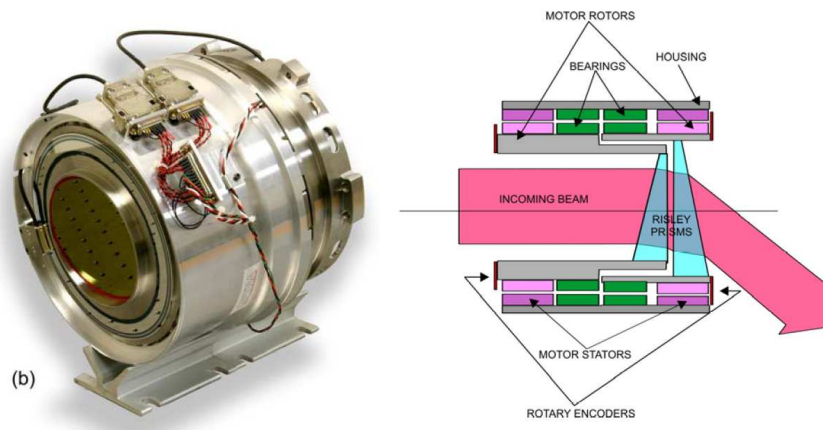


FIGURE 1.32 – Exemple de montage de Risley [Sch06]

1.2.6 Figures des performances et conclusion

Etablir une figure des performances exhaustive est délicate tant les paramètres sont nombreux. Ainsi, la figure 1.33 propose un comparatif des technologies de capture existantes reposant sur 5 critères qui sont : la sensibilité aux perturbations, la discrétion des marqueurs, la facilité d'usage, la fidélité des mesures et le coût de la technologie. Ce comparatif met en évidence plusieurs paramètres concurrents.

Ainsi, on remarque que les systèmes donnant les meilleures mesures sont ceux qui nécessitent des marqueurs non discrets et un appareillage adéquat. Concernant le critère de sensibilité aux perturbations, les systèmes les plus robustes sont ceux utilisant des marqueurs non discrets.

Le critère de facilité d'usage peut-être rattaché à la notion de durée de mise en place du système ainsi que le niveau d'expertise requis pour sa mise en œuvre. Ainsi la caméra temps de vol donne une image en 3 dimensions sans aucun calibrage comparée au système vision infrarouge. Ce dernier, par son principe de stéréoscopie, nécessite une mise en position délicate et des procédures de calibration dont seul l'utilisateur expert peut en juger le succès.

En conclusion, cette figure 1.33 met en évidence les qualités globales des systèmes lasers. Dans le cas de ce comparatif, le système laser mis à l'épreuve est un dispositif dédié aux applications de métrologie ce qui explique le mauvais positionnement en terme de coût.

La figure 1.34 propose à son tour un comparatif des technologies de balayage et de poursuite à base de lasers. Le système dédié à la métrologie est de nouveau présent sous l'appellation "scanner à miroir orienté". Ce système est donc précis, grand champs, robuste mais onéreux et optimisé pour le suivi d'une seule cible à moyenne dynamique. Cependant, ce système est également capable de poursuivre plusieurs cibles mais au détriment de la dynamique. La figure 1.34 positionne les nouvelles technologies de MOEMS⁴ face aux systèmes déjà plus anciens comme le scanner galvanométrique et le principe des prismes de Risley. Ces technologies MOEMS méritent un regard

4. Micro Opto Electro Mechanical System

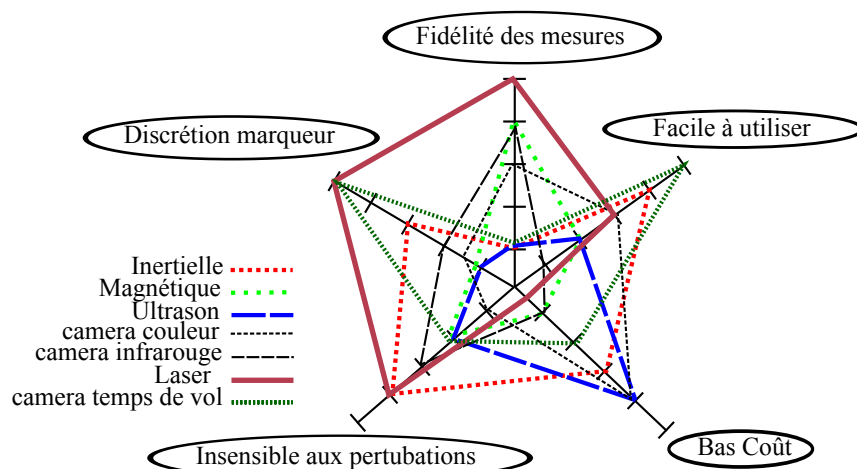


FIGURE 1.33 – Figure de performances des technologies de capture

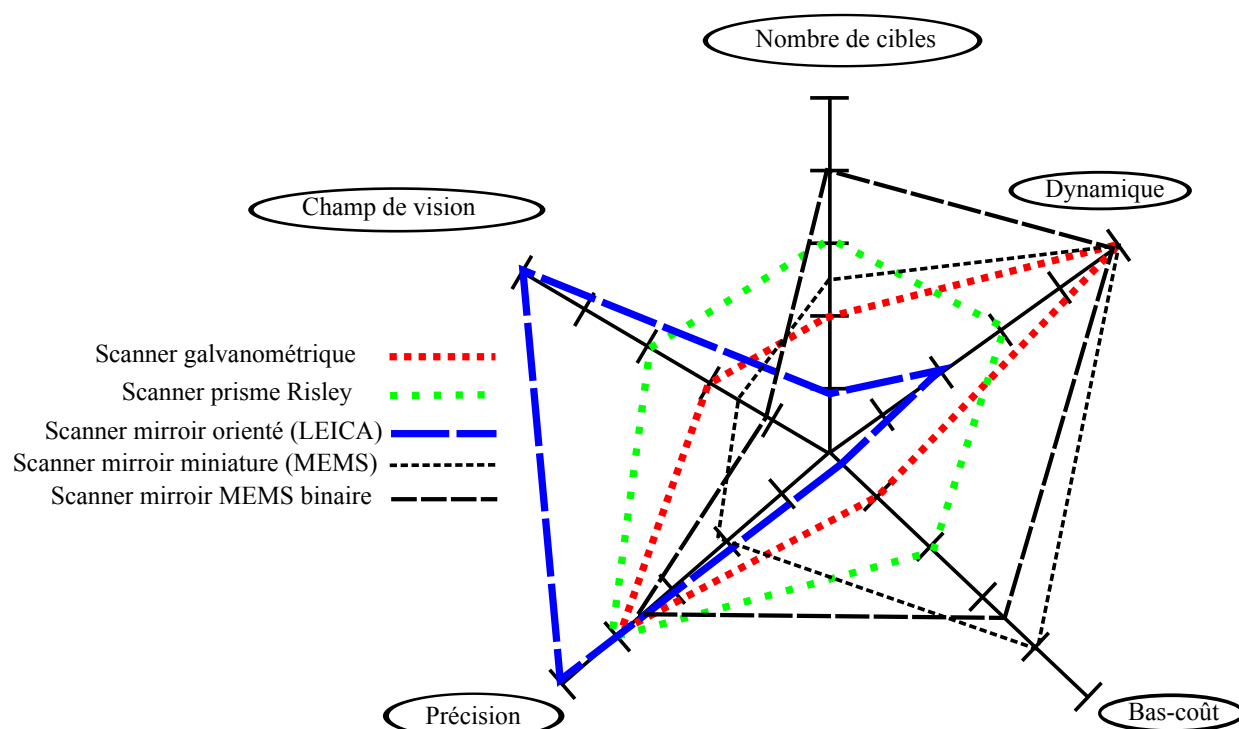


FIGURE 1.34 – Figure de performance des technologies de poursuite laser

particulièrement attentif étant donné leur potentiel en terme de rapport coût/performance mais qui nécessite encore des améliorations et notamment concernant le paramètre "plage de mesure".

Finalement, la force de la technologie laser réside en sa possibilité d'atteindre un grand champ de vision avec une forte immunité contre les perturbations. L'autre point fort est sa possibilité d'acquérir des distances de manière très ciblée, ce qui contribue à la simplicité de mise en œuvre de cette technologie et de ces cibles. D'un autre côté, l'usage d'un rayon laser ponctuel nécessite l'implémentation de technologies mécaniques de balayage qui ne sont pas toujours coopératives lorsqu'il s'agit d'assurer des mouvements à grandes dynamiques. Les avancées en matière de micro-fabrication, dont les MEMS font parties, nous amènent à nous poser la question de la pertinence de combiner ces innovations avec les propriétés de la lumière laser afin de relever le challenge d'un système de mesure facile à utiliser, performant et à bas-coût. Afin d'acquérir des éléments de compréhension nécessaires à l'étude de cette pertinence, le chapitre 2 propose un état de l'art concernant la photodétection et traite notamment des techniques de mesure de distance par télémétrie laser. Ce dernier point constitue l'un des points forts justifiant le choix d'étudier les techniques de mesures de trajectoire par la physique du laser.

Chapitre 2

Etat de l'art de la photodétection

Sommaire

2.1	Les contraintes de la Photodétection	30
2.1.1	Grandeurs usuelles	30
2.1.1.1	Photodétection	30
2.1.1.2	Rapport signal sur bruit	32
2.1.2	Milieu de propagation	34
2.1.2.1	La capacité d'absorption	34
2.1.2.2	Sources lumineuses environnementales	36
2.1.2.3	Sécurité Laser	38
2.1.3	Influence de la nature des cibles sur la détection	40
2.1.3.1	Cible diffusante	40
2.1.3.2	Cible spéculaire	42
2.1.3.3	Cible rétro-réflexive	43
2.1.4	Photo-détecteurs	44
2.1.4.1	Photodiode PN	44
2.1.4.2	Photodiode PIN	45
2.1.4.3	Photodiode avalanche	46
2.1.4.4	Photomultiplicateur	47
2.1.4.5	Photo-détecteurs dérivés : SIPM et MCP	48
2.1.5	Figures des performances	48
2.2	Etat de l'art des méthodes de télémétrie laser	49
2.2.1	Triangulation	49
2.2.2	Interférométrie	50
2.2.3	Différence de phases	50
2.2.4	Temps de vol	52
2.2.5	Différence de fréquences	53
2.2.6	Figure des performances et conclusion	54

2.1 Les contraintes de la Photodétection

2.1.1 Grandeurs usuelles

2.1.1.1 Photodétection

La photodétection fait référence à la discipline dédiée à la mesure des photons. Usuellement le terme de photon est employé pour désigner la grandeur physique permettant de quantifier la lumière en terme énergétique. Ainsi un photon représente une quantité d'énergie de l'ordre de 2 eV. Pour mieux cerner les enjeux, il convient d'introduire des notions fondamentales de photodétection à notre échelle d'utilisateur des techniques de mesures des photons. La mesure de lumière est rendue possible à l'aide d'un transducteur électronique qui convertit une énergie ou une puissance optique absorbée en une grandeur électrique. La grandeur principale qui caractérise les propriétés de photo-détection est la photosensibilité donnée par la relation 2.1.

$$R_{\text{idéale}}(\lambda) = \frac{I_0}{P_r} = \frac{q \cdot \lambda}{h \cdot c} \quad \text{A/W} \quad (2.1)$$

ou encore dans sa version simplifiée par la relation 2.2

$$R_{\text{idéale}}(\lambda) = 0.807 \lambda_{\mu\text{m}} \quad \text{mA/mW} \quad (2.2)$$

avec :

- I_0 le photo-courant en A,
- P_r la puissance optique en W,
- $q = 1.602 \cdot 10^{-19}$ C la charge d'un électron,
- $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ W · s² la constante de Planck
- $c = 2.998 \cdot 10^8$ m/s la vitesse de propagation de la lumière dans le vide

En pratique, cette photo-sensibilité ne tient pas compte de la notion de rendement quantique définie par la relation 2.3. Cette notion de rendement quantique est couramment fournie par les fabricants de photo-détecteurs qui préfèrent donner directement une courbe intégrant la photosensibilité et le rendement quantique comme le montre la figure 2.1 pour une gamme de capteurs silicium fabriqués par Hamamatsu. La figure 2.2 permet de comparer les courbes d'efficacité quantique pour des capteurs basés sur les matériaux silicium(Si) et Indium Gallium Arsenide (InGaAs).

$$\eta = \frac{r(\lambda)}{R_{\text{idéal}}(\lambda)} \quad (2.3)$$

Ces différentes courbes mettent en évidence que les capteurs à base de silicium seront préférés pour des photodétections dans la gamme de longueurs d'ondes comprises entre 0,4 μm et 1 μm . Pour la plage comprise entre 0,9 μm et 1,7 μm , les capteurs à base de InGaAs sont plus adaptés. De

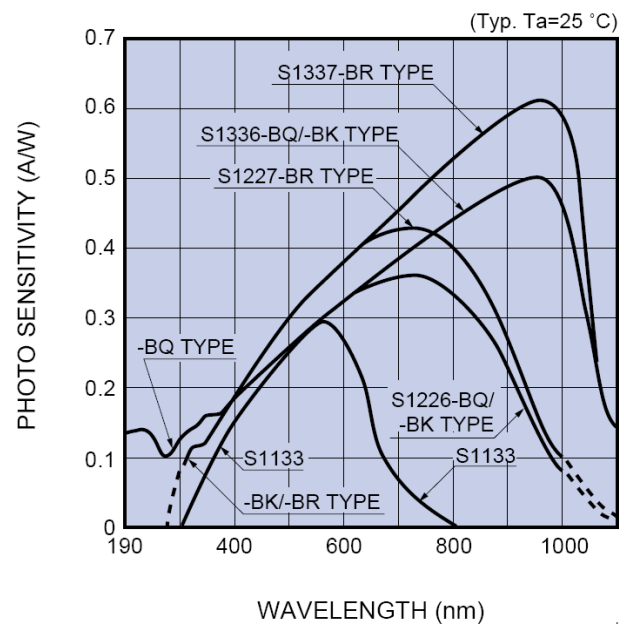


FIGURE 2.1 – Réponse spectrale de photo-détecteur silicium Hamamatsu [Pho09]

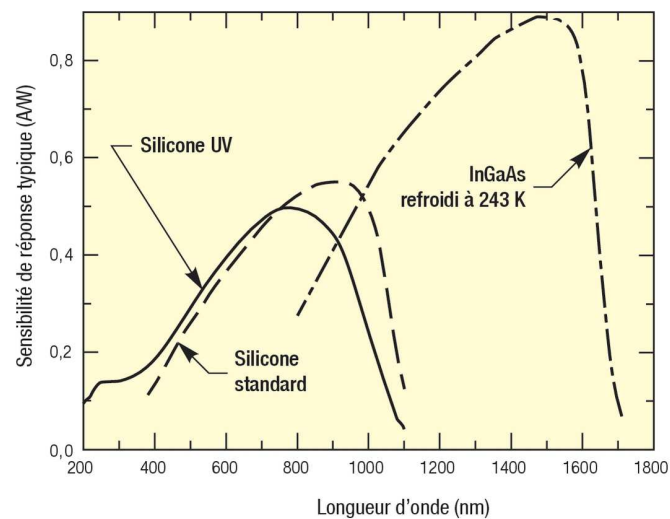


FIGURE 2.2 – Efficacité quantique des matériaux utilisés pour les photo-détecteurs [Cor06]

manière plus pragmatique, le silicium répond bien avec le domaine du visible et proche infrarouge et le InGaAs est mieux adapté pour le domaine de l'infrarouge. La figure 2.3 permet de rappeler le positionnement de ces plages de longueurs d'onde dans le spectre des ondes électromagnétiques.

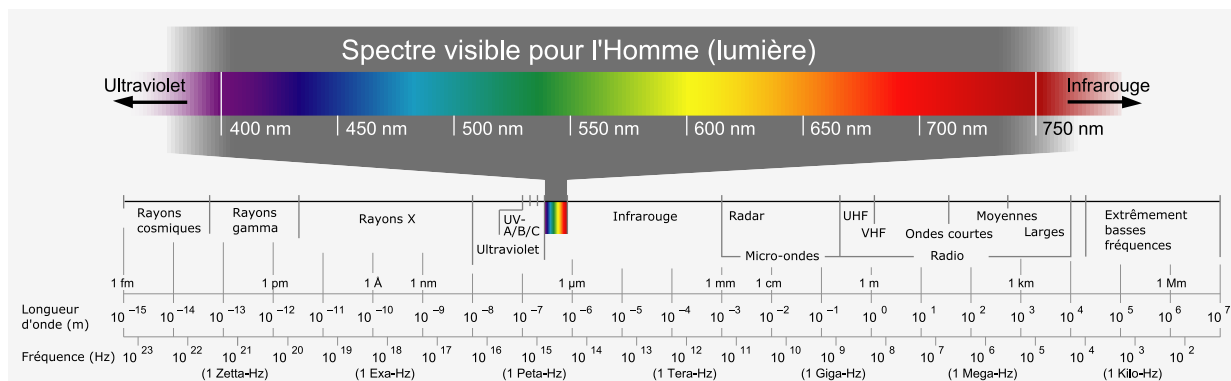


FIGURE 2.3 – Spectre électromagnétique [Sha07]

2.1.1.2 Rapport signal sur bruit

Une fois le signal électrique généré par un photo-détecteur dont les caractéristiques sont connues, l'étape suivante est d'identifier et d'extraire l'information recherchée. Le signal fourni par le détecteur est composé des signaux utiles et de bruits. La figure 2.4 explicite les signaux utiles superposés avec le bruit aléatoire mais également la composante continue considérée comme un bruit dans le cadre de cet exemple.

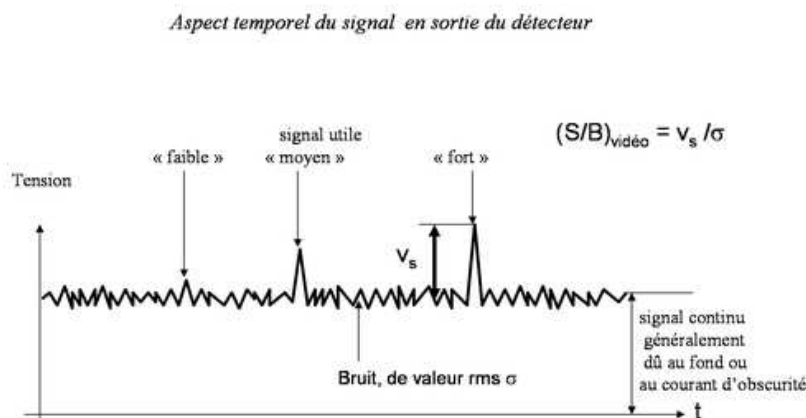


FIGURE 2.4 – Notion de rapport signal à bruit [JL07]

La grandeur qualifiant la performance de robustesse du détecteur est appelée rapport signal sur bruit. Le critère de choix de ce rapport repose sur la notion de probabilité de détection du signal et la probabilité de fausse détection. Ainsi la figure 2.5 propose un abaque dans le cas d'une détection dite directe (non hétérodyne).

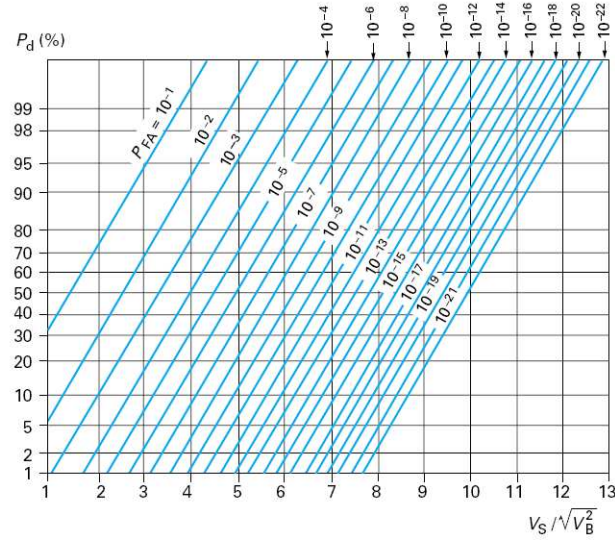


FIGURE 2.5 – Variation de P_d en fonction du rapport $\frac{S}{B}$ (détection directe) pour différentes valeurs de P_{FA} [JL98]

Les sources de bruit proviennent de différentes origines physiques, elles sont détaillées dans le tableau 2.1.1.2 et récapitulées par l'équation 2.6. A l'exception du bruit en $\frac{1}{F}$, les origines physiques sont principalement ramenées aux deux phénomènes rencontrés systématiquement en électronique. La première source de bruit qui incombe à tous les composants électroniques traversés par un courant est le "Shot noise" ou le bruit de grenaille. Ce bruit est lié à la circulation des électrons et sa densité de puissance spectrale est donnée par l'équation 2.4.

$$i_n^2 = 2 \cdot q \cdot I_p \cdot B \quad (2.4)$$

avec :

- q la charge d'un électron $1.602 \cdot 10^{-19} \text{C}$
- I_p La valeur du photo-courant
- B La bande passante

La seconde source de bruit présente dans les composants électroniques est d'origine thermique et appelée "Johnson noise". Il est présent dans les résistances et dépend de la valeur de la température ainsi que sa résistivité comme décrit par l'équation 2.5. Cette valeur est déterminante dans les montages en photodétection car le photo-courant est quasi systématiquement conditionné par un montage trans-impédance permettant de convertir le photo-courant en tension par l'usage d'une résistance.

$$i_{nt}^2 = \frac{4 \cdot k \cdot T \cdot B}{R} \quad (2.5)$$

avec :

- k la constante de Boltzmann $1.381 \cdot 10^{-23} J/K$
- T Température absolue en Kelvin
- B La bande passante
- R La résistance en Ω .

Source de bruit	Paramètre	Variance S_i^2
Fond (en IR)	Courant de fond i_F	$2 \cdot q \cdot i_F \cdot \Delta f$
Signal	Courant de signal i_S	$2 \cdot q \cdot i_S \cdot \Delta f$
Obscurité	Courant d'obscurité i_o	$2 \cdot q \cdot i_o \cdot \Delta f$
En $\frac{1}{f}$	Défauts surface connexions	A définir au cas par cas
Thermique	Température de R_C	$\frac{4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f}{R_c}$
Amplificateur	Facteur de bruit F	$\frac{4 \cdot k \cdot (F-1) \cdot T \cdot \Delta f}{R_c}$

TABLE 2.1 – Les différentes sources de bruit d'après [JL98]

$$\sigma_i^2 = 2 \cdot q \cdot (i_F + i_S + i_o) \cdot \Delta f + \frac{4 \cdot k \cdot T \cdot F}{R_C} \cdot \Delta f \quad (2.6)$$

La prise en compte du rapport signal sur bruit est un indicateur primordial, plus important que le signal utile lui-même. En effet, pour augmenter la robustesse d'une détection, il est possible soit de travailler sur l'amélioration du signal utile, ou bien sur l'atténuation des bruits. Les sources de bruit sont de différentes natures et souvent proportionnelles à la bande passante, en conséquence, une sur-spécification en bande passante du conditionneur électronique engendre du bruit supplémentaire.

2.1.2 Milieu de propagation

Comme dans tous les cas de figures où la propagation d'une onde électromagnétique est exploitée, il est nécessaire de posséder des informations sur le milieu de propagation. Les trois sous-sections suivantes détaillent les trois critères environnementaux à prendre en compte dans la spécification d'une machine à détection de lumière.

2.1.2.1 La capacité d'absorption

La loi de Beer-Lambert, rappelée avec l'équation 2.7, est la plus couramment utilisée pour décrire le comportement de la propagation d'une onde pour un milieu donné.

$$I(\lambda, X) = I_0(\lambda) \cdot e^{-\alpha X r} \quad (2.7)$$

avec :

- I_0 intensité lumineuse de la lumière incidente,
- I intensité de la lumière sortante.

- α coefficient d'absorption en $\text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$ ou en $\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$,
- X la longueur du trajet optique (en m ou en cm),
- r la concentration de l'entité absorbante, atomes ou molécules, dans le milieu (en $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$).

La valeur du coefficient d'absorption α varie entre différents matériaux et avec la longueur d'onde pour un matériau particulier. Elle est définie par la relation 2.8.

$$\alpha = \frac{2\omega k}{c} = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (2.8)$$

avec :

- ω la pulsation angulaire du rayonnement électromagnétique
- k le coefficient d'extinction linéique qui exprime l'atténuation de l'énergie du rayonnement électromagnétique à travers le milieu.
- c la vitesse de propagation de la lumière dans le vide

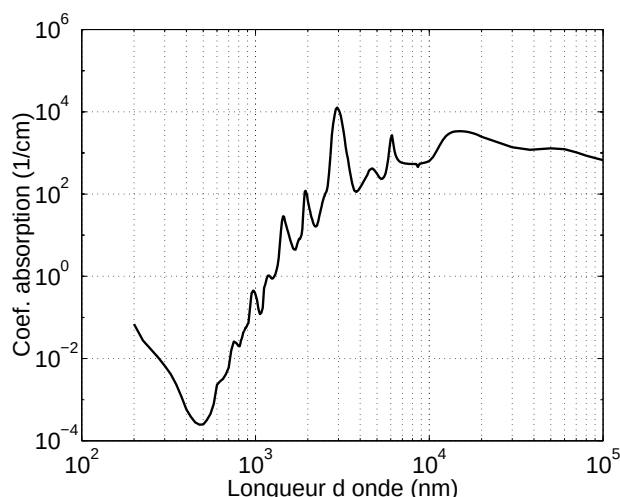


FIGURE 2.6 – Coefficient d'absorption dans l'eau en fonction de la longueur d'onde [HQ73]

Pour le cas de la propagation dans l'eau, la figure 2.6 illustre les différents coefficients d'absorption en fonction de la longueur d'onde. A titre d'exemple, en prenant pour référence le bleu à 475 nm de longueur d'onde, le rouge à 650 nm est 13 fois plus absorbé, le proche infrarouge à 900 nm l'est 275 fois et l'infrarouge dit à sécurité oculaire à 1550 nm est 40000 fois plus absorbé par l'eau. Pour le cas de la propagation dans l'air, La figure 2.7 montre que certaines longueurs d'onde sont absorbées (ex : 1400 nm) alors que d'autres montrent de bons taux de transmission (ex : 4000 nm) en fonction de la nature et de la densité des molécules présentes.

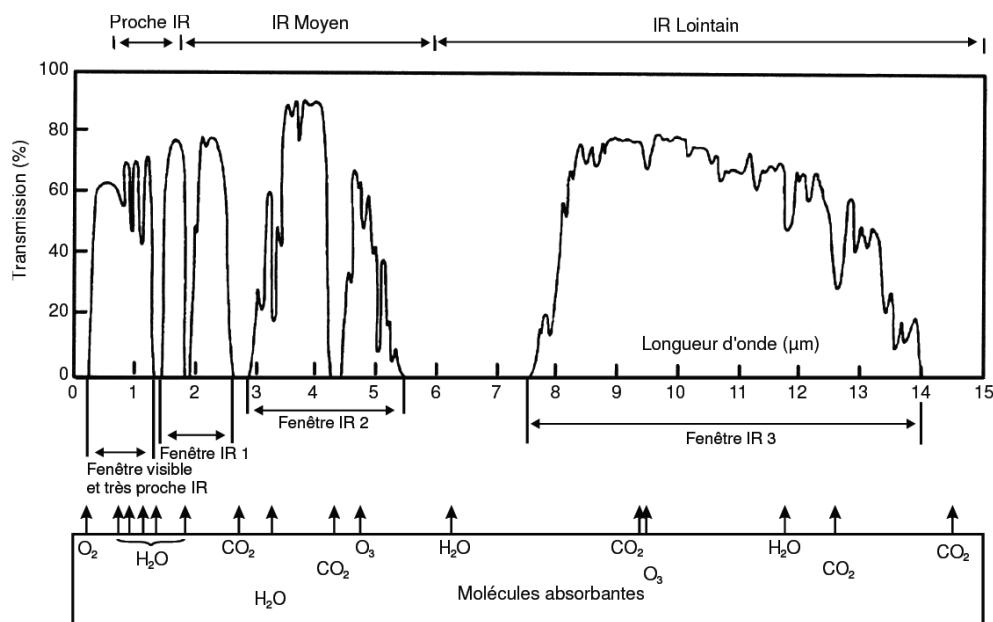


FIGURE 2.7 – Transmission à travers l'atmosphère terrestre en fonction de la longueur d'onde pour un trajet horizontal de 1800 m [Hud69]

2.1.2.2 Sources lumineuses environnementales

L'environnement ambiant engendre et propage des sources de rayonnement de différentes intensités, bandes spectrales et bandes fréquentielles. Les origines de ces rayonnements peuvent être naturelles ou artificielles. Les rayonnements naturels sont générés par le soleil dont le rayonnement sur terre est perçu dans la gamme de longueurs d'onde commençant entre 200 nm et 300 nm jusqu'à l'infrarouge lointain avec un pic d'intensité aux alentours de 450 nm. La grandeur utilisée est l'éclairement exprimé en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$. La figure 2.8 donne la répartition spectrale de l'éclairement solaire à la limite de l'atmosphère pour les applications extraterrestres et l'éclairement au niveau de la mer. Cette superposition des deux courbes montre l'influence de l'atmosphère par rapport à la longueur d'onde.

La seconde source de radiation lumineuse est d'origine artificielle. La figure 2.9 donne un exemple d'occupation spectrale d'une source de lumière fonctionnant par incandescence, fluorescence et halogène. Enfin une dernière source artificielle qu'il peut être nécessaire de prendre en compte est la lumière infrarouge générée par les appareils sans fils (télécommande infrarouge etc...).

Dans le cas des lumières artificielles, l'intensité lumineuse spectrale est déterminante, mais également la fréquence de ces signaux qui ondulent la plupart du temps. En effet, la réponse temporelle d'un photo-détecteur placé sous une lampe, fait apparaître une ondulation de fréquence égale à 100 Hz. Cette fréquence correspond à deux fois 50 Hz qui est la fréquence d'alimentation des appareils électriques du secteur en Europe. Dans les pays dont le secteur est cadencé à 60 Hz, l'ondulation lumineuse sera alors de 120 Hz.

La prise en compte des conditions lumineuses environnementales naturelles et artificielles doit

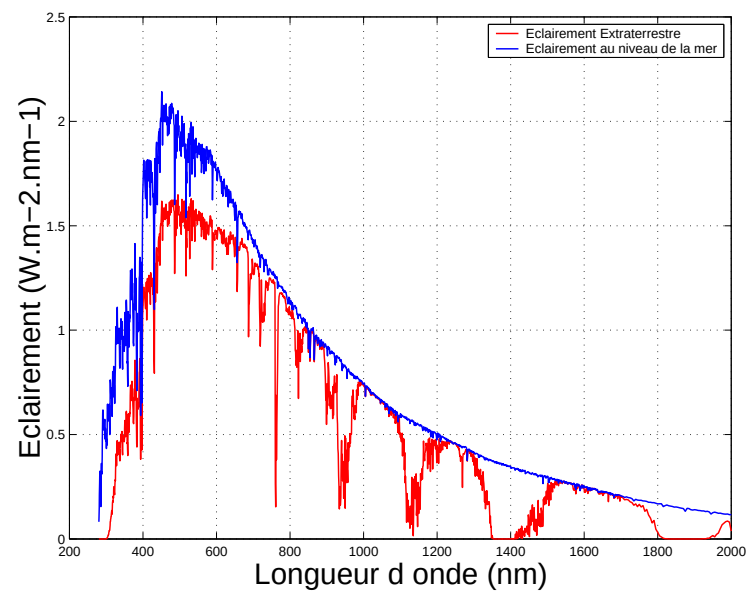


FIGURE 2.8 – spectre solaire [AST09]

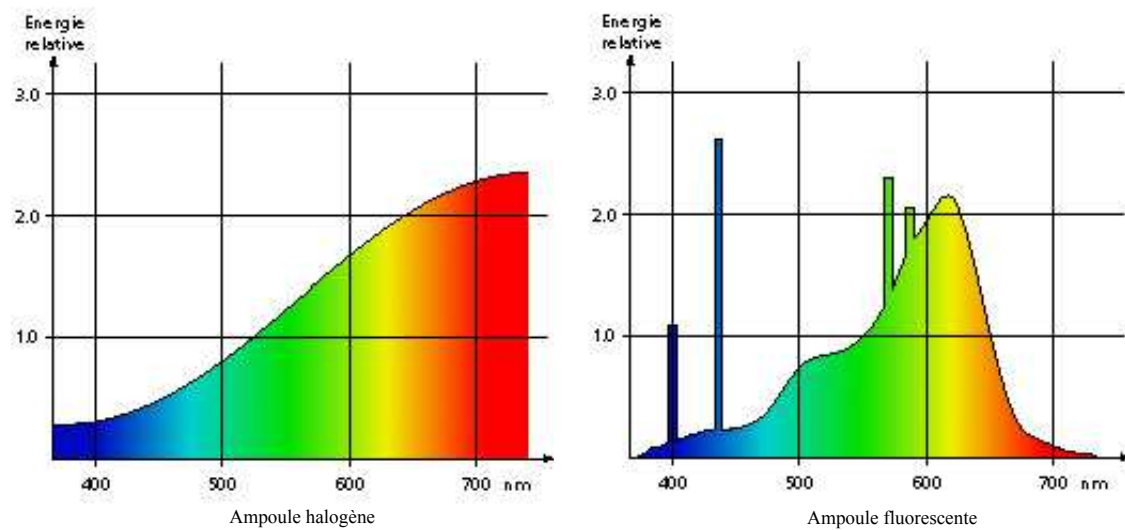


FIGURE 2.9 – Spectre lumière artificielle [dG10]

motiver le choix d'une longueur d'onde ainsi que de sa modulation.

2.1.2.3 Sécurité Laser

Dans ce paragraphe, il est proposé d'évoquer la question de la sécurité lors de l'utilisation d'une source de lumière très intense de type laser dans les cas où une présence humaine est incontournable.

La lumière laser présente un danger en cas de forte densité de puissance par unité de surface. Les propriétés de cohérence et de mono-chromaticité du laser font que le faisceau peut être collimaté pour maintenir sa densité quelle que soit la distance et donc rester dangereux. La norme qui régit les préconisations et les prescriptions pour les machines à laser est référencée IEC60825. Cette norme fait apparaître une classification permettant d'identifier les risques associés (Tableau 2.1.2.3).

Classe 1	Lasers qui sont sans danger dans toutes les conditions d'utilisations raisonnablement prévisibles ($180 \text{ nm} \leq \lambda \leq 10^6 \text{ nm}$, $T_{\text{base}} = 100 \text{ s}$ ou 30000 s).
Classe 1M	Lasers dont la vision directe dans le faisceau, notamment à l'aide d'instruments d'optiques peut être dangereuse ($302,5 \text{ nm} \leq \lambda \leq 4000 \text{ nm}$, $T_{\text{base}}=100 \text{ s}$ ou 30000 s)
Classe 2	Lasers qui émettent un rayonnement visible dans la gamme de longueurs d'onde de 400 nm à 700 nm . La protection de l'œil est normalement assurée par les réflexes de défense comprenant le réflexe palpébral ($400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 700 \text{ nm}$, $T_{\text{base}} = 0,25 \text{ s}$)
Classe 2M	Lasers qui émettent un rayonnement visible dans la gamme de longueurs d'onde de 400 nm à 700 nm dont la vision directe dans le faisceau, notamment à l'aide d'instruments d'optiques peut être dangereuse ($400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 700 \text{ nm}$, $T_{\text{base}}=0,25 \text{ s}$)
Classe 3R	Lasers dont l'exposition directe dépasse l'E.M.P pour l'oeil, mais dont le niveau d'émission est limité à 5 fois la L.E.A des classes 1 et 2 ($400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 700 \text{ nm}$, $T_{\text{base}} = 0,25 \text{ s}$ et $302,5 \text{ nm} \leq \lambda \leq 400 \text{ nm}$ et $700 \text{ nm} \leq \lambda \leq 10^6 \text{ nm}$, $T_{\text{base}} = 100 \text{ s}$)
Classe 4	Lasers qui sont aussi capables de produire des réflexions diffuses dangereuses. Ils peuvent causer des dommages sur la peau et peuvent aussi constituer un danger d'incendie. Leur utilisation requiert des précautions extrêmes.

TABLE 2.2 – Description de la classification des lasers [C.V]

Cette classification est établie en fonction de la puissance lumineuse, de la longueur d'onde utilisée, de la densité de lumière par unité de surface et enfin, de la durée d'exposition. Le tableau appelé Exposition Maximale Permise 2.1.2.3 permet d'évaluer et de vérifier si un système répond bien aux exigences de la norme.

Longueur d'onde (μm)	Durée d'exposition (s)	MPE Pulsée ($J \cdot cm^{-2}$)	MPE Continue $v(\cdot cm^{-2})$
0,180 à 0,302 *	10^{-9} à 3×10^4	3×10^{-3}	$3 \times 10^{-3} \times T_{max}^{-1}$
0,302 à 0,315 *+	10^{-9} à 3×10^4	$0,63 \times (\lambda/0,314)^{142}$	$0,63 \times (\lambda/0,314)^{142} \times T_{max}^{-1}$
0,315 à 0,400	10^{-9} à 10	$0,56 \times t^{0,25}$	$0,56 \times T_{max}^{-0,75}$
0,4000 à 1,050	10^{-13} à 10^{-11} 10^{-11} à 10^{-9} 10^{-9} à 19×10^{-6} 18×10^{-6} à 10 0,25 10	$1,5 \times C_A \times 10^{-8}$ $2,7 \times C_A \times t^{0,75}$ $0,5 \times C_A \times 10^{-6}$ $1,8 \times C_A \times t^{0,75} \times 10^{-3}$ $0,64 \times C_A \times 10^{-3}$ $10 \times C_A \times 10^{-3}$	$1,8 \times C_A \times T_{max}^{-0,25} \times 10^{-3}$ $2,6 \times C_A \times 10^{-3}$ $1,0 \times C_A \times 10^{-3}$
1,050 à 1,400	10^{-13} à 10^{-11} 10^{-11} à 10^{-9} 10^{-9} à 50×10^{-6} 50×10^{-9} à 10 10	$1,5 \times C_c \times 10^{-7}$ $27 \times C_c \times t^{0,75}$ $5,0 \times C_c \times 10^{-6}$ $9 \times C_c \times t^{0,75} \times 10^{-3}$ $50 \times C_c \times 10^{-3}$	$9 \times C_c \times T_{max}^{-0,25} \times 10^{-3}$ $5 \times C_c \times 10^{-3}$
1,400 à 1,500	10^{-9} à 10^{-3} 10^{-3} à 10 10	0,1 $0,56 \times t^{0,25}$ 1,0	$1/(10 \times T_{max})$ $0,56 \times T_{max}^{-0,75}$ 0,1
1,500 à 1,800	10^{-9} à 10	1,0	$1/T_{max}$
1,800 à 2,600	10 10^{-9} à 10^{-3} 10^{-3} à 10 10	1,0 0,1 $0,56 \times t^{0,25}$ 1,0	0,1 $1/(10 \times T_{max})$ $0,56 \times T_{max}^{-0,75}$ 0,1
2,600 à 10^3	10^{-9} à 10^{-7} 10^{-7} à 10 10	10×10^{-3} $0,56 \times t^{0,25}$ 1,0	$0,56 \times T_{max}^{-0,75}$ 0,1

$C_A = 1,0$ pour $\lambda = 0,4$ à $0,7 \mu m$ $C_A = 10^{2(\lambda-0,7)}$ pour $\lambda = 0,7$ à $1,05 \mu m$ $C_A = 5,0$ pour $\lambda = 1,05$ à $1,4 \mu m$
 $C_C = 1,0$ pour $\lambda = 1,05$ à $1,15 \mu m$ $C_C = 10^{18(\lambda-1,15)}$ pour $\lambda = 1,15$ à $1,2 \mu m$ $C_C = 8,0$ pour $\lambda = 1,2$ à $1,4 \mu m$

TABLE 2.3 – Table des Expositions Maximales Permisses

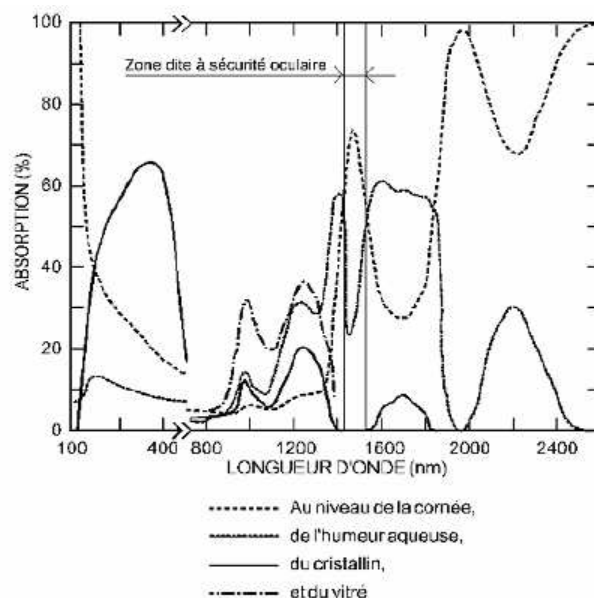


FIGURE 2.10 – Courbe d'absorption en fonction de la longueur d'onde [C.V]

Un système laser peut être sûr si les caractéristiques de la lumière qu'il émet sont bien identifiées. On peut aussi se protéger d'éventuels risques d'expositions à des lasers dont la classe est supérieure à 2 grâce à des lunettes filtrantes. Il est également envisageable de dimensionner son système afin qu'il utilise une longueur d'onde à faible influence dite "à sécurité oculaire" comme le montre la figure 2.10. Sur cette figure, la bande de longueur d'onde de 1450 nm à 1550 nm est identifiée comme une zone dite à sécurité oculaire. Néanmoins, à forte puissance, ces longueurs d'ondes restent dangereuses et il convient de toujours se rapporter à la table des Expositions Maximales Permisses (tableau 2.1.2.3) où l'on peut aussi constater que l'EMP est 100 fois plus grande dans la plage 1400 nm à 1500 nm que pour un laser rouge émettant à 650 nm dans le cas d'une exposition continue d'une durée de 10 s.

2.1.3 Influence de la nature des cibles sur la détection

Sans détailler les différents aspects de l'étude des interactions entre les lasers et la matière, la vocation de cette section est de donner quelques lois génériques permettant d'apprécier les différents phénomènes de réflexion d'une source laser sur un obstacle. Les différents types d'interactions sont regroupés ci-après en trois familles.

2.1.3.1 Cible diffusante

L'interaction la plus fréquemment rencontrée est la diffusion de la lumière. Il s'agit d'une dispersion de la lumière dans toutes les directions. La loi qui décrit le plus souvent ce phénomène est la loi du cosinus de Lambert. Cette dernière considère que l'intensité décroît en cosinus en fonction

de l'angle par rapport à l'axe normal au plan de la source lumineuse. La figure 2.11 illustre la répartition de l'intensité qui est proportionnelle à la valeur du cosinus de l'angle.

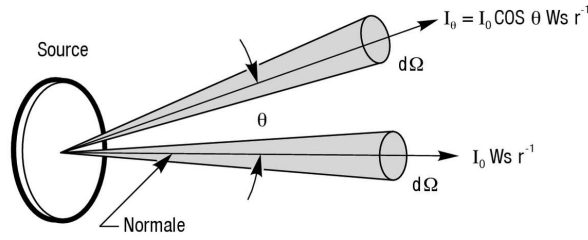


FIGURE 2.11 – Loi du cosinus de Lambert [Cor09]

Dans [SPI04] l'équation 2.9 propose un modèle approximé décrivant la relation entre l'intensité d'un émetteur laser en collision sur une cible diffuse et l'intensité mesurable par le photo-détecteur (figure 2.12).

$$I_0(Z) = \frac{R \cdot I_L \cdot S \cdot \cos(\beta)}{a^2 + Z^2} + I_B \quad (2.9)$$

avec :

- I_L intensité de l'émetteur laser collimaté,
- R réflectance de la cible,
- S surface du photo-détecteur,
- a demi-distance de l'émetteur,
- β angle du capteur,
- Z distance à la cible,
- i_B intensité apportée par la lumière ambiante,

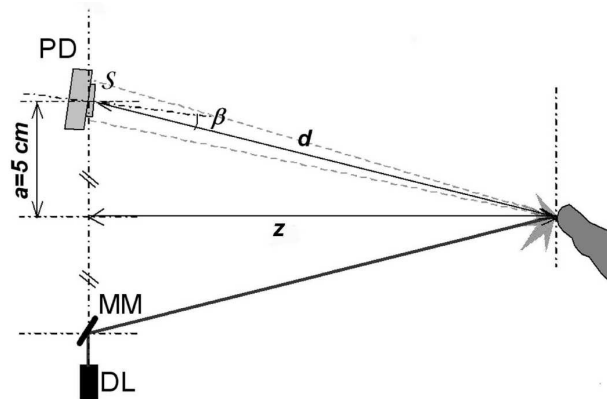


FIGURE 2.12 – Paramètre géométrique dans le modèle [SPI04]

Dans le contexte de la détection de la peau humaine, comme l'illustre la figure 2.13, le choix de la longueur d'onde joue encore un rôle prépondérant pour le rendement de l'interaction avec une source de lumière. Par exemple, dans le cas de la longueur d'onde de 550 nm, la peau pigmentée réfléchit presque 30 % de moins que la peau claire.

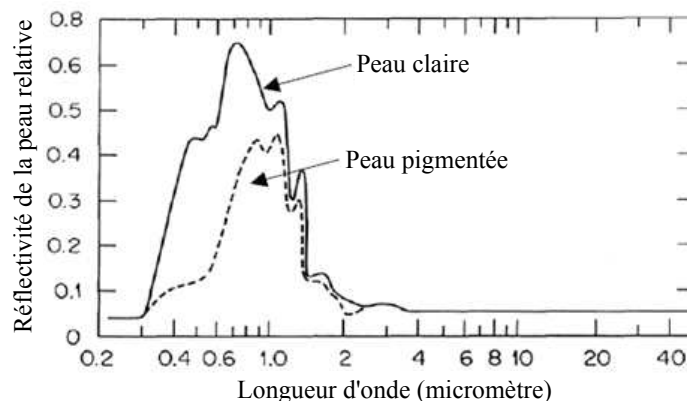


FIGURE 2.13 – Réflectance de la peau en fonction de la longueur d'onde [C.V]

En pratique, la cible diffuse est le type de cible que l'on rencontre le plus fréquemment à l'état naturel. L'intensité de la lumière réfléchie, décroît avec le carré de la distance, et avec le cosinus de l'angle décrit par la normale de la surface Lambertienne.

2.1.3.2 Cible spéculaire

Les cibles spéculaires renvoient la source de lumière incidente sans engendrer de dispersion du signal. Ainsi, un miroir est considéré comme une cible spéculaire. La loi régissant ce comportement est principalement décrite par Snell-Descartes indiquant que $\theta_1 = \theta_2$ comme illustrée par la figure 2.14.

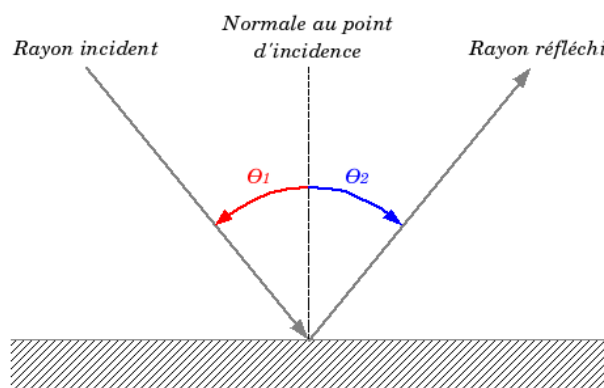


FIGURE 2.14 – Réflexion spéculaire

En terme de rendement de transmission, en fonction de la longueur utilisée, il est important de prendre en compte les propriétés des matériaux comme l'illustre la figure 2.15.

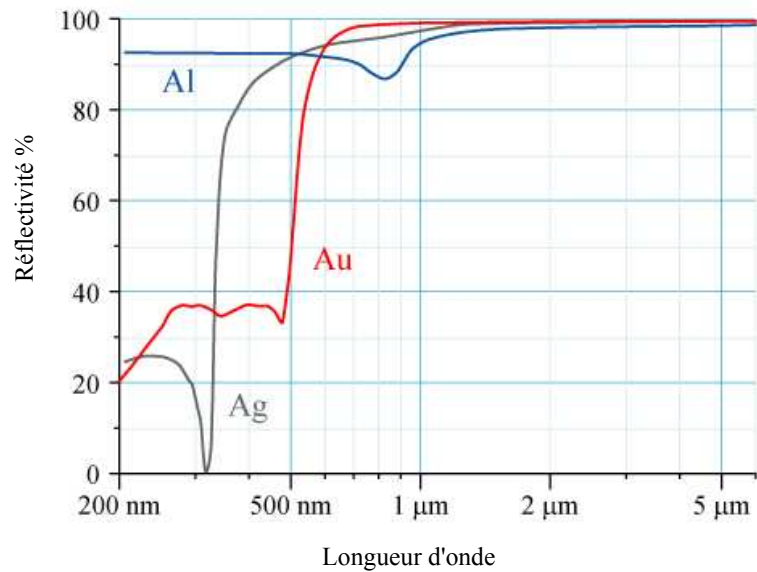


FIGURE 2.15 – Courbe de réflectance pour des miroirs en aluminium (Al), argent (Ag), et or à incidence normale [M.B94]

2.1.3.3 Cible rétro-réfléctive

Les cibles rétro-réfléctives possèdent la propriété de réfléchir les rayons lumineux incidents dans la même direction en sens opposé. Cette propriété permet la récupération de la lumière émise quelle que soit l'orientation de la cible. Cette propriété est obtenue principalement à l'aide de deux techniques optiques. La première consiste à disposer 3 miroirs en angle droit de manière à former un "coin de cube".

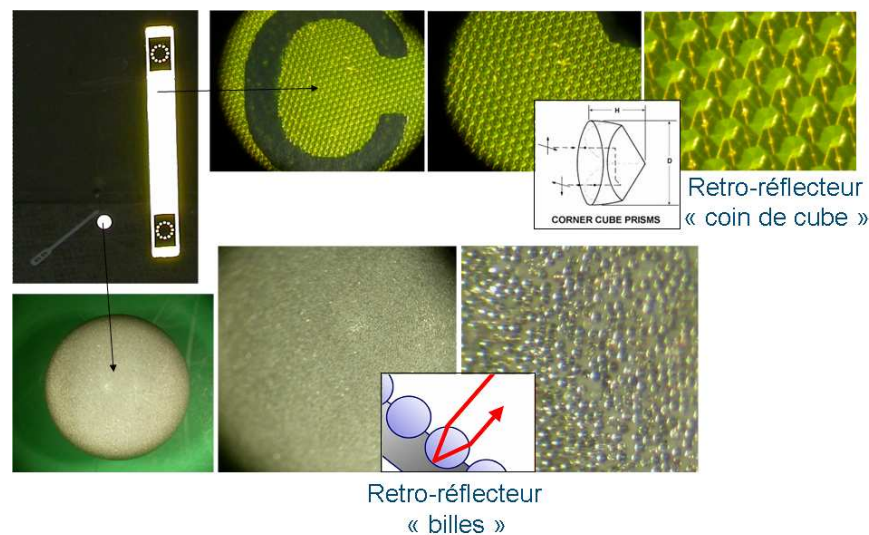


FIGURE 2.16 – Rétro-réflécteurs de type coin de cube et sphérique.

La figure 2.16 présente des photographies à différentes échelles de deux types de rétro-réflécteurs. L'un d'entre eux utilise l'approche "coin de cube" arrangé en matrice sur un bracelet flexible utilisé

pour des applications de balisage. Le second type, est une sphère composée d'un conglomérat de microbilles de verre agissant comme une multitude de rétro-rélecteurs mais avec cette fois l'apparition d'un comportement dispersif. Cette technique de rétro-réflexion à base de microbilles est aussi couramment utilisée sous forme de bandes de tissus intégrées aux maillots de sécurité pour la prévention routière ou sur les chantiers.

Les cibles utilisant cette technique de rétro-réflexion sont couramment appelées "cibles coopératives", en raison de la faculté à renvoyer une très grande quantité de lumière, de manière orientée à destination de la source d'émission favorisant ainsi l'implémentation et la robustesse des dispositifs de détection et particulièrement dans le cas de détections à grandes distances.

2.1.4 Photo-détecteurs

Les photodiodes sont des semi-conducteurs dont la jonction P-N génère un courant ou une tension en présence de lumière. La section ci-après présente les caractéristiques génériques des photodiodes PN, PIN et APD ou détecteur avalanche.

2.1.4.1 Photodiode PN

Une photodiode est constituée de deux électrodes formant une jonction PN (figure 2.17) qui se comporte comme un convertisseur photo-électrique. Lorsque la lumière atteint la photodiode avec une énergie suffisante, les électrons présents dans la structure cristalline sont stimulés et franchissent la bande de conduction laissant des "trous" dans la bande de valence (figure 2.18). C'est de cette façon que des paires "électrons-trous" sont générées et créent une charge positive dans la couche P et une charge négative dans la couche N. En connectant une charge aux bornes de cette jonction, un courant électrique peut ainsi être observé.

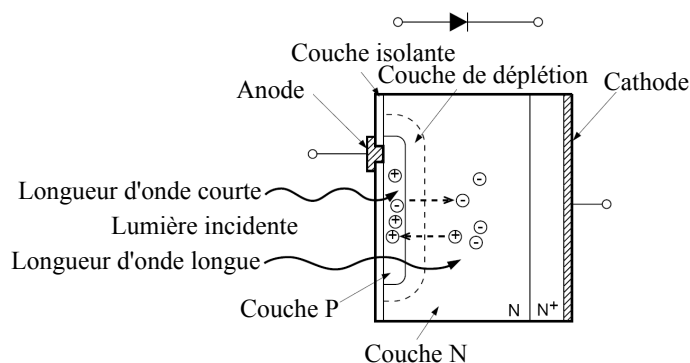


FIGURE 2.17 – Section d'une photodiode [pKSSD04]

La figure 2.19 représente le schéma électrique équivalent d'une photodiode. Cette équivalence est d'une importance capitale pour bien interpréter les paramètres qui vont entrer en compte dans le choix d'un compromis dans les critères de performances. Par exemple, la capacité parasite C_j

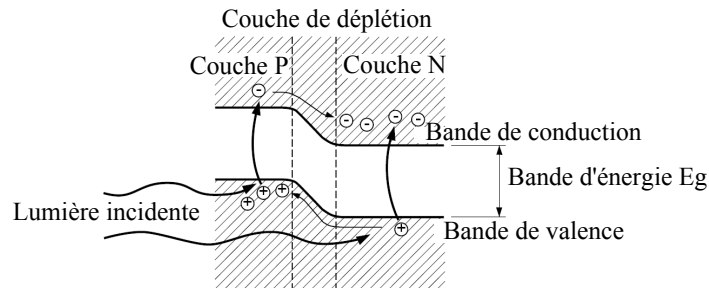


FIGURE 2.18 – Jonction P-N d'une photodiode [pKSSD04]

est proportionnelle à la surface sensible du détecteur et va donc influencer sur le filtre passe-bas constitué par le produit $C_j \cdot R_L$ dans l'hypothèse où R_{sch} est quasi infini et R_S négligeable.

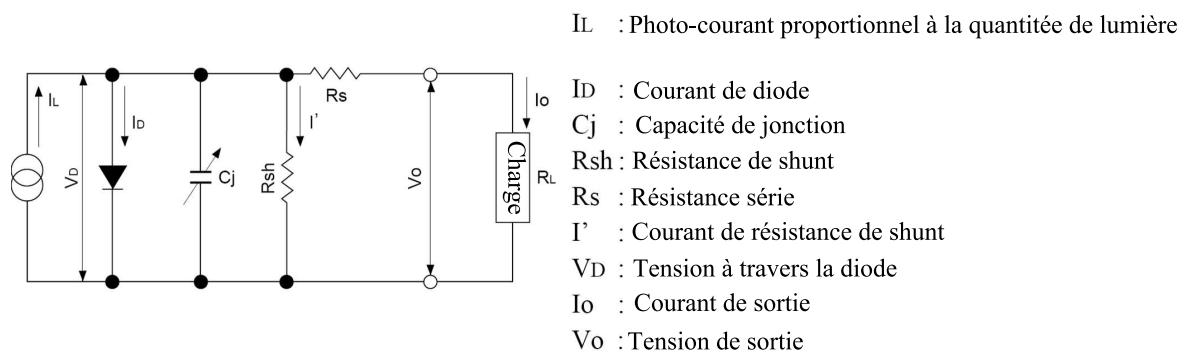


FIGURE 2.19 – Schéma électrique équivalent d'une photodiode [pKSSD04]

Les applications pour ce détecteur sont nombreuses et touchent plus particulièrement le domaine des applications grand public bon marché (ex : télécommande infrarouge, détecteur de niveau lumineux ambiant etc...). C'est de plus un détecteur peu complexe à mettre en œuvre pour des applications ne nécessitant ni une grande sensibilité ni une bande passante importante.

2.1.4.2 Photodiode PIN

La photodiode PIN est basée sur la photodiode PN mais avec une zone non dopée entre les portions dopées P et N. En appliquant une tension de polarisation inverse (figure 2.20), la linéarité est améliorée mais surtout la valeur de la capacité parasite de jonction décroît et permet ainsi d'améliorer la valeur de la bande passante. Ce procédé reste malgré tout délicat car une valeur de polarisation inverse trop importante conduit à la détérioration du photo-détecteur.

La photodiode PIN, reprend globalement les caractéristiques de la photodiode PN mais avec des performances améliorées en terme de bande passante. C'est un capteur couramment utilisé dans les applications de communication en fibres optiques ou de mesure LIDAR¹.

1. LIDAR : Light Detection And Ranging

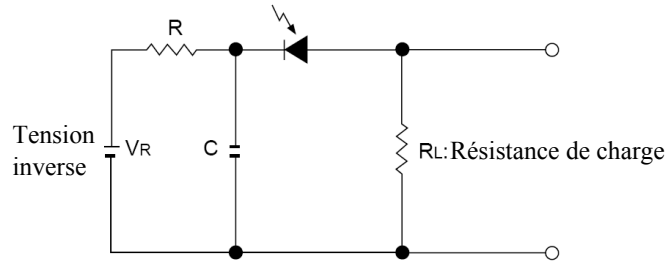


FIGURE 2.20 – Photodiode PIN avec tension de polarisation [pKSSD04]

2.1.4.3 Photodiode avalanche

La photodiode avalanche possède la capacité de générer un gain interne, elle est privilégiée pour la détection de très faibles signaux. Ce mécanisme de gain interne améliore le seuil de détection minimum d'un facteur de 10 à 100. En effet, le facteur limitant le minimum de détection d'un signal, est le bruit apporté par l'étage d'amplification en aval du photo-détecteur. Le principe de fonctionnement repose sur l'application d'une source de haute tension (jusqu'à 200 volts) qui va générer un champ électrique accélérant le phénomène de génération de paires "électrons-trous". Cette accélération va à son tour provoquer une réaction en chaîne permettant de multiplier le photo-courant jusqu'à un rapport de 100 électrons générés en sortie pour un électron généré par la lumière. Comme pour la PIN, l'utilisation de source de tension en polarisation inverse réduit la capacité parasite augmentant ainsi la bande passante.

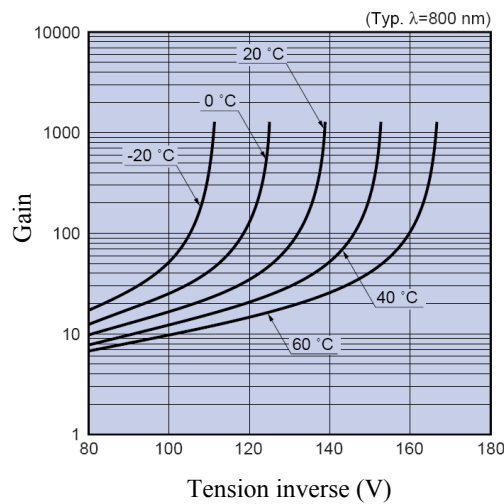


FIGURE 2.21 – Gain interne de l'APD et sensibilité à la température [pKSSD04]

En revanche, la photodiode avalanche se montre plus onéreuse que les détecteurs PN ou PIN et plus complexe à mettre en œuvre, en raison de l'usage de haute tension et de sa sensibilité à la température qui requiert la plupart du temps l'implémentation d'un dispositif de stabilisation thermique. Cette stabilisation est nécessaire afin de conserver un bon compromis entre gain interne constant et sécurité pour ne pas dépasser la valeur dite de "breakdown", qui est néfaste pour la

durée de vie du détecteur. Cette stabilisation est d'autant plus délicate que la relation entre le gain et la tension inverse n'est pas linéaire comme l'illustre la caractéristique de la figure 2.21.

Le choix de ce détecteur doit également faire l'objet d'une étude détaillée concernant les sources de bruits produites par ce détecteur qui montrera de moins bonnes performances que les PN ou PIN pour des niveaux de signaux à détecter élevés [pKSSD04].

Le domaine d'application des photodiodes avalanche touche la communication par fibre optique, la détection de faibles signaux, les lecteurs code-barres, les radars lasers ou encore certains appareils pour le bio-médical.

2.1.4.4 Photomultiplicateur

Tout comme la photodiode avalanche, ce photo-détecteur est dédié à la détection de signaux de très faibles intensités. Il se caractérise par une grande surface sensible, un gain interne de l'ordre de 10^6 pour un faible bruit et une grande bande passante.

Le photomultiplicateur se présente sous la forme d'un tube de verre sous vide contenant une photocathode et une anode à chacune de ses extrémités, et des dynodes.

Le principe est le suivant : quand un photon atteint la photo-cathode, celle-ci rejette un électron par effet photoélectrique. L'électron atteint la première dynode, qui se comporte comme un multiplicateur d'électrons. La succession des dynodes permet de générer un million d'électrons qui, lorsqu'ils vont finalement atteindre l'anode à l'autre extrémité du tube vont générer une impulsion de courant (figure 2.22).

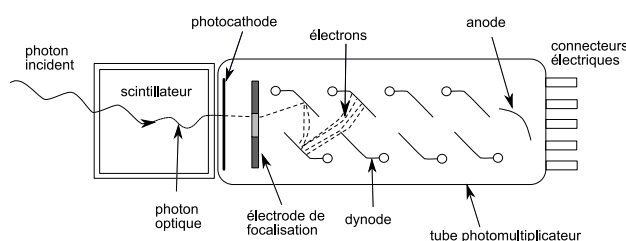


FIGURE 2.22 – Schéma interne d'un Photomultiplicateur

La contrepartie des performances du photomultiplicateur, hormis son prix élevé, est la fragilité et la complexité de mise en œuvre. En effet, c'est un photo-détecteur sensible aux champs magnétiques, il se détériore à la lumière ambiante et tout comme la photodiode avalanche, ce capteur nécessite une source de haute tension (jusqu'à 900 V).

Ce capteur est réservé à des problématiques d'instrumentation expérimentale où sont recherchées à la fois des performances de bande passante mais également une grande sensibilité comme c'est le cas pour les applications de comptage photonique, spectro-photométrie ou encore pour des applications dans le domaine de l'astronomie.

2.1.4.5 Photo-détecteurs dérivés : SIPM et MCP

Avec l'avancée des techniques de fabrication, de nouveaux détecteurs voient le jour en combinant les qualités des différents dispositifs existants. Ainsi le **SIPM**, pour Silicon Photomultiplier, possède la solidité, l'insensibilité et la petite taille d'un photo-détecteur silicium mais également un gain proche de celui du photomultiplicateur, de l'ordre de 10^5 . C'est en fait un photo-détecteur composé d'une matrice de diodes à avalanche. Néanmoins, on constate rapidement chez les fabricants qui ont commencé à en produire (Hamamatsu et Photonics) que les SiPM se limitent pour le moment à des longueurs d'onde de travail de l'ordre de 400-500 nm.

Un autre détecteur récent est le **MCP** pour Micro Channel Plate. La "galette de micro-canaux" peut être considérée comme une évolution du photomultiplicateur. Les micro-canaux sont recouverts d'un matériau semblable à celui des dynodes, qui va multiplier un électron capturé par le canal. Ce photo-détecteur possède l'avantage de bénéficier d'un gain de l'ordre 10^4 et d'être miniaturisé.

2.1.5 Figures des performances

En terme de performance de rapport signal sur bruit, les figures 2.23 et 2.24 proposent une comparaison des photo-détecteurs du type PN, avalanche et photomultiplicateur en fonction de la quantité de lumière reçue. Ces caractéristiques rappellent deux notions fondamentales : d'une part, le bruit est croissant avec la bande passante empruntée, ce qui dégrade le rapport signal sur bruit, d'autre part, les photo-détecteurs avalanche et photomultiplicateur sont adaptés à la détection de petits signaux et au delà d'une certaine valeur, leurs performances convergent voire dépassent celles des photodiodes PN moins complexes à mettre en œuvre et meilleur marché.

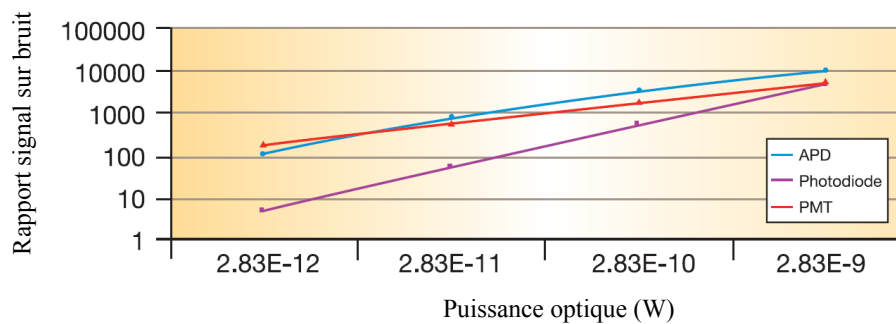


FIGURE 2.23 – Comparaison des SNR des photo-détecteurs pour 10 Hz [Kau05]

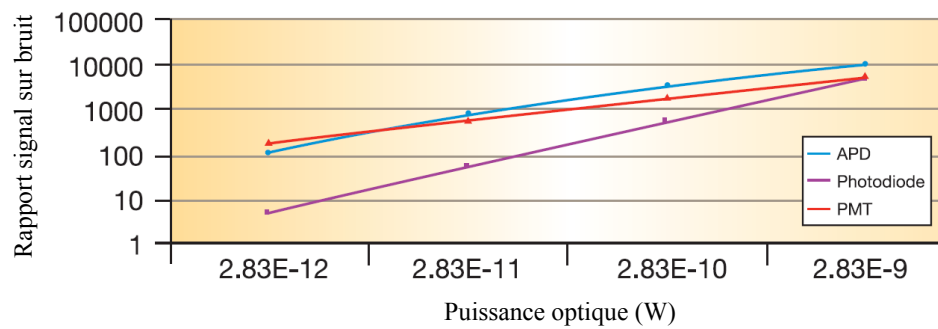


FIGURE 2.24 – Comparaison des SNR des photo-détecteurs pour 2000 Hz [Kau05]

2.2 Etat de l'art des méthodes de télémétrie laser

Cette section passe en revue les différentes méthodes qui permettent de mesurer une distance à l'aide d'un signal laser. Chacune d'entre elles possèdent des forces et des faiblesses en terme de portée, de précision et de complexité de réalisation.

2.2.1 Triangulation

La triangulation est basée sur des règles géométriques simples consistant à déterminer la longueur d'un côté d'un triangle à partir de deux angles et un côté connu.

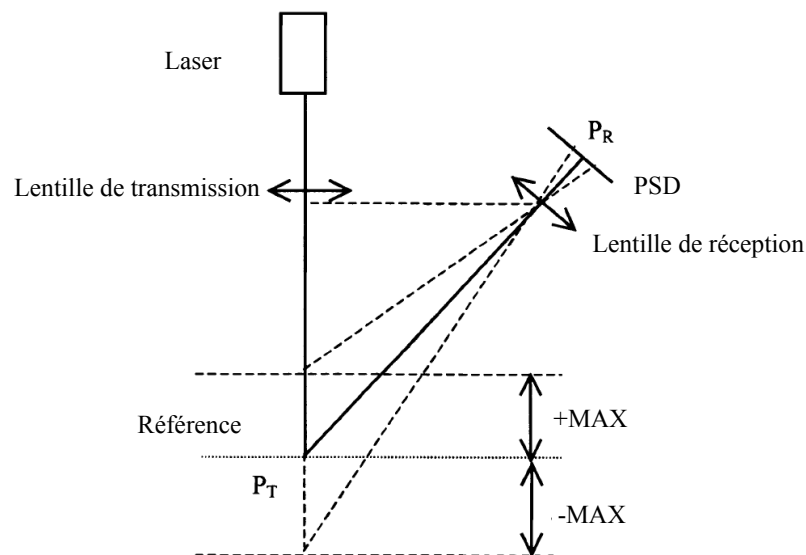


FIGURE 2.25 – Principe de la triangulation laser [TC06]

Comme l'illustre la figure 2.25, le rayon généré par la diode laser est réfléchi par la cible de manière diffuse. Une partie de la réflexion est récupérée par une lentille optique convergente qui

vient frapper un détecteur PSD² ou CCD³. On peut alors déterminer l'angle de triangulation et en déduire la distance séparant le système de la cible à l'aide de l'équation 2.10.

$$d = B \cdot \tan(\alpha) \quad (2.10)$$

avec :

- d : distance de la cible,
- B : distance diode laser - détecteur PSD,
- α : angle de triangulation.

Les systèmes de télémétrie laser utilisant la triangulation sont souvent réservés à des applications de métrologie basées sur des distances comprises entre quelques millimètres et plusieurs dizaines de centimètres.

2.2.2 Interférométrie

L'interférométrie repose sur l'étude des interférences générées par une onde cohérente. En effet, la superposition de deux signaux cohérents va créer des figures d'interférences qui vont varier en fonction de l'amplitude des signaux et de leurs phases. L'étude de ces figures d'interférence permet d'obtenir des informations sur l'amplitude et la phase à l'échelle de la longueur de l'onde choisie donnant ainsi une grande précision.

Il existe plusieurs techniques d'interférométrie. Celle illustrée par la figure 2.26 repose sur un montage composé d'une source laser S , d'un miroir semi-transparent M_0 au centre et de deux miroirs M_1 et M_2 . La figure d'interférences générée est projetée sur la surface B .

En faisant varier la distance d , la source en provenance de M_1 vient se superposer sur la source en provenance de M_2 pour former une figure d'interférences et ainsi traduire sous forme d'intensité la position du miroir M_1 . La figure 2.27 illustre l'évolution de la figure d'interférences en fonction du déplacement de M_1 .

Néanmoins, l'ambiguïté de la mesure de phase de modulo 2π provoque une ambiguïté de mesure de l'ordre de $\frac{\lambda}{2}$, soit 350 nm pour un rayon rouge de longueur d'onde 700 nm. Pour remédier à cela, le comptage du nombre de périodes peut être appliqué. Globalement, cette méthode est aujourd'hui celle qui permet de mesurer les plus petits déplacements mais en contrepartie, c'est un système optique complexe avec des contraintes de stabilisations thermiques et mécaniques importantes.

2.2.3 Différence de phases

Le principe de cette méthode est de moduler le laser avec un signal périodique et de mesurer la différence de phases entre le signal d'émission et de réception. Cette différence est proportionnelle

2. PSD : Position Sensitive Device

3. CCD : Charged-Coupled Device

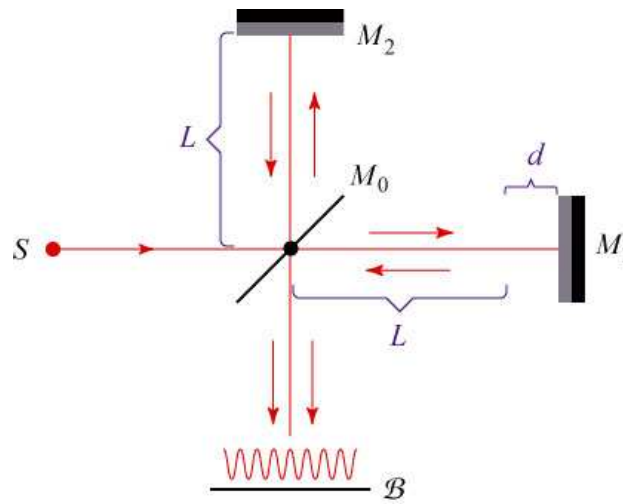
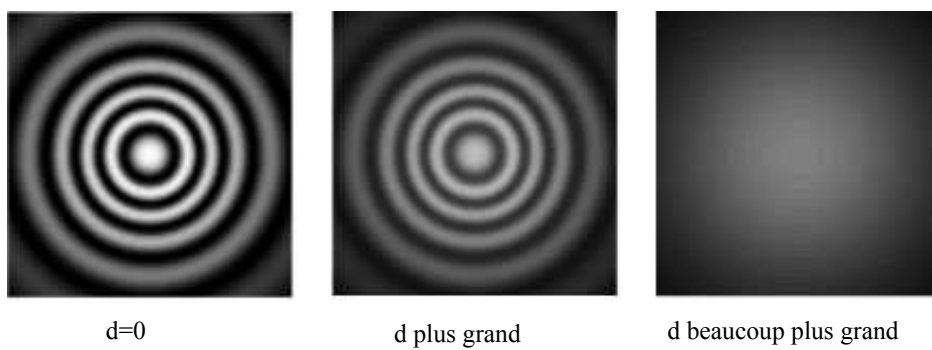


FIGURE 2.26 – Interféromètre de Michelson [sku08]



d=0

d plus grand

d beaucoup plus grand

FIGURE 2.27 – Figure d'interférences [sku08]

à la distance comme le montre l'équation 2.11.

$$D = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \frac{\Delta \cdot \varphi}{2 \cdot \pi} \cdot f_{Rf} \quad (2.11)$$

avec :

- D : distance de la cible,
- c : vitesse de propagation de la lumière,
- φ : la différence de phase,
- f_{Rf} : la fréquence de modulation.

Comme pour l'interférométrie, il existe une ambiguïté de mesure liée à la périodicité du signal. La distance maximale mesurable sans ambiguïté est égale à la moitié de la longueur d'onde associée à la fréquence de modulation.

Pour $D_{\text{ambiguité}} \geq D_{\text{maxplagedemesure}} = 5 \text{ m}$, on obtient une fréquence de modulation maximale de $F_{Rf\text{max}} = 30 \text{ MHz}$.

Le choix de F_{Rf} est un compromis entre la distance d'ambigüité, la précision qui est meilleure en hautes fréquences et la fréquence de mesure.

Cette technique est adaptée pour des distances moyennes de l'ordre de quelques mètres. Elle est relativement bon marché grâce notamment aux développements des techniques de sous-échantillonnage numérique [SP99].

2.2.4 Temps de vol

L'objectif est de mesurer la distance entre une source laser et un objet réfléchissant en mesurant le temps que met une impulsion de source de lumière pour effectuer un aller-retour (équation 2.12). Comme l'illustre la figure 2.28, le système se compose d'un générateur d'impulsion laser, d'un couple récepteur-amplificateur suivi par un discriminateur temporel [PP05], d'un "chronomètre" et d'un module permettant de compenser les dérives de diverses natures.

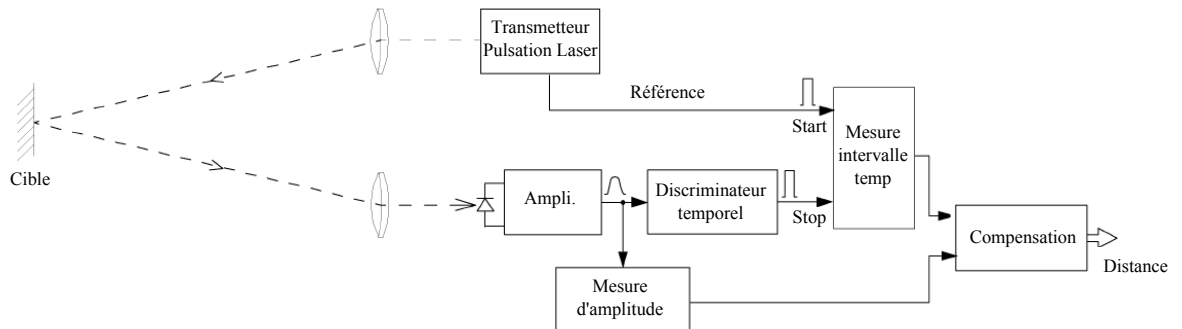


FIGURE 2.28 – Principe et schéma bloc d'un télémètre par mesure temps de vol [PP05]

$$d = \frac{c \cdot t}{2} \quad (2.12)$$

avec :

- d : distance de la cible,
- c : vitesse de propagation de la lumière,
- t : temps de transit.

Cette technique est adaptée pour des distances allant de plusieurs mètres à plusieurs kilomètres avec une résolution brute de l'ordre du centimètre, mais qui peut être réduite au millimètre avec une électronique performante et capable d'effectuer un moyennage. L'électronique doit se plier à des contraintes temporelles sévères pour être performante puisqu'il s'agit de mesurer des durées de 6.7 ps pour obtenir une résolution millimétrique. D'un point de vue sécurité oculaire, le fonctionnement par impulsion permet d'exploiter de fortes puissances pendant de faibles durées d'expositions permettant ainsi une détection robuste, à grande distance, en plein jour. D'autre part, le développement des TDC⁴ propose maintenant des composants électroniques programmables intégrés bon marché offrant des résolutions temporelles de l'ordre de 10 ps.

2.2.5 Différence de fréquences

Le principe de cette méthode aussi appelée FMCW⁵, est de moduler le laser avec un signal périodique sinusoïdal ou carré dont la fréquence varie dans le temps. Le retard en fréquence mesurée est proportionnel à la distance de la cible (2.13).

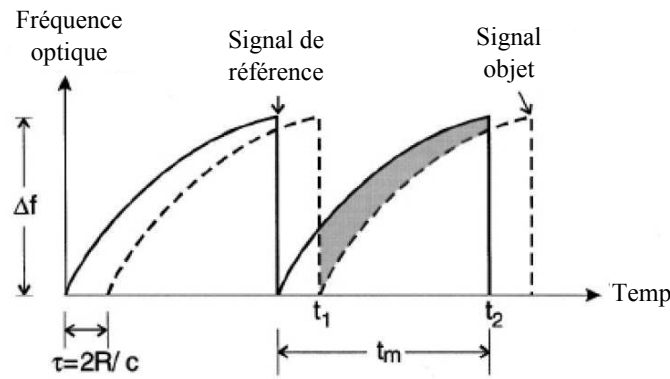


FIGURE 2.29 – Télémétrie par mesure d'écart de fréquence [Sid03]

$$d = \frac{f_{if}}{2 \cdot \Delta f} \cdot c \cdot t_m \quad (2.13)$$

avec :

-
- 4. TDC : Time to Digital Converter
 - 5. FMCW : Frequency Modulated Continuous Wave

- d : distance de la cible,
- f_{if} : écart de fréquence,
- f : fréquence,
- c : vitesse de propagation de la lumière,
- t_m : période de la rampe de fréquence.

Cette approche présente l'avantage de fonctionner avec des circuits électroniques cadencés à quelques KHz. En revanche, la modulation en fréquence des diodes lasers peut faire apparaître des comportements non-linéaires illustrés par la figure 2.29 et décrits par [Sid03].

2.2.6 Figure des performances et conclusion

Les appareils de télémétrie laser mettent en œuvre différentes approches physiques qui présentent chacune à la fois des performances en terme de portée, temps de réponse et précision, mais également en terme de complexité de mise en œuvre et de coûts résultants. La figure 2.30 proposée par [Del00] confronte, en terme de plage de mesure et de précision permettant d'effectuer une première sélection. Pour les autres paramètres, il sera toujours question de mettre en relation les besoins de l'application avec les traditionnels compromis entre temps de réponse, précision et coût du dispositif, sans oublier les compromis nécessaires au respect de la sécurité laser.

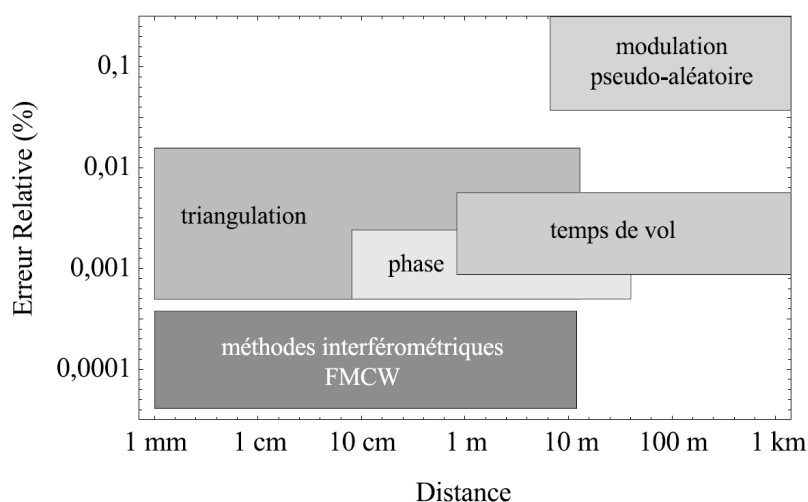


FIGURE 2.30 – Représentation distance-précision des méthodes de télémétrie [Del00]

Cet état de l'art sur les contraintes de la photo-détection, ces technologies et ces méthodes font apparaître plusieurs compromis. Le plus important est celui qui met en concurrence la robustesse et la sécurité laser. En effet, pour obtenir un dispositif de photo-détection robuste, le rapport du signal sur le bruit doit être conséquent. Or, dans des milieux bruités par la pollution lumineuse ou peu coopératifs comme l'eau ou l'atmosphère, il devient nécessaire d'augmenter la puissance du signal. Cependant, au delà d'une certaine puissance, des risques pour la santé apparaissent. Une parade à l'augmentation de la puissance des signaux, est l'usage de capteur offrant une meilleure sensibilité

mais au détriment des coûts et de la complexité de mise en œuvre représentant un autre compromis. Compte-tenu de la portée de l'application, la technologie PIN se présente comme un très bon compromis entre sensibilité, bande passante, complexité du montage et coût abordable. Cependant, les nouvelles technologies de photodétection sont à surveiller de près car elles se rapprochent de plus en plus des performances des capteurs aujourd'hui réservées à l'instrumentation de laboratoire.

Pour l'application recherchée, c'est-à-dire pour des interactions sur plusieurs mètres avec une précision inférieure au centimètre, les méthodes de télémétrie les plus adéquates sont la triangulation, la mesure de phase et éventuellement, la mesure par temps de vol à lumière pulsée constituant un autre compromis entre complexité et précision.

A partir des constats établis dans les chapitres 1 et 2, le chapitre suivant présente une première approche technologique dont l'objectif est de permettre la capture d'une cible, équipée d'un marqueur simple, en trois dimensions dans un espace de mesure le moins restreint possible. L'objectif est également de se concentrer sur des technologies à bas-coûts et de rendre le dispositif simple à utiliser en éliminant le besoin de calibration.

Chapitre 3

Dispositif de mesure de trajectoire mono-cible à grand champ

Sommaire

3.1	Modèle géométrique et grandeurs	58
3.2	Découplage de la mesure locale et globale	65
3.2.1	Mesure locale	67
3.2.1.1	Approche générique	67
3.2.1.2	Exemple d'implémentation d'une matrice de sources lasers 8 points	71
3.2.1.3	Photodétection	73
	Uniformité de réception.	74
	Réponse en distance de la cible.	74
	Réponse angulaire de la cible.	76
	Identification et immunité aux bruits.	76
3.2.2	Mesure globale	81
3.2.2.1	Approche générique	82
3.2.2.2	Exemple d'implémentation à l'aide de moto-réducteur	86
3.3	Mesure couplée et performances	95
3.3.1	Evaluation de la précision statique	95
3.3.2	Evaluation des performances dynamiques	97
3.3.2.1	Précision dynamique	97
3.3.2.2	Vitesse et accélération de décrochage	99
3.3.3	Bilan de l'évaluation	101
3.4	Positionnement à l'état de l'art et perspective d'application	101

L'objectif de ce chapitre est de démontrer l'intérêt et la faisabilité d'un découplage entre la scrutation statique locale et le suivi mobile global. Cette approche a pour objectif de proposer une structure permettant de suivre une cible dans un champ de vision limitant les angles morts avec une approche technologique simple et robuste.

Basée sur l'approche laser de [SPI04], le concept exploré dans ce chapitre, consiste à remplacer les moteurs galvanométriques, onéreux et impliquant des éléments mécaniques à haute dynamiques, par un dispositif de scrutation local basé sur un réseau de sources lasers. Cette approche multifaisceaux donne une première mesure de position de la cible sans la nécessité de générer un mouvement à cet organe. Afin d'élargir le champ de mesure, un second dispositif prend le relai. Il s'agit d'un étage d'actionneurs autorisant deux degrés de liberté en rotation autour d'un volume sphérique.

Les paragraphes suivants se proposent d'étudier successivement les paramètres géométriques, optiques et électromécaniques influant sur les performances.

3.1 Modèle géométrique et grandeurs

La position d'une cible dans l'espace selon trois degrés de liberté sans redondance peut être décrite avec un système à deux rotations et une translation (figure 3.1(a)), ou encore avec un système composé de trois translations (figure 3.1(b)).

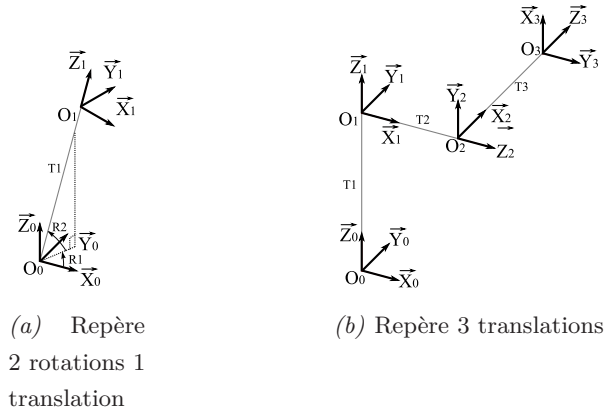


FIGURE 3.1 – Cinématique 3 DDL

Dans l'objectif de localiser une cible à l'aide d'un dispositif composé d'un étage de poursuite globale et d'un étage de poursuite locale disposés en série, il apparaît une redondance qui peut être représentée par le modèle géométrique de la figure 3.2, ainsi que par la figure 3.3 présentant le prototype faisant l'objet de l'étude. La figure 3.4 illustre la notion de mesure locale latérale quantifiée par les grandeurs d_4 et θ_3 .

Ce système possède 3 rotations (θ_1 , θ_2 et θ_3) et 2 translations (d_3 et d_4). Le repère O_0 représente le repère de référence et le repère O_4 représente le centre de la cible dont la position est à mesurer (la mesure des trois orientations liées au repère O_4 dépasse le cadre de cette étude). Les autres repères représentent les grandeurs constituant la chaîne cinématique du dispositif de poursuite de

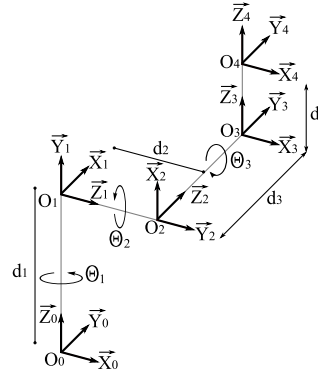


FIGURE 3.2 – Modèle géométrique 3R 2T

cible proposé. Les grandeurs décrites dans la figure 3.2, c'est à dire d_1 , d_2 , θ_1 et θ_2 sont d'origines mécaniques alors que d_3 , d_4 et θ_3 sont d'origines optiques puisque résultant de la télémétrie et de la mesure locale de position locale latérale grâce à la tête optique présentée par la suite dans ce chapitre. Cette propriété est illustrée par la figure 3.4.

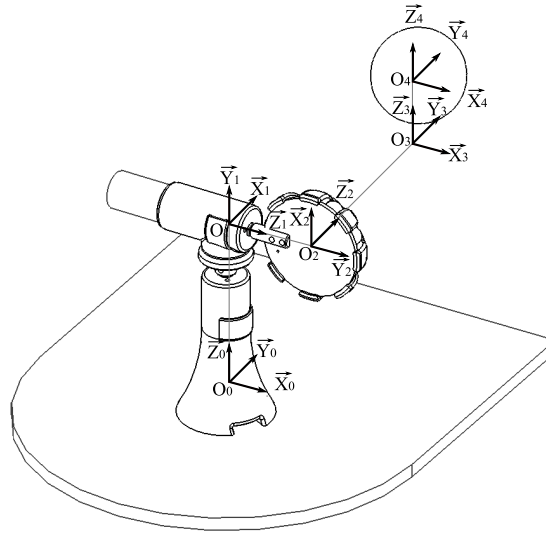


FIGURE 3.3 – Modèle géométrique

Afin de définir le modèle géométrique direct du système, la méthode des paramètres de Denavit-Hartenberg est utilisée en raison de son approche systématique et modulaire pour la modélisation de chaîne cinématique ouverte. La méthode consiste à positionner les repères et grandeurs des liaisons en suivant la procédure suivante :

1. L'axe Z_{i-1} est placé selon la direction de l'axe de la liaison i (rotation ou translation).
2. L'axe X_i est placé selon l'axe normal commun de Z_{i-1} et Z_i .
3. L'axe Y_i est placé selon X_i et Z_i de façon à respecter un trièdre direct.
4. d_i est la distance entre O_i et X_{i-1} .
5. θ_i est l'angle selon Z_{i-1} partant de X_{i-1} jusqu'à X_i .

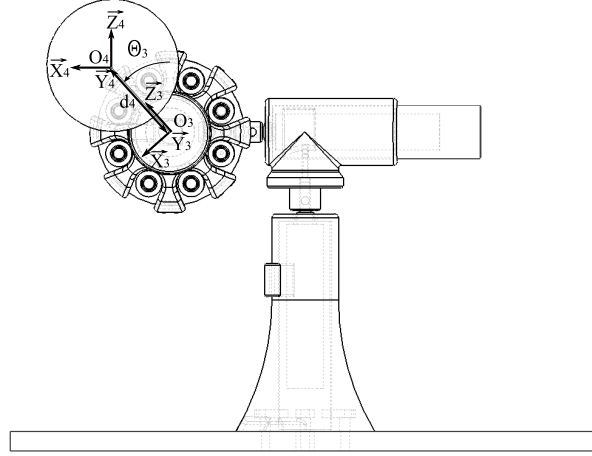


FIGURE 3.4 – Mesure de position locale

6. a_i est la distance entre O_{i-1} et Z_i .

7. α_i est l'angle selon la normale commune partant de Z_{i-1} jusqu'à Z_i .

Une fois les paramètres d_i , θ_i , a_i et α_i identifiés et classés dans un tableau récapitulatif (table 3.1), les matrices de transformation peuvent être complétées en suivant le modèle donné par la matrice élémentaire (équation 3.1).

Axe	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	...	...	...	...
2	...	...	...	...
3	...	...	...	...
4	...	...	...	...

TABLE 3.1 – Table de Denavit Hartenberg

$$DH_i = \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \cdot \cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i) \cdot \sin(\alpha_i) & a_i \cdot \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \cdot \cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i) \cdot \sin(\alpha_i) & a_i \cdot \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Le modèle géométrique direct complet, est obtenu par le produit des matrices de transformations de chacun des axes (équation 3.2).

$$MGD = DH_0 \cdot DH_1 \cdot \dots \cdot DH_i \quad (3.2)$$

Basées sur la table 3.2 où les paramètres α_i sont considérés comme invariants car ne présentant pas d'intérêt en terme d'optimisation dans cette étude, les matrices de transformations DH_i donnent :

Axe	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	$\pi/2$	0	d_1	θ_1
2	$\pi/2$	0	d_2	θ_2
3	$\pi/2$	0	d_3	θ_3
4	0	0	d_4	0

TABLE 3.2 – Table de Denavit Hartenberg

$$DH_{01} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) & 0 & \sin(\theta_1) & 0 \\ \sin(\theta_1) & 0 & -\cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

$$DH_{12} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_2) & 0 & \sin(\theta_2) & 0 \\ \sin(\theta_2) & 0 & -\cos(\theta_2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

$$DH_{23} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_3) & 0 & \sin(\theta_3) & 0 \\ \sin(\theta_3) & 0 & -\cos(\theta_3) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

$$DH_{34} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

$$DH_{01234} = \begin{pmatrix} C1 & C2 & C3 & C4 \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

$$C1 = \begin{pmatrix} C\theta_1 C\theta_2 C\theta_3 + S\theta_1 S\theta_3 \\ S\theta_1 C\theta_2 C\theta_3 - C\theta_1 S\theta_3 \\ S\theta_2 C\theta_3 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

$$C2 = \begin{pmatrix} C\theta_1 S\theta_2 \\ S\theta_1 S\theta_2 \\ -C\theta_2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

$$C3 = \begin{pmatrix} C\theta_1 C\theta_2 S\theta_3 - S\theta_1 C\theta_3 \\ S\theta_1 C\theta_2 S\theta_3 + C\theta_1 C\theta_3 \\ S\theta_2 S\theta_3 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

$$C4 = \begin{pmatrix} (C\theta_1 C\theta_2 S\theta_3 - S\theta_1 C\theta_3)d_4 + C\theta_1 S\theta_2 d_3 + S\theta_1 d_2 \\ (S\theta_1 C\theta_2 S\theta_3 + C\theta_1 C\theta_3)d_4 + S\theta_1 S\theta_2 d_3 - C\theta_1 d_2 \\ S\theta_2 S\theta_3 d_4 - C\theta_2 d_3 + d_1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{pmatrix} = MGD \quad (3.11)$$

Etant donné que l'orientation de la cible présenterait une information superflue dans le contexte de cette étude, seule la dernière colonne de l'équation 3.7, dont l'expression finale est donnée par l'équation 3.11, est exploitée. Cette expression donne le modèle géométrique direct en fonction des variables articulaires et des mesures optiques. Les paramètres d_1 et d_2 n'apparaissent pas dans l'équation mais ils constituent des paramètres de conception qui définissent la position du centre du champ de mesure et la forme de la zone non accessible comme représentée sur la figure 3.5. Le diamètre de la sphère qui définit la zone de mesure est une fonction de la distance maximale de poursuite.

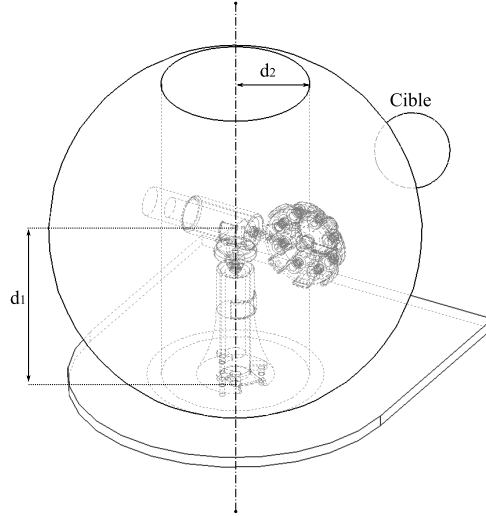


FIGURE 3.5 – Influence des paramètres d_1 et d_2 sur le champ de mesure

Une fois le modèle géométrique déterminé et la zone d'accessibilité identifiée, il est incontournable de déterminer le modèle géométrique inverse (MGI). En effet, cet outil va permettre d'obtenir les valeurs des variables θ_1 , θ_2 , θ_3 , d_3 et d_4 en fonction d'une position cible définie par les coordonnées X_c , Y_c , Z_c dans l'espace cartésien. En terme d'usage, cet outil va orienter le dispositif à destination d'un point de l'espace pour une initialisation par exemple, ou afin de parcourir une trajectoire de recherche de cibles. D'autre part, avec ce modèle, les parcours angulaires à effectuer peuvent être déterminés afin d'annuler l'erreur de position locale et ainsi engendrer un comportement dynamique de poursuite de cible. Pour ces deux exemples d'usages, d_4 sera considérée comme

nulle afin de centrer le dispositif sur la cible. Cette condition se traduit par l'expression du modèle géométrique direct (MGD) de l'expression 3.12.

$$\overrightarrow{MGD}(\theta_1, \theta_2, d_1, d_2, d_3, d_4 = 0) = \begin{pmatrix} C\theta_1 S\theta_2 d_3 + S\theta_1 d_2 \\ S\theta_1 S\theta_2 d_3 - C\theta_1 d_2 \\ -C\theta_2 d_3 + d_1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

Pour ce calcul de MGI, il faudrait résoudre le système à 3 équations et trois inconnues mais le caractère non-linéaire et multi-configurations incite à opter pour la méthode de résolution de Newton-Raphson donnée par l'expression 3.13. Cette méthode de résolution par linéarisation locale se généralise bien mais au détriment de la vitesse de calcul.

$$\delta^i = J^{-1}(q^i)(O_4^F - O_4^i) \quad (3.13)$$

Cette méthode itérative peut être appliquée à l'aide de l'algorithme suivant :

1) $i=0$ et calcul de l'erreur de position initiale donnée par les positions réelles et finales du point

$$O_4 : \epsilon_i = O_4^F - O_4^i$$

2) Répéter les opérations suivantes tant que $|\epsilon_i| < \text{Précision}$:

→ Calcul de la jacobienne J_i et de son inverse J_i^{-1} si elle existe

→ Calcul de δ_i grâce à J_i^{-1} et ϵ_i

$$\rightarrow q^{i+1} = q^i + \delta_i$$

$$\rightarrow \epsilon_i = (O_4^F - O_4^i)$$

$$\rightarrow i = i + 1$$

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial X_c}{\partial \theta_1} & \frac{\partial X_c}{\partial \theta_2} & \frac{\partial X_c}{\partial d_3} \\ \frac{\partial Y_c}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Y_c}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Y_c}{\partial d_3} \\ \frac{\partial Z_c}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Z_c}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Z_c}{\partial d_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -S\theta_1 S\theta_2 d_3 + C\theta_1 d_2 & C\theta_1 C\theta_2 d_3 & C\theta_1 S\theta_2 \\ C\theta_1 S\theta_2 d_3 + S\theta_1 d_2 & S\theta_1 C\theta_2 d_3 & S\theta_1 S\theta_2 \\ 0 & S\theta_2 d_3 & -C\theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

$$J^{-1} = \frac{1}{aei + bfg + cdh - ceg - bdi - afh} \cdot \begin{pmatrix} ei - fh & ch - bi & bf - ce \\ fg - di & ai - cg & cd - af \\ dh - eg & bg - ah & ae - bd \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

avec J la Jacobienne correspondante à la matrice des dérivées partielles du premier ordre donnée par l'expression 3.14 et son inverse J^{-1} qui existe si le déterminant est non nul et dont l'expression est donnée par 3.15. Un déterminant nul correspond à une configuration singulière qui apparaît en général au limite de l'espace de travail. La figure 3.7 présente le résultat d'une simulation du modèle géométrique à l'aide de l'outil Matlab. Dans cette simulation, un balayage de 0° à 180° pour θ_2 et de 0° à 360° pour θ_1 est réalisé pour une distance d_3 fixée arbitrairement à 200 mm. Chaque point tracé est ponctué de la valeur du déterminant faisant ainsi apparaître la façon dont

le déterminant tend vers 0. Ce même espace est également parcouru avec un balayage 180° à 360° pour θ_2 et de 0° à 360° pour θ_1 mais avec une posture différence puisqu'un même point peut être atteint de deux façons différentes ou "postures" comme l'illustre la figure 3.6.

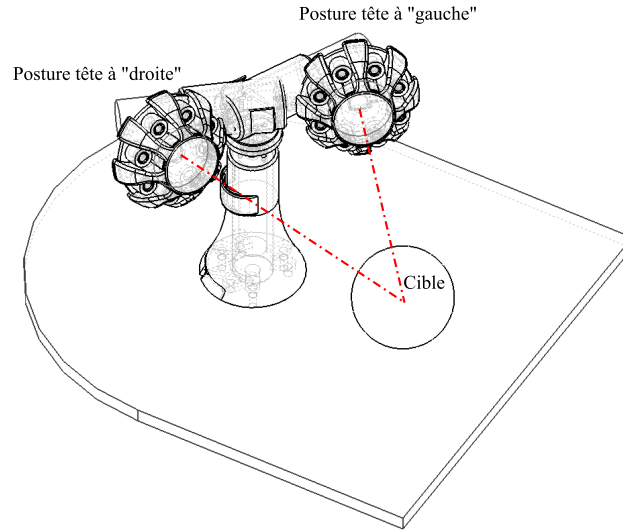


FIGURE 3.6 – Les deux postures admissibles

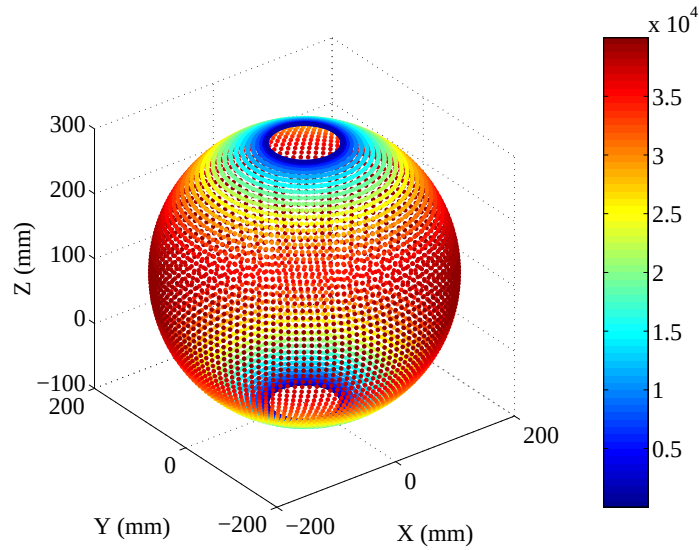


FIGURE 3.7 – Variation du déterminant en fonction du champ de mesure

Ce modèle peut-être simplifié dans le cas où le segment d_2 est considéré de longueur nulle. Dans ce cas de figure, le MGI est donné par l'expression 3.16.

$$MGD_{d_2=0} = \begin{pmatrix} C\theta_1 S\theta_2 d_3 \\ S\theta_1 S\theta_2 d_3 \\ -C\theta_2 d_3 + d_1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{pmatrix} = O_4 \quad (3.16)$$

La résolution est alors assez aisée et il n'est pas nécessaire d'utiliser une méthode approximative gourmande en ressources de calcul. Les expressions 3.17, 3.18, 3.19, 3.20 et 3.21 reprennent les différentes étapes de la résolution afin de déterminer θ_1 , θ_2 , et d_3 .

$$\theta_2 = \pm \cos^{-1} \left(\frac{d_1 - Z_c}{d_3} \right) \quad (3.17)$$

$$d_3 = \sqrt{X_c^2 + Y_c^2 + (Z_c - d_1)^2} \quad (3.18)$$

$$S\theta_1 = \frac{Y_c}{S\theta_2 d_3} \quad (3.19)$$

$$C\theta_1 = \frac{X_c}{S\theta_2 d_3} \quad (3.20)$$

$$\theta_1 = \arctan 2(C\theta_1, S\theta_1) \quad (3.21)$$

Les deux exemples de résolution de modèle géométrique inverse qui viennent d'être abordés ont pour vocation d'attirer l'attention sur la répercussion d'un choix mécanique sur les besoins en capacité de calcul et inversement. En pratique, et en fonction des performances requises, il peut être nécessaire d'intégrer dans le modèle tous les paramètres géométriques liés aux imprécisions mécaniques. C'est dans ce type de cas qu'il devient nécessaire de procéder à une calibration du système en comparant les écarts du modèle à l'aide d'une référence absolue.

3.2 Découplage de la mesure locale et globale

Afin de mettre en pratique les concepts géométriques exposés précédemment, un prototype a été développé. Ce dispositif se compose d'une structure mobile composée de deux axes de rotation motorisés en configuration série afin d'obtenir une extrémité orientable dans un champ sphérique. Cette extrémité reçoit un dispositif optique statique qui mesure localement la position de la cible. La figure 3.8 illustre le prototype ainsi que les circuits électroniques de traitement de signaux et de contrôle.

En terme de structure électrique, la figure 3.9 présente les trois sous-ensembles électroniques associés respectivement aux fonctions de contrôle des actionneurs, contrôle de la tête optique et contrôle de l'ensemble du système incluant la communication vers un terminal extérieur. Ces différents organes sont détaillés dans les sections suivantes.

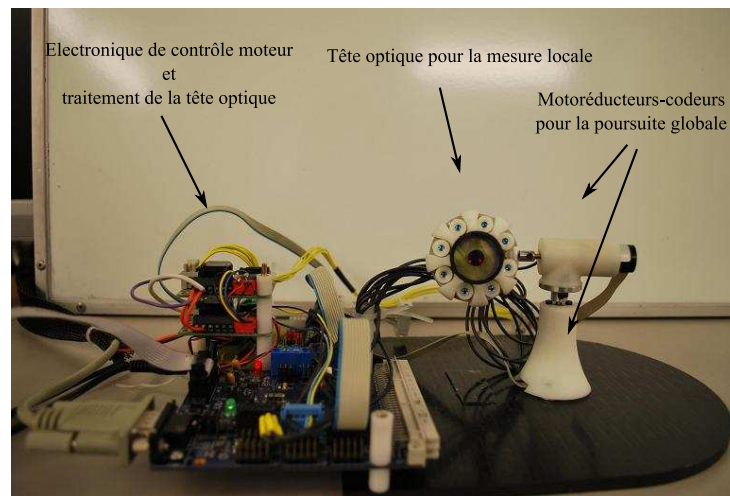


FIGURE 3.8 – Vue d'ensemble du prototype

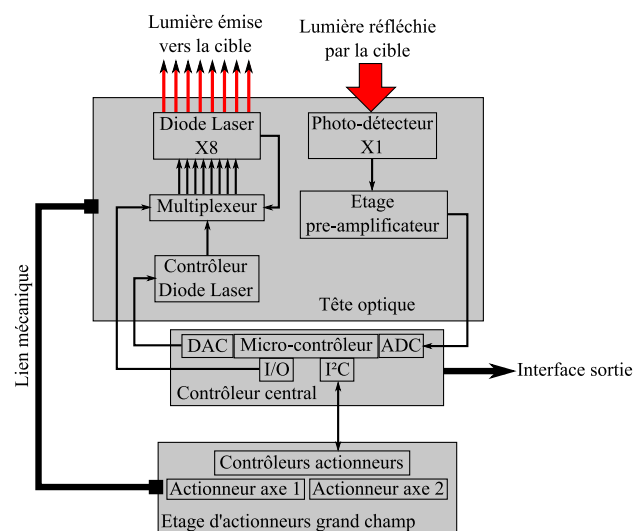


FIGURE 3.9 – Organigramme du traitement des signaux

3.2.1 Mesure locale

3.2.1.1 Approche générique

Le dispositif présenté dans ce chapitre mesure la position dite "locale" de la cible. Il s'agit d'un système composé d'éléments uniquement statiques et utilisant plusieurs faisceaux lasers collimatés éclairant la cible. La quantité de lumière réfléchie est mesurée à l'aide d'un photo-détecteur unitaire (figure 3.10).

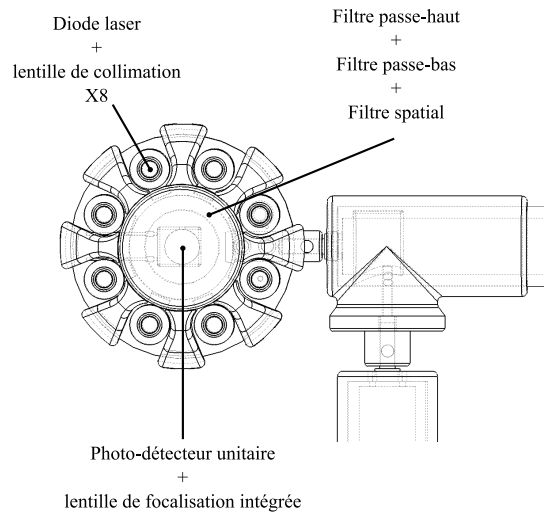


FIGURE 3.10 – Description de la tête optique

Le principe de fonctionnement repose sur la commutation successive et exclusive des sources lasers à destination de la zone où se situe la cible. Pour chaque diode émettant de la lumière, le contrôleur électronique enregistre la quantité de lumière générée par le photo-détecteur. De cette manière, une scrutation est réalisée selon la forme géométrique décrite par le positionnement du réseau de sources laser. Ce dispositif peut donc être assimilé à un scanner sans pièce mécanique en mouvement.

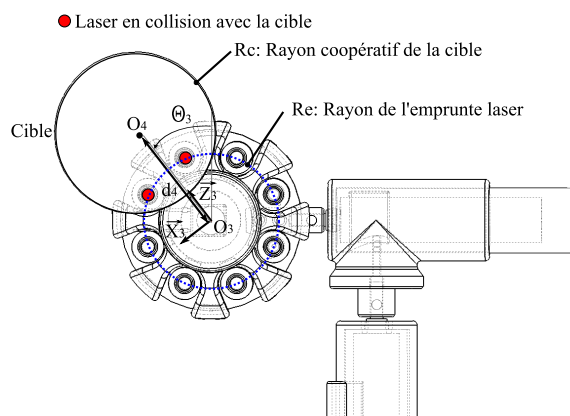


FIGURE 3.11 – Mesure de la position locale

Cette mesure locale détermine la position de la cible selon la distance latérale d_4 ainsi que l'angle

θ_3 définis dans le plan $(0_3, \vec{X}_3, \vec{Z}_3)$. Ces valeurs représentées dans la figure 3.11 et l'expression littérale pour d_4 est donnée par 3.22 et pour θ_3 par l'équation 3.25.

$$d_4 = R_e \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) + (R_c(I_{ph}) - \sigma(I_{ph}) \cdot R_l) \cdot \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (3.22)$$

$$\alpha = (nDL_{on} - 1) \cdot \frac{2\pi}{nDL} \text{ pour } nDL_{on} < nDL \text{ sinon } \alpha = 2\pi \quad (3.23)$$

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{Re}{R_c(I_{ph})} \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right) \quad (3.24)$$

$$\theta_3 = \frac{\beta}{2} - \beta_{DL_1} \quad (3.25)$$

$$Z_m = R_c(I_{ph}) - R_e \pm 2 \cdot \sigma(I_{ph}) \cdot R_l \quad (3.26)$$

avec :

- α : l'ouverture angulaire entre la première et la dernière diode laser en collision avec la cible dans le référentiel empreinte laser (centre du cercle),
- β : l'ouverture angulaire entre la première et la dernière diode laser en collision avec la cible dans le référentiel cible (centre du cercle),
- $R_c(I_{ph})$: le rayon coopératif (limite de détection du capteur) de la cible,
- R_e : le rayon de l'empreinte laser,
- R_l : le rayon de la taille du point laser à mi-puissance,
- nDL_{on} : le nombre de diodes lasers successives en collision avec la cible,
- α_{DL_1} : la position angulaire de la première diode laser en collision par rapport à l'origine angulaire du repère 0_3 ,
- Z_m : la zone d'incertitude de position pour 100% de collision,
- $\sigma(I_{ph})$: Facteur compris entre 0 et 1 dépendant de la quantité I_{ph} de photo-courant détectée.

Les dimensions précédemment décrites établissent les relations qui vont déterminer les spécifications du capteur en termes de plage de mesure, de résolution, de précision statique et de dynamique. Tout d'abord, la résolution est une fonction du nombre de sources lasers et de leurs dispositions géométriques. La figure 3.12 illustre un cas de figure où 8 diodes lasers sont uniformément réparties sur un cercle de 35 mm de diamètre pour un rayon coopératif de la cible de 35 mm également. Cette première figure permet de mettre en évidence la notion de plage de mesure et de "pas" de résolution non linéaire.

Afin de bien illustrer l'impact du nombre de diodes sur cette résolution, la figure 3.13 donne un exemple pour l'usage de 16 diodes dans les mêmes conditions que précédemment. La plage de

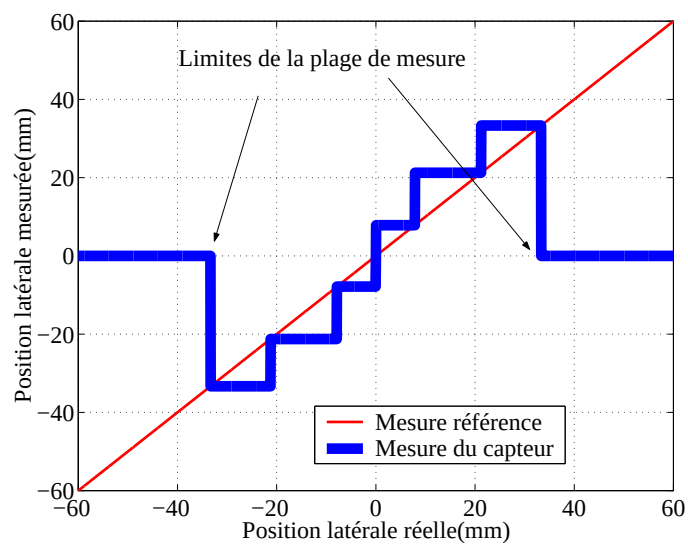


FIGURE 3.12 – Mesure du capteur locale pour 8 diodes réparties sur un cercle

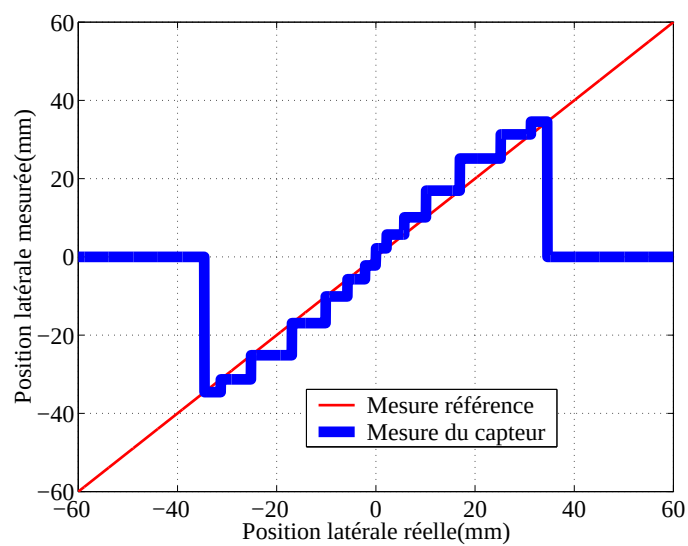


FIGURE 3.13 – Mesure du capteur locale pour 16 diodes réparties sur un cercle

mesure n'a pas changée. En revanche, le nombre de pas est deux fois plus élevé tout en conservant le caractère non-linéaire de cette discrétisation.

Un autre critère fondamental qu'il est important de mettre en évidence, est la zone morte identifiée par Z_m dans l'équation 3.26. Cette zone est due à l'écart entre le cercle décrivant l'empreinte laser ainsi que le cercle coopératif propre à la cible et constitue une incertitude de mesure. Ainsi dans la figure 3.14, la zone autour de la position 0 est connue à ± 7.5 mm qui correspond aux 15 mm d'écart entre le cercle $R_c(I_{ph})$ de 50 mm et le cercle R_e de 35 mm qui ont fait l'objet de cette simulation. Cette zone est problématique car elle dégrade la précision de la mesure mais dépend également des conditions de photodétection qui sont variables en fonction de l'angle d'incidence du laser sur la cible ou encore la distance de cette dernière¹.

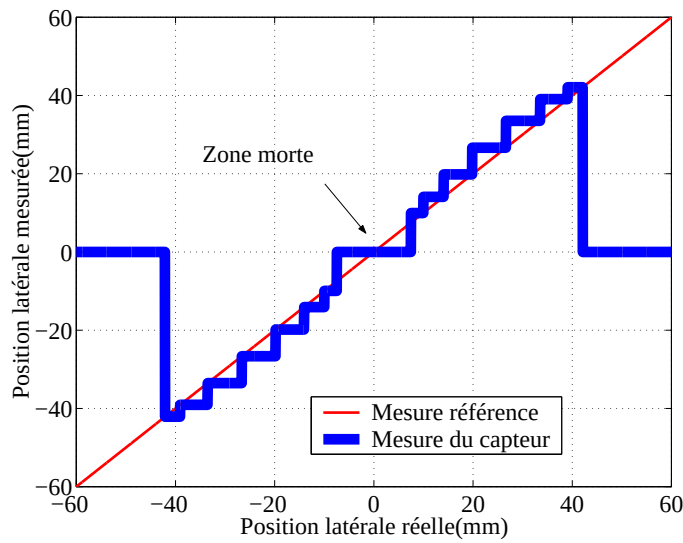


FIGURE 3.14 – Mesure du capteur local pour 16 diodes réparties sur un cercle + zone morte

Sur les trois figures présentées, le trait correspondant à la mesure du capteur à été volontairement grossi. Cette attention illustre l'influence des paramètres $\sigma(I_{ph}) \cdot R_l$ qui représente une source supplémentaire d'incertitude de mesure. En effet, plus le rayon de la source laser à mi-puissance R_l sera grand, plus il induira une incertitude de position. A cela s'ajoute le fait qu'en fonction des paramètres de réflectivité et de distance, le photo-détecteur aura besoin d'une interaction plus ou moins importante en terme de surface sur la cible avant de se déclencher.

En observant ces différentes spécifications, il peut se révéler intéressant d'adapter la puissance des sources lasers en fonction de la distance, de manière à obtenir un rayon coopératif $R_c(I_{ph})$ le plus proche possible du rayon de l'empreinte laser R_e , afin de réduire la zone morte Z_m au minimum. Une autre approche pourrait consister à ne jamais se positionner en condition de zone morte pour des mesures statiques mais plutôt dans une zone du capteur offrant une meilleure précision. Un travail d'optimisation dans le positionnement des sources lasers représente désormais un axe de perspective qu'il devient intéressant d'étudier dans une étude future.

1. Voir le chapitre 2.1.3 pour les questions relatives aux conditions de réflectivité

Concernant la résolution, il apparaît séduisant d'augmenter le nombre de sources lasers. Cette solution sera au détriment de la fréquence de mesure du dispositif qui ne dispose que d'un seul photo-détecteur et qui doit mesurer les interactions pour chacune des sources. Au delà du critère temporel, il persiste malgré tout la contrainte de l'encombrement. Cependant, les progrès réalisés en matière de fabrication de sources laser VCSEL en matrice et de réseau de microlentilles représentent un axe d'optimisation de l'encombrement et des coûts bien plus avantageux que d'effectuer un assemblage complexe de plusieurs modules lasers indépendants.

3.2.1.2 Exemple d'implémentation d'une matrice de sources lasers 8 points

La lumière est émise par des diodes lasers conditionnées individuellement et dont la source initialement divergente est collimatée à l'aide de lentilles convexes de 6 mm de distance focale. L'ensemble des lentilles doit être positionnées de manière à rendre non seulement les faisceaux collimatés mais également parallèles. Il faut en effet obtenir une empreinte laser dont la géométrie ne varie pas avec la distance.

Les diodes lasers implémentées sont de type VCSEL² émettant à 650 nm à une puissance optique maximum de 2.5 mW. Alors que les traditionnelles diodes laser reposent sur une technique d'émission de lumière par la tranche du substrat de silicium, le développement proposé utilise des diodes à émission par la surface. Parmi les avantages de cette technologie, l'une des plus intéressantes est la possibilité de fabriquer en un seul substrat une matrice de sources lasers réduisant les coûts de production tout en améliorant la précision de positionnement. Une autre qualité réside dans la géométrie du faisceau qui est parfaitement circulaire contrairement au faisceau elliptique traditionnellement rencontré dans les émetteurs par la tranche (figure 3.15).

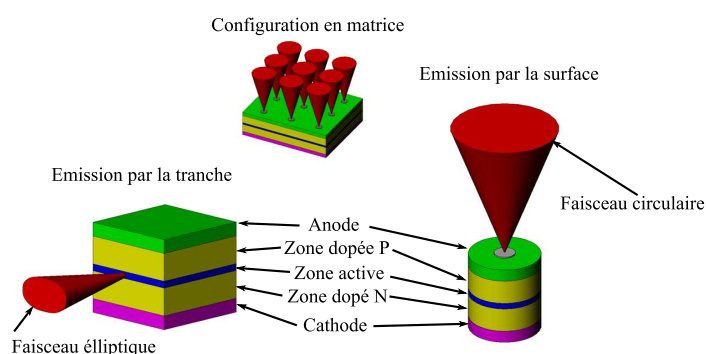


FIGURE 3.15 – Diodes lasers émettrices par la tranche et par la surface (VCSEL).

Cette capacité de réalisation en matrice représente une opportunité pour l'application présentée dans ce chapitre car elle repose sur une scrutation matricielle en remplacement du traditionnel balayage. Une autre spécification d'ordre électrique à prendre en compte concerne la caractéristique courant/tension des diodes VCSEL. Avec les grandes variations de courant en fonction de la tension d'alimentation, il est nécessaire de mettre en place une régulation de courant afin de stabiliser la

2. VCSEL : Vertical Cavity Surface Emitting Laser

puissance optique générée. Les diodes laser choisies ne proposant pas de photodiodes intégrées, le contrôle de la puissance est réalisé en boucle ouverte à partir de la documentation du constructeur représentée par la figure 3.16. Une autre caractéristique de cette diode VCSEL est le courant de commutation autour de 2 mA, beaucoup plus bas que les diodes traditionnelles. Cette différence a pour conséquence d'exclure quasiment tous les composants traditionnels dédiés au pilotage de diodes lasers incapables d'agir dans cette plage de courant.

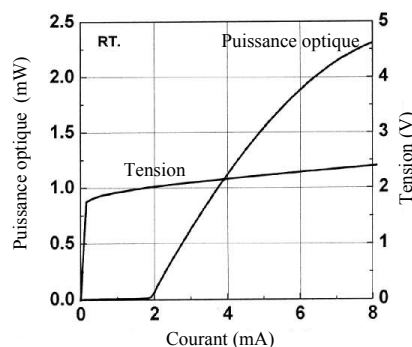


FIGURE 3.16 – Caractéristiques de la diode VCSEL PM67-F1P0N

La stratégie de commutation successive et exclusive des diodes laser implique le contrôle d'une seule diode à la fois. Afin de réduire l'encombrement en limitant le nombre de composants, un unique contrôleur de courant est implémenté, suivi par un multiplexeur analogique agissant comme un aiguillage à destination de toutes les diodes lasers. Cette méthode de contrôle est représentée dans la figure 3.9. Cette approche multiplexée nécessite malgré tout d'être attentif aux caractéristiques d'une diode laser à l'autre. En effet, il est fréquent d'observer des écarts dans le cas d'usage de composants bas coût non triés. Dans le cas du prototype réalisé, une mesure de puissance a été effectuée dans l'obscurité à l'aide d'un puissance-mètre calibré à 650 nm et dont les résultats sont inscrits dans le tableau 3.3 et graphiquement représentés à l'aide de la figure 3.17. Ces résultats montrent un écart maximum de 12.5 % entre la diode la plus puissante et la moins puissante. En plus de la dispersion de fabrication des diodes lasers, ce pourcentage d'erreur masque également les fluctuations liées aux spécificités du routage électrique comme la longueur des pistes, la qualité des soudures, ainsi qu'aux éléments optiques également non triés et qui ont été collés manuellement dans une atmosphère non protectrice. Il est donc probable que les performances de transmission des lentilles soient altérées par des poussières emprisonnées pendant l'assemblage et dégradant ainsi la puissance émise.

NroDiode	1	2	3	4	5	6	7	8
Puissance I=cst (μ W)	545	603	576	572	523	582	555	522
Puissance I calibré (μ W)	597	604	601	600	599	599	608	597
Erreur %	8.7	0.2	4.2	4.7	12.7	2.8	8.8	12.5

TABLE 3.3 – Mesure de la puissance des diodes laser

En raison de sa cohérence, la lumière laser peut présenter des risques biologiques lorsqu'elle est

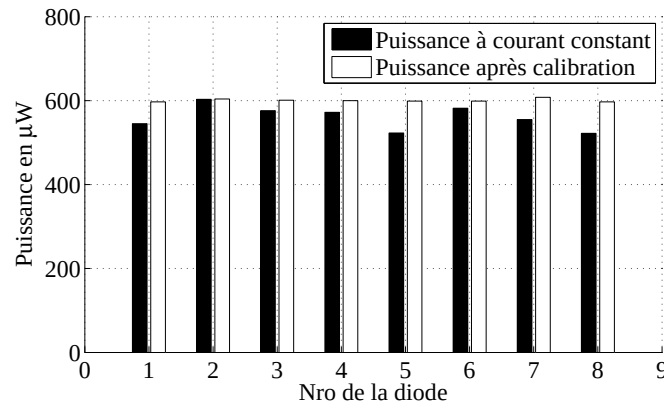


FIGURE 3.17 – Répartition en puissance optique des diodes lasers

collimatée ou focalisée engendrant de fortes intensités de lumière par unité de surface. Comme détaillé dans le paragraphe 2.1.2.3, le risque laser est identifié par une classification répondant à la norme IEC 60825-1. Dans le cas présenté dans cette étude, les diodes lasers utilisées peuvent fournir une puissance maximum de 2.5 mW. Cette dernière est considérée comme un dispositif de classe 3 dans le cas où la lumière est concentrée. Dans le but de rester dans la classe 2, le signal est contrôlé de manière à fournir une impulsion d'une durée de 467 μ s toute les 4.48 ms avec une amplitude de 600 μ W. La valeur moyenne de la puissance équivalente est égale à 62 μ W. La sécurité laser³ s'appuie sur plusieurs critères dont celui de la longueur d'onde. Dans l'étude présentée, bien que n'étant pas optimum, le domaine du visible est privilégié afin de favoriser un certain confort lors des expérimentations tout en restant dans des conditions de sécurité acceptables dans un contexte expérimental.

3.2.1.3 Photodétection

L'enjeu de ce dispositif est de détecter une cible par la mesure de la réflexion de sa propre lumière laser, sans subir les variations des conditions environnementales dans lesquelles évolue le dispositif. Un tel système doit donc être "immunisé" contre les sources lumineuses artificielles et naturelles mais également tenir compte de la capacité de transmission du milieu⁴.

La photodiode utilisée est la référence S6036 fabriquée par Hamamatsu. Il s'agit d'une photodiode de technologie PIN⁵ offrant un bon compromis entre performances et contraintes de mise en œuvre. Cette référence possède une lentille de focalisation intégrée de 7 mm de diamètre qui augmente la surface sensible pour une même surface de silicium réduisant ainsi les coûts tout en conservant de bonnes performances de bande passante et de bruit. Ces deux dernières sont des caractéristiques qui se dégradent en proportion de la surface active. Il est donc préférable de minimiser la surface active de détection tout en conservant une surface de collection de lumière

3. Voir paragraphe 2.1.2.3

4. Voir paragraphe 2.1.2.2 et le paragraphe 2.1.2.1

5. Voir paragraphe 2.1.4.2

favorisant un rapport signal sur bruit adéquat⁶.

Afin d'illustrer les problématiques essentielles associées à ce dispositif de photodétection locale, un banc de mesure est mis en place. Décrit par la figure 3.18, pour une distance déterminée, le photo-courant généré par le capteur est mesuré en fonction de différentes configurations de la cible et de son environnement.

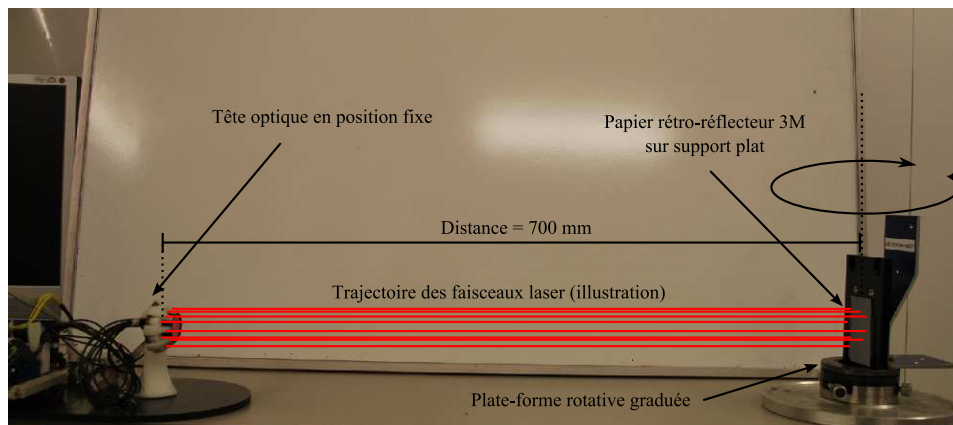


FIGURE 3.18 – Banc de mesure de réflexion de la cible

Uniformité de réception. La première expérimentation vise à vérifier que la quantité de lumière reçue par le capteur est uniforme quelle que soit la diode laser sélectionnée. Comme illustré par la figure 3.10, le photo-détecteur est disposé à distance égale de chacune des diodes laser et le calibrage décrit dans le paragraphe précédent démontre que les diodes émettent à puissance égale. Une cible plate recouverte de rétro-rélecteur 3M est disposée perpendiculairement à l'axe optique du dispositif et pour chaque commutation de diode, la quantité de lumière reçue est mesurée. Ces valeurs sont consignées dans le tableau 3.4 et la figure 3.19 permet de constater visuellement la notion de rendement entre la puissance optique émise et la puissance optique reçue.

Diode	1	2	3	4	5	6	7	8
Puissance I calibré (μW)	597	604	601	600	599	599	608	597
Puissance mesurée (μW)	43	39	41	48	40	36	41	41
Rendement optique %	7.3	6.5	6.8	7.9	6.7	6.0	6.8	6.9

TABLE 3.4 – Répartition en puissance en réception

Ces résultats démontrent un rendement de 7% avec une uniformité de $\pm 1\%$. Ces valeurs doivent, en théorie, se dégrader avec la distance accentuant les conséquences des erreurs d'alignements entre l'axe optique du capteur et l'axe de révolution de l'empreinte laser circulaire décrite par les 8 diodes.

Réponse en distance de la cible. L'objectif de cette expérimentation est de mettre en évidence le comportement de dispersion de la lumière en fonction de la distance de la cible.

6. Voir paragraphe 2.1.1.2

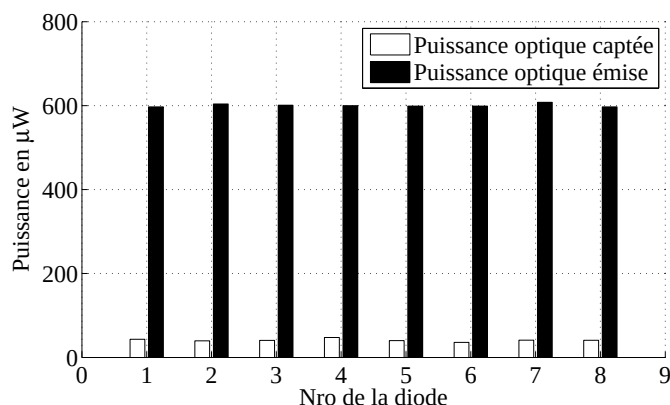


FIGURE 3.19 – Répartition en puissance en réception

Pour réaliser cette mesure, deux cibles sont éloignées du capteur et pour chaque distance, la puissance optique est relevée. L'une des cibles est composée d'une feuille blanche alors que l'autre est composée de papier rétro-réfléchissant 3M. Cette expérimentation est réalisée dans l'obscurité afin de bénéficier d'un signal continu dépourvu de la composante alternative de la lumière artificielle de la pièce. La distance est relevée à l'aide d'un télémètre laser industriel de type Sick DT50Hi d'une portée maximum de 20 m, d'une précision de ± 7 mm pour une résolution de 1 mm. Le DT50Hi émet des pulsations de 185 mW pendant 5 ns à un taux de répétition de 1 MHz. Après mesure, ce signal n'est pas détecté par le montage. En effet, la bande passante du montage n'est pas suffisante pour détecter ces pics.

Le résultat de cette mesure est donné sur la figure 3.20. Ce relevé présente deux courbes. L'une pour une cible composée d'une feuille de papier blanc offrant un comportement de diffusion Lambertien⁷ et la seconde courbe, correspondant à la réponse sur une cible rétro-réflexive.

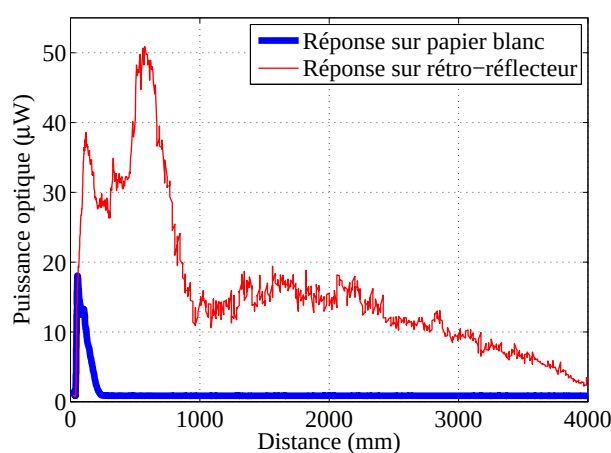


FIGURE 3.20 – Réponse de la cible en fonction de sa distance

Ces courbes mettent en évidence des comportements transitoires importants pour des distances

7. voir le paragraphe 2.1.3 pour plus d'informations sur les comportements de diffusion

inférieures à 1000 mm. Ces variations peuvent s'expliquer d'une part par l'entrée progressive de la zone sensible du capteur dans le volume emprunté par la lumière réfléchie, d'autre part par l'intervention dans l'angle d'acceptance, de l'ensemble composé du capteur et des optiques impliquant leurs propriétés de réflexion et de réfraction. Après ces phases transitoires, la courbe pour la cible diffuse décroît rapidement jusqu'à 250 mm. Pour la cible rétro-réfléchissante, à partir de 1500 mm de distance, la lumière détectée est atténuée de manière monotone mais relativement bruitée.

La cible rétro-réfléctive permet d'augmenter la portée. Il serait intéressant d'étudier si cette intensité peut être exploitée comme estimateur de distance comme c'est le cas dans [SPI04] sur une cible diffuse.

L'usage de papier rétro-réfléctif contribue à la fois à la notion de robustesse de détection et propose également une cible passive fonctionnant sur des distances importantes, et à bas-coût. En revanche, cette robustesse est remise en cause si un objet neutre revêtu de rétro-réflécteurs est présent dans l'espace de mesure comme ceux utilisés sur les vêtements de sport ou de sécurité.

Réponse angulaire de la cible. L'expérimentation suivante vise à mesurer les spécifications de réflexion du matériau utilisé pour la cible. Également basée sur le banc de mesure de la figure 3.18, la plate-forme sur laquelle repose l'échantillon de papier cible est orientée de manière à modifier l'angle d'incidence des faisceaux lasers. Pour chacune des positions angulaires et à une distance de 700 mm, la quantité de lumière relative à la position angulaire nulle est relevée. La figure 3.21 illustre le résultat obtenu. Le fabricant de la référence 3M ScotchLite utilisée ne garantit plus de réflexion pour un angle de 45° , ce qui correspondrait d'après le présent relevé, à un rendement de l'ordre de 80%. Cette caractéristique confirme la faculté des cibles rétro-réfléctives à renvoyer une importante quantité de lumière selon la même direction que l'axe d'émission de la lumière avec une grande tolérance angulaire de la surface d'impact⁸.

Identification et immunité aux bruits. En terme de signaux, il est nécessaire de distinguer le signal photo-électrique généré par la source laser, des signaux photo-électriques produit par les sources lumineuses considérées comme du bruit. A cette contrainte s'ajoute le bruit généré par les composants opto-électroniques eux-mêmes.

Le choix du photo-détecteur, de son conditionnement optique et de son conditionnement électrique constitue donc des paramètres critiques.

Les expérimentations ci-après, illustrent les paramètres influents et les stratégies possibles d'immunisation contre les perturbations optiques. Dans les expérimentations suivantes, le photo-courant généré par la photodiode est conditionné à l'aide d'un montage électronique de type transimpédance (fig : 3.22). Ce montage converti le photo-courant généré en une tension en suivant les relations 3.27 et 3.28.

8. Pour plus d'informations sur les propriétés de réflexion des cibles, consulter la section 2.1.3 de ce manuscrit

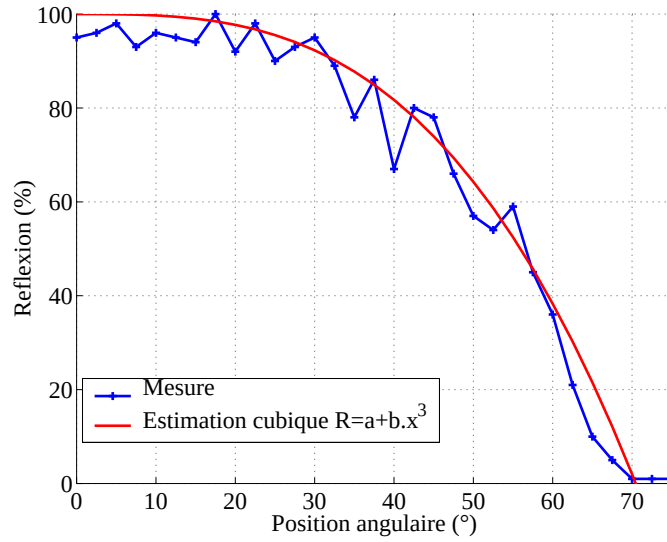


FIGURE 3.21 – Coefficient de réflexion en fonction de l'angle de la cible

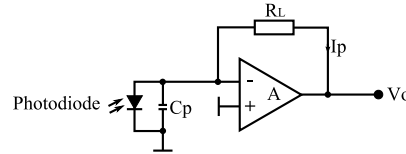


FIGURE 3.22 – Montage transimpédance

$$V_0 = -I_p \cdot R_L \quad (3.27)$$

$$I_p = \frac{I_o}{R(\lambda)} \quad (3.28)$$

avec :

- I_p le photo-courant en A.
- R_L la résistance de gain transimpédance en Ω .
- $R(\lambda)$ la sensibilité du photo-détecteur en A/W
- I_o l'intensité optique frappant le photo-détecteur en W

Afin de centrer la sensibilité du capteur au signal utile correspondant au laser à 650 nm, deux filtres optiques fréquentiels sont ajoutés. L'action de filtrage correspond à un filtre équivalent passe-bande obtenu par la superposition d'un filtre passe-bas de technologie interférentielle (réf :FES0700) et coupant à 700 nm ainsi qu'un filtre de couleur (réf :RG610) d'action passe-haut de valeur de coupure de 610 nm . Ces deux filtres sont commercialisés par la société Thorlabs.

Cette action atténue les longueurs d'ondes non utiles et donc supprime une partie du signal. Cependant, une fenêtre fréquentielle est conservée et continue à recevoir une quantité de lumière de la même longueur d'onde ne provenant pas des diodes lasers. Le spectre de sensibilité équivalent est

illustré par la figure 3.23, où est positionnée la longueur d'onde de 650 nm utilisée par rapport à la courbe de photosensibilité du photo-détecteur sans filtrage. L'impact du filtrage est représenté par une courbe alignée sur la longueur d'onde exploitée, visualisant de façon graphique la réduction de la largeur de bande spectrale au détriment d'une atténuation du signal utile également représentée.

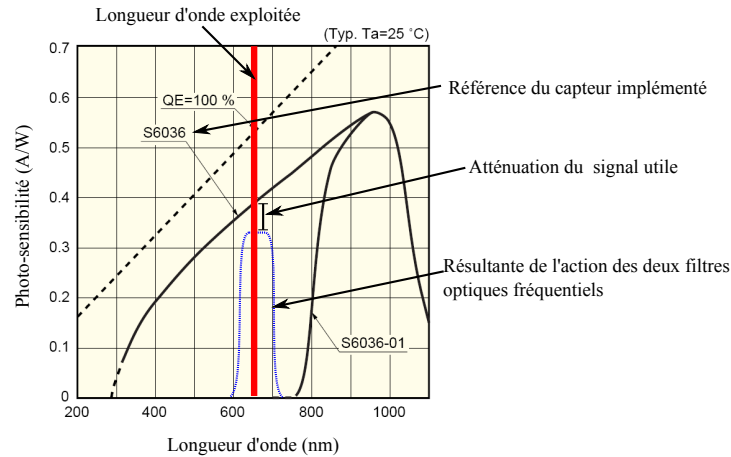


FIGURE 3.23 – Spectre de sensibilité équivalent de la photodiode avec filtres optiques

Afin de réduire davantage cette quantité de lumière non désirée, un filtre spatial peut être implémenté. La figure 3.24 illustre l'impact de ce filtre en fonction de la taille de cible, de la zone d'impact des faisceaux lasers ainsi que la distance minimale de détection désirée permettant d'exploiter 100% de la surface du capteur. Sur cette figure est également représentée en arrière plan la caractéristique de sensibilité angulaire sur laquelle agit le filtre spatial.

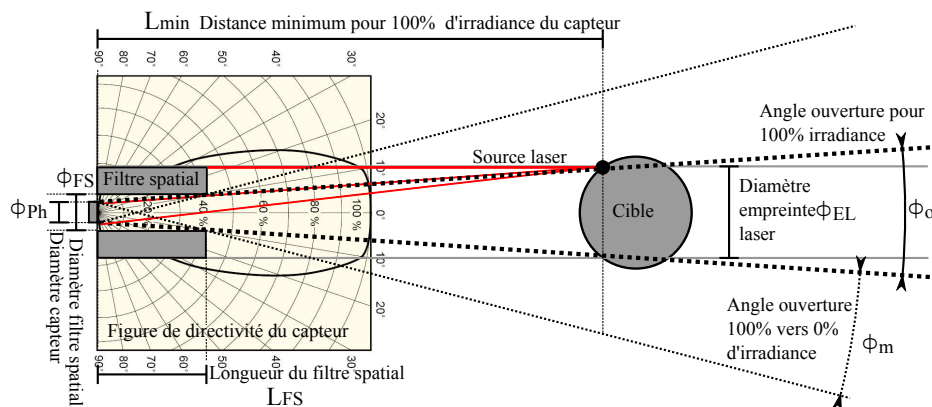


FIGURE 3.24 – Modèle géométrique du filtre spatial

Un premier dimensionnement du filtre spatial peut être abordé en ayant comme critère de rendre accessible 100% de la surface sensible du capteur. Dans cette première hypothèse simplificatrice, une première optimisation consiste à minimiser les angles ϕ_o et ϕ_m donnés par les expressions 3.29 et 3.30 tout en respectant les contraintes dimensionnelles imposées par la distance $D_{\min}$ décrite par l'expression 3.31 et par le cahier des charges.

Dans le cas d'un besoin de dimensionnement plus exigeant, une optimisation des dimensions

du filtre spatial peut-être envisagée pour la zone comprise entre ϕ_o et ϕ_m . Celle-ci correspond à l'occultation progressive de la surface sensible du capteur. Si cette zone a besoin d'être exploitée, il devient donc nécessaire de prendre en compte le modèle de réceptivité du détecteur couplé avec le modèle de réflectivité de la cible⁹.

$$\phi_o = 2 \cdot \arctan \left(\frac{\phi_{FS} - \phi_{Ph}}{2 \cdot L_{FS}} \right) \quad (3.29)$$

$$\phi_m = \arctan \left(\frac{\phi_{Ph} + \phi_{FS}}{2 \cdot L_{FS}} \right) - \frac{\phi_o}{2} \quad (3.30)$$

$$D_{min} = \frac{\phi_{EL}}{2 \cdot \tan(\phi_o)} \quad (3.31)$$

avec :

- ϕ_o : angle d'ouverture pour 100% d'irradiance du capteur,
- D_{min} : distance minimum de détection permettant de bénéficier de toute la surface du capteur,
- ϕ_m : angle d'ouverture pour 100% vers 0% d'irradiance du capteur,
- ϕ_{FS} : diamètre du filtre spatial,
- L_{FS} : longueur du filtre spatial,
- ϕ_{Ph} : diamètre de la surface sensible du photo-détecteur,
- ϕ_{EL} : diamètre du cercle décrit par l'empreinte laser.

A titre d'illustration de l'influence des techniques de filtrage optique spatial, teinté et interférentiel, quelques relevés de photo-mesures sont réalisés. Un oscilloscope mesure la tension électrique générée par le pré-amplificateur du photo-détecteur du prototype dans les conditions du montage décrit par la figure 3.25. Les mesures sont effectuées en présence de lumière artificielle générée par un néon alimenté sur le secteur 220 V/50 Hz. Celle-ci fera apparaître un signal sinusoïdal de valeur absolue de fréquence égale à 100 Hz. La figure 3.26 présente le résultat brut ainsi que les différentes interprétations de la composition des signaux avec et sans filtrage optique. Afin de mieux mettre en évidence l'influence des filtrages sur les bruits mais aussi sur la qualité du signal utile, une série de mesure est effectuée et résumée dans le tableau 3.5.

Ces mesures montrent que le cumul de ces trois technologies de filtrage atténuent jusqu'à plus de 90 % la composante provoquée par la lumière artificielle de type Néon. La conséquence est que la capture d'un signal utile est effectuée dans une plage électrique en-dessous du seuil de saturation (fig :3.26) de l'étage de pré-amplification. Cette marge correspond à la colonne " $P_{satur} - P_{max}$ ". Ainsi, potentiellement, le gain d'amplification est augmenté et le signal utile est extrait du bruit thermique afin de tomber dans les conditions optimums dites de bruit de grenaille limitant ou "shot noise limited"¹⁰. Un autre constat, qui coïncide avec la figure 3.23, est l'atténuation du signal utile comme indiquée par la colonne "signal C-C".

9. voir le paragraphe 2.1.3

10. voir la section 2.1.1.2 pour la description des différents bruits

Filtrage	Max Néon μW	Atté. %	signal C-C μW	$P_{\text{satur}} - P_{\text{max}}$ μW
Sans	417	0	64	86
Spatial (FS)	181	57	64	322
Passe-haut (PH)	153	63	59	352
Passe-bas (PB)	263	37	64	240
(PB+PH+FS)	35	92	55	472
Atté. (PB+PH+FS)	92%	-	14%	-

TABLE 3.5 – Influence des méthodes de filtrage optique en éclairage intérieur

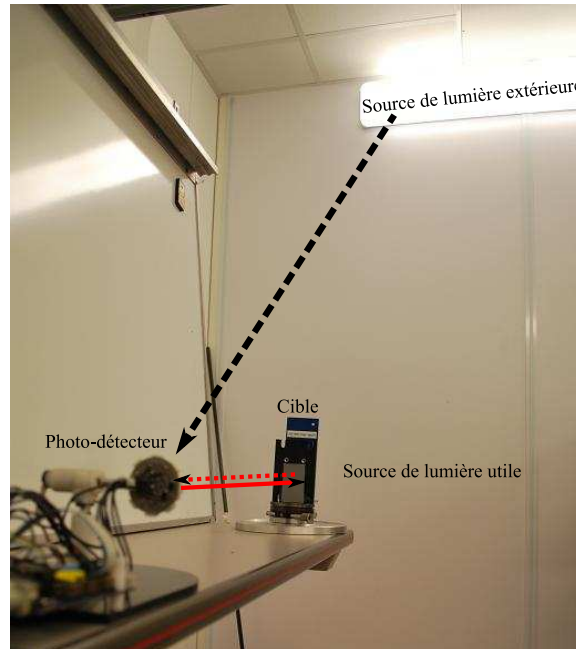


FIGURE 3.25 – Conditions expérimentales pour la mesure de bruit

A partir des différences entre la répartition spectrale de la lumière artificielle et naturelle¹¹, il est nécessaire d'adapter les paramètres de filtrage optique en fonction du milieu dans lequel va évoluer le dispositif. Dans certains cas, il peut être intéressant de déployer d'autres technologies de filtrage optique telle que la polarisation. Ce choix atténue l'influence de la lumière environnementale dans la mesure du signal utile, afin de conserver un rapport signal sur bruit en adéquation avec les contraintes de robustesse de détection attendues.

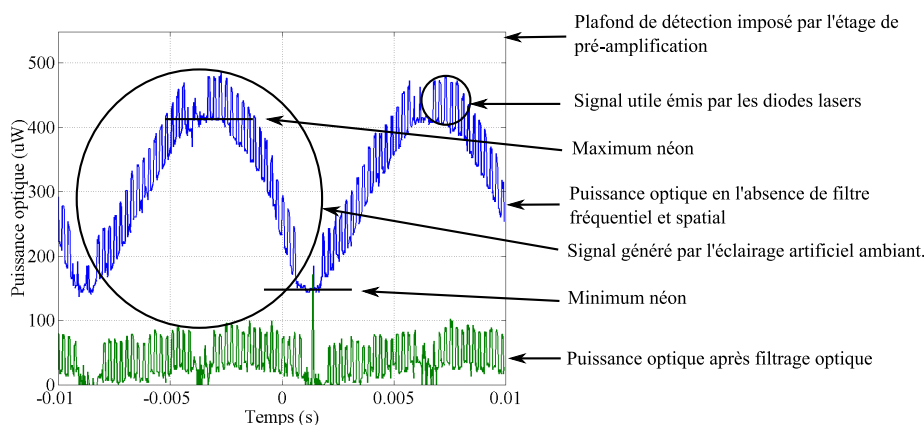


FIGURE 3.26 – Puissance optique mesurée par la photodiode

L'extraction du signal utile est assurée par une méthode de détection synchrone implémentée en langage C dans un micro-contrôleur, par l'intermédiaire d'un convertisseur analogique numérique de 12 bits à la cadence de 100 Ks/S. Cette approche effectue un filtrage de type passe-bande avec un coefficient de sélectivité supérieur aux méthodes de filtrage passe-bande traditionnelles. Cette approche est particulièrement préconisée dans les cas où de faibles signaux sont perdus dans le bruit. Cependant, l'implémentation de cette méthode n'est possible que lorsque les signaux reçus et émis sont synchronisés. Dans le cas étudié, les signaux étant générés et traités par le même contrôleur numérique (figure 3.9), la synchronisation est garantie à condition de prendre en compte la variation de la phase dans l'espace de propagation en fonction de la fréquence de modulation et de la portée du système¹². Dans notre cas de figure, les temps d'expositions lumineux et de traitement sont bien supérieurs aux variations du retard de la lumière dues à sa propagation. A titre d'exemple, pour une distance de 4 mètres, le temps nécessaire à la lumière pour parcourir cette distance sera de 26 ns. Or, la durée d'impulsion est de 467 μ s soit 18000 fois supérieur, ce qui rend négligeable ce paramètre.

3.2.2 Mesure globale

La partie précédemment étudiée présente un dispositif pour la mesure de position locale. Il est entendu par "position locale" le champ restreint à la zone d'impact des faisceaux lasers. Cette partie sur la mesure globale présente un second dispositif qui a pour fonction l'orientation de la

11. Voir paragraphe 2.1.2.2

12. voir la section 2.2.3 traitant de la télémétrie par mesure de phase

tête optique, afin de réaliser une poursuite de cible avec un champ de vision étendu. Un dispositif de mesure globale se caractérise par son champ de déplacement, comme déjà évoqué, mais elle se caractérise également par sa résolution, sa précision et ses performances dynamiques. Afin d'exploiter au maximum les performances mais également pour compenser les actions extérieures appliquées sur le système, un asservissement est réalisé.

3.2.2.1 Approche générique

Idéalement, le modèle dynamique d'un système mécanique complexe en mouvement peut être décrit par l'équation 3.32. Il relie les accélérations angulaires aux efforts extérieurs.

$$M\ddot{\theta} + B\dot{\theta}^2 + g = C \quad (3.32)$$

avec :

- M : la matrice des inerties,
- B : la matrice des coefficients des forces centrifuges et de Coriolis,
- g : la matrice décrivant la gravité,
- C : la matrice des couples appliqués,
- $\ddot{\theta}$: l'accélération angulaire de l'axe concerné,
- $\dot{\theta}$: la vitesse angulaire de l'axe concerné.

Ce type de modèle peut être obtenu à partir des équations de Lagrange et convient particulièrement pour l'étude de robot série possédant de nombreux degrés de liberté engageant des charges variables et soumis à de grandes dynamiques. Dans le cas étudié, où seulement deux axes sont employés, il est choisi d'opérer un contrôle à l'aide de deux boucles d'asservissements isolées simplifiant le modèle. Les seules variations de charges présumées sont celle ressenties par la gravité et l'influence du câblage qui seront également négligées dans cette étude. Celles-ci peuvent cependant devenir prépondérantes dans certaines configurations mécaniques même basées sur deux axes.

Afin de représenter de manière graphique l'organisation de cet asservissement, la figure 3.27 propose un schéma bloc global. Ce schéma décrit les relations entre les signaux d'entrées et les signaux de sorties ainsi que les fonctions de correction de cet asservissement. Ainsi, les variables d'entrées sont la position locale de consigne identifiée par P_eLoc ainsi que la position de la cible dans l'espace identifiée par P_eCible . Les blocs MGD pour "Modèle Géométrique Direct" et MGI pour "Modèle Géométrique Inverse" correspondent aux modèles de transfert entre les grandeurs des domaines cartésien et articulaire.

L'étage d'actionneur de mesure globale est représenté par la fonction de transfert noté $H_1(p)$ dont le détail de la modélisation dépend du dispositif choisi et sera abordé dans la sous-section suivante à titre d'illustration. Comme pour tous les asservissements, il est nécessaire d'implémenter des correcteurs agissant sur les performances du système en fonction du cahier des charges. Ce cahier

des charges doit fournir des informations sur les critères de temps de réponse, de précision statique et de précision dynamique en fonction du besoin. Ces correcteurs sont identifiés par le bloc $C_1(p)$ et $C_2(p)$. Concernant les grandeurs manipulées, en raison du caractère pivotant des actionneurs, il est choisi de réaliser un asservissement de position angulaire à l'aide d'une boucle de vitesse à l'intérieur d'une seconde boucle de position. La boucle fermée de vitesse utilise les encodeurs articulaires propres aux actionneurs, alors que la boucle de position est réalisée à l'aide de la tête optique précédemment décrite dans le paragraphe 3.2.1. Cette configuration en double boucle est particulièrement adaptée lorsqu'il est question de compenser les variations de deux grandeurs. En effet, dans le cas de figure traité ici, le mouvement de la plate-forme constitue une première grandeur et le mouvement de la cible en représente une seconde. En fonction des performances attendues, cette boucle de vitesse bas niveau peut se révéler superflue et peut représenter une économie de ressources de calcul. En revanche, les codeurs angulaires des axes doivent être exploités afin de fournir l'information de position globale attendue.

Sur cette figure, la grandeur de sortie est identifiée par le point O_4 qui correspond à la position de la cible que l'on souhaite mesurer. Les grandeurs géométriques évoquées sur cette figure sont celle précédemment employées dans la figure 3.2.

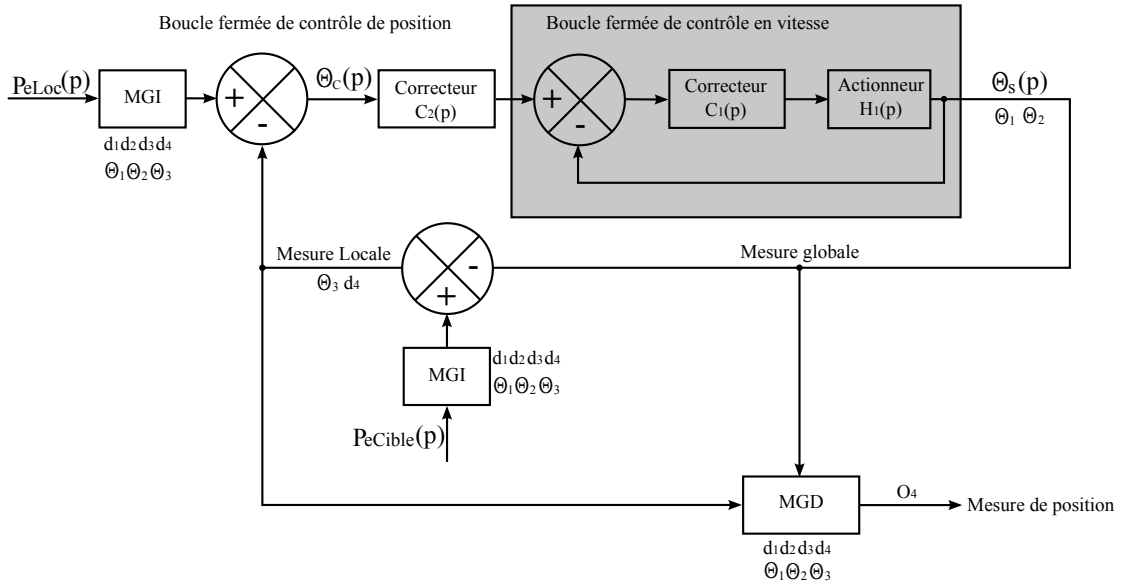
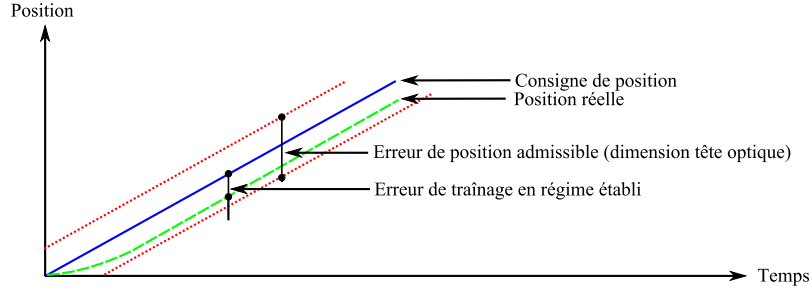


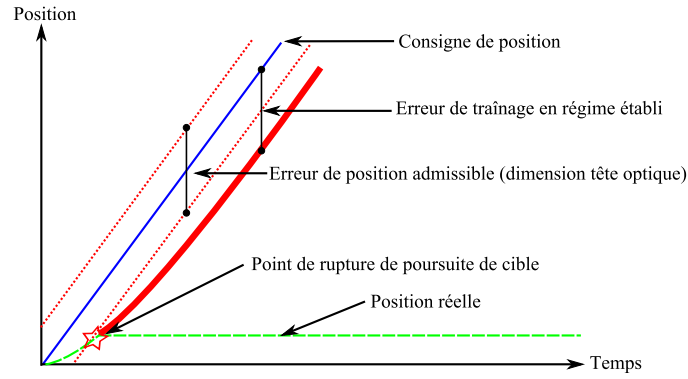
FIGURE 3.27 – Schéma de bouclage

Concernant les performances attendues de cet asservissement, il doit offrir le meilleur temps de réponse possible ainsi qu'une erreur de position statique et dynamique (erreur de traînage) qui ne doit jamais dépasser une certaine valeur au risque de perdre de vue la cible. La conséquence est, par exemple, une interruption de l'action de poursuite. Cette valeur, contraignante pour les performances, correspond à la zone de scrutation locale et se traduit en pratique par l'absence de collision entre la cible et l'une des sources lasers du dispositif de mesure locale.

A titre d'illustration, la figure 3.28 permet de visualiser la notion d'erreur de traînage entre une consigne de position de type rampe et la position réelle des actionneurs. Avec cette figure, l'impact

FIGURE 3.28 – Erreur de traînage tolérée pour $\alpha = 1$

de la dimension de la tête optique sur l'erreur de position admissible est visualisé. Dans le cas présenté, la pente de vitesse satisfait la condition de fonctionnement. En revanche, la figure 3.29 illustre le cas contraire où la pente de vitesse est trop élevée et conduit à une rupture de l'action de poursuite.

FIGURE 3.29 – Erreur de traînage non tolérée pour $\alpha = 1$

Le comportement de l'erreur de traînage est différent selon la nature du système et de ses composantes de correction. Les expressions 3.33, 3.34 et 3.35 ont pour vocation de rappeler, à l'aide du formalisme de Laplace, l'erreur de traînages en fonction de la fonction de transfert rationnelle intégrant à la fois le système et ses correcteurs.

$$FTBO(P) = K \cdot G(P) = \frac{K \cdot N(P)}{P^\alpha \cdot D(P)} \quad (3.33)$$

$$FTBF(P) = \frac{K \cdot N(P)}{P^\alpha \cdot D(P) + K \cdot N(P)} \quad (3.34)$$

$$\varepsilon(P) = \frac{P^\alpha \cdot D(P)}{P^\alpha \cdot D(P) + K \cdot N(P)} \cdot E(P) \quad (3.35)$$

avec :

- FTBO : Fonction de Transfert Boucle Ouverte,
- FTBF : Fonction de Transfert Boucle Fermée,

- K : gain,
- α : classe,
- $N(P)$: polynôme en P au numérateur,
- $D(P)$: polynôme en P au dénominateur,
- $\varepsilon(P)$: erreur de position,
- $E(P)$: entrée du système

Basé sur le théorème de la valeur finale décrit par l'expression 3.36, le tableau récapitulatif résume le type d'erreur et le comportement de cette erreur en régime établi en fonction du degré α identifiant le nombre de termes intégrateurs dans la fonction de transfert. Avec ce tableau, le degré d'intégration en fonction des contraintes d'erreur de position décrite par les performances attendues, peut être choisi. Plus le degré α est important, plus l'erreur de position en régime établi est réduite en fonction des contraintes dynamiques. Cette précision obtenue sera cependant au détriment de la stabilité du système dont la modification du temps de réponse sera nécessaire afin de fournir l'amortissement nécessaire. Cette perte de stabilité s'explique par l'ajout d'une phase de 90° pour chaque intégrateur ajouté, réduisant ainsi la marge de phase.

$$\varepsilon_s(P) = \lim_{P \rightarrow 0} [P \cdot \varepsilon(P)] = \lim_{P \rightarrow 0} \left[\frac{P^{\alpha+1} \cdot D(P)}{P^\alpha \cdot D(P) + K \cdot N(P)} \cdot E(P) \right] \quad (3.36)$$

$E(P)$	$\alpha = 0$	$\alpha = 1$	$\alpha = 2$	$\alpha > 2$
Echelon $\frac{a}{P}$	$\frac{a}{1+K}$	0	0	0
Rampe $\frac{a}{P^2}$	∞	$\frac{a}{K}$	0	0
Parabole $\frac{2a}{P^3}$	∞	∞	$\frac{2a}{K}$	0

TABLE 3.6 – Erreur statique et dynamique en fonction de la classe du système et du type d'entrée

En plus du compromis précision/stabilité, la figure 3.30 illustre un cas de figure où le choix de la précision n'est pas valorisé en raison de la constante de temps de l'action intégrale. Celle-ci n'a pas permis de supprimer l'erreur de trainage dans la phase transitoire et a conduit le dispositif à une rupture de fonctionnement.

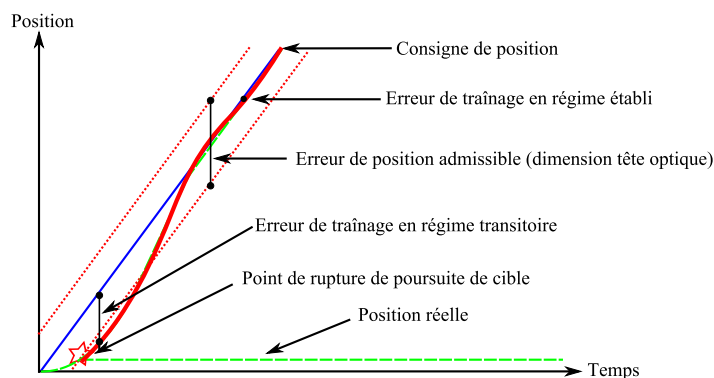


FIGURE 3.30 – Erreur de trainage non tolérée pour $\alpha = 2$

En plus du caractère dynamique et des paramètres d'asservissement, la valeur de l'erreur de traînage de rupture est une fonction de la taille de la plage de mesure du dispositif local et de la distance à laquelle se situe la cible. Ainsi, la figure 3.31 illustre le comportement de l'erreur de traînage admissible dans le cas d'une plage de mesure locale de 70 mm et de 35 mm. Sont représentés également deux seuils correspondants à l'erreur de traînage générée par le déplacement d'une cible à la vitesse angulaire V_1 et pour une vitesse 3 fois plus élevée. L'intersection des courbes et des seuils déterminent le point de fonctionnement du dispositif de poursuite. Ainsi, on peut déduire que pour un capteur local de 70 mm de champ de mesure, la portée de fonctionnement est de ≈ 3500 mm pour V_1 mais tombe à ≈ 1200 mm pour une vitesse trois fois plus élevée.

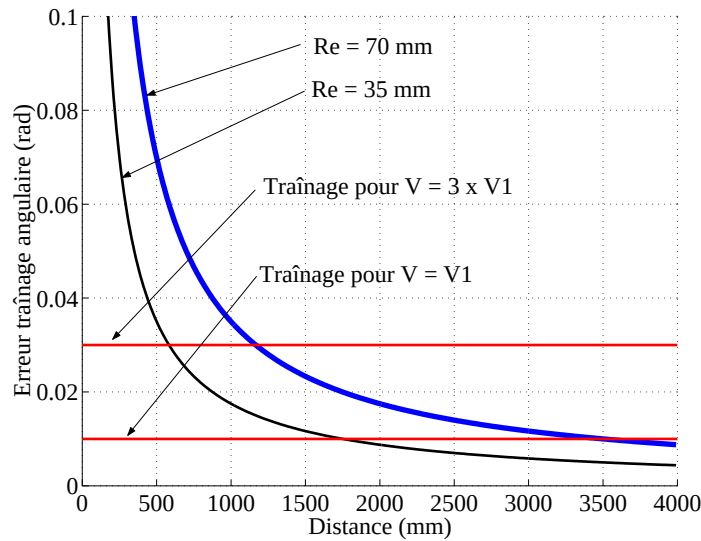


FIGURE 3.31 – Erreur de traînage de rupture de fonctionnement en fonction de la distance

Le choix du type de correcteur doit donc être utilisé à bon escient en fonction des spécifications cinématiques de la cible. Afin de privilégier de fortes accélérations pour de faibles vitesses, il peut devenir stratégique de privilégier des systèmes de classe $\alpha = 1$ optimisant le temps de réponse au détriment d'une erreur qui ne pose pas de problème particulier tant qu'elle reste dans la plage d'erreur admissible. Dans le cas contraire, où de fortes vitesses sont recherchées mais basées sur de faibles accélérations, il devient intéressant d'augmenter la classe du système à $\alpha = 2$ voir 3 afin d'annuler l'erreur de position quelle que soit la vitesse. Une piste d'optimisation pourrait consister à implémenter un asservissement adaptatif en fonction de la dynamique de la cible mais ce travail ne sera pas traité dans le cadre de ces travaux de thèse.

3.2.2.2 Exemple d'implémentation à l'aide de moto-réducteur

L'objectif de cette démonstration est d'évaluer les performances de la configuration choisie, et de tenter de se rapprocher d'une fonction de transfert connue, tout en mettant en avant de manière qualitative les comportements physiques conditionnant cette fonction de transfert. Cette fonction de transfert correspond au bloc $H_1(p)$ telle que décrit dans le schéma-bloc 3.32.

La figure 3.32 propose le schéma bloc de contrôle-commande correspondant avec l'hypothèse supplémentaire que la position locale désirée P_{eLoc} soit toujours égale à zéro. En effet, cette condition se traduit par le désir de voir le dispositif pointer systématiquement au centre de la cible. Dans le cas de l'asservissement, et afin de simplifier considérablement l'implémentation de ce dernier dans un contrôleur bas-coût n'ayant pas les capacités de résoudre dynamiquement des modèles inverses complexes, ce modèle peut être considéré comme équivalent, lorsque le déport d_2 devient suffisamment petit devant d_3 , selon le modèle géométrique présenté avec la figure 3.2. Cependant, il convient de continuer à calculer la grandeur de sortie O_4 , en empruntant le MGD réel pour ne pas dégrader la fidélité de la mesure. Dans ce schéma équivalent, le bloc MGI a été réduit et repose désormais sur d_3 qui est la distance mesurée par le dispositif de télémétrie.

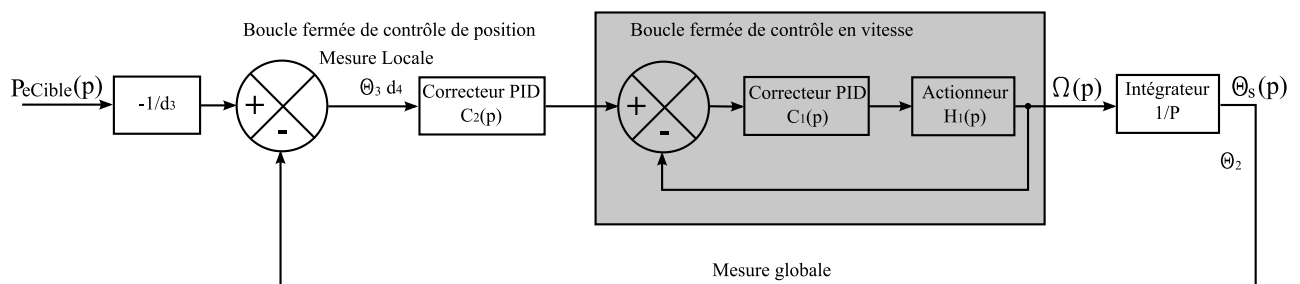


FIGURE 3.32 – Schéma de bouclage réduit et consigne locale de position nulle

La technologie d'actionnement utilisée pour ce premier prototype, est l'actionnement par moteur à courant continu en raison des bons rapports entre performance dynamique, plage de mesure, coût, et disponibilité. La configuration cinématique choisie donne deux degrés de liberté en rotation à la tête optique (figure 3.8). Ce montage scrute un volume sphérique tel que décrit par le modèle géométrique et présenté dans le paragraphe 3.1. Dans la configuration décrite, les axes de rotation ne sont pas co-localisés et laissent apparaître une zone inaccessible comme déjà abordée à l'occasion de la figure 3.5. Une conception co-localisée constitue un premier axe d'optimisation, mais au prix d'une certaine complexité. Ce choix est écarté pour la réalisation de ce premier prototype de validation de concept.

Les actionneurs choisis sont deux moteurs à balais de marque Faulhaber et de référence 1524SR d'une puissance de 1.75 W. Afin d'adapter le couple et la vitesse de rotation, un réducteur à engrenages précontraints d'un rapport de 1/76 est utilisé. La position angulaire de l'axe moteur est connue grâce à un codeur magnétique de 512 points, donnant une résolution angulaire en sortie de réducteur de $2.312 \cdot 10^{-3}$ degré/pas. La spécificité de ces moto-réducteurs réside dans l'usage de réducteurs précontraints qui permettent de supprimer le jeu axial, donnant ainsi une maximum de fidélité entre la position de l'axe moteur et l'axe de l'effecteur, malgré la présence d'un jeu d'engrenages. La conséquence néfaste reste cependant un rendement pouvant se dégrader de près de 50% et un comportement à basse vitesse laissant apparaître beaucoup de frictions.

De manière générique, un moteur électrique peut être décrit par l'expression 3.37.

$$\Omega_m(P) = \frac{\frac{K_t}{K_t K_e + R f}}{1 + \frac{R J_e + L f}{K_t K_e + R f} P + \frac{L J_e}{K_t K_e + R f} P^2} \cdot U(P) - \frac{\frac{R + L P}{K_t K_e + R f}}{1 + \frac{R J_e + L f}{K_t K_e + R f} P + \frac{L J_e}{K_t K_e + R f} P^2} \cdot C_r(P) \quad (3.37)$$

- $\Omega_m(P)$: La vitesse angulaire en sortie d'axe en Rad/s
- K_e : Le coefficient de force électro-motrice en V/(Rad/s)
- K_t : Le coefficient de couple en N.m/A
- R : La résistance électrique interne en Ω
- f : Le coefficient de frottement en N.m/(Rad/s)
- L : L'inductance en H
- J : L'inertie en Kg.m²
- $C_r(P)$: Les couples extérieurs appliqués en N.m
- $U(P)$: La tension électrique appliquée en V

Le constructeur du moteur fournit une partie de ces informations mais il reste cependant à déterminer l'inertie J , le coefficient de frottement f , et la fonction de couple perturbateur $C_r(P)$ qui sont des paramètres qui dépendent de la configuration du système.

Afin d'identifier le gain, l'ordre, et la marge de phase du système, une analyse fréquentielle est effectuée reposant sur la configuration expérimentale décrite à l'aide de la figure 3.33. Cette figure fait apparaître les différents sous-systèmes permettant de traiter les informations d'entrées et de sorties, comme déjà abordés à l'occasion de la figure 3.9. Ainsi, sont représentés les convertisseurs numériques/analogiques 12 bits, le codeur incrémental du moteur ainsi que l'amplificateur précédant le moteur. La fréquence d'échantillonnage est de 1700 Hz.

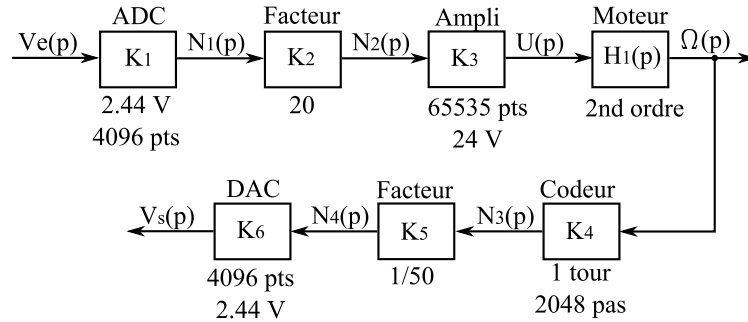


FIGURE 3.33 – Configuration de la mesure.

Les expérimentations d'analyses fréquentielles sont conduites à l'aide d'un signal sinusoïdal d'amplitude égale à la moitié de la tension nominale des moteurs, 12 V, la fréquence est balayée de 0.5 Hz à 500 Hz. Les résultats sont donnés par la figure 3.34 pour la réponse en gain, et la figure 3.35 pour la réponse en phase. Sur ces deux courbes sont superposées la réponse pour le moteur en position basse et la réponse pour le second moteur en position haute du prototype. Une troisième courbe est superposée et propose un modèle du second ordre de la forme donnée par l'expression 3.38. Cette courbe met en avant que le modèle du second ordre traditionnellement choisi pour le moteur n'est pas applicable ici.

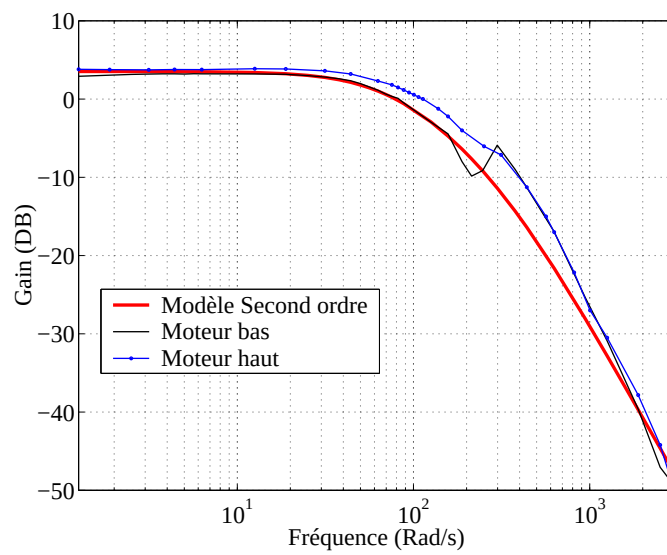


FIGURE 3.34 – Diagramme fréquentiel de gain en boucle ouverte.

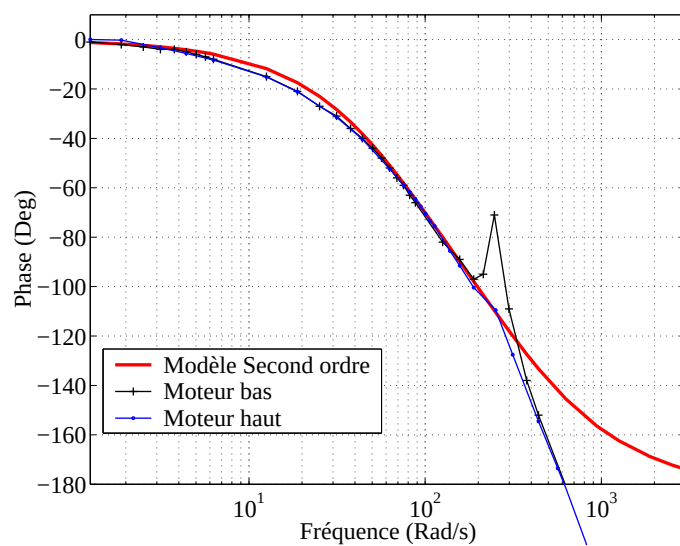


FIGURE 3.35 – Diagramme fréquentiel de phase en boucle ouverte.

$$H_1(p) = \frac{K_M}{1 + \frac{2\xi}{\omega_0}p + \frac{1}{\omega_0^2}p^2} \quad (3.38)$$

Avec cette première analyse, les deux gains statiques, les fréquences de coupure pour -3 dB d'atténuation et enfin, la valeur de marge de phase et de gain permettant d'évaluer la stabilité intrinsèque du système sont obtenus. Une marge de 45° pour la phase et -10 dB, sont considérés comme des valeurs usuelles assurant une bonne marge de sécurité afin d'éviter l'instabilité. L'ensemble de ces valeurs est consigné dans le tableau 3.7. Bien que les moteurs soient identiques, les performances obtenues sont différentes. Cette différence s'explique par le fait que la configuration mécanique n'est pas similaire. En effet, le moteur bas est celui qui doit entraîner en rotation le moteur haut, lui-même engendrant le mouvement de la tête optique. En conséquences, l'inertie est plus importante pour le moteur bas, et la bande passante est plus faible. De plus, le constructeur ne garantit pas une très bonne répétabilité dans le montage de ces réducteurs précontraints et annonce un rendement pouvant atteindre les 50 %. Concernant l'ordre du système, la courbe de gain laisse présumer un ordre supérieur à 2 en raison des -45 dB/décades. Cette hypothèse est confirmée par la courbe de phase qui permet d'affirmer que le déphasage maximum dépasse les 180°, ce qui correspond à un système au minimum d'ordre 3.

	Gain statique	Pente	Puls. de coupure -3 dB	Marge phase	Marge gain
Mot. haut	3.7 dB	-45 dB/Déc	140 rad/s 22 Hz	118°	17 dB
Mot. bas	2.9 dB	-45 dB/Déc	110 rad/s 17 Hz	105°	17 dB

TABLE 3.7 – Tableau récapitulatif en boucle ouverte

Au delà des valeurs génériques qui viennent d'être extraites, ce relevé fréquentiel présente une spécificité qu'il convient de signaler. En effet, entre les pulsations 200 rad/s et 400 rad/s, un pic de gain de l'ordre de 5 dB apparaît, coïncidant avec un retour de phase de près de 20°. En constatant que ce comportement est propre au moteur bas et en ayant observé une vibration assez nette de la tête optique pendant l'expérience, ce comportement résonnant est très probablement attribué à la configuration masse-ressort de la tête optique et de sa fixation.

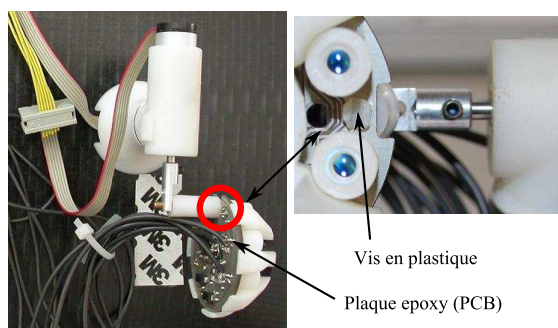


FIGURE 3.36 – Fixation de la tête optique

Comme le montre la photo 3.36, la fixation est assurée par une vis en plastique reposant sur une faible surface de l'extrémité du PCB supportant les composants de la tête optique. Le PCB et le

nylon de la vis ayant tous deux une faible raideur devant celle du métal, cette configuration est propice aux déformations lorsqu'elle soumise à des contraintes d'inertie. Aux alentours de 35 Hz, la faible surface de contact entre le tête de la vis et le PCB laisse à penser que la fixation n'est effectivement pas adéquate. Par rapport au modèle de l'équation 3.37, ce type de comportement est considéré comme un couple résistant extérieur à la chaîne de mesure donc, dans la variable $C_r(P)$. Une nouvelle mesure fréquentielle avec la tête optique déposée serait un bon moyen de confirmer cette hypothèse mais la caractérisation mécanique de la plate-forme ne constituant pas le cœur de la problématique, il est délibérément choisi de ne pas approfondir cette étude.

Afin de compléter cette première analyse, deux mesures sont effectuées dans le domaine temporel et représentées par les figures 3.37 pour une excitation sinusoïdale et la figure 3.38 pour la réponse à un échelon.

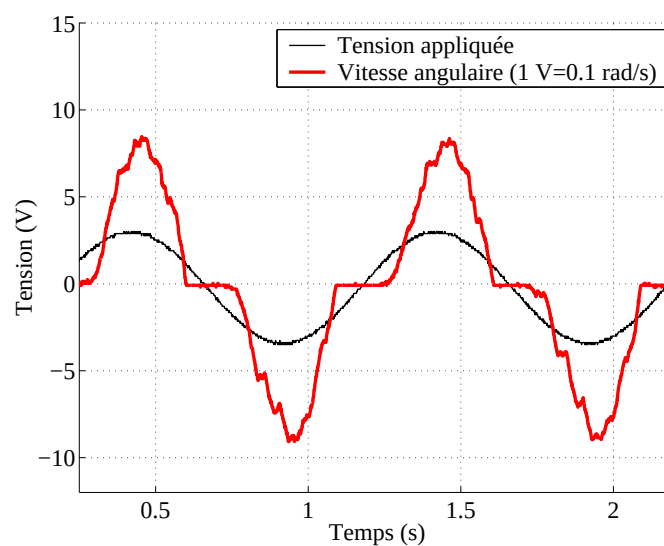


FIGURE 3.37 – Réponse en vitesse du moto-réducteur bas à une tension sinusoïdale

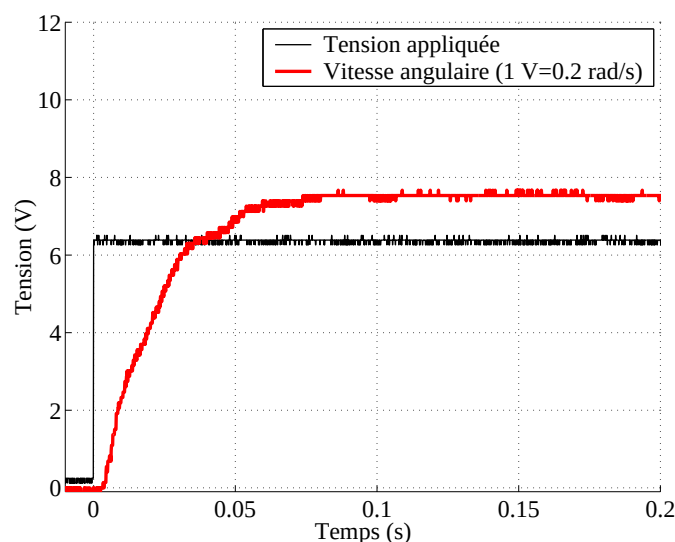


FIGURE 3.38 – Réponse à un échelon de vitesse en boucle ouverte

La mesure expérimentale 3.37 effectuée sur le moteur bas met en évidence l'influence du frottement sec. En effet, aux alentours de 0 V, le moteur ne tourne plus jusqu'au franchissement d'un seuil de tension. Connaissant la résistance interne du moteur et son coefficient de couple, il est alors possible de calculer le couple mécanique nécessaire pour vaincre cette force de friction appelée frottement sec. Concernant la réponse à un échelon de vitesse, la figure 3.38 permet d'illustrer la notion d'écart de vitesse une fois le régime établi.

Avec ces premières expérimentations, les caractéristiques et les défauts de la plate-forme motorisée développée pour ce prototype sont identifiés. Comme déjà évoqué, l'implémentation d'un asservissement optimise ces performances. C'est donc à l'aide d'un asservissement numérique, implémenté sur une carte du commerce de marque FIVECO, et de référence FMOD-I2CMOT 48/1.5, qu'une nouvelle série de mesures a été effectuée.

Dans un premier temps, les paramètres du correcteur PID¹³ sont ajustés dans le but d'obtenir le meilleur temps de réponse à 5 % et une erreur en vitesse nulle. Ce réglage est obtenu en observant la réponse à un échelon comme illustré par la figure 3.39. Cette figure présente une réponse en vitesse qui vient se superposer à la consigne, témoignant ainsi de l'action du correcteur intégrateur.

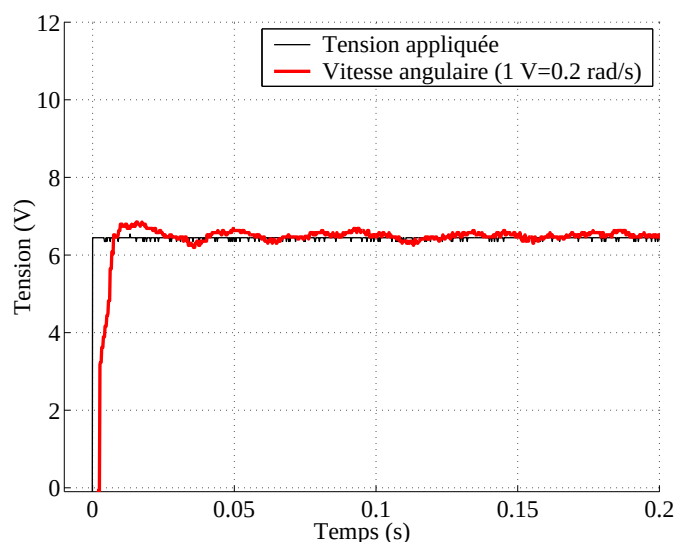


FIGURE 3.39 – Réponse à un échelon de vitesse en boucle fermée

Concernant le phénomène de friction abordé précédemment, l'asservissement a bien contribué à l'atténuation de ce handicap, comme le montre la mesure expérimentale 3.40. Cette figure montre que la courbe de consigne sinusoïdale est quasiment superposée avec celle de la réponse en vitesse du moteur. Le phénomène de frottement sec reste cependant perceptible, toujours aux alentours de la consigne de 0 V.

L'intérêt de l'asservissement est mis en évidence ici au travers de l'exemple du frottement sec, ce procédé permet également d'apporter des corrections aux effets liés à l'inertie, aux forces centrifuges, Coriolis, aux frottements visqueux ainsi qu'à l'action de la gravité sur le dispositif. A

13. PID : Proportionnel Intégral Dérivé

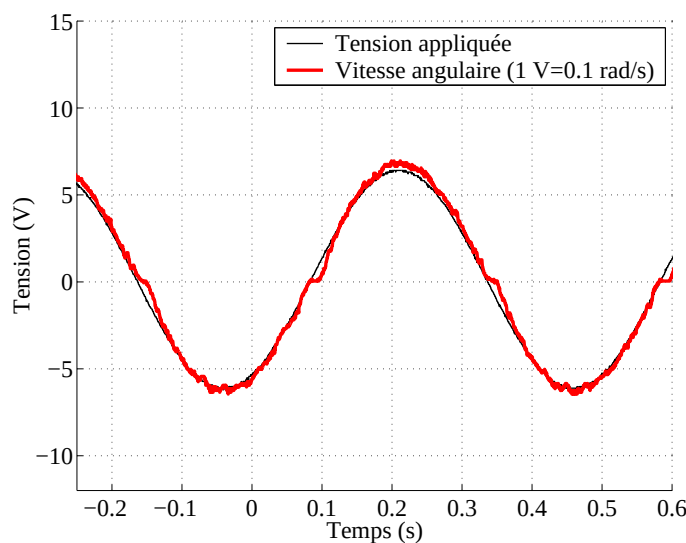


FIGURE 3.40 – Réponse en vitesse du moto-réducteur en boucle fermée

titre d'illustration, dans la configuration décrite précédemment, pour une tête optique mesurant 30 grammes et déportée de 25 mm par rapport à l'axe du moteur, la variation de couple résistant apportée par la gravité représente 7 % des 95 N.m de couple nominal. Le phénomène certainement le plus délicat à prendre en compte est le couple résistant, induit par le câblage partant de la tête optique. Pour limiter l'influence, des câbles souples multibrins, revêtus d'une gaine silicone sont préférés aux traditionnels câbles.

Un autre atout du contrôle de vitesse en boucle fermée, est le gain en bande passante, mis en évidence par une nouvelle série de mesures fréquentielles en gain et en phase illustrée par les figures 3.41 pour le gain et 3.42 pour la phase. La bande passante à -3 dB est passé d'environ 20 Hz à 63 Hz. En revanche, l'asservissement n'a pas permis d'atténuation significative du phénomène de résonance parasite lié à la fixation de la tête optique qui continu d'apparaître sous forme de pic d'absorption à 35 Hz. La sollicitation de cette plage de fréquence étant néfaste pour le fonctionnement normal de l'ensemble du dispositif en raison du déphasage induit par la flexibilité de la tête optique, la bande passante est artificiellement réduite à l'aide de l'implémentation de pentes d'accélération et de décélération proposée par la carte d'asservissement.

En guise de synthèse, le tableau 3.8 propose une sélection des grandeurs à retenir pour caractériser le dispositif de mesure global qui vient d'être décrit et évalué. La colonne spécification reprend les paramètres cinématiques et dynamiques du système assimilé à un ensemble unique mécanique+moteur+capteur+carte de commande.

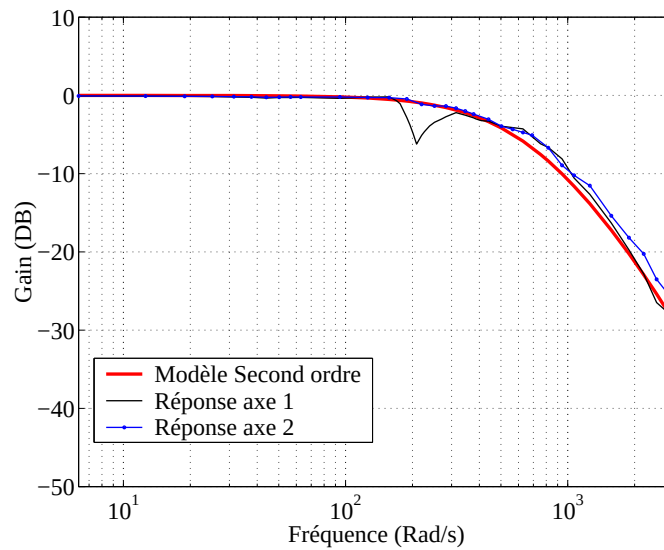


FIGURE 3.41 – Diagramme fréquentiel de gain en boucle fermée

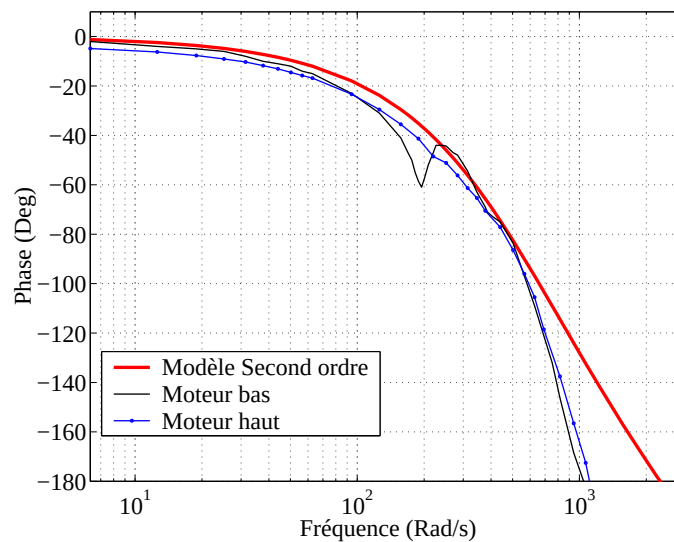


FIGURE 3.42 – Diagramme fréquentiel de phase en boucle fermée

Spécifications	Résultats	Facteurs critiques
Plage de déplacement	$\pm 180^\circ$	Dépendance aux câblages
Résolution	$2.312 \cdot 10^{-3}$ degré	Codeur + réducteur
Précision	-	structure méca + codeur
Vitesse (moteur à vide)	818 rad/s	Moteur + réducteur + structure méca
Accélération (moteur à vide)	1408 rad/s^2	Moteur + réducteur + structure méca
Bande passante optimale	68 Hz	moteur+structure méca
Bande passante bridée	30 Hz	moteur+structure méca
Taux de rafraîchissement	2000 Hz	Cartes de contrôle
Système et asservissement	Vitesse avec correcteur PID	ordre ≥ 3 et classe $\alpha = 1$

TABLE 3.8 – spécification de l'étage de poursuite global

3.3 Mesure couplée et performances

Cette section s'intéresse à l'évaluation des performances des deux sous-systèmes une fois couplés afin de mesurer la position d'une cible dans l'espace. Il est rappelé que le prototype exploité ne permettant pas la mesure de distance correspondant à la grandeur d_3 dans le modèle géométrique, cette mesure est évaluée manuellement et intégrée dans les calculs qui suivent.

3.3.1 Evaluation de la précision statique

Pour cette évaluation, nous cherchons à connaître la précision de mesure d'une cible statique en fonction de la distance.

L'évaluation de cette caractéristique est réalisée en effectuant manuellement un aller retour transversal de 20 mm. La précision du geste maître est de ± 0.5 mm. Pour une distance donnée et une position transverse donnée, le dispositif se stabilise et la position de la cible est relevée. L'expérience est répétée pour plusieurs distances. Les cibles utilisées sont des sphères de 40 mm et 50 mm recouvertes de papier rétro-réfléchissant 3M découpé à partir d'un vêtement de sécurité pour automobiliste.

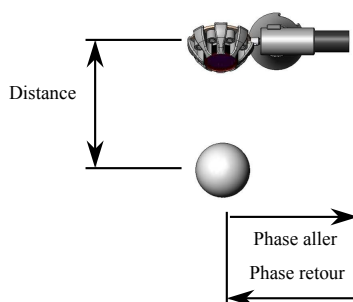


FIGURE 3.43 – Protocole de mesure de la précision statique

Le premier phénomène qui apparaît est une hystérésis. Exprimé différemment, il existe une portion où la cible se déplace mais le dispositif reste statique. D'autre part, ce premier graphique révèle que l'amplitude de la "zone morte" est plus faible pour la cible de 40 mm que celle de 50 mm.

La figure 3.45 représente l'erreur de position en fonction du même point mesuré. On retrouve le phénomène d'hystérésis aussi appelé zone morte dans ce chapitre. Pour la balle de 50 mm de diamètre et l'empreinte laser de 35 mm, la zone morte est évaluée à 12 mm et pour la balle de 40 mm, cet écart est ramené à 2 mm. Une première constatation peut-être faite : avec une balle-cible mesurant 10 mm de moins sur le diamètre, le gain de précision est de 10 mm.

La figure 3.46 résume les résultats obtenus en termes de précision, fonction de la distance et du diamètre de la sphère. Les courbes d'erreurs Max-Min B40 et Max-Min B50 démontrent que la sphère de 40 mm offre des précisions comprises entre 1 et 3 mm, pour des distances inférieures à 1500 mm. Au-delà, le système entre dans un mode d'oscillation lié au fait que l'ensemble des lasers

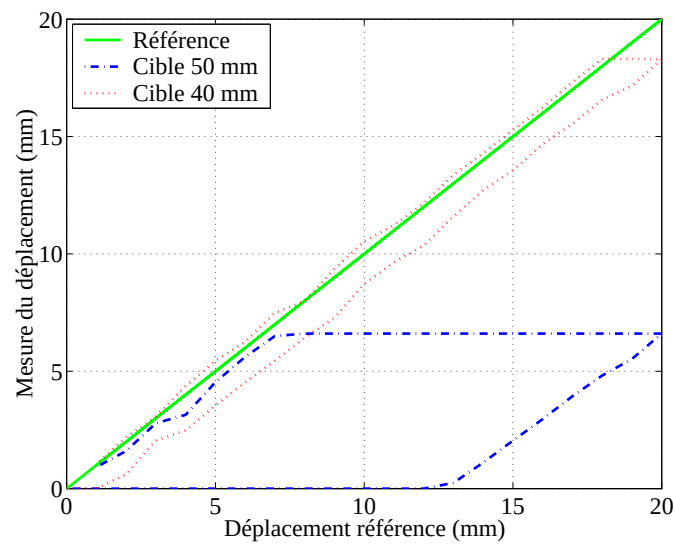


FIGURE 3.44 – Réponse en position à 500 mm de distance

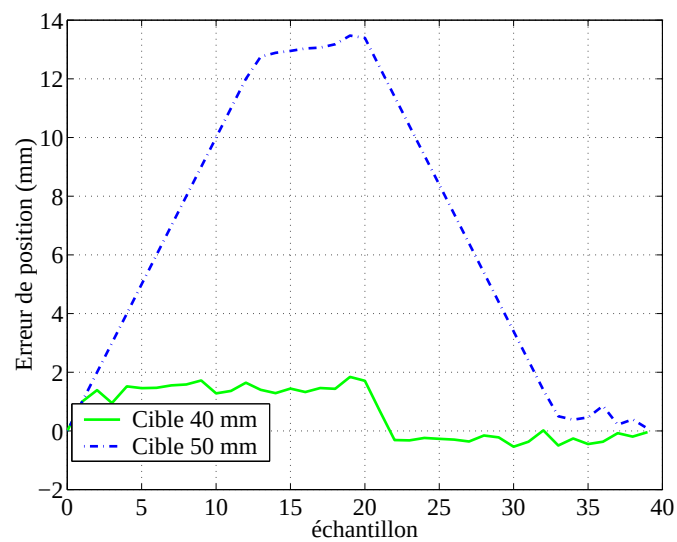


FIGURE 3.45 – Erreur de position pour une réponse à 500 mm de distance.

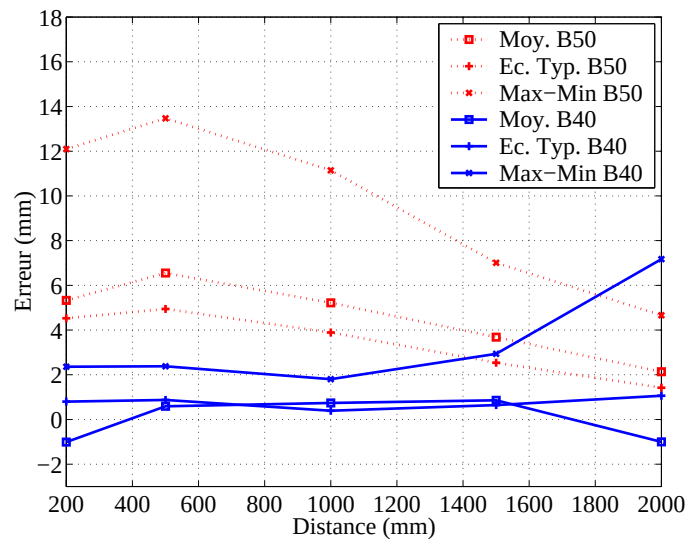


FIGURE 3.46 – Précision statique en fonction du rayon coopératif et distance.

ne parvient plus à détecter simultanément tous les points sur la cible à cause de la diminution du rayon coopératif. La cible de 50 mm devient alors plus adaptée.

Cette campagne de mesures confirme la mise en évidence d'une relation entre la géométrie de la cible, et la précision statique lorsqu'on utilise un réseau de sources lasers disposées en cercle. Plus la distance augmente, plus la quantité de lumière reçue par le capteur diminue, et rend critique l'angle d'incidence sur la cible, réduisant ainsi le cercle dit "coopératif". La conséquence de ce comportement est une précision, qui augmente avec la distance, jusqu'à une valeur critique où la cible n'est plus capable de renvoyer suffisamment de lumière pour détecter simultanément la présence des 8 sources lasers. Cette situation engendre une instabilité du dispositif. C'est ce phénomène qui explique une augmentation de l'erreur max-min pour la balle de 40 mm dans le relevé de la figure 3.46 à partir de 1000 mm.

En l'absence de spécification constructeur précise concernant la surface rétro-réfléchissante (initialement prélevée sur un vêtement de sécurité), une campagne de mesure faisant apparaître l'angle critique de détection en fonction de la distance permettrait de produire un abaque liant, diamètre de la cible sphère, distance de détection et précision statique.

3.3.2 Evaluation des performances dynamiques

3.3.2.1 Précision dynamique

Pour cette évaluation, nous cherchons à connaître la précision de mesure d'une cible en mouvement circulaire en fonction de sa distance et sa vitesse tangentielle. Le banc de test mis en œuvre est constitué d'un moteur, sur lequel est montée une barre rigide en carbone. La vitesse du moteur est consultée grâce à un encodeur incrémental connecté à un oscilloscope permettant d'effectuer une lecture de la vitesse angulaire par la mesure de la fréquence des signaux.

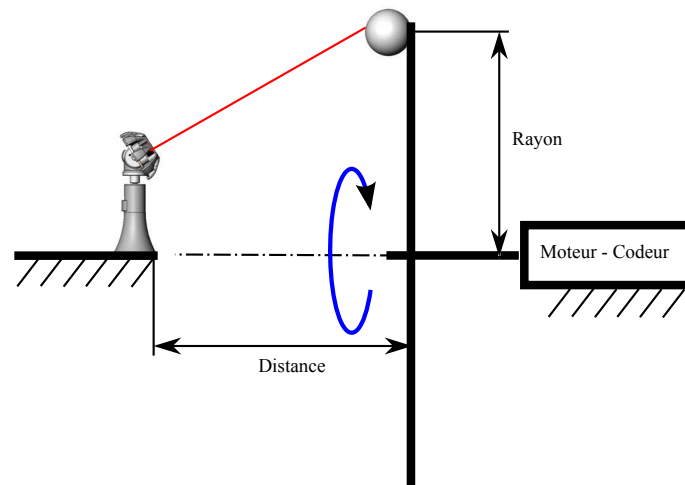


FIGURE 3.47 – Banc de mesure pour l'animation circulaire

Au démarrage, une initialisation de l'origine est effectuée, puis la cible entre dans un mouvement circulaire de rayon égal à 500 mm, à vitesse constante, engendrée par le moteur électrique. Les figures suivantes représentent l'estimation de l'erreur en soustrayant aux valeurs obtenues la valeur du rayon du cercle de référence. Ce montage donne une première idée de la fidélité du mouvement acquis et du comportement global. La figure 3.48 fait apparaître un cercle de référence sur lequel sont ajoutées les mesures de positions fournies par le dispositif de poursuite. Cette expérience est menée à une vitesse tangentielle de 55 mm/s et permet une première évaluation visuelle de la fidélité de la mesure de trajectoire.

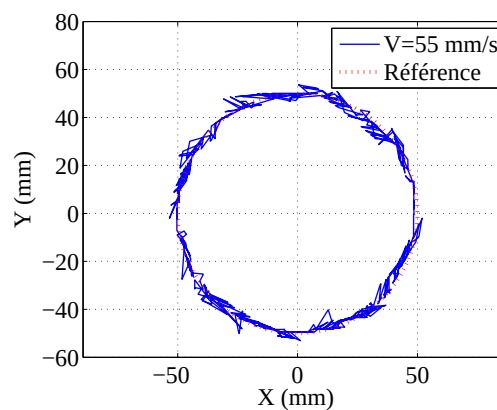


FIGURE 3.48 – Mesure à 55 mm/s

La figure 3.49 fait apparaître l'erreur de position de la plate-forme de poursuite globale, ainsi que l'erreur totale incluant les mesures de la tête optique permettant la mesure locale.

Cette expérience est reconduite pour deux autres vitesses, mais en conservant une distance de 300 mm et un rayon de 500 mm. La synthèse de ces trois expériences est représentée à l'aide de la figure 3.51. Cette figure fournit la valeur moyenne, l'écart type et le Max-Min pour à la fois l'erreur de la plate-forme globale en pointillé et pour la valeur de l'erreur totale en trait continu

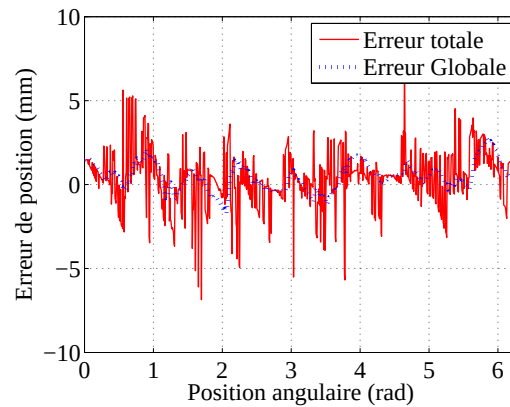


FIGURE 3.49 – Erreur Mesure à 55 mm/s

en fonction de la vitesse tangentielle. Ces courbes font apparaître que, globalement, l'erreur de position augmente avec la vitesse. Cette propriété correspond à la théorie de l'erreur de traînage proportionnelle à la vitesse, comme décrit dans la section 3.2.2. Ce phénomène peut être mis en valeur de manière plus pragmatique, en photographiant en pause longue, une cible en chute libre, comme l'illustre la figure 3.50. Cette dernière met en évidence que, plus la cible prend de la vitesse, plus l'écart se creuse entre le centre de la cible et l'empreinte laser circulaire. Sur cette photo, les points rouges correspondent aux reflets des sources lasers en collision avec la cible.

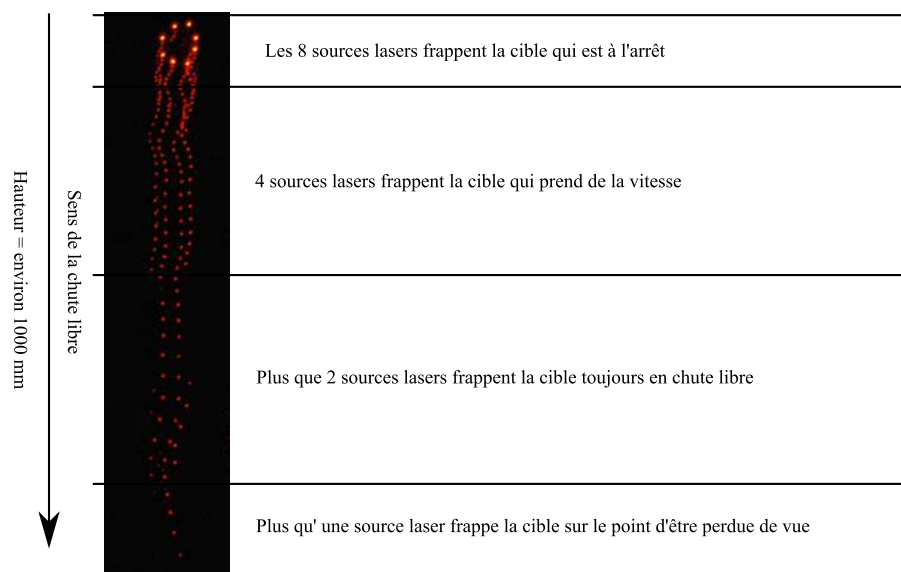


FIGURE 3.50 – Chute libre d'une cible en photographie pause longue dans l'obscurité

3.3.2.2 Vitesse et accélération de décrochage

L'objectif de cette dernière évaluation est de mesurer la vitesse et l'accélération maximale. Expérimentalement, ces variables sont relevées lorsque le dispositif perd sa cible. Pour cela, le même banc de test que précédemment est utilisé. La barre supportant la cible est manuellement

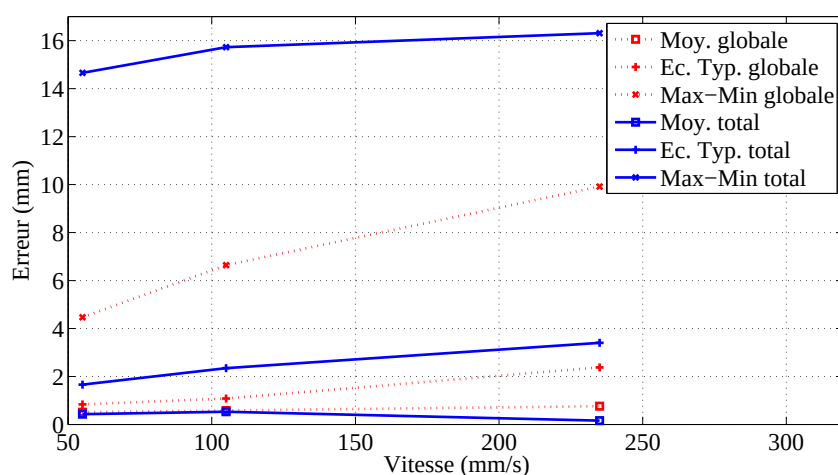


FIGURE 3.51 – Erreur dynamique en fonction de la vitesse

lancée à la main, à plusieurs reprises. Dans ce cas, le moteur est passif, il est utilisé comme guidage en rotation. La cible est à 1000 m de distance et poursuit une trajectoire circulaire d'un rayon de 500 mm.

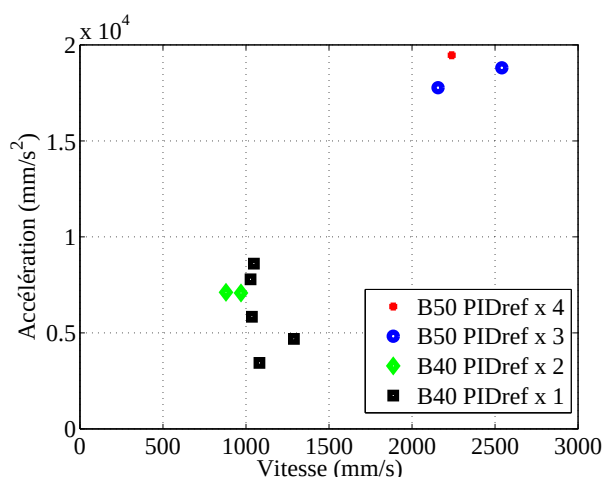


FIGURE 3.52 – Accélération et vitesse de décrochage de la cible

La figure 3.52 résume les résultats obtenus pour différents facteurs de multiplication des coefficients de correction PID. Ce facteur varie de 1 à 4 (PIDref x n sur la figure). La taille de la cible est un paramètre qui est aussi modifié. Les deux cibles utilisées mesurent 40 mm et 50 mm de diamètre (B40 et B50 sur la figure).

La première observation significative est l'écart entre, les expériences conduites avec une cible de 50 mm et celles avec une cible de 40 mm. Une cible de 50 mm décroche à plus haute vitesse qu'une cible plus petite. Cette caractéristique s'explique par la tolérance à l'erreur de traînage comme déjà abordé à plusieurs reprises. L'augmentation du gain de correction montre lui aussi une sensible amélioration des performances de l'accélération et donc, du temps de réponse. Les

meilleurs résultats sont obtenus pour une cible de 50 mm avec une vitesse de décrochage de 2,2 m/s et une accélération de 19,5 m/s²

3.3.3 Bilan de l'évaluation

Les paragraphes précédents présentent un bilan d'évaluation des caractéristiques et les limitations du dispositif de poursuite laser mono-cible. Ainsi, les critères influant sur les limitations en termes de précisions statiques et dynamiques mais également les caractéristiques de vitesse et accélération limites, sont successivement identifiées et évaluées.

En plus de l'évaluation des performances, certains paramètres ont été critiqués comme le manque de rigidité de la structure mécanique, le comportement des cibles sphériques en fonction de la distance mais aussi la répercussion du nombre et l'arrangement des sources lasers sur la précision.

Le développement d'une électronique de mesure de distance par mesure de phase est toujours en développement et doit permettre, à terme, de finaliser le prototype présenté dans ce chapitre.

Le tableau ci-dessous reprend les rubriques standards de description d'un système de capture de mouvement. La rubrique "facteurs critiques" correspond aux paramètres représentant des axes d'optimisations.

Spécifications	Résultats	Facteurs critiques
Erreur statique	$\approx$ mm	Configuration tête optique - cible - distance
Erreur dynamique	6 mm	Configuration tête optique + Erreur traînage
Taux de rafraîchissement	160 Hz	Taux ADC (100 Ksp/s) + Taux liaison RS232
Plage de mesure (2DDL)	$\approx 2 \times 2 \times 2$ m	erreur de traînage et intensité laser
Vitesse de décrochage à 1000 mm	2,5 m/s	Erreur de traînage
Accélération maximum	20 m/s ²	Temps de réponse électromécanique global
Taille du marqueur	40 mm	Configuration tête optique
Calibration	Origine du plan	

TABLE 3.9 – spécification du prototype de capture mono-cible

3.4 Positionnement à l'état de l'art et perspective d'application

Basé sur l'état de l'art des dispositifs de mesure de trajectoire dont le bilan a été dressé dans le chapitre 1.2.6, ce chapitre propose une approche innovante, se concentrant sur la notion de grand champ pour les besoins de capture d'une seule cible et reposant sur des technologies permettant de réduire les coûts. Ainsi, la figure 3.53 reprend la figure de performances des dispositifs existants avec l'ajout du dispositif décrit dans ce chapitre. Nous pouvons conclure, que le choix d'une approche hybride, en utilisant notamment une matrice de source laser contribue à l'effort de coût avec cependant une dégradation de la précision. Un autre point qui n'apparaît pas dans la figure

mais qui est cependant intéressant, est la complexité des cibles qui a été considérablement réduite par rapport au dispositif LEICA.

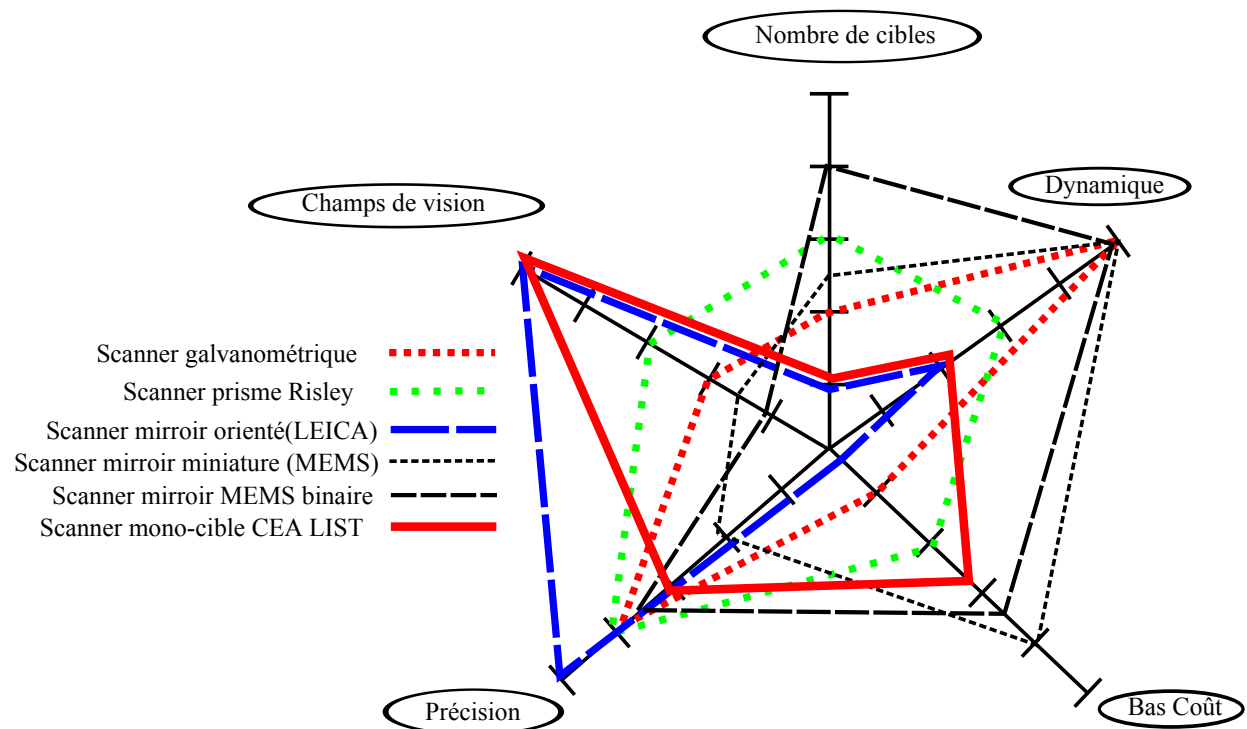


FIGURE 3.53 – Positionnement du dispositif par rapport à l'état de l'art

Le dispositif présenté dans ce chapitre fait désormais l'objet d'un dépôt de brevet et d'un transfert technologique avec un industriel, pour le contrôle du positionnement d'un robot d'inspection dans un environnement hostile et d'espace restreint à grand champ de mesure.

Au-delà de l'exemple détaillé dans ce chapitre, le chapitre suivant explore de nouvelles possibilités de mesure locale et de mesure globale et propose une étude comparative des différentes combinaisons envisageables et leurs spécificités.

Chapitre 4

Alternatives de mesure globale et locale

Sommaire

4.1	Mesure locale par imageur laser DMD	104
4.1.1	Principe de la formation d'une empreinte laser par matrice DMD	104
4.1.2	Solution technologique testée expérimentalement	106
4.1.3	Expérimentations à l'aide d'une source laser	107
4.1.4	Bilan préliminaire et perspectives	109
4.2	Mesure globale par double prismes	109
4.2.1	Modèle géométrique du montage "prisme de Risley"	109
4.2.2	Solution technologique proposée	115
4.2.3	Validations et performances du système	118
4.2.3.1	Validation du modèle géométrique direct	118
4.2.3.2	Performances dynamiques	120
4.2.4	Conclusion et perspectives	125
4.3	Exemples de combinaisons	126
4.3.1	Matrice de sources lasers et robot série	126
4.3.2	Matrice sources lasers et prismes	127
4.3.3	Imageur laser DMD et prismes	129
4.3.4	Imageur laser DMD et prismes pour la mesure de plusieurs cibles	130
4.3.5	Imageur laser DMD et robot série	132
4.3.6	Bilan et figure de performances	132

La chapitre précédent a permis de mettre en avant le potentiel qu'offre la combinaison d'un dispositif de mesure globale et de mesure locale. Les performances, mais également les limitations ont été étudiées.

Ce chapitre se décompose en deux parties. La première propose deux alternatives de modules de mesure locale et globale. Enfin, le deuxième temps de ce chapitre propose d'étudier au cas par cas les spécificités de chacune des combinaisons envisageables afin de confirmer la pertinence de l'approche basée sur le découplage de la mesure locale et la mesure globale.

4.1 Mesure locale par imageur laser DMD

La méthode explorée dans le chapitre 3 repose sur la mise en parallèle de plusieurs sources lasers collimatées. Cette méthode se distingue par sa compacité, son bas-coût, sa simplicité technique et d'utilisation. Cependant, l'empreinte laser formée possède une résolution spatiale limitée dont la taille est figée. Le concept proposé dans cette partie propose une alternative au réseau de sources lasers en se basant sur une matrice de micro-miroirs DMD¹. Cette dernière agit comme un masque offrant ainsi la possibilité de disposer d'une empreinte laser dynamiquement reconfigurable.

4.1.1 Principe de la formation d'une empreinte laser par matrice DMD

Le principe détaillé dans cette partie fait référence au scanner à matrice de miroirs miniatures à orientation binaire, déjà évoqué dans l'état de l'art du chapitre 1. Le principe de fonctionnement est rappelé dans la figure 4.1. Le système se compose d'une source de lumière orientée vers la matrice de micro-miroirs. Chacun possède la capacité de basculer indépendamment selon deux états stables. Ces deux positions sont imposées par des butées mécaniques définissant des angles précis. En fonction de la position choisie, la lumière est réfléchiée, soit à destination d'un absorbeur si elle est indésirable, soit à destination de l'espace de projection si cette lumière doit contribuer à la fonction d'éclairage.

Le principe optique retenu par la formation d'une empreinte laser reconfigurable est schématisé à l'aide de la figure 4.2. Cette formation se décompose en trois étapes. La première étape consiste à générer un faisceau laser homogène en intensité et collimaté. La taille de ce faisceau doit coïncider avec la surface utile du DMD. Pour réaliser cette fonction, une lentille de collimation est associée à une source laser homogène. La seconde étape consiste à masquer une partie de la lumière et laisser l'autre partie se réfléchir. C'est le rôle que doit remplir la matrice DMD dont les miroirs sont contrôlés indépendamment. Enfin, la troisième étape produit un agrandissement de l'empreinte laser si l'application le nécessite.

Cette approche a été validée à l'aide d'un montage optique et d'un kit de développement commercialisé par Texas Instrument, actuel leader de la technologie DMD. Le paragraphe suivant

1. DMD : Digital Micromirror Device

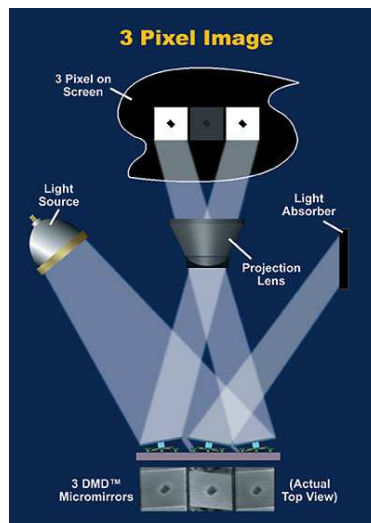


FIGURE 4.1 – Principe de fonctionnement de la matrice de micro-miroirs [Ins09]

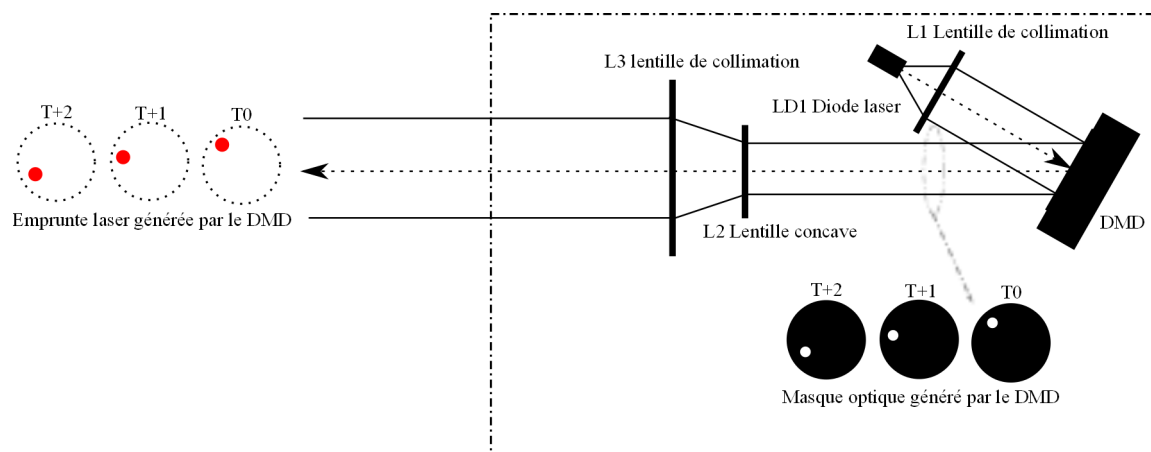


FIGURE 4.2 – Principe de la formation d'image laser par DMD

présente les premières expérimentations du principe détaillé.

4.1.2 Solution technologique testée expérimentalement

Un montage est réalisé à l'aide d'éléments optiques modulaires. Il se compose de trois modules : un module d'émission, un module d'amplification optique et un imageur DMD. L'organisation de ces trois organes est illustrée sur le modèle de la figure 4.3.

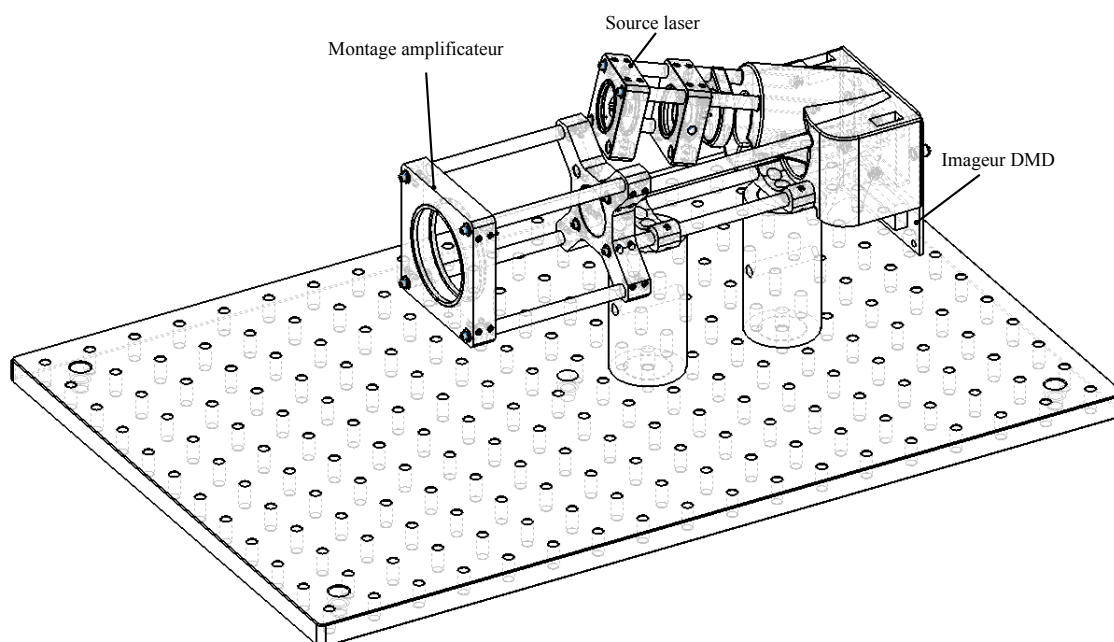


FIGURE 4.3 – Montage expérimental de l'imageur DMD

Pour l'imageur DMD, les expérimentations suivantes reposent sur le kit de développement de référence "DLP Discovery 4000 0,7 XGA". Celui-ci se compose d'une matrice de micro-miroirs et d'une carte de contrôle. Les caractéristiques sont résumées dans le tableau 4.1.

Taux de rafraîchissement	32552 images/seconde
Résolution	1024 × 768
Taille de la surface active	11.059 mm par 8.294 mm
Taille des miroirs	10.8 μm
Inclinaison des miroirs	$\pm 10 - 12^\circ$
Mode de contrôle	FPGA ou contrôle activeX

TABLE 4.1 – Caractéristiques du Kit D4000

La figure 4.4 propose quatre photos issues d'un microscope électronique d'un DMD faisant apparaître la matrice de miroirs ainsi que le micro-mécanisme de basculement démonté pour l'occasion.

Comme illustrée par la photo de la figure 4.5, la matrice de micro-miroirs agit comme un masque

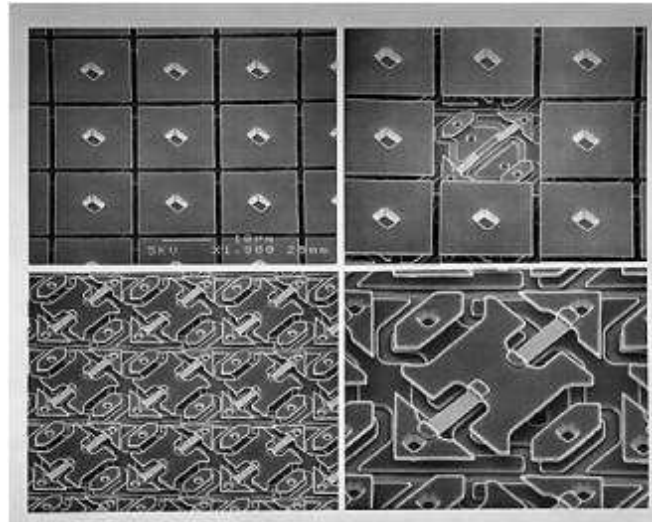


FIGURE 4.4 – Matrice de micro-miroirs observée au microscope électronique [Ins09]

permettant une réflexion partielle de la lumière. Pour les besoins de cette photo, une image en noir et blanc est chargée à l'aide de l'interface logiciel fournie. Cette image apparaît sur la matrice de micro-miroirs. L'image apparaît grâce à l'angle de prise de vue de la photo qui fait réfléchir la lumière du néon servant à éclairer la pièce.

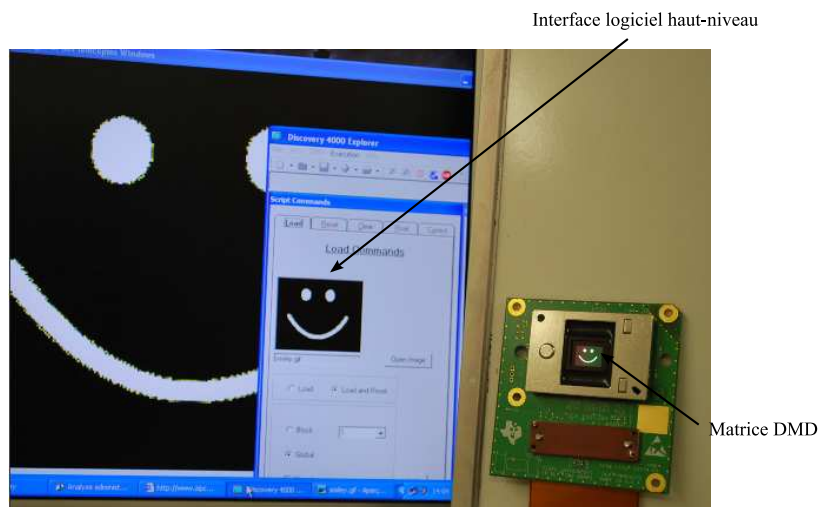


FIGURE 4.5 – Kit de développement D4000

Après la description des choix technologiques, la partie suivante s'intéresse plus particulièrement à son usage avec une source laser.

4.1.3 Expérimentations à l'aide d'une source laser

Comme décrit précédemment, le DMD est composé d'une matrice de micro-miroirs. Lorsqu'une source de lumière rencontre une arrête dans son parcours, il apparaît un phénomène de diffraction. Dans le cas d'une source de lumière cohérente comme un laser, le DMD fonctionne comme réseau

diffacteur [Ins05]. Afin de mieux quantifier cette caractéristique considérée comme un phénomène parasite dans le cas présent, un montage expérimental est réalisé. L'objectif de ce montage est d'effectuer une évaluation de la perte de puissance associée à ce phénomène.

Dans la configuration présentée, une diode laser VCSEL de longueur d'onde égale à 650 nm est utilisée et collimatée pour former une tache de diamètre 15 mm. Comme l'illustre la figure 4.6, le faisceau laser est réfléchi et diffracté, formant une figure régulière de sources collimatées. A l'aide d'un puissance-mètre optique calibré, possédant une ouverture de 9 mm de diamètre, chaque source diffractée est mesurée dans l'obscurité afin d'éliminer les bruits lumineux ambiants. La figure 4.6 représente pour chacune des sources diffractées la puissance relative concentrée. La source la plus puissante est évaluée à 28.7% de la puissance initiale mesurée après la lentille de collimation (L1 sur la figure 4.2).

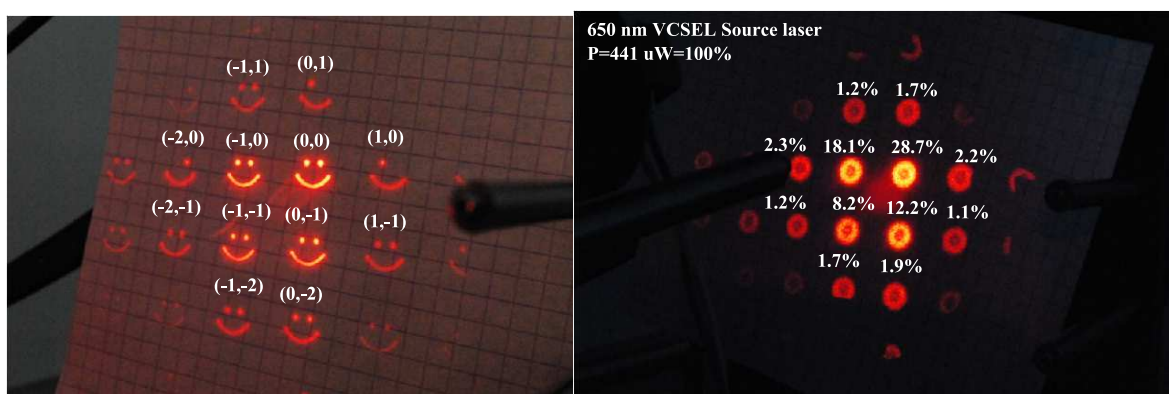


FIGURE 4.6 – Figure de diffraction à la sortie du DMD

Afin de ne garder que la source la plus puissante, la solution la plus simple consiste à utiliser un filtre spatial agissant comme un masque. La figure 4.7 présente une photo de l'empreinte laser une fois filtrée. Cette figure met également en évidence un autre phénomène, la formation de franges d'interférences. Celle-ci est supposée liée au caractère cohérent de la lumière laser interagissant avec le réseau de micro-miroirs.

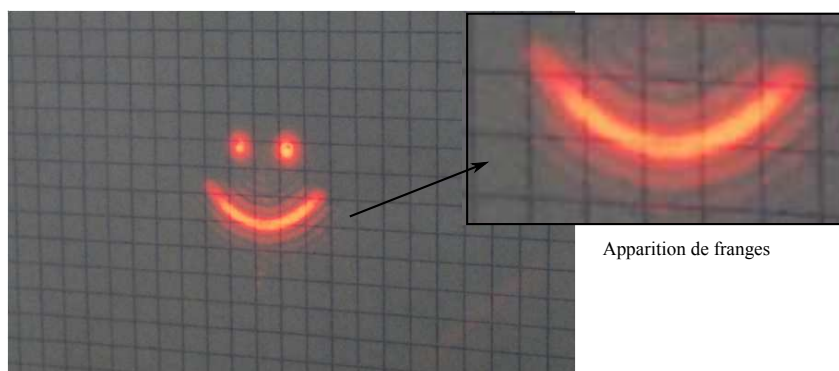


FIGURE 4.7 – Franges d'interférences

4.1.4 Bilan préliminaire et perspectives

Le concept de formation d'image laser à base de DMD vient d'être exploré et produit la formation d'une image laser collimatée. Cette approche offre l'opportunité de réaliser un dispositif de scrutation locale à haute résolution et à haute dynamique sans générer de mouvements de pièces mécaniques à forte inertie. Le procédé de micro-fabrication MOEMS utilisé pour ce type de technologie est abordable avec une capacité de miniaturisation manifeste. Cependant, et comme l'ont révélées les premières expérimentations, cette approche nécessite l'usage d'une source laser de forte puissance. D'une part, il est nécessaire d'éclairer continuellement toute la surface du DMD, et d'autre part, le phénomène de diffraction provoque $\approx 70\%$ de perte de la puissance lumineuse initiale. Une autre difficulté rencontrée à l'occasion des essais préliminaires concerne l'encombrement de l'ensemble des chemins optiques en raison des distances focales à respecter. En conséquence, il apparaît, a priori, délicat de concevoir une tête de mesure locale mobile reposant sur cette technologie.

Afin de proposer une réponse à ce problème de mobilité et d'offrir une nouvelle alternative à la problématique de la mesure globale, la partie suivante propose une autre approche basée sur deux prismes orientables.

4.2 Mesure globale par double prismes

Cette technique a déjà été évoquée dans l'état de l'art du chapitre 1 et plus particulièrement au sujet des techniques de déviation de faisceaux collimatés ou "balayage laser"². Cette approche se révèle intéressante à plusieurs titres. D'une part, elle assure la déviation de faisceaux lumineux sans la nécessité d'embarquer les organes générateurs. D'autre part, ce dispositif optique génère un mouvement de scrutation systématique d'un volume sans la nécessité de faire varier les vitesses de ces organes. Malgré les avantages de cette technologie, elle est aujourd'hui réservée à des applications militaires et métrologiques. Ce contexte la rend difficile à obtenir car elle est onéreuse. L'objectif de cette étude est de proposer une approche technologique plus abordable avec un modèle géométrique direct associé.

La section suivante propose un modèle géométrique, une description des choix technologiques implémentés ainsi qu'une évaluation des performances comparée à des modèles du commerce de la société OPTRA [Sch06].

4.2.1 Modèle géométrique du montage "prisme de Risley"

Le montage de Risley exploite les propriétés de réfraction d'une onde à l'interface de deux milieux. L'onde exploitée est la lumière et les deux milieux de propagation intervenant sont l'air

2. voir section 1.2.5.2

et le verre de type BK7³ composant les deux prismes. La figure 4.8 illustre l'espace d'évolution conique balayé par les deux prismes.

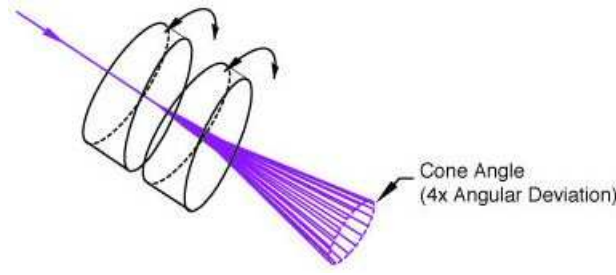


FIGURE 4.8 – Montage de Risley [Tho09]

L'objectif des calculs suivant est de déterminer le modèle géométrique qui va associer une position cartésienne dans l'espace en fonction des positions angulaires des deux prismes, de la longueur donnée par le télémètre laser et de la position dans le plan d'origine de cette source de lumière. La figure 4.9 identifie les notations des composantes vectorielles qui vont intervenir dans l'expression et la résolution de ce modèle.

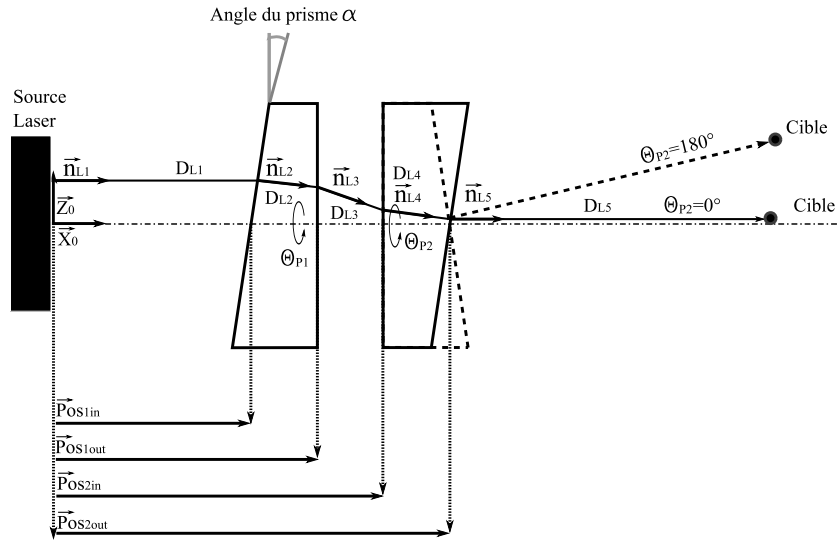


FIGURE 4.9 – Modèle géométrique du montage de Risley

La première étape du calcul s'intéresse au phénomène de réfraction d'un rayon de lumière à l'interface de deux milieux. Ainsi la figure 4.10 illustre la transformation du rayon lumineux incident de vecteur unitaire $\vec{n}_{L1}$ dans le milieu d'indice n_1 qui devient le nouveau vecteur unitaire $\vec{n}_{L2}$ dans le milieu d'indice n_2 . Le $\vec{n}_{L11}$ est la projection de $\vec{n}_{L1}$ selon $\vec{n}_{1out}$ alors que $\vec{n}_{L12}$ est la projection selon la perpendiculaire de $\vec{n}_{1out}$. Selon les lois de la réfraction prononcées par Snell-Descartes (rappelée par l'expression 4.1 pour le franchissement de la première surface), le rayon réfracté est donné par l'équation 4.5 avec les coefficients k_1 et k_2 donnés par les expressions 4.3 et 4.2. L'expression 4.4 est une variante de l'expression 4.3 avec l'usage de la fonction de calcul de

3. Indice BK7 : 1,51452 à 650 nm

produit vectoriel. Cette équivalence n'est valable que dans le cas de vecteur unitaire comme c'est le cas ici.

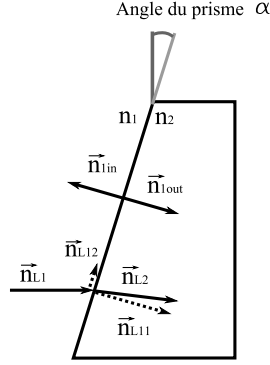


FIGURE 4.10 – Réfraction élémentaire d'un rayon incident

$$n_1 \cdot \sin(\widehat{\overrightarrow{n_{L1}}, \overrightarrow{n_{1in}}}) = n_2 \cdot \sin(\widehat{\overrightarrow{n_{L2}}, \overrightarrow{n_{1in}}}) \quad (4.1)$$

$$k_2 = \frac{n_2}{n_1} \quad (4.2)$$

$$k_1 = \sqrt{\frac{1 - (k_2 \cdot (\sin(\widehat{\overrightarrow{n_{L1}}, \overrightarrow{n_{1in}}}))^2}{1 - \sin(\widehat{\overrightarrow{n_{L1}}, \overrightarrow{n_{1in}}})^2}} \quad (4.3)$$

$$k_1 = \sqrt{\frac{1 - (k_2 \cdot (\overrightarrow{n_{L1}} \wedge \overrightarrow{n_{1in}}))^2}{1 - (\overrightarrow{n_{L1}} \wedge \overrightarrow{n_{1in}})^2}} \quad (4.4)$$

$$\overrightarrow{n_{L1}} = \overrightarrow{n_{L11}} + \overrightarrow{n_{L12}} \quad (4.5)$$

$$\overrightarrow{n_{L2}} = k_1 \cdot \overrightarrow{n_{L11}} + k_2 \cdot \overrightarrow{n_{L12}} \quad (4.6)$$

A partir de k_1 et k_2 traduisant l'opération de réfraction, il est alors possible de déterminer le vecteur directeur du rayon réfracté. En partant de l'expression 4.6 transformée en 4.7, l'expression 4.8 est obtenue.

$$\overrightarrow{n_{L12}} = \frac{1}{k_2} \cdot \overrightarrow{n_{L2}} - \frac{k_1}{k_2} \cdot \overrightarrow{n_{L11}} \quad (4.7)$$

$$\overrightarrow{n_{L2}} = k_2 \cdot \overrightarrow{n_{L1}} - (k_2 - k_1) \cdot \overrightarrow{n_{L11}} \quad (4.8)$$

Enfin, $\overrightarrow{n_{L11}}$ est identifié par l'équation 4.9 et une fois remplacé dans l'équation 4.8, le vecteur $\overrightarrow{n_{L2}}$ (vecteur directeur unitaire du rayon réfracté), est alors identifié (expression 4.10).

$$\vec{n}_{L11} = (\vec{n}_{L1} \cdot \vec{n}_{1in}) \cdot \vec{n}_{1in} \quad (4.9)$$

$$\vec{n}_{L2} = k_2 \cdot \vec{n}_{L1} - (k_2 - k_1) \cdot (\vec{n}_{L1} \cdot \vec{n}_{1in}) \cdot \vec{n}_{1in} \quad (4.10)$$

A cette étape des calculs, le vecteur directeur du rayon réfracté est connu et l'étape suivante consiste à déterminer sa longueur jusqu'à la prochaine surface d'impact.

Comme rappelé dans [Haf00], par définition, pour tout plan de l'espace, le produit scalaire du vecteur normal du plan avec tout autre vecteur allant de l'origine jusqu'à un point localisé sur le plan, est constant. La figure 4.11 illustre ce cas de figure où l'on cherche à connaître la distance D_{L2} qui est le rayon laser traversant le premier prisme. L'expression de cette définition dans ce cas de figure est donnée par l'équation 4.11. Cette dernière, une fois factorisée, donne l'expression 4.12. Il suffit alors d'appliquer la relation de Chasles (équation 4.13) pour faire apparaître le terme D_{L2} dans l'équation 4.14.

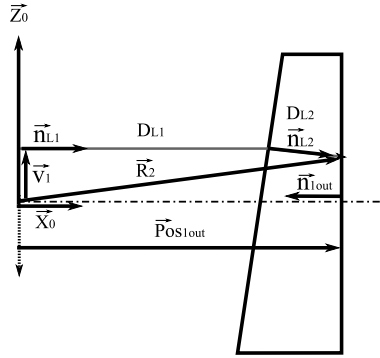


FIGURE 4.11 – Calcul de la norme du rayon réfracté

$$\vec{R}_2 \cdot \vec{n}_{1out} = \vec{Pos}_{1out} \cdot \vec{n}_{1out} \quad (4.11)$$

$$\vec{n}_{1out} \cdot (\vec{R}_2 - \vec{Pos}_{1out}) = 0 \quad (4.12)$$

$$\vec{R}_2 = \vec{V}_1 + D_{L1} \cdot \vec{n}_{L1} + D_{L2} \cdot \vec{n}_{L2} \quad (4.13)$$

$$D_{L2} = \frac{\vec{n}_{1out} \cdot (\vec{Pos}_{1out} - \vec{V}_1 - D_{L1} \cdot \vec{n}_{L1})}{\vec{n}_{1out} \cdot \vec{n}_{L2}} \quad (4.14)$$

Les expressions 4.10 et 4.14 permettent de déterminer le segment laser en propagation dans le premier prisme. Ces expressions sont toutes les deux dépendantes des vecteurs normaux des surfaces des prismes ainsi que de leurs positions. Ainsi, les vecteurs directeurs des faces des prismes

tournants sont donnés par les équations 4.15 et 4.16. Les vecteurs décrits par les équations 4.15 font apparaître l'influence des positions angulaires des deux prismes et constituent des vecteurs normaux à positions variables. Concernant les positions des prismes, leurs influences sont identifiées par les vecteurs $\overrightarrow{Pos_{1in}}$, $\overrightarrow{Pos_{1out}}$, $\overrightarrow{Pos_{2in}}$ et $\overrightarrow{Pos_{2out}}$ que l'on retrouve dans la figure 4.9.

$$\overrightarrow{n_{1in}} = \begin{pmatrix} -\cos(\alpha) \\ \sin(\theta_{P1}) \cdot \sin(\alpha) \\ \cos(\theta_{P1}) \cdot \sin(\alpha) \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{n_{2out}} = \begin{pmatrix} -\cos(\alpha) \\ \sin(\theta_{P2}) \cdot \sin(\alpha) \\ \cos(\theta_{P2}) \cdot \sin(\alpha) \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

$$\overrightarrow{n_{1out}} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{n_{2in}} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{n_{Cout}} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.16)$$

Ces opérations sont reproduites pour les 5 segments représentant le parcours (voir figure 4.9) d'un rayon laser et dont les expressions sont représentées ci-dessous. Une exception est faite cependant pour la distance D_{L5} puisque cette distance est déduite de la mesure de la télémétrie laser comme démontrée dans l'expression 4.36 avec la grandeur "Telem" qui est la distance fournie par le télémètre laser.

- Pour le segment 1 : Le vecteur directeur unitaire :

$$\overrightarrow{n_{L1}} = [1 \quad 0 \quad 0] \quad (4.17)$$

avec les k_1 et k_2 associés :

$$k_1 = \sqrt{\frac{1 - (k_2 \cdot (\overrightarrow{n_{L1}} \wedge \overrightarrow{n_{1in}}))^2}{1 - (\overrightarrow{n_{L1}} \wedge \overrightarrow{n_{1in}})^2}} \quad (4.18)$$

$$k_2 = \frac{n_1}{n_2} \quad (4.19)$$

Et la longueur du segment :

$$D_{L1} = \frac{\overrightarrow{n_{1in}} \cdot (\overrightarrow{Pos_{1in}} - \overrightarrow{V_1})}{\overrightarrow{n_{1in}} \cdot \overrightarrow{n_{L1}}} \quad (4.20)$$

- Pour le segment 2 : Le vecteur directeur unitaire :

$$\overrightarrow{n_{L2}} = k_2 \cdot \overrightarrow{n_{L1}} - (k_2 - k_1) \cdot (\overrightarrow{n_{L1}} \cdot \overrightarrow{n_{1in}}) \cdot \overrightarrow{n_{1in}} \quad (4.21)$$

avec les k_1 et k_2 associés :

$$k_1 = \sqrt{\frac{1 - (k_2 \cdot (\overrightarrow{n_{L2}} \wedge \overrightarrow{n_{1out}}))^2}{1 - (\overrightarrow{n_{L2}} \wedge \overrightarrow{n_{1out}})^2}} \quad (4.22)$$

$$k_2 = \frac{n_2}{n_1} \quad (4.23)$$

Et la longueur du segment :

$$D_{L2} = \frac{\overrightarrow{n_{1out}} \cdot (\overrightarrow{Pos_{1out}} - \overrightarrow{V_1} - D_{L1} \cdot \overrightarrow{n_{L1}})}{\overrightarrow{n_{1out}} \cdot \overrightarrow{n_{L2}}} \quad (4.24)$$

- Pour le segment 3 : Le vecteur directeur unitaire :

$$\vec{n}_{L3} = k_2 \cdot \vec{n}_{L2} - (k_2 - k_1) \cdot (\vec{n}_{L2} \cdot \vec{n}_{1out}) \cdot \vec{n}_{1out} \quad (4.25)$$

avec les k_1 et k_2 associés :

$$k_1 = \sqrt{\frac{1 - (k_2 \cdot (\vec{n}_{L3} \wedge \vec{n}_{2in}))^2}{1 - (\vec{n}_{L3} \wedge \vec{n}_{2in})^2}} \quad (4.26)$$

$$k_2 = \frac{n_1}{n_2} \quad (4.27)$$

Et la longueur du segment :

$$D_{L3} = \frac{\vec{n}_{2in} \cdot (\vec{Pos}_{2in} - \vec{V}_1 - D_{L1} \cdot \vec{n}_{L1} - D_{L2} \cdot \vec{n}_{L2})}{\vec{n}_{2in} \cdot \vec{n}_{L3}} \quad (4.28)$$

- Pour le segment 4 : Le vecteur directeur unitaire :

$$\vec{n}_{L4} = k_2 \cdot \vec{n}_{L3} - (k_2 - k_1) \cdot (\vec{n}_{L3} \cdot \vec{n}_{2in}) \cdot \vec{n}_{2in} \quad (4.29)$$

avec les k_1 et k_2 associés :

$$k_1 = \sqrt{\frac{1 - (k_2 \cdot (\vec{n}_{L4} \wedge \vec{n}_{2out}))^2}{1 - (\vec{n}_{L4} \wedge \vec{n}_{2out})^2}} \quad (4.30)$$

$$k_2 = \frac{n_2}{n_1} \quad (4.31)$$

Et la longueur du segment :

$$D_{L4} = \frac{\vec{n}_{2out} \cdot (\vec{Pos}_{2out} - \vec{V}_1 - D_{L1} \cdot \vec{n}_{L1} - D_{L2} \cdot \vec{n}_{L2} - D_{L3} \cdot \vec{n}_{L3})}{\vec{n}_{2out} \cdot \vec{n}_{L4}} \quad (4.32)$$

- Pour le segment 5 : Le vecteur directeur unitaire :

$$\vec{n}_{L5} = k_2 \cdot \vec{n}_{L4} - (k_2 - k_1) \cdot (\vec{n}_{L4} \cdot \vec{n}_{2out}) \cdot \vec{n}_{2out} \quad (4.33)$$

avec les k_1 et k_2 associés :

$$k_1 = \sqrt{\frac{1 - (k_2 \cdot (\vec{n}_{L5} \wedge \vec{n}_{Cout}))^2}{1 - (\vec{n}_{L5} \wedge \vec{n}_{Cout})^2}} \quad (4.34)$$

$$k_2 = \frac{n_1}{n_2} \quad (4.35)$$

Et la longueur du segment :

$$D_{L5} = Telem - D_{L4} - D_{L3} - D_{L2} - D_{L1} \quad (4.36)$$

Une fois chaque élément du chemin déterminé, la somme vectorielle donne la position de la cible comme représentée par l'expression 4.37. Cette dernière donne le modèle géométrique direct du système composé de deux prismes optiques contrôlés en position angulaire selon θ_{P1} et θ_{P2} ainsi qu'un télémètre laser dont la position d'origine est déterminée par $\vec{V}_1$.

$$\overrightarrow{V_{impact}} = \overrightarrow{V1} + D_{L1} \cdot \overrightarrow{n_{L1}} + D_{L2} \cdot \overrightarrow{n_{L2}} + D_{L3} \cdot \overrightarrow{n_{L3}} + D_{L4} \cdot \overrightarrow{n_{L4}} + D_{L5} \cdot \overrightarrow{n_{L5}} \quad (4.37)$$

L'espace de mesure couvert par ce modèle est équivalent à un cône avec cependant une zone inaccessible en son centre. Cette zone est de forme cylindrique et la valeur de son diamètre résulte de la déviation des segments 2, 3 et 4 sur la figure 4.9. Cette valeur augmente avec l'épaisseur des prismes, l'espace entre les prismes et l'angle de déviation de chacun des prismes. Cette valeur peut être calculée en appliquant le modèle dans la configuration décrite par la figure 4.9 où les prismes sont en opposition d'angle.

Le modèle géométrique inverse peut être déterminé à l'aide d'une méthode de résolution numérique du type Newton-Raphson à partir de la matrice Jacobienne inverse, comme abordé dans le chapitre 3. Le déterminant de la matrice d'inversion va s'annuler aux conditions singulières à la fois à la périphérie du cône décrit par l'espace de travail mais également aux alentours du cylindre d'inaccessibilité au centre de ce dernier.

4.2.2 Solution technologique proposée

L'objectif est de réaliser un dispositif mécatronique capable de contrôler dynamiquement la position des prismes. Une grande partie de la difficulté de cette réalisation réside dans le fait que l'axe de rotation doit être dégagé afin de permettre la circulation du flux optique. Une autre contrainte est celle du guidage en rotation des prismes qui doit réduire les jeux au maximum afin d'offrir une précision de pointage optimale. A l'aide d'une technologie comme celle développée par [Sch06], ces contraintes sont relativement bien satisfaites. En revanche, cette solution fait appel à des moteurs brushless conçus sur mesure et qui nécessitent des circuits électroniques de contrôle exigeants et des pièces mécaniques non standards.

La solution proposée et réalisée repose sur des composants mécaniques et électroniques standards dans un souci de disponibilité et de coût. La conception a été animée par la volonté d'utiliser le minimum de pièces possibles afin de faciliter le montage et les paramètres d'ajustement. La figure 4.12 propose deux illustrations du dispositif développé.

La vue de droite présente le mécanisme dans son ensemble. Il se compose d'un bâti qui supporte les deux blocs moteurs d'entraînement des prismes par l'intermédiaire d'une transmission par courroie synchrone. Ces blocs moteurs ont la particularité d'excentrer les moteurs par rapport à leur centre de rotation. Cette excentricité autorise un réglage manuel et progressif de la tension de la courroie. Cette illustration fait également apparaître le dispositif électronique donnant une référence angulaire absolue. Il s'agit d'un capteur à réponse binaire avec hystérésis à effet hall. L'information logique, fournie par ce capteur, change d'état lorsque l'aimant mobile, générateur d'un champ magnétique, passe devant la zone sensible. Ce système est nécessaire car les codeurs incrémentaux associés aux moteurs ne donnent pas la position angulaire absolue. Le type de capteur incrémental choisi repose sur une technologie magnétique et propose 1000 points par tour

de moteur sur deux voies. La résolution angulaire des moteurs obtenue est donc de 4000 points après décodage de la quadrature qui tient compte des fronts montants et fronts descendants des deux voies. Le rapport de réduction engendré par la transmission par courroie étant de 3, les positions angulaires des prismes sont codées sur 12000 points correspondant à une résolution angulaire de 523 mrad. Les moteurs utilisés sont de marque Maxon RE-MAX de 22 W à commutation graphite et constituent des moteurs relativement bon marché.

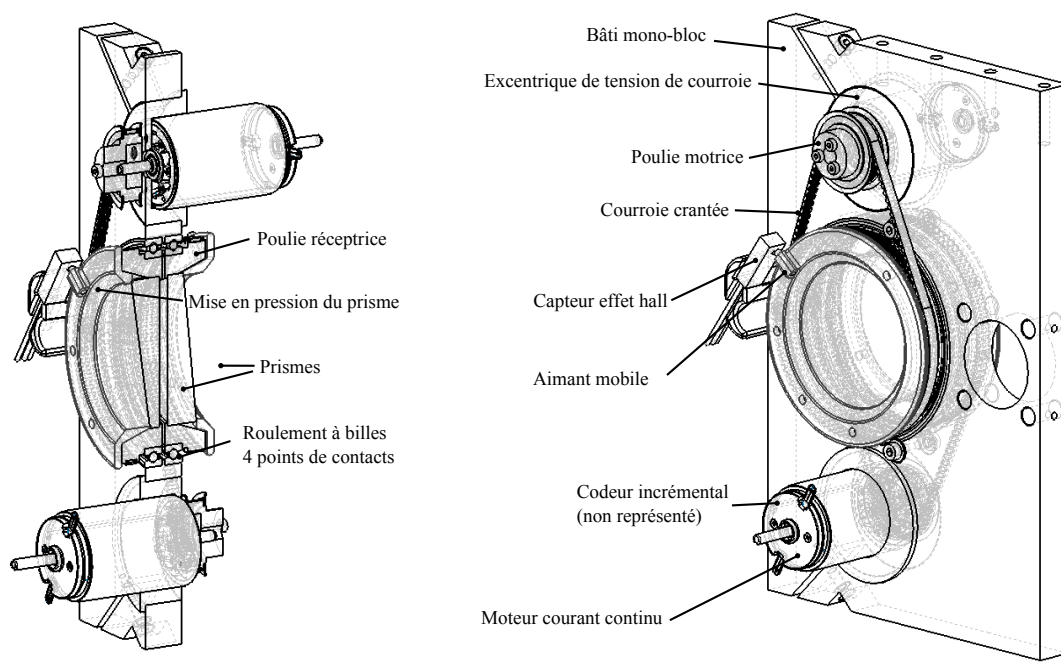


FIGURE 4.12 – Composition du montage de Risley développé

L'illustration de gauche de la figure 4.12 présente une vue en coupe du montage. Elle visualise plus en détails l'un des éléments clés de cette conception simplifiée, le guidage en rotation des deux prismes. Traditionnellement, le guidage en rotation d'éléments de grands diamètres sans jeu axial s'obtient à l'aide d'un montage reposant sur deux roulements suffisamment écartés pour réduire le rôtulage naturel des deux roulements à billes. Toujours afin de réduire les jeux, les roulements à contacts obliques. Cependant, malgré les performances de ce montage, la réalisation est délicate car elle fait appel à des contraintes d'usinage importantes, impactant directement les coûts et les difficultés de réglages. L'innovation proposée dans le montage de la figure 4.12 repose sur l'usage d'un roulement, de marque Kaydon, qui fonctionne sur le principe de 4 points de contact. L'usage de ce type de roulement réduit considérablement la complexité du montage puisqu'il ne suffit plus que d'un seul roulement par guidage. D'autre part, le réglage "usine" dispense l'utilisateur d'une conception contraignante et coûteuse, tout en conservant l'avantage d'un guidage minimisant le rôtulage et donc l'erreur axiale.

Concernant la stratégie de commande, plusieurs possibilités sont envisageables en fonction du besoin. Dans le cas d'un contrôle en position, la stratégie de contrôle va reposer sur deux asservissements de position indépendants comme représentés par la figure 4.13. Cette dernière présente

deux boucles d'asservissements. La première assure le contrôle en vitesse angulaire, alors que la seconde s'occupe du contrôle en position. Dans la mesure où le montage mécanique peut présenter des différences en termes de frottement, les asservissements doivent être réglés indépendamment. En effet, une différence dans le réglage de la tension de la courroie peut affecter le gain et les conditions de stabilité.

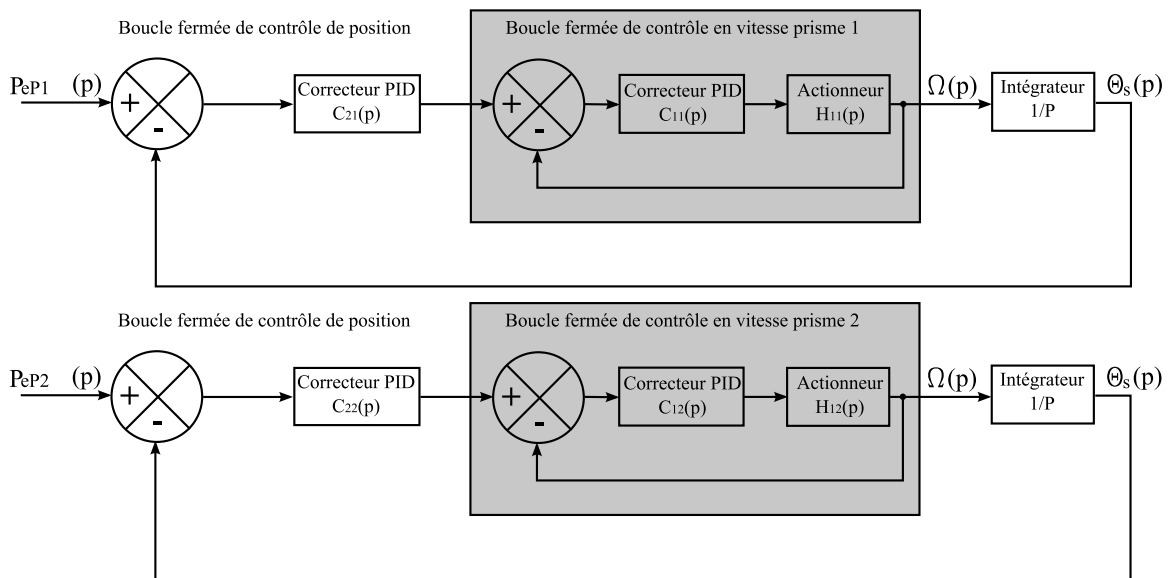


FIGURE 4.13 – Commande en position indépendante des 2 prismes

Une seconde stratégie peut reposer sur le besoin de contrôler un écart de vitesse. En effet, l'un des atouts du montage à double prisme est la possibilité de balayer un volume conique de manière systématique à vitesse constante. Un mouvement mécanique à vitesse constante contribue à sa stabilité, limite les vibrations et la consommation, et ne nécessite pas un contrôle avec une grande bande passante. En fonction de ces deux vitesses, la trajectoire parcourue par le flux optique, va décrire soit une spirale si les vitesses angulaires possèdent le même signe, soit une rosace si ces vitesses sont opposées. L'écart de vitesse va influencer le "pas" et la géométrie de la spirale.

Pour l'implémentation de ces différentes stratégies de commande, deux cartes d'asservissements numériques FMOD-I2CMOT 48/1.5 de marque FIVECO sont utilisées et coordonnées par une carte microcontrôleur C8051F120. Ces cartes sont similaires à celles implémentées et décrites dans le chapitre 3 pour le contrôle des actionneurs du module de mesure globale.

Cette maquette a été réalisée comme le montre la photo de la figure 4.14. L'ensemble du dispositif propose un encombrement réduit et utilise peu de pièces mécaniques.

Le modèle géométrique et la solution technologique retenue décrits, la partie suivante présente les premiers résultats pour valider le modèle géométrique proposé.

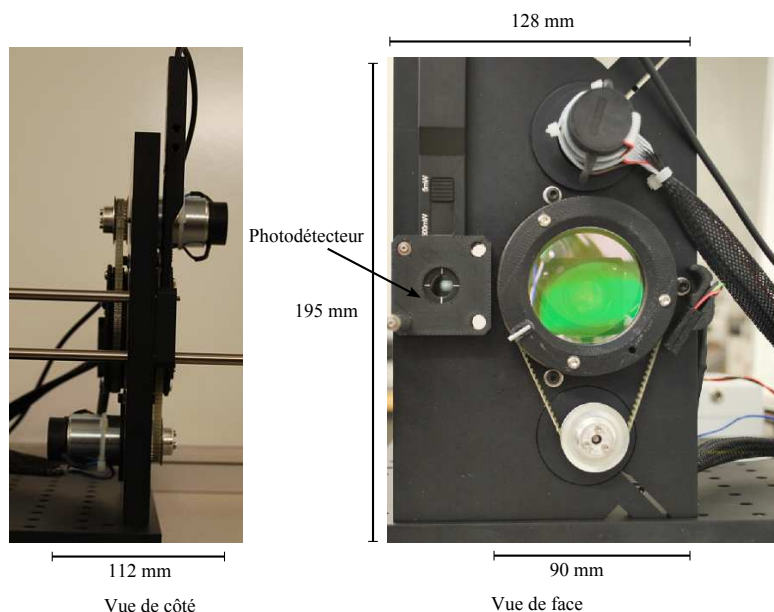


FIGURE 4.14 – Photos de face et de côté du prototype d'orientation par prismes

4.2.3 Validations et performances du système

4.2.3.1 Validation du modèle géométrique direct

Pour vérifier la coïncidence entre le modèle théorique et le pointage effectif, l'idéal serait de pouvoir comparer la position dans l'espace donné par le dispositif avec celui d'un second dispositif de mesure externe. Un robot industriel ou un dispositif de capture de mouvement performant serait un outil de validation délicat à mettre en place. Une première validation de principe est proposée à l'aide d'un vidéo-projecteur dont le montage est décrit ci-après.

La photo de la figure 4.15 présente l'organisation du banc de validation du modèle géométrique direct. Il est constitué du prototype et de son électronique de commande. Le modèle étant relativement lourd, comparé aux capacités de calculs arithmétiques du microcontrôleur utilisé, il est calculé sur un PC standard à l'aide du logiciel Matlab. Ce même PC est connecté à un vidéoprojecteur placé au sol. Ce dernier projette une figure produite par Matlab sur un mur. Un télémètre laser⁴ mesure la distance qui sépare le prototype de la zone de projection. De plus, le point laser rouge généré par ce dernier permet de constater visuellement la zone d'impacte superposée à la figure projetée.

La fenêtre vidéo-projetée doit être centrée par rapport au centre du cône de projection du prototype. Pour cette contrainte, les prismes sont entraînés en rotation de manière à décrire une spirale à l'aide du pointeur laser. Le centre de cette spirale permet ainsi de déterminer le centre du cône de balayage comme représenté sur la photo de la figure 4.16.

Une fois l'étape de centrage terminée, les prismes sont entraînés en rotation à faible vitesse afin

4. référence Sick DT50Hi

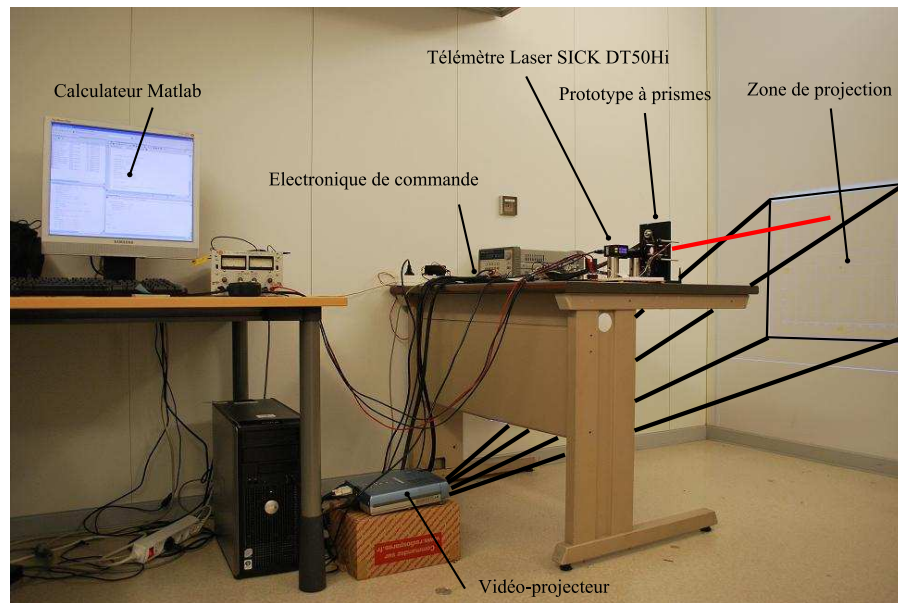


FIGURE 4.15 – Configuration pour la validation du modèle géométrique

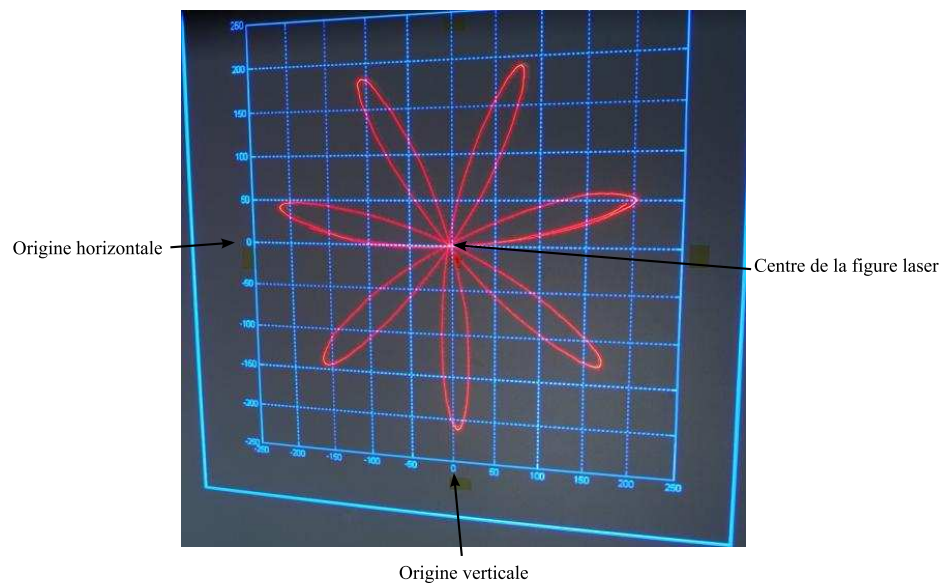


FIGURE 4.16 – Centrage de la figure Matlab et de la figure laser

de minimiser l'influence des délais de calcul et de transfert des données. Ces dernières transitent par l'intermédiaire d'une liaison I2C puis d'une liaison RS232 entre les cartes de contrôles moteur I2CMOD et le PC par l'intermédiaire d'un micro-contrôleur. Ensuite, la position angulaire instantanée est relevée. Le modèle Matlab récupère les données angulaires pour les convertir en données cartésiennes en appliquant le modèle. Ces données sont représentées à l'aide d'un point blanc sur la figure Matlab projetée par le vidéoprojecteur. La photo de la figure 4.17 montre un premier résultat.

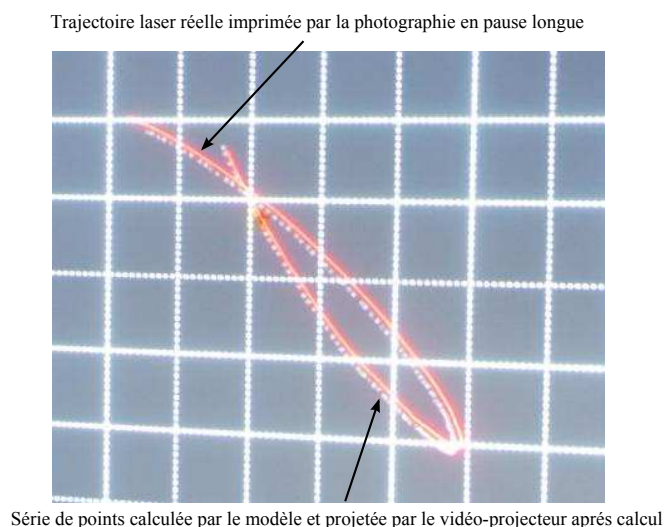


FIGURE 4.17 – Superposition de l'empreinte laser et de l'empreinte calculée

Malgré les distorsions optiques présumées du vidéoprojecteur et le positionnement approximatif des dispositifs de projection par rapport au mur, la trajectoire laser réelle se superpose avec l'empreinte. L'écart est compris entre 1 et 5 mm sur l'ensemble de la figure validant ainsi la pertinence du modèle géométrique proposé pour cette distance.

4.2.3.2 Performances dynamiques

Concernant les performances dynamiques de l'ensemble, une analyse fréquentielle est effectuée en boucle ouverte identifiant le gain et l'ordre du système.

Les expérimentations sont conduites à l'aide d'un signal sinusoïdal d'amplitude égale au quart de la tension nominale des moteurs, 6 V. La fréquence est balayée de 0.5 Hz à 7 Hz. Les résultats sont donnés par la figure 4.18 pour la réponse en gain, et la figure 4.19 pour la réponse en phase. Sur ces deux courbes sont superposées les réponses des deux moteurs entraînant les deux prismes. Une troisième courbe est superposée et propose un modèle du premier ordre à titre de comparaison. En effet, les courbes de gain présentent, pour les deux moteurs, une atténuation du gain d'une valeur de -20 dB par décade et une phase qui tend vers -90° . Ces caractéristiques sont typiques d'un modèle d'ordre 1. Les gains statiques et les valeurs des bandes passantes à -3 dB sont consignés dans le tableau 4.2.

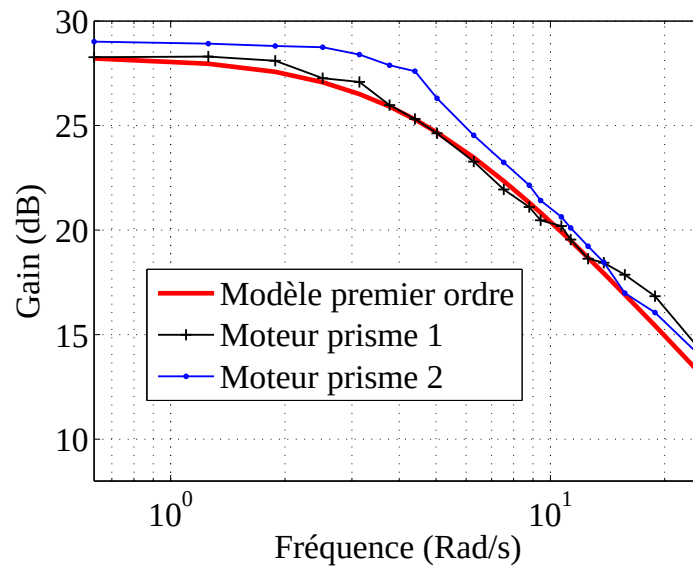


FIGURE 4.18 – Diagramme fréquentiel de gain en boucle ouverte

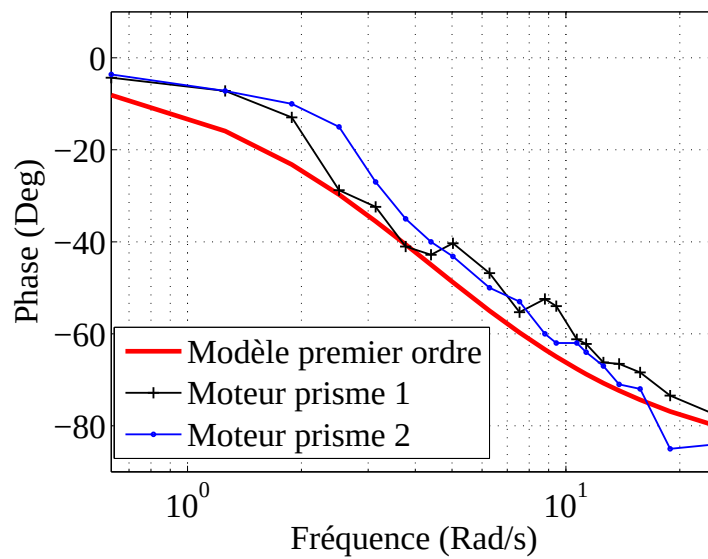


FIGURE 4.19 – Diagramme fréquentiel de phase en boucle ouverte

	Gain statique	Pente	Puls. de coupure -3 dB
Mot. prisme 1	26 dB	-20 dB/Déc	4,4 rad/s 0,7 Hz
Mot. prisme 2	28 dB	-20 dB/Déc	5 rad/s 0,8 Hz

TABLE 4.2 – Tableau récapitulatif en boucle ouverte

Afin d'améliorer les performances, un contrôle en boucle fermée est implémenté. Le contrôleur choisi repose sur un réglage de correcteur de type Proportionnel Intégral afin d'annuler l'erreur de traînage et de donner une meilleure dynamique. Les réglages des gains de l'asservissement ont été effectués à l'aide de relevés fréquentiels.

A titre d'illustration, la figure 4.20 présente la réponse à un échelon en boucle ouverte et la figure 4.21 montre le résultat une fois le réglage des correcteurs effectué. Cette dernière montre bien la superposition de la consigne et de la vitesse réelle.

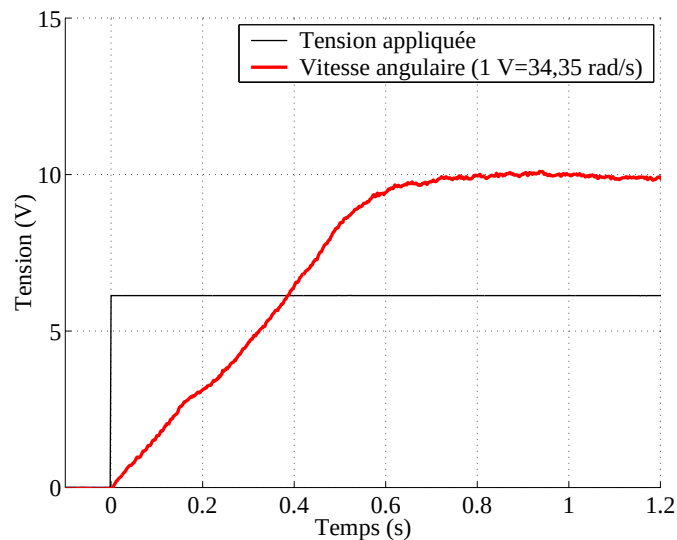


FIGURE 4.20 – Réponse à un échelon en boucle ouverte

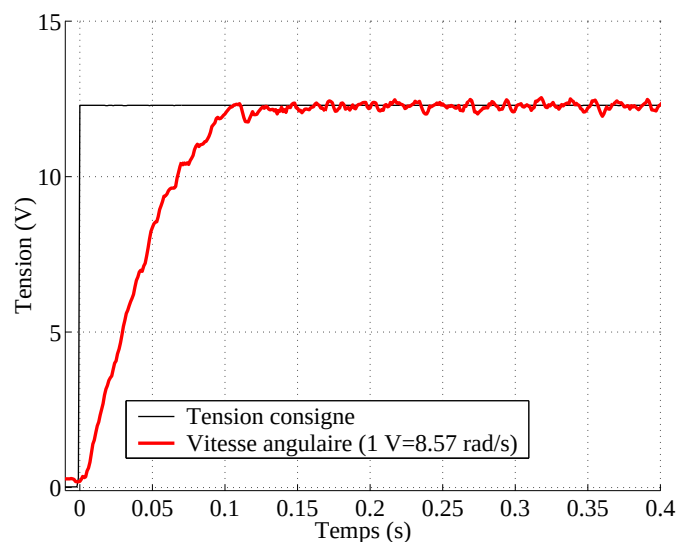


FIGURE 4.21 – Réponse à un échelon en boucle fermée

De manière générale, les moteurs à courant continu présentent un frottement sec empêchant le mouvement pour de faibles couples. Ce phénomène peut être visualisé en observant la vitesse du moteur soumis à un signal de tension sinusoïdale (figure 4.22). Sur cette dernière, nous déduisons

que la valeur de couple de frottement sec de l'ensemble moteur et mécanisme d'entraînement des prismes est de 10,8 mN.m puisque le moteur ReMax29 de 24 V possède une résistance interne 2.37Ω et une constante de couple de 25,8 mN.m/A. Contrôler le moteur en boucle fermée réduit l'influence de cette caractéristique. Cette remarque est illustrée par le relevé temporel de la figure 4.23 où la courbe de la vitesse angulaire mesurée est bien superposée à la courbe de consigne.

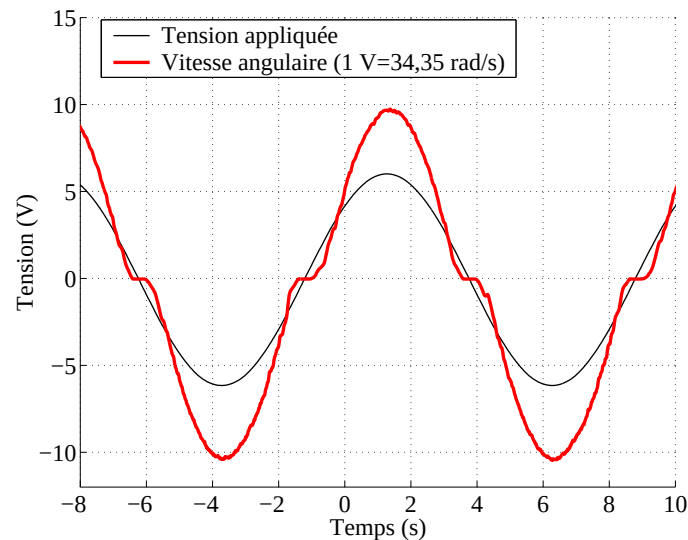


FIGURE 4.22 – Réponse sinusoïdale en boucle ouverte

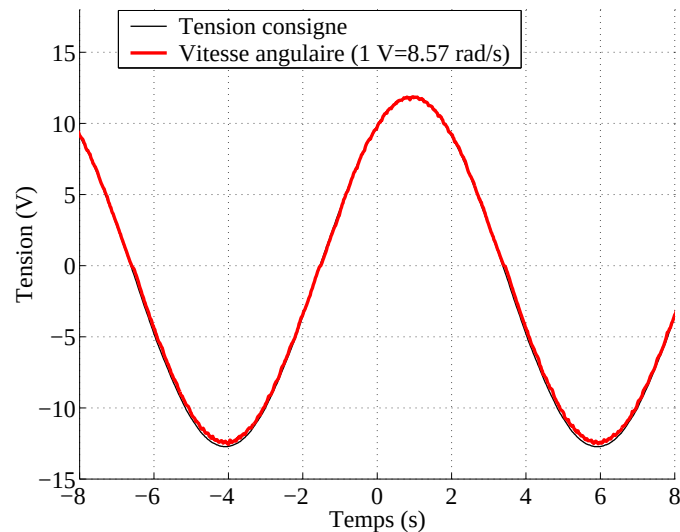


FIGURE 4.23 – Réponse sinusoïdale en boucle fermée

Enfin, une analyse fréquentielle en boucle fermée est effectuée afin d'identifier les performances dynamiques du montage. Ainsi, le diagramme fréquentiel de la figure 4.24 montre un comportement passe-bas toujours de -20 dB/déc et une bande passante de 6 Hz. La figure 4.25 illustre le diagramme fréquentiel en phase et montre un déphasage supplémentaire par rapport à l'analyse fréquentielle en boucle ouverte. Ce déphasage supplémentaire est expliqué par l'usage d'un correcteur intégrateur ajoutant ainsi un décalage de -90° .

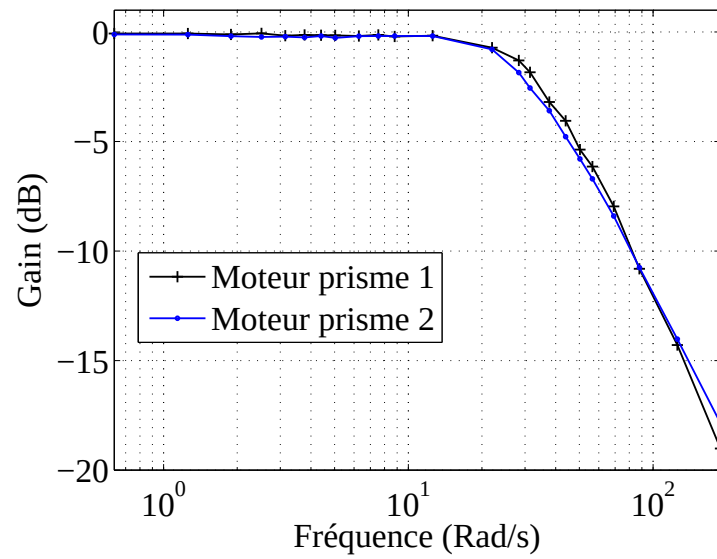


FIGURE 4.24 – Diagramme fréquentiel de gain en boucle fermée

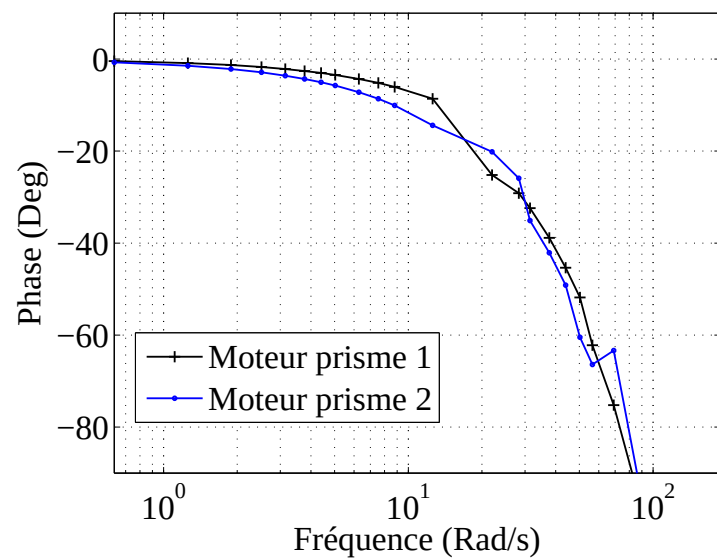


FIGURE 4.25 – Diagramme fréquentiel de phase en boucle fermée

Enfin, la vitesse maximale est estimée en appliquant la tension maximale de 24 V. Pour le moteur entraînant le premier prisme, la vitesse angulaire maximale obtenue est de 7791 tr/mn et de 7848 tr/mn pour le second moteur. En tenant compte du rapport de réduction de la transmission par courroie, la vitesse angulaire maximale pour les prismes est donc respectivement de 2597 tr/mn et 2616 tr/mn.

4.2.4 Conclusion et perspectives

Le système décrit dans ce chapitre repose sur le contrôle de deux prismes orientant un flux de lumière selon un espace conique. La tableau 4.3 propose une comparaison des performances obtenues avec celles de deux dispositifs commercialisés par la société OPTRA [Sch06]. Le système développé présente globalement de moins bonnes performances absolues mais au bénéfice d'une approche modulaire, simplifiée et reposant sur des composants plus standards. En effet, le guidage mécanique reposant sur des roulements à 4 points de contact réduit considérablement la complexité sans dégrader les qualités de guidage. De plus, l'usage de moteur à courant continu déporté par une transmission par courroie synchrone, simplifie le changement du type de moteur et sa puissance en fonction du besoin. Cependant, le choix d'utiliser un codeur pour la mesure de la position angulaire du moteur pose plusieurs difficultés. La première concerne la nécessité d'ajuster un capteur de position supplémentaire pour connaître la position angulaire de référence des prismes. De plus, la courroie utilisée présente une raideur qui va induire une erreur dans l'estimation de la position angulaire des prismes.

Spécification	3 mm OPTRA	100 mm OPTRA	48 mm CEA
Dimension maximale du faisceau	3 mm	100 mm	48 mm
Plage angulaire	$\pm 60^\circ$	$\pm 60^\circ$	$\pm 24^\circ$
Précision pointage	1 milliradian	0,7 milliradian	NC
Résolution pointage	NC	NC	0,5 milliradian
Temps de réponse	100 msec	500 msec	140 msec
Bande passante boucle fermée	50 Hz	50 Hz	7 Hz
Vitesse angulaire maximale	6000 tr/mn	6000 tr/mn	2600 tr/mn
Taux de rafraîchissement	500 Hz	500 Hz	1700 Hz
Taille approximative (mm)	L=89 D=81	L=221 D=273	L=76 l=200
Puissance nécessaire	28 watt	86 watt	44 watt

TABLE 4.3 – Spécification des scanners OPTRA et CEA

Comparé à la méthode basée sur l'orientation de la source de lumière (étudié dans le chapitre 3), le montage exposé dans ce chapitre présente plusieurs avantages. D'une part, l'usage de deux axes mécaniquement indépendants, offre un comportement dynamique moins complexe et avec des performances similaires pour chacun des axes. D'autre part, les problèmes liés à la fragilité des composants optiques embarqués ainsi que les contraintes de câblage mobile sont éliminés. Cependant, le principe d'orientation par réfraction de la lumière dans un prisme va limiter les

dimensions de l'espace de mesure en raison de l'angle critique pour lequel la réfraction n'est plus possible. Enfin, la zone de forme cylindrique inaccessible au centre de l'espace de mesure peut potentiellement présenter un inconvénient en fonction du type de montage.

Les paragraphes suivants proposent des combinaisons de montages où les forces et faiblesses de l'imageur laser DMD et le montage à prismes sont discutées.

4.3 Exemples de combinaisons

L'un des enjeux de ces travaux de thèse est de démontrer la pertinence de mesurer la trajectoire d'une cible dans l'espace en combinant deux sous-systèmes. L'un, pour la mesure locale, assurant la précision et la suppression de pièces mécaniques en mouvement à hautes dynamiques et le second, pour une mesure globale complémentaire, propose un champ de vision élargi.

Au travers du chapitre 3 et au début de celui-ci, 4 sous-systèmes ont été présentés. Deux d'entre eux se concentrent sur la mesure locale et les deux autres proposent des solutions de mesure globale. Les paragraphes suivant proposent d'identifier les spécificités de chacune des combinaisons entre les dispositifs de mesure locale et globale.

4.3.1 Matrice de sources lasers et robot série

Cette combinaison à été détaillée dans le chapitre 3 (figure 4.26). Pour rappel, Le dispositif est composé de deux axes en série offrant un grand espace de mesure. La mesure locale est réalisée à l'aide d'une matrice de sources lasers dont la configuration géométrique de l'empreinte laser est figée et conditionne la résolution de la mesure. Cette combinaison propose un bon compromis entre complexité, performance et champ de mesure. Cependant, la nécessité d'orienter la tête optique de mesure locale entraîne des contraintes liées aux mouvements du câblage. D'autre part, et comme abordées dans le chapitre 3, les performances de l'étage de mesure globale ont dû être bridées en raison de la fragilité de la tête optique et de la structure elle-même.

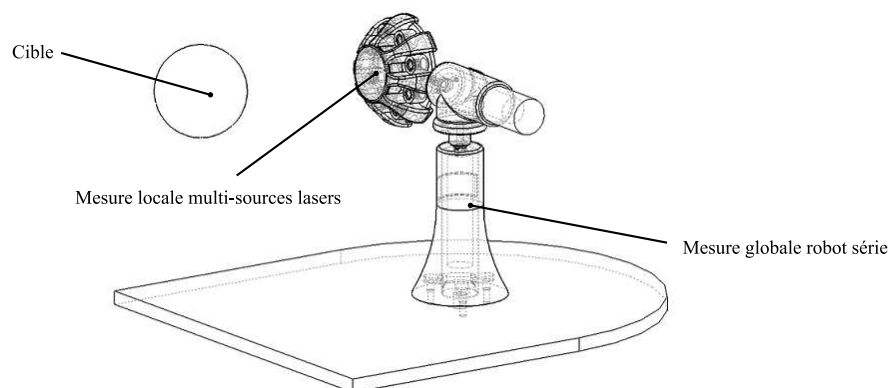


FIGURE 4.26 – Vue d'ensemble du prototype

4.3.2 Matrice sources lasers et prismes

Cette combinaison repose sur la tête optique de mesure locale présentée dans le chapitre 3 et le dispositif à prismes présenté auparavant dans ce chapitre. Celle-ci est intéressante si la trajectoire à mesurer se déroule dans un espace conique. La tête optique est fixée juste derrière les deux prismes dont les positions angulaires sont contrôlées en fonction des déplacements de la cible. La figure 4.27 représente ce montage. Sur cette illustration, la grande taille de la table optique est volontairement maintenue à titre de repère de comparaison avec les combinaisons traitées dans les parties suivantes (ex : figure 4.31).

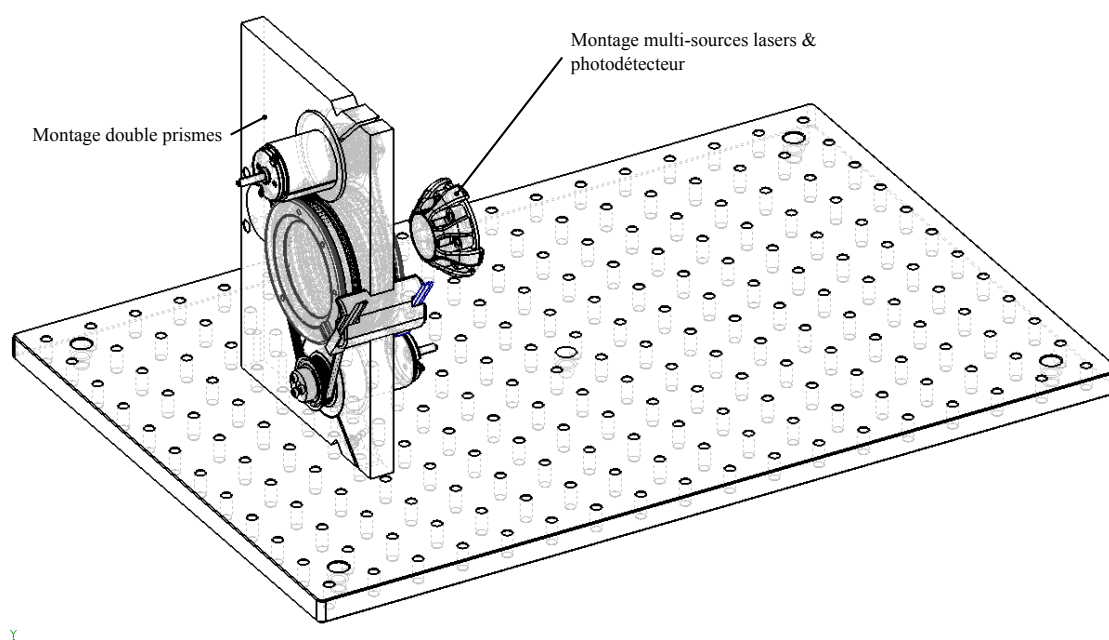


FIGURE 4.27 – Montage sources lasers + double prismes

Cette configuration à l'avantage d'être simple et compacte. C'est également un montage mécaniquement robuste car seuls les prismes sont en mouvement. De plus, la recherche de cible en parcourant une spirale est facilitée en contrôlant les prismes à vitesses constantes.

Cependant, les performances dynamiques de poursuites vont se révéler inégales en fonction de la zone de l'espace de travail, en raison du caractère non-linéaire du modèle géométrique. De plus, la zone centrale présente une partie inaccessible pour la mesure et la poursuite en fonction de ses dimensions. Enfin, en fonction de l'angle des prismes, l'empreinte laser générée par la tête optique va se déformer pour former un ovale à la périphérie de l'espace de mesure. La figure 4.28 illustre la déformation simulée à l'aide du modèle géométrique décrit précédemment dans ce chapitre en se basant sur un prisme dont l'angle est égal à 25° , et pour une empreinte laser carrée de 40 mm de côté. Le plan de projection choisi est normal au vecteur laser. Les déformations sont assimilables à des compressions intervenant en fonction de l'orientation des deux prismes.

Cette distorsion conduit à une dégradation de la précision en raison de l'augmentation de la zone morte telle que détaillée dans le chapitre 3. Il est donc nécessaire de tenir compte du coefficient de

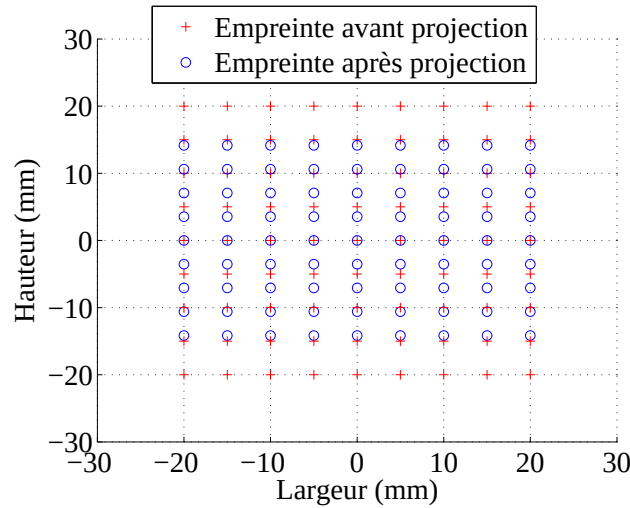


FIGURE 4.28 – Distorsion pour un prisme de 25° à déviation latérale maximale

distorsion associé à l'angle des prismes avant d'opter pour cette combinaison. Basée sur le modèle géométrique précédemment décrit, la figure 4.29 propose une simulation du taux de compression que subit l'empreinte laser à l'issue des deux prismes en fonction de l'angle de ces derniers.

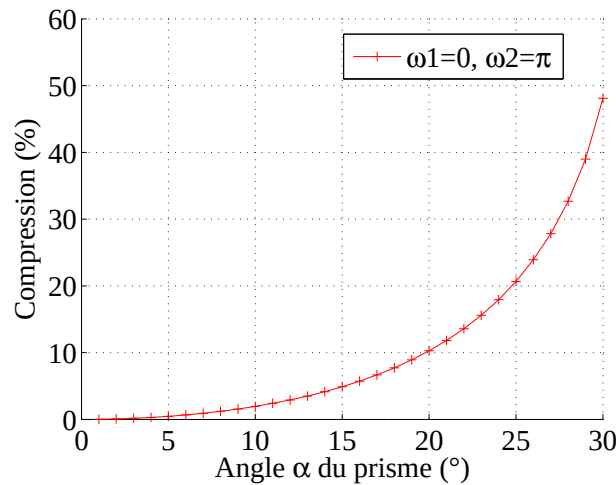


FIGURE 4.29 – Taux de compression de l'empreinte en fonction de l'angle du prisme

La figure 4.30 schématise cette notion de distorsion optique de l'empreinte laser en fonction de sa position dans l'espace de mesure en présentant 4 cas de figures caractéristiques. La notion d'inaccessibilité de la zone centrale est également illustrée par un défaut de centrage entre l'empreinte laser et la cible dans le cas où elle se trouve parfaitement au centre du cône de l'espace de mesure.

Pour des besoins de mesures à faible champ latéral, les distorsions peuvent se révéler négligeables et ne pas poser de difficultés particulières. Cette combinaison peut donc offrir un bon compromis entre performances, simplicité, et robustesse.

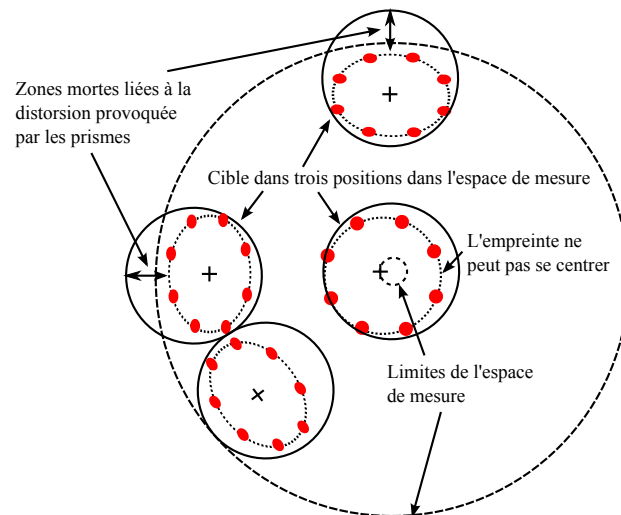


FIGURE 4.30 – Relation entre les distorsions optiques et la plage de mesure

4.3.3 Imageur laser DMD et prismes

Cette configuration, représentée par la figure 4.31, se compose de prismes pour la mesure globale, mais le réseau de sources lasers est remplacé par l'imageur laser à base de DMD qui décrit au début de ce chapitre.

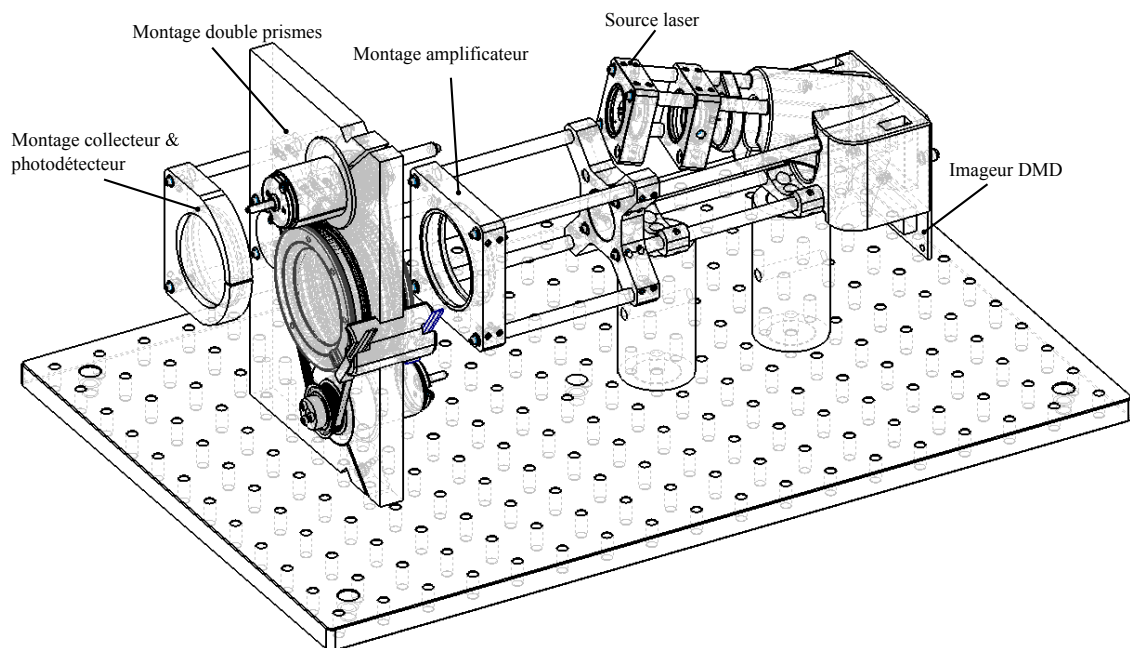


FIGURE 4.31 – Montage imageur DMD + double prismes

Celle-ci est particulièrement intéressante pour pallier les défauts décrits dans le paragraphe précédent. La possibilité de générer une empreinte laser reconfigurable de manière dynamique, compense les distorsions optiques. En effet, en connaissant la distorsion que va subir l'empreinte, le générateur d'image va intégrer cette déformation de manière à obtenir une empreinte non dé-

formée à la sortie des deux prismes. L'imageur laser anticipe les distorsions mais il va être possible également d'effectuer un décalage de cette image afin d'atteindre la zone inaccessible du centre du cône décrivant le champ de mesure des doubles prismes. En plus de cette capacité de correction, l'usage de l'image laser DMD autorise une résolution plus importante. La figure 4.32 illustre le principe de l'anticipation de distorsion optique. Sur cette figure est également représenté le principe de décalage pour atteindre la zone centrale et le nombre de points constituant l'empreinte laser est doublé afin d'illustrer la capacité à augmenter la résolution.

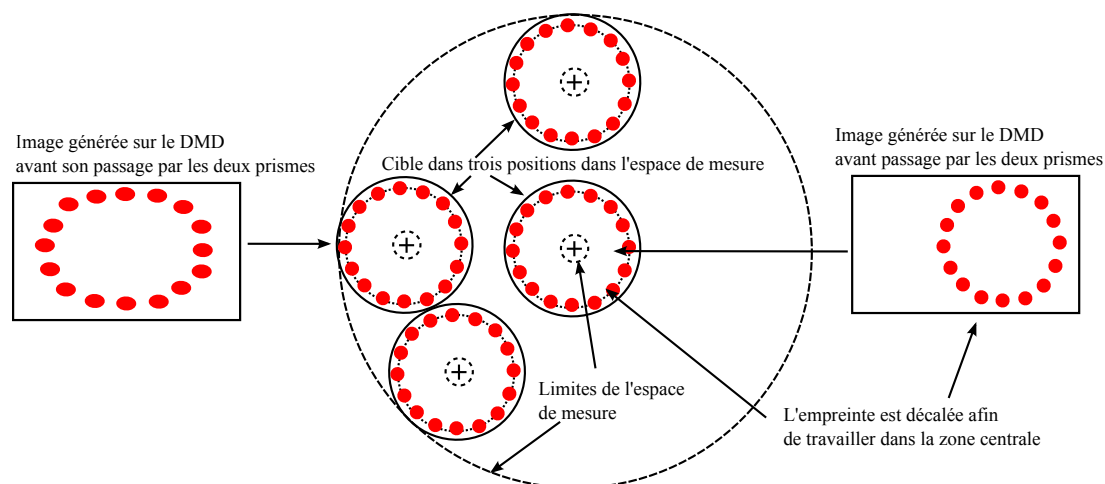


FIGURE 4.32 – Correction des défauts à l'aide de l'imageur laser DMD

La combinaison étudiée se révèle être une alternative pour pallier les limites de la configuration basée sur le réseau de sources lasers. Ce choix est donc préconisé dans le cas où l'angle du cône de mesure devient suffisamment important pour imposer la correction des distorsions optiques et accéder à la zone centrale de l'espace de mesure. De plus, l'usage de l'imageur DMD augmente la résolution mais au prix d'un montage optique plus encombrant (voir figure 4.31).

4.3.4 Imageur laser DMD et prismes pour la mesure de plusieurs cibles

Les combinaisons précédemment décrites s'intéressent à la capture de trajectoire d'une seule cible. Pour cela, les deux orientations du module de mesure globale et de la profondeur à l'aide d'un traitement à base de temps de vol sont exploitées. L'approche théorique présentée dans ce paragraphe pose la question de la possibilité de mesurer la position de plusieurs cibles. Ce concept innovant consisterait à simplifier la mesure de profondeur par un procédé de triangulation inspiré du principe du vélocimètre à franges.

La configuration des dispositifs est similaire à celle présentée dans le paragraphe "Imageur laser DMD et prismes". L'empreinte laser est constituée de plusieurs lignes dont l'orientation est contrôlée dynamiquement comme illustrée par la figure 4.33. Celle-ci est orientée dans l'espace de manière systématique en suivant une rosace ou une spirale à partir de deux prismes contrôlés à vitesses constantes. Les cibles utilisées sont suffisamment petites pour faire apparaître une succes-

sion de pics au niveau du photo-détecteur. Ceux-ci coïncident avec l'interaction de la cible et des lignes générées par l'imageur laser DMD comme illustrée par la figure 4.34.

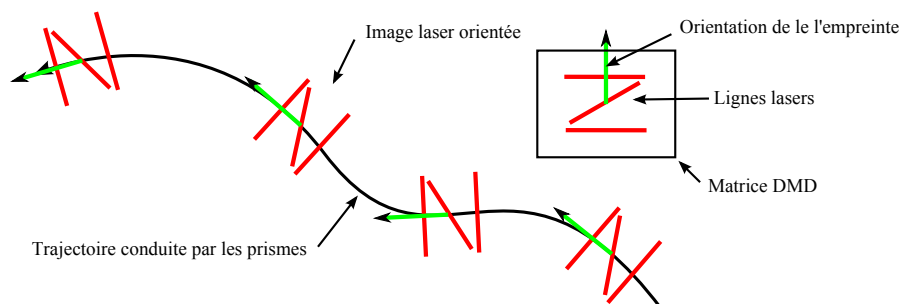


FIGURE 4.33 – Contrôle de l'image laser en fonction de la trajectoire globale

Lors de la " collision " de l'image laser avec une cible détectée par le photo-détecteur, les positions angulaires des moteurs des prismes sont relevées. A Partir de la connaissance du repère sphérique dans lequel évolue le balayage et la géométrie de l'empreinte laser, il est possible de remonter à la position spatiale. Comme l'illustre la figure 4.34, la position de la cible est tout d'abord estimée en profondeur en mesurant les positions angulaires des prismes coïncidant avec les temps T1 et T3. La longueur, entre la première ligne laser et la seconde étant constante quelle que soit la distance grâce à la lumière collimatée, est donc mesurée en divisant cet écart entre les lignes avec l'écart angulaire mesuré entre T1 et T3. Ensuite, le rapport des intervalles angulaires T2-T1 sur T3-T2 donne l'information de position latérale. Cette information, ajoutée la position globale des prismes, donne quasiment de manière analogique, la position de la cible dans l'espace.

Un point important pour la validation de cette stratégie est l'usage de cibles suffisamment petites pour produire des fronts lumineux suffisamment détachés comme l'illustre la figure 4.34.

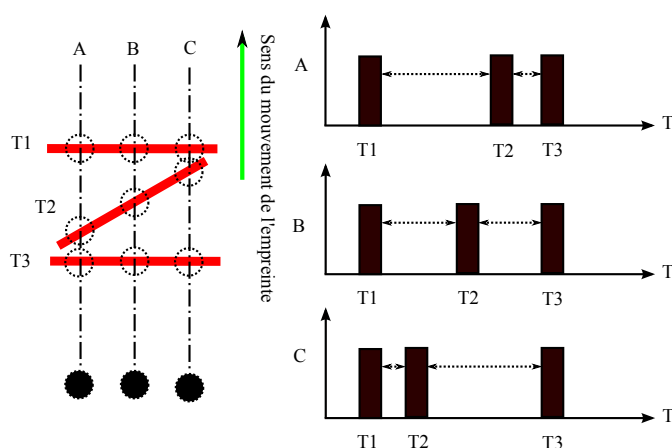


FIGURE 4.34 – Interaction de l'empreinte laser avec une cible

Le succès de cette stratégie est principalement basé sur la faculté de la matrice de micro-miroirs à générer une image laser collimatée et complètement reconfigurable afin de suivre la trajectoire des prismes à haut cadencement. Cette faculté à reconfigurer l'image corrige, en amont du circuit optique, les distorsions créées par les prismes.

Le système pourrait mesurer plusieurs petites cibles selon trois degrés de translation dans l'espace sans avoir recours à une méthode de télémétrie par temps de vol.

En pratique, cette approche inspirée du lecteur de code-barres ou du vélocimètre à frange est relativement exigeante pour l'électronique de traitement du signal. La précision de cette approche repose sur des contraintes temps-réel très importantes. Pour cela, l'électronique de photodétection doit être très rapide et stable.

4.3.5 Imageur laser DMD et robot série

Cette combinaison répond au besoin de cumuler un grand champ de mesure avec la nécessité d'avoir une grande résolution de mesure. Cependant, l'importance de l'équipement optique associé à l'imageur optique DMD ne favorise pas sa mobilité mais cette combinaison peut convenir pour des applications avec des grands champs nécessitant une grande résolution.

4.3.6 Bilan et figure de performances

La philosophie explorée dans ce chapitre est de valoriser le concept de couplage entre un dispositif de mesure locale et un autre de mesure globale. Les forces et faiblesses des différentes combinaisons envisageables avec 4 modules ont été discutées.

Afin de confronter les différents constats formulés, la figure 4.35 reprend chacune des configurations et les positionnent de manière relative en fonction des critères comme le de champ de mesure, le nombre de cibles, la dynamique, le bas-coût et la résolution. Le bilan de cette figure est que les différentes combinaisons sont complémentaires. Globalement, les méthodes utilisant la matrice de sources lasers offre un bon rapport entre coût et précision. L'usage du DMD est plus complexe mais offre plus de précision et de modularité contribuant à la performance de l'ensemble. Cependant, un autre constat concerne la pertinence du découplage pour des applications multi-cibles. Le rapport entre complexité et performances reste encore à démontrer.

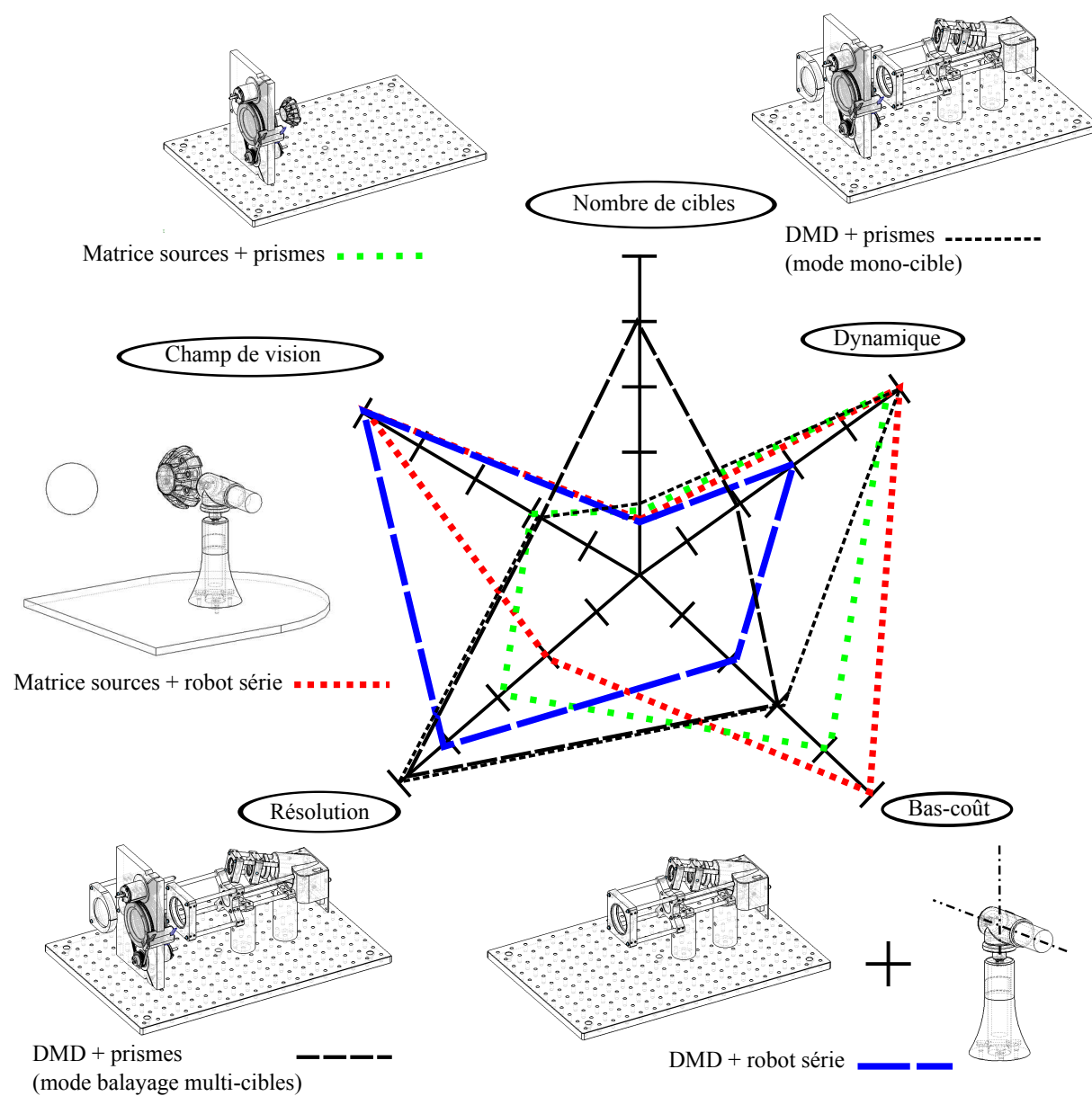


FIGURE 4.35 – Comparatif des performances des combinaisons de couplage mesure locale/globale

Conclusion générale

La thématique abordée dans ces travaux de thèse est la numérisation de la trajectoire d'une cible dans l'espace. Après la numérisation de documents papiers, de photos, de films, la numérisation d'un mouvement est un nouveau challenge offrant un spectre d'applications touchant de nombreux domaines pour un public non expert.

Les dispositifs existants sont encore peu nombreux et chacun reposent sur des technologies différentes. Chacune d'entre elle propose des compromis autour des paramètres spécifiant la mesure d'une trajectoire. La résolution, la précision, le champ de mesure, la complexité des cibles et leurs natures, la robustesse sont autant de caractéristiques techniques qu'il est également indispensable d'associer avec les notions de facilité d'usage et de coût pour en démocratiser l'usage.

L'orientation stratégique proposée dans cette étude propose des compromis en combinant deux approches. L'approche "locale", se consacre à la mesure de la position d'une cible passive dans un espace réduit. Elle repose sur des techniques de balayages à haute dynamique sans pièces mécaniques en mouvement. La seconde approche combinée est la mesure "globale". Sa fonction est d'apporter une extension du champ de mesure. Elle est assurée par des technologies dont les performances dynamiques sont moins déterminantes et moins onéreuses. Associée à cette stratégie de découplage, l'usage de la technologie laser constitue un bon outil de mesure optique sans contact et robuste face aux conditions environnementales. L'usage du laser est d'autant plus intéressant que cette technologie devient de plus en plus abordable grâce aux efforts de développement initialement dédiés au marché de la fibre optique.

Le prototype décrit dans le chapitre 3 de cette étude valide le principe de découplage. Les performances obtenues restituent la trajectoire d'une cible passive dans un grand espace de manière robuste et sans préparatifs experts. Les concepts implémentés sont simples et reproductibles avec des composants électromécaniques standards. Cette approche, désormais brevetée, est actuellement en cours de transfert technologique pour le contrôle redondant en position d'un robot d'inspection en milieu hostile et restreint.

Afin d'étayer cette stratégie de découplage, le chapitre 4 a proposé d'autres exemples de dispositifs de mesure locale et globale qui ont été confrontés dans une étude des différentes combinaisons envisageable. Globalement, les méthodes utilisant la matrice de sources lasers offre un bon rapport entre coût et précision. La stratégie de commutation séquentielle des diodes lasers ainsi que l'usage d'un simple photo-détecteur unitaire a contribué à la simplicité du dispositif. L'implémentation

du DMD est plus complexe mais offre plus de précision et de modularité contribuant à la performance de l'ensemble. Concernant la pertinence du découplage pour des applications multi-cibles, le rapport entre complexité et performances reste encore à démontrer.

Les concepts innovants mis en avant, reposent à la fois sur les deux dispositifs de mesure locale présentés mais aussi sur l'idée d'avoir une approche modulaire et adaptée en fonction du besoin. L'un des dispositifs de mesure locale valorise la possibilité de fabriquer des matrices de sources lasers VCSEL pour supprimer les traditionnels mécanismes à balayage. De plus, les procédés de micro-fabrication offre la possibilité de fabriquer sur le même substrat, un réseau de sources lasers VCSEL ainsi que le photo-détecteur donnant ainsi un fort potentiel de fabrication et d'assemblage simplifiée. La seconde alternative explorée, repose sur la formation d'une image laser collimatée de grande résolution et à grand taux de rafraîchissement à l'aide d'une matrice de micro-miroirs DMD.

Les perspectives d'évolution de ces nouvelles technologies issues de la micro-fabrication sont nombreuses. D'un côté, la réduction des coûts de fabrication des matrices de sources laser VCSEL doit permettre de fabriquer une plus grande variété de matrices d'émetteurs qui sont aujourd'hui réservées aux applications de communication par fibres optiques à des longueurs d'onde non optimisées pour la sécurité oculaire. Ensuite, beaucoup de travaux de recherche sont orientées sur les micro-miroirs à orientations continues et non binaire, contrairement au DMD abordé dans cette étude. Ces travaux peuvent potentiellement conduire à la disparition des dispositifs complexes assemblés de type moteur à courant continu. Enfin, l'une des voies d'évolutions, certainement des plus encourageantes, concerne la fabrication en matrice de détecteurs à haute sensibilité et à haute bande passante sur une grande densité de surface, permettant de remplacer progressivement les caméras à pixel colorimétrique en dispositif de mesure à 3 dimensions. En effet, les premiers systèmes démontrent la viabilité du principe mais dont la robustesse et la résolution constitue actuellement des voies d'amélioration.

Bibliographie

- [AST09] ASTM. Astm g173-03. URL : <http://rredc.nrel.gov/>, 2009.
- [Bel10a] Mary Bellis. Bar codes. URL : <http://inventors.about.com>, 2010.
- [Bel10b] Mary Bellis. History of computer printers. URL : <http://inventors.about.com>, 2010.
- [Bel10c] Mary Bellis. History of the compact disk or cd. URL : <http://inventors.about.com>, 2010.
- [Bio05] Biometrics. URL : <http://www.biometrics.fr>, 2005.
- [BP05] Nissanka Bodhi Priyantha. *The Cricket Indoor Location System*. PhD thesis, MIT, 2005.
- [CBSSF09] A. Collet, D. Berenson, S. S. Srinivasa, and D. Ferguson. Object recognition and full pose registration from a single image for robotic manipulation. In *IEEE ICRA : Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, 2009.
- [Cor06] Newport Corporation. Oriel photodiode detectors for optical power meter. URL : <http://www.newport.com/>, 2006.
- [Cor09] Newport Corporation. Lois de radiation. URL : <http://www.newport.com/>, 2009.
- [C.V] C.Vergnenègre. Sécurité laser au laas-cnrs. URL : <http://www2.laas.fr/>.
- [cyb09] cyberglovesystems. Cyberglove. URL : <http://www.cyberglovesystems.com/>, 2009.
- [Del00] V. Delaye. *Etude et réalisation d'un télémètre laser par temps de vol*. PhD thesis, INPG, 2000.
- [dG10] Université de Genève. La lumière, type de spectre. <http://tecfa.unige.ch/>, 2010.
- [Fut08] Futuroscope. Les animaux du futur. URL : <http://www.lesanimauxdufutur.com/>, 2008.
- [Haf00] M. Hafez. *Compact Fast-steering Tip/Tilt Laser Scanner for High Power Material Processing Applications*. PhD thesis, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, 2000.
- [Hap09] Haption. Virtuouse 6d35-45. URL : <http://www.haption.com/>, 2009.
- [HQ73] G. M. Hale and M. R. Querry. Optical constants of water in the 200nm to 200 μ m wavelength region. *Appl. Opt.*, 12, pages 555–563, 1973.

- [HS92] Y. Hirata and M. Sato. 3-dimensional interface device for virtual work space. In *IEEE/RSJ International Conference on IROS, vol.2, pp889-896*, pages pp889–896, 1992.
- [Hud69] R.D. Hudson. Infrared system engineering. JohnWiley and Sons, 1969.
- [Ima08] MESA Imaging. Sr4000 user manual. URL : <http://www.mesa-imaging.ch/>, 2008.
- [Ins05] Texas Instrument. Using lasers with dlp(r) dmd technology. TI DN 2509927, 2005.
- [Ins09] Texas Instruments. Dlp. URL : <http://www.ti.com/>, 2009.
- [JL98] J-L.MEYZONNETTE. Conception de capteurs optroniques e4075. <http://www.techniques-ingenieur.fr>, 1998.
- [JL07] J-L.MEYZONNETTE. Capteurs optroniques opi-fr-m05-c05. URL : <http://prn1.univ-lemans.fr/prn1/siteheberge/PublisCours-OPI/>, 2007.
- [Kau05] K. Kaufmann. Choosing your detector. URL : <http://sales.hamamatsu.com/>, 2005.
- [LG09] Leica-Geosystem. Leica absolute tracker. URL : <http://www.leica-geosystems.fr/>, 2009.
- [M.B94] Van Stryland M.Bass. E.w. (eds.) handbook of optics vol. 2 (2nd ed.). McGraw-Hill, 1994.
- [Mov08] Movea air mouse fiche technique. URL : <http://www.movea-tech.com/>, 2008.
- [Net09] IEEE Global History Network. Theodore h. maiman. URL : <http://www.ieeeahn.org>, 2009.
- [Phi00] PhilipsAN22. Electronic compass design using kmz51 and kmz52. URL : Philips Semiconductors Datasheet, 2000.
- [Pho09] Hamamatsu Photonics. Sensibilité spectrale. URL : <http://sales.hamamatsu.com/>, 2009.
- [pKSSD04] Hamamatsu photonics K.K Solid State Division. Si photodiode. URL : <http://sales.hamamatsu.com/>, 2004.
- [Pol09] Polhemus. Motion tracking polhemus. URL : <http://www.polhemus.com/>, 2009.
- [PP05] J. Kostamovaara P. Palojärvi, T. Ruotsalainen. A 250-mhz bicmos receiver channel with leading edge timing discriminator for a pulsed time-of-flight laser rangerfinder. *IEEE Journal of solid-state circuits*, pages Vol. 40, No.6, 2005.
- [RJJST07] Hakki H. Refai, Jr James J. Sluss, and Monte P. Tull. Digital micromirror device for optical scanning applications. *Optical Engineering* 46, 085401, page 8, 2007.
- [RLP09] D. Roetenberg, H. Luinge, and Slycke P. Xsens mvn : Full 6dof human motion tracking using miniature inertial sensors. URL : <http://www.xsens.com/>, 2009.
- [Rob99] Robocup. URL : <http://www.robocup.org/>, 1999.
- [Sch06] C. Schwarze. A new look at risley prisms. URL : <http://www.optra.com/>, 2006.
- [Sci08] Sciences.gouv.fr. Le laser : histoire d'un rayon. URL : <http://www.science.gouv.fr/>, 2008.

- [Sha07] Sharayanan. Electromagnetic spectrum. URL : <http://fr.wikiversity.org>, 2007.
- [Sid03] J. Siddharth. A survey of laser range finding. URL : <http://awargi.org>, 2003.
- [sku08] skullsinthestars. Optics basics : Coherence. URL : <http://skullsinthestars.com/2008/09/03/optics-basics-coherence/>, 2008.
- [SP99] D. Miller S. Poujouly, B. Journet. Laser range finder based on fully digital phase-shift measurement. In *IEEE*, 1999.
- [SPI03] A. Cassinelli S. Perrin and M. Ishikawa. Laser-based finger tracking system suitable for moems integration. In *New Zealand (IVCNZ 2003)*, pages pp.131–136, 2003.
- [SPI04] A. Cassinelli S. Perrin and M. Ishikawa. Gesture recognition using laser-based tracking system, 6th international conference on automatic face and gesture recognition. In *6th International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*, 17-19 May 2004.
- [TC06] G. Zhang B. Chen T. Chen, L. Zhang. Design of a displacement/angle measurement system based on laser triangulation principle. In *Proceedings of International Technology and Innovation Conference*, 2006.
- [Tho09] Wedge prisms. URL : <http://www.thorlabs.com>, 2009.
- [TJ08] M. Tirabassi and S. J. Rothberg. Scanning ldv using wedge prisms. *Optics and Lasers in Engineering* 47, page 454 460, 2008.
- [Tra06] Art Tracking. Fingertracking. URL : <http://www.ar-tracking.de>, 2006.
- [vic09] URL : <http://www.vicon.com/>, 2009.
- [VM08] W. K. Lo V. Milanovic. Fast and high-precision 3d tracking and position measurement with mems micromirrors. In *IEEE/LEOS Optical MEMS and Their Applications Conf.*, page 0, 2008.