



Identification et mise à l'essai d'un robot parallèle entraîné par câbles

Mémoire

Nicolas Tremblay

Maîtrise en génie mécanique - avec mémoire
Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

Identification et mise à l'essai d'un robot parallèle entraîné par câbles

Mémoire

Nicolas Tremblay

Sous la direction de:

Philippe Cardou, directeur de recherche
Marc Gouttefarde, codirecteur de recherche

Résumé

Les robots parallèles entraînés par câbles sont un type de manipulateur bénéficiant d'un grand espace de travail en translation tout en offrant des performances dynamiques supérieures à celles des architectures de robots traditionnelles. Malgré tout, ceux-ci demeurent tout de même peu utilisés et les rares prototypes qui existent sont la plupart du temps trouvés en milieu académique. Plusieurs problèmes qui empêchent l'implantation des robots parallèles à câbles en milieu industriel nécessitent encore un peu de travail. Le but principal de ce manuscrit est d'étudier et de proposer des solutions à quelques problèmes qui pourraient survenir lors de la mise en service de tels robots.

Premièrement, une méthode d'identification du couple d'encochage aux moteurs est utilisée afin d'uniformiser le mouvement à basse vitesse des moteurs. Les courbes de couple d'encochage résultantes sont par la suite incorporées à un schéma de commande qui est utilisé de manière subséquente.

Deuxièmement, des essais de téléopération sont effectués avec un robot plan afin de simuler une tâche d'assemblage à moyenne échelle. Ces tests permettent de déterminer qu'une précision de ± 5.3 mm est atteignable lorsqu'un humain commande l'effecteur en étant basé sur une rétroaction visuelle seulement.

Troisièmement, on remarque généralement que les robots parallèles entraînés par câbles ont une précision absolue moindre que les autres robots parallèles. Afin de tenter de résoudre ce problème, une méthode d'étalonnage automatique à l'aide d'une caméra embarquée est proposée. Celle-ci inclut une méthode de génération d'une liste de poses d'étalonnage. Un modèle d'erreur est également proposé et comparé aux résultats obtenus en simulation. En dernier lieu, une validation expérimentale est réalisée, puis une vérification permet de conclure que l'application de la méthode se traduit par une erreur moyenne de 31 mm en position et 1.6° en orientation.

Abstract

Cable-driven parallel robots are a type of manipulator allowing for a large translational workspace and superior dynamic capabilities than their traditional equivalent. Nevertheless, these robots still remain little used and the few prototypes that exist are mostly found within academia. Several problems preventing the implementation of cable-driven parallel robots in industrial environments still need to be worked on. The purpose of this manuscript is to study and propose solutions to some problems that may arise during the putting into service of such robot.

First, to ensure uniform operation of the robot at low speed, an identification of the cogging torque is performed. Resulting cogging torque curves are then incorporated into a control scheme that is subsequently used.

Second, an accuracy assessment is carried out on a planar robot in order to mimic a medium-sized assembly task. These tests determine that an accuracy of $\pm 5.3\text{mm}$ can be achieved when a human teleoperates the end effector using only a visual feedback.

Third, cable-driven parallel robots are generally less accurate in absolute than other parallel robots. In an effort to solve this issue, an automatic eye-on-hand calibration method is proposed. It includes an algorithm for the generation of a list of calibration poses. An error model is also proposed and the results are compared to the ones obtained by simulation. Finally, an experimental validation is carried out along with a verification of the resulting accuracy. The mean post-calibration error measured is 31 mm in position and 1.6° in orientation.

Table des matières

Résumé	iii
Abstract	iv
Table des matières	v
Liste des tableaux	viii
Liste des figures	ix
Remerciements	xii
Introduction	1
1 Compensation du couple d'encoche d'un moteur à courant continu sans balais	4
1.1 Introduction	4
1.2 Description du phénomène et techniques de réduction existantes	5
1.3 Méthode d'identification	6
1.4 Identification	7
1.4.1 Montage	7
1.4.2 Procédure	8
1.4.3 Schéma de commande de compensation	11
1.5 Validation expérimentale, résultats et discussion	12
1.6 Conclusion	12
2 Évaluation de la précision lors d'une tâche de téléopération	15
2.1 Introduction	15
2.2 Variables à l'étude	16
2.3 Modèle d'un robot à câbles plan	17
2.3.1 Problème géométrique inverse	17
2.3.2 Équations de vitesse	18
2.3.3 Problème géométrique direct	18
2.4 Schéma de commande	19
2.4.1 Commande en position	20
2.4.2 Génération d'une distribution de tension	21
2.4.3 Commande en vitesse	22
2.5 Montage expérimental	23

2.5.1	Interface maître-esclave	23
2.5.2	Système de suivi de mouvements	25
2.6	Méthodologie	26
2.7	Résultats	27
2.8	Discussion	28
2.9	Conclusion	31
3	Méthode d'étalonnage à l'aide d'une caméra embarquée	32
3.1	Introduction	32
3.2	Modèle d'un robot à câbles spatial	34
3.2.1	Problème géométrique inverse	34
3.2.2	Équations de vitesse	34
3.2.3	Problème géométrique direct	35
3.3	Formulation du problème d'étalonnage	36
3.3.1	Étalonnage à l'aide d'une caméra embarquée	38
3.4	Génération d'une liste de poses atteignables	39
3.4.1	Trajectoire à l'intérieur de l'espace statique	40
3.4.2	Vérification à l'aide du logiciel <i>ARACHNIS</i>	41
3.4.3	Trajectoire sans interférence entre câbles	42
3.4.4	Liste de poses atteignables	43
3.4.5	Choix des plans formant la boîte de génération des poses à atteindre	44
3.5	Simulation	46
3.5.1	Nombre de poses d'étalonnage nécessaires	46
3.5.2	Modèle d'erreur	47
3.5.3	Comparaison entre les résultats de la simulation et du modèle d'erreur	51
3.5.4	Analyse de la propagation d'erreurs lors de la combinaison de plu- sieurs erreurs de mesure	53
3.6	Commande	54
3.6.1	Commande de la pose de haut niveau	54
3.6.2	Distribution de tension	57
3.6.3	Commande en vitesse	58
3.7	Validation expérimentale	58
3.7.1	Montage expérimental	58
3.7.2	Validation des hypothèses	58
3.7.3	Essais et résultats	63
3.8	Analyse de la précision de la reconstruction de la carte de marqueurs	67
3.9	Discussion	69
3.10	Conclusion	72
	Conclusion	73
	A Fiches techniques	76
	B Résultats de la comparaison entre le modèle d'erreur et la simulation	83
	C Résultats de l'analyse de propagation d'erreur pour des erreurs de mesures combinées	90
	D Résultats des étalonnages	94

Liste des tableaux

1.1	Principales spécifications techniques du moteur	7
2.1	Erreurs mesurées selon le type d'opération, le facteur d'échelle et la position de la grille.	28
2.2	Temps de réalisation de la tâche selon le type d'opération, le facteur d'échelle et la position de la grille	30
3.1	Valeurs de bruit à un écart type causant une erreur du modèle d'environ 20% sur les erreurs quadratiques obtenues en simulation.	53
3.2	Valeurs d'affaissement et effet sur la longueur totale du câble pour différentes tensions	61
3.3	Résultats de l'étalonnage	66
3.4	Erreurs de pose de la caméra, relativement à la référence	66
3.5	Incohérences de la pose caméra, relativement à la solution du PGD	67
D.1	Résultats de l'étalonnage pour l'échantillon de poses A (mm)	95
D.2	Résultats de l'étalonnage pour l'échantillon de poses B (mm)	95
D.3	Résultats de l'étalonnage pour l'échantillon de poses C (mm)	95

Liste des figures

1.1	Schéma d'un moteur cc sans balais	6
1.2	Schéma de commande utilisé pour la caractérisation du couple d'encoche	6
1.3	Enrouleur utilisé et ses principales composantes	8
1.4	Courbes du couple d'encoche brut pour les deux sens de rotation	9
1.5	Superposition des courbes de couple d'encoche sur une période d'un quart de tour	9
1.6	Courbes de couple d'encoche générées lors de l'identification et celles qui sont utilisées pour la compensation.	10
1.7	Caractérisation du couple d'encoche dans un cas de perte de contrôle du mouvement du rotor en certains points.	11
1.8	Schéma de commande en vitesse utilisé pour compenser le couple d'encoche.	12
1.9	Suivi de la consigne et effort du régulateur PID, avec et sans compensation	13
1.10	Variation de la vitesse du rotor par rapport à la consigne, avec et sans compensation	13
2.1	Modèle géométrique du robot utilisé pour la téléopération.	17
2.2	Schéma de commande du robot à câbles plan utilisé pour la téléopération.	19
2.3	Régulateur de position C_p	21
2.4	Vue globale du montage expérimental du robot esclave	23
2.5	Robot maître : interface haptique <i>Touch</i> . Tiré de [1]	24
2.6	Rétroaction visuelle fournie à l'opérateur.	24
2.7	Schéma du contenu des paquets échangés lors de la téléopération.	25
2.8	Trajectoire devant être suivie lors de la tâche de téléopération.	26
2.9	Principales dimensions des cibles	26
2.10	Erreur mesurée selon le type d'opération.	29
2.11	Erreur mesurée selon le facteur d'échelle entre l'esclave et le maître.	29
2.12	Erreur mesurée selon la position de la grille dans l'espace du robot.	30
3.1	Modèle géométrique d'un robot à câbles spatial	33
3.2	Modèle géométrique d'un robot à câbles pour un étalonnage à l'aide d'une caméra embarquée	36
3.3	Comparaison entre l'espace de travail à orientation constante généré par la méthode proposée et par le logiciel <i>ARACHNIS</i>	42
3.4	Comparaison entre trois sections de l'espace de travail à orientation constante généré par la méthode proposée et trois autres sections générées par le logiciel <i>ARACHNIS</i>	43
3.5	Exemple de pose atteignable générée à partir de X_0 et X_r	44
3.6	Illustration de l'effet sur X_j de différentes boîtes \mathcal{Z}	45

3.7	Effet du nombre de poses d'étalonnage n sur l'erreur quadratique moyenne e_{rms} sur les paramètres géométriques à reconstituer lorsqu'une erreur aléatoire de ± 3 mm sur les longueurs de câbles est ajoutée.	47
3.8	Effet du nombre de poses d'étalonnage n sur l'erreur quadratique moyenne e_{rms} sur les paramètres géométriques à reconstituer lorsque des erreurs aléatoires de ± 3 mm, ± 2 mm et $\pm 1^\circ$ sont ajoutées respectivement sur $\boldsymbol{\rho}$, \mathbf{p} et \mathbf{Q}	48
3.9	Schéma de commande du robot à câbles pour étalonnage	55
3.10	Disposition des câbles attachés à l'effecteur	59
3.11	Système embarqué de vision	59
3.12	Schéma de l'architecture matérielle et logicielle utilisée pour l'étalonnage	60
3.13	Chaînette	60
3.14	Résultats des tests d'élasticité du câble en <i>Dyneema</i>	62
3.15	Détection des marqueurs dans deux images d'étalonnage	63
3.16	Carte de marqueurs reconstituée et poses de caméra correspondantes	64
3.17	Poses de vérification de l'étalonnage	65
3.18	Représentation des liens entre les différentes sources de mesures	66
3.19	Vue rapprochée d'une partie de la superposition des trois cartes de marqueurs reconstruites	67
3.20	Erreurs de position relatives entre les origines des mêmes marqueurs en fonction de la distance de ceux-ci par rapport à l'origine du marqueur de référence	68
3.21	Erreurs entre les positions établies des coins des marqueurs en fonction de leur distance du marqueur de référence	69
3.22	Erreurs moyennes en position après étalonnage	70
3.23	Erreurs moyennes en orientation après étalonnage	70
3.24	Incohérences moyennes en position entre les instruments de mesure	71
3.25	Incohérences moyennes en orientation entre les instruments de mesure	71
B.1	Comparaison des erreurs obtenues en simulation et pour le modèle d'erreur selon le biais sur $\boldsymbol{\rho}$	84
B.2	Comparaison des erreurs obtenues en simulation et pour le modèle d'erreur selon le biais sur \mathbf{p}	85
B.3	Comparaison des erreurs obtenues en simulation et pour le modèle d'erreur selon le biais sur \mathbf{Q}	86
B.4	Comparaison des erreurs obtenues en simulation et pour le modèle d'erreur selon le bruit sur $\boldsymbol{\rho}$	87
B.5	Comparaison des erreurs obtenues en simulation et pour le modèle d'erreur selon le bruit sur \mathbf{p}	88
B.6	Comparaison des erreurs obtenues en simulation et pour le modèle d'erreur selon le bruit sur \mathbf{Q}	89
C.1	Estimation de l'erreur quadratique moyenne (mm) commise sur \mathbf{a} selon les valeurs de bruit sur \mathbf{p} et $\boldsymbol{\rho}$	91
C.2	Estimation de l'erreur quadratique moyenne (mm) commise sur $\boldsymbol{\rho}_0$ selon les valeurs de bruit sur \mathbf{p} et $\boldsymbol{\rho}$	91
C.3	Estimation de l'erreur quadratique moyenne (mm) commise sur \mathbf{a} selon les valeurs de bruit sur \mathbf{p} et \mathbf{Q}	92
C.4	Estimation de l'erreur quadratique moyenne (mm) commise sur $\boldsymbol{\rho}_0$ selon les valeurs de bruit sur \mathbf{p} et \mathbf{Q}	92

C.5	Estimation de l'erreur quadratique moyenne (mm) commise sur \mathbf{a} selon les valeurs de bruit sur $\boldsymbol{\rho}$ et \mathbf{Q}	93
C.6	Estimation de l'erreur quadratique moyenne (mm) commise sur $\boldsymbol{\rho}_0$ selon les valeurs de bruit sur $\boldsymbol{\rho}$ et \mathbf{Q}	93

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier Philippe Cardou, mon directeur de recherche, qui m'a d'abord donné l'opportunité de me lancer dans cette aventure, puis m'a épaulé tout au long de cette dernière à l'aide de judicieux conseils et de formulations mathématiques élégantes. Ce travail n'aurait certes pas été le même sans son savoir, sa patience et sa grande disponibilité.

J'adresse aussi des remerciements à Marc Gouttefarde, mon codirecteur de recherche. Malgré la distance qui sépare l'Université Laval du LIRMM, son savoir-faire au sujet des robots parallèles entraînés par câbles aura apporté une contribution sans égal.

Merci également à Simon Foucault et Thierry Laliberté, professionnels de recherche du Laboratoire de robotique, qui n'ont jamais hésité une seconde à mettre de côté leur nombreux projets afin de pouvoir donner un coup de main.

Merci aussi à Hugo Carlier et Vincent Bertholon pour leur contribution en tant que stagiaires à l'été 2018. Sans eux, la préparation des tests expérimentaux aurait été une toute autre paire de manches. Je tiens également à remercier Guofan Yin et Jeremy Cooperstock, du Shared Reality Lab de l'Université McGill, sans qui la réalisation des essais de téléopération n'aurait pas été possible.

Je tiens également à remercier Sylvie Daniel et Christian Larouche, du Département des sciences géomatiques, ainsi que Denis Ouellet, du Laboratoire de vision et systèmes numériques, pour le prêt des appareils de mesures de grande échelle et le support technique s'y rattachant.

Merci à ma famille de m'avoir supporté et encouragé tout au long de mes études et finalement, un grand merci à Alison qui a su être à mes côtés depuis le tout début de mes études supérieures.

Introduction

Le potentiel des robots parallèles à accomplir des tâches ne pouvant pas être réalisées par leurs équivalents sériels est indéniable. De par leur architecture en boucle fermée, les robots parallèles sont intrinsèquement plus rigides, peuvent supporter de plus grandes charges et bénéficient de meilleures capacités dynamiques. Cependant, dans de tels robots, les multiples chaînes cinématiques qui relient l'effecteur aux moteurs situés sur la base du robot peuvent parfois causer certains problèmes. En effet, celles-ci sont généralement constituées d'éléments ayant une longueur minimale lorsque rétractés, ce qui limite l'espace de travail en translation de tels robots. Ces mécanismes sont donc utilisés dans des environnements de petite taille où la vitesse d'exécution d'une tâche est critique ou encore quand la charge utile à manipuler est très élevée.

De plus, la majorité des robots parallèles possèdent des membrures rigides subissant des efforts soit en flexion, comme les robots Delta, ou en compression, comme la plate-forme de Gough-Stewart. Dans les deux cas, il est essentiel de limiter les forces exercées par les actionneurs afin d'éviter la déformation ou le flambage des composantes ainsi sollicitées. Le remplacement de ces membrures par des câbles permet d'obtenir des liens ne travaillant qu'en tension, ce qui assure l'utilisation optimale du matériau qui les compose. Pour une même charge utile, la masse des composantes constituant les chaînes cinématiques est donc considérablement réduite.

Ce faisant, il est possible d'appliquer des forces de grande amplitude sur un ensemble de pièces en mouvement initialement très léger. Ainsi, le robot peut supporter une charge utile importante ou produire des accélérations très élevées, tout en conservant la rigidité typique aux robots parallèles. Naturellement, il est possible d'enrouler et de dérouler les câbles, ce qui permet de déplacer l'effecteur sur des distances largement supérieures à ce qui peut être accompli par d'autres types de robots. Un robot parallèle à câbles peut donc bénéficier d'un espace de travail en translation de plusieurs ordres de grandeur supérieur à ce qu'il est possible d'obtenir en utilisant d'autres architectures. En Chine, le radiotélescope FAST [4, 30] utilise d'ailleurs un robot de ce type afin de positionner la cabine focale au-dessus du réflecteur de 500 m de diamètre.

L'utilisation de câbles permet également que des robots de grande envergure demeurent tout de

même portables. En effet, après avoir détaché les câbles, les enrouleurs peuvent être démontés pour le transport, puis attachés à nouveau à une structure. Un robot parallèle à câbles peut donc être aisément reconfiguré selon la tâche devant être effectuée ou l'environnement dans lequel il se trouve, contrairement à la quasi-totalité des architectures de robots existantes. On peut facilement imaginer l'utilisation d'un tel robot dans plusieurs domaines techniques comme pour la fabrication de structures de grandes tailles [6, 14] ou encore la maintenance d'aéronefs [32]. Cette propriété pourrait également être mise à contribution pour des tâches de manipulation devant être effectuées à l'extérieur, à l'instar d'une grue de chantier à plusieurs degrés de liberté. Par exemple, ces robots pourraient être déployés afin d'être utilisés autant pour des opérations critiques comme la recherche et le sauvetage [5, 43], l'agriculture [37] ou l'assemblage à très grande échelle, comme pour la construction de centrales solaires [35].

On répertorie d'ailleurs plusieurs travaux de recherche visant à développer les applications de fabrication à grande échelle. Les robots parallèles à câbles pourraient notamment être utilisés dans le domaine de la construction qui demeure à ce jour très peu automatisé. Que ce soit en simulation ou de manière expérimentale, ceux-ci peuvent faire de la maçonnerie [24, 42] ou de la fabrication additive à grande échelle afin d'ériger des bâtiments [18, 45].

Jusqu'à maintenant, la très grande majorité des robots parallèles à câbles existants sont des prototypes, utilisés surtout en milieu académique à des fins de recherche. Malgré les avancées récentes, ceux-ci souffrent encore de quelques problèmes qui semblent les empêcher d'être utilisés dans diverses applications concrètes.

L'objectif de ce mémoire est de développer et de vérifier expérimentalement des techniques visant à permettre la mise en route et l'opération d'un robot à câbles. Dans l'optique d'une éventuelle utilisation dans des applications pratiques, comme en milieu industriel, ces dernières devront être simples à mettre en place, nécessiter peu d'intervention de la part de l'opérateur et demeurer relativement peu onéreuses. Afin de simuler au mieux le milieu industriel, une approche expérimentale est préconisée. Bien entendu, il est en premier lieu nécessaire de faire l'identification du robot, pour ensuite procéder à l'essai des techniques proposées sur celui-ci.

Le premier chapitre cherche à faire l'identification du comportement des enrouleurs. Le principal sujet d'intérêt est la compensation du couple d'encoche présent aux moteurs afin d'assurer un mouvement uniforme pour l'ensemble des câbles, principalement à basse vitesse.

Au cours du deuxième chapitre, un robot plan vertical est assemblé. Celui-ci est ensuite utilisé afin de répliquer une tâche d'assemblage à moyenne échelle par téléopération. Le but de ces tests est d'étudier les paramètres qui influencent la précision du mécanisme lorsque la commande est entièrement assurée par un humain. Ces tests sont également utilisés afin de quantifier la précision qu'il est possible d'atteindre au courant d'une tâche d'assemblage de ce type.

Au troisième chapitre, une méthode d'étalonnage à l'aide d'une caméra embarquée est proposée. Combinée à un algorithme de génération de poses atteignables par le robot, celle-ci permet de réaliser un étalonnage de manière automatique. Un modèle d'erreur est par la suite proposé et sa validité est déterminée par comparaison avec des résultats simulés. Puis, plusieurs combinaisons d'erreurs sont analysées à l'aide du modèle de manière à estimer le comportement de la propagation d'erreurs des mesures jusqu'aux résultats finaux. Des essais expérimentaux sont ensuite effectués afin de valider la performance de la méthode. Pour finir, l'analyse des résultats est faite pour mettre en relation les différentes sources d'erreur.

Chapitre 1

Compensation du couple d'encoche d'un moteur à courant continu sans balais

1.1 Introduction

Le principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu (cc) sans balais est analogue à celui d'un moteur à aimants permanents qui serait commuté électroniquement. On y retrouve donc un rotor constitué d'aimants, dont l'orientation est contrôlée par le champ magnétique des différentes bobines du stator. Le fait de remplacer le commutateur mécanique du bobinage d'un traditionnel moteur à courant continu permet d'augmenter le rendement, la durée de vie, la réponse dynamique et la plage de vitesses disponibles tout en réduisant la friction ainsi que le niveau de bruit.

Au cours des dernières décennies, la diminution de la taille et du coût des composantes électroniques, couplée au développement des aimants à bases de terres rares, a permis à ce type de moteur de se démarquer en raison de leurs caractéristiques intéressantes. En effet, les aimants en samarium-cobalt ou en néodyme-fer-bore peuvent générer un champ magnétique intense, ce qui permet d'obtenir une haute densité de puissance et un rendement élevé. Cette architecture de moteurs est donc un choix idéal pour plusieurs applications et est notamment utilisée dans les jouets téléguidés, les outils portatifs, les périphériques d'ordinateurs et maintenant dans certaines voitures électriques, comme la *Tesla Model 3*.

Le couple d'encoche, ou *cogging torque*, est une caractéristique indésirable, dont la variation est attribuable aux encoches présentes dans le stator d'une machine à aimants permanents. Lors du fonctionnement à bas régime de certains moteurs, cette variation peut être assez importante pour causer des fluctuations de vitesses indésirables. Bien qu'il soit possible de construire des stators sans encoches ou sans noyau, respectivement connus en anglais sous

les termes *slotless* et *coreless*, ceux-ci sont généralement plus dispendieux, car plus difficiles à fabriquer.

En robotique, ce phénomène peut être observé lorsque ce type de moteur est utilisé dans un système ayant un faible ratio de réduction. Lorsque c'est le cas pour les enrouleurs d'un robot parallèle à câbles, cet effet peut s'avérer néfaste pour la précision des mouvements, particulièrement lorsqu'ils sont effectués à basse vitesse.

Ce chapitre traite d'abord du phénomène du couple d'encoche. Par la suite, l'application d'une méthode d'identification du couple d'encoche est présentée. Une méthode de compensation pour un moteur asservi est par la suite décrite, avant d'être vérifiée expérimentalement.

1.2 Description du phénomène et techniques de réduction existantes

La figure 1.1 présente une vue de coupe schématisée d'un moteur cc sans balais. Les éléments essentiels à la construction d'un tel moteur y sont identifiés. Comme mentionné précédemment, on utilise les bobines, enroulées autour des pôles du stator, de manière à pouvoir magnétiser ceux-ci et interagir avec les aimants au rotor. Le courant parcourant tour à tour les paires de bobines opposées est donc utilisé afin de faire tourner le rotor.

Le couple d'encoche est dû à la variation de réluctance causée par la géométrie du rotor et du stator. Le rotor a donc tendance à s'aligner avec le stator de manière à ce que la réluctance qu'il observe soit minimisée. Cet effet varie selon la position du rotor et est présent même lorsqu'aucun courant ne circule dans le moteur. À haute vitesse, l'inertie du rotor agit comme un filtre passe-bas, ce qui fait que son effet est davantage perçu à basse vitesse ou dans des situations où le moteur n'est pas relié au système via un haut rapport de réduction.

Plusieurs paramètres influencent le couple d'encoche d'un moteur [47]. Il est entre autres possible de modifier la géométrie du rotor et du stator, comme la largeur des pôles et des espaces d'air. On recommande aussi d'éviter que le nombre d'encoches divisé par le nombre de pôles du rotor soit un nombre entier, ce qui impliquerait l'existence de positions angulaires où les pôles du rotor coïncident simultanément avec plusieurs encoches du rotor. Une autre technique consiste à décaler légèrement l'angle d'empilement des plaques statoriques lors de leur lamination, ce qui permet d'obtenir un stator ayant des encoches inclinées (*skewed*). Cette méthode permet d'éviter la création de points précis où une partie du rotor est parfaitement alignée avec certains pôles et par conséquent adoucit la transition entre les pôles.

Toutefois, l'ensemble de ces méthodes doivent être appliquées lors de la conception du moteur. Il n'est pas envisageable d'utiliser celles-ci afin de réduire le couple d'encoche d'un moteur déjà existant. De plus, celles-ci tendent à diminuer le couple de sortie du moteur.

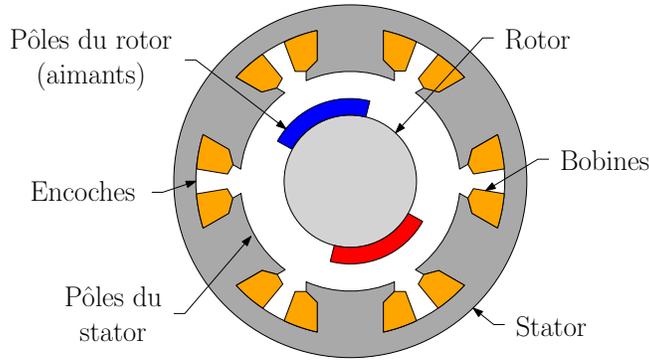


FIGURE 1.1 – Schéma d'un moteur cc sans balais

Afin de réduire le couple d'encoche sur un montage où l'effet de ce dernier s'avère problématique, une méthode de caractérisation ne nécessitant aucun capteur externe mis à part un encodeur est proposée en [34]. Une fois caractérisées, il est possible de compenser ces valeurs de couples dans le schéma de commande. La technique utilisée dans ce chapitre est en grande partie basée sur cette méthode.

1.3 Méthode d'identification

Afin de faire l'identification des courbes du couple d'encoche d'un moteur, celui-ci est asservi en position par un simple régulateur proportionnel à gain élevé. Dans le but d'éviter des perturbations liées à la dynamique du moteur, on commande un balayage de manière quasi statique de l'ensemble des positions angulaires. La figure 1.2 présente le schéma de commande utilisé.

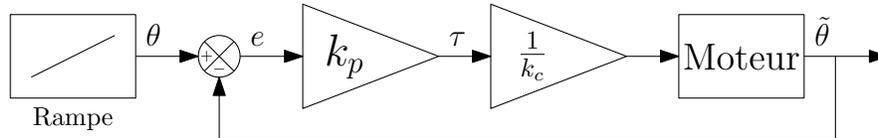


FIGURE 1.2 – Schéma de commande utilisé pour la caractérisation du couple d'encoche

Les diverses sources de friction causent de l'hystérésis, identifiable par des valeurs de couple commandé qui sont différentes selon le sens de rotation de celui-ci. Dans le but d'obtenir des mesures viables pour la caractérisation, il est donc important de s'assurer que le moteur tourne toujours dans le même sens que celui qui est imposé par la rampe à l'entrée du schéma de commande. Le respect de ce critère est assuré par l'utilisation d'un régulateur proportionnel plutôt qu'un régulateur de type PID. En effet, en supposant une friction suffisante dans le moteur, le décalage entre l'angle mesuré $\tilde{\theta}$ et l'angle commandé θ se traduit par un couple τ dont le signe correspond à celui de la pente de la rampe.

Tout au long du processus, une boucle enregistre les valeurs de couple commandé τ correspon-

dant aux valeurs d'angle mesuré $\tilde{\theta}$, ayant comme référence la position de l'index de l'encodeur. On peut ensuite commander le moteur en courant en divisant par la constante de couple du moteur k_c . En répétant le processus dans le sens de rotation inverse, on obtient, pour chaque sens, la courbe du couple nécessaire afin d'amorcer le mouvement du moteur en fonction de sa position. Ces courbes prennent en compte non seulement le couple d'encoche, mais aussi l'ensemble des phénomènes contribuant à la friction dynamique à basse vitesse.

1.4 Identification

Cette section décrit, étape par étape, les actions qui ont été réalisées afin de procéder à l'identification du couple d'encoche, jusqu'à la compensation de ce phénomène dans le schéma de commande. Les actions sont décrites pour un seul moteur, qui sert d'exemple, mais la procédure doit être répétée pour chaque moteur du robot.

1.4.1 Montage

Le moteur utilisé est fabriqué par la compagnie *Parker*. Le tableau 1.1 présente un résumé des spécifications techniques du manufacturier qui sont d'intérêt dans le cadre de la caractérisation. Les spécifications détaillées sont disponibles à l'annexe A.

TABLE 1.1 – Principales spécifications techniques du moteur

Propriété	Valeur	Unité
Modèle	MPP0923D	
Puissance	1.55	kW
Couple nominal	3.00	Nm
Nombre de pôles	8	
Constante de couple (k_c)	0.561	Nm/A

La caractérisation vise un moteur qui est couplé à un réducteur 4:1 et installé sur un enrouleur (figure 1.3). Le moteur entraîne le réducteur, qui, à son tour, actionne une courroie. Cette dernière permet de synchroniser le mouvement du tambour, sur lequel le câble est enroulé ainsi que celui du chariot, ce qui permet d'assurer l'enroulement hélicoïdal désiré.

Le montage nécessaire afin d'identifier le couple d'encoche est relativement simple. En effet, aucun capteur externe, mis à part l'encodeur, n'est nécessaire. Dans le but d'éviter de soumettre le moteur à des perturbations en fonction d'un système quelconque ou qui n'auraient pas la même période que le phénomène d'encoche, la caractérisation du couple d'encoche de celui-ci est effectuée à vide, c'est-à-dire sans charge sur l'arbre du moteur. Le moteur est donc détaché des composantes auxquelles il se rattache normalement.

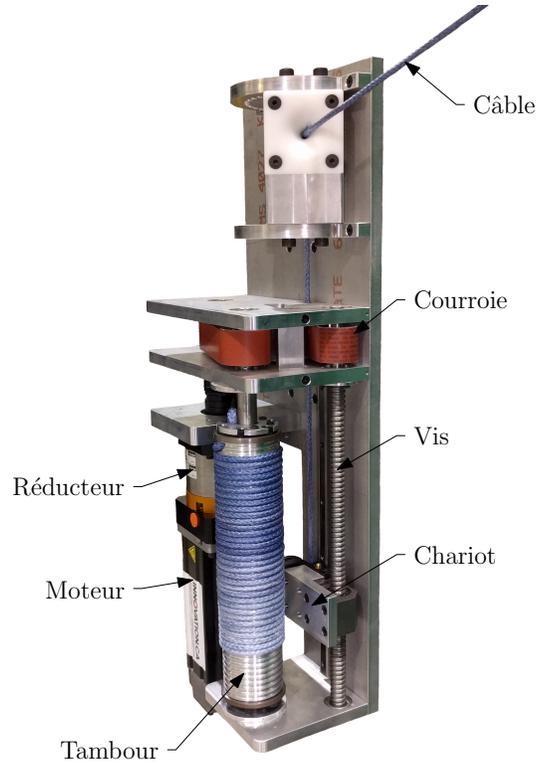


FIGURE 1.3 – Enrouleur utilisé et ses principales composantes

1.4.2 Procédure

L'acquisition des données est faite à basse vitesse, c'est-à-dire à une vitesse de consigne de $3^\circ/\text{s}$ sur une plage de deux tours complets, pour les deux sens de rotation. Des essais ont également été effectués à des vitesses supérieures. Cependant, ceux-ci ont été rejetés, car même si les résultats sont similaires, plus la vitesse est grande, plus le rapport de l'amplitude du bruit sur celle du signal augmente. La figure 1.4 présente donc le couple obtenu sur une seule rotation, pour le sens horaire (SH) et antihoraire (SAH). On remarque que le phénomène cyclique est répété quatre fois par tours, ce qui est dû au fait que le moteur soit constitué de quatre paires de pôles. Il est possible d'isoler, pour chaque courbe, la variation du couple d'encoche $\tau_e(\theta)$ en calculant

$$\tau_e(\theta) = \tau(\theta) - \bar{\tau}(\theta) \quad (1.1)$$

où $\bar{\tau}(\theta)$ est la moyenne du couple commandé sur un cycle. La figure 1.5 présente le résultat, c'est-à-dire la superposition des courbes d'encoche dans les deux sens de rotation sur un seul cycle du moteur. On remarque que les deux courbes sont semblables, mais comportent un décalage en position de moins de trois degrés. En pratique, on pourrait donc obtenir un bon estimé de la variation du couple d'encoche en utilisant la même valeur $\tau_e(\theta)$ dans les deux sens de rotation.

Afin d'obtenir des courbes pouvant être utilisées pour la compensation, les courbes $\tau(\theta)$ doivent

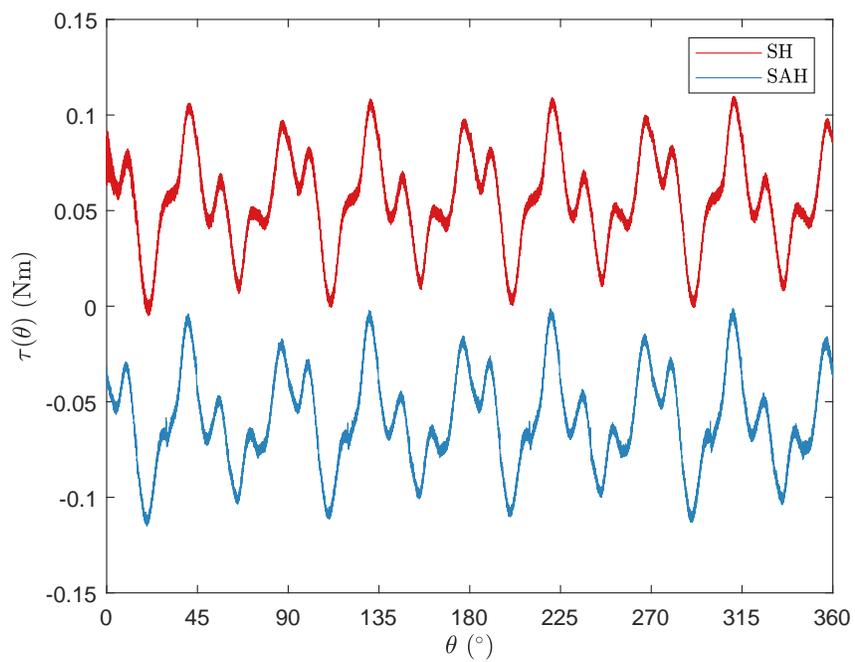


FIGURE 1.4 – Courbes du couple d’encochage brut pour les deux sens de rotation

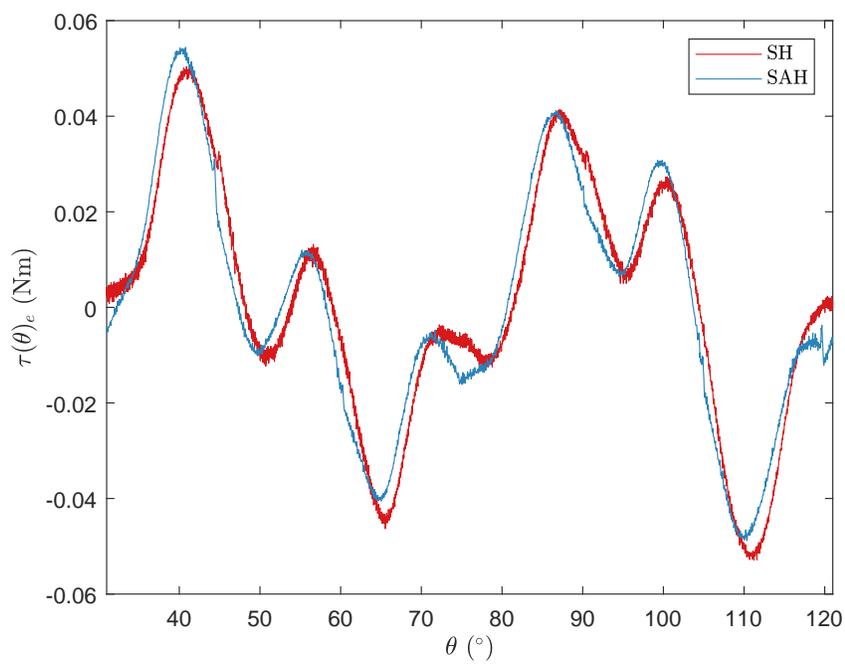


FIGURE 1.5 – Superposition des courbes de couple d’encochage sur une période d’un quart de tour

être filtrées. Dans le cas présent, c'est un filtre à réponse impulsionnelle finie utilisant l'algorithme de Savitzky-Golay qui est appliqué. Afin d'éviter d'écrêter des maximums ou des minimums locaux, des résultats satisfaisants sont obtenus lors du filtrage à l'aide d'un polynôme de degré 2 ou 3, sur une fenêtre d'environ cinq degrés.

La figure 1.6 compare les valeurs brutes et les courbes filtrées en utilisant un polynôme de degré 2. Les courbes $\tau_c(\theta)$ ainsi obtenues seront utilisées pour faire la compensation du couple d'encoche.

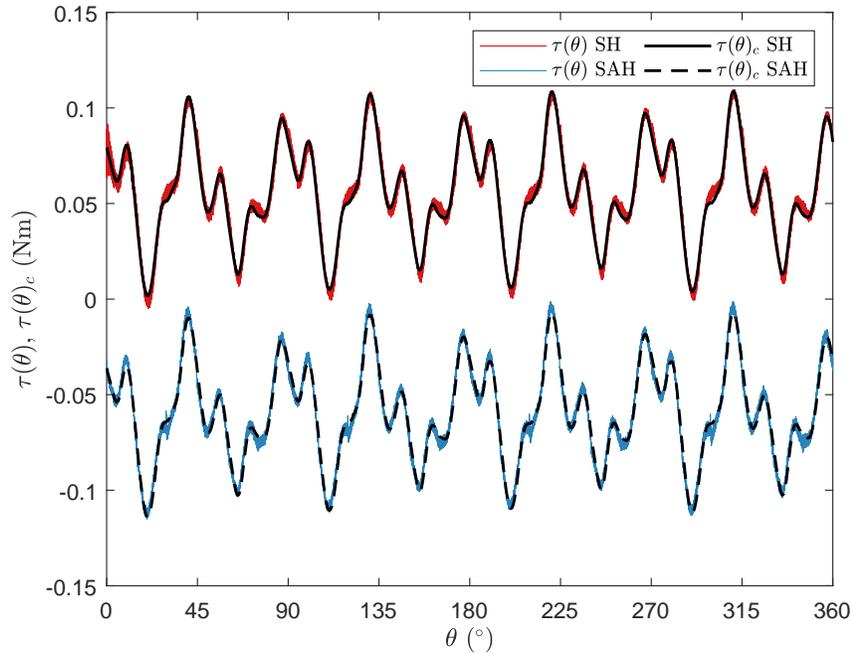


FIGURE 1.6 – Courbes de couple d'encoche générées lors de l'identification et celles qui sont utilisées pour la compensation.

L'utilisation d'un régulateur proportionnel ne permet toutefois pas d'empêcher un éventuel dépassement de la consigne. Ce phénomène est parfois observé lors de la caractérisation de certains ensembles de moteurs et d'entraînements électroniques. La somme de l'effort du régulateur et du couple d'encoche résulte en un couple total provoquant un changement rapide de position angulaire. Lorsque l'action linéaire du régulateur proportionnel n'est pas en mesure d'empêcher le mouvement, un dépassement de consigne survient. L'erreur e devient donc négative, ce qui résulte en un couple commandé $\tau(\theta)$ qui n'est plus représentatif du phénomène d'encoche au moteur, causant ainsi des discontinuités dans la courbe. Évidemment, une compensation de ces valeurs erronées est indésirable.

Lorsque ce problème est rencontré, il est possible d'estimer la portion de courbe $\tau_c(\theta)$ affectée en utilisant les valeurs $\tau_e(\theta)$ de la portion correspondante de la courbe du sens de rotation

inverse. Étant donné que ce problème survient lorsque le couple commandé est faible, les points où une perte de contrôle du rotor est constatée sont différents selon le sens de rotation du moteur. La figure 1.7 montre les résultats de l'application de cette méthode sur un ensemble de moteurs et d'entraînement électronique problématique.

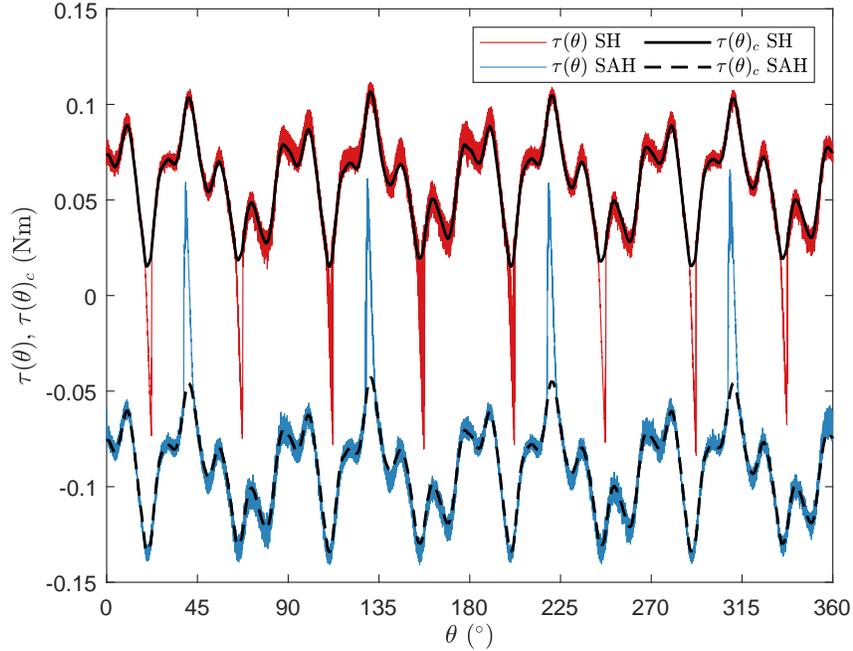


FIGURE 1.7 – Caractérisation du couple d'encochage dans un cas de perte de contrôle du mouvement du rotor en certains points.

1.4.3 Schéma de commande de compensation

La caractérisation effectuée précédemment peut ensuite être utilisée pour simplifier la commande du moteur. En effet, si l'on dispose à tout moment de la position du moteur et de son sens désiré de rotation, il est possible d'ajouter la valeur prédite du couple d'encochage à celle du signal produit par le reste du schéma de commande. Dans le cas présent, cette technique permet de diminuer et de linéariser l'effort devant être fourni par un régulateur proportionnel, intégral et dérivé (PID). Cette addition au schéma de commande tend à réduire l'erreur et permet de suivre de manière plus fidèle la trajectoire prescrite. La figure 1.8 présente un exemple d'application concrète de cette technique de compensation du couple d'encochage τ_c , à un schéma de commande en position. Sur ce schéma, θ est la consigne de position angulaire, tandis que $\tilde{\theta}$ est la valeur de position angulaire mesurée. Ce schéma est utilisé dans la validation expérimentale qui suit.

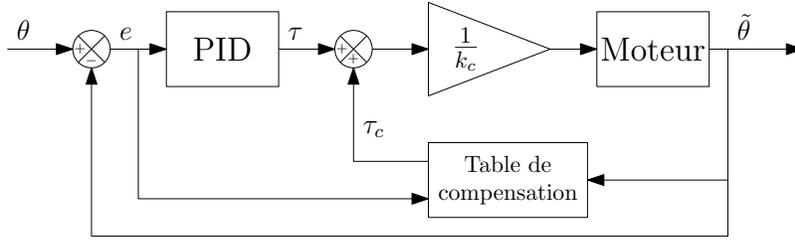


FIGURE 1.8 – Schéma de commande en vitesse utilisé pour compenser le couple d'encochage.

1.5 Validation expérimentale, résultats et discussion

On cherche à vérifier l'effet de la compensation du couple d'encochage sur le moteur. Pour ce faire, une rampe de $22^\circ/\text{s}$ est commandée au moteur à vide. Cette valeur est choisie, car elle correspond à une vitesse d'enroulement du câble de 10 mm/s . Afin de permettre la comparaison, le test est effectué sans compensation, soit $\tau_c = 0$, puis pour une valeur τ_c tirée de l'interpolation de la table de compensation.

Les tests sont réalisés sur une même portion de positions angulaires correspondant à environ un sixième de tour, ce qui reflète bien le comportement du moteur sur une révolution complète. Quelques rotations sont effectuées avant de débiter l'acquisition des données, de manière à laisser un temps suffisant pour que le régulateur PID fonctionne en régime permanent.

La figure 1.9 présente la réponse en position du système, selon la consigne, ainsi que l'effort devant être produit par le régulateur PID, pour les deux situations. À son tour, la figure 1.10 montre l'erreur en vitesse par rapport à la rampe prescrite. On remarque que les variations de position sont beaucoup plus brusques et importantes lorsqu'il n'y a pas de compensation. Le suivi de la consigne est donc considérablement meilleur avec la compensation du couple d'encochage, soit une erreur quadratique moyenne trois fois moins importante.

En observant le couple commandé, on remarque que ces dépassements surviennent à des maximums locaux de couple d'encochage, difficilement endossables par le régulateur PID, dont l'action est linéaire. Celui-ci tarde donc à produire le couple nécessaire pour maintenir la vitesse et lorsque le maximum de couple est atteint, il provoque un dépassement important de la consigne. Lorsque le couple d'encochage, non linéaire, est compensé, le couple requis de la part du régulateur PID pour atteindre l'ensemble des positions articulaires est plus faible et les variations sont moindres.

1.6 Conclusion

En résumé, plusieurs méthodes existent afin de réduire le phénomène d'encochage sur des moteurs à aimants permanents. Cependant, la très grande majorité d'entre elles doivent être appliquées lors de la phase de design du moteur et ont une influence directe sur son coût et

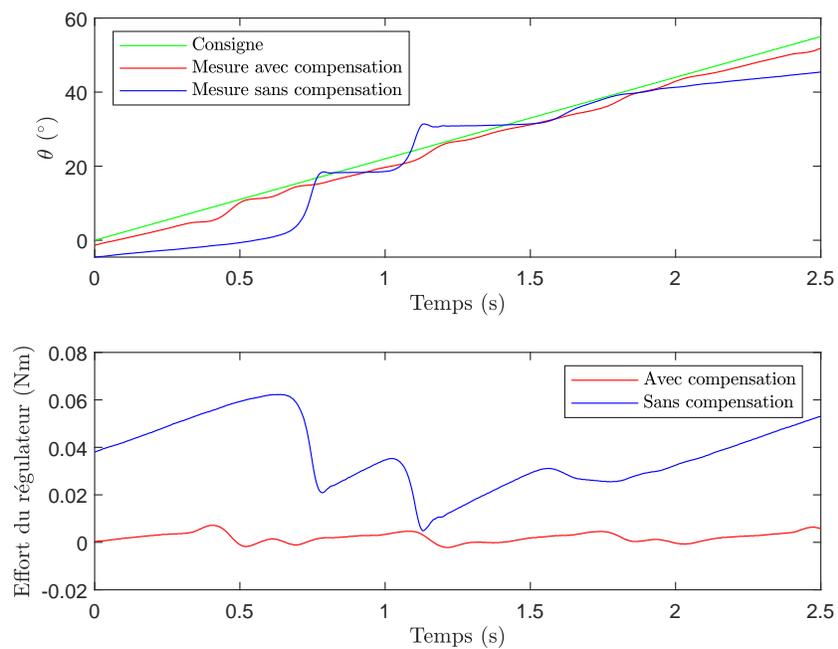


FIGURE 1.9 – Suivi de la consigne et effort du régulateur PID, avec et sans compensation

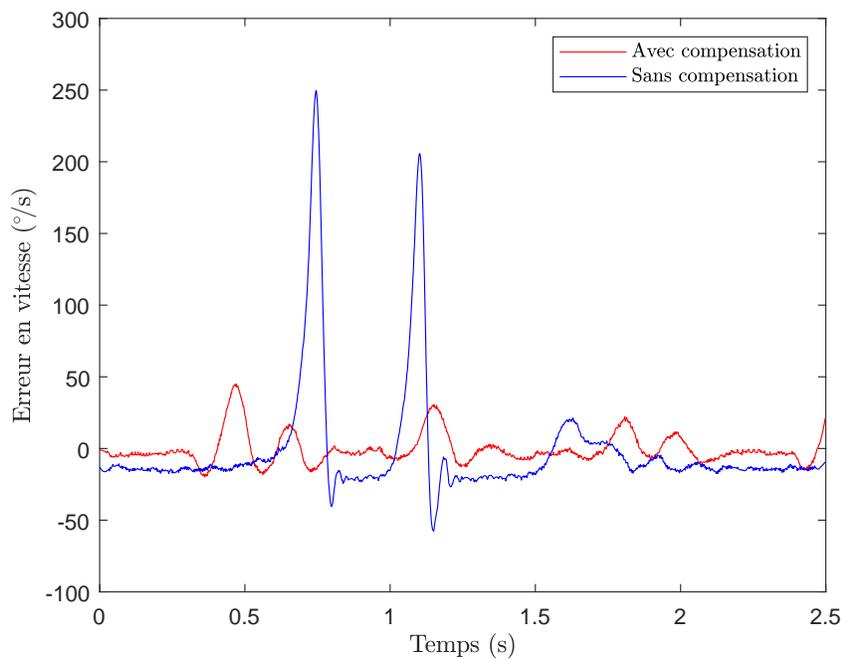


FIGURE 1.10 – Variation de la vitesse du rotor par rapport à la consigne, avec et sans compensation

ses performances. Dans le cas présent, l'identification du couple d'encoche a été effectuée après l'acquisition du moteur. La compensation de ces valeurs de couple directement dans le schéma de commande a permis de diviser l'erreur quadratique moyenne par trois et l'effort maximal du régulateur PID par plus de six. L'application de cette méthode se traduit donc par un mouvement comportant beaucoup moins de variations de vitesse et par un meilleur suivi de la consigne. Étant en position de commander des mouvements jugés assez uniformes aux actionneurs, il est désormais possible de poursuivre la mise en service du robot en attachant ensemble plusieurs câbles de manière à former un robot parallèle.

Chapitre 2

Évaluation de la précision lors d'une tâche de téléopération

2.1 Introduction

Les robots parallèles sont parfois utilisés en téléopération dans le but d'enrichir l'expérience utilisateur. En effet, la précision et la rigidité attendues d'un tel robot permettent de mettre en place un schéma de téléopération avec retour haptique, ce qui rend généralement l'expérience plus réaliste [16, 40].

Par ailleurs, la téléopération fait partie des thèmes abordés lors des premiers travaux de recherche sur les robots parallèles à câbles. Historiquement, ceux-ci étaient alors utilisés dans des conditions similaires, c'est-à-dire comme périphériques maîtres à retour de force [19, 21]. Depuis, les principaux axes de recherche sont plutôt passés de la téléopération aux manipulateurs. Cela qui fait qu'en recherche, l'utilisation d'un robot à câbles en tant que manipulateur esclave demeure somme toute assez peu documentée.

Pourtant, les robots parallèles entraînés par câbles pourraient être utilisés dans des environnements où d'autres architectures de robots ne pourraient pas effectuer une tâche similaire. En effet, la téléopération est traditionnellement utilisée dans des environnements difficiles d'accès, dangereux ou inhospitaliers, comme l'espace, les environnements sous-marins ou encore les zones hautement radioactives [17]. D'ailleurs, des robots à câbles suspendus seront utilisés pour démanteler les réacteurs ayant causé des désastres nucléaires à Tchernobyl et à Fukushima [31]. Ceux-ci sont basés sur l'architecture du NIST RoboCrane [3].

Dans plusieurs de ces environnements, on pourrait vouloir opérer dans de grands espaces ou tout simplement manipuler une charge élevée, critères qui peuvent généralement être satisfaits par l'utilisation d'une architecture parallèle à câbles. De plus, dans d'autres sphères comme le domaine manufacturier ou la construction, il est facile d'imaginer que certaines tâches

d'assemblage ou de maintenance à grande échelle pourraient être effectuées plus aisément par téléopération.

On désire donc vérifier expérimentalement si l'utilisation d'un robot à câbles en tant que périphérique esclave est viable. À cette fin, on tente de répliquer une tâche d'assemblage simple à l'échelle humaine. Concrètement, on simule l'insertion d'éléments à des endroits précis, éléments qui pourraient être des pièces ou simplement des organes d'assemblage comme des vis.

Pour ce faire, on définit en premier lieu les variables qui seront étudiées. Ces variables sont l'influence de la position du robot dans l'espace, l'échelle du robot ainsi que la distance de téléopération, qui influence le délai de communication. Par la suite, les équations décrivant les différentes relations géométriques du robot sont établies. Celles-ci sont utilisées afin d'élaborer un schéma de commande adapté pour la téléopération. Ensuite, est vérifiée la précision qu'il serait possible d'atteindre lorsqu'un humain guide le robot. Le niveau de précision ainsi atteint, selon les variables étudiées, est finalement utilisé afin de conclure sur l'efficacité du mécanisme dans sa configuration actuelle.

2.2 Variables à l'étude

Naturellement, plusieurs variables liées à la tâche réalisée ou aux conditions de téléopération peuvent avoir une influence sur la précision du système. Dans le cas considéré, trois variables spécifiques, jugées potentiellement reliées à cette dernière, sont identifiées. Dans l'optique d'étudier la précision de positionnement du système de manière aussi générale que possible, les tests seront effectués de façon à ce que ces variables adoptent quelques valeurs différentes.

La première variable est la position de la grille dans l'espace de travail du robot. Afin de s'assurer que la variation de la sensibilité du manipulateur n'influence pas la précision, les mêmes tests seront effectués à plusieurs endroits dans l'espace atteignable du robot.

La deuxième variable est le facteur d'échelle de la téléopération. Dans le cas actuel, ce facteur s'exprime comme le rapport entre l'amplitude des mouvements au robot maître et celle des mouvements sur le robot esclave. On s'attend donc à ce qu'un facteur plus faible permette l'atteinte d'une meilleure précision au robot esclave. Parce que l'on désire tirer profit de la grandeur de l'espace de travail de ce dernier, les mouvements effectués par le robot maître seront toujours amplifiés lorsque reproduits, ce qui correspond à un facteur dépassant l'unité. Le plus grand facteur (8:1) est choisi pour qu'un mouvement de la largeur de l'espace de travail sur le robot maître se traduise par un mouvement couvrant la largeur de l'espace de travail sur le robot esclave tandis que le choix du plus petit facteur (2:1) est limité par la dimension de la tâche devant être accomplie sur l'interface esclave.

La troisième variable est le type d'opération, c'est-à-dire si la téléopération du robot est réa-

lisée à distance ou sur place. Il est connu depuis longtemps que l'augmentation du délai de communication dégrade les performances de téléopération [41]. Conséquemment, l'opération à distance effectuée via Internet aura un délai supérieur à la téléopération sur place, permettant ainsi de vérifier l'impact de ce dernier. Pour cette même variable, une troisième valeur considérée est l'opération manuelle, i.e., lorsque la tâche est réalisée manuellement en utilisant l'effecteur du robot. Celle-ci est utilisée comme référence pour les autres tests.

2.3 Modèle d'un robot à câbles plan

Pour l'opération du robot, un modèle doit en premier lieu être établi. La figure 2.1 présente le modèle géométrique utilisé pour un robot plan à m câbles. Ce robot possède deux degrés de liberté, c'est-à-dire que l'orientation de ce dernier est supposée comme étant constante.

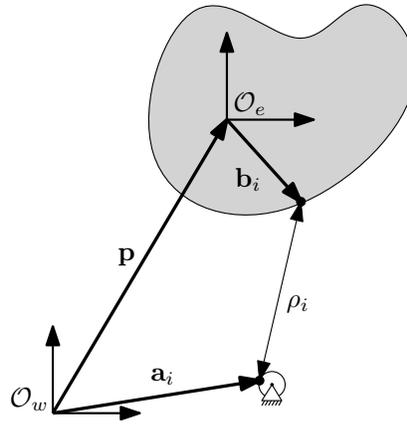


FIGURE 2.1 – Modèle géométrique du robot utilisé pour la téléopération.

Pour chaque câble i de longueur ρ_i , le vecteur \mathbf{a}_i dicte le point de sortie du câble, exprimé dans le repère \mathcal{O}_w , tandis que le vecteur \mathbf{b}_i est le point d'attache sur l'effecteur, exprimé dans son propre repère \mathcal{O}_e . En réalité, contrairement au modèle, l'orientation de l'effecteur n'est pas toujours constante. En effet, de petites rotations dans le plan du robot liées sa position sont perceptibles. Cependant, celles-ci ont très peu d'effet sur les longueurs des câbles et donc sur la commande du robot. On juge donc qu'il n'est pas nécessaire d'adapter le modèle géométrique afin de prendre ces rotations en compte.

2.3.1 Problème géométrique inverse

Dans le cas présent, le problème géométrique inverse (PGI) permet d'obtenir les valeurs articulaires ρ_i à partir d'une position \mathbf{p} donnée. Afin de résoudre celui-ci, on applique les équations de fermeture de boucle sur chaque câble i , soit

$$\rho_i^2 = (\mathbf{p} + \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i)^T (\mathbf{p} + \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i). \quad (2.1)$$

ce qui permet d'obtenir la solution au PGI, c'est-à-dire la longueur, obligatoirement positive, de chaque câble, exprimée comme

$$\rho_i = \sqrt{(\mathbf{p} + \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i)^T (\mathbf{p} + \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i)}. \quad (2.2)$$

2.3.2 Équations de vitesse

On s'intéresse également à la relation entre la vitesse cartésienne et la vitesse articulaire. Par différentiation, on obtient pour chaque câble la relation

$$(\mathbf{p} + \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i)^T \dot{\mathbf{p}} = \rho_i \dot{\rho}_i. \quad (2.3)$$

En utilisant $\boldsymbol{\rho}$ afin de représenter l'ensemble des longueurs de câbles ρ_i , le système complet peut être réécrit sous la forme

$$\mathbf{J} \dot{\mathbf{p}} = \dot{\boldsymbol{\rho}}, \quad (2.4)$$

en utilisant la matrice

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{(\mathbf{p} + \mathbf{b}_1 - \mathbf{a}_1)^T}{\rho_1} \\ \vdots \\ \frac{(\mathbf{p} + \mathbf{b}_m - \mathbf{a}_m)^T}{\rho_m} \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

permettant de faire le lien entre les vitesses cartésiennes et articulaires du robot. Cette dernière est généralement nommée la matrice jacobienne du robot.

2.3.3 Problème géométrique direct

À l'opposé du PGI, le problème géométrique direct (PGD) cherche à reconstituer la position \mathbf{p} à partir des différentes longueurs de câbles $\boldsymbol{\rho}$. Pour le robot utilisé, le nombre de câbles m est plus grand que le nombre de degrés de liberté, ce qui entraîne la surdétermination du système. Concrètement, il n'est donc pas possible de trouver une solution analytique au PGD lorsque l'ensemble des câbles est considéré. L'utilisation d'une procédure numérique basée sur le résultat du PGD s'impose donc afin de résoudre ce problème.

À cette fin, l'algorithme de Newton-Gauss est utilisé. Celui-ci permet de générer une position \mathbf{p}_{k+1} à chaque itération k telle que

$$\mathbf{p}_{k+1} = \mathbf{p}_k + \Delta \mathbf{p}_k \quad (2.6)$$

qui convergera d'une estimation initiale \mathbf{p}_0 vers une solution estimée de la position $\tilde{\mathbf{p}}$. En outre, on utilise le vecteur $\boldsymbol{\rho}(\mathbf{p}_k)$, donné par l'application de l'équation (2.2) sur l'ensemble des câbles. Le résidu du PGI s'exprime donc comme

$$\mathbf{f}(\mathbf{p}_k) = \boldsymbol{\rho}(\mathbf{p}_k) - \tilde{\boldsymbol{\rho}} \quad (2.7)$$

où $\tilde{\rho}$ est le vecteur formé des longueurs de câbles mesurées. Il est ensuite possible de calculer l'incrément de position

$$\Delta \mathbf{p}_k = -\mathbf{J}(\mathbf{p}_k)^I \mathbf{f}(\mathbf{p}_k), \quad (2.8)$$

où \mathbf{J}^I est l'inverse généralisé de la matrice jacobienne correspondant à la solution aux moindres carrés. Cette matrice correspond à

$$\mathbf{J}^I = (\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T \quad (2.9)$$

et permet de calculer la position \mathbf{p}_{k+1} avec l'équation (2.6). Après cette étape, si le critère de convergence n'est pas atteint, la procédure est répétée. Normalement, la convergence est atteinte en très peu d'itérations.

2.4 Schéma de commande

Après avoir établi les relations géométriques décrivant le robot, il est maintenant possible de se baser sur celles-ci afin de couvrir les aspects traitant de la commande du robot. Globalement, la stratégie de commande utilisée doit assurer l'atteinte de deux principaux objectifs. En premier lieu, afin de garantir en tout temps le contrôle de l'effecteur, il est impératif que les câbles demeurent tendus en tout temps. Deuxièmement, l'effecteur doit suivre la trajectoire générée par le robot maître de manière fidèle, ce qui permet de répliquer au mieux les mouvements qui sont effectués par l'opérateur.

Le schéma de commande utilisé, visible à la figure 2.2, tire avantage de la réversibilité du système. En effet, cette propriété permet de conserver la tension dans les câbles. Pour ce faire, le schéma de commande comporte un régulateur PID en vitesse dont la valeur de sortie est saturée de manière à éviter un déroulement excessif des câbles. Les vitesses de consigne de celui-ci sont générées par un régulateur de position C_p .

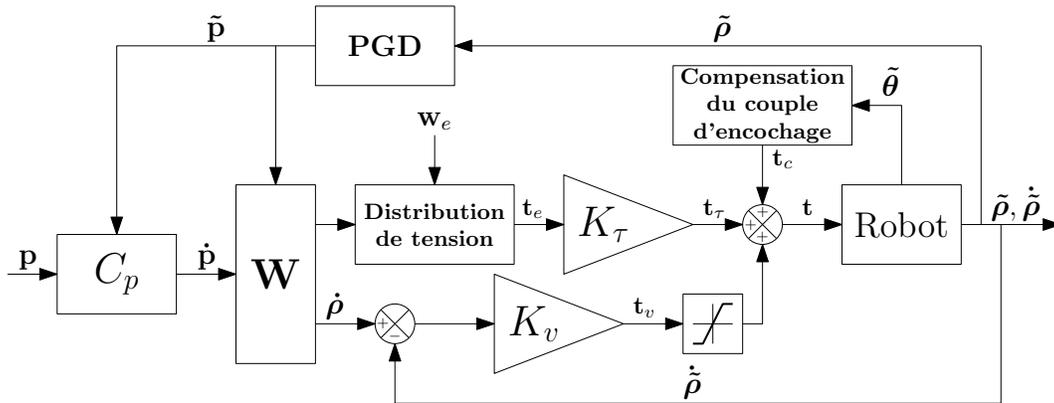


FIGURE 2.2 – Schéma de commande du robot à câbles plan utilisé pour la téléopération.

2.4.1 Commande en position

L'utilisation de la téléopération implique que le calcul de la trajectoire soit fait très rapidement pour une position de consigne \mathbf{p} . En effet, celle-ci peut changer à la réception de chaque message en provenance du robot maître. Contrairement à une trajectoire entièrement précalculée, la partie future de la trajectoire est évidemment inconnue. Malgré tout, la stratégie utilisée doit assurer la continuité de la trajectoire en vitesse et en position et de répliquer, à un facteur d'échelle près, les mouvements du robot maître.

Il est possible d'établir des contraintes imposant le comportement désiré à l'algorithme de commande en position. Premièrement, la trajectoire doit être calculable en temps réel, de manière à assurer une latence aussi courte que possible. Deuxièmement, l'algorithme de commande en position doit être en mesure de permettre des changements de consigne fluides et une atteinte rapide de celle-ci tout en limitant le dépassement. Troisièmement, le schéma de commande doit être sensible et répondre rapidement à des petites variations de mouvement, de manière à atteindre correctement les points désirés.

Afin de satisfaire ces contraintes, on choisit de générer des profils de vitesse trapézoïdaux. Ces profils simples permettent en tout temps de déplacer l'effecteur soit à la vitesse maximale spécifiée ou à l'accélération maximale permise. On obtient donc une trajectoire permettant l'atteinte de la position de consigne très rapidement, tout en demeurant aisément calculable. On remarque cependant que ce choix impose des accélérations qui ne sont pas continues. Le fait d'utiliser une architecture pleinement contrainte rend la plate-forme plus stable aux perturbations que si celle-ci était un robot à câbles suspendu. Par conséquent, le robot devrait être en mesure de résister aux perturbations causées par les variations de force discontinues, nécessaires à la génération d'un tel profil de vitesse.

En premier lieu, la vitesse maximale v_u^{\max} et l'accélération maximale a_u^{\max} permises à l'effecteur le long d'un axe u sont définies. Normalement, la trajectoire est constituée de trois parties : l'accélération, la vitesse constante, puis la décélération. Cependant, si la distance à parcourir n'est pas assez grande, il est possible que la vitesse maximale ne soit pas atteinte. La stratégie est donc basée sur la distance à parcourir, qui est définie comme

$$s_u = p_u - \tilde{p}_u. \quad (2.10)$$

Étant donné qu'on veut éviter un dépassement de la consigne, le point de consigne p_u doit être atteint à vitesse nulle. Pour ce faire, la vitesse permettant une décélération de l'effecteur sans dépasser la valeur de décélération maximale $d_u^{\max} = -a_u^{\max}$ s'exprime comme

$$v_u^{\text{dec}}(t) = \text{sgn}(s_u(t)) \sqrt{2d_u^{\max}|s_u(t)|} \quad (2.11)$$

La borne supérieure de la vitesse est donc calculée tout au long de la trajectoire selon le résultat de l'équation (2.11) et la vitesse maximale comme

$$\hat{v}_u(t) = \min(v_u^{\max}(t), v_u^{\text{dec}}(t)). \quad (2.12)$$

Afin de déplacer l'effecteur aussi rapidement que possible, on désire avoir $\dot{p}_u = \hat{v}_u$. Il faut cependant limiter le taux de variation de la vitesse par $\pm a_u^{\max}$. Ce faisant, les valeurs d'accélération sont respectées même dans les cas où la valeur de s_u diminue.

Les équations (2.10), (2.11) et (2.12) sont par la suite utilisées indépendamment pour chaque dimension du robot considéré. On utilise pour les deux dimensions du plan $u = \{x, y\}$.

Finalement, dans le but d'éviter l'oscillation autour du point de consigne, de l'hystérésis sous la forme de deux fonctions sigmoïdes est ajoutée à la distance à parcourir s . La valeur de ces fonctions est elle-même basée sur la norme de \mathbf{s} . L'ensemble du fonctionnement du régulateur de position C_p ainsi construit est schématisé à la figure 2.3.

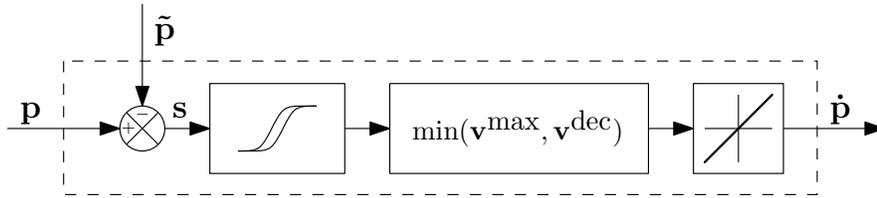


FIGURE 2.3 – Régulateur de position C_p

2.4.2 Génération d'une distribution de tension

Afin de garantir l'équilibre statique de la plate-forme d'un robot à câbles pleinement contraint, l'établissement d'une distribution de tension est primordial. Une fois générée, cette distribution peut être transformée en un ensemble de couples précalculés qui seront commandés aux moteurs. Sans ceux-ci, la génération de la tension nécessaire dans les câbles serait assurée uniquement par l'effort du régulateur PID, ce qui veut dire que l'accès à des zones de l'espace de travail nécessitant une tension importante dans certains câbles serait considérablement plus difficile.

Une comparaison des différentes méthodes actuellement utilisées pour calculer une distribution de tension est présentée dans [36]. La dimension de l'espace solution de la répartition des tensions possibles est définie par la différence entre le nombre de câbles m et le nombre de degrés de liberté du mécanisme. Parce que le robot plan considéré dans ce chapitre est construit avec $m = 3$ câbles, ce noyau est unidimensionnel, ce qui veut dire qu'il est possible de calculer cet espace en trouvant un vecteur dans le noyau de la matrice jacobienne du robot.

On débute en définissant

$$\mathbf{W} = [\mathbf{c}_1 \quad \dots \quad \mathbf{c}_m] \quad (2.13)$$

où \mathbf{c}_i est le vecteur unitaire représentant la direction du câble i donnée par

$$\mathbf{c}_i = \frac{\mathbf{a}_i - \mathbf{p} - \mathbf{b}_i}{\|\mathbf{a}_i - \mathbf{p} - \mathbf{b}_i\|}. \quad (2.14)$$

On remarque au passage que la matrice \mathbf{W} est la transposée de la matrice jacobienne \mathbf{J} construite à la section 2.3.2. Si \mathbf{t} est le vecteur des tensions dans les câbles et \mathbf{w}_e représente l'ensemble des forces exercées à l'effecteur par son environnement, la relation représentant l'équilibre statique à l'effecteur est

$$\mathbf{W}\mathbf{t} + \mathbf{w}_e = \mathbf{0}_2. \quad (2.15)$$

L'ensemble de tensions \mathbf{t} est décomposé comme étant la somme d'un ensemble de tensions $-\mathbf{W}^I\mathbf{w}_e$ servant à maintenir l'équilibre statique et $k\mathbf{u}$, servant à augmenter la tension dans les câbles, telle que

$$\mathbf{t} = -\mathbf{W}^I\mathbf{w}_e + k\mathbf{u} \quad (2.16)$$

où \mathbf{W}^I est la matrice pseudo-inverse de \mathbf{W} , soit

$$\mathbf{W}^I = \mathbf{W}^T(\mathbf{W}\mathbf{W}^T)^{-1}. \quad (2.17)$$

Afin de résoudre pour \mathbf{u} , on effectue une factorisation QR de la matrice \mathbf{W} . Dans le cas du mécanisme considéré, celle-ci s'écrit

$$\mathbf{W} = \mathbf{R}^T\mathbf{Q}^T = \begin{bmatrix} r_{1,1} & 0 & 0 \\ r_{2,1} & r_{2,2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1^T \\ \mathbf{q}_2^T \\ \mathbf{q}_3^T \end{bmatrix}. \quad (2.18)$$

Étant donné que \mathbf{q}_3 se situe dans le noyau de \mathbf{W} , on utilise

$$\mathbf{u} = \mathbf{q}_3 \quad (2.19)$$

afin de générer la distribution de tension, la valeur k de l'équation (2.16) est dynamiquement ajustée afin d'assurer que tous les câbles soient suffisamment tendus, soit $\mathbf{t} \geq \mathbf{t}_{\min}$, où \mathbf{t}_{\min} est le vecteur des tensions minimales pour chaque câble.

2.4.3 Commande en vitesse

L'ensemble de vitesses cartésiennes $\dot{\mathbf{p}}$ respectant les limites de vitesse et d'accélération est par la suite transformé en un vecteur de vitesses articulaires $\dot{\boldsymbol{\rho}}$ selon l'équation (2.4). Le couple nécessaire afin de générer les vitesses articulaires requises est produit à l'aide d'un régulateur proportionnel de gain K_v . Comme mentionné plus tôt, le déroulement excessif des câbles est évité en appliquant une saturation sur les couples articulaires générés, tirant ainsi profit de la réversibilité du mécanisme. Ce couple est additionné au couple \mathbf{t}_r assurant une bonne répartition de tension dans les câbles et à la compensation du couple d'encoche aux moteurs présentée au chapitre 1 afin de permettre le mouvement adéquat du robot.

2.5 Montage expérimental

Le schéma de commande développé peut maintenant être implanté dans un robot. Celui-ci consiste en un mécanisme parallèle à câbles à deux degrés de liberté. Ce robot plan est contrôlé par un dispositif d'envergure moindre à trois degrés de liberté permettant de mesurer la position de la pointe d'un stylet. Comme il est possible de le voir à la figure 2.4, une grille comporte des points cibles et deux caméras permettent à l'opérateur d'observer le robot esclave afin de le guider correctement.

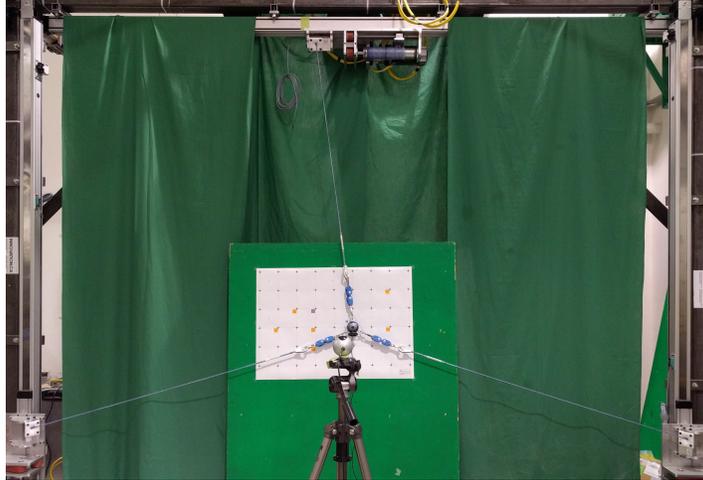


FIGURE 2.4 – Vue globale du montage expérimental du robot esclave

2.5.1 Interface maître-esclave

Le robot maître, visible à la figure 2.5 est une interface haptique *Touch*, de *3D Systems*, précédemment connue comme l'interface *PHANToM* [23]. Ce dernier offre un espace de travail relativement grand pour un appareil de bureau et une bonne résolution, c'est-à-dire d'environ 0.06 mm [1]. Les capacités de rendu haptique de cet appareil ne sont toutefois pas utilisées pour les tests.

Le robot esclave, qui doit reproduire les mouvements du maître, est un robot à câbles plan, dont l'orientation n'est pas contrôlée. La forme de l'effecteur est celle d'un triangle équilatéral de 150 mm de côté dont les trois coins sont reliés aux moteurs par des câbles. Les moteurs sont attachés sur une structure faisant environ 4 m de largeur et 3 m de hauteur. L'espace de travail du robot est essentiellement un pseudo triangle légèrement concave dont les trois coins sont définis par les points de sortie des câbles \mathbf{a}_i .

Une visée est installée au centre de l'effecteur. Afin de fournir un retour visuel à l'opérateur, deux caméras sont installées. La première est située dans la visée de manière à pouvoir précisément comparer la position de l'effecteur à celle des cibles. La deuxième caméra est installée afin



FIGURE 2.5 – Robot maître : interface haptique *Touch*. Tiré de [1]

de pouvoir observer l'entièreté de la grille et de localiser globalement l'effecteur. La figure 2.6 présente la manière dont ces deux points de vues sont combinés puis présentés à l'opérateur. On y observe à droite la vue globale de la grille et à gauche la visée bleue, attachée au centre de l'effecteur, avec une cible derrière.

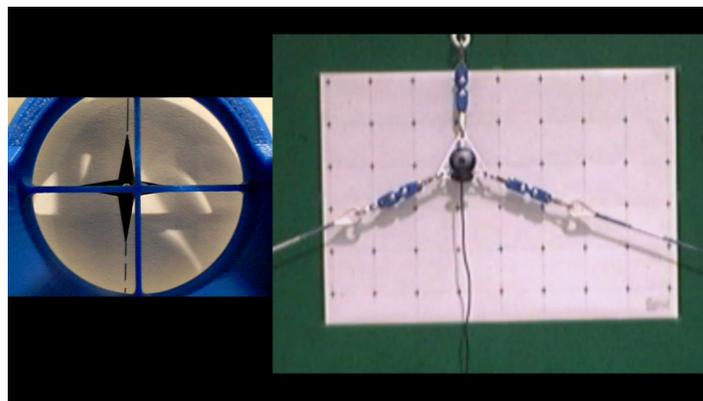


FIGURE 2.6 – Rétroaction visuelle fournie à l'opérateur.

Afin d'assurer un mouvement continu, le lien de communication entre le maître et l'esclave doit être en mesure de délivrer une quantité modeste d'information à une fréquence élevée, tout en ayant une latence aussi faible que possible. Celui-ci est donc assuré par un lien UDP connectant l'ordinateur du robot maître, fonctionnant sous *Windows 10*, et le noeud de calcul en temps réel de l'esclave, fonctionnant sous *QNX*. Ce protocole de communication permet d'envoyer rapidement une grande quantité d'information.

Contrairement au protocole TCP, l'UDP ne permet pas de détecter les paquets qui se perdent en route ou d'assurer l'ordre de réception de ceux-ci. Le protocole UDP est donc généralement utilisé dans les applications où la vitesse et la bande passante sont plus importantes que la fiabilité de la transmission, comme la diffusion de vidéo en continu ou les jeux vidéo. Ainsi,

dans le cas présent, l'envoi des données est effectué à une fréquence variant entre 30 et 60 Hz. Le contenu des messages échangés entre le maître et l'esclave est présenté à la figure 2.7. En parallèle, le flux vidéo est transmis en utilisant le logiciel *Skype* pour la téléopération à distance. Pour la téléopération sur place, celui-ci est directement obtenu à partir du logiciel permettant de fusionner les images des deux caméras.

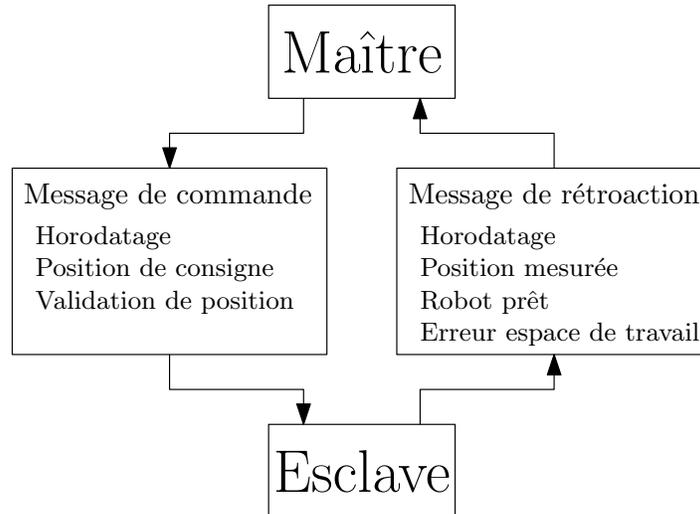


FIGURE 2.7 – Schéma du contenu des paquets échangés lors de la téléopération.

2.5.2 Système de suivi de mouvements

Afin de fournir une mesure de pose externe, un système de huit caméras *Vicon MX-T-40S* est installé d'un côté du plan de travail du robot. Celles-ci sont disposées de manière hémisphérique et orientées vers le milieu de l'espace de travail, ce qui permet aux marqueurs d'être visibles en tout temps par presque toutes les caméras. En considérant qu'un marqueur doit être visible par un minimum de deux caméras afin d'être localisé dans l'espace, le montage assure donc un niveau élevé de redondance.

Dans des conditions similaires et pour le même système de caméras, une étude sur la précision du système *Vicon* a été réalisée en [26]. Celle-ci rapporte que de manière statique, l'erreur de positionnement moyenne est de 0.15 mm, et l'écart type sur les mesures est de 0.015 mm. Pour une tâche réalisée à l'échelle humaine, la précision et la répétabilité du système sont donc jugées amplement suffisantes.

Sur les objets dans la scène, des marqueurs réfléchissants repérables par le système *Vicon* sont placés à des endroits précis et prévus à cet effet, afin de connaître la pose relative entre l'effecteur et la grille. Parce que l'on connaît la géométrie de ces objets, ce choix permet de savoir en tout temps la position des points cibles et la pose de l'axe de la visée. Afin d'éviter de perturber le déplacement de l'effecteur, ce sont des marqueurs hémisphériques d'un diamètre

de 3 mm qui sont posés sur la grille. Bien que ceux-ci soient légèrement plus difficiles à détecter que les marqueurs hémisphériques de 8 mm de diamètre placés sur l'effecteur, il est connu que la taille des marqueurs d'un tel ordre de grandeur n'a pas d'impact sur la précision [46]. L'acquisition de la position des cibles est effectuée à une fréquence de 100 Hz et une moyenne du résultat est faite sur 10 échantillons.

2.6 Méthodologie

Afin de s'assurer de la répétabilité de la tâche d'assemblage ou d'insertion d'un essai à un autre, une trajectoire à suivre est définie à l'avance parmi les points de la grille. Celle-ci fait 600 mm sur 300 mm et sa disposition est observable, sur une grille de 800 mm sur 500 mm, à la figure 2.8. Chaque flèche indique un point devant être atteint en exécutant d'abord la partie de droite avant de terminer par celle de gauche. Le cercle vert, quant à lui, indique la position de départ et de fin du parcours. La trajectoire comporte donc 10 points à atteindre. Ceux-ci sont par ailleurs indiqués directement sur la grille de manière à ce qu'ils soient visibles par l'opérateur. Tandis que les branches formant la visée de l'effecteur ont une épaisseur de 1 mm, les dimensions des cibles sont présentées à la figure 2.9.

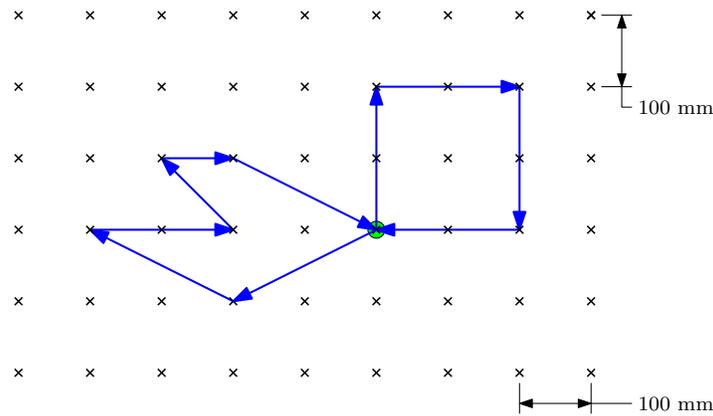


FIGURE 2.8 – Trajectoire devant être suivie lors de la tâche de téléopération.

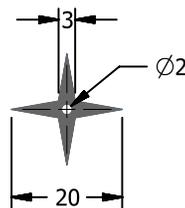


FIGURE 2.9 – Principales dimensions des cibles

À chaque point, on enregistre le temps et la position relative de la grille et de l'effecteur, utilisée pour projeter l'axe de la visée sur le plan, ce qui permet de mesurer l'erreur entre le point de

consigne et le point visé par l'effecteur. On cherche à étudier la précision atteignable en faisant varier trois paramètres. Le premier paramètre est le type d'opération. La téléopération sera donc comparée à la téléopération sur place, ainsi qu'à l'opération manuelle. Par la suite, pour les deux premiers types d'opération, on cherche à étudier l'effet du facteur d'échelle entre les amplitudes des mouvements au maître et à l'esclave sur la précision du robot. Troisièmement, afin de s'assurer que la sensibilité du robot n'affecte pas les données, on déplace la grille de cibles à trois endroits différents dans l'espace du robot, identifiés A, B et C.

Lors de la téléopération, le robot sera opéré à l'Université McGill, à Montréal, tandis que l'esclave est situé à l'Université Laval, à Québec. La distance physique entre les deux robots est donc approximativement de 225 km. Lorsque l'opérateur estime avoir atteint le point prescrit, il confirme son choix à l'aide d'un bouton situé sur l'effecteur du robot maître.

La téléopération sur place sera faite dans les mêmes conditions que la téléopération à distance, à la différence près que le robot maître sera dans la même pièce que le robot esclave. L'opérateur ne peut cependant pas regarder le robot esclave et doit donc toujours utiliser la rétroaction visuelle qui lui est fournie. Cependant, cette fois, on s'attend à ce que la latence du flux vidéo et du flux de données entre les deux robots soit grandement diminuée.

Afin d'avoir une base servant à comparer les résultats obtenus, on choisit d'effectuer la tâche manuellement. Ainsi, on aura une référence pour comparer les résultats de téléopération, à distance et à proximité. Pour l'opération manuelle, une poignée est fixée à l'effecteur, qui est alors détaché du robot à câbles. À des fins d'uniformité, l'opérateur se base toujours sur le flux vidéo afin d'assurer son mouvement et il ou elle confirme l'atteinte des points à l'aide d'un bouton.

On charge un seul opérateur d'effectuer l'entièreté des essais. A priori, on demande à celui-ci de se familiariser avec le système et on réalise plusieurs essais non comptabilisés avant de commencer l'enregistrement des données.

2.7 Résultats

Une fois les essais réalisés, les résultats sont traités puis analysés. Les erreurs entre les points de consigne et le point projeté de l'axe de la caméra sont donc compilées. Le tableau 2.1 présente la moyenne des résultats, ce qui permet de quantifier la précision ou l'exactitude du système. De plus, le même tableau donne la dispersion des résultats en considérant trois écarts types, ce qui englobe 99.7% des résultats. Cette mesure est associée à la répétabilité du système.

Les statistiques concernant les temps de réalisation des tâches sont aussi présentées dans le tableau 2.2. La figure 2.10 montre la compilation des erreurs obtenues classées par le type d'opération, c'est-à-dire par téléopération à distance, par téléopération sur place ou par opération manuelle. À leur tour, les figures 2.11 et 2.12 présentent respectivement les mêmes

erreurs classées par le facteur d'échelle entre le maître et l'esclave ainsi que selon la position de la grille. Les barres d'erreurs tracées sur celles-ci correspondent à trois fois la valeur de l'écart type.

La latence aller-retour du système, c'est-à-dire le temps nécessaire avant qu'un mouvement effectué du côté de l'opérateur soit perçu dans la rétroaction visuelle, est mesurée à l'aide d'une caméra haute vitesse située du côté maître. Le fait d'établir cette dernière permet d'analyser de manière critique les différents temps de réalisation de la tâche. De manière pratique, celle-ci est grandement due au délai de transmission du flux vidéo. La latence aller-retour mesurée est de 350 ms pour la téléopération sur place contre 730 ms pour la téléopération éloignée.

TABLE 2.1 – Erreurs mesurées selon le type d'opération, le facteur d'échelle et la position de la grille.

Variable		Erreur (mm)			
		Moyenne		$\pm(3\sigma)$	
		x	y	x	y
Opération	Manuelle	0.000	-0.070	3.61	3.03
	Téléopération éloignée	-0.343	0.193	4.31	3.39
	Téléopération sur place	-1.059	0.083	3.83	3.84
Facteur d'échelle	8:1	-0.704	0.261	5.30	4.87
	4:1	-0.826	0.005	3.96	3.36
	2:1	-0.413	0.087	3.32	2.39
Position	A	-0.632	0.199	3.86	3.08
	B	-0.624	0.286	4.17	3.51
	C	-0.604	-0.210	4.58	3.90

2.8 Discussion

À partir des résultats obtenus, il est possible d'effectuer une analyse de la corrélation entre certains facteurs et la précision afin de vérifier si elle est réellement influencée. À un seuil p de 95%, on observe que le changement du type d'opération et la modification du facteur d'échelle entre le maître et l'esclave causent, de manière statistiquement significative, une variation de la moyenne des normes des erreurs. En contrepartie, pour le seuil considéré, le changement d'emplacement de la grille dans l'espace de travail du robot ne cause pas de variation statistiquement significative de la moyenne des normes des erreurs.

À partir des résultats obtenus pour la variation du facteur d'échelle, on remarque que la répétabilité varie grandement. Naturellement, celle-ci tend à augmenter plus, pour une même amplitude de mouvement de l'esclave, l'amplitude du mouvement effectué sur le robot maître est grande. Bien que l'exactitude varie peu d'essai en essai, le facteur d'échelle 2:1 est, en

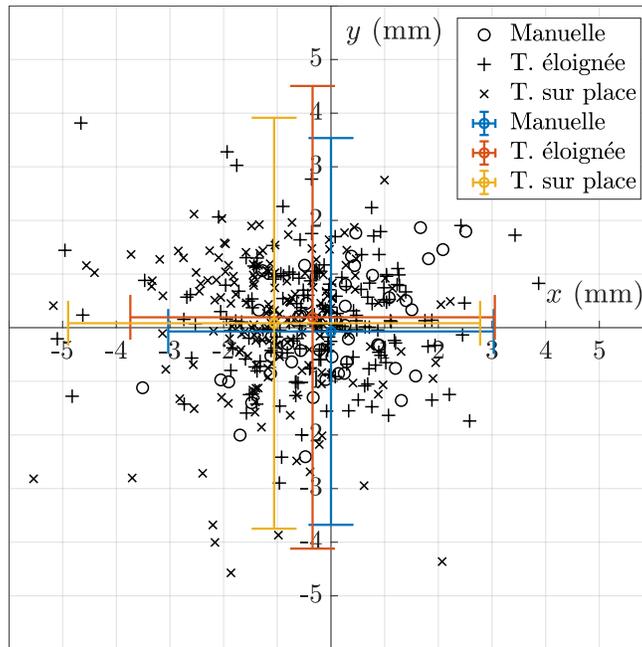


FIGURE 2.10 – Erreur mesurée selon le type d'opération.

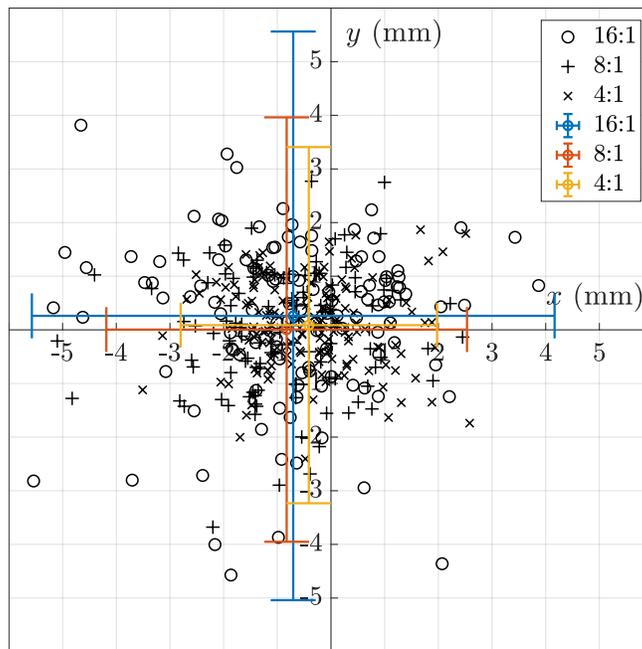


FIGURE 2.11 – Erreur mesurée selon le facteur d'échelle entre l'esclave et le maître.

TABLE 2.2 – Temps de réalisation de la tâche selon le type d’opération, le facteur d’échelle et la position de la grille

Variable	Temps (s)		
	Moyenne	σ	
Opération	Manuelle	47.5	3.6
	Téléopération éloignée	89.0	11.5
	Téléopération sur place	39.9	5.4
Facteur d’échelle	8:1	63.4	26.2
	4:1	58.5	24.4
	2:1	64.4	26.6
Position	A	65.1	26.7
	B	61.4	26.7
	C	61.0	24.0

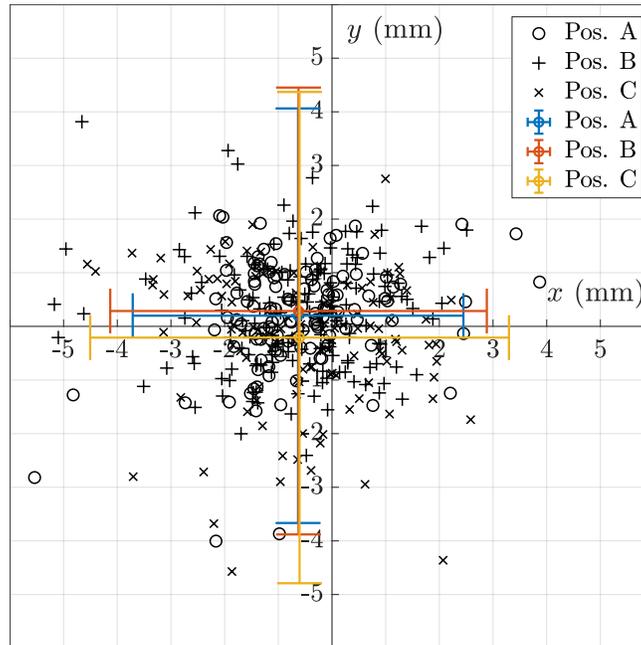


FIGURE 2.12 – Erreur mesurée selon la position de la grille dans l’espace du robot.

plus d’être le plus répétable, celui qui offre la meilleure précision. Par ailleurs, pour le facteur d’échelle 8:1, une répétabilité d’environ dix fois la sensibilité du robot maître est atteinte.

Pour tous les essais sauf pour l’opération manuelle, on observe un léger biais sur la précision. En effet, la visée semble être légèrement décalée vers la partie négative de l’axe x pour l’ensemble des essais. Il est intéressant de constater que malgré ce biais en précision, la répétabilité est très similaire entre l’opération manuelle et les deux autres types de téléopération.

La plus grande différence entre les différents types d'opération se situe au niveau du temps de réalisation des tâches. Tandis que la tâche prend en moyenne 47.5 secondes à effectuer manuellement, celle-ci peut être effectuée près de huit secondes plus rapidement lorsque la téléopération est utilisée. Par contre, lorsque la téléopération est effectuée à distance, le délai aller-retour double, ce qui fait approximativement doubler le temps de réalisation de la tâche. Dans ces conditions, la répétabilité de positionnement des deux méthodes est similaire, même si la précision s'avère être détériorée lorsque le robot est téléopéré à proximité.

On remarque que le fait d'utiliser un facteur d'échelle ne semble pas avoir d'incidence sur la vitesse à laquelle la tâche est effectuée, tout comme la position de la grille dans l'espace de travail du robot à câbles plan. Selon les essais réalisés, la répétabilité du mécanisme est, dans toutes les conditions, comparable à la réalisation manuelle de la tâche. Dans le cas présent, l'exactitude est détériorée lorsqu'on utilise la téléopération. Il est néanmoins possible de réaliser la tâche plus rapidement en téléopération que manuellement, à la condition que le délai de transmission aller-retour soit assez court.

2.9 Conclusion

Dans le but de déterminer la précision d'un robot à câbles téléopéré, les différentes relations géométriques et un schéma de commande ont été établis. Ce schéma a ensuite été utilisé afin de faire la commande d'un tel robot à deux degrés de liberté. Finalement, une méthodologie a été développée de manière à vérifier l'effet de certains paramètres sur la précision, puis des tests expérimentaux ont été effectués.

Selon ces tests, on peut affirmer que peu importe l'emplacement dans l'espace du travail du robot, il est possible d'atteindre par téléopération des cibles avec une précision moyenne d'environ ± 5.3 mm. Il a été démontré que la latence aller-retour n'influence pas la précision d'un tel système, mais fait grandement varier le temps nécessaire afin d'accomplir la tâche. Par ailleurs, lorsque la latence est faible, les essais montrent qu'il est possible d'accomplir une tâche plus rapidement en téléopération que manuellement tout en conservant une répétabilité similaire. Naturellement, on note également que le facteur d'échelle entre les mouvements du robot maître et ceux du robot esclave influence la précision du système.

L'utilisation de ce robot est donc envisageable pour l'assemblage à grande échelle. Bien entendu, il serait beaucoup plus intéressant de faire des translations et des rotations dans l'espace. Cela nécessiterait un robot ayant un nombre plus élevé de degrés de liberté. Étant donné que les tâches d'assemblage peuvent s'avérer assez répétitives, il serait également avantageux de pouvoir réaliser le tout de manière automatique. Dans ce cas, parce qu'aucun opérateur ne guide l'effecteur, les paramètres du modèle géométrique du robot doivent être précisément déterminés afin de conserver l'exactitude et la répétabilité nécessaires.

Chapitre 3

Méthode d'étalonnage à l'aide d'une caméra embarquée

3.1 Introduction

La commande d'un robot exige l'établissement préliminaire de sa géométrie. L'utilisation d'un modèle réaliste et l'exactitude de ses paramètres sont directement liées à la précision de positionnement du robot. Afin de déterminer ces paramètres, la méthode préconisée est généralement l'étalonnage.

Ce chapitre présente une méthode permettant de générer une liste de poses d'étalonnage, atteignables depuis une pose de départ. Ces poses sont ensuite utilisées pour faire l'étalonnage d'un robot à câbles pleinement contraint. La méthode proposée pour l'étalonnage utilise une caméra attachée à l'effecteur et des cibles dispersées dans l'environnement du robot afin d'estimer la pose de l'effecteur.

Plusieurs techniques ont été développées afin d'étalonner les robots parallèles, plus particulièrement la plate-forme de Gough-Stewart. Une méthode efficace consiste à mesurer la pose de l'effecteur afin de minimiser la somme des résidus du PGI [48]. On retrouve dans la littérature plusieurs exemples d'appareils permettant de fournir la mesure de la pose de l'effecteur, soit par exemple l'utilisation d'une patte redondante [33], un théodolite [49] ou une caméra fixe [38].

La figure 3.1 montre le modèle géométrique d'un robot parallèle pour chacun des $i = 1, \dots, m$ câbles. Ces câbles sont attachés à l'effecteur aux vecteurs \mathbf{b}_i exprimés dans le repère de ce dernier, \mathcal{O}_e . La pose de l'effecteur est exprimée dans le repère global \mathcal{O}_w par le vecteur de position \mathbf{p} et la matrice d'orientation \mathbf{Q} . Dans certaines applications, on souhaite être en mesure de reconfigurer ce mécanisme, c'est-à-dire changer la position des points de sortie des câbles \mathbf{a}_i . En effet, on peut aisément imaginer un robot de très grande taille, où il est possible

de détacher les câbles et les enrouleurs afin de pouvoir le transporter sur différents sites. Dans le même ordre d'idées, il serait également possible d'avoir un robot où les enrouleurs peuvent être déplacés par des actionneurs, ce qui permettrait de modifier dynamiquement la géométrie afin de changer la forme de l'espace de travail ou de moduler la sensibilité cinématique. Dans cette mesure, un étalonnage rapide et suffisamment précis, idéalement automatisé, est primordial afin de pouvoir utiliser efficacement la capacité de reconfiguration de ces manipulateurs.

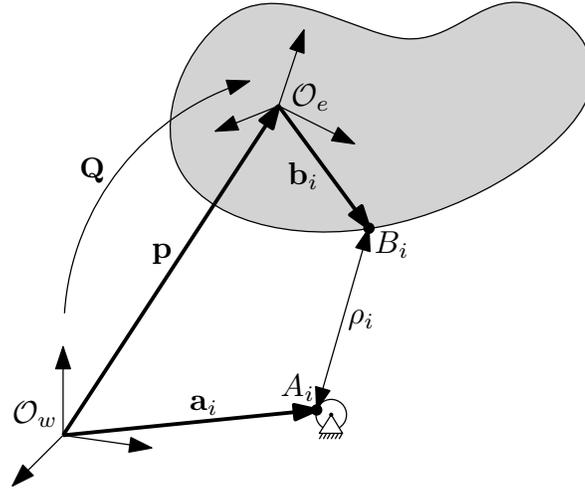


FIGURE 3.1 – Modèle géométrique d'un robot à câbles spatial

Pour ce qui est de l'étalonnage des robots à câbles, des méthodes similaires à celles qui ont été développées pour les robots parallèles traditionnels peuvent être utilisées. Étant donné que les robots à câbles pleinement contraints possèdent nécessairement un nombre de câbles m plus élevé que le nombre de degrés de liberté à contrôler, il est possible d'utiliser la redondance de mesure des longueurs de câbles ρ_i à des fins d'étalonnage. À cet effet, quelques auteurs proposent des méthodes ne requérant pas de capteurs externes [12, 13, 20]. On note au passage que l'ajout de capteurs de force permet une identification simultanée de la rigidité des câbles, lorsque nécessaire [28]. Dans [12], quelques algorithmes d'étalonnage sont également vérifiés expérimentalement.

Néanmoins, parce qu'elles nécessitent une redondance de mesure, ces techniques ne peuvent pas être appliquées sur une architecture de robot à câbles suspendu où le nombre de degrés de liberté contrôlés est égal au nombre de câbles m . De plus, les algorithmes utilisés par les méthodes ne faisant pas l'usage de capteurs de pose externe nécessitent d'itérer sur une estimation de la pose de l'effecteur, c'est à dire \mathbf{p} et \mathbf{Q} . La solution comprend donc les paramètres désirés, habituellement \mathbf{a}_i , mais aussi la reconstruction de chaque pose d'étalonnage. Bien entendu le temps de calcul pour une grande quantité de poses peut être considérable, sans toutefois garantir l'exactitude de la solution obtenue si aucun estimé initial de ces dernières n'est disponible.

L'utilisation d'un système capable de mesurer directement cette pose permet de contourner ce problème. Pour ce faire, un choix évident est d'utiliser des appareils traditionnels adaptés pour la métrologie dans des espaces vastes comme un théodolite ou encore une station totale. Bien que ces appareils permettent de prendre des mesures précises sur de très grandes distances, leur utilisation est relativement complexe et la prise de mesure ne peut pas être effectuée rapidement. De plus, lorsque l'orientation de l'effecteur doit être mesurée, il est nécessaire de mesurer les positions d'au minimum trois points sur l'effecteur, ce qui ajoute à la lourdeur de la tâche.

En revanche, cette tâche peut être automatisée en utilisant par exemple un laser de poursuite (*Laser Tracker*). Malgré le fait que cette solution semble être très utilisée au coeur de la communauté académique, le coût d'acquisition élevé de tels systèmes est souvent du même ordre de grandeur que celui du robot à câbles lui-même. L'application de techniques d'asservissement visuel permet d'obtenir une grande précision de positionnement [9, 10], mais nécessite l'acquisition de plusieurs caméras. En principe, il n'existe donc pas de méthode d'étalonnage qui soit économique. Le besoin d'une méthode permettant un étalonnage précis, peu onéreux et facile, voire automatisé, est donc réellement présent.

3.2 Modèle d'un robot à câbles spatial

De manière similaire à ce qui a été fait à la section 2.3, on cherche à établir un modèle permettant de transformer les coordonnées articulaires en coordonnées cartésiennes, et vice-versa, pour un robot parallèle à câbles à six degrés de liberté.

3.2.1 Problème géométrique inverse

Dans le but de résoudre le PGI, on applique les équations de fermeture de boucle sur chaque câble i . Pour un robot dont l'orientation est contrôlée, on doit considérer la matrice de rotation \mathbf{Q} représentant l'orientation de l'effecteur. On obtient donc

$$\rho_i^2 = (\mathbf{p} + \mathbf{Q}\mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i)^T (\mathbf{p} + \mathbf{Q}\mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i). \quad (3.1)$$

Conséquemment, la longueur de chaque câble s'exprime comme

$$\rho_i = \sqrt{(\mathbf{p} + \mathbf{Q}\mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i)^T (\mathbf{p} + \mathbf{Q}\mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i)}. \quad (3.2)$$

3.2.2 Équations de vitesse

Tout comme pour le cas du robot plan, on désire obtenir la relation entre la vitesse cartésienne et la vitesse articulaire. Le vecteur de vitesse cartésienne est exprimé comme

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{p}} \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

où $\boldsymbol{\omega}$ est le vecteur de vitesses angulaires. Pour débiter, on définit le vecteur

$$\mathbf{c}_i = \mathbf{p} + \mathbf{Q}\mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i. \quad (3.4)$$

En remplaçant celui-ci dans l'équation (3.1) puis par dérivation, on obtient

$$\rho_i \dot{\rho}_i = \mathbf{c}_i^T (\dot{\mathbf{p}} + \boldsymbol{\Omega}\mathbf{b}_i) \quad (3.5)$$

avec

$$\boldsymbol{\Omega} = \text{cpm}(\boldsymbol{\omega}) \equiv \frac{\partial(\mathbf{x} \times \mathbf{y})}{\partial \mathbf{y}}, \quad (3.6)$$

ce qui permet d'écrire

$$\rho_i \dot{\rho}_i = \mathbf{c}_i^T \dot{\mathbf{p}} + [\mathbf{Q}\mathbf{b}_i \times (\mathbf{c}_i - \mathbf{a}_i)]^T \boldsymbol{\omega}. \quad (3.7)$$

Globalement, la relation s'exprime donc comme

$$\mathbf{J}\mathbf{v} = \mathbf{K}\dot{\boldsymbol{\rho}} \quad (3.8)$$

en utilisant

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \rho_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \rho_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \rho_m \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

et

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_1 & \mathbf{c}_2 & \dots & \mathbf{c}_m \\ \mathbf{Q}\mathbf{b}_1 \times \mathbf{c}_1 & \mathbf{Q}\mathbf{b}_2 \times \mathbf{c}_2 & \dots & \mathbf{Q}\mathbf{b}_m \times \mathbf{c}_m \end{bmatrix}^T. \quad (3.10)$$

3.2.3 Problème géométrique direct

Comme pour le cas du robot plan, le PGD est résolu de manière numérique en utilisant itérativement le résidu du PGI de manière à converger vers un estimé de la pose de l'effecteur. Bien que la procédure soit semblable, la formulation du problème doit être différente afin de considérer l'orientation du robot spatial. La pose est donc exprimée par un vecteur composé de la position \mathbf{p} et d'un vecteur $\boldsymbol{\psi}$ des angles d'Euler décrivant l'orientation \mathbf{Q} de l'effecteur tel que

$$\boldsymbol{\gamma} = \begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ \boldsymbol{\psi} \end{bmatrix}. \quad (3.11)$$

À l'instar de l'équation 2.6, il est possible d'utiliser l'algorithme de Newton-Gauss afin de générer une pose $\boldsymbol{\gamma}_{k+1}$ à chaque itération k , soit

$$\boldsymbol{\gamma}_{k+1} = \boldsymbol{\gamma}_k + \Delta\boldsymbol{\gamma}_k, \quad (3.12)$$

de manière à tendre vers la solution $\boldsymbol{\gamma}$. En utilisant les longueurs de câbles mesurées $\tilde{\boldsymbol{\rho}}$, le résidu du PGI $\boldsymbol{\rho}(\boldsymbol{\gamma}_k)$ est donné par

$$\mathbf{f}(\boldsymbol{\gamma}_k) = \boldsymbol{\rho}(\boldsymbol{\gamma}_k) - \tilde{\boldsymbol{\rho}}. \quad (3.13)$$

L'incrément de pose peut donc être calculé en définissant la matrice

$$\mathbf{L} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{J} \quad (3.14)$$

puis en utilisant l'équation

$$\Delta \gamma_k = -\mathbf{L}(\gamma_k)^T \mathbf{f}(\gamma_k), \quad (3.15)$$

où \mathbf{L}^I est l'inverse généralisée correspondant à la solution aux moindres carrés. La procédure est répétée jusqu'à convergence de la pose.

3.3 Formulation du problème d'étalonnage

La figure 3.2 montre le modèle géométrique d'un robot à m câbles, adapté pour un étalonnage à l'aide de marqueurs et d'une caméra. A priori, on ne connaît pas la longueur de câble déroulée parce qu'on suppose que le robot est déjà assemblé. Par conséquent, pour le câble i , cette longueur s'exprime

$$\rho_i = \Delta \rho_i + \rho_{i,0}, \quad (3.16)$$

où $\rho_{i,0}$ est la longueur initiale du câble, c'est-à-dire la longueur lors du début de l'acquisition des valeurs de l'encodeur, tandis que $\Delta \rho_i$ est l'allongement du câble depuis l'initialisation. Les équations de fermeture de boucle pour une pose $X = \{\mathbf{p}, \mathbf{Q}\}$ donnée prennent donc la forme

$$(\Delta \rho_i + \rho_{i,0})^2 = (\mathbf{p} + \mathbf{Q}\mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i)^T (\mathbf{p} + \mathbf{Q}\mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i). \quad (3.17)$$

Habituellement, les paramètres inconnus pour un robot à câbles sont les positions des différents points de sortie des enrouleurs et les longueurs initiales des câbles, respectivement \mathbf{a}_i et $\rho_{i,0}$. Un

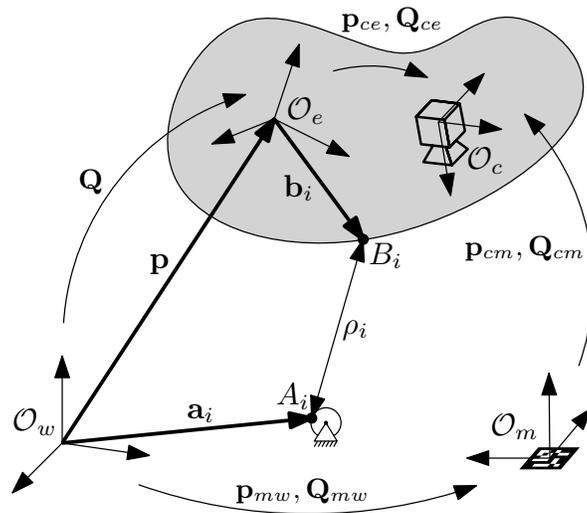


FIGURE 3.2 – Modèle géométrique d'un robot à câbles pour un étalonnage à l'aide d'une caméra embarquée

étalonnage complet pourrait inclure la géométrie de l'effecteur, c'est-à-dire les paramètres \mathbf{b}_i . Néanmoins, on considère que l'effecteur est généralement petit et peut être aisément construit en utilisant des techniques de fabrication et d'assemblage précises. Conséquemment, la précision des mesures des positions des points d'ancrage des câbles à l'effecteur est grandement supérieure à celle des paramètres \mathbf{a}_i et $\rho_{i,0}$, ce qui justifie l'hypothèse que les paramètres \mathbf{b}_i ne nécessitent pas d'étalonnage.

Le résidu de l'équation de fermeture de boucle, pour chaque mesure $j = 1, \dots, n$ est écrit comme

$$u_{i,j} = \|\mathbf{p}_j + \mathbf{Q}_j \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i\|_2^2 - (\Delta\rho_{i,j} + \rho_{i,0})^2. \quad (3.18)$$

où les valeurs $\Delta\rho_i$ sont directement obtenues des encodeurs relatifs tandis que \mathbf{p}_j et \mathbf{Q}_j sont obtenus à l'aide d'un capteur externe. On définit

$$\mathbf{v} = [\mathbf{a}_1^T \quad \dots \quad \mathbf{a}_m^T \quad \rho_{1,0} \quad \dots \quad \rho_{m,0}]^T \quad (3.19)$$

comme étant le vecteur des paramètres de l'optimisation. En considérant l'ensemble des câbles $i = 1, \dots, m$, le problème d'étalonnage peut être écrit comme une optimisation aux moindres carrées non linéaires, soit

$$\underset{\mathbf{v}}{\text{minimiser}} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n u_{i,j}^2. \quad (3.20)$$

Pour l'étalonnage d'un mécanisme spatial, on note qu'il est impératif que la contrainte

$$n \geq 4 \quad (3.21)$$

soit satisfaite afin d'éviter la sous-détermination du système d'équations.

Pour réduire le temps de calcul, la matrice jacobienne de la fonction est fournie à l'algorithme d'optimisation. Pour obtenir l'expression de cette matrice, on débute en définissant le vecteur

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{u}_m \end{bmatrix}, \quad (3.22)$$

lui-même constitué des différents vecteurs

$$\mathbf{u}_i = \begin{bmatrix} u_{i,1} \\ \vdots \\ u_{i,n} \end{bmatrix}. \quad (3.23)$$

La matrice jacobienne est ensuite définie comme

$$\mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{v}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_{1,1}}{\partial \mathbf{a}_1}^T & \frac{\partial u_{1,1}}{\partial \mathbf{a}_2}^T & \cdots & \frac{\partial u_{1,1}}{\partial \mathbf{a}_m}^T & \frac{\partial u_{1,1}}{\partial \rho_{1,0}} & \cdots & \frac{\partial u_{1,1}}{\partial \rho_{m,0}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial u_{n,1}}{\partial \mathbf{a}_1}^T & \frac{\partial u_{n,1}}{\partial \mathbf{a}_2}^T & \cdots & \frac{\partial u_{n,1}}{\partial \mathbf{a}_m}^T & \frac{\partial u_{n,1}}{\partial \rho_{1,0}} & \cdots & \frac{\partial u_{n,1}}{\partial \rho_{m,0}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial u_{n,m}}{\partial \mathbf{a}_1}^T & \frac{\partial u_{n,m}}{\partial \mathbf{a}_2}^T & \cdots & \frac{\partial u_{n,m}}{\partial \mathbf{a}_m}^T & \frac{\partial u_{n,m}}{\partial \rho_{1,0}} & \cdots & \frac{\partial u_{n,m}}{\partial \rho_{m,0}} \end{bmatrix}_{mn \times 4m}, \quad (3.24)$$

où les éléments de celle-ci, pour $k = 1, \dots, m$, s'écrivent

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_{i,j}}{\partial \mathbf{a}_k} &= \begin{cases} -2(\mathbf{p}_j + \mathbf{Q}_j \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i) & \text{si } i = k, \\ \mathbf{0}_3 & \text{autrement.} \end{cases} \\ \frac{\partial u_{i,j}}{\partial \rho_{k,0}} &= \begin{cases} -2(\Delta \rho_{i,j} + \rho_{i,0}) & \text{si } i = k, \\ 0 & \text{autrement.} \end{cases} \end{aligned} \quad (3.25)$$

Une fois le problème d'étalonnage formulé, il est maintenant possible d'y intégrer les mesures de pose obtenues à l'aide du capteur externe.

3.3.1 Étalonnage à l'aide d'une caméra embarquée

Dans le cas présent, le capteur externe utilisé pour fournir la mesure de la pose de la plateforme $(\mathbf{p}_j, \mathbf{Q}_j)$ est une caméra. Puisque l'effecteur doit couvrir un espace de travail assez vaste, l'utilisation d'une cible unique résulterait en un étalonnage limité dans le choix de poses. En effet, la pose devrait être choisie de manière à ce que la cible soit toujours dans le champ de vue de la caméra, ce qui pourrait se traduire par un étalonnage moins précis. Ce problème peut être résolu en utilisant un grand nombre de cibles dont les poses relatives sont connues. Cependant, la fabrication ou la mesure d'un tel ensemble serait coûteux ou vulnérable aux erreurs.

On choisit donc d'utiliser une multitude de cibles dont les poses relatives sont inconnues. Celles-ci peuvent alors être placées arbitrairement dans l'espace de travail du robot. Afin de reconnaître les différentes cibles sur l'ensemble des photos utilisées, on utilise des marqueurs fiduciaires. Chaque marqueur est une cible à laquelle est associé un identifiant unique. Cet identifiant fait généralement partie de l'apparence du marqueur. Dans le cas de ce manuscrit, la librairie *ArUco* [15, 39] est utilisée afin de générer, de détecter et de décoder les marqueurs. Ceux-ci peuvent facilement être imprimés à l'aide d'une imprimante conventionnelle à l'échelle désirée et disposés dans l'espace de travail du robot.

L'estimation de la géométrie de la carte des marqueurs est par la suite obtenue à l'aide d'une librairie [29] fonctionnant avec ces marqueurs. Celle-ci permet également de reconstituer les

poses de la caméra en utilisant l’algorithme de Levenberg-Marquardt pour minimiser l’erreur de reprojection des coins des marqueurs sur l’ensemble des images. Les poses de l’effecteur peuvent finalement être obtenues à partir de celles de la caméra en utilisant les transformations rigides \mathbf{p}_{ce} et \mathbf{Q}_{ce} , exprimés comme

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_{mw} + \mathbf{Q}_{mw}\mathbf{p}_{cm} + \mathbf{Q}_{mw}\mathbf{Q}_{cm}\mathbf{p}_{ce}, \quad (3.26a)$$

$$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_{mw}\mathbf{Q}_{cm}\mathbf{Q}_{ce}^T, \quad (3.26b)$$

où \mathbf{p}_{mw} et \mathbf{Q}_{mw} sont établis avant l’étalonnage, tandis que \mathbf{p}_{cm} et \mathbf{Q}_{cm} sont obtenus en utilisant la pose reconstruite par le logiciel.

Dans le cas d’un robot à câbles suspendu, c’est-à-dire qui ne possède pas de redondance d’actionnement, les valeurs \mathbf{p}_{ce} et \mathbf{Q}_{ce} doivent être déterminées avant l’étalonnage. Dans le cas contraire, la redondance d’actionnement permet d’estimer ces paramètres. Pour ce faire, il est nécessaire d’inclure ceux-ci dans les variables de décision du problème d’optimisation formulé à l’équation (3.20).

3.4 Génération d’une liste de poses atteignables

Dans l’optique d’effectuer un étalonnage de manière autonome, il est essentiel de définir un ensemble de plusieurs poses $X_j = \{\mathbf{p}_j, \mathbf{Q}_j\}$ qui peuvent être atteintes à partir d’une pose initiale $X_0 = \{\mathbf{p}_0, \mathbf{Q}_0\}$. Dans le but d’être atteignable, la trajectoire reliant ces deux poses doit être à l’intérieur de l’espace de travail et libre de toute collision entre câbles. La technique proposée est de projeter une pose X_r , générée aléatoirement dans une boîte à six degrés de liberté, sur l’espace de travail du robot.

Dans le but de trouver des poses atteignables, un estimé initial des paramètres à étalonner est nécessaire. Ces paramètres sont aussi utilisés comme estimé initial pour l’étalonnage lui-même. En l’occurrence, cet estimé initial est obtenu à l’aide d’un ruban à mesurer et d’un niveau laser. Dans un contexte industriel, il serait avantageux d’utiliser des appareils permettant une mesure rapide et automatique. Par exemple, les systèmes de positionnement à bande ultra-large permettent de localiser des balises par trilatération dans un environnement intérieur. En installant des balises sur les enrouleurs, il est possible d’obtenir un estimé de la position des points de sortie des câbles \mathbf{a}_i . Selon les technologies actuellement disponibles sur le marché, il est possible d’obtenir une précision de positionnement de l’ordre d’une dizaine de centimètres [2].

Pour chaque pose d’étalonnage j , une nouvelle pose aléatoire $X_r = \{\mathbf{p}_r, \mathbf{Q}_r\}$ est générée. La trajectoire entre X_0 et X_r est définie, en utilisant $0 \leq \lambda \leq 1$, comme un mouvement rectiligne du point \mathbf{p}_0 combiné à une rotation à vitesse angulaire constante de l’effecteur. Une telle

trajectoire est décrite comme :

$$\mathbf{p}(\lambda) = \mathbf{p}_0 + \lambda(\mathbf{p}_r - \mathbf{p}_0), \quad (3.27a)$$

$$\mathbf{Q}(\lambda) = \mathbf{Q}_t(\lambda)\mathbf{Q}_0, \quad (3.27b)$$

où

$$\mathbf{Q}_t(\lambda) = \mathbf{e}\mathbf{e}^T + \cos \lambda\phi(\mathbf{1}_{3 \times 3} - \mathbf{e}\mathbf{e}^T) + \sin \lambda\phi\mathbf{E} \quad (3.28)$$

est la rotation subite par l'effecteur de $\lambda = 0$ jusqu'à la valeur λ . On utilise

$$\mathbf{E} = \text{cpm}(\mathbf{e}), \quad (3.29)$$

la fonction définie à l'équation (3.6), de manière à ce que \mathbf{e} et ϕ représentent respectivement la direction de l'axe de cette rotation ainsi que son amplitude. En résolvant (3.27b) pour $\mathbf{Q}_t(\lambda)$ et en utilisant $\lambda = 1$, on obtient

$$\mathbf{Q}_t(1) = \mathbf{Q}_r\mathbf{Q}_0^T. \quad (3.30)$$

Il est ensuite possible de trouver la direction de l'axe et l'angle qui correspondent à cette rotation en définissant

$$\text{tr}(\mathbf{Q}_t(1)) \equiv q_{t11} + q_{t22} + q_{t33}, \quad (3.31a)$$

$$\text{vect}(\mathbf{Q}_t(1)) \equiv \frac{1}{2} \begin{bmatrix} q_{t32} - q_{t23} \\ q_{t13} - q_{t31} \\ q_{t21} - q_{t12} \end{bmatrix}, \quad (3.31b)$$

puis en utilisant les propriétés

$$\text{tr}(\mathbf{Q}_t(1)) = 1 + 2 \cos \phi, \quad (3.32a)$$

$$\text{vect}(\mathbf{Q}_t(1)) = \sin \phi \mathbf{e}. \quad (3.32b)$$

3.4.1 Trajectoire à l'intérieur de l'espace statique

Dans le but d'assurer le respect des limites de l'espace statique, l'objectif est de trouver la valeur maximale $\lambda = \lambda_s$ qui peut être atteinte tout en respectant la contrainte. Il est possible de s'assurer du tout en commençant par trouver la direction de chaque câble, donnée par

$$\mathbf{c}_i(\lambda_s) = \frac{\mathbf{a}_i - \mathbf{p}(\lambda_s) - \mathbf{Q}(\lambda_s)\mathbf{b}_i}{\|\mathbf{a}_i - \mathbf{p}(\lambda_s) - \mathbf{Q}(\lambda_s)\mathbf{b}_i\|}, \quad (3.33)$$

et en construisant la matrice des torseurs des câbles

$$\mathbf{W}(\lambda_s) = \mathbf{L}(\lambda_s)^T = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_1(\lambda_s) & \cdots & \mathbf{c}_m(\lambda_s) \\ \mathbf{Q}(\lambda_s)\mathbf{b}_1 \times \mathbf{c}_1(\lambda_s) & \cdots & \mathbf{Q}(\lambda_s)\mathbf{b}_m \times \mathbf{c}_m(\lambda_s) \end{bmatrix}. \quad (3.34)$$

Par ailleurs, tout comme le cas du robot plan, la matrice \mathbf{W} se trouve à être la transposée de la matrice \mathbf{L} de l'équation 3.15. En imposant des limites sur les tensions dans les câbles

tel que $t_{\min} \leq t_i \leq t_{\max}$ et en ajoutant la contrainte d'équilibre statique à l'effecteur, on peut formuler le problème comme suit

$$\begin{aligned}
& \text{maximiser } \lambda_s \\
& \text{sujet à } \mathbf{t}_{\min} \leq \mathbf{t} \leq \mathbf{t}_{\max}, \\
& \mathbf{W}(\lambda_s)\mathbf{t} + \mathbf{w}_e = \mathbf{0}, \\
& 0 \leq \lambda_s \leq 1
\end{aligned} \tag{3.35}$$

où \mathbf{t} est le vecteur des tensions dans les câbles et \mathbf{w}_e est le torseur appliqué sur la plate-forme par l'environnement.

3.4.2 Vérification à l'aide du logiciel *ARACHNIS*

En générant de manière aléatoire une sphère de points autour du point \mathbf{p}_0 , puis en suivant la démarche élaborée, il est également possible de tracer l'espace statique du robot, pour une orientation constante de la plate-forme. Une vérification de la méthode proposée est donc effectuée en faisant une comparaison entre l'espace de travail ainsi obtenu et celui tracé à l'aide *ARACHNIS* [8], un logiciel permettant d'effectuer la même tâche.

Le rayon de la sphère est choisi de manière à ce que tous les points \mathbf{p}_r sur la surface de celle-ci soient à l'extérieur de l'espace de travail, ce qui peut être fait aisément en s'assurant que la sphère englobe les différentes valeurs \mathbf{a}_i . La distance maximale λ_s pouvant être atteinte est ensuite calculée, ce qui permet de tracer un ensemble de points se situant exactement à la frontière de l'espace de travail. Si le nombre de points est suffisant, on peut les relier de manière à obtenir une approximation de surface formant cette frontière.

De son côté, le logiciel *ARACHNIS* calcule plutôt un indice de robustesse de l'équilibre statique du robot sur un volume discret afin de déterminer la forme de l'espace de travail. Cette méthode est sans contredit plus efficace d'un point de vue calcul, mais sa précision dépend de la finesse de la discrétisation utilisée.

Dans le but de vérifier la performance de méthode obtenue, on utilise 2000 points afin de générer la surface de l'espace de travail du robot présenté dans la section 3.7 à une orientation $\mathbf{Q} = \mathbf{1}_{3 \times 3}$. Par la suite, la même procédure est répétée avec *ARACHNIS*, pour un volume discret de $20 \times 20 \times 20$ points. Les surfaces obtenues, très similaires, sont présentées à la figure 3.3. On remarque que celles-ci s'avèrent être assez bien superposées, ce qui suggère qu'il n'y a pas de biais ou de différence importante entre les deux méthodes. Afin de mieux visualiser les différences entre ces deux méthodes, trois vues de section des mêmes surfaces sont présentées à la figure 3.4. Les seules différences, minimales, semblent dues aux choix des points utilisés pour générer la surface. En effet, étant donné que la méthode proposée utilise des points \mathbf{p}_r aléatoirement distribués sur la surface d'une sphère, la densité de points formant les portions de surface se trouvant plus près du point \mathbf{p}_0 a tendance à être plus élevée. Les portions de surface étant formées par ces points auront donc tendance à être plus précises.

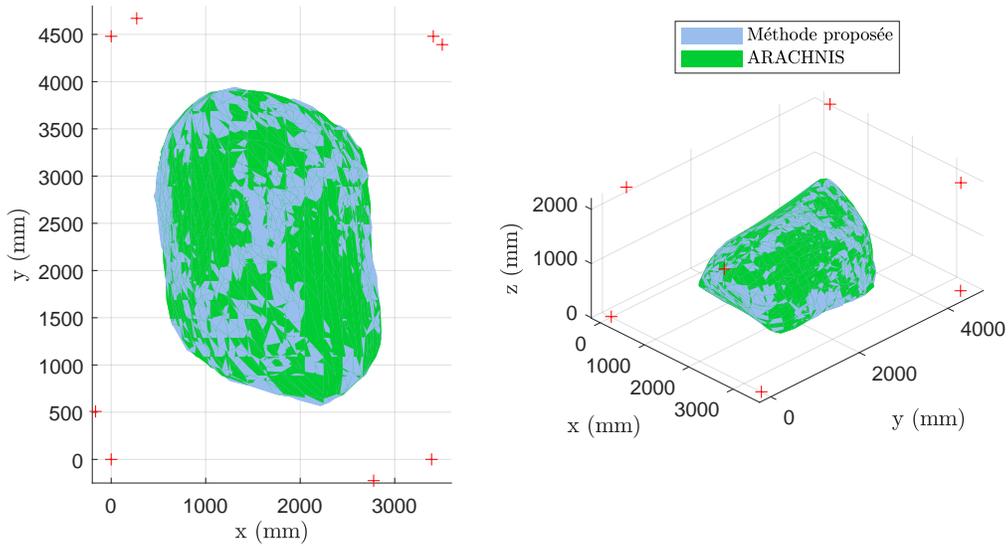


FIGURE 3.3 – Comparaison entre l’espace de travail à orientation constante généré par la méthode proposée et par le logiciel *ARACHNIS*

3.4.3 Trajectoire sans interférence entre câbles

On définit $\zeta(\mathbf{p}_{k1}, \mathbf{p}_{k2}, \mathbf{p}_{l1}, \mathbf{p}_{l2})$ comme étant une fonction qui calcule la distance entre deux segments à partir des quatre points formant les extrémités de ceux-ci [27]. Cette fonction calcule essentiellement la distance entre deux droites, mais gère également les cas limites liés aux extrémités lorsqu’on considère deux segments de longueurs finies. Les câbles k et l sont donc être modélisés par les segments $\mathbf{p}_{k2} - \mathbf{p}_{k1}$ et $\mathbf{p}_{l2} - \mathbf{p}_{l1}$.

On peut réécrire ces points en fonction de la géométrie du robot, c’est-à-dire,

$$\mathbf{p}_{k1} = \mathbf{a}_k, \quad (3.36a)$$

$$\mathbf{p}_{k2} = \mathbf{p}(\lambda_{k,l}) + \mathbf{Q}(\lambda_{k,l})\mathbf{b}_k, \quad (3.36b)$$

$$\mathbf{p}_{l1} = \mathbf{a}_l, \quad (3.36c)$$

$$\mathbf{p}_{l2} = \mathbf{p}(\lambda_{k,l}) + \mathbf{Q}(\lambda_{k,l})\mathbf{b}_l. \quad (3.36d)$$

Une collision se produit entre deux câbles de même diamètre lorsque $\zeta(\mathbf{p}_{k1}, \mathbf{p}_{k2}, \mathbf{p}_{l1}, \mathbf{p}_{l2}) < \epsilon$, où ϵ est le diamètre des câbles. Pratiquement, on peut considérer des câbles de diamètre négligeable, c’est-à-dire $\epsilon = 0$, ce qui simplifie la suite de la procédure.

Les zéros de la fonction sont ensuite trouvés en utilisant

$$\begin{aligned} & \underset{\lambda_{k,l}}{\text{minimiser}} \zeta(\mathbf{p}_{k1}, \mathbf{p}_{k2}, \mathbf{p}_{l1}, \mathbf{p}_{l2}) \\ & \text{sujet à } 0 \leq \lambda_{k,l} \leq 1 \end{aligned} \quad (3.37)$$

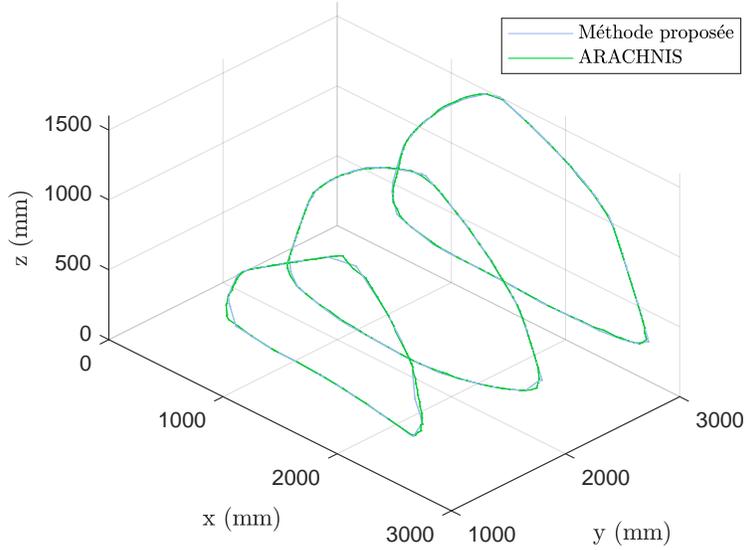


FIGURE 3.4 – Comparaison entre trois sections de l’espace de travail à orientation constante généré par la méthode proposée et trois autres sections générées par le logiciel *ARACHNIS*

pour les $\frac{m}{2}(m-1)$ paires possibles de câbles, soit pour $k, l \in \{1, \dots, m\}, k < l$. Si aucune racine n’est trouvée dans cet intervalle, la trajectoire peut être entièrement réalisée sans interférence, ce qui implique $\lambda_{i,j} = 1$.

3.4.4 Liste de poses atteignables

La liste de poses atteignables peut être générée en considérant la plus petite valeur λ qu’il est possible d’atteindre, pour l’ensemble des combinaisons d’interférences possibles de câbles k et l ainsi que pour le respect du critère d’équilibre statique, soit

$$\lambda = \mu \min\{\lambda_s, \lambda_{k,l}\} \quad (3.38)$$

où $0 \leq \mu \leq 1$ est un facteur appliqué pour prendre en compte les différences entre l’estimation initiale de la géométrie du robot et sa géométrie réelle. Ce dernier peut être ajusté en fonction du niveau de confiance qu’on a dans l’approximation initiale des paramètres. En effet, si l’on considère $\mu = 1$, les poses correspondant à λ se trouvent exactement à la frontière de l’espace de travail ou à la limite d’une collision entre câbles. Ainsi, une légère erreur dans ces paramètres pourrait accidentellement commander une trajectoire vers une pose impossible à atteindre. Une valeur μ élevée se traduit donc par un haut niveau de confiance de l’estimé de \mathbf{a}_i et $\Delta\rho_i$, tandis qu’une valeur plus faible limite linéairement la progression sur la trajectoire, dans le cas où le niveau de confiance sur les mesures est plus faible.

Il est finalement possible de reconstituer la pose pouvant être atteinte à l’aide des équations (3.27a) et (3.27b). La procédure est répétée jusqu’à ce que l’ampleur de la liste de poses

d'étalonnage soit jugée assez importante.

À titre d'exemple, la figure 3.5 montre une pose X_j , générée sur la trajectoire allant de la pose X_0 à la pose X_r . Dans le cas qui y est illustré, on obtient une valeur $\lambda = 0.56$.

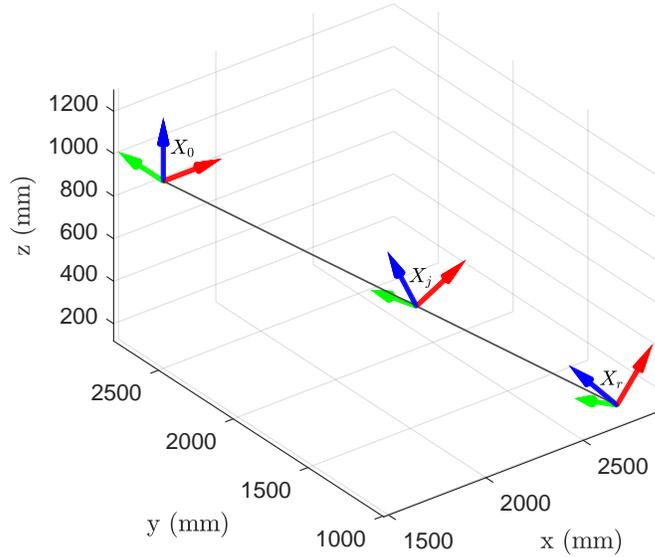


FIGURE 3.5 – Exemple de pose atteignable générée à partir de X_0 et X_r

La complexité de la tâche de génération d'une liste utilisant la méthode décrite précédemment est évidemment proportionnelle au nombre de poses d'étalonnage la constituant. Bien que ce processus ne puisse pas être effectué en temps réel, on s'intéresse au temps de calcul nécessaire afin d'élaborer une telle liste. Celui-ci est donc expérimentalement déterminé, sur un processeur *Intel Core 2 Duo E8400* fonctionnant à 3.00 GHz. Lors de l'essai réalisé pour la génération d'une liste de 10 000 échantillons, le temps moyen obtenu est de 1.29 s par pose, avec un écart type de 1.32 s.

3.4.5 Choix des plans formant la boîte de génération des poses à atteindre

Parce qu'a priori on ne connaît pas l'espace de travail du robot, cette méthode ne peut pas garantir la génération de poses X_j aléatoirement dispersées à l'intérieur de celui-ci. Dans le but d'obtenir un étalonnage satisfaisant, on désire tout de même obtenir un bassin de poses assez diversifié. Comme vu précédemment, les poses X_r ne pouvant être atteintes sont projetées sur l'espace de travail du robot, appelé \mathcal{W} . Le choix des plans formant la boîte à six dimensions \mathcal{Z} dans laquelle celles-ci sont aléatoirement générées aura donc un impact direct sur la liste finale de poses X_j . Bien que l'ensemble \mathcal{Z} soit une boîte dans le cas ici considéré, il n'y a aucune raison pour laquelle on devrait être limité à cette forme particulière.

À titre d'exemple, la figure 3.6 montre, pour un robot à deux degrés de liberté, trois cas de figures représentant l'impact du choix des bornes de la génération des points X_r , visibles en rouge, sur les points X_j trouvés par l'algorithme, représentés par des croix bleues.

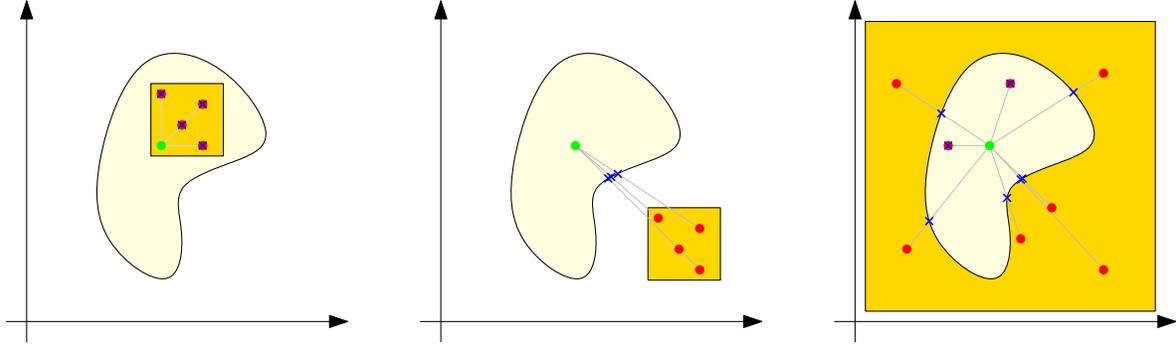


FIGURE 3.6 – Illustration de l'effet sur X_j de différentes boîtes \mathcal{Z} .

Afin d'obtenir des poses dispersées dans l'entièreté de l'espace \mathcal{W} , ce dernier doit impérativement être inscrit dans la boîte \mathcal{Z} . Idéalement, on désire également s'assurer que ces derniers soient aussi centrés que possible, afin d'éviter d'obtenir une plus grande densité de points dans certaines parties de l'espace de travail que dans d'autres. Finalement, la taille de \mathcal{Z} est également importante. Plus cet espace est grand, plus la proportion de poses X_j situées sur la limite de \mathcal{W} sera grande. L'inverse est également vrai : pour un petit espace \mathcal{Z} , les chances de générer une pose X_r à l'extérieur de \mathcal{W} étant faibles, la plupart des points X_r pourront être atteints, ce qui revient à $\lambda = \mu$, conformément à l'équation (3.38).

En présence d'un espace de travail \mathcal{W} a priori inconnu, la position et la taille de \mathcal{Z} ne peut être déterminée. On fait donc une approximation initiale grossière de \mathcal{W} , basée uniquement sur la géométrie de l'ensemble des points d'attache \mathbf{a}_i . Pour ce qui est de la pose X_0 , l'orientation \mathbf{Q}_0 est choisie manuellement de manière à éviter les collisions entre les câbles. Dans le cas présent, l'orientation retenue est $\mathbf{Q}_0 = \mathbf{1}_{3 \times 3}$. La pose initiale \mathbf{p}_0 retenue est quant à elle la moyenne géométrique des vecteurs \mathbf{a}_i .

On peut ensuite vérifier que X_0 est à l'intérieur de l'espace de travail du robot en tentant de résoudre l'optimisation convexe (3.80), présentée à la section 3.6.2. Si une solution est trouvée, on peut ensuite définir la boîte à six dimensions, centrée autour de X_0 dans laquelle seront générées aléatoirement les poses X_r . Sinon, on devra choisir une autre pose initiale X_0 .

Il a été observé que les poses optimales pour l'étalonnage d'un robot tendent à converger à la limite de l'espace de travail [11, 22, 44]. Le fait de générer une boîte \mathcal{Z} considérablement plus grande que l'espace de travail n'aura donc pas d'impact négatif sur l'étalonnage, contrairement au fait de sous-estimer la taille réelle de \mathcal{W} et ainsi générer un espace \mathcal{Z} n'y étant pas inscrit. En position, on génère donc une boîte de taille égale ou légèrement supérieure à celle

du mécanisme. En orientation, des limites plus conservatrices sont utilisées, car de manière générale, un changement de position aura tendance à faire varier les longueurs des câbles de manière plus importante qu'un changement d'orientation, davantage susceptible de causer une collision entre des câbles.

3.5 Simulation

Une fois le problème d'étalonnage formulé et la liste de poses d'étalonnage validée, l'efficacité et la précision de la technique d'étalonnage proposée peuvent être vérifiées en simulation. Dans cette section, la procédure permettant de simuler l'étalonnage d'un robot est présentée. Les données ainsi générées sont utilisées afin de déterminer l'ordre de grandeur du nombre de poses nécessaire à un étalonnage. Puis, un modèle permettant de faire un estimé de la propagation d'erreur lors de l'étalonnage est développé. Ce modèle sera par la suite comparé aux résultats de la simulation afin de pouvoir conclure sur sa validité. Finalement, ce dernier est utilisé afin d'analyser l'effet de différentes combinaisons d'erreurs de mesure sur un étalonnage.

Afin de générer des données permettant de simuler un étalonnage, la géométrie d'un robot virtuel est d'abord établie, puis la résolution du PGI est faite pour chaque pose X_j , générée selon la section 3.4, afin d'obtenir les longueurs de câbles correspondantes ρ_j . Un biais et du bruit sont ensuite ajoutés sur \mathbf{p}_j , \mathbf{Q}_j et ρ_j de manière à reproduire la variabilité des mesures. Pour finir, les paramètres \mathbf{a}_i et $\boldsymbol{\rho}_0$ sont estimés en réalisant un étalonnage conformément à la section 3.3.

Pour représenter l'erreur commise sur l'ensemble des $4m$ paramètres à identifier, l'erreur quadratique moyenne est utilisée. Afin d'éviter toute ambiguïté, cet indicateur est défini comme suit pour les deux quantités à identifier

$$e_{\text{rms}}(\mathbf{a}) = \sqrt{\frac{1}{3m} \sum_{i=1}^m [(\tilde{a}_{xi} - a_{xi})^2 + (\tilde{a}_{yi} - a_{yi})^2 + (\tilde{a}_{zi} - a_{zi})^2]}, \quad (3.39a)$$

$$e_{\text{rms}}(\boldsymbol{\rho}_0) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\tilde{\rho}_i - \rho_i)^2}. \quad (3.39b)$$

3.5.1 Nombre de poses d'étalonnage nécessaires

Il va de soi que pour l'étalonnage d'un robot effectué sans erreur de mesure, la géométrie reconstituée ne présente, elle non plus, aucune erreur. Cependant, en réalité, la surdétermination du système d'équations de l'étalonnage est souhaitable, car elle permet de diminuer l'effet du bruit de mesure, ce qui résulte généralement en une identification plus précise des paramètres.

Afin d'être surdéterminé, l'étalonnage doit être basé sur un nombre d'échantillons $n > 5$. Parce que la mesure d'un nombre de poses inutilement élevé est nécessairement peu pratique,

on cherche à estimer le nombre d'échantillons nécessaires pour réaliser un étalonnage. Pour ce faire, un mécanisme n'étant sujet qu'à l'erreur des mesures des câbles est considéré. Une erreur de ± 3 mm (à un écart type) est donc ajoutée sur celles-ci. En faisant varier le nombre de poses d'étalonnage pour chaque simulation réalisée, il est possible de tracer le graphique visible à la figure 3.7. Même si l'erreur commise sur ρ_0 est toujours légèrement supérieure à celle qui est commise sur \mathbf{a} , on observe une convergence d'allure similaire pour ces deux paramètres. Il est possible de constater que dans ce cas, l'utilisation d'un nombre de poses d'étalonnage supérieur à environ 200 ne permet pratiquement plus d'améliorer la précision de l'étalonnage.

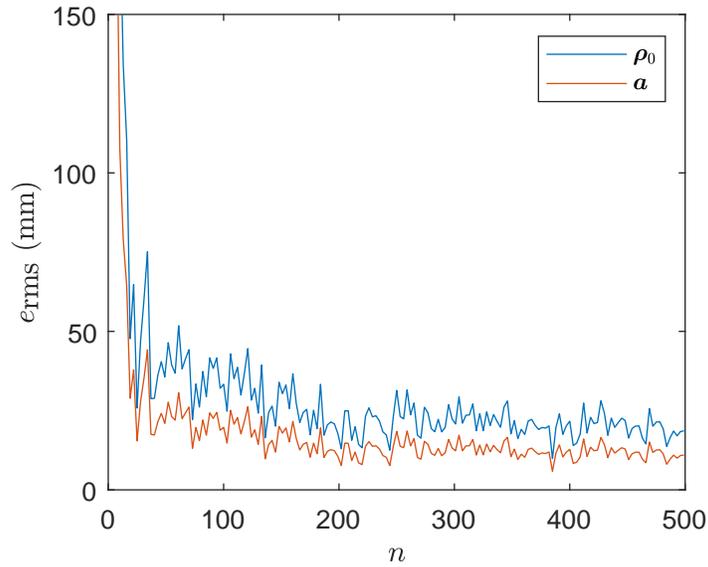


FIGURE 3.7 – Effet du nombre de poses d'étalonnage n sur l'erreur quadratique moyenne e_{rms} sur les paramètres géométriques à reconstituer lorsqu'une erreur aléatoire de ± 3 mm sur les longueurs de câbles est ajoutée.

Afin de mieux représenter la réalité, il est également possible d'ajouter une erreur sur la pose de l'effecteur, dictée par la reconstruction de la pose de la caméra. En conservant la même amplitude d'erreur aléatoire pour les longueurs des câbles, l'effet de l'ajout d'une erreur de positionnement de l'effecteur de ± 2 mm et d'une erreur en orientation de 1 degré (à un écart type) est montré à la figure 3.8. Naturellement, l'ajout de cette erreur fait augmenter l'erreur RMS sur l'ensemble de la plage, mais on note que cette augmentation ne semble pas avoir d'effet sur la position du plateau qui survient toujours après approximativement 200 poses d'étalonnage.

3.5.2 Modèle d'erreur

De toute évidence, lors de l'étalonnage, la précision de l'identification des paramètres est dictée par les erreurs de mesures. Afin d'établir la relation entre les erreurs d'identification

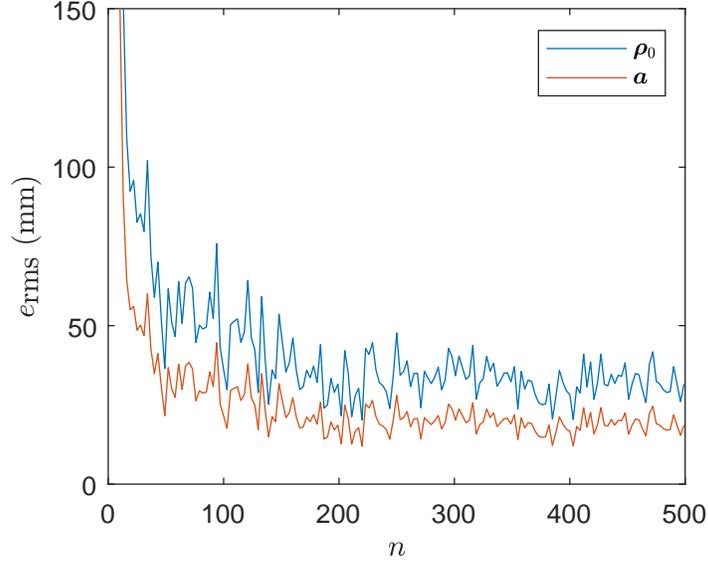


FIGURE 3.8 – Effet du nombre de poses d'étalonnage n sur l'erreur quadratique moyenne e_{rms} sur les paramètres géométriques à reconstituer lorsque des erreurs aléatoires de ± 3 mm, ± 2 mm et $\pm 1^\circ$ sont ajoutées respectivement sur $\boldsymbol{\rho}$, \mathbf{p} et \mathbf{Q} .

et de mesure, la méthode la plus simple est d'y aller par simulation. On peut ainsi aisément bruitez les mesures et réaliser l'étalonnage par la suite. Par contre, si l'on désire quantifier l'effet de plusieurs combinaisons de bruit ou de biais sur les différentes mesures, une grande quantité de problèmes de régression aux moindres carrés non linéaire doivent être résolus. Le fait de procéder ainsi peut s'avérer laborieux ou tout simplement long. Cette section présente donc un modèle linéaire permettant d'estimer la relation entre les erreurs à l'entrée et à la sortie du système, puis évalue la validité de ce modèle.

On débute en faisant l'hypothèse que les erreurs sont suffisamment petites. Par dérivation de l'équation (3.17), on obtient

$$(\mathbf{p}_j + \mathbf{Q}_j \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i)^T (\delta \mathbf{p}_j + \delta \mathbf{Q}_j \mathbf{b}_i - \delta \mathbf{a}_i) = (\rho_{i,0} + \Delta \rho_{i,j}) (\delta \rho_{i,0} + \delta \Delta \rho_{i,j}). \quad (3.40)$$

En regroupant les entrées et les sorties du système, il est possible de réécrire sous la forme

$$-\mathbf{c}_i^T \delta \mathbf{a}_i - (\rho_{i,0} + \Delta \rho_{i,j}) \delta \rho_{i,0} = -\mathbf{c}_i^T \delta \mathbf{p}_j - \mathbf{c}_i^T \mathbf{B}_i \delta \mathbf{q}_j + (\rho_{i,0} + \Delta \rho_{i,j}) \delta \Delta \rho_{i,j}. \quad (3.41)$$

où

$$\mathbf{c}_i = \mathbf{p}_j + \mathbf{Q}_j \mathbf{b}_i - \mathbf{a}_i, \quad (3.42a)$$

$$\mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{xi} \mathbf{1}_{3 \times 3} & \mathbf{b}_{yi} \mathbf{1}_{3 \times 3} & \mathbf{b}_{zi} \mathbf{1}_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \quad (3.42b)$$

$$\delta \mathbf{Q}_j = \begin{bmatrix} \delta \mathbf{q}_{1j} & \delta \mathbf{q}_{1j} & \delta \mathbf{q}_{1j} \end{bmatrix}, \quad (3.42c)$$

$$\delta \mathbf{q}_j = \begin{bmatrix} \delta \mathbf{q}_{1j}^T & \delta \mathbf{q}_{2j}^T & \delta \mathbf{q}_{3j}^T \end{bmatrix}. \quad (3.42d)$$

Cette équation peut être exprimée comme

$$\mathbf{d}_{i,j}^T \delta \mathbf{x}_i = -(\rho_{i,0} + \Delta \rho_{i,j}) \delta \Delta \rho_{i,j} + \mathbf{c}_{i,j}^T \delta \mathbf{p}_j + \mathbf{c}_{i,j}^T \mathbf{B}_i \delta \mathbf{q}_j \quad (3.43)$$

en utilisant

$$\mathbf{d}_{i,j} = [(\rho_{i,0} + \Delta \rho_{i,j}) \quad \mathbf{c}_{i,j}^T]^T, \quad (3.44a)$$

$$\mathbf{x}_i = [\delta \rho_{i,0} \quad \delta \mathbf{a}_i^T]^T. \quad (3.44b)$$

Par la suite, les équations (3.43) correspondant à chacun des m câbles peuvent être assemblées, ce qui est transcrit comme

$$\mathbf{D}_j \delta \mathbf{x} = -\mathbf{F}_j \delta \Delta \boldsymbol{\rho}_j + \mathbf{G}_j \delta \mathbf{p}_j + \mathbf{H}_j \delta \mathbf{q}_j, \quad (3.45)$$

avec les matrices

$$\mathbf{D}_j = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{1,j}^T & \mathbf{0}_4^T & \cdots & \mathbf{0}_4^T \\ \mathbf{0}_4^T & \mathbf{d}_{2,j}^T & \cdots & \mathbf{0}_4^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0}_4^T & \mathbf{0}_4^T & \cdots & \mathbf{d}_{m,j}^T \end{bmatrix}, \quad (3.46a)$$

$$\mathbf{F}_j = \begin{bmatrix} \rho_{1,0} + \Delta \rho_{1,j} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \rho_{2,0} + \Delta \rho_{2,j} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \rho_{m,0} + \Delta \rho_{m,j} \end{bmatrix}, \quad (3.46b)$$

$$\mathbf{G}_j = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_{1,j}^T \\ \mathbf{c}_{2,j}^T \\ \vdots \\ \mathbf{c}_{m,j}^T \end{bmatrix}, \quad (3.46c)$$

$$\mathbf{H}_j = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_{1,j}^T \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{c}_{2,j}^T \mathbf{B}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{c}_{m,j}^T \mathbf{B}_m \end{bmatrix}. \quad (3.46d)$$

À ce point, il est important de préciser que la valeur de $\delta \mathbf{Q}_j$ n'est pas connue. On connaît plutôt $\tilde{\mathbf{Q}}_j$, l'orientation mesurée lorsque la plate-forme devrait être orientée selon \mathbf{Q}_j . Or, on sait, selon les propriétés d'une matrice de rotation, que

$$\mathbf{Q}_j^T \mathbf{Q}_j = \mathbf{1}_{3 \times 3}. \quad (3.47)$$

Après dérivation, il est possible d'écrire

$$\delta \mathbf{Q}_j^T \mathbf{Q}_j + \mathbf{Q}_j^T \delta \mathbf{Q}_j = \mathbf{0}_{3 \times 3}. \quad (3.48)$$

Si l'on considère que

$$\mathbf{Q}_j = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{1j} & \mathbf{q}_{2j} & \mathbf{q}_{3j} \end{bmatrix}, \quad (3.49)$$

l'équation (3.48) revient à écrire

$$\begin{bmatrix} 2\mathbf{q}_{1j}^T \delta \mathbf{q}_{1j} & \mathbf{q}_{2j}^T \delta \mathbf{q}_{1j} + \mathbf{q}_{1j}^T \delta \mathbf{q}_{2j} & \mathbf{q}_{3j}^T \delta \mathbf{q}_{1j} + \mathbf{q}_{1j}^T \delta \mathbf{q}_{3j} \\ \mathbf{q}_{2j}^T \delta \mathbf{q}_{1j} + \mathbf{q}_{1j}^T \delta \mathbf{q}_{2j} & 2\mathbf{q}_{2j}^T \delta \mathbf{q}_{2j} & \mathbf{q}_{3j}^T \delta \mathbf{q}_{2j} + \mathbf{q}_{2j}^T \delta \mathbf{q}_{3j} \\ \mathbf{q}_{3j}^T \delta \mathbf{q}_{1j} + \mathbf{q}_{1j}^T \delta \mathbf{q}_{3j} & \mathbf{q}_{3j}^T \delta \mathbf{q}_{2j} + \mathbf{q}_{2j}^T \delta \mathbf{q}_{3j} & 2\mathbf{q}_{3j}^T \delta \mathbf{q}_{3j} \end{bmatrix} = \mathbf{0}_{3 \times 3}, \quad (3.50)$$

ce qui implique

$$\mathbf{S}^T \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{1j} \\ \mathbf{q}_{2j} \\ \mathbf{q}_{3j} \end{bmatrix} = \mathbf{0}_6, \quad (3.51)$$

où

$$\mathbf{S}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{1,j}^T & \mathbf{0}_3^T & \mathbf{0}_3^T \\ \mathbf{0}_3^T & \mathbf{q}_{2,j}^T & \mathbf{0}_3^T \\ \mathbf{0}_3^T & \mathbf{0}_3^T & \mathbf{q}_{3,j}^T \\ \mathbf{0}_3^T & \mathbf{q}_{3,j}^T & \mathbf{q}_{2,j}^T \\ \mathbf{q}_{3,j}^T & \mathbf{0}_3^T & \mathbf{q}_{1,j}^T \\ \mathbf{q}_{2,j}^T & \mathbf{q}_{1,j}^T & \mathbf{0}_3^T \end{bmatrix}. \quad (3.52)$$

Les trois vecteurs qui engendrent le noyau de \mathbf{S}^T sont donc

$$\begin{bmatrix} \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{q}_{3j} \\ -\mathbf{q}_{2j} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -\mathbf{q}_{3j} \\ \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{q}_{1j} \end{bmatrix}^T \text{ et } \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{2j} \\ -\mathbf{q}_{1j} \\ \mathbf{0}_3 \end{bmatrix}^T. \quad (3.53)$$

On peut donc utiliser ce résultat afin d'ajouter une équation de contrainte qui force \mathbf{Q}_j et $\delta \mathbf{Q}_j$ à respecter l'équation (3.48), ou, autrement dit, qui force $\mathbf{Q}_j + \delta \mathbf{Q}_j$ à donner une matrice de rotation sous l'hypothèse que $\delta \mathbf{Q}_j$ soit suffisamment petit, c'est-à-dire

$$\delta \mathbf{q}_j = \mathbf{T}_j \delta \mathbf{r}_j, \quad (3.54)$$

où

$$\mathbf{T}_j = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_3 & -\mathbf{q}_{3j} & \mathbf{q}_{2j} \\ \mathbf{q}_{3j} & \mathbf{0}_3 & -\mathbf{q}_{1j} \\ -\mathbf{q}_{2j} & \mathbf{q}_{1j} & \mathbf{0}_3 \end{bmatrix} \text{ et } \delta \mathbf{r}_j \in \mathbb{R}^3. \quad (3.55)$$

En pratique, il est possible de trouver la valeur de $\delta \mathbf{r}_j$ en utilisant

$$\delta \mathbf{Q}_j = \tilde{\mathbf{Q}}_j - \mathbf{Q}_j \quad (3.56)$$

puis en reformulant l'éq (3.54)

$$\delta \mathbf{r}_j = (\mathbf{T}_j^T \mathbf{T}_j)^{-1} \mathbf{T}_j^T \delta \mathbf{q}_j. \quad (3.57)$$

où

$$\delta \mathbf{Q}_j = \begin{bmatrix} \delta \mathbf{q}_{1j} & \delta \mathbf{q}_{2j} & \delta \mathbf{q}_{3j} \end{bmatrix}. \quad (3.58)$$

En substituant l'éq (3.54) dans (3.45), on obtient donc

$$\mathbf{D}_j \delta \mathbf{x} = \mathbf{K}_j \delta \mathbf{y}_j, \quad (3.59)$$

où

$$\mathbf{K}_j = \begin{bmatrix} -\mathbf{F}_j & \mathbf{G}_j & \mathbf{H}_j \mathbf{T}_j \end{bmatrix} \quad (3.60a)$$

$$\delta \mathbf{y}_j = \begin{bmatrix} \delta \Delta \boldsymbol{\rho}_j^T & \delta \mathbf{p}_j^T & \delta \mathbf{r}_j^T \end{bmatrix}^T. \quad (3.60b)$$

Par la suite, l'assemblage de l'équation (3.59) est effectué pour l'ensemble des poses $i = 1, \dots, n$ où des mesures ont été enregistrées. Le tout s'écrit

$$\mathbf{D} \delta \mathbf{x} = \mathbf{K} \delta \mathbf{y}, \quad (3.61)$$

avec

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_1 \\ \mathbf{D}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{D}_n \end{bmatrix} \quad (3.62a)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_1 & \mathbf{0}_{m \times (m+6)} & \cdots & \mathbf{0}_{m \times (m+6)} \\ \mathbf{0}_{m \times (m+6)} & \mathbf{K}_2 & \cdots & \mathbf{0}_{m \times (m+6)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0}_{m \times (m+6)} & \mathbf{0}_{m \times (m+6)} & \cdots & \mathbf{K}_n \end{bmatrix}, \quad (3.62b)$$

$$\delta \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \delta \mathbf{y}_1^T & \delta \mathbf{y}_2^T & \cdots & \delta \mathbf{y}_n^T \end{bmatrix}^T. \quad (3.62c)$$

Finalement, on peut utiliser l'équation (3.61) afin de calculer l'erreur $\delta \mathbf{x}$ pour des erreurs de mesure $\delta \mathbf{y}$ données. Pour ce faire, l'équation s'écrit

$$\delta \mathbf{x} = (\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{D}^T \mathbf{K} \delta \mathbf{y}. \quad (3.63)$$

3.5.3 Comparaison entre les résultats de la simulation et du modèle d'erreur

Une fois le modèle d'erreur établi, on souhaite vérifier sa validité et la plage d'erreurs de mesure sur laquelle celui-ci représente bien la simulation. À cet effet, une simulation ainsi qu'une analyse d'erreurs sont effectuées de manière parallèle. Une fois de plus, on compare les résultats à l'aide de l'erreur quadratique moyenne, pour \mathbf{a} et $\boldsymbol{\rho}_0$. Le critère choisi pour assurer l'exactitude du modèle d'erreur est une différence maximale de 20% entre la valeur obtenue en

simulation et celle prédite par le modèle. Au-dessus de ce seuil, on considère donc que l'erreur sur la mesure est trop grande pour que le modèle d'erreur puisse estimer correctement son effet sur la reconstruction des paramètres \mathbf{a} et ρ_0 .

On vérifie d'abord l'effet de l'erreur systématique (biais) ainsi que de l'erreur aléatoire (bruit), ce qui fait six paramètres à étudier indépendamment. Afin de faire la comparaison, lorsque l'effet d'un type d'erreur est évalué, on pose les erreurs qui ne sont pas analysées à zéro. De plus, pour l'analyse de l'effet du biais, une direction arbitraire est choisie et demeure constante pour l'ensemble de la comparaison. Le bruit est quant à lui ajouté en utilisant une loi normale centrée dont on fait varier l'écart type. Les essais sont réalisés pour 100 poses d'étalonnage.

Les figures B.1, B.2 et B.3 de l'annexe B montrent respectivement l'effet de l'ajout d'une erreur systématique, c'est-à-dire un biais, sur les différentes variables mesurées ρ , \mathbf{p} et \mathbf{Q} . Tandis que \mathbf{a} et ρ_0 dénotent les valeurs obtenues par simulation, $\hat{\mathbf{a}}$ et $\hat{\rho}_0$ représentent les valeurs obtenues à l'aide du modèle d'erreur. Pour l'ensemble des figures présentées, la partie du haut montre les erreurs obtenues tandis que la partie du bas montre à son tour la différence entre celles-ci, permettant ainsi de représenter l'inexactitude du modèle d'erreur.

En premier lieu, il est possible d'observer qu'un biais sur ρ est très bien reproduit par le modèle. Ce biais impacte uniquement la reconstruction des longueurs initiales de câbles ρ_0 . L'erreur du modèle et celle obtenue en simulation sur la reconstruction des points \mathbf{a}_i demeurent inférieures à 10^{-12} , ce qui est caractéristique d'une erreur due uniquement à la résolution numérique du problème. Pour cette raison, ces valeurs ne sont pas représentées sur l'échelle logarithmique du graphique à la figure B.1.

À l'inverse, un biais sur \mathbf{p} n'influence que la reconstruction des points \mathbf{a}_i . Conséquemment, l'erreur commise sur la reconstruction de ρ_0 , également inférieure à 10^{-12} , n'est pas non plus montrée à la figure B.2.

En regardant les résultats, on remarque que ce comportement similaire vient du fait que l'ajout d'un biais sur l'une ou l'autre de ces mesures ne fait que décaler la reconstruction du mécanisme. Logiquement, un biais sur les longueurs de câbles mesurées se répercutera directement sur les longueurs de câbles initiales, tandis qu'un biais sur la position mesurée se répercutera de son côté sur la position de l'ensemble des points de sortie des câbles.

Toutefois, on remarque à la figure B.3 que lorsqu'un biais angulaire est ajouté à la mesure de \mathbf{Q} , l'effet observé est différent. On observe par ailleurs que le modèle d'erreur représente moins bien ce qui est calculé en simulation. Dans le cas présent, afin de limiter l'erreur du modèle à 20% au maximum, l'erreur systématique en orientation doit être limitée à environ 2 degrés. Au-dessus de cette valeur, le modèle tend à sous-estimer l'erreur commise sur la reconstruction des paramètres, ce qui est attendu d'un modèle linéaire.

De manière semblable, les figures B.4, B.5 et B.6 présentent à leur tour l'effet de l'ajout d'une

erreur aléatoire, c'est-à-dire du bruit, sur ces mêmes mesures. Au premier coup d'oeil, on remarque que l'allure des courbes d'erreur est assez similaire, que le bruit soit ajouté sur la position, les longueurs des câbles ou l'orientation. De plus, on observe que tout comme lors de l'ajout d'un biais en orientation, le modèle tend à sous-estimer l'erreur. Afin d'éviter une fois de plus une déviation maximale de l'erreur quadratique de plus de 20%, l'écart type du bruit doit être au maximum de 2.8 mm pour ρ , 2 mm pour \mathbf{p} et 0.4° pour \mathbf{Q} . Le tableau 3.1 résume ces bornes supérieures à respecter pour assurer la validité des résultats ainsi que les erreurs quadratiques moyennes obtenues pour ces seuils en simulation.

TABLE 3.1 – Valeurs de bruit à un écart type causant une erreur du modèle d'environ 20% sur les erreurs quadratiques obtenues en simulation.

Valeur mesurée	Bruit maximal	$e_{\text{rms}}(\mathbf{a})$ (mm)	$e_{\text{rms}}(\boldsymbol{\rho}_0)$ (mm)
ρ	2.8 mm	13.0	20.0
\mathbf{p}	2.0 mm	5.3	9.2
\mathbf{Q}	0.4°	2.5	4.2

On juge donc que le modèle est apte à représenter la propagation d'erreurs observée en simulation. Ce modèle doit cependant être utilisé sur une plage d'erreurs de mesure assez limitée. En effet, pour des erreurs de mesures de plus grande amplitude, l'hypothèse faite au début du développement, c'est-à-dire que celles-ci sont suffisamment petites, ne pourrait pas être faite. Au-dessus des limites identifiées précédemment, l'utilisation de ce modèle tend à sous-estimer l'impact sur les paramètres \mathbf{a} et $\boldsymbol{\rho}_0$ reconstitués lors de l'étalonnage.

Puisque le bruit semble induire une erreur quadratique moyenne de plus grande amplitude pour chaque type de mesure, il semble justifié d'étudier davantage la relation entre ce type d'erreur et leur effet sur l'étalonnage du robot.

3.5.4 Analyse de la propagation d'erreurs lors de la combinaison de plusieurs erreurs de mesure

Dans la sous-section précédente, la propagation d'erreur a été étudiée de manière indépendante pour chaque mesure. Bien entendu, lors de l'étalonnage, l'ensemble des mesures sont affectées par des erreurs de grandeurs différentes. Il importe donc de vérifier l'effet de ces différentes combinaisons d'erreurs sur la précision de l'étalonnage.

Pour ce faire, un balayage des erreurs de bruit sur les intervalles considérés précédemment est effectué en considérant celles-ci deux à deux. On fait donc l'hypothèse qu'après combinaison, l'erreur sur les paramètres \mathbf{a} et $\boldsymbol{\rho}_0$ devrait être dans le même ordre de grandeur que lorsque les erreurs sont considérées individuellement. Le modèle d'erreur utilisé précédemment peut donc encore être utilisé. Cependant, selon les résultats obtenus à la section précédente, on sait que les erreurs ainsi calculées seront sous-estimées.

Après calcul, un filtre gaussien est appliqué par convolution sur les résultats afin de pouvoir observer la tendance de manière plus nette. À l’annexe C, les figures C.1 et C.2 montrent l’effet, sous forme de courbes de niveau, d’une combinaison d’un bruit sur \mathbf{p} et $\boldsymbol{\rho}$ respectivement sur \mathbf{a} , puis sur $\boldsymbol{\rho}_0$. Par la suite, les figures C.3 et C.4 montre la propagation d’erreur causée par une combinaison d’erreurs sur \mathbf{p} et sur \mathbf{Q} . Finalement, dans le même ordre d’idée, les figures C.3 et C.4 présentent des résultats similaires pour le couple d’erreurs de mesure sur $\boldsymbol{\rho}$ et \mathbf{Q} .

Sur les plages d’erreurs étudiées, le modèle linéaire montre évidemment une propagation quasi linéaire de l’erreur, qui semble être de tendance proportionnelle à la norme du vecteur formé par les composantes des erreurs de mesure. On remarque, pour chaque paire de graphiques, une similarité très importante sur la forme des lignes de contour. D’ailleurs, on observe que dans tous les cas, l’erreur sur $\boldsymbol{\rho}_0$ est approximativement supérieure d’un facteur $\sqrt{3}$ à celle qui est commise sur \mathbf{a} . Géométriquement, cette grandeur correspond à la diagonale d’un cube unitaire. La présence de ce facteur est donc censée dans le cas où l’architecture du robot est analogue à celle d’un cube dont les coins correspondent aux vecteurs \mathbf{a}_i , si les poses d’étalonnage sont mesurées lorsque l’effecteur est situé assez près du barycentre de ce dernier.

3.6 Commande

Dans le but d’atteindre les poses désirées sans que le robot ne soit étalonné, il est primordial d’utiliser un schéma de commande qui peut tolérer les erreurs commises sur l’estimation initiale des paramètres. En effet, dans le cas d’un robot à câbles pleinement contraint asservi en position, d’éventuelles erreurs dans l’estimation de ceux-ci pourraient causer des tensions trop élevées ou trop faibles dans les câbles. Tandis qu’une tension trop élevée pourrait causer la rupture d’un câble, une tension trop faible causerait un affaissement de certains câbles, ce qui pourrait fausser la mesure des longueurs des câbles, supposés comme étant rectilignes. De surcroît, dans les deux cas, le contrôle de l’effecteur serait perdu ou diminué, ce qui est à proscrire. La figure 3.9 présente un schéma de commande permettant de faire l’acquisition des données nécessaires à l’étalonnage, en présence de telles incertitudes. Le but premier de cette stratégie de contrôle est d’assurer la prise de mesures viables pour l’étalonnage, notamment en conservant un certain niveau de tension dans l’ensemble des câbles. La tâche secondaire du schéma de contrôle est d’atteindre les poses désirées.

3.6.1 Commande de la pose de haut niveau

La pose cartésienne estimée $\{\tilde{\mathbf{p}}, \tilde{\mathbf{Q}}\}$ résulte de la résolution du PGD, effectuée de manière numérique à l’aide des longueurs de câbles mesurées $\tilde{\boldsymbol{\rho}}$. Cette pose peut ensuite être comparée à la pose de consigne $\{\mathbf{p}, \mathbf{Q}\}$ par C_p , afin de générer un profil de vitesse qui sera fourni en tant que consigne au régulateur en vitesse, dont il est question dans la section 3.6.3.

Un profil de vitesse permettant à l’effecteur de diriger l’effecteur de la position $\tilde{\mathbf{p}}$ vers \mathbf{p} doit

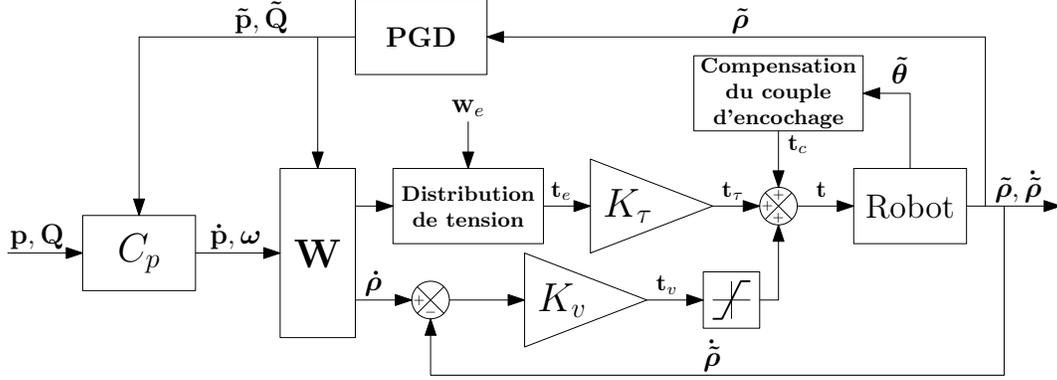


FIGURE 3.9 – Schéma de commande du robot à câbles pour étalonnage

être généré. Considérant que l’atteinte du point final est beaucoup plus importante que la trajectoire empruntée, il n’est pas nécessaire de précalculer cette trajectoire. En effet, on doit simplement adoucir la transition entre les deux positions et éviter l’oscillation autour de la consigne \mathbf{p} , de manière à obtenir une mesure viable.

Pour un robot à câbles suspendu, on préfère générer des trajectoires avec des conditions initiales et finales d’accélération nulles. En contrepartie, l’utilisation d’un robot à câbles pleinement contraint offre un meilleur contrôle de l’effecteur, ce qui permet l’utilisation de trajectoires à profil trapézoïdal de vitesse. En comparaison avec les trajectoires où le profil d’accélération est continu, ce type de trajectoires permet de diminuer le temps de déplacement entre deux positions, diminuant ainsi le temps total d’acquisition des données pour l’étalonnage.

Il faut également traiter du déplacement angulaire de l’effecteur, soit celui qui permet d’orienter la plate-forme d’une orientation mesurée $\tilde{\mathbf{Q}}$, calculée par le PGD jusqu’à la matrice d’orientation désirée \mathbf{Q} . La rotation entre ces deux matrices est exprimée comme

$$\mathbf{Q}_c = \mathbf{Q}\tilde{\mathbf{Q}}^T. \quad (3.64)$$

Étant donné que le schéma de commande utilisé nécessite en entrée un vecteur de vitesse angulaire ω , on doit utiliser la matrice de vitesse angulaire, soit,

$$\boldsymbol{\Omega} = k_p \frac{\delta \tilde{\mathbf{Q}}}{\delta t} \tilde{\mathbf{Q}}^T, \quad (3.65)$$

où δt est la période d’échantillonnage, si $\tilde{\mathbf{Q}}$ est continue et dérivable par rapport au temps. De par l’orthogonalité de cette dernière, $\boldsymbol{\Omega}$ est nécessairement antisymétrique, et liée à ω par l’équation (3.6).

A priori, $\tilde{\mathbf{Q}}$ est inconnue car elle relève d’une mesure. Par conséquent, l’équation (3.65) ne peut être utilisée telle quelle. On cherche donc à trouver $\delta \tilde{\mathbf{Q}}$ permettant d’orienter ultimement l’effecteur selon \mathbf{Q} afin d’obtenir $\boldsymbol{\Omega}$ et de moduler son amplitude en ajustant k_p . Le respect

de l'orthogonalité de $\tilde{\mathbf{Q}}$ s'écrit comme

$$\tilde{\mathbf{Q}}\tilde{\mathbf{Q}}^T = \mathbf{1}_{3 \times 3}. \quad (3.66)$$

Par dérivation, on obtient

$$\delta\tilde{\mathbf{Q}}\tilde{\mathbf{Q}}^T + \tilde{\mathbf{Q}}\delta\tilde{\mathbf{Q}}^T = \mathbf{0}_{3 \times 3}. \quad (3.67)$$

En décomposant $\tilde{\mathbf{Q}}$ en trois vecteurs colonnes

$$\tilde{\mathbf{Q}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{q}}_1 & \tilde{\mathbf{q}}_2 & \tilde{\mathbf{q}}_3 \end{bmatrix}, \quad (3.68)$$

l'équation (3.67) devient

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{q}}_1^T \\ \tilde{\mathbf{q}}_2^T \\ \tilde{\mathbf{q}}_3^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\tilde{\mathbf{q}}_1^T & \delta\tilde{\mathbf{q}}_2^T & \delta\tilde{\mathbf{q}}_3^T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta\tilde{\mathbf{q}}_1^T \\ \delta\tilde{\mathbf{q}}_2^T \\ \delta\tilde{\mathbf{q}}_3^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{q}}_1^T & \tilde{\mathbf{q}}_2^T & \tilde{\mathbf{q}}_3^T \end{bmatrix} = \mathbf{0}_{3 \times 3}. \quad (3.69)$$

Le système d'équations permettant d'obtenir une matrice antisymétrique se résume donc aux contraintes

$$\tilde{\mathbf{q}}_i^T \delta\tilde{\mathbf{q}}_i = 0, \quad i = 1, 2, 3, \quad (3.70a)$$

$$\tilde{\mathbf{q}}_i^T \delta\tilde{\mathbf{q}}_j = -\tilde{\mathbf{q}}_j^T \delta\tilde{\mathbf{q}}_i, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (3.70b)$$

qui peuvent être représentées par

$$\mathbf{C} \begin{bmatrix} \delta\tilde{\mathbf{q}}_1 \\ \delta\tilde{\mathbf{q}}_2 \\ \delta\tilde{\mathbf{q}}_3 \end{bmatrix} = \mathbf{0}_6 \quad (3.71)$$

où \mathbf{C} est la matrice de contraintes, c'est-à-dire

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{q}}_1^T & \mathbf{0}_3^T & \mathbf{0}_3^T \\ \mathbf{0}_3^T & \tilde{\mathbf{q}}_2^T & \mathbf{0}_3^T \\ \mathbf{0}_3^T & \mathbf{0}_3^T & \tilde{\mathbf{q}}_3^T \\ \tilde{\mathbf{q}}_2^T & \tilde{\mathbf{q}}_1^T & \mathbf{0}_3^T \\ \mathbf{0}_3^T & \tilde{\mathbf{q}}_3^T & \tilde{\mathbf{q}}_2^T \\ \tilde{\mathbf{q}}_3^T & \mathbf{0}_3^T & \tilde{\mathbf{q}}_1^T \end{bmatrix}. \quad (3.72)$$

La solution à norme minimale de l'équation (3.71) s'obtient en utilisant l'inverse généralisée de la matrice \mathbf{C} , définie comme

$$\mathbf{C}^I = \mathbf{C}^T (\mathbf{C}\mathbf{C}^T)^{-1}. \quad (3.73)$$

On peut donc définir la matrice qui permet de projeter les composantes d'une matrice de rotation dans le noyau de \mathbf{C}

$$\mathbf{P} = \mathbf{1}_{9 \times 9} - \mathbf{C}^I \mathbf{C}. \quad (3.74)$$

Il est possible de calculer la matrice \mathbf{P} numériquement, ce qui s'avère être plus stable que lorsque l'équation (3.74) est appliquée directement. Pour ce faire, on effectue une factorisation QR telle que

$$\mathbf{C}^T = \mathbf{Q}\mathbf{R} = [\mathbf{Q}_1 \mathbf{Q}_2] \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 \\ \mathbf{0}_{3 \times 6} \end{bmatrix} = \mathbf{Q}_1 \mathbf{R}_1, \quad (3.75)$$

où

$$\mathbf{Q}_1 \in \mathbb{R}^{9 \times 6}, \quad (3.76)$$

$$\mathbf{R}_1 \in \mathbb{R}^{6 \times 6}. \quad (3.77)$$

En substituant \mathbf{C} et \mathbf{C}^I dans (3.74), puis en simplifiant, on obtient

$$\mathbf{P} = \mathbf{1}_{9 \times 9} - \mathbf{Q}_1 \mathbf{Q}_1^T. \quad (3.78)$$

Par la suite, cette projection peut être utilisée afin d'obtenir les vecteurs constituant la matrice $\delta\tilde{\mathbf{Q}}$ à partir de ceux de la matrice représentant la rotation devant être accomplie \mathbf{Q}_c , en écrivant

$$\begin{bmatrix} \delta\tilde{\mathbf{q}}_1 \\ \delta\tilde{\mathbf{q}}_2 \\ \delta\tilde{\mathbf{q}}_3 \end{bmatrix} = \mathbf{P} \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{c1} \\ \mathbf{q}_{c2} \\ \mathbf{q}_{c3} \end{bmatrix} \quad (3.79)$$

où $[\mathbf{q}_{c1} \ \mathbf{q}_{c2} \ \mathbf{q}_{c3}] = \mathbf{Q}_c$. Finalement, la matrice $\mathbf{\Omega}$ peut être calculée en substituant la matrice $\delta\tilde{\mathbf{Q}}$ ainsi obtenue dans l'équation (3.65) et en ajustant k_p expérimentalement.

3.6.2 Distribution de tension

Afin d'assurer l'uniformité du mouvement dans l'ensemble de l'espace de travail, une distribution de tensions dans les différents câbles assurant l'équilibre statique à l'effecteur est primordiale. Parce que l'espace solution de la répartition des tensions d'un robot à 6 degrés de liberté formé de 8 câbles est de dimension deux, la stratégie appliquée à la section 2.4.2 ne peut être utilisée. La méthode de résolution choisie pour résoudre ce problème est la programmation quadratique, car celle-ci est relativement bien connue, assez performante et elle s'applique dans le cas du mécanisme à l'étude. On cherche à obtenir la distribution de tension \mathbf{t} à norme minimale, ce qui se traduit par le problème d'optimisation

$$\begin{aligned} & \text{minimiser } \frac{1}{2} \|\mathbf{t}\|^2 \\ & \text{sujet à } \mathbf{t}_{\min} \leq \mathbf{t} \leq \mathbf{t}_{\max}, \\ & \mathbf{W}^T \mathbf{t} + \mathbf{w}_e = \mathbf{0}. \end{aligned} \quad (3.80)$$

Afin d'être en mesure d'exécuter cette opération en temps réel, l'implantation de celle-ci est réalisée en *C*, en utilisant *CVXGEN* [25], un générateur de code pour optimisation convexe. Afin de calculer la distribution de couples requis aux moteurs, l'ensemble de tensions ainsi obtenu est ensuite multiplié par un gain K_t , provenant de la géométrie des enrouleurs. Bien qu'il

serait possible d’asservir la tension dans les câbles, l’ajout des couples calculés aux moteurs en boucle ouverte semble produire des résultats assez satisfaisants pour l’application désirée.

3.6.3 Commande en vitesse

Les profils de vitesse cartésienne et angulaire désirés $(\dot{\mathbf{p}}, \boldsymbol{\omega})$ sont transformés en vitesses articulaires en utilisant l’équation 3.8. Un régulateur PID est ensuite utilisé afin d’asservir la vitesse aux différents enrouleurs en produisant le vecteur de couples \mathbf{t}_v . Étant donné que le mécanisme est réversible, c’est-à-dire qu’une tension suffisante permet de dérouler le câble, on choisit de saturer le couple pouvant être produit par le régulateur PID afin d’éviter de dérouler excessivement les câbles, ce qui provoquerait des mesures $\Delta\rho_i$ erronées.

3.7 Validation expérimentale

3.7.1 Montage expérimental

Dans le but de vérifier la performance de la méthode proposée, une validation est effectuée sur un robot à câbles existant. Ce dernier est constitué de huit enrouleurs, qui sont à leur tour montés sur autant d’axes linéaires motorisés, pouvant servir à la reconfiguration de l’ensemble. La structure qui supporte le tout mesure approximativement 5 m \times 4 m \times 3 m et les moteurs sont déplacés le plus près possible des coins de celle-ci.

L’effecteur est un prisme rectangulaire de 200 mm \times 200 mm \times 600 mm. Comme il est possible de voir sur la figure 3.10, les huit câbles y sont attachés de manière à permettre une certaine amplitude de mouvement en rotation.

La figure 3.11 présente le système embarqué de vision, installé à l’intérieur de l’effecteur. Une caméra *Basler ace acA1300-gm* est orientée vers le sol, ce qui lui permet de photographier la carte de marqueurs qui s’y trouve. Cette caméra est connectée à un nano-ordinateur *Raspberry Pi 3*, ainsi qu’à une batterie, ce qui permet de commander l’acquisition d’images entièrement à distance via une connexion Wi-Fi. On peut voir à la figure 3.12 un schéma de l’architecture du système et l’interfaçage des différentes composantes du montage.

3.7.2 Validation des hypothèses

En ce qui a trait au modèle du robot, deux principales hypothèses concernant les câbles sont faites dans le but de diminuer la complexité de ce dernier. Malgré le fait que celles-ci soient largement rencontrées dans la littérature, on cherche, dans le cadre du présent montage expérimental, à quantifier l’erreur qui en découlera. Dans cette sous-section, la validité de celles-ci sera donc vérifiée. Étant donné que chaque mesure est effectuée de manière statique, les effets dynamiques agissant sur les câbles n’ont pas besoin d’être considérés.

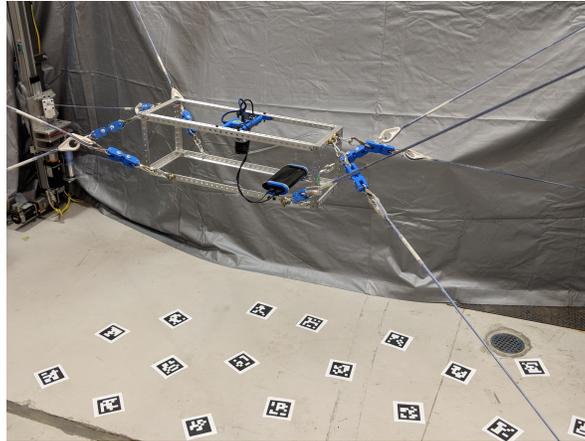


FIGURE 3.10 – Disposition des câbles attachés à l'effecteur

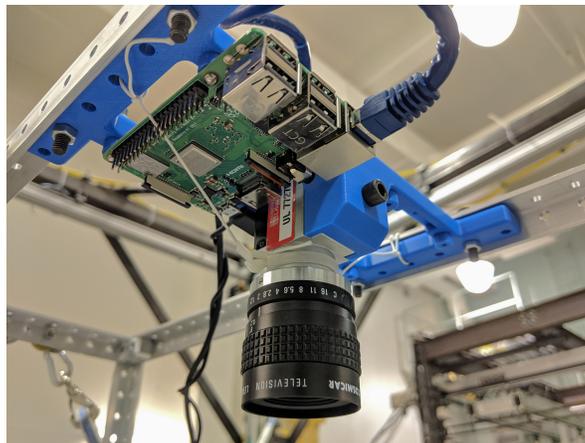


FIGURE 3.11 – Système embarqué de vision

La première hypothèse est que les câbles sont en tout temps rectilignes. Cette hypothèse dépend donc de la masse du câble, de sa longueur ainsi que de la tension dans celui-ci. Parce que la masse du câble est une constante et que dans un contexte pratique sa longueur peut être bornée, on cherche à vérifier s'il est possible de trouver une tension minimale de valeur raisonnable qui permet de poser cette hypothèse. Les câbles ont un diamètre de 4.8 mm et ils sont faits de fibre *Dyneema SK75*. Les propriétés nécessaires à cette analyse sont listées dans la fiche technique disponible à l'annexe A.

On dénomme chaînette la courbe qui représente la forme d'un câble flexible suspendu, attaché aux extrémités et ne supportant que son propre poids. Le profil de celle-ci est dicté par l'équation

$$y(x) = \alpha \cosh\left(\frac{x}{\alpha}\right) \quad (3.81)$$

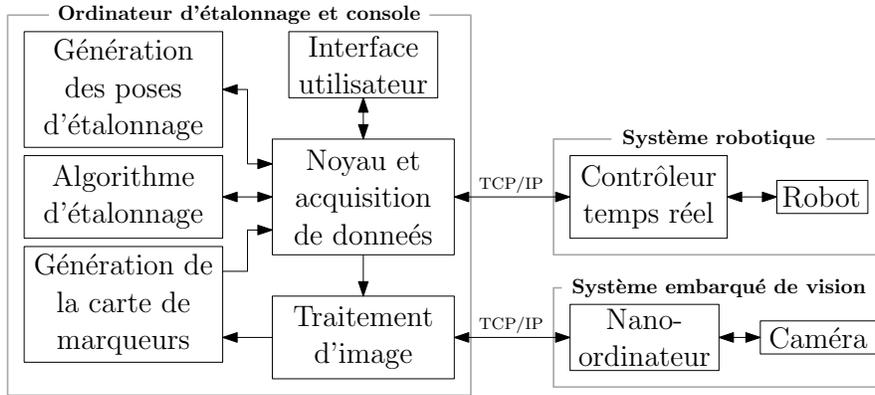


FIGURE 3.12 – Schéma de l'architecture matérielle et logicielle utilisée pour l'étalonnage

dont la forme est définie par le paramètre

$$\alpha = \frac{\tau_x}{\beta g} \quad (3.82)$$

où τ_x est la composante horizontale de la tension, β la masse linéaire du câble considéré et g est l'accélération gravitationnelle. Une chaînette générale est montrée à la figure 3.13. Celle-ci est construite entre les points p_1 et p_2 .

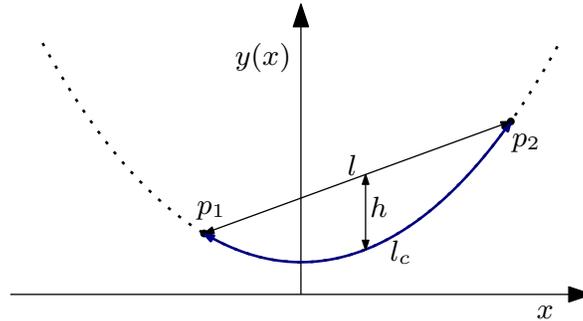


FIGURE 3.13 – Chaînette

Pour les câbles utilisés et selon la tension, on cherche à savoir si la différence entre la longueur idéalisée d'un segment de droite l et la longueur réelle du câble l_c est négligeable. Étant donné qu'il est difficile de mesurer l_c , mais que cette valeur peut être aisément calculée, on choisit d'étudier le cas où les points p_1 et p_2 sont à la même hauteur. Cette simplification permet de comparer l'affaissement maximal \tilde{h} mesuré et celui donné par le modèle, afin de s'assurer de la validité de la longueur l_c obtenue à l'aide de celui-ci.

Comme suggéré par Bouchard [7], on débute en faisant l'hypothèse que l'affaissement du câble est négligeable, ce qui permet de considérer une tension constante dans le câble telle que $\tau_x = \tau$, sur l'ensemble de la longueur du câble. Parce que les points d'attache sont à la

même hauteur $y(x)$, l'affaissement maximal est donné par

$$h = y\left(\frac{l}{2}\right) - y(0) = \alpha \left[\cosh\left(\frac{l}{2\alpha}\right) - 1 \right]. \quad (3.83)$$

On s'intéresse également à la longueur réelle d'un tel câble, soit

$$l_c = 2 \operatorname{arcsinh}\left(\frac{l}{2a}\right). \quad (3.84)$$

Le but de cet exercice est de comparer l'affaissement maximal calculé h et l'affaissement maximal mesuré \tilde{h} d'un câble horizontal sous différentes tensions. Ce faisant, il est possible de vérifier la validité du modèle et celle des paramètres qui découlent des propriétés du câble.

On désire également étudier l'effet de cet affaissement sur la longueur totale du câble afin de savoir si l'approximation de celui-ci par une ligne droite est réaliste. Pour des raisons techniques dues aux dimensions de la structure, le test est effectué sur une longueur de câble $l = 4925$ mm, supérieure à la longueur maximale pouvant être atteinte par le mécanisme assemblé. Le tableau 3.2 contient les valeurs obtenues pour un poids linéaire mesuré de 0.122 N/m, ce qui est légèrement différent des spécifications techniques.

TABLE 3.2 – Valeurs d'affaissement et effet sur la longueur totale du câble pour différentes tensions

τ	\tilde{h}	h	$ l_c - l $	$\frac{ l_c - l }{l}$
(N)	(mm)	(mm)	(mm)	(%)
4.6	80	80.2	3.47	0.071
10.4	37	35.5	0.68	0.014
14.5	26	25.4	0.35	0.007
18.6	21	19.8	0.21	0.004

La première conclusion pouvant être tirée de ce tableau est que le modèle d'une chaînette représente très bien l'affaissement du câble \tilde{h} mesuré expérimentalement, même si l'approximation $\tau = \tau_x$ a été faite, ce qui assure la validité des valeurs calculées de différence de longueur $l_c - l$. Deuxièmement, on remarque que dans le cas du mécanisme et des câbles considérés, cette différence de longueurs pourra aisément être négligée. Bien que déjà très faible à basse tension, l'erreur de longueur entre un câble réel et un câble idéalisé devient rapidement négligeable lorsque la tension est augmentée. Afin de s'assurer que la tension réelle soit satisfaisante, la tension minimale désirée aux moteurs est fixée à $\tau = 20$ N, ce qui résulte en une erreur de longueur qui ne devrait pas dépasser 0.2 mm, soit 0.004 % de sa longueur totale.

La deuxième hypothèse est que les câbles sont parfaitement inélastiques. Étant donné que les mesures sont effectuées de manière statique, on cherche à savoir si, dans l'intervalle de tensions autorisées dans les câbles, l'allongement de ceux-ci peut être négligé.

Selon la fiche technique du câble, le taux d'élongation élastique varie de manière non linéaire en fonction de la force appliquée. En outre, plus la tension dans le câble est grande, moins le ratio de l'allongement du câble sur la tension est grand. Étant donné que la force maximale appliquée sur le câble sera largement inférieure à 10% de la force de rupture, utiliser les valeurs qui sont spécifiées sur la fiche technique pourrait causer une sous-estimation importante de l'allongement du câble. Par conséquent, on choisit de prendre des mesures sur une plage de tensions plus faibles, représentatives de l'amplitude des forces produites par le robot à câbles. Cette plage s'avère être moins de 1% de la force de rupture du câble.

Un enrouleur est donc accroché en hauteur et un câble d'une longueur de 2200 mm est déroulé. La variation de longueur de celui-ci est mesurée à l'aide d'un trusquin de hauteur. Les mesures obtenues et la tendance linéaire de celles-ci sont illustrées à la figure 3.14, pour une force allant jusqu'à environ 130 N. On remarque que la droite ne passe pas par l'origine, car il est nécessaire d'y suspendre initialement une petite masse afin d'obtenir une première mesure valide.

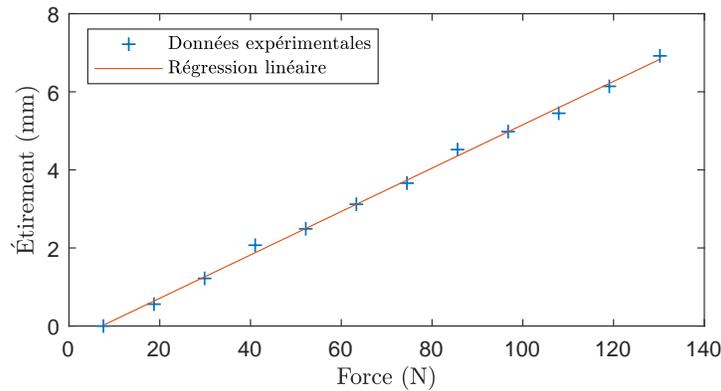


FIGURE 3.14 – Résultats des tests d'élasticité du câble en *Dyneema*

Dans cet intervalle de tensions, le taux d'allongement du câble mesuré est de 0.0025 %/N. Conséquemment, si la tension dans les câbles demeure en tout temps entre 25 et 125 N, l'incertitude sur la longueur du câble due à l'élasticité est de 0.25%. Si l'on considère encore une fois un câble ayant une longueur maximale de $l = 4925$ mm, l'allongement maximal est donc de 12.3 mm. En pratique, on observe que pour les poses atteignables, la longueur de câble dépasse rarement 3500 mm, ce qui fait que l'allongement de chaque câble devrait généralement être inférieur à un centimètre.

Il est tout de même possible de noter que dans les conditions présentes, l'affaissement des câbles cause une erreur d'un à deux ordres de grandeur inférieure à celle causée par l'allongement de ceux-ci. Parce que dans les deux cas l'erreur découlant de ces hypothèses est bien en deçà de 1% de la longueur du câble, on considère que ces dernières sont valides. Conséquemment, l'étalonnage du robot peut être réalisé.

3.7.3 Essais et résultats

Pour débiter, trois différentes listes de poses d'étalonnage sont générées en utilisant $\mu = 0.8$ et une quantité de $n = 100$ échantillons. Le choix trivial d'un référentiel \mathcal{O}_w confondu avec \mathcal{O}_m est fait, ce qui se traduit par des valeurs $\mathbf{p}_{mw} = \mathbf{0}$ et $\mathbf{Q}_{mw} = \mathbf{1}_{3 \times 3}$.

L'acquisition des données débute à la pose $X_0 = \{\mathbf{p}_0, \mathbf{Q}_0\}$. La plate-forme se déplace ensuite jusqu'à la pose X_1 . Avant d'atteindre la pose X_2 , le robot retourne à la pose initiale X_0 , qui agit donc également à titre de pose intermédiaire. La procédure est répétée jusqu'à ce que $X_j = X_n$, soit jusqu'à la dernière pose d'étalonnage. À chaque échantillon, on enregistre les longueurs relatives des câbles $\Delta\rho_i$ ainsi que la photo prise par la caméra. Tandis que les mesures des câbles sont fournies directement à l'algorithme d'étalonnage, des étapes additionnelles doivent être accomplies afin d'obtenir la pose de l'effecteur.

En premier lieu, les marqueurs sont détectés dans l'environnement du robot. La figure 3.15 présente la détection des marqueurs effectuée pour un échantillon de deux images. Le motif binaire situé à l'intérieur du carré est utilisé afin d'identifier celui-ci de manière unique. À cette étape, il est possible d'analyser les différentes photos et de s'assurer que les marqueurs détectés dans l'ensemble de celles-ci peuvent tous être interreliés. On cherche ici à s'assurer qu'assez de photos ont été prises afin d'éviter de fournir à l'algorithme des données correspondant aux positions de plusieurs îlots de marqueurs indépendants. Ainsi, toutes les poses pourront être exprimées relativement à \mathcal{O}_m .

Cet identifiant unique peut également être utilisé afin d'obtenir un indice sur la couverture de l'espace de travail par les poses suggérées. En effet, en considérant que la quantité de marqueurs disposés dans l'environnement de travail du robot est connue, il est possible de calculer la proportion de cibles détectées. Si celle-ci est jugée insuffisante, on devra donc soit ajouter des poses d'étalonnage, augmenter le facteur μ ou changer la disposition des marqueurs afin qu'ils puissent être observés par la caméra.

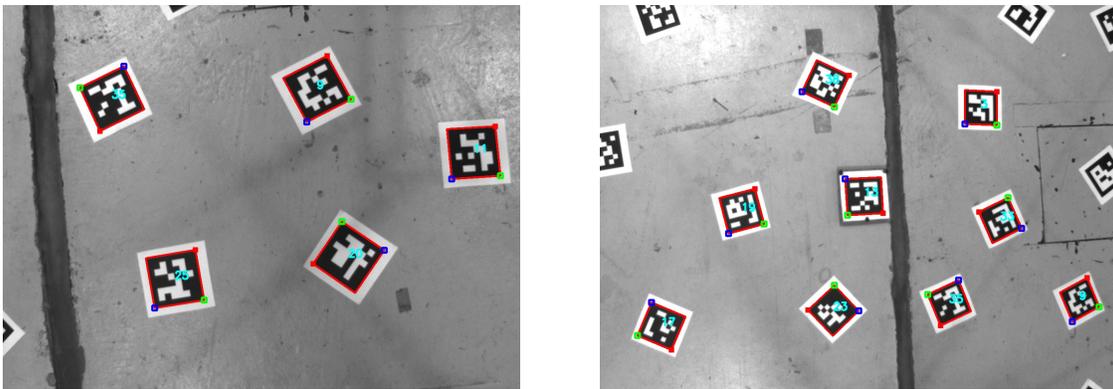


FIGURE 3.15 – Détection des marqueurs dans deux images d'étalonnage

L'ensemble de photos est ensuite utilisé afin de déterminer à la fois les poses relatives des marqueurs et celles de la caméra en minimisant l'erreur de reprojection. La figure 3.16 montre les poses de caméra reconstituées ainsi que la géométrie résultante de la carte de marqueurs ainsi estimée. En suivant la démarche décrite à la section 3.3.1, la pose de l'effecteur peut ensuite être déterminée afin d'effectuer l'étalonnage. Les paramètres géométriques identifiés par l'étalonnage sont dès lors mis à jour dans le contrôleur temps réel. À partir de ce moment, les mouvements effectués par le robot sont donc entièrement gouvernés par les résultats de l'étalonnage. Par la suite, la pose de l'effecteur est modifiée pour atteindre successivement dix poses de vérification arbitrairement choisies au préalable, montrées à la figure 3.17. Pour chacune d'entre elles, une mesure de la pose est effectuée à l'aide d'un instrument de métrologie externe. En l'occurrence, un balayeur laser *Faro X130* est utilisé. L'incertitude de mesure de cet appareil est de ± 2 mm.

À des fins de comparaison, la procédure est répétée une deuxième fois, en excluant les informations de la caméra et en se basant uniquement sur les longueurs de câbles mesurées. Ce deuxième étalonnage est basé sur une méthode expliquée dans [13, 20]. On note au passage que cette méthode ne peut être appliquée que sur des robots à câbles pleinement contraints, car comme expliqué plus tôt, elle nécessite une redondance de mesure, ici fournie par un nombre de câbles plus grand que le nombre de degrés de liberté.

En réalisant un étalonnage basé uniquement sur les mesures des encodeurs aux enrouleurs, il est impossible de contraindre spatialement la reconstruction de la géométrie du mécanisme.

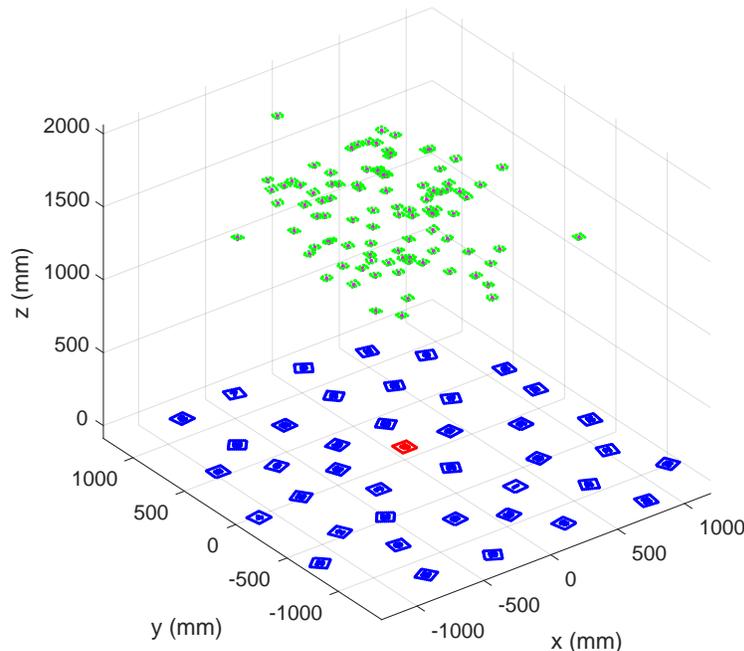


FIGURE 3.16 – Carte de marqueurs reconstituée et poses de caméra correspondantes

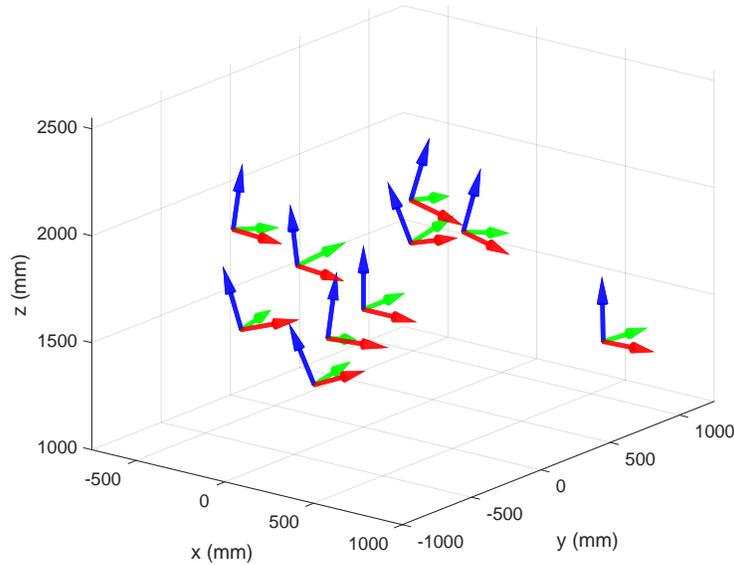


FIGURE 3.17 – Poses de vérification de l'étalonnage

Pour résoudre ce problème et afin que la comparaison soit viable avec la première méthode, six composantes des vecteurs \mathbf{a}_i sont prescrites selon les valeurs obtenues précédemment. La pose de l'effecteur obtenue à l'aide de la méthode précédente est également utilisée comme estimé initial de la solution afin d'éviter autant que possible que l'algorithme converge dans un minimum local différent. Une fois l'étalonnage effectué, des mesures des mêmes dix poses de vérification sont faites. À l'annexe D, les tableaux D.1, D.2 et D.3 présentent les résultats de l'étalonnage obtenus respectivement pour les listes de poses A, B et C.

Le tableau 3.3 fait état de la précision mesurée du mécanisme après les trois essais. À l'aide de l'appareil de mesure externe, la pose est mesurée de manière relative à la carte de marqueurs utilisée pour l'étalonnage (P.r. marqueur). Afin de s'assurer que la comparaison puisse être faite entre les deux méthodes et d'éviter qu'un éventuel biais de la caméra n'affecte la précision sur l'ensemble de l'espace de travail, la pose est également exprimée de manière relative à la première pose mesurée (P.r. 1^{ère} pose).

On peut comparer la relation entre les trois sources de mesures utilisées à un triangle, tel qu'illustré à la figure 3.18. Tandis que les sources des mesures forment les coins du triangle, les arêtes de ce dernier représentent les mesures relatives pouvant être effectuées. Dans le cas présent, le balayeur laser est considéré comme la référence absolue. Les résultats présentés au tableau 3.3 sont issus de la résolution du PGD, c'est-à-dire des mesures qui proviennent du robot, et de la référence absolue. Bien que ce lien, représenté comme une ligne pleine, soit le sujet de l'étude, celui-ci dépend des deux liens représentés avec des lignes pointillées. L'étude de celles-ci est donc nécessaire afin de comprendre les sources d'erreurs qui se répercutent sur la performance de la méthode d'étalonnage.

TABLE 3.3 – Résultats de l'étalonnage

Données	r (mm)	Erreur de position (mm)				Erreur d'orientation (deg)				
		P.r. marqueur		P.r. 1 ^{ère} pose		P.r. marqueur		P.r. 1 ^{ère} pose		
		Moy.	σ	Moy.	σ	Moy.	σ	Moy.	σ	
Avec caméra	A	12.9	60.9	8.1	25.8	7.8	2.1	0.8	1.3	0.9
	B	14.1	64.5	14.0	27.4	8.2	2.3	0.5	1.3	0.7
	C	15.6	59.5	17.2	30.5	11.1	2.9	0.6	1.6	1.2
Sans caméra [13, 20]	A	3.8	278.3	22.0	28.6	11.2	4.6	1.8	2.9	2.0
	B	4.1	268.2	24.0	28.7	16.0	3.2	1.2	2.7	1.0
	C	4.0	984.5	25.6	110.1	32.1	7.6	4.4	5.7	1.1

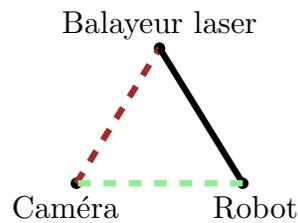


FIGURE 3.18 – Représentation des liens entre les différentes sources de mesures

Pour tester la précision de ces deux mesures, une photo de la carte de marqueurs est prise lors de chaque pose de validation, puis comparée à la géométrie de la carte de marqueurs établie précédemment. La pose reconstruite est ensuite comparée à la pose réelle, mesurée par le balayeur laser. Parce que la pose de la caméra ne peut être mesurée directement, ce sont les poses relatives de l'effecteur qui sont comparées à ces mesures. Le tableau 3.4 présente les incohérences entre la pose reconstruite de la caméra et celle obtenue par le balayeur laser. Le tableau 3.5 fait par la suite état des incohérences observées entre les mesures de la caméra et celles obtenues par la résolution du PGD du robot. Afin de mieux interpréter ces résultats, il est cependant nécessaire d'établir en premier lieu la précision de la reconstruction de la carte de marqueurs.

TABLE 3.4 – Erreurs de pose de la caméra, relativement à la référence

Données	Erreur de position (mm)		Erreur d'orientation (deg)	
	Moy.	σ	Moy.	σ
A	59.2	9.1	1.8	0.4
B	61.5	12.4	1.9	0.4
C	30.8	9.6	1.5	0.4

TABLE 3.5 – Incohérences de la pose caméra, relativement à la solution du PGD

Données	Erreur de position (mm)		Erreur d'orientation (deg)	
	Moy.	σ	Moy.	σ
A	8.4	4.2	1.3	0.4
B	8.2	3.5	1.2	0.5
C	32.2	10.3	2.3	0.5

3.8 Analyse de la précision de la reconstruction de la carte de marqueurs

En superposant les cartes de marqueurs obtenues pour les trois jeux de données A, B et C, à la figure 3.19, on remarque la présence d'erreurs relatives entre les différentes poses reconstituées pour un même marqueur. Étant donné que la géométrie de la carte est établie partiellement à partir de chaque photo, on remarque également que l'erreur semble s'accumuler plus les marqueurs sont éloignés du marqueur de référence, ici visible en rouge. Bien qu'indésirable, cet effet est intrinsèque à la méthode de reconstitution utilisée.

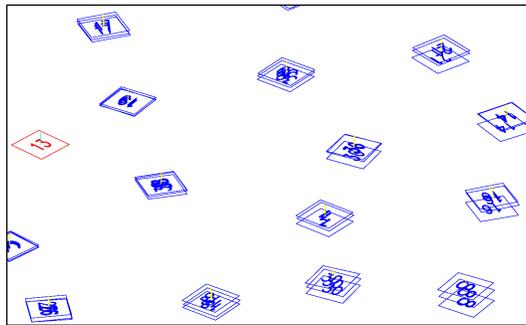


FIGURE 3.19 – Vue rapprochée d'une partie de la superposition des trois cartes de marqueurs reconstruites

La figure 3.20 présente la norme des erreurs, mesurées relativement entre les différentes cartes établies, pour un même marqueur. Celles-ci sont exprimées par rapport à la distance entre l'origine du marqueur mesuré et celle du marqueur servant de référence à l'entièreté de la carte. On observe que l'erreur maximale sur la reconstruction de la position du marqueur dépend de sa position par rapport au marqueur de référence.

Parce que la position de l'origine d'un marqueur est calculée à partir des positions de ses coins, la figure 3.21 présente plutôt les erreurs entre les positions des coins des mêmes marqueurs. Cependant, cette fois-ci, l'erreur est décomposée selon les axes du système de coordonnées du marqueur de référence. On observe que la variabilité est beaucoup plus importante selon l'axe Z , normal au plan du marqueur. En effet, en valeur absolue, tandis que l'erreur maximale selon les axes X et Y est de 6.9 mm, celle selon l'axe Z est de 63.7 mm. Il est donc possible

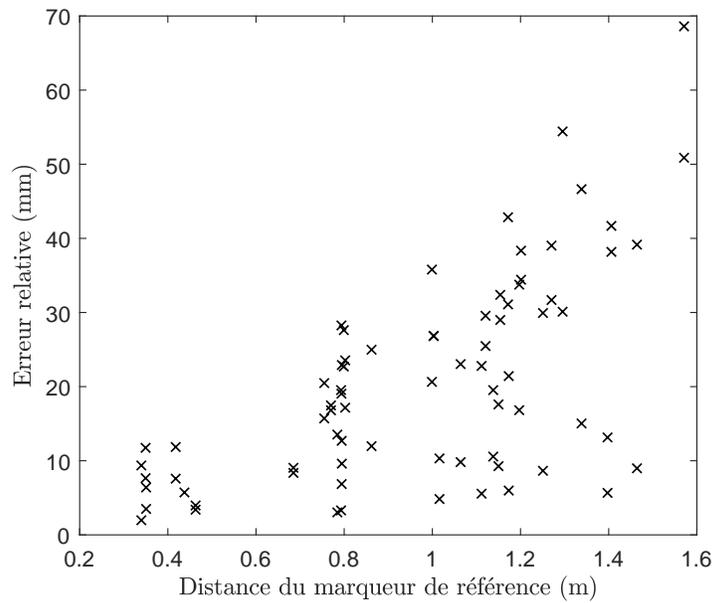


FIGURE 3.20 – Erreurs de position relatives entre les origines des mêmes marqueurs en fonction de la distance de ceux-ci par rapport à l’origine du marqueur de référence

d’affirmer que la précision de la reconstruction selon l’axe Z limite grandement la précision globale de la reconstruction de la carte de marqueurs.

Il est important de souligner que parce que l’amplitude des variations d’orientation à l’effecteur demeure limitée, l’angle minimal entre le vecteur normal du plan image et celui de la carte de marqueurs est généralement faible. Ainsi, le fait que la carte des marqueurs soit reconstituée de manière moins précise en Z est possiblement dû à une sensibilité plus faible de la caméra dans cette direction. En utilisant une seule caméra, la distance entre celle-ci et le marqueur est estimée en comparant la taille du marqueur dans le plan image à sa taille réelle, connue. Par ailleurs, plus un marqueur est éloigné de la caméra, plus une variation de sa distance par rapport à la caméra se traduit par une variation faible de sa taille dans le plan image. La reconstruction de la position de la caméra selon l’axe Z est donc de moins en moins sensible lorsque le marqueur est éloigné de la caméra.

Conséquemment, deux solutions peuvent être envisagées afin d’améliorer la précision de la reconstruction. En premier lieu, il serait possible d’augmenter l’angle entre le plan image de la caméra et le plan normal des marqueurs. Concrètement, parce qu’il est difficile de commander des variations d’orientation d’amplitude plus importantes à l’effecteur, les marqueurs pourraient être disposés de manière à ce qu’ils ne soient pas quasi-coplanaires, tout en restant détectables par la caméra. En deuxième lieu, la taille du marqueur dans le plan image pourrait être augmentée. S’il est impossible de rapprocher physiquement la caméra des marqueurs, des marqueurs de plus grande taille pourraient être utilisés.

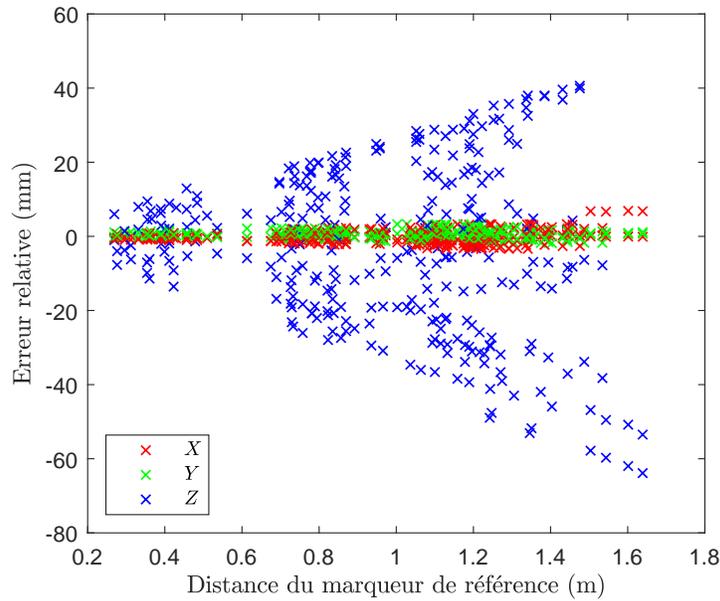


FIGURE 3.21 – Erreurs entre les positions établies des coins des marqueurs en fonction de leur distance du marqueur de référence

3.9 Discussion

Les résultats du tableau 3.3 semblent montrer que la méthode d'étalonnage proposée améliore la précision relativement à la première pose. Cependant, l'analyse de la variance à un facteur montre que, pour une valeur $p = 95\%$, cette amélioration n'est significative que pour les données correspondant à l'essai C. En contrepartie, pour le même seuil, l'amélioration de la précision en orientation est significative pour l'ensemble des données, soit pour les trois essais effectués.

Les figures 3.22 et 3.23 présentent les mêmes résultats, toujours de manière relative à la première pose, respectivement en position et en orientation. Les figures 3.24 et 3.25 présentent à leur tour une représentation combinée des tableaux 3.4 et 3.5. On remarque ainsi que l'erreur entre la position réelle de l'effecteur et celle reconstruite par la caméra est d'environ 60 mm, ce qui correspond approximativement à l'erreur maximale faite sur la reconstruction de la position des marqueurs (figure 3.20). Toutefois, l'erreur entre la position reconstruite par la caméra et celle obtenue par résolution du PGD est largement inférieure, c'est-à-dire typiquement moins de 10 mm. L'étalonnage semble donc bien représenter la position reconstruite par la caméra, qui s'avère cependant inexacte. Ce comportement pourrait donc expliquer la précision après étalonnage, qui est en moyenne de ± 28 mm.

Pour ce qui est de l'orientation, l'erreur de reconstruction de la caméra est très similaire à celle obtenue suite à la résolution du PGD. Dans tous les cas, les erreurs oscillent habituelle-

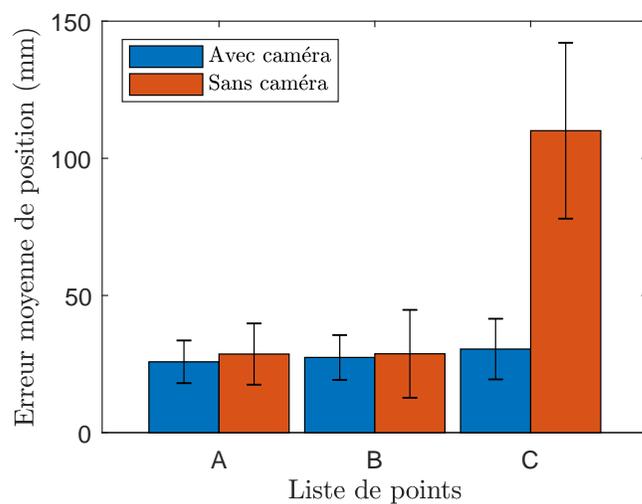


FIGURE 3.22 – Erreurs moyennes en position après étalonnage

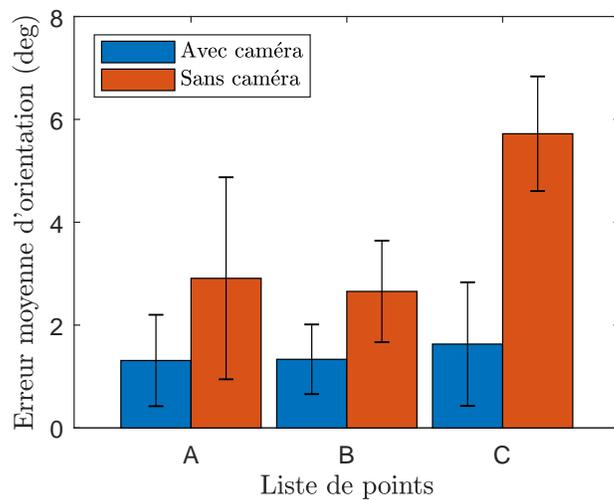


FIGURE 3.23 – Erreurs moyennes en orientation après étalonnage

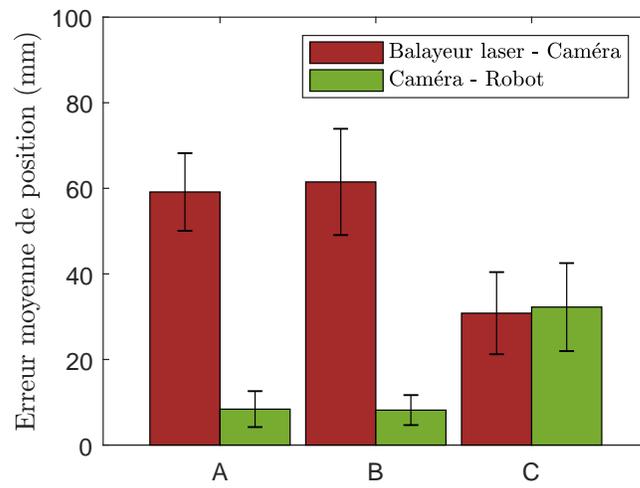


FIGURE 3.24 – Incohérences moyennes en position entre les instruments de mesure

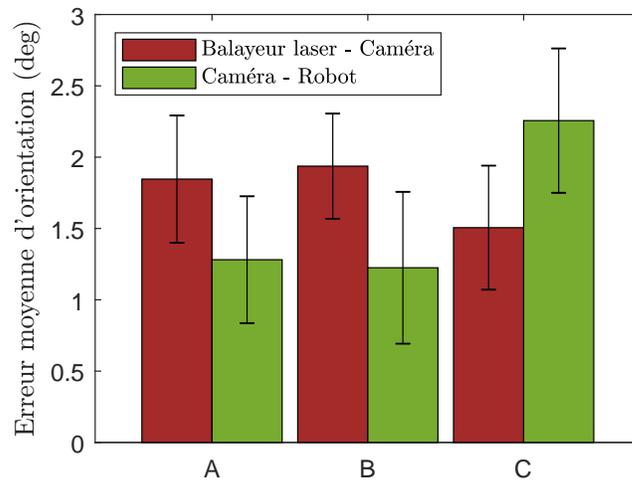


FIGURE 3.25 – Incohérences moyennes en orientation entre les instruments de mesure

ment entre environ 1.3 et 2.3 degrés, ce qui semble également correspondre à la précision en orientation mesurée après l'étalonnage.

En observant les résultats de l'étalonnage, disponibles à l'annexe D, on remarque que les vecteurs \mathbf{a}_i , qui sont en réalité demeurés constants, varient énormément d'un étalonnage à l'autre. Pour comparer avec ce qui a été fait jusqu'à présent, on fait l'hypothèse que les valeurs réelles de ces vecteurs sont la moyenne des valeurs reconstituées par les trois étalonnages. L'erreur quadratique moyenne ainsi calculée sur \mathbf{a} est de 316 mm, ce qui est 24 fois plus élevé que la plus grande erreur quadratique moyenne au tableau 3.1. On en déduit donc que le bruit sur les mesures est considérablement plus grand que les valeurs considérées aux sections 3.5.3 et 3.5.4. Par ailleurs, l'ordre de grandeur des erreurs de mesure observées au cours de l'étalonnage semble confirmer que le modèle d'erreur développé précédemment ne peut pas être appliqué de manière valide pour des erreurs d'une telle envergure. Il est important de noter qu'on ne peut pas appliquer le même raisonnement pour les valeurs de ρ_0 estimées par l'étalonnage car la pose du mécanisme n'était pas forcément la même lors de la mise sous tension du robot pour les trois essais.

3.10 Conclusion

Ce chapitre a donc montré que le problème de l'étalonnage d'un robot parallèle à câbles peut être résolu à partir des mesures d'une caméra embarquée. De plus, une méthode permettant de générer automatiquement une liste de poses d'étalonnage atteignables a été développée. Puis, en simulation, il a été démontré que l'utilisation d'un modèle peut bien représenter l'erreur commise sur les paramètres d'étalonnage, à l'intérieur d'une plage définie. Après présentation du schéma de commande, une validation expérimentale a été effectuée, permettant ainsi de conclure sur les liens entre les différentes erreurs de mesure et leur répercussion sur la précision de l'étalonnage.

Selon les résultats des trois étalonnages effectués, bien que l'ajout de la caméra augmente la précision en orientation, il n'est pas possible de dire la même chose pour la précision en position. Les plus grandes erreurs moyennes mesurées sont donc de ± 31 mm en position et $\pm 1.6^\circ$ en orientation. On déduit de l'analyse des sources d'erreur que la précision de la reconstruction de la pose de la caméra limite la précision de la méthode. Les résultats de l'analyse de la précision de la reconstruction de la carte des marqueurs démontrent par ailleurs qu'une erreur d'un ordre de grandeur similaire à la précision en position de l'étalonnage est commise sur la position des marqueurs étant les plus éloignés du marqueur de référence. On fait également le constat que la composante de cette erreur dans la direction normale au plan du marqueur est de loin la plus élevée. Logiquement, si l'erreur commise sur la composante en Z de cette erreur pouvait être réduite, une amélioration significative de la précision de l'étalonnage pourrait être observée.

Conclusion

L'objectif de ce manuscrit était de développer et de vérifier des techniques visant à permettre la mise en route et l'opération d'un robot à câbles. Une approche expérimentale a été utilisée de manière à pouvoir reproduire les conditions pouvant entourer l'installation et le fonctionnement de tels robots dans un milieu industriel et de vérifier la robustesse de celles-ci.

Le premier chapitre a décrit une méthode permettant d'identifier le couple d'encoche des moteurs en fonction de leur positions angulaires. Un schéma de commande permettant de compenser une grande partie de ce couple a également été présenté. L'intégration de ce schéma à la stratégie de commande a permis de grandement réduire les variations de position brusques à basse vitesse. Ainsi, pour le moteur présenté en guise d'exemple, l'erreur maximale en vitesse a été divisée par cinq. Par extension, l'erreur quadratique moyenne en position a été divisée par plus de trois, tout en linéarisant l'effort devant être fourni par le régulateur PID. Conséquemment, l'amplitude de l'effort de ce dernier a été réduite d'un facteur six. L'application de cette méthode est donc étendue aux autres moteurs et utilisée pour les étapes subséquentes.

Au cours du deuxième chapitre, le schéma de commande utilisé pour la téléopération d'un robot à câbles plan a été présenté. Par la suite, les tests à effectuer et variables d'intérêt ont été déterminés. Les essais de téléopération ont montré que la précision moyenne pour la tâche d'assemblage simulée est de ± 5.3 mm, pour 99.7% des mesures. Les résultats montrent également que la latence aller-retour n'influence pas la précision, mais fait grandement augmenter le temps nécessaire pour accomplir la tâche. Évidemment, le système tend à être plus précis si des mouvements de grande amplitude sur le robot maître provoquent des mouvements d'amplitude plus faible sur le robot esclave. Les résultats montrent également que pour la localisation de la grille n'influence pas la précision. De plus, la précision mesurée en téléopération est comparable à celle qui est mesurée lorsque la tâche est accomplie manuellement.

Le troisième chapitre a présenté et validé expérimentalement une méthode d'étalonnage à l'aide d'une caméra embarquée. Le modèle d'erreur présenté au cours de ce chapitre fut également comparé avec des résultats d'étalonnage établis par simulation afin de pouvoir déterminer la plage dans laquelle les résultats du modèle sont valides. Une méthode permettant de générer une liste de poses d'étalonnages qui peuvent être atteintes par le robot est présentée et celle-ci est également utilisée lors de la validation expérimentale. Le schéma de commande qui est

proposé pour l'étalonnage permet d'atteindre ces poses même si seule une estimation de la géométrie du robot est connue. L'analyse effectuée sur les hypothèses permet de conclure que pour les câbles utilisés et dans l'intervalle de tensions spécifié, l'allongement des câbles dû à leur élasticité est de deux ordres de grandeur supérieur à l'erreur résultant de l'affaissement de ces derniers. Dans tous les cas, les erreurs engendrées par ces hypothèses demeurent relativement faibles lorsque la longueur totale du câble est prise en compte.

Des trois essais expérimentaux effectués, les erreurs moyennes les plus élevées sont de ± 31 mm en position et de $\pm 1.6^\circ$ en orientation. Par comparaison aux essais effectués sans caméra, on déduit que le fait d'utiliser une caméra pour l'étalonnage permet d'améliorer la précision en orientation mais pas nécessairement la précision de positionnement. Après analyse des sources d'erreur, il semblerait la précision de l'étalonnage soit surtout influencée par une reconstruction de la carte des marqueurs, particulièrement sujette au bruit dans la direction normale au plan formé par les marqueurs.

Améliorations futures

Bien que la précision de positionnement résultante de l'étalonnage ne soit pas suffisante pour accomplir une tâche d'assemblage comme celle considérée précédemment, la méthode d'étalonnage par caméra s'avère relativement simple à mettre en place et peu onéreuse. Dans le but d'améliorer la précision du robot, quelques pistes de solutions pourraient être explorées.

Contrairement à l'approche décrite plus tôt, il serait intéressant de vérifier la précision d'un étalonnage lorsque le positionnement relatif des marqueurs est déjà connu. La position de ces marqueurs pourrait être mesurée ou tout simplement imprimée sur un support de grande taille. Il serait également possible de vérifier si la disposition des marqueurs sur le sol ou la taille de ceux-ci influence la précision de la reconstruction dans la direction. De même, on remarque que tous les marqueurs sont posés directement sur le sol, ce qui fait que tous les marqueurs sont pratiquement coplanaires. L'erreur de reconstruction est donc très grande dans la direction normale au plan du sol. Le fait de disposer les marqueurs de manière à ce qu'ils ne soient pas coplanaires et l'utilisation de marqueurs de plus grande taille pourraient améliorer la précision globale de la reconstruction de la pose de la caméra.

De plus, l'ajout de capteurs de tension quelconques dans les câbles pourrait permettre de prédire leur allongement. En effet, les résultats de l'analyse des hypothèses montrent que dans le cas considéré, les câbles pouvaient subir un allongement allant jusqu'à 10 mm. La méthode utilisée au troisième chapitre ne prenant pas cette variation en compte, il serait possible de s'intéresser à l'effet de l'allongement des câbles sur la précision de l'étalonnage et potentiellement de compenser celui-ci lors de la prise de mesures.

Finalement, il serait avantageux de reconsidérer le choix des poses d'étalonnage. Dans le cas

considéré précédemment, celles-ci étaient aléatoirement choisies. Cependant, il serait plus judicieux d'utiliser un critère d'optimalité afin d'effectuer cette tâche. Par conséquent, pour une même qualité d'étalonnage, le bassin de poses sélectionnées pourrait être plus petit, ce qui réduirait le temps nécessaire pour effectuer le tout.

Ces améliorations pourraient réduire les incertitudes liées aux mesures des câbles et à la pose de caméra reconstruite, ce qui se traduirait ultimement par une amélioration de la précision après étalonnage. Ce faisant, il pourrait être envisageable de faire varier régulièrement la configuration d'un robot à câbles tout en maintenant un niveau de précision acceptable en tout temps.

Annexe A

Fiches techniques

MPP/MPJ Series

Low & High Inertia Rotary Servo Motors



The MPP/MPJ family of brushless servo motors redefines performance, flexibility, and reliability.

The MPP (MaxPlusPlus) Series is the industry's highest performing servo motor. Utilizing eight-pole segmented lamination technology, the MPP produces more torque in a shorter package. Use MPP motors for higher torque applications, customization options, or when high performance is required.

The MPJ (MaxPlus-J) Series of rotary servo motors from Parker features the same design characteristics as the MPP, but with 3 - 8 times the inertia of the standard MPP. This is a perfect solution for your applications requiring a high inertia servo motor.

Contact Information:

Parker Hannifin Corporation
Electromechanical & Drives Division
5500 Business Park Drive
Rohnert Park, CA 94928

phone: 800.358.9068 / 707.584.7558
fax: 707.584.8015
email: emn_support@parker.com
www.parker.com/emdusa



The MPP Series features a new design that offers lower inertia and higher power, all in a smaller motor package. These brushless servo motors are designed for the demanding applications found in today's high-performance servo systems.

The MPP motors feature segmented core technology, which can yield up to 40% higher torque per unit size than conventionally wound servo motors. "Potted" stators improve heat transfer for better thermal efficiency, resulting in increased torque at the motor shaft. High-energy neodymium magnets are employed for higher rates of acceleration.

Parker will customize any MPP/MPJ motor to meet your specific system requirements. Parker does customs like no one else. We are specialists at customs, offering unrivaled custom motor solutions and support.

Common Customized Options:

- Shafts (longer, shorter, diameter change, hollow shafts)
- Front flange (bolt circle, pilot, NEMA dimensions)
- Motors coatings (white, PTFE, steel-it grey)
- Non-standard feedback devices
- Special connectors
- Special stator windings



ENGINEERING YOUR SUCCESS.

MPP/MPJ Series Servo Motors

Low & High Inertia
Rotary Servo Motors

MPP/MPJ Motor Features

- Segmented core technology – very high torque-to-inertia ratio – 40% higher torque
- Potted stator design for improved thermal efficiency
- MPP available in 92, 100, 115, 142, 190 and 270 frame sizes
- MPJ available in 92, 100, 115 and 142 frame sizes
- Continuous stall torque: 1.5 Nm (14 lb-in) to 157 Nm (1396 lb-in)
- Peak torque: 5 Nm (44 lb-in) to 513 Nm (4540 lb-in)
- Brushless construction
- High-performance neodymium magnets
- Thermistor protection
- Resolver, incremental encoder, or single- or multi-turn absolute encoders
- 24 volt failsafe brake (optional)
- Right-angle rotatable PS-style connectors
- IP64 standard, IP65 optional shaft seal
- Best-in-class lead-time, two year warranty
- CE and UL



MPP/MPJ Common Specifications by Frame Size

Series Frame Size (mm)	MPP/MPJ 092	MPP/MPJ 100	MPP/MPJ 115	MPP/MPJ 142	MPP 190	MPP 270
Max DC Bus Voltage ¹ 230 VAC Models 460 VAC Models	V_{mbus}		VDC	340 650		650
Max AC Voltage ¹ 230 VAC Models 460 VAC Models	V_s		VAC	240 460		460
Ambient Temp at Rating	T_{amb}		°C	25		
Max Winding Temp	T_{max}		°C	155		
Winding Temp at Rating ²	T_{wr}		°C	125		
Number of Rotor Magnet Poles	N_p		# poles	8		
Motor UL Class	F		UL class	H		
Environmental Protection Rating ²	IP			IP40 – IP65		

⁶ Reference only

⁷ The winding temperature at the motor rated speed may be lower than the winding maximum due to feedback or amplifier limitations.

⁸ Refer to the product part number configurator for the IP rating character. All servo motors with a "V" designator in the part number for the shaft seal option are rated IP65. All other motors are rated for IP64, provided the feedback device is encased in an aluminum housing. Motors that have exposed feedback devices are rated at IP40.

	Rated Speed	kW	HP	Rotor Inertia				Stall Torque		Peak Torque		Cont. Stall Current (RMS)	Peak Current (RMS)
				MPP		MPJ		Nm	lb-in	Nm	lb-in		
				lb-in-sec ²	Kg-m ²	lb-in-sec ²	Kg-m ²						
230 VAC Models													
0921B	3793.57	0.52	0.69	3.90 ⁻⁰⁴	4.41 ⁻⁰⁵	3.45 ⁻⁰³	3.90 ⁻⁰⁴	1.55	13.72	4.32	38.22	1.83	5.78
0921C	4947.33	0.61	0.81	3.90 ⁻⁰⁴	4.41 ⁻⁰⁵	3.45 ⁻⁰³	3.90 ⁻⁰⁴	1.58	13.97	4.38	38.79	2.86	9.02
0922C	4287.68	1.08	1.44	6.90 ⁻⁰⁴	7.80 ⁻⁰⁵	6.11 ⁻⁰³	6.90 ⁻⁰⁴	2.94	25.99	8.29	73.33	3.72	11.77
0922D	4947.33	1.24	1.65	6.90 ⁻⁰⁴	7.80 ⁻⁰⁵	6.11 ⁻⁰³	6.90 ⁻⁰⁴	3.11	27.51	8.67	76.76	5.59	17.66
0923D	4947.33	1.55	2.07	1.00 ⁻⁰³	1.13 ⁻⁰⁴	—	—	4.03	35.63	11.55	102.23	7.23	22.85
1002D	4782.42	1.55	2.07	2.30 ⁻⁰³	2.60 ⁻⁰⁴	7.29 ⁻⁰³	8.24 ⁻⁰⁴	4.56	40.34	12.69	112.32	7.87	24.87
1003C	4153.31	1.77	2.36	3.30 ⁻⁰³	3.73 ⁻⁰⁴	—	—	6.03	53.35	17.25	152.67	7.21	22.80
1003D	4177.74	1.76	2.34	3.30 ⁻⁰³	3.73 ⁻⁰⁴	—	—	5.99	53.00	17.16	151.84	10.28	32.49
1152C	4067.80	1.63	2.18	2.40 ⁻⁰³	2.71 ⁻⁰⁴	9.01 ⁻⁰³	1.02 ⁻⁰³	5.68	50.24	15.69	138.86	8.45	26.71
1152D	4067.80	1.67	2.22	2.40 ⁻⁰³	2.71 ⁻⁰⁴	9.01 ⁻⁰³	1.02 ⁻⁰³	5.79	51.22	15.93	141.00	10.45	33.02
1153B	3505.88	2.20	2.93	3.60 ⁻⁰³	4.07 ⁻⁰⁴	1.00 ⁻⁰²	1.13 ⁻⁰³	7.91	70.02	22.23	196.71	7.74	24.46
1153C	4012.83	2.29	3.06	3.60 ⁻⁰³	4.07 ⁻⁰⁴	1.00 ⁻⁰²	1.13 ⁻⁰³	8.04	71.16	22.52	199.29	12.10	38.25
1154A	1903.70	1.79	2.39	4.60 ⁻⁰³	5.20 ⁻⁰⁴	—	—	9.85	87.18	28.01	247.92	5.36	16.94
1154B	3852.24	2.69	3.59	4.60 ⁻⁰³	5.20 ⁻⁰⁴	—	—	9.86	87.28	28.04	248.16	10.73	33.91
1422C	4342.65	3.40	4.53	6.90 ⁻⁰³	7.80 ⁻⁰⁴	6.38 ⁻⁰²	7.20 ⁻⁰³	10.89	96.37	28.08	248.48	14.62	46.20
1424B	3599.33	5.18	6.90	1.30 ⁻⁰²	1.47 ⁻⁰³	6.98 ⁻⁰²	7.88 ⁻⁰³	19.20	169.90	52.20	461.99	19.35	61.16
1424C	3750.33	5.22	6.96	1.30 ⁻⁰²	1.47 ⁻⁰³	6.98 ⁻⁰²	7.88 ⁻⁰³	19.28	170.62	52.35	463.33	24.30	76.78
1426B	3386.17	6.27	8.36	1.90 ⁻⁰²	2.15 ⁻⁰³	7.38 ⁻⁰²	8.34 ⁻⁰³	25.73	227.73	72.30	639.88	26.18	82.72
1906B	2898.29	10.00	13.33	5.55 ⁻⁰²	6.27 ⁻⁰³	—	—	45.87	405.92	121.42	1074.53	36.22	114.44
460 VAC Models													
0921R	4947.33	0.61	0.81	3.90 ⁻⁰⁴	4.41 ⁻⁰⁵	3.45 ⁻⁰³	3.90 ⁻⁰⁴	1.58	13.96	4.38	38.75	1.43	4.51
0922R	4947.33	1.24	1.65	6.90 ⁻⁰⁴	7.80 ⁻⁰⁵	6.11 ⁻⁰³	6.90 ⁻⁰⁴	3.11	27.48	8.67	76.69	2.79	8.82
0923R	4947.33	1.55	2.07	1.00 ⁻⁰³	1.13 ⁻⁰⁴	—	—	4.02	35.59	11.54	102.13	3.61	11.41
1002R	4782.42	1.55	2.07	2.30 ⁻⁰³	2.60 ⁻⁰⁴	7.29 ⁻⁰³	8.24 ⁻⁰⁴	4.55	40.29	12.68	112.22	3.93	12.42
1003Q	4155.75	1.85	2.46	3.30 ⁻⁰³	3.73 ⁻⁰⁴	—	—	6.28	55.60	17.84	157.89	3.88	12.25
1003R	4177.74	1.86	2.49	3.30 ⁻⁰³	3.73 ⁻⁰⁴	—	—	6.34	56.08	17.97	159.01	5.44	17.20
1152R	4067.80	1.57	2.09	2.40 ⁻⁰³	2.71 ⁻⁰⁴	9.01 ⁻⁰³	1.02 ⁻⁰³	5.46	48.35	15.22	134.67	4.92	15.56
1153P	3314.71	2.28	3.03	3.60 ⁻⁰³	4.07 ⁻⁰⁴	1.00 ⁻⁰²	1.13 ⁻⁰³	8.36	74.03	23.24	205.71	4.10	12.94
1153R	4012.83	2.29	3.06	3.60 ⁻⁰³	4.07 ⁻⁰⁴	1.00 ⁻⁰²	1.13 ⁻⁰³	8.03	71.08	22.50	199.11	6.04	19.10
1154P	3839.27	2.69	3.59	4.60 ⁻⁰³	5.20 ⁻⁰⁴	—	—	9.85	87.18	28.01	247.92	5.36	16.94
1422R	4342.65	3.39	4.53	6.90 ⁻⁰³	7.80 ⁻⁰⁴	6.38 ⁻⁰²	7.20 ⁻⁰³	10.88	96.26	28.05	248.27	7.30	23.07
1424R	3779.98	5.21	6.95	1.30 ⁻⁰²	1.47 ⁻⁰³	6.98 ⁻⁰²	7.88 ⁻⁰³	19.26	170.42	52.31	462.97	12.13	38.34
1426P	3371.51	6.26	8.35	1.90 ⁻⁰²	2.15 ⁻⁰³	7.38 ⁻⁰²	8.34 ⁻⁰³	25.70	227.47	72.25	639.38	13.07	41.31
1428P	2950.07	6.98	9.30	2.30 ⁻⁰²	2.60 ⁻⁰³	—	—	32.97	291.80	93.75	829.70	16.75	52.93
1428Q	2924.42	7.01	9.35	2.30 ⁻⁰²	2.60 ⁻⁰³	—	—	33.11	293.05	94.04	832.22	21.03	66.46
1904P	3377.62	8.31	11.09	4.00 ⁻⁰²	4.52 ⁻⁰³	—	—	34.18	302.47	89.06	788.19	18.14	57.31
1906P	3035.58	9.76	13.01	5.55 ⁻⁰²	6.27 ⁻⁰³	—	—	44.63	395.02	118.71	1050.56	23.45	74.11
1908N	2365.44	11.63	15.51	6.85 ⁻⁰²	7.74 ⁻⁰³	—	—	60.61	536.39	160.81	1423.13	20.60	65.08
1908P	2781.50	11.66	15.54	6.85 ⁻⁰²	7.74 ⁻⁰³	—	—	58.46	517.35	156.09	1381.38	30.31	95.77
2706M	1264.85	14.15	18.87	2.42 ⁻⁰¹	2.73 ⁻⁰²	—	—	121.25	1073.1	306.63	2713.65	24.70	78.06
2706N	1775.31	17.12	22.83	2.42 ⁻⁰¹	2.73 ⁻⁰²	—	—	117.08	1036.11	298.90	2645.25	32.36	102.25
2706P	2126.16	18.02	24.03	2.42 ⁻⁰¹	2.73 ⁻⁰²	—	—	117.77	1042.24	300.19	2656.70	40.54	128.10
2708L	1048.86	15.69	20.92	3.13 ⁻⁰¹	3.54 ⁻⁰²	—	—	157.74	1395.99	402.31	3560.46	26.44	83.56
2708M	1680.77	20.74	27.65	3.13 ⁻⁰¹	3.54 ⁻⁰²	—	—	152.15	1346.51	391.75	3467.01	38.93	123.01
2708N	1961.51	21.13	28.17	3.13 ⁻⁰¹	3.54 ⁻⁰²	—	—	149.65	1324.37	386.95	3424.50	49.96	157.89

MPP/MPJ Size 92 Specifications

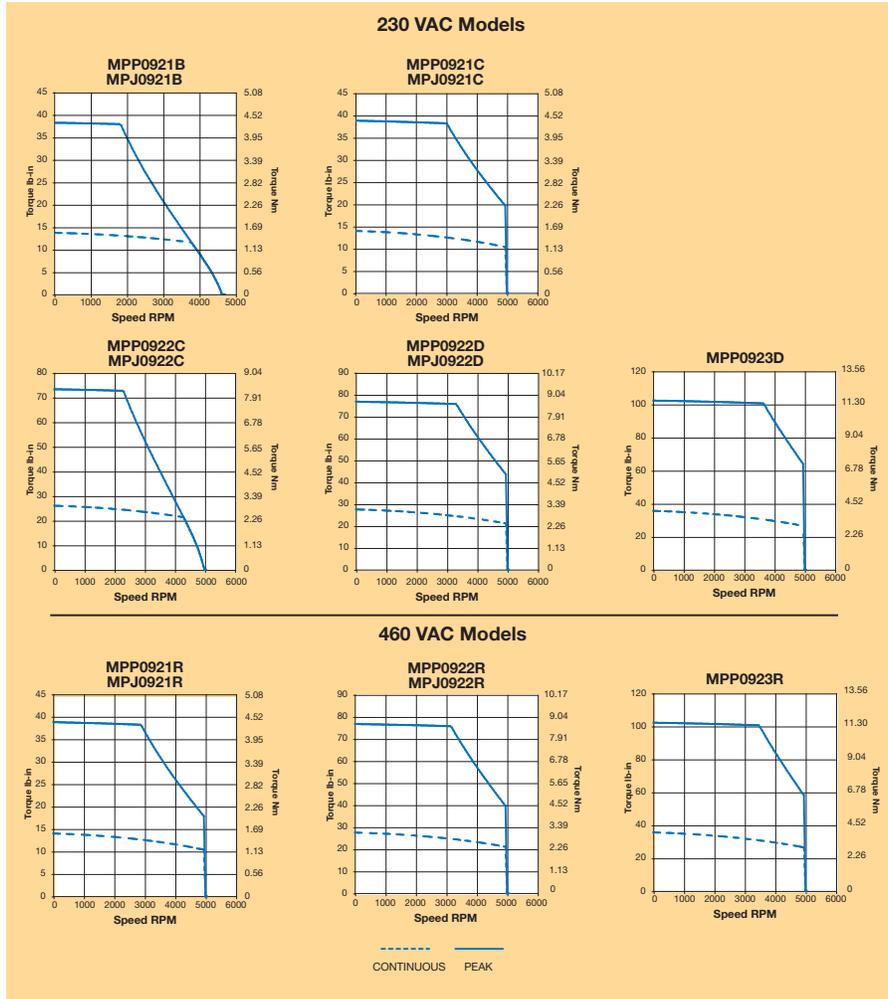
230 VAC Models

Parameter	Symbol	Units	MPP/MPJ 0921B	MPP/MPJ 0921C	MPP/MPJ 0922C	MPP/MPJ 0922D	MPP0923D
Stall Torque Continuous ^{1,2,3}	T _{cs}	Nm	1.55	1.58	2.94	3.11	4.03
		in-lb	13.7	14.0	26.0	27.5	35.6
Stall Current Continuous ^{1,2,3}	I _{cs} (rms)	Arms	1.8	2.9	3.7	5.6	7.2
Peak Torque	T _{pk}	Nm	4.32	4.38	8.29	8.67	11.55
		in-lb	38.2	38.8	73.3	76.8	102.2
Peak Current	I _{pk} (rms)	Arms	5.8	9.0	11.8	17.7	22.8
Rated Speed ^{1,2,3}	S _r	rpm	3794	4947	4288	4947	4947
Rated Torque ^{1,2,3}	T _r	Nm	1.30	1.17	2.41	2.39	3.00
		in-lb	11.5	10.4	21.3	21.1	26.5
Rated Shaft Output Power ^{1,2,3}	P _{out}	kW	0.52	0.61	1.08	1.24	1.55
Current at Rated Speed ^{1,2,3}	I _r	A _{rms}	1.59	2.24	3.15	4.45	5.59
Voltage Constant ⁴	K _e	V _{rms} /k _r rpm	51.63	33.72	48.09	33.95	33.95
Torque Constant ⁴	K _t (sine)	Nm/A _{rms}	0.854	0.558	0.795	0.561	0.561
Resistance ^{3,4}	R	ohm	11.00	4.52	3.90	1.73	1.20
Inductance ^{3,5}	L	mH	47	20	19	9	6
MPP Rotor Inertia ⁶	J	kg-m ²	4.407 ⁻⁵	4.407 ⁻⁵	7.796 ⁻⁵	7.796 ⁻⁵	1.130 ⁻⁴
		in-lb-sec ²	3.900 ⁻⁴	3.900 ⁻⁴	6.900 ⁻⁴	6.900 ⁻⁴	1.000 ⁻³
MPJ Rotor Inertia ⁶	J	kg-m ²	3.911 ⁻⁴	3.911 ⁻⁴	4.261 ⁻⁴	4.261 ⁻⁴	NA
		in-lb-sec ²	3.462 ⁻³	3.462 ⁻³	3.772 ⁻³	3.772 ⁻³	NA
Motor Weight ⁶		kg	2.69	2.69	3.69	3.69	4.59
		lb	5.94	5.94	8.14	8.14	10.12

460 VAC Models

Parameter	Symbol	Units	MPP/MPJ 0921R	MPP/MPJ 0922R	MPP 0923R
Stall Torque Continuous ^{1,2,3}	T _{cs}	Nm	1.58	3.11	4.02
		in-lb	14.0	27.5	35.6
Stall Current Continuous ^{1,2,3}	I _{cs} (rms)	Arms	1.4	2.8	3.6
Peak Torque	T _{pk}	Nm	4.38	8.67	11.54
		in-lb	38.8	76.7	102.1
Peak Current	I _{pk} (rms)	Arms	4.5	8.8	11.4
Rated Speed ^{1,2,3}	S _r	rpm	4947	4947	4947
Rated Torque ^{1,2,3}	T _r	Nm	1.17	2.38	3.00
		in-lb	10.4	21.1	26.5
Rated Shaft Output Power ^{1,2,3}	P _{out}	kW	0.61	1.24	1.55
Current at Rated Speed ^{1,2,3}	I _r	A _{rms}	1.12	2.22	2.79
Voltage Constant ⁴	K _e	V _{rms} /k _r rpm	67.43	67.90	67.90
Torque Constant ⁴	K _t (sine)	Nm/A _{rms}	1.115	1.123	1.123
Resistance ^{3,4}	R	ohm	18.12	6.94	4.81
Inductance ^{3,5}	L	mH	80	38	26
MPP Rotor Inertia ⁶	J	kg-m ²	4.407 ⁻⁵	7.796 ⁻⁵	1.130 ⁻⁴
		in-lb-sec ²	3.900 ⁻⁴	6.900 ⁻⁴	1.000 ⁻³
MPJ Rotor Inertia ⁶	J	kg-m ²	3.911 ⁻⁴	4.261 ⁻⁴	NA
		in-lb-sec ²	3.462 ⁻³	3.772 ⁻³	NA
Motor Weight ⁶		kg	2.69	3.69	4.59
		lb	5.94	8.14	10.12

MPP/MPJ Size 92 Speed-Torque Performance



- 1 Assumes motor is mounted to an aluminum plate with dimensions of 12" x 12" x 1/2" for 92 mm motor frames.
- 2 Maximum winding temperature is 155°C. Thermal protection device threshold may be at a lower temperature.
- 3 These ratings are valid for Parker drives. Other drives may not achieve the same ratings.
- 4 ±10%
- 5 ±30% @ 1kHz
- 6 Reference only

Note: These specifications are based on theoretical motor performance and are not specific to any amplifier.

Corde 12 brins de fibre de Dyneema® (UHMWPE)

La corde 12 brins en fibre de Dyneema® (UHMWPE) offre un rapport force/poids maximal et elle est plus forte que le câble d'acier. Elle flotte, offre une flexibilité supérieure et résiste bien à un usage intensif.

Caractéristiques

- Plus forte qu'un câble d'acier de même diamètre avec seulement le septième du poids
- Très léger
- Haute résistance à l'abrasion
- Facile à épisser
- N'a pas tendance à vriller
- Flexible et facile à manier
- Élasticité comparable aux câbles d'acier
- Facile à inspecter et épisser sur le terrain
- Flotte
- Résiste à la fatigue et l'usage intensif

Utilisations

- Élingues d'hélicoptères
- Lignes de vie de plongée
- Tire-câbles
- Gréages multiples
- Substituts de câbles d'acier
- Câbles de treuil



CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

- Couleurs standards : Orange, vert, blanc, bleu
(autres couleurs disponibles sur demande)

Code	Diamètre		kg par 100m	lbs par 100'	Force moyenne	
	(mm)	(po)			(kg)	(lbs)
DYNEEMA04 COA	3,2	1/8	0,45	0,3	1 300	2 900
DYNEEMA06 COA	4,8	3/16	1,5	1,0	2 360	5 200
DYNEEMA08 COA	6,4	1/4	2,4	1,6	3 950	8 700
DYNEEMA10 COA	7,9	5/16	3,9	2,6	6 000	13 300
DYNEEMA12 COA	9,5	3/8	5,2	3,5	8 400	18 500
DYNEEMA14 COA	11,1	7/16	6,2	4,2	10 600	23 500
DYNEEMA16 COA	12,7	1/2	9,5	6,4	15 360	33 800
DYNEEMA20 COA	15,9	5/8	15,2	10,2	23 800	52 500
DYNEEMA24 COA	19,1	3/4	19,9	13,4	29 300	64 600
DYNEEMA28 COA	22,2	7/8	29,0	19,5	41 100	90 500
DYNEEMA32 COA	25,4	1	32,3	21,7	48 900	107 700
DYNEEMA36 COA	28,6	1-1/8	47,5	31,9	67 100	148 000
DYNEEMA40 COA	31,8	1-1/4	54,0	36,3	77 200	170 000
DYNEEMA44 COA	34,9	1-3/8	67,0	45,0	93 200	205 000
DYNEEMA48 COA	38,1	1-1/2	76,9	51,7	103 000	228 000

Élongation élastique par % force de rupture		
10%	20%	30%
0,46% d'élongation	0,70% d'élongation	0,96% d'élongation

Cordages Barry Itée

6110, boul. des Grandes-Prairies
Montréal QC H1P 1A2 Canada
☎ 514.328.3888 📠 514.328.1963
1.800.305.2673 (Canada / USA)

www.barry.ca

Dyneema® est une marque déposée de DSM. L'utilisation de cette marque de commerce est interdite sans autorisation.

Annexe B

Résultats de la comparaison entre le modèle d'erreur et la simulation

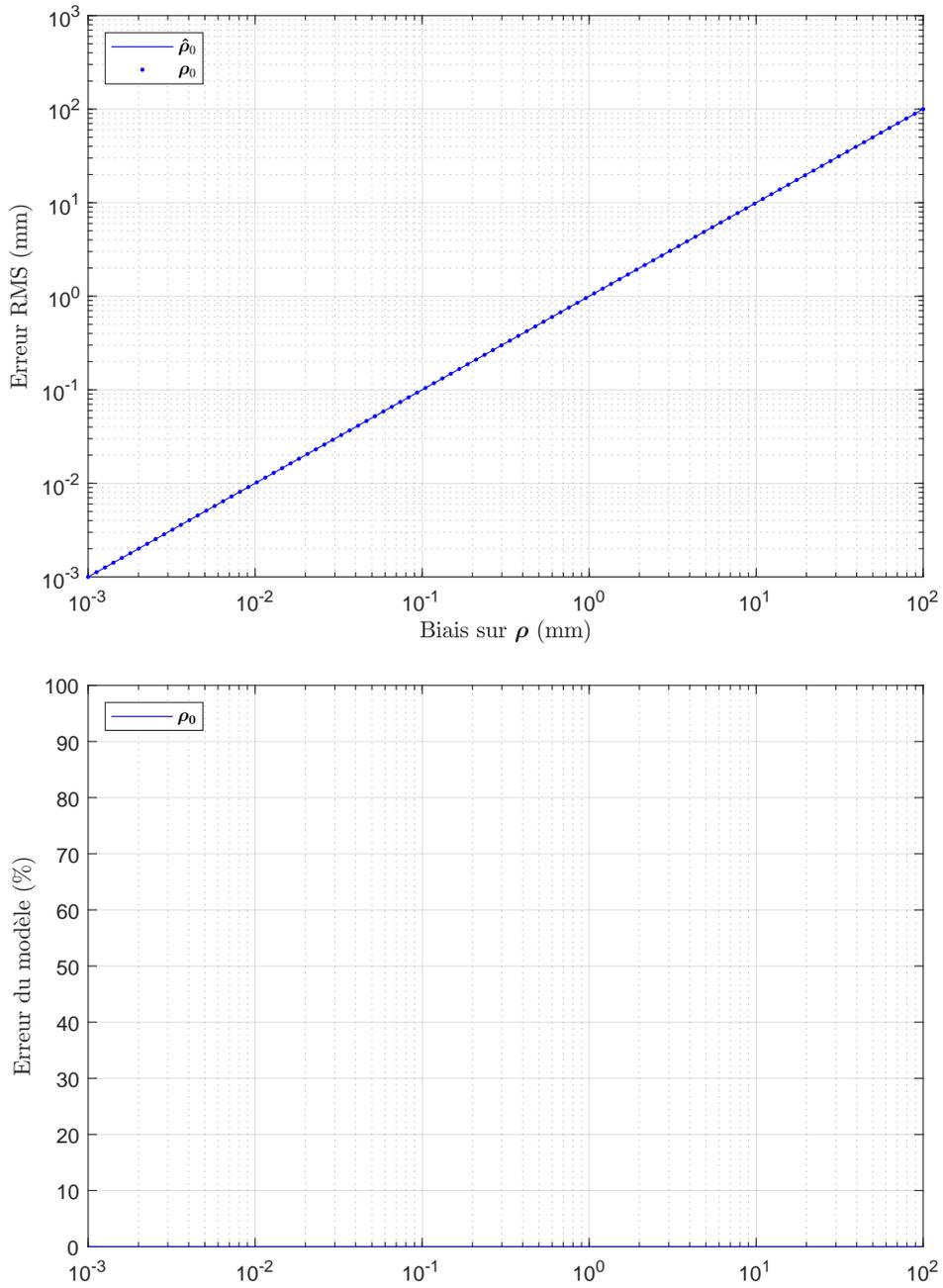


FIGURE B.1 – Comparaison des erreurs obtenues en simulation et pour le modèle d’erreur selon le biais sur ρ

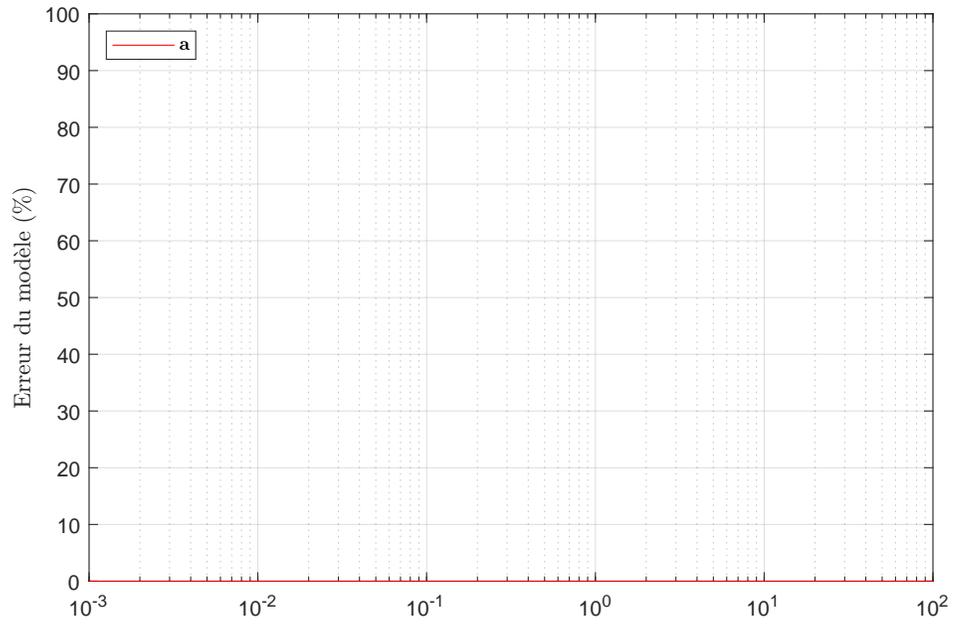
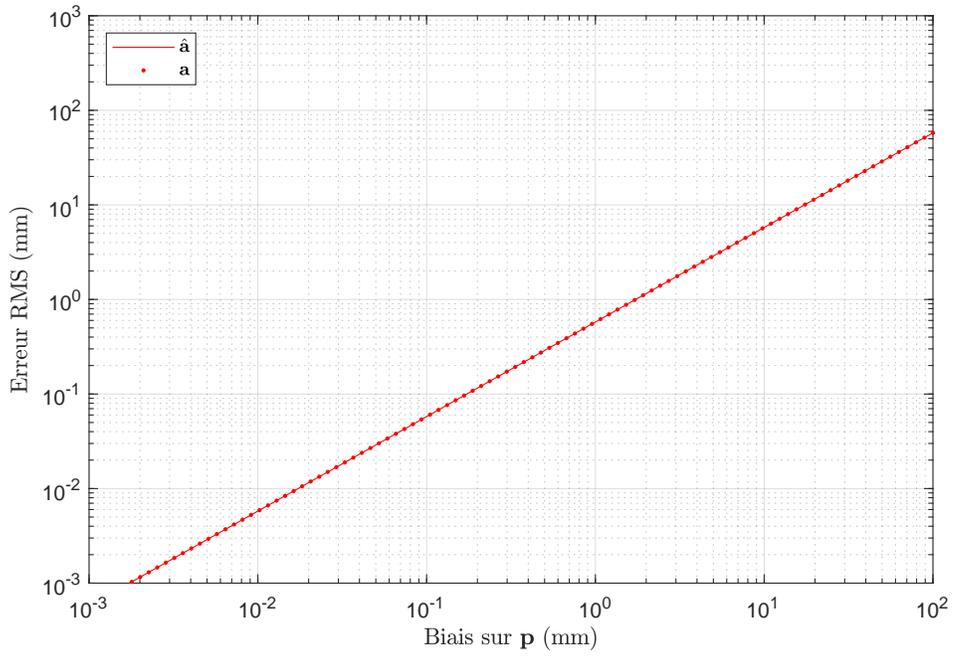


FIGURE B.2 – Comparaison des erreurs obtenues en simulation et pour le modèle d’erreur selon le biais sur \mathbf{p}

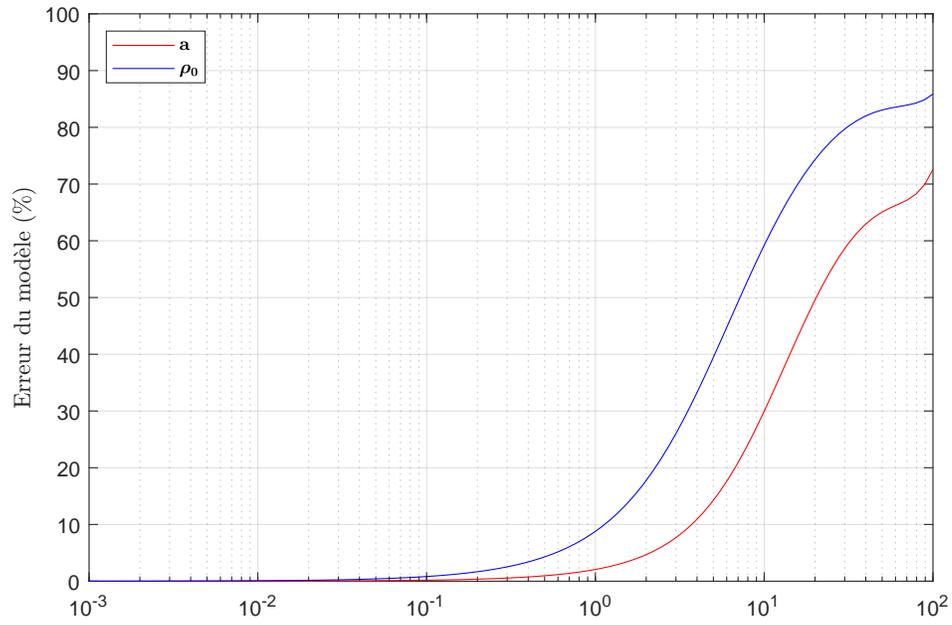
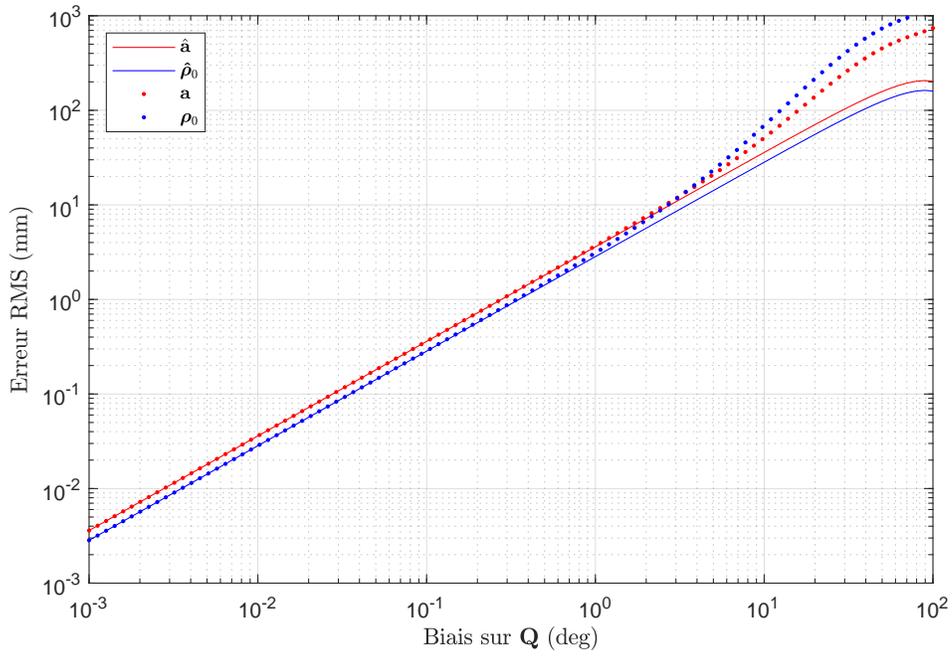


FIGURE B.3 – Comparaison des erreurs obtenues en simulation et pour le modèle d’erreur selon le biais sur Q

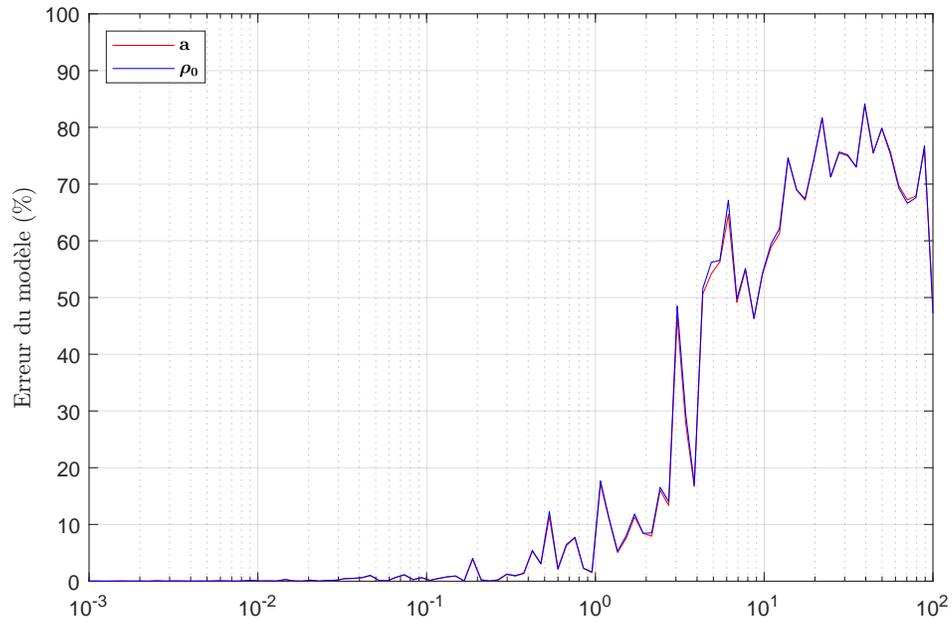
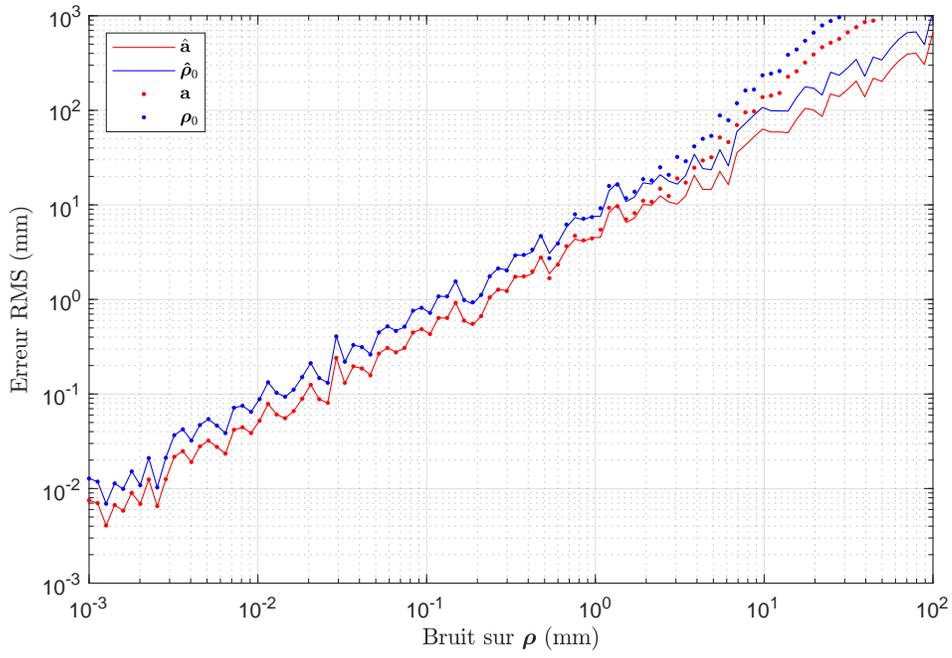


FIGURE B.4 – Comparaison des erreurs obtenues en simulation et pour le modèle d’erreur selon le bruit sur ρ

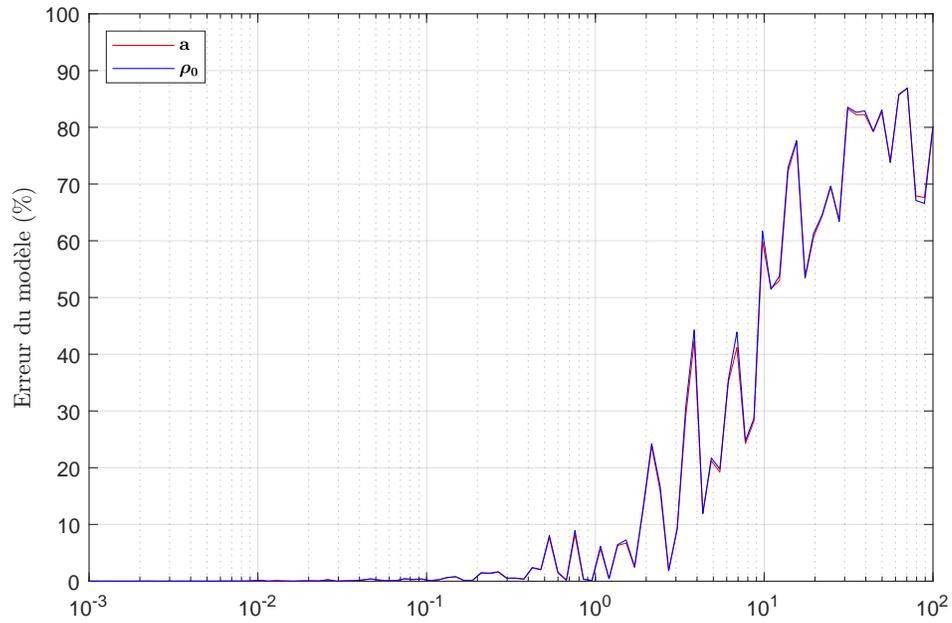
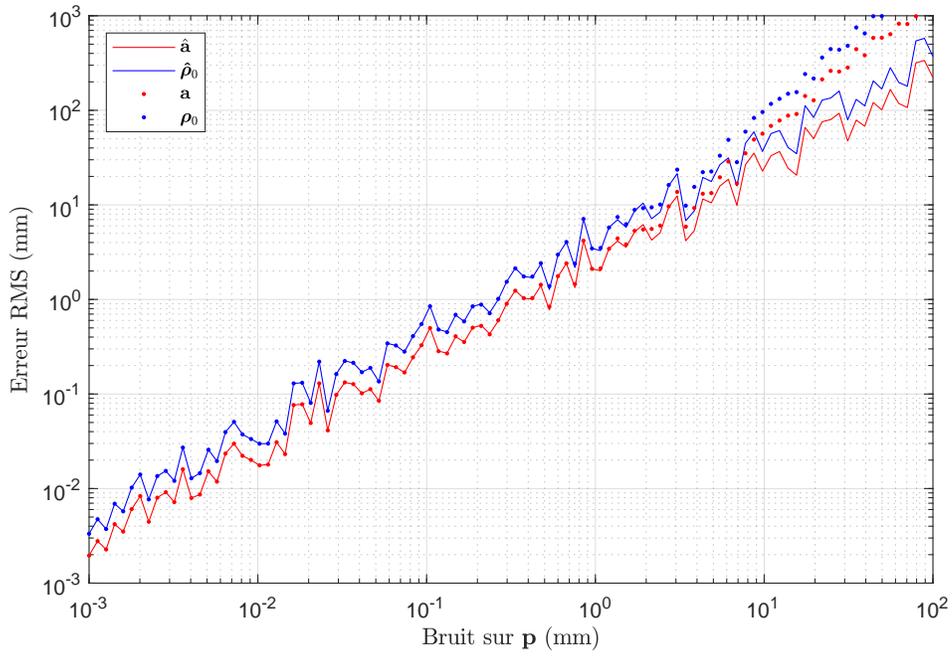


FIGURE B.5 – Comparaison des erreurs obtenues en simulation et pour le modèle d’erreur selon le bruit sur \mathbf{p}

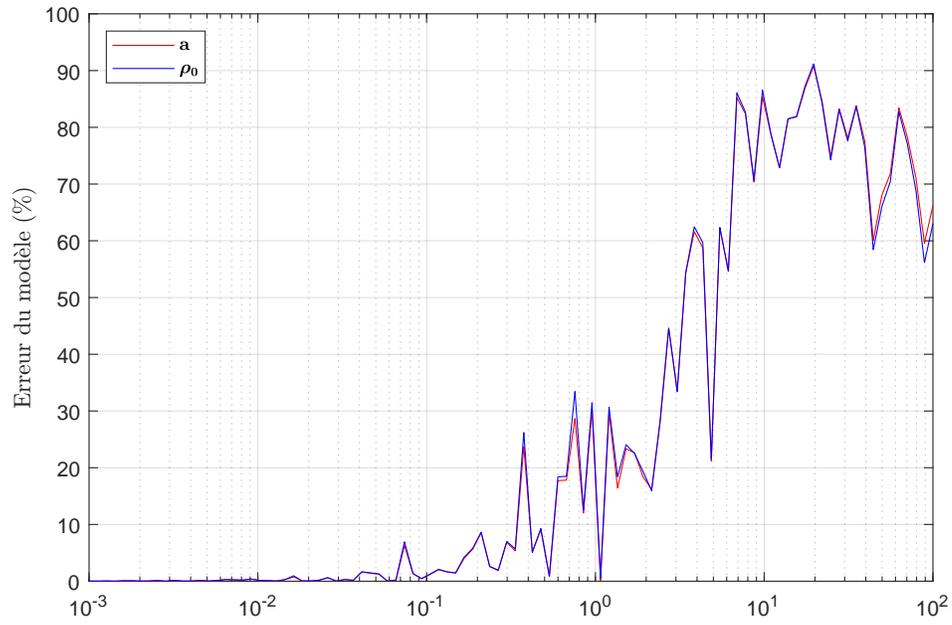
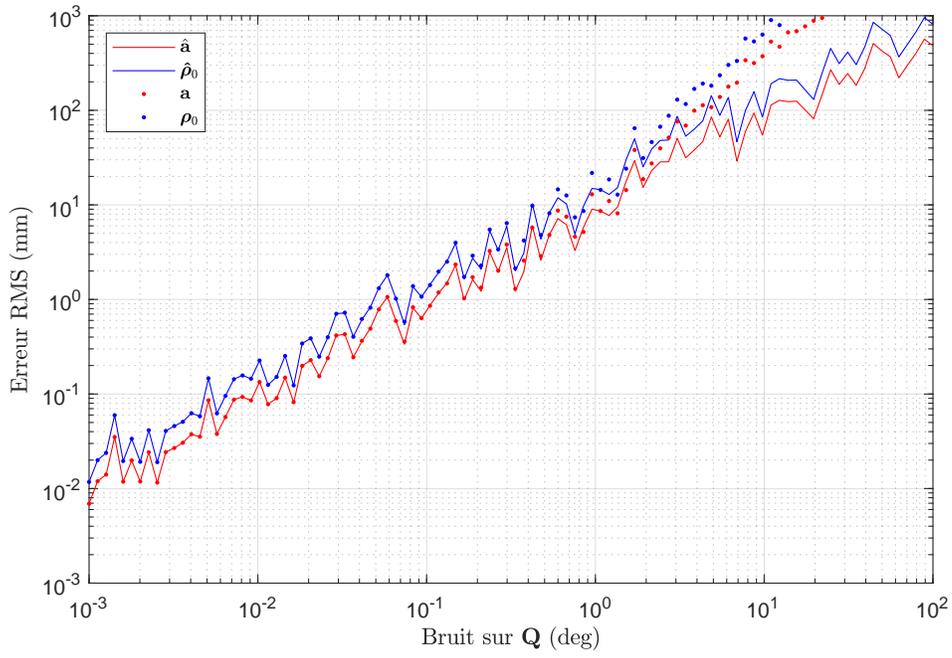


FIGURE B.6 – Comparaison des erreurs obtenues en simulation et pour le modèle d’erreur selon le bruit sur Q

Annexe C

Résultats de l'analyse de propagation d'erreur pour des erreurs de mesures combinées

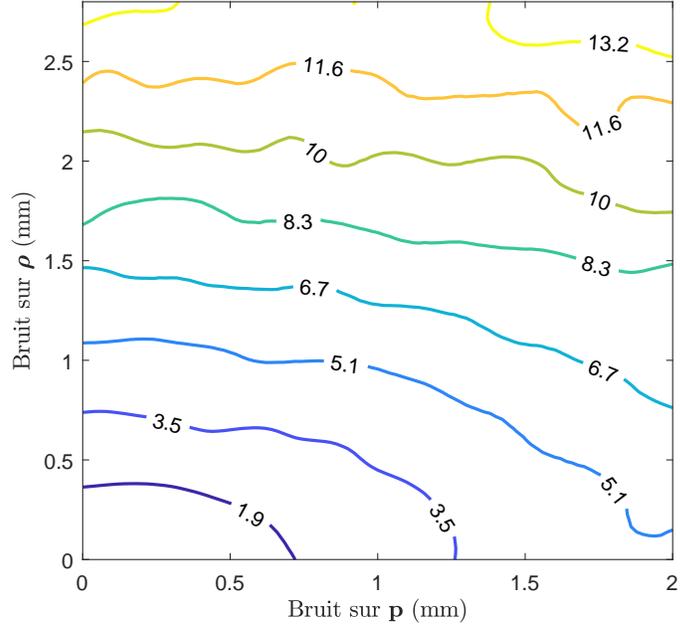


FIGURE C.1 – Estimation de l’erreur quadratique moyenne (mm) commise sur \mathbf{a} selon les valeurs de bruit sur \mathbf{p} et ρ

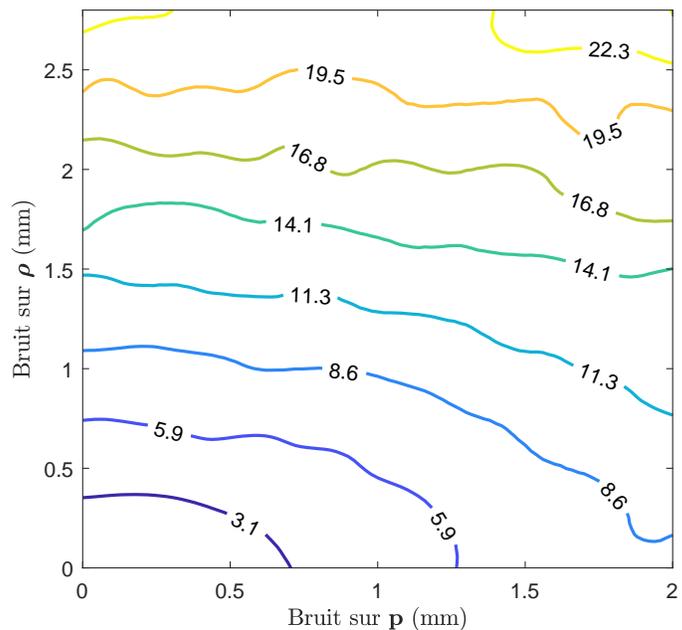


FIGURE C.2 – Estimation de l’erreur quadratique moyenne (mm) commise sur ρ_0 selon les valeurs de bruit sur \mathbf{p} et ρ

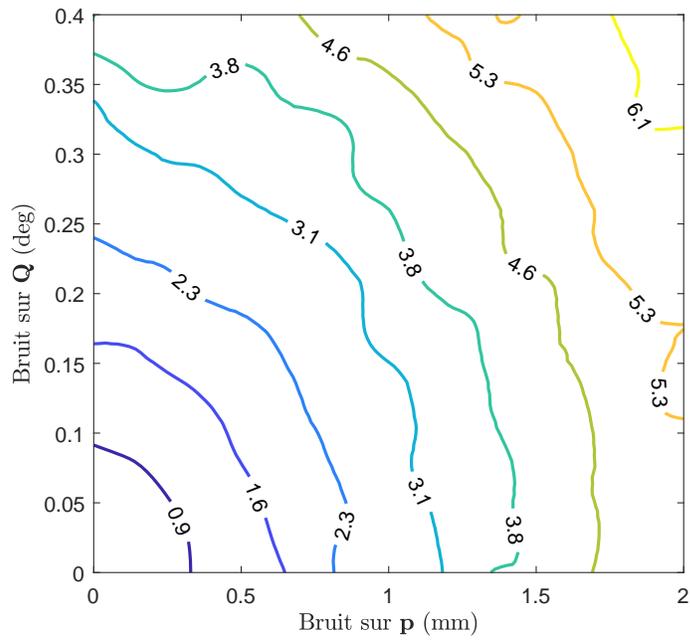


FIGURE C.3 – Estimation de l’erreur quadratique moyenne (mm) commise sur a selon les valeurs de bruit sur p et Q

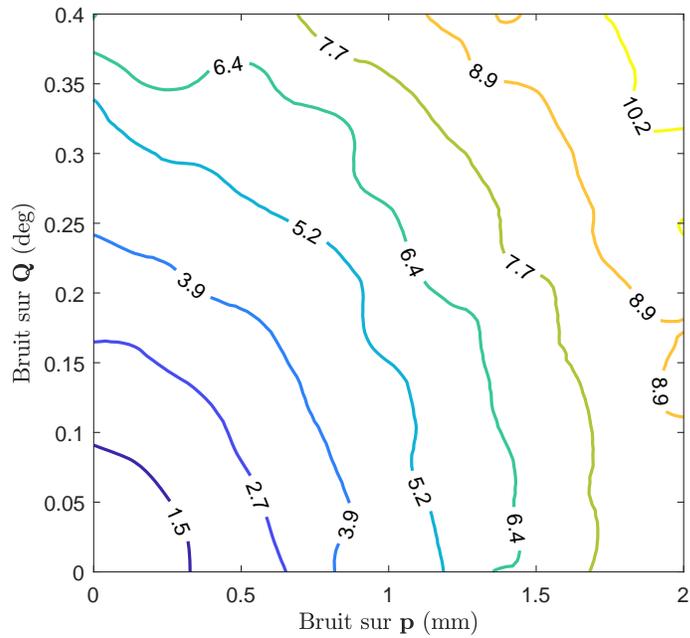


FIGURE C.4 – Estimation de l’erreur quadratique moyenne (mm) commise sur ρ_0 selon les valeurs de bruit sur p et Q

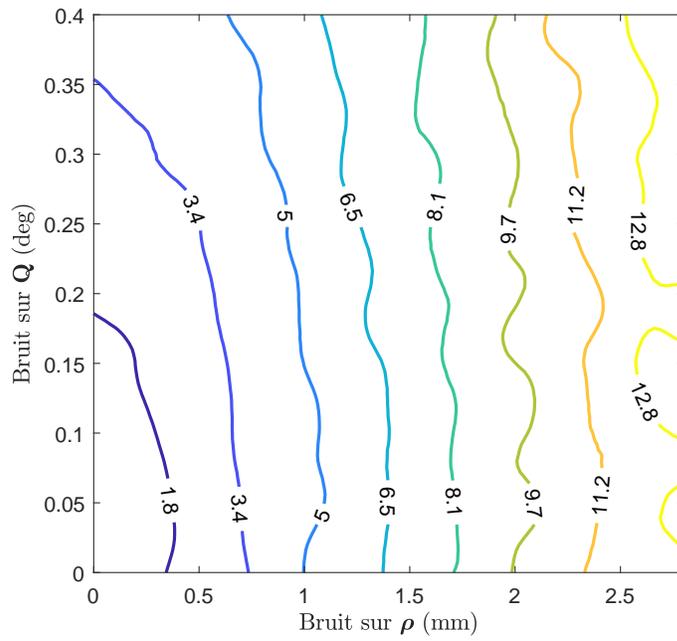


FIGURE C.5 – Estimation de l’erreur quadratique moyenne (mm) commise sur a selon les valeurs de bruit sur ρ et Q

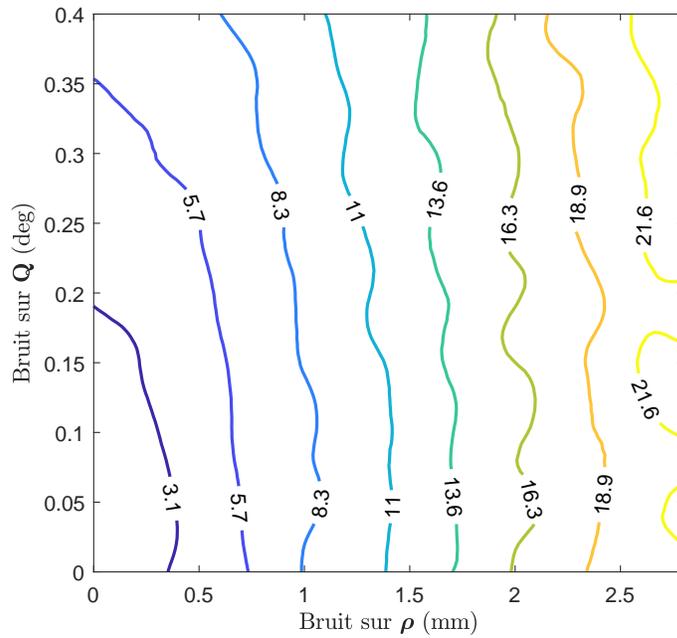


FIGURE C.6 – Estimation de l’erreur quadratique moyenne (mm) commise sur ρ_0 selon les valeurs de bruit sur ρ et Q

Annexe D

Résultats des étalonnages

i	\mathbf{a}_i	$\rho_{i,0}$
1	$[-1813.3, -2159.4, 824.0]^T$	2638.8
2	$[-1678.2, 2125.0, 787.9]^T$	2539.9
3	$[1508.3, 2046.1, 865.7]^T$	2495.6
4	$[1523.3, -2233.5, 835.3]^T$	2712.2
5	$[-2087.3, -1725.4, 2960.2]^T$	2810.0
6	$[-1492.1, 2442.0, 2880.9]^T$	2921.1
7	$[1692.4, 2143.8, 2860.1]^T$	2916.3
8	$[873.2, -2428.2, 3004.5]^T$	2835.5

TABLE D.1 – Résultats de l'étalonnage pour l'échantillon de poses A (mm)

i	\mathbf{a}_i	$\rho_{i,0}$
1	$[-1716.1, -2101.8, 844.4]^T$	2532.4
2	$[-1616.5, 2085.4, 892.5]^T$	2487.4
3	$[1483.5, 1977.1, 892.7]^T$	2406.6
4	$[1522.4, -2237.0, 789.0]^T$	2611.8
5	$[-2044.9, -1787.4, 2974.1]^T$	2881.6
6	$[-1369.5, 2312.9, 2856.3]^T$	2827.7
7	$[1682.8, 2019.9, 2791.0]^T$	2816.2
8	$[921.9, -2443.1, 2869.0]^T$	2794.2

TABLE D.2 – Résultats de l'étalonnage pour l'échantillon de poses B (mm)

i	\mathbf{a}_i	$\rho_{i,0}$
1	$[-1428.5, -1813.7, 1081.9]^T$	2097.5
2	$[-1466.1, 1988.7, 908.3]^T$	2263.9
3	$[1522.8, 2117.6, 823.5]^T$	2556.9
4	$[1313.7, -1992.9, 1053.4]^T$	2303.0
5	$[-1821.5, -1545.7, 2829.0]^T$	2502.7
6	$[-1364.4, 2373.2, 2715.6]^T$	2739.5
7	$[1743.4, 2239.7, 2797.7]^T$	2981.9
8	$[814.8, -2209.6, 2827.4]^T$	2572.3

TABLE D.3 – Résultats de l'étalonnage pour l'échantillon de poses C (mm)

Bibliographie

- [1] 3D SYSTEMS : Touch Haptic Device Technical Specifications. URL <https://www.3dsystems.com/haptics-devices/touch/specifications>.
- [2] Abdulrahman ALARIFI, AbdulMalik AL-SALMAN, Mansour ALSALEH, Ahmad ALNAFESSAH, Suheer AL-HADHRAMI, Mai A AL-AMMAR et Hend S AL-KHALIFA : Ultra wideband indoor positioning technologies : Analysis and recent advances. *Sensors (Switzerland)*, 16(5):707, 5 2016. ISSN 14248220. URL <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27196906><https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/PMC4883398/>.
- [3] James ALBUS, Roger BOSTELMAN et Nicholas DAGALAKIS : The NIST robocrane. *Journal of Robotic Systems*, 10(5):709–724, 7 1993. ISSN 0741-2223. URL <https://doi.org/10.1002/rob.4620100509>.
- [4] BAOYAN DUAN, YUANYING QIU, FUSHUN ZHANG et BIN ZI : Analysis and experiment of the feed cable-suspended structure for super antenna. In *2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pages 329–334. IEEE, 7 2008. ISBN 978-1-4244-2494-8. URL <http://ieeexplore.ieee.org/document/4601682/>.
- [5] Paul BOSSCHER, Robert L. WILLIAMS et Melissa TUMMINO : A concept for rapidly-deployable cable robot search and rescue systems. In *Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference - DETC2005*, volume 7 B, pages 589–598, 9 2005. ISBN 0791847446. URL <https://doi.org/10.1115/DETC2005-84324>.
- [6] Roger BOSTELMAN, Adam JACOFF, Fred PROCTOR, Tom KRAMER et Albert WAVE-RING : Cable-based reconfigurable machines for large scale manufacturing. In *Proceedings of the 2000 Japan-USA Symposium on Flexible Automation*, pages 23–26, 2000.
- [7] Samuel BOUCHARD : *Géométrie des robots parallèles entraînés par des câbles*. Thèse de doctorat, Université Laval, 2008.
- [8] Ana Lucia CRUZ RUIZ, Stéphane CARO, Philippe CARDOU et Francois GUAY : ARACHNIS : Analysis of Robots Actuated by Cables with Handy and Neat Interface Software. In *Mechanisms and Machine Science*, volume 32, 2014.

- [9] Tej DALLEJ, Marc GOUTTEFARDE, Nicolas ANDREFF, Redwan DAHMOUCHE et Philippe MARTINET : Vision-based modeling and control of large-dimension cable-driven parallel robots. *In IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1581–1586, 10 2012. ISBN 9781467317375.
- [10] Tej DALLEJ, Marc GOUTTEFARDE, Nicolas ANDREFF, Pierre-Elie HERVÉ et Philippe MARTINET : Modeling and vision-based control of large-dimension cable-driven parallel robots using a multiple-camera setup. *Mechatronics*, 61:20–36, 2019. ISSN 0957-4158.
- [11] David DANEY, Yves PAPEGAY et Blaise MADELINE : Choosing measurement poses for robot calibration with the local convergence method and Tabu search. *The International Journal of Robotics Research*, 24(6):501–518, 2005. ISSN 0278-3649.
- [12] J. A. DIT SANDRETTO, D. DANEY et M. GOUTTEFARDE : Calibration of a fully-constrained parallel cable-driven robot. *In 19th CISM-IFTOMM Symposium on Robot Design, Dynamics, and Control (ROMANSY 2012)*, Paris, France, 2012.
- [13] Alexis FORTIN-CÔTÉ, Philippe CARDOU et Clément GOSSELIN : An admittance control scheme for haptic interfaces based on cable-driven parallel mechanisms. *In Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 819–825, 2014. ISBN 978-1-4799-3685-4.
- [14] Lorenzo GAGLIARDINI, Stéphane CARO, Marc GOUTTEFARDE, Philippe WENGER et Alexis GIRIN : A reconfigurable Cable-Driven parallel robot for sandblasting and painting of large structures. *In Andreas POTT et Tobias BRUCKMANN, éditeurs : Mechanisms and Machine Science*, volume 32, pages 275–291, Cham, 2015. Springer International Publishing. ISBN 9783319094885.
- [15] S. GARRIDO-JURADO, R. MUÑOZ-SALINAS, F. J. MADRID-CUEVAS et R. MEDINA-CARNICER : Generation of fiducial marker dictionaries using Mixed Integer Linear Programming. *Pattern Recognition*, 51:481–491, 2016. ISSN 00313203. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320315003544>.
- [16] F GOSSELIN, C BIDARD et J BRISSET : Design of a High Fidelity Haptic Device for Telesurgery. *In Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 205–210, 2005. ISBN 1050-4729 VO -.
- [17] Peter F HOKAYEM et Mark W SPONG : Bilateral teleoperation : An historical survey. *Automatica*, 42(12):2035–2057, 2006. ISSN 0005-1098. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109806002871>.
- [18] Jean-Baptiste IZARD, Alexandre DUBOR, Pierre-Elie HERVÉ, Edouard CABAY, David CULLA, Mariola RODRIGUEZ et Mikel BARRADO : Large-scale 3D printing with cable-

- driven parallel robots. *Construction Robotics*, 1(1):69–76, 2017. ISSN 2509-8780. URL <https://doi.org/10.1007/s41693-017-0008-0>.
- [19] S. KAWAMURA et K. ITO : A new type of master robot for teleoperation using a radial wire drive system. In *Proceedings of 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '93)*, volume 1, pages 55–60, 1993. ISBN 0-7803-0823-9. URL <http://ieeexplore.ieee.org/document/583079/>.
- [20] Darwin LAU : Initial Length and Pose Calibration for Cable-Driven Parallel Robots with Relative Length Feedback. In Clément GOSSELIN, Philippe CARDOU, Tobias BRUCKMANN et Andreas POTT, éditeurs : *Cable-Driven Parallel Robots*, pages 140–151, Cham, 2018. Springer International Publishing. ISBN 978-3-319-61431-1.
- [21] Randel LINDEMANN et Delbert TESAR : Construction and demonstration of a 9-string 6 DOF force reflecting joystick for telerobotics. *Proceedings of the NASA Conference on Space Telerobotics*, 4:55–63, 1989. URL <http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CB09781107415324A009>.
- [22] A B LINTOTT et G R DUNLOP : Parallel topology robot calibration. *Robotica*, 15(4):395–398, 1997. ISSN 0263-5747. URL <https://www.cambridge.org/core/article/parallel-topology-robot-calibration/BE6F22CCD0DD6B0934D2E705F831F7A0>.
- [23] Thomas H MASSIE et J K SALISBURY : The PHANTOM Haptic Interface : A Device for Probing Virtual Objects, 1994.
- [24] Hannah MATTERN, Tobias BRUCKMANN, Arnim SPENGLER et Markus KÖNIG : Simulation of automated construction using wire robots. In *Proceedings of the 2016 winter simulation conference*, pages 3302–3313. IEEE Press, 2016. ISBN 1509044841.
- [25] Jacob MATTINGLEY et Stephen BOYD : CVXGEN : A code generator for embedded convex optimization. *Optimization and Engineering*, 13(1):1–27, 2012. ISSN 13894420.
- [26] Pierre MERRIAUX, Yohan DUPUIS, Rémi BOUTTEAU, Pascal VASSEUR et Xavier SAVATIER : A Study of Vicon System Positioning Performance. *Sensors*, 17(7), 2017. ISSN 1424-8220. URL <http://www.mdpi.com/1424-8220/17/7/1591>.
- [27] Ramy MEZIANE, Philippe CARDOU et Martin J.D. OTIS : Cable interference control in physical interaction for cable-driven parallel mechanisms. *Mechanism and Machine Theory*, 132:30–47, 2019. ISSN 0094114X. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094114X18301629>.
- [28] Philipp MIERMEISTER et Andreas POTT : Auto Calibration Method for Cable-Driven Parallel Robots Using Force Sensors. In Jadran LENARCIC et Manfred HUSTY, éditeurs : *Latest Advances in Robot Kinematics*, pages 269–276. Springer Netherlands, Dordrecht, 2012. ISBN 978-94-007-4619-0.

- [29] Rafael MUÑOZ-SALINAS, Manuel J. MARÍN-JIMENEZ, Enrique YEGUAS-BOLIVAR et R. MEDINA-CARNICER : Mapping and localization from planar markers. *Pattern Recognition*, 73:158–171, 2018. ISSN 00313203. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320317303151>.
- [30] Rendong NAN, Di LI, Chengjin JIN, Qiming WANG, Lichun ZHU, Wenbai ZHU, Haiyan ZHANG, Youling YUE et Lei QIAN : The five-hundred-meter aperture spherical radio telescope (FAST) project. *International Journal of Modern Physics D*, 20(06):989–1024, 2011. ISSN 0218-2718.
- [31] Michael E. NEWMAN : Helping to Clean Up a Disaster Inside the Chernobyl ‘Mega Tomb’, 2017. URL <https://www.nist.gov/nist-time-capsule/fixed-life-nist-help/helping-clean-disaster-inside-chernobyl-mega-tomb>.
- [32] D Q NGUYEN et M GOUTTEFARDE : Study of reconfigurable suspended cable-driven parallel robots for airplane maintenance. In *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1682–1689, 2014. ISBN VO -.
- [33] Amit J. PATEL et Kornel F. EHMANN : Calibration of a hexapod machine tool using a redundant leg. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(4):489–512, 3 2000. ISSN 08906955.
- [34] Matthew PICCOLI et Mark YIM : Cogging Torque Ripple Minimization via Position Based Characterization, 2014. URL <http://www.roboticsproceedings.org/rss10/p42.pdf>.
- [35] A POTT, C MEYER et A VERL : Large-scale assembly of solar power plants with parallel cable robots. In *ISR 2010 (41st International Symposium on Robotics) and ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics)*, pages 1–6, 2010. ISBN VO -.
- [36] Andreas POTT : *Cable-driven parallel robots : Theory and application*, volume 120. Springer International Publishing, 5 2018. ISBN 3319761382.
- [37] J RADOJICIC, D SURDILOVIC et J KRÜGER : Application challenges of large-scale wire robots in agricultural plants. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(4):77–82, 2013. ISSN 1474-6670. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016335121>.
- [38] P. RENAUD, N. ANDREFF, F. MARQUET et P. MARTINET : Vision-based kinematic calibration of a H4 parallel mechanism. *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422)*, 1:1191–1196, 2003. ISSN 1050-4729.
- [39] Francisco J. ROMERO-RAMIREZ, Rafael MUÑOZ-SALINAS et Rafael MEDINA-CARNICER : Speeded up detection of squared fiducial markers. *Image and Vision Computing*, 76:38–47, 2018. ISSN 02628856. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0262885618300799>.

- [40] Dongseok RYU, Jae-Bok SONG, Changhyun CHO, Sungchul KANG et Munsang KIM : Development of a six DOF haptic master for teleoperation of a mobile manipulator. *Mechatronics*, 20(2):181–191, 2010. ISSN 0957-4158. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957415809001895>.
- [41] T B SHERIDAN et W R FERRELL : Remote Manipulative Control with Transmission Delay. *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, HFE-4(1):25–29, 1963. ISSN 0096-249X VO - HFE-4.
- [42] José Pedro SOUSA, Cristina Gassó PALOP, Eduardo MOREIRA, Andry Maykol PINTO, José LIMA, Paulo COSTA, Pedro COSTA, Germano VEIGA et A PAULO MOREIRA : The SPIDERobot : A Cable-Robot System for On-site Construction in Architecture BT - Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016. pages 230–239, Cham, 2016. Springer International Publishing. ISBN 978-3-319-26378-6. URL https://doi.org/10.1007/978-3-319-26378-6_17.
- [43] Satoshi TADOKORO, Richard VERHOEVEN, Manfred HILLER et Toshi TAKAMORI : A portable parallel manipulator for search and rescue at large-scale urban earthquakes and an identification algorithm for the installation in unstructured environments. *In Proceedings 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human and Environment Friendly Robots with High Intelligence and Emotional Quotients (Cat. No. 99CH36289)*, volume 2, pages 1222–1227. IEEE, 1999. ISBN 0780351843.
- [44] Hongbo WANG, Tianqi GAO, Jun KINUGAWA et Kazuhiro KOSUGE : Finding Measurement Configurations for Accurate Robot Calibration : Validation with a Cable-Driven Robot. *IEEE Transactions on Robotics*, 33(5):1156–1169, 2017. ISSN 15523098.
- [45] Robert L. WILLIAMS, Ming XIN et Paul BOSSCHER : Contour-crafting-cartesian-cable robot system concepts : Workspace and stiffness comparisons. *In Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, volume 2, pages 31–38, 8 2008. ISBN 9780791843260. URL <https://doi.org/10.1115/DETC2008-49478>.
- [46] Peng-Fei YANG, Maximilian SANNO, Gert-Peter BRÜGGEMANN et Jörn RITTWEGGER : Evaluation of the performance of a motion capture system for small displacement recording and a discussion for its application potential in bone deformation in vivo measurements. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H : Journal of Engineering in Medicine*, 226(11):838–847, 7 2012. ISSN 0954-4119. URL <https://doi.org/10.1177/0954411912452994>.
- [47] Z Q ZHU et D HOWE : Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 15(4):407–412, 2000. ISSN 0885-8969.

- [48] H ZHUANG, J YAN et O MASORY : Calibration of Stewart platforms and other parallel manipulators by minimizing inverse kinematic residuals. *Journal of Robotic Systems*, 15:395–405, 1998. ISSN 07412223.
- [49] Hanqi ZHUANG, Oren MASORY et Jiahua YAN : Kinematic calibration of a Stewart platform using pose measurements obtained by a single theodolite. *Intelligent Robots and Systems 95. 'Human Robot Interaction and Cooperative Robots', Proceedings. 1995 IEEE/RSJ International Conference on*, 2:329–334, 1995.