



HAL
open science

Modélisation et identification géométrique de robots utilisés pour des opérations d'usinage

José Gutierrez Tapia

► **To cite this version:**

José Gutierrez Tapia. Modélisation et identification géométrique de robots utilisés pour des opérations d'usinage. Médecine humaine et pathologie. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2016. Français. NNT : 2016CLF22728 . tel-01469691

HAL Id: tel-01469691

<https://theses.hal.science/tel-01469691>

Submitted on 16 Feb 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'ordre : D. U : 2728
EDSPIC : 771

UNIVERSITE BLAISE PASCAL - CLERMONT II

ECOLE DOCTORALE

SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE CLERMONT-FERRAND

T h è s e

Présentée

pour obtenir le grade de

DOCTEUR D'UNIVERSITÉ

SPECIALITE : Génie Mécanique

par

José GUTIERREZ

**Modélisation et Identification géométrique de robots
utilisés pour des opérations d'usinage.**

Soutenue publiquement le 20 septembre 2016 devant le jury :

M. TOURNIER Christophe	Professeur Univ., ENS de Cachan	Président
M. RENAUD Pierre	Professeur Univ., INSA Strasbourg	Rapporteur
M. FURET Benoît	Professeur Univ., IUT de Nantes	Rapporteur
Mme. CHANAL Hélène	Maître de Conf. HDR SIGMA-Clermont	Directeur de thèse
M. DUC Emmanuel	Professeur Univ., SIGMA-Clermont	Encadrant de thèse
Mme. DURIEUX Séverine	Maître de Conf., SIGMA-Clermont	Encadrant de thèse

Remerciements

Je tiens à remercier à tous les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail, à M. Christophe TOURNIER d'avoir présidé le jury et à M. Pierre RENAUD et M. Benoît FURET d'avoir accepté de rapporter mon mémoire de thèse. La lecture attentive de mon manuscrit et ses remarques m'ont été très précieuses.

Merci également à Hélène CHANAL qui dès début de ce travail, elle m'a encouragé, soutenu et surtout fait confiance durant ces années de thèse. J'ai beaucoup appris à son contact pour tout ce qu'elle m'a apporté. Également mes remerciement iront à Emmanuel DUC qui durant ces années m'a aidé, et qui par sa bonne humeur m'a permis de travailler dans d'excellentes conditions. Je remercie aussi à Séverine DURIEUX, encadrant de thèse pour sa disponibilité et ses remarques. Leurs expertises et leurs remarques avisées m'auront permis de prendre du recul sur mes travaux et de les voir sous un angle nouveau.

Il me faut remercier l'ensemble des personnes de l'IFMA (SIGMA-Clermont) que j'ai eu le bonheur de rencontrer, ils ont également beaucoup contribué à la réussite de ce travail.

Un grand remerciement à ma famille, cette thèse n'aurait pu en voir le jour sans le soutien et l'attention d'eux en chaque instant : mon épouse Zulimar, qui a su me soutenir et me comprendre ; aussi à mes filles Crismar et Elizmar pour me donner tous les jours de la joie et de la motivation.

Ces lignes sont pour ma famille en Vénézuéla qui bien qu'éloignée par la distance durant ces années m'a toujours soutenu et accompagné.

Table des matières

Introduction	11
Chapitre 1 Les robots industriels pour l'usinage.....	15
1 L'évolution des robots dans l'industrie	15
2 Robots sériels pour le pré-usinage.....	18
3 Analyse du comportement des robots pénalisant pour l'usinage	21
4 Conclusion	25
Chapitre 2 Maîtrise de la précision des robots sériels	27
1 Définitions.	28
1.1 Robots sériels.	28
1.2 Espace de travail.....	30
1.3 Pose de l'effecteur	31
1.4 Précision statique de la pose de l'effecteur final.	31
1.5 Modèle géométrique des robots.	33
1.6 Conclusion.	34
2 Précision des robots sériels.	34
2.1 Précision attendue en fonction de la tâche.	34
2.2 Cause des erreurs de précision de pose des robots.....	36
2.3 Conclusion.	38
3 Etalonnage géométrique des robots.....	39
3.1 La modélisation.	40
Modèle de Denavit Hartenberg (DH)	41
Modèle de Khalil.....	43
Modèle de Hayati et variantes.	45
Modèle Travelling Coordinate System (TCS).	48
3.2 La mesure.	49
Théodolite	50
Laser Tracking.....	51
Vision.....	52

BallBar	53
Conclusion	55
3.3 L'identification.....	55
4 Problématique.....	56
4.1 Constat	56
5 Objectif des travaux	57
Chapitre 3 Evaluation de la précision d'un robot d'usinage.	59
1 Présentation du robot ABB IRB 6660.	60
1.1 Introduction.	60
1.2 Description du robot ABB IRB 6660.	60
1.3 Modélisation géométrique du robot ABB 6660	62
1.4 Modèle sérielle ouvert.	63
2 Protocole de mesure de la pose réelle du robot.....	68
3 Mesure de la pose des 66 points.....	73
4 Identification du modèle	79
5 Conclusions	81
Chapitre 4.....	83
Proposition d'un modèle géométrique des robots d'usinage en fonction de l'espace de travail	83
1 Analyse de la structure du robot ABB IRB 6660.....	84
1.1 Analyse de l'architecture du robot.....	84
2 Modèles géométriques du robot.	86
2.1 Modèles sériel du robot	86
2.2 Modèle avec parallélogramme.	89
3 Identification des paramètres.	93
4 Analyse de sensibilité des paramètres géométriques	99
5 Identification d'un nouveau modèle.....	102
6 Généralisation de la méthodologie de modélisation	104
7 Conclusions.	105
Conclusions et perspectives	107
Références bibliographiques.....	109

Table des illustrations

Figure 1- 1 Approvisionnement mondiale de robots (source : IFR World Robotics, 2015)	15
Figure 1- 2 Robot Unimate	16
Figure 1- 3 L'évolution des robots industriels.	17
Figure 1- 4 Robot pour l'usinage ABB IRB 6660 [ABB]	18
Figure 1- 5 Robot ABB pour le fraisage [Machine-outil]	19
Figure 1- 6 Robot Kuka pour l'usinage d'une pièce de grande dimension [Kuka]	20
Figure 1- 7 Robot RX170 hsm de Staübli [STAUBLI]	20
Figure 1- 8 Trajectoires mesurées.	22
Figure 1- 9 Trajectoires dans le plan X-Y.	23
Figure 1- 10 Trajectoire dans le plan X-Z.	24
Figure 1- 11 Trajectoire dans les plans X-Y et X-Z.	24
Figure 2- 1 Classifications des robots selon leur structure cinématique. (a) Sériel, (b) Parallèle et (c) Hybride.	28
Figure 2- 2 Robot sériel ABB IRB 6600.	29
Figure 2- 3 Robots à structure sérielle.	29
Figure 2- 4 Robot ABB 6660.	30
Figure 2- 5 Espace de travail du robot IRB 6660 [ABB]	31
Figure 2- 6 Exactitude et répétitivité.....	32
Figure 2- 7 Modèles géométriques.	33
Figure 2- 8 Amplitude et fréquence des erreurs d'usinage et ses causes [Pritschow02].	38
Figure 2- 9 Notation de Denavit-Hartenberg [Craig05].....	41
Figure 2- 10 Différences entre les notations des modèles. a) DH, b) Paul et c) Craig. [Lipkin05].....	43
Figure 2- 11 Notation de Khalil et Kleinfinger [Khalili99].	44
Figure 2- 12 Structure du type parallélogramme dans le robot ABB IRB 6660.....	45
Figure 2- 13 Illustration de la convention des repères du modèle de Hayati [Horne12].....	46
Figure 2- 14 S-model [Stone87].....	47
Figure 2- 15 Model Zéro-référence avec le robot PUMA 560 [Mooring91].	48
Figure 2- 16 Théodolite TMC100A [Leica].	50
Figure 2- 17 Système Théodolite [Bernhardt93].	51
Figure 2- 18 Laser Tracker FARO [FARO].	52
Figure 2- 19 Mesure par vision, (a) caméra dans les environs du robot [Renaud03] (b) caméra montée sur l'effecteur du robot [Guanglog13].	53
Figure 2- 20 Mesure avec BallBar [Renishaw].	54
Figure 2- 21 Exemple de mesure au BallBar [Prevost11].	54

Figure 3- 1 Axes du robot ABB IRB 6660.	60
Figure 3- 2 Dimensions géométriques du robot ABB IRB 6660.....	61
Figure 3- 3 Broche Fisher MFW-1412 [Fisher].	62
Figure 3- 4 Paramètres géométriques, formalisme de Khalil-Kleinfinger.....	62
Figure 3- 5 Modèle sériel du robot.	63
Figure 3- 6 Position et orientation du repère de référence de la broche par rapport au repère de la base du robot.	65
Figure 3- 7 Dimensions de la Broche.....	66
Figure 3- 8 Modèle TCS du robot ABB 6660.	67
Figure 3- 9 Résumé protocole d'essais.....	69
Figure 3- 10 Laser Tracker Leica ATD-901.	70
Figure 3- 11 Repères équerre.....	70
Figure 3- 12 Disposition de l'équerre, le Laser Tracker et le palpeur.	71
Figure 3- 13 Les espaces de travail étudiés.....	72
Figure 3- 14 Les 66 points sur l'espace de travail.....	73
Figure 3- 15 Le robot et le Laser Tracker dans la phase de mesure.....	74
Figure 3- 16 Erreur de position initiale dans l'espace de travail n°1.....	74
Figure 3- 17 Surfaces des erreurs de position initiale dans l'axe X , essai N°1.	75
Figure 3- 18 Surfaces des erreurs de position initiale dans l'axe Y , essai N°1.	75
Figure 3- 19 Surfaces des erreurs de position initiale dans l'axe Z , essai N°1.....	76
Figure 3- 20 Erreur de position initiale essai N°2.....	76
Figure 3- 21 Surfaces des erreurs de position initiale dans l'axe X , essai N°2.	77
Figure 3- 22 Surfaces des erreurs de position initiale dans l'axe Y , essai N°2.	77
Figure 3- 23 Surfaces des erreurs de position initiale dans l'axe Z , essai N°2.....	77
Figure 3- 24 Erreur de position résiduelle pour le modèle à 6 paramètres, espace n°1.	81
Figure 3- 25 Erreur de position résiduelle pour le modèle à 6 paramètres, espace n°2.	81
Figure 4- 1 Schéma cinématique du robot.....	84
Figure 4- 2 Graphe de liaisons du mécanisme du robot.	85
Figure 4- 3 Modèle à 9 paramètres.....	87
Figure 4- 4 Modèle à 11 paramètres.....	88
Figure 4- 5 Modèle de DH en bleu et modèle à 21 paramètres en vert.	89
Figure 4- 6 Modèle parallèle du robot.	90
Figure 4- 7 Relations des paramètres du parallélogramme.....	90
Figure 4- 8 Modèle à 42 paramètres avec les erreurs de position et d'orientation.	92
Figure 4- 9 Erreur résiduelle du modèle à 6 paramètres S_6.	94
Figure 4- 10 Erreur résiduelle du modèle à 9 paramètres S_9.	94
Figure 4- 11 Erreur résiduelle du modèle à 11 paramètres S_11.	94
Figure 4- 12 Erreur résiduelle du modèle à 21 paramètres S_21.	95
Figure 4- 13 Erreur résiduelle du modèle à 9 paramètres P_9.	95
Figure 4- 14 Erreur résiduelle du modèle à 12 paramètres P_12.	95
Figure 4- 15 Erreur résiduelle du modèle à 21 paramètres P_21.	96
Figure 4- 16 Erreur résiduelle du modèle à 42 paramètres P_42.	96

Figure 4- 17 Erreur résiduelle du modèle TCS_6.....	96
Figure 4- 18 Erreur résiduelle du modèle TCS_9.....	97
Figure 4- 19 Erreur résiduelle du modèle TCS_21.....	97
Figure 4- 20 Erreur maximale de position des modèles.....	97
Figure 4- 21 Influence maximum des paramètres dans l'axe X, Y et Z pour 66 points.....	100
Figure 4- 22 Influence maximum des paramètres dans l'axe X, Y et Z pour 18750 points.....	101
Figure 4- 23 Erreur résiduelle du nouveau modèle.	103

Index des tableaux

Tableau 2- 1 Tolérances commerciales des procédés d'usinage [Kalpakjian08].	35
Tableau 2- 2 Types de causes des erreurs.....	37
Tableau 2- 3 Comparaison des conventions des repères.	43
Tableau 3- 1 Caractéristiques de la broche [Fisher].....	61
Tableau 3- 2 Paramètres du robot.	63
Tableau 3- 3 Résumé des résultats des identifications des erreurs initiales Essai N°1.....	78
Tableau 3- 4 Résumé des résultats des identifications des erreurs initiales Essai N°2.....	78
Tableau 4- 1 Modèles du robot développés.	93
Tableau 4- 2 Erreur spatiale maximale de position du point piloté de l'outil pour chacun des modèles.....	98
Tableau 4- 3 Course de variables articulaires du robot.	101
Tableau 4- 4 Identification des paramètres.	102

Introduction

L'utilisation des robots sériels pour des opérations d'usinage est devenue un enjeu de développement des robots ces dernières années. L'objectif est de proposer une alternative aux machines-outils. Ainsi, des robots gros porteurs 6 axes sont proposés par les fabricants et concepteurs de robots. Toutefois, les robots développés présentent des précisions de suivi de trajectoire uniquement de l'ordre du dixième de millimètre, même si leur rigidité a été améliorée par rapport aux robots utilisés pour des opérations moins exigeantes. En effet, les comportements géométrique, statique et dynamique de ces robots ne permettent pas de réaliser des usinages avec une grande précision. Le comportement géométrique observé sans sollicitation de la structure par une tâche particulière montre déjà une erreur de suivi de trajectoire de l'ordre du dixième de millimètre. Ce rapport de thèse s'intéresse à l'étude de la précision géométrique de robots sériels utilisés pour l'usinage, et plus particulièrement à la proposition d'une méthodologie de définition du modèle géométrique et d'identification des paramètres géométriques associés.

Les erreurs géométriques de pose de l'effecteur de l'outil sont principalement dues aux erreurs de transformation cinématique inverse résultant des incohérences entre le comportement du modèle géométrique implémenté dans la commande du robot et le comportement géométrique réel de la structure du robot. En effet, la structure du robot est fabriquée et usinée ; le comportement géométrique du robot est donc influencé par les défauts d'usinage et d'assemblage des éléments le composant. Ces défauts bornés par le tolérancement mis en place génèrent un écart entre les dimensions nominales du robot et les dimensions réelles de la structure assemblée. Il est alors nécessaire d'identifier les dimensions influentes sur la pose de l'effecteur final et de les maîtriser soit par un tolérancement adapté, soit par le développement d'un modèle géométrique adapté associé à une méthode d'identification de ces paramètres géométriques.

Les modèles géométriques des robots reposent généralement sur un ensemble d'équations mathématiques permettant de définir la pose de l'effecteur final en fonction des valeurs des variables articulaires et de paramètres géométriques. Les méthodes de modélisation les plus répandues reposent généralement sur le formalisme de Denavit-Hartenberg (DH). Ce formalisme est enrichi par divers travaux scientifiques afin de s'adapter

plus particulièrement à certains types de structures. Toutefois, la complexité des modèles développés ne garantit pas une meilleure précision géométrique. En effet, l'ajout de paramètres géométriques rend le modèle plus sensible aux erreurs d'identification. Il est nécessaire de limiter le nombre de paramètres géométriques aux paramètres influents et identifiables.

De même, afin d'améliorer la précision de réalisation d'une tâche, il est nécessaire d'étudier l'influence de chaque paramètre géométrique sur la tâche et d'identifier ses paramètres dans les conditions de réalisation de la tâche. En effet, l'objectif n'est pas de garantir une précision de pose absolue du robot dans tout son espace de travail mais de se focaliser sur la précision de réalisation de la tâche. Pour cela, il faut se concentrer sur les poses de l'effecteur ayant une influence sur la précision de réalisation de la tâche dans l'espace de travail nécessaire à la tâche. Ainsi, dans le cas de l'usinage, les défauts de pose autour de l'axe de rotation de l'outil ne sont pas influents sur la qualité de réalisation d'une pièce et il est nécessaire de maîtriser la qualité de pose de l'outil uniquement dans l'espace de travail où se situe l'opération d'usinage. L'objectif de ces travaux est de contribuer à la réponse au besoin de déterminer une cohérence entre la précision géométrique attendue d'un robot pour réaliser une tâche, la méthode de génération du modèle géométrique implémenté dans la commande, la méthode d'identification des paramètres géométriques et la qualité de fabrication et d'assemblage de la structure du robot.

Il existe différents critères pour caractériser la précision d'un robot comme par exemple l'exactitude et la répétabilité ; de même cette précision est influencée par des autres facteurs comme : la vitesse, la charge ou la localisation de la tâche à effectuer pour le robot. Dans ces travaux, nous nous intéressons à l'amélioration des erreurs d'exactitude du robot dans le cadre d'opération d'usinage. En effet, ce type d'opération impose la programmation hors ligne des trajectoires par rapport à un repère pièce. Après positionnement de ce repère dans l'espace de travail, le suivi de ces trajectoires doit permettre d'obtenir la pièce avec la qualité d'usinage désirée.

Nous proposons dans ces travaux d'apporter une contribution sur la définition du nombre et de la nature des paramètres géométriques d'un robot sériel équipé d'une broche afin d'améliorer la maîtrise de la précision de réalisation d'une tâche. Dans un premier temps, nous allons présenter le contexte de l'utilisation des robots sériels pour l'usinage et ses contraintes. Nous présentons, ensuite, des méthodes de modélisation et d'étalonnage des robots sériels. Finalement, nous réalisons le processus d'identification et d'optimisation des paramètres pour conduire à un nouveau modèle géométrique.

La suite de ce document est organisée de la manière suivante :

1.- D'abord, dans le chapitre 1, nous montrons l'évolution des robots sériels jusqu'à nos jours dans le domaine industriel. Des robots utilisés pour l'usinage ainsi que les inconvénients rencontrés sont présentés afin d'identifier les limitations actuelles dans l'utilisation de ces robots en usinage. A la fin de ce chapitre, nous présentons les mesures réalisées pour qualifier le comportement des robots pendant le suivi d'une trajectoire.

2.- Le chapitre 2 permet d'introduire les définitions relatives aux robots sériels ainsi qu'à la notion de précision. Nous précisons les termes de base utilisés tout au long de ce manuscrit et nous détaillons le processus d'étalonnage des paramètres géométriques depuis la modélisation du robot, en passant par la mesure de l'erreur de pose et finissant par le processus d'optimisation d'une fonction coût minimisant l'écart entre les valeurs des positions mesurées et des positions commandées.

3.- Le troisième chapitre s'intéresse à l'évaluation de la précision d'un robot d'usinage, nous définissons les caractéristiques du robot ABB IRB 6660 ainsi qu'un modèle géométrique initial. Nous proposons ensuite différents modèles géométriques de ce robot en fonction de ses caractéristiques structurales. Un protocole de mesure de la position réelle est proposé et des mesures dans deux espaces différents de travail du robot sont étudiées pour aboutir à la définition des erreurs initiales ou des erreurs « usine ».

4.- Le dernier chapitre se concentre sur l'identification des paramètres géométriques de chaque modèle développé et des erreurs résiduelles. Nous proposons ensuite une amélioration du modèle du robot en déterminant les paramètres les plus influents à partir d'une analyse de la matrice de sensibilité du modèle géométrique et de l'étude de rang de cette matrice.

Chapitre 1

Les robots industriels pour l'usinage

Ce chapitre présente le contexte de la robotique industrielle et plus particulièrement son évolution et son usage dans le cadre de l'usinage. L'objectif de ce chapitre est de donner une synthèse générale des robots anthropomorphes sériels en termes d'avantages pour une utilisation en usinage. Pour cela, dans un premier temps, nous présentons l'évolution des robots dans l'industrie et leurs débuts dans le domaine de l'usinage. Puis nous présentons une analyse des besoins des industriels en termes de précision pour des applications d'usinage. Enfin nous exprimons les problèmes industriels rencontrés à l'heure actuelle.

1 L'évolution des robots dans l'industrie

Depuis les années 60, de plus en plus de processus industriels sont automatisés afin de répondre à des problématiques de maîtrise de la qualité produite, de la productivité et des coûts. Une des méthodes d'automatisation repose sur la robotisation. La Figure 1- 1 montre l'évolution de la demande mondiale de robots au cours des 10 dernières années.

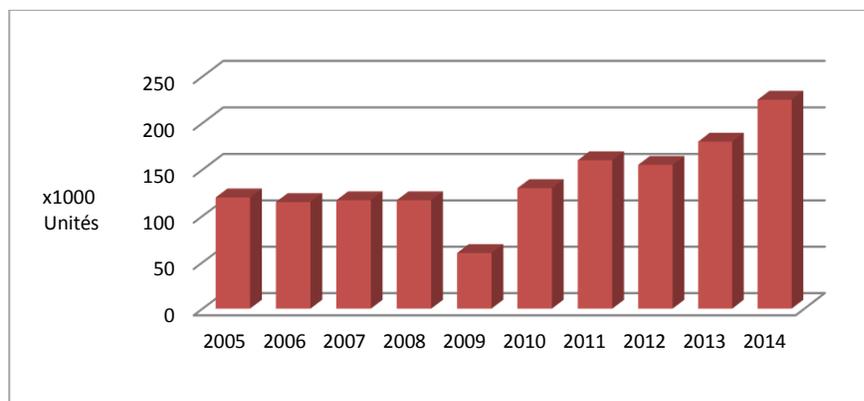


Figure 1- 1 Approvisionnement mondial de robots (source : IFR World Robotics, 2015)

Pour la période 2015 – 2017, une croissance de la demande annuelle moyenne de 16% est attendue en Asie et Australie et de 6% en Amérique et Europe [IFRa].

L'industrie automobile est la plus demandeuse en robots industriels. En effet, depuis son apparition, l'utilisation des robots industriels a principalement consisté à réaliser des opérations dangereuses pour l'être-humain. Le premier robot industriel, appelé Unimate, a été créé en 1959 par George Devol et Joe Engelberger [IFRb]. Il a été utilisé la première fois en 1961 sur les chaînes de montage de General Motors, pour déposer des pièces de métal à très haute température dans des bains de refroidissement. Le robot Unimate pesait 2 tonnes, utilisait des actionneurs hydrauliques et était contrôlé par un programme gravé sur un disque magnétique (Figure 1- 2).



Figure 1- 2 Robot Unimate

En 1974, en France, la Direction des Techniques Avancées en Automatismes (DTAA) coopère avec la Société Française d'Etude et de Réalisation de Machines-Outils (SOFREMO) sur la conception de robots. Ces robots sont intégrés la première fois par l'entreprise Renault en 1976.

En 1970, la première conférence sur les robots industriels est organisée à Chicago aux Etats Unis, l'ISIR (International Symposium on Industrial Robots). Après cet évènement, le Robot Institute of America (RIA) a été créé [NOF99]. En 1987, la conférence change de nom et devient l'ISR (International Symposium of Robotics) jusqu'à nos jours.

Dans les années 70, KUKA développe le robot Famulus, le premier robot avec six axes électromécaniques. Dès lors, l'activité dans le domaine des robots industriels n'a cessé de croître de manière significative. Nous pouvons noter les faits marquants suivants :

- Hitachi, en 1970, développe le premier robot avec l'intégration de capteurs de vision dynamique pour détecter les objets en mouvement.

- L'entreprise Cincinnati Milacron Corporation crée en 1974 le robot T3, le premier robot commandé par un microprocesseur.

- ASEA en 1974 développe le premier robot ARB 6, avec un microprocesseur Intel 8bit.

- En 1978, General Motors intègre, avec l'entreprise Unimation/Vicarm, un robot PUMA pour l'assemblage des pièces plus légères.

- Cette même année (1978), Hiroshi Makino de l'Université de Yamanashi développe le robot SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) [Bonet14].

- En 1981 à l'Université de Carnegie Mellon aux Etas Unis, Haruiko Asada et Takeo Kanade proposent une méthode de conception de mécanismes de transmission pour les bras robotiques, le Direct Drive Arm. Ce mécanisme permet aux robots de se déplacer avec précision à grande vitesse [Haruiko81].

- En 2006, Comau en Italie introduit le WiTP (Wireless Tech Pendant), une unité de contrôle et programmation des robots sans fil.

- La même année, en Allemagne, KUKA développe un robot avec une structure extérieure en aluminium afin de réduire son poids et réaliser des économies d'énergie [KUKA].

La Figure 1- 3 illustre les différents robots présentés ci-dessus.

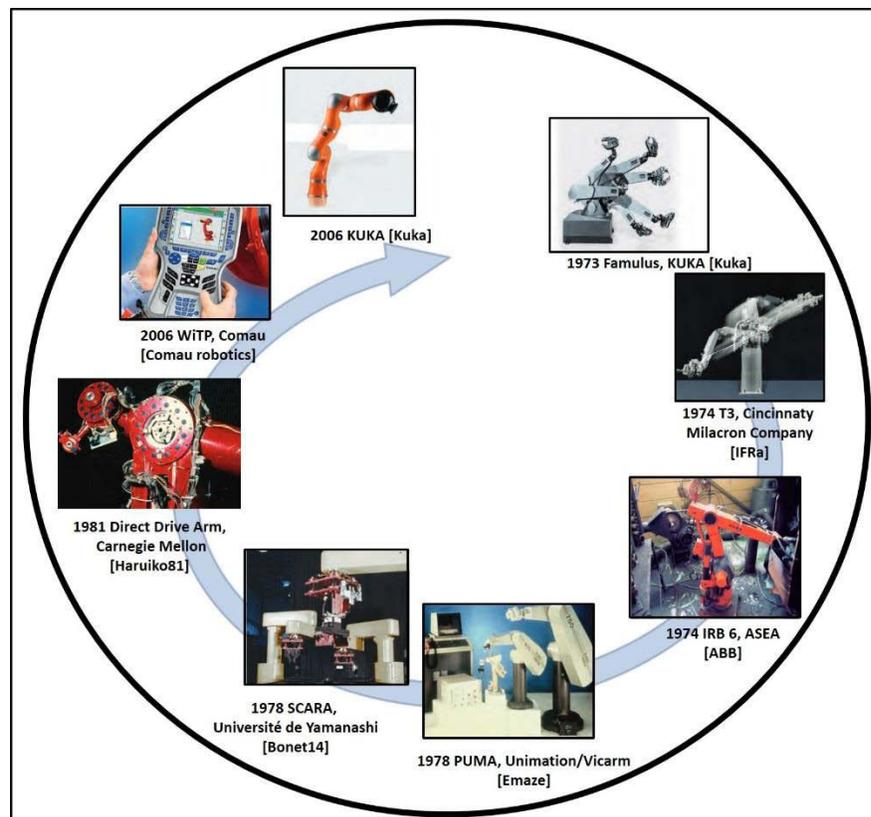


Figure 1- 3 L'évolution des robots industriels.

2 Robots sériels pour le pré-usinage

Dans un premier temps les robots sériels étaient utilisés pour des opérations industrielles simples : assemblage, manipulation, découpe, peinture et soudage de pièces. En effet, ces opérations exigent une précision de remise en position et de suivi de trajectoire assez faible. Toutefois, à l'heure actuelle, les robots font de nombreuses autres tâches industrielles plus complexes.

Ainsi, les robots sériels sont, de plus en plus, utilisés dans les secteurs aéronautiques et automobiles, pour des opérations de pré-usinage, perçage, polissage, découpage et parachèvement des pièces. Mais seulement 3% à 4% des robots industriels sont dédiés à l'usinage [Milutinovic10] [Denkena13]. Les performances de ces robots sont généralement comparées à celle des machines-outils qui ont été spécifiquement conçues pour des opérations d'usinage avec une précision de l'ordre de 0,01 mm.

Malgré la faible utilisation des robots manipulateurs sériels dans les opérations d'usinage celui-ci proposent un certain nombre d'avantages par rapport aux machines-outils comme une adaptabilité élevée, un bas coût, un grande espace de travail et un nombre important d'applications différentes [Dendeka13] [ERM] [KUKA].

Ainsi, les entreprises concevant et fabricant des robots continuent de développer des robots plus performants afin de proposer une alternative aux machines-outils. Nous pouvons citer ABB Robotique avec son robot à haute performance IRB 6660, son premier robot dédié au pré-usinage des pièces de fonderie, pour des applications telles que le fraisage, le découpage et le sciage [ABB] (Figure 1- 4)



Figure 1- 4 Robot pour l'usinage ABB IRB 6660 [ABB]

Ce robot est, à ce jour, présenté comme le robot polyarticulé à 6 axes le plus rigide proposé sur le marché. Il a été conçu pour répondre à des exigences de compacité, de robustesse et de sollicitation par des efforts importants et variables générés par processus de fabrication.

L'avantage de ce robot vis-à-vis d'une machine-outil repose sur son grand rayon d'action tout en respectant une certaine capacité de charge (le robot ABB 6660-205/1.9 a un rayon d'action de 1,9 m. et une capacité de charge de 205 Kg.).

La Société Axioma a installé un robot ABB 6640 pour le fraisage de produits en composites polyester tels que des vasques et de lavabos. Le choix de ce robot est basé sur son grand rayon d'action (2,8 m.) et sur sa capacité de charge permettant de recevoir une broche de fraisage et supporter les efforts de coupe (Figure 1- 5)



Figure 1- 5 Robot ABB pour le fraisage [Machine-outil]

Les travaux sur les pièces de grandes dimensions montrent un gain significatif lié à l'utilisation de robots sériels comme dans l'exemple précédent. Un autre exemple concerne l'usinage de pièces de grandes dimensions avec un robot de l'entreprise KUKA. La pièce à usiner a une longueur de 1524 cm et une hauteur allant jusqu'à 366 cm. Un robot KUKA KR 100 L80 a été monté sur une unité linéaire de 13 m (Figure 1- 6).



Figure 1- 6 Robot Kuka pour l'usinage d'une pièce de grande dimension [Kuka]

Dans les deux cas précédents, une broche a été ajoutée au dernier bras du robot comme effecteur final, cela permet d'intégrer différents outils nécessaires pour les opérations de fabrication à réaliser comme le fraisage, le perçage, la rectification ou le polissage. D'autres robots sériels comme le robot RX170 hsm (high speed machining) de Staübli ont une conception basée sur les besoins effectifs des opérations d'usinage en termes d'accessibilité. Ainsi, le nombre de degrés de liberté a été réduit à 5 afin d'intégrer une électro-broche dans l'avant-bras et ainsi d'améliorer la rigidité et la précision de pose de l'outil en réduisant le porte-à-faux de l'outil [STAUBLI] (Figure 1- 7).



Figure 1- 7 Robot RX170 hsm de Staübli [STAUBLI]

Finalement, nous pouvons constater que les concepteurs de robots font de plus en plus d'évolutions, afin de concevoir des robots dédiés à l'usinage. Les évolutions mises en place permettent de diminuer les inconvénients présentés dans le paragraphe suivant.

3 Analyse du comportement des robots pénalisant pour l'usinage

Malgré l'avancée de l'utilisation des robots sériels pour l'usinage, ces robots présentent aujourd'hui, des faiblesses qui limitent leur utilisation en termes d'usinage notamment au niveau de la précision de pose de l'outil et de suivi de trajectoire.

Parmi les inconvénients rencontrés sur les robots sériels, nous pouvons citer notamment :

- Le rapport faible entre les masses mobiles et la masse totale des robots sériels anthropomorphes par rapport à d'autres types d'architectures : dans le cas d'une architecture sérielle classique, l'effecteur final et son outil se situent à l'extrémité de la structure mécanique, chaque moteur-actionneur doit avoir la puissance suffisante pour mettre en mouvement l'ensemble des éléments constituant le robot y compris l'effecteur final.
- La limitation des vitesses et accélérations atteignables du fait des masses et des inerties importantes de ces éléments.
- La faible précision de pose de l'outil, due en partie, aux erreurs cumulées de pose de chaque articulation. En effet, la structure sérielle du robot fait, qu'une erreur de positionnement de chaque articulation a une répercussion sur la position finale de l'effecteur.
- La valeur faible de la première fréquence propre du robot qui le rend plus sensible à l'apparition de vibrations dû à la sollicitation de l'usinage

L'ensemble de ces phénomènes génèrent une dégradation de la qualité de pose de l'outil et donc de la qualité de la surface usinée. Ainsi, si l'axe de l'outil d'usinage n'est pas orthogonal au mouvement d'avance de l'outil, des marques caractéristiques apparaissent sur la surface usinée par le flanc [Olofsson15].

De plus, la précision de pose de l'outil atteignable par des robots sériels n'est pas suffisante pour répondre aux exigences industrielles en termes de tolérances d'usinage de pièces finies. Par exemple, pour le processus de fraisage, les tolérances désirées sont généralement de l'ordre de 0,02 à 0,25 mm [Wu14]. La précision effective des robots sériels en usinage est, lui, de l'ordre de 0,2 mm.

Le niveau de précision dans le suivi de trajectoires est, aussi, de grande importance ; par exemple dans le processus de parachèvement, le robot doit être capable de supprimer de la pièce toutes les marques inhérentes aux procédés de fabrication pour répondre aux critères du cahier de charges du client.

A cet égard, nous présentons, dans la suite, des essais réalisés sur un robot sériel anthropomorphe IRB 6660 de ABB sur lequel nous avons mesuré la trajectoire du point piloté du robot suivant plusieurs cas.

La mesure de la trajectoire est faite par un instrument laser dédié : un Laser Tracker ATD-901 de l'entreprise Leica lequel a été réglé pour faire des mesures dynamiques de la trajectoire.

Les trajectoires mesurées sont faites suivant l'axe X du repère du robot en partant de du point 1 de coordonnées (1200, -700, 850) jusqu'au point 2 de coordonnées (1700, -700, 850) dans le repère de base du robot. La trajectoire est programmée de différentes manières : avec seulement le point de départ (point 1) et le point final (point 2) (trajectoire a), en passant pour un point au milieu de la trajectoire (trajectoire b), en passant pour 3 points entre le point départ et de fin (trajectoire c) et, finalement, en passant par 9 points entre le point de départ et de fin (trajectoire d). La vitesse linéaire moyenne programmée pour le parcours des trajectoires est de 10mm/s.

Les trajectoires décrites sont montrées dans la Figure 1- 8.

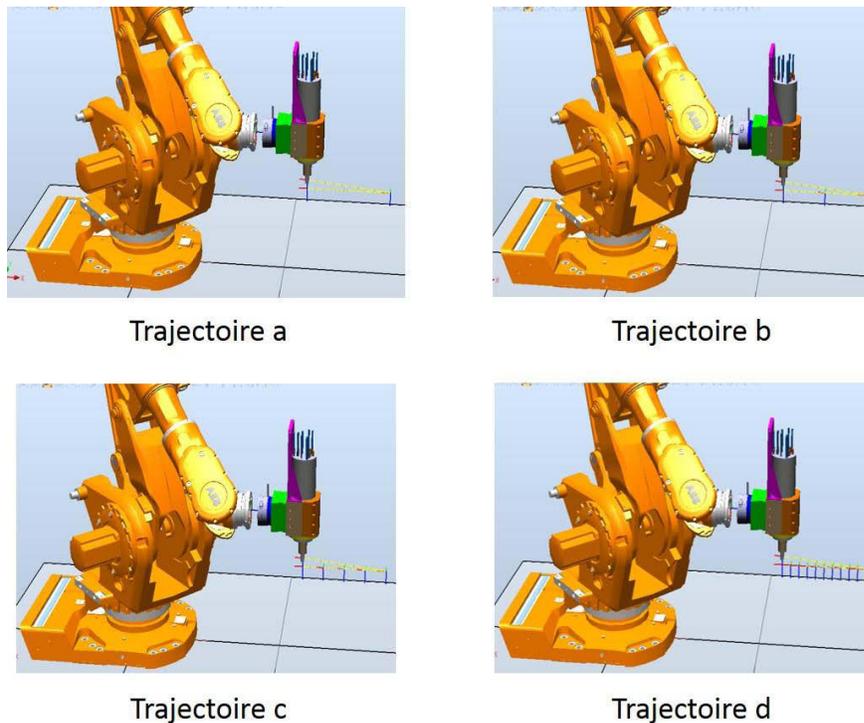


Figure 1- 8 Trajectoires mesurées.

L'objectif est d'étudier l'influence du nombre de points de passage utilisés sur la trajectoire suivie par le robot. De plus, nous allons, aussi, étudier l'influence de la vitesse

linéaire programmée. Deux vitesses seront utilisées pour parcourir la trajectoire de 5mm/s et 10mm/s.

Les erreurs de position entre la mesure du Laser Tracker et la commande du robot dans le plan X - Y sont montrées dans la Figure 1- 9.

Les erreurs de position entre la mesure du Laser Tracker et la commande du robot dans le plan X - Z sont montrées dans la Figure 1- 10.

Sur la Figure 1- 11, nous comparons toutes les trajectoires dans les plans X - Y et X - Z .

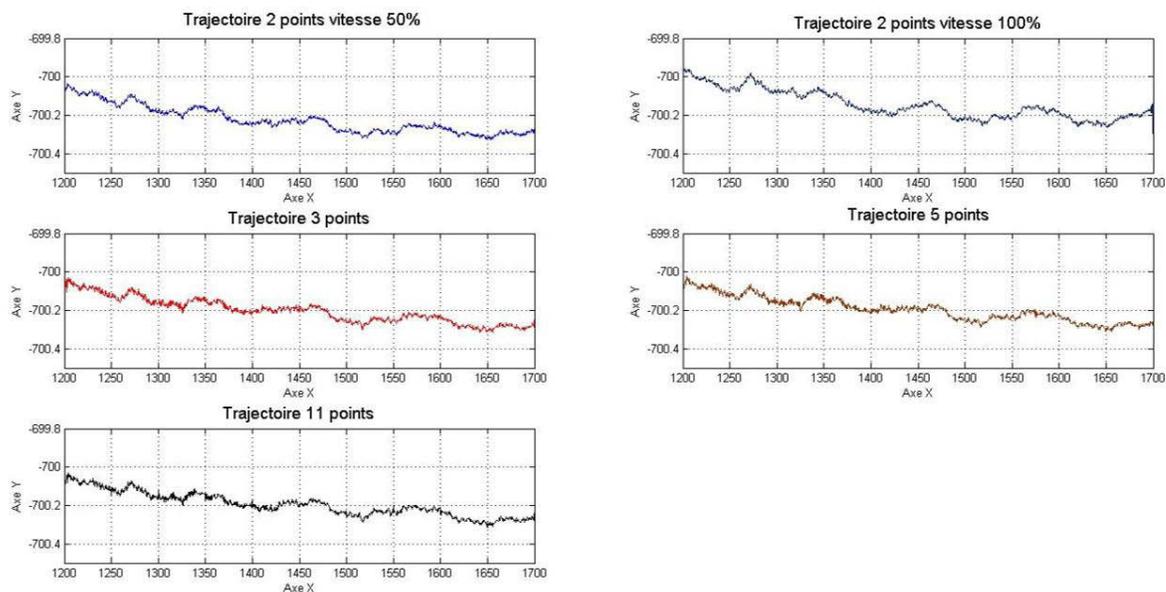


Figure 1- 9 Trajectoires dans le plan X - Y .

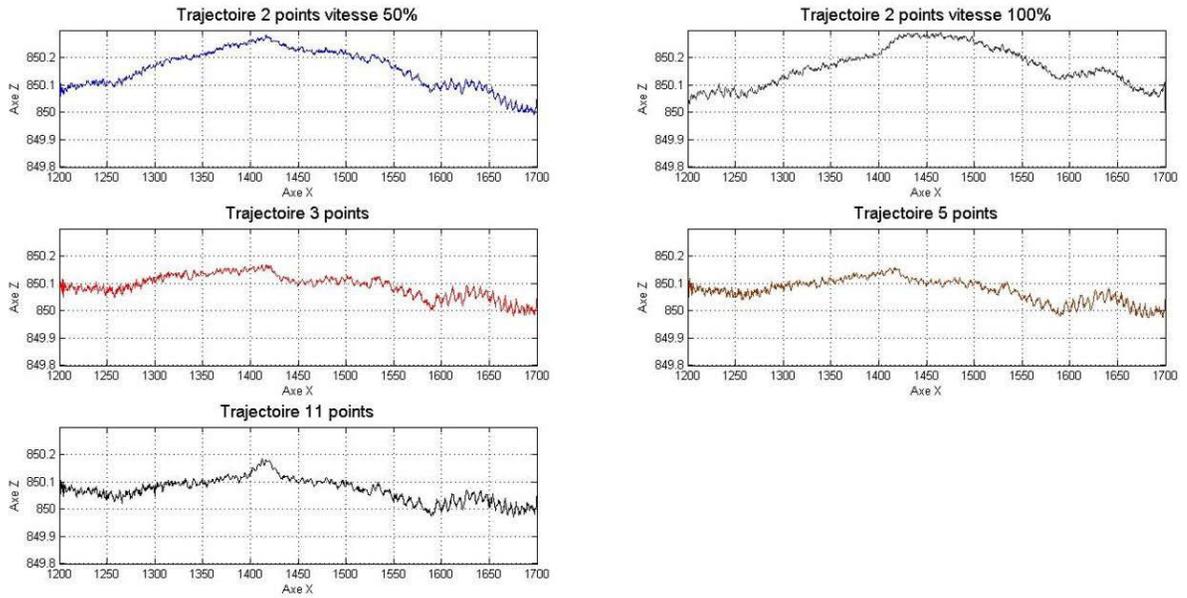


Figure 1- 10 Trajectoire dans le plan X-Z.

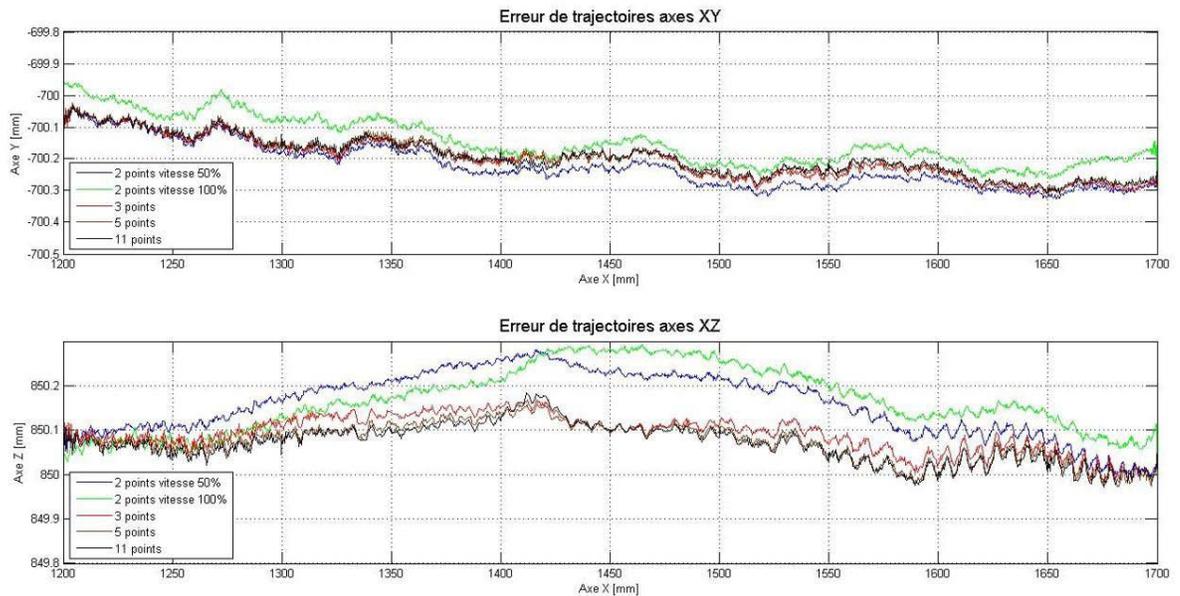


Figure 1- 11 Trajectoire dans les plans X-Y et X-Z.

Nous pouvons constater que, pour les trajectoires définies, le réglage initial du robot présente des erreurs de position par rapport aux mesures faites par le Laser Tracker.

Nous constatons aussi que dans le cas de trajectoires avec 3, 5 et 11 points la précision de suivi de trajectoire est meilleure que dans le cas de trajectoires avec seulement deux

points (point de départ et point d'arrivée). En effet, la stratégie de gestion de la précision de pose du robot est différente au niveau des points de passage que pendant le suivi de la trajectoire.

En résumé, les robots sériels présentent, à l'heure actuelle, un certain nombre d'avantages qui les rendent attrayants pour leur utilisation pour des opérations d'usinage. Toutefois, des inconvénients limitent ces applications. Ces inconvénients génèrent un défaut de pose de l'outil et de suivi de la trajectoire dont l'amplitude n'est généralement pas compatible avec les exigences de qualité des pièces usinées. C'est ce constat qui a motivé ces travaux de thèse.

4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une introduction aux robots industriels, les principaux aspects de leur évolution et leur apparition dans l'industrie. Nous avons ensuite abordé l'utilisation des robots sériels pour des applications d'usinage. Nous avons pu constater l'évolution actuelle des robots proposés par divers constructeurs permettant de présenter une alternative aux machines-outils avec des avantages comme par exemple un espace de travail plus grand pour un même encombrement et une dextérité importante.

Néanmoins, un certain nombre d'inconvénients persiste, à l'heure actuelle, et limitent l'application des robots pour des opérations d'usinage. En effet, la précision actuelle atteinte par les robots est trop faible pour une application générique en usinage comme le montre les mesures de suivi de trajectoire présentées dans ce chapitre.

Dans ces travaux de thèse, nous nous intéressons à l'influence du comportement géométrique du robot sur la précision de pose de l'outil et le suivi de trajectoire. Le chapitre suivant s'intéresse ainsi aux différentes méthodes permettant de réduire l'impact du comportement géométrique de la structure d'un robot sur la précision de pose de l'outil.

Chapitre 2

Maîtrise de la précision des robots sériels

Ce chapitre s'intéresse aux méthodes mises en place dans des activités de recherche pour maîtriser la précision des robots sériels. Ce chapitre débute par la définition des termes relatifs à la maîtrise de la précision des robots sériels. Par la suite, nous détaillons les différentes causes générant des erreurs de précision afin de positionner nos travaux sur la diminution des erreurs de transformation inverse. Enfin, nous exposons toutes les étapes nécessaires à l'étalonnage des paramètres géométriques du modèle représentant le comportement géométrique d'un robot, depuis la proposition d'un modèle du robot jusqu'à l'identification des paramètres.

Dans la suite de ce chapitre, nous nous concentrons sur les aspects théoriques liés au processus d'étalonnage de robots et nous montrons quels sont, à l'heure actuelle, les défis pour améliorer la précision de la pose de l'outil.

Dans un premier temps, les robots industriels ont été conçus afin de remplacer l'humain pour des tâches répétitives, dangereuses ou fatigantes. Néanmoins toutes les applications ne sont pas aisément robotisables. Les tâches robotisées sont généralement des tâches basées sur des mouvements simples et répétitifs [Hereter10]. Peu à peu les robots dits sériels ont été développés pour une utilisation industrielle réservée à des machines dédiées comme pour l'usinage, les machines-outils. Toutefois, leur manque de précision rend leur utilisation délicate pour des applications d'usinage. Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord les définitions les plus importantes pour comprendre le contexte de ce travail, ensuite nous abordons celles relatives à la définition de la précision des robots. Puis nous présentons les méthodes utilisées pour l'étalonnage des robots avant de conclure sur le constat et la présentation de la problématique de ces activités de recherche.

1 Définitions.

Des définitions associées à la modélisation et précision des robots sériels sont présentées dans ce paragraphe. Ces définitions permettent de préciser les termes employés dans ces travaux de thèse.

1.1 Robots sériels.

Les robots peuvent être classifiés selon divers critères comme : le nombre de degrés de liberté, leur structure cinématique, la taille et la forme de leur espace de travail ou les caractéristiques de leur mouvement [Tsai99]. Dans le cadre de cette thèse, nous définissons les robots selon leur structure cinématique ; les robots peuvent alors être définis comme des robots sériels, des robots parallèles ou des robots hybrides (Figure 2- 1). Un robot est dit sériel lorsqu'il a une structure basée sur une chaîne cinématique ouverte constituée par une succession de corps rigides ou bras chacun d'eux liés à son prédécesseur par une articulation à un degré de liberté [Merlet06] .

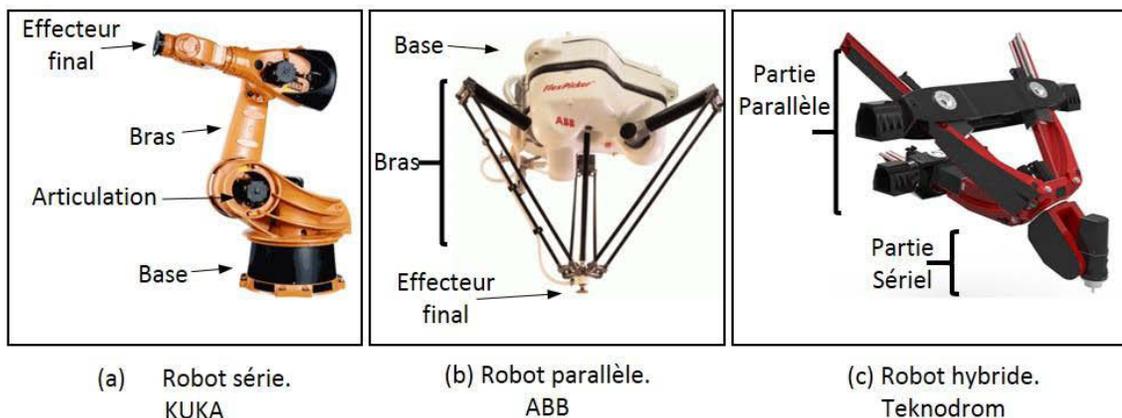


Figure 2- 1 Classifications des robots selon leur structure cinématique.

(a) Sériel, (b) Parallèle et (c) Hybride.

La succession d'éléments assemblés composant un robot sériel débute par la base et se termine par l'effecteur final [Khalil99]. La structure mécanique articulée a pour but de positionner l'effecteur final par rapport à une tâche dans une situation de l'espace donné (position et orientation) suivant une vitesse et accélération programmée. Cette structure est basée sur une chaîne cinématique composée de solides rigides articulés par des liaisons passives ou actives.

Un exemple de robot sériel est proposé dans la Figure 2- 2.

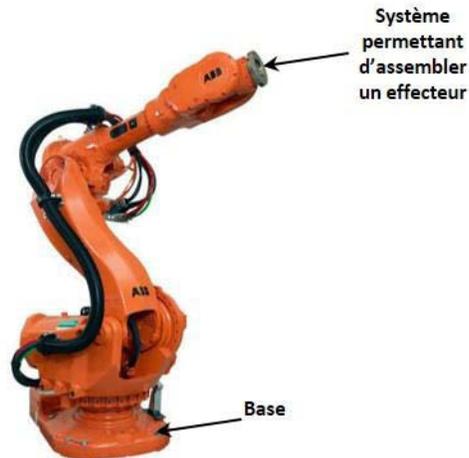
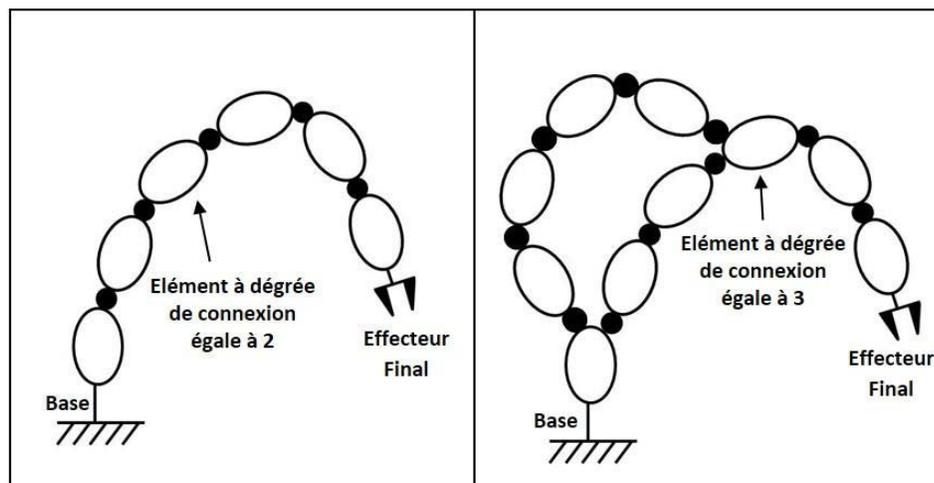


Figure 2- 2 Robot sériel ABB IRB 6600.

Selon Khalil, suivant le type de connexion entre les éléments, les robots à structure sérielle peuvent être à chaîne ouverte, à chaîne fermée ou à chaîne complexe.

Les robots sériels à chaîne ouverte sont des robots composés d'éléments ou corps reliés au reste du système avec 2 liaisons à 1 degré de liberté (*ddl*). L'effecteur final et la base sont, eux, reliés avec une liaison à 1 *ddl* (Figure 2- 3 (a)). Les robots sériels à chaîne fermée, par contre, ont au moins un élément ou corps avec un degré de connexion supérieur à deux (Figure 2- 3 (b)).



(a) Structure sériel à chaîne ouvert

(b) structure sériel à chaîne fermée

Figure 2- 3 Robots à structure sérielle.

Les robots sériels à chaîne ouverte sont les plus communément utilisés dans l'industrie, cependant, les robots sériels à chaîne fermée ont l'avantage de proposer une structure

réputée plus rigide. Ainsi, certaines structures de robot dédiée à l'usinage possèdent une structure fermée, voir Figure 2- 4.



Figure 2- 4 Robot ABB 6660.

Les robots sont généralement caractérisés par leur espace de travail et la précision de pose de l'effecteur.

1.2 Espace de travail.

L'espace de travail d'un robot sériel est défini comme l'espace atteignable par l'effecteur final. La taille de l'espace de travail est fonction de plusieurs facteurs : le nombre de degrés de liberté, la longueur des éléments constituant le robot, la disposition des articulations, les limites des articulations (comme les butées mécaniques) et les interférences mécaniques entre ses éléments [Khalil99]. La Figure 2- 5 présente l'espace de travail ou zone atteignable par le centre du poignet du robot IRB 6660 de ABB dans un plan donné.

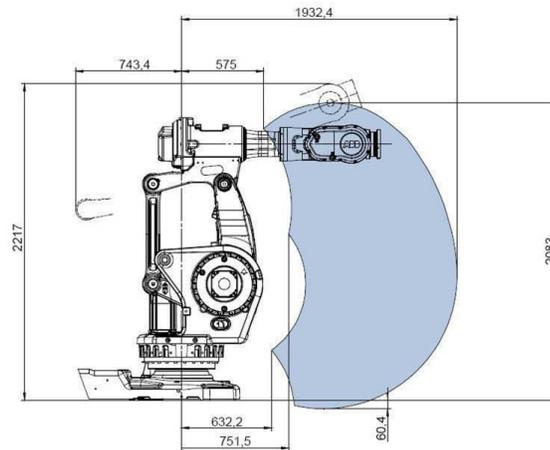


Figure 2- 5 Espace de travail du robot IRB 6660 [ABB]

Cet espace de travail permet de vérifier que l'ensemble de la tâche est accessible.

1.3 Pose de l'effecteur

La pose X de l'effecteur final du robot définit la position et l'orientation de l'organe terminal dans son espace de travail.

Le nombre de paramètres nécessaires pour définir la pose d'un corps rigide dans l'espace est de six : trois coordonnées définissant la position et trois coordonnées définissant l'orientation. Pour définir la position d'un point particulier de l'effecteur final, les coordonnées cartésiennes sont généralement utilisées. Pour exprimer l'orientation, plusieurs notations existent comme les angles d'Euler, les quaternions, les matrices de rotation ou les cosinus directeurs. Une explication plus étendue de ces notations d'orientation est précisée dans [Craig05], [Sciavico00] et [Khalil99].

La pose de l'effecteur est fonction des positions des liaisons actives représentées généralement par des variables articulaires q et des paramètres géométriques du robot ξ selon l'équation 2-1.

$$X = f(q, \xi) \quad 2-1$$

La qualité de pose de l'effecteur est qualifiée, par des paramètres tels que l'exactitude et la répétitivité.

1.4 Précision statique de la pose de l'effecteur final.

Pour les robots, la précision de pose de l'effecteur est définie à partir des concepts de : résolution, exactitude et répétitivité [Conrad00].

La résolution est définie comme le plus petit incrément de mouvement qui peut être réalisé par les liaisons actives du robot ou par l'effecteur final [Khalil99],[Ismail08].

L'exactitude en robotique est la capacité de positionnement de l'effecteur final en un point cible dans l'espace de travail du robot [Conrad00]. Cette exactitude qualifie l'écart entre la position désirée et la moyenne des positions atteintes.

La répétabilité est un terme associé à l'exactitude et elle est définie comme la grandeur caractéristique de la dispersion de poses atteintes [Khalil99], [Mooring91]. Ainsi, la répétabilité représente la capacité du robot à atteindre la même pose de l'outil avec les mêmes consignes de position articulaires et suivant la même trajectoire d'approche dans les mêmes conditions expérimentales [Olabi11].

La Figure 2- 6 illustre les concepts d'exactitude et répétabilité.

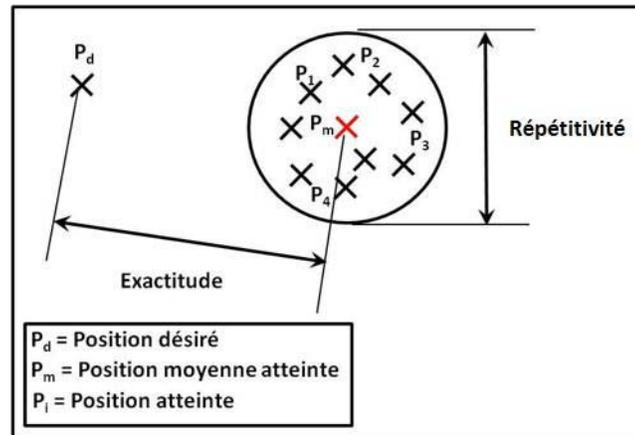


Figure 2- 6 Exactitude et répétabilité.

L'expérience des processus industriels a montré que les robots proposent une répétabilité meilleure que l'exactitude [Mooring91]. La répétabilité d'une structure est une caractéristique de nature aléatoire et est causé, entre autres, par des phénomènes non géométriques comme l'hystérésis [Deblaise06].

Cependant, l'exactitude peut être améliorée par la mise en place d'une méthode d'étalonnage [Nubiola13]. Dans ces travaux de thèse, nous nous focalisons sur la réduction du défaut d'exactitude de pose de l'outil par l'application de méthodes d'identification géométrique.

La maîtrise de la pose de l'outil passe par l'établissement de modèles mathématiques représentant le comportement géométrique du robot.

1.5 Modèle géométrique des robots.

Le modèle géométrique est la description mathématique du comportement géométrique du robot. C'est un modèle qui exprime la pose du centre de l'outil par rapport à la base en fonction de la pose des articulations actives [Ginani11].

L'expression de ce modèle est basé sur l'utilisation de paramètres géométriques du robot. Ces paramètres géométriques représentent un type d'erreur considéré comme influent sur la pose de l'outil. Un compromis doit être fait entre le nombre de paramètres considérés et la complexité du modèle obtenu [Barati11].

Il existe différents types de modèles géométriques [Andreff06] [Hubert10]:

- Le modèle géométrique direct (*MGD*) qui exprime la pose de l'effecteur final X en fonction des variables articulaires q et des paramètres géométriques ξ du robot :

$$X = MGD(q, \xi) \quad 2-2$$

- Le modèle géométrique inverse (*MGI*) exprime les variables articulaires q en fonction de la pose de l'effecteur final X et des paramètres géométriques ξ du robot :

$$q = MGI(X, \xi) \quad 2-3$$

La Figure 2- 7 montre la relation entre le modèle *MGD* et le modèle *MGI*.

De nombreuses approches existent pour développer le modèle géométrique d'un robot, comme par exemple la méthode de Denavit-Hartenberg (*DH*) [Denavit55], la méthode Travel Coordinated Systems (*TCS*) [Gogu97] et la méthode de Khalil-Kleinfinger [Khalil86].

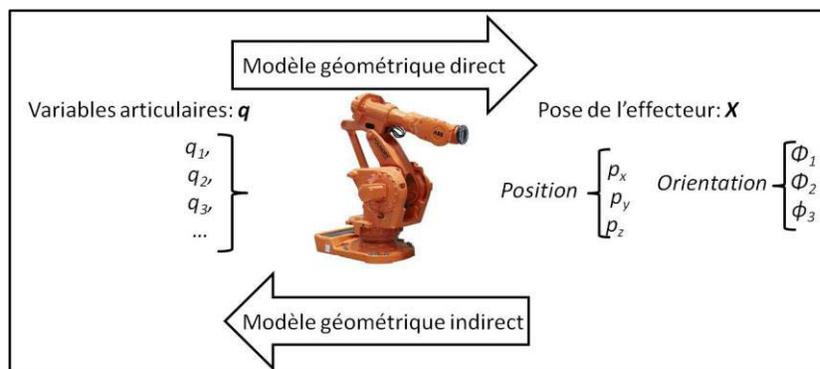


Figure 2- 7 Modèles géométriques.

Les modèles géométriques peuvent être développées pour différentes applications et besoins spécifiques. Ainsi, il existe plusieurs méthodes pour décrire la pose de l'effecteur.

Ces méthodes diffèrent par les techniques mathématiques appliquées et par la méthode de paramétrage et sont discutées plus tard dans ce chapitre [Wu14].

1.6 Conclusion.

Les robots sériels peuvent être conçus suivant différentes structures mécaniques : ouvertes ou fermées. La structure particulière de chaque robot est liée à des caractéristiques attendues et influe sur la précision de la pose de l'outil.

L'amélioration de la précision de pose de l'outil passe par la proposition d'un modèle géométrique et l'identification des paramètres géométriques en fonction de la précision de réalisation de la tâche attendue.

2 Précision des robots sériels.

Lors de la réalisation de la tâche, le robot doit garantir une précision compatible avec le processus à réaliser. Dans la suite de ce paragraphe, nous commençons par présenter la gamme de précision atteinte par le robot en fonction des tâches à effectuer puis nous précisons l'origine des erreurs de pose de l'effecteur.

2.1 Précision attendue en fonction de la tâche.

Les robots sont généralement conçus en fonction de critères tels que l'accessibilité, la taille de l'espace de travail et la sollicitation de la tâche. Ces critères permettent de définir le nombre d'axes, la charge que doit supporter le robot et le niveau de répétitivité à atteindre.

Toutefois, la précision absolue (*absolute ou volumetric accuracy*, en anglais) est rarement spécifié [Nubiola13].

Cette précision est à comparer avec les exigences des différents procédés d'usinage qui peuvent être réalisés sur un robot. Le Tableau 2- 1 donne une idée de l'ordre de grandeur de différents procédés d'usinage.

Processus	Tolérances commerciales ($\pm mm$)
Tournage	0,025 – 0,13
Alésage, Forage	0,025
Perçage	0,075
Fraisage	0,13 – 0,25
Façonnage	0,05 – 0,13
Brochage	0,025 – 0,15
Tronçonnage	0,8

Tableau 2- 1 Tolérances commerciales des procédés d'usinage [Kalpakjian08].

La précision de pose de l'outil doit être inférieure à la qualité d'usinage attendue afin de maîtriser la précision d'usinage. En effet, si nous considérons un assemblage à réaliser entre deux pièces de quelques microns, il est nécessaire d'avoir une exactitude et une répétitivité du moyen de production de l'ordre du micron afin d'assurer un positionnement relatif entre les deux pièces compatibles avec la qualité attendue.

De plus, le comportement in situ du robot évolue par rapport à celui spécifié par le constructeur. En effet, l'étalonnage réalisé par le fabricant dans un environnement maîtrisé à l'aide d'équipements dédiés n'est pas forcément optimum lorsque le robot est en situation de production [Young00]. Il est alors nécessaire de proposer des méthodes d'étalonnage applicable dans un environnement industriel.

Les fabricants de robot développent ainsi des procédures particulières permettant d'améliorer l'exactitude de pose de l'outil sur une ligne de production. La compagnie ABB a développé une option nommée « Absolute Accuracy » pour assurer une précision de positionnement du *TCP* (Tool Center Point) d'au moins 0,1 mm dans tout l'espace de travail. Cette méthode est basée sur la mesure de la pose de l'effecteur de l'outil à 100 emplacements différents dans tout l'espace de travail. Les positions réelles de l'effecteur sont déterminées à l'aide de mesure de position par un système laser. Un ensemble de paramètres de compensation est identifié. Ces paramètres ne sont pas détaillés par ABB et semblent prendre en compte les imperfections mécaniques et les déformations causées par le poids des éléments du robot et les charges embarquées [ABB].

Dans le cas de Fanuc robotics, plusieurs logiciels pour l'étalonnage des robots comme *iR*Vision et *iR*Calibration ont été développés afin d'obtenir une précision dans l'ordre de 0,1 mm [Fanuc].

D'autres produits sont commercialisés pour l'étalonnage de robots. Ainsi l'outil *Isios Robotics* semble permettre d'atteindre une précision de l'ordre de 0,1 mm et jusqu'à 0,06 mm [Isios] Cette méthode est basée sur la mesure de la position d'un capteur laser placé directement sur l'effecteur final du robot, lorsque l'extrémité du robot est déplacée le long du faisceau laser, les plus petits écarts par rapport à la ligne droite sont détectés aisément. Les mesures de ces écarts donnent un modèle du comportement du robot. *Nikon Metrology* a le produit « *K-Series robots MMC system* » qui offre la possibilité d'atteindre une précision de 0,06 mm dans un espace de travail de 17 m³ grâce à la mesure de LED infrarouges en utilisant une technologie par vision à l'aide d'une caméra.

Ainsi, nous pouvons constater qu'il existe une multitude de procédures industrielles permettant d'étalonner un robot. Toutefois, ces méthodes ne sont pas formalisées et peuvent rester perfectibles car nécessitant des précautions particulières non maîtrisées par l'utilisateur final.

Afin, de maîtriser la nature des paramètres à mettre en place pour une identification géométrique nous analysons dans le paragraphe suivant les différentes causes d'erreur.

2.2 Cause des erreurs de précision de pose des robots.

Les causes des erreurs de précision de pose des robots ont été largement étudiées par des chercheurs qui les ont classées, de façon générale, suivant plusieurs facteurs. Mooring fait une classification des causes des erreurs suivant deux grands facteurs : les facteurs de type géométrique et non-géométrique [Mooring91]. Les facteurs de type géométrique sont des facteurs associés à la relation géométrique entre les éléments ou les liaisons du robot. Ces facteurs ne sont pas liés à la charge ou au mouvement piloté du robot. Dans ces facteurs, nous trouvons alors les erreurs associées aux longueurs des éléments du robot et les erreurs associées aux orientations des axes des liaisons. Ces erreurs apparaissent généralement pendant l'assemblage et l'usinage des pièces du robot suivant les tolérances imposées. Les facteurs de type non-géométriques sont des facteurs liés au mouvement et à la charge du robot. Le frottement, l'usure, les jeux, la déformation des éléments du robot sont des exemples de facteurs non-géométriques.

Facenda [Facenda06] ajoute un troisième type de facteurs : les facteurs associés aux conditions de travail du robot. Ainsi, les sources de chaleurs dues aux systèmes de transmission et/ou les moteurs, les variations de la température ambiante et les charges externes appliquées à l'effecteur final peuvent faire évoluer le comportement du robot.

Nubiola [Nubiola13] et Guo [Guo15] font un résumé des facteurs spécifiés dans les travaux de Karan [Karan94]. Nubiola résume les causes d'erreurs en cinq facteurs : environnement (comme la température ou le réchauffement du robot), paramétriques (comme les paramètres géométriques et dynamiques du robot, le frottement et le comportement de forme hystérésis), mesure (résolution et non-linéarité des capteurs de position), numérique (les erreurs d'arrondi et de commande) et application (comme les erreurs d'installation du robot). Guo considère différentes classes d'erreurs : les erreurs géométriques (comme le désalignement d'assemblage, les offsets latéraux et angulaires des articulations), les erreurs non-géométriques (comme la flexion des bras du robot, les déformations thermiques) et les autres erreurs (hystérésis, jeu entre les pièces, résolution des codeurs).

Jawale [Jawale13] classe les erreurs en différents catégories technologiques : les erreurs au niveau des liaisons, les erreurs aux niveaux des pièces composants le robot et les erreurs des systèmes de transmission. Les erreurs au niveau des liaisons sont liées à des jeux dans les liaisons, la pesanteur, l'inertie et les facteurs dynamiques. Les erreurs aux niveaux des pièces composants le robot sont associées aux dimensions des pièces, aux tolérances d'usinage et d'assemblage, à la raideur des pièces et aux effets thermiques. Finalement, les erreurs des systèmes de transmission sont associées à la résolution des moteurs du robot et à la flexibilité de ses composants.

Nous pouvons constater que les causes des erreurs de précision de pose des robots proviennent de deux sources : les causes relatives à la géométrie intrinsèque du robot et les causes liés aux facteurs d'utilisation du robot.

Pour synthétiser, le Tableau 2- 2 résume les différents types de causes des erreurs de précision pour les robots sériels et les phénomènes associés.

Types de causes des erreurs	Phénomène
Géométrique	- Longueurs des éléments du robot et orientation des liaisons.
Non-géométrique	- Le frottement. - La raideur.
Environnementaux	- La température.

Tableau 2- 2 Types de causes des erreurs.

Dans le cas de l'usinage avec des robots à structure parallèle, Pritschow [Pritschow02] propose la classification de différents comportements d'une cellule d'usinage suivant

l'origine des erreurs de pose de l'effecteur de façon cohérente avec les travaux précédents (Figure 2- 8).

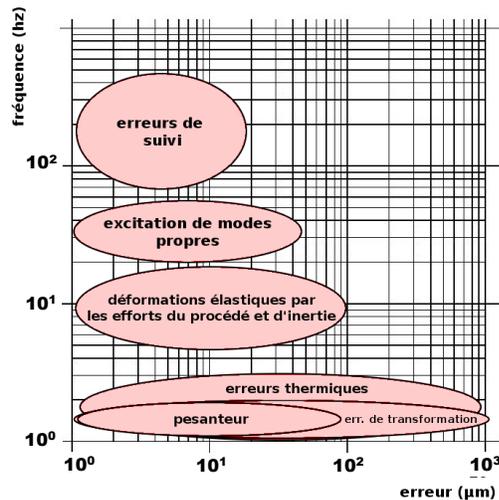


Figure 2- 8 Amplitude et fréquence des erreurs d'usinage et ses causes [Pritschow02].

Pritschow définit deux types de phénomènes générateurs d'erreurs de pose de l'effecteur : des phénomènes liés à des sollicitations statiques et des phénomènes liés à des sollicitations dynamiques. Les phénomènes liés à des sollicitations statiques génèrent des erreurs de transformation inverse, une déformation élastique due au poids et une déformation thermique. Les phénomènes liés à des sollicitations dynamiques génèrent des déformations élastiques dues à la sollicitation de l'usinage, des vibrations et des erreurs de suivi de trajectoire.

Dans le même sens, Chanal [Chanal06] indique que des méthodes ont été proposées pour réduire l'influence de ces erreurs sur la précision. Ainsi la diminution des erreurs de transformation inverse peut passer par la mise en place d'un *TCP control* ou de méthodes d'identification géométrique.

2.3 Conclusion.

La précision des robots sériels, à l'heure actuelle, ne répond pas aux exigences en termes de précisions pour des opérations d'usinage. En effet, les processus répandus de fabrication ont des tolérances entre 25 et 50 μm.

Les facteurs affectant la précision sont de diverses natures et l'influence de chacun de ces facteurs n'est pas totalement identifiable.

Bien que ces facteurs soient multiples, les facteurs associés à la géométrie du robot sont généralement invariants dans le temps, ce qui facilite la mise en place d'une stratégie ou méthode de compensation [Dolinsky01].

De plus, les erreurs associées aux paramètres géométriques ont été signalés comme les erreurs les plus influentes dans la précision de pose de l'outil [Zhong95], [Judd90], [Hage12], [Ziegert88]. Ainsi, nous avons choisi de nous focaliser dans ces travaux de thèse sur la diminution des erreurs de transformation inverse par l'identification du comportement géométrique. Nous présentons, dans le paragraphe suivant, les méthodes de modélisation et d'identification géométriques mises en place dans le cas des robots sériels.

3 Etalonnage géométrique des robots.

Le comportement géométrique nominal d'un robot est différent du comportement réel. L'identification du comportement géométrique est nécessaire pour maîtriser la précision du robot. Cette identification passe par la proposition d'un modèle géométrique et l'identification des paramètres associés. L'identification des paramètres géométriques permet d'améliorer le niveau de précision du robot. L'étalonnage est basé sur la détermination de l'écart entre les valeurs de poses géométriques estimées par le modèle nominal et les valeurs des poses géométriques réelles. La minimisation de cet écart permet de corriger les valeurs nominales des paramètres géométriques afin d'améliorer la précision statique du robot.

Les méthodes d'étalonnage sont diverses comme l'indique Khalil [Khalil09], mais en général, toutes ces méthodes sont basées sur 4 étapes [Mooring91] :

1.- La modélisation : Elle repose sur la définition du modèle géométrique et des paramètres géométriques influents sur la précision du robot. Dans la littérature, il existe une grande variété de modèles géométriques, le but de cette étape est de trouver un modèle cohérent avec le comportement géométrique du robot et permettant un niveau de prédiction satisfaisant après l'étape d'identification.

2.- La mesure : L'objectif de cette étape est d'estimer à partir de mesures la pose réelle de l'effecteur final en fonction des variables articulaires. Une procédure de mesure typique consiste à déplacer le robot vers une position choisie de son espace de travail, à enregistrer les variables articulaires q ayant permis d'atteindre cette position et à mesurer avec un système de mesure externe la pose total (position et orientation) ou partiel (position ou orientation) de l'effecteur.

3.- L'identification : Le processus d'identification est basé sur une optimisation d'une fonction coût représentant l'écart entre la pose estimée par mesure et la pose simulée par le modèle. Les variables d'optimisation sont les paramètres géométriques. Ainsi, le processus d'identification peut être illustré à partir de l'équation suivante :

$$\Delta X_i = X_{mes,i} - X_{modi} \quad 2-4$$

Où $X_{mes,i}$ est une pose mesurée et X_{modi} est la pose déterminée pour le modèle géométrique dans la position i . L'équation (2-4) peut être réécrite comme suit :

$$\Delta X_i = X_{mes,i} - f(q_i, \xi) \quad 2-5$$

Où q_i sont les variables articulaires dans la position i et ξ sont les paramètres géométriques. ΔX_i représente la différence entre la pose calculée avec le modèle géométrique et la pose mesurée. L'objectif de l'identification est de trouver les valeurs de ξ que minimise .

4.- La compensation ou implémentation : Dans cette étape, le modèle obtenu dans les étapes précédentes est utilisé en intégrant les valeurs des paramètres géométriques déterminés à l'étape d'identification dans la commande du robot.

Dans la suite nous présentons, en détail, chacune des étapes du processus d'étalonnage.

3.1 La modélisation.

En général, un robot est composé de plusieurs bras ou éléments rigides liés entre eux par des articulations considérées comme idéales (sans jeu mécanique et sans déformation) et dotés d'un effecteur final. Pour garantir la qualité de réalisation de la tâche, la précision de la pose de l'effecteur final doit être maîtrisée. Un modèle géométrique cohérent avec le comportement géométrique de la structure du robot doit être développé.

Dans la littérature scientifique, le modèle géométrique est souvent défini à l'aide d'une séquence de transformations homogènes partant de la base du robot jusqu'à l'effecteur final. Ces transformations homogènes sont déterminées à l'aide de matrices homogènes de rotation (\mathbf{R}_x , \mathbf{R}_y , \mathbf{R}_z) et de translation (\mathbf{T}_x , \mathbf{T}_y , \mathbf{T}_z). Différentes méthodes sont développées pour définir, de manière générique, les modèles géométriques de robots sériels. Dans la

suite, nous présentons les approches les plus connues pour la modélisation des robots, c'est-à-dire les méthodes communément utilisées par les industriels et les chercheurs.

Modèle de Denavit Hartenberg (DH)

Denavit et Hartenberg [Denavit55] ont proposés une méthode pour décrire la transformation homogène entre deux solides adjacents avec une position et orientation particulière des repères.

Pour la construction des repères il faut suivre la procédure suivante :

Nommer les corps du robot de $i=0$ jusqu'à $i=n$ en commençant par la base du robot avec $i=0$;

Nommer les articulations de $i=1$ à n (1 pour le premier degré de liberté et n pour le dernier) ;

Pour $i=0$ jusqu'à $i=n-1$ fixer l'axe Z_i sur l'articulation $i+1$;

L'origine du repère R_0 sera un point quelconque de l'axe Z_0 , de sorte que, X_0 et Y_0 forment un repère orthonormé direct ;

Pour $i=1,2,\dots,n-1$, l'origine du repère est fixé à l'intersection de l'axe Z_i avec la droite perpendiculaire commune à Z_{i-1} et Z_i . Si les deux axes se coupent, l'origine est le point d'intersection. Si par contre, les axes sont parallèles l'origine est l'origine du repère de l'articulation $i+1$.

L'axe X_i est la droite perpendiculaire commune à Z_{i-1} et Z_i , et l'axe Y_i est choisi de sorte que le repère soit orthonormé direct.

La Figure 2- 9 illustre cette méthode.

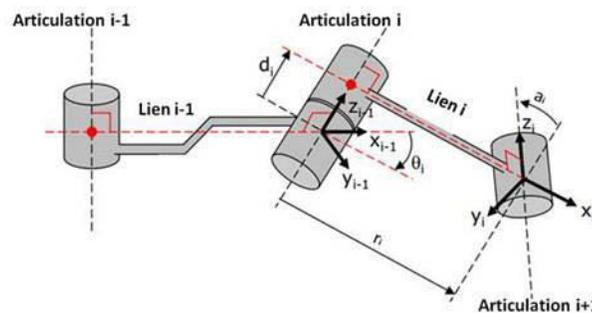


Figure 2- 9 Notation de Denavit-Hartenberg [Craig05].

Avec cette convention l'équation de la matrice de transformation du repère $i-1$ au repère i est :

$${}^{i-1}\mathbf{T}_i = \text{Rot}(\mathbf{Z}_{i-1}, \theta_i) \text{Trasl}(\mathbf{Z}_{i-1}, d_i) \text{Trasl}(\mathbf{X}_i, r_i) \text{Rot}(\mathbf{X}_i, \alpha_i)$$

où :

$Rot(\mathbf{Z}_{i-1}, \theta_i)$ représente la rotation un angle θ_i autour de l'axe \mathbf{Z}_{i-1} .

$Trasl(\mathbf{Z}_{i-1}, d_i)$ représente la translation une distance d_i le long de l'axe \mathbf{Z}_{i-1} .

$Trasl(\mathbf{X}_i, r_i)$ représente la translation une distance r_i le long de l'axe \mathbf{X}_i .

$Rot(\mathbf{X}_i, \alpha_i)$ représente la rotation un angle α_i autour de l'axe \mathbf{X}_i .

θ_i est l'angle entre \mathbf{X}_{i-1} et \mathbf{X}_i autour l'axe \mathbf{Z}_{i-1} .

d_i est la distance entre \mathbf{Z}_{i-1} et \mathbf{Z}_i le long de \mathbf{X}_{i-1} .

r_i est la distance entre \mathbf{Z}_i et \mathbf{X}_i le long de \mathbf{Z}_i , et

α_i est l'angle entre \mathbf{Z}_i et \mathbf{X}_i autour de \mathbf{Z}_i .

De cette façon les matrices de transformation s'écrivent :

$${}^{i-1}\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & r_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_i & -s\alpha_i & 0 \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 2-7$$

Finalement, nous obtenons la matrice de transformation du repère $i-1$ au repère i :

$${}^{i-1}\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_i s\theta_i & s\alpha_i s\theta_i & r_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_i c\theta_i & -s\alpha_i c\theta_i & r_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 2-8$$

Le modèle de DH est le plus répandu dans la communauté scientifique pour la modélisation des robots.

Par contre ce modèle a la particularité que l'axe \mathbf{Z}_i du repère R_i est confondu avec l'axe de rotation $i+1$ du robot et pas avec l'axe de rotation i . Ainsi, les repères sont mis en place de façon différente comme dans les travaux de Paul [Paul81] et de Craig [Craig86]. Dans les conventions de Paul et de Craig, des changements de placement de repères par rapport à la convention originale de DH sont faits comme le montre le tableau comparatif Tableau 2- 3. L'objectif de leur convention est d'avoir une cohérence entre les valeurs des

paramètres associés à chaque lien et d'éviter les confusions car la convention de DH a été développée pour des robots avec des mécanismes en série simples [Lipkin 05].

Critère	DH	Paul	Craig
Repère i en liaison i	✓	✓	✓
θ_i et d_i autour de l'axe Z_i	✓	X	✓
α_i et r_i autour de l'axe X_i	X	✓	✓

Tableau 2- 3 Comparaison des conventions des repères.

Dans la Figure 2- 10, les différents repères utilisés sont présentés pour les modèles de DH, de Paul et de Craig.

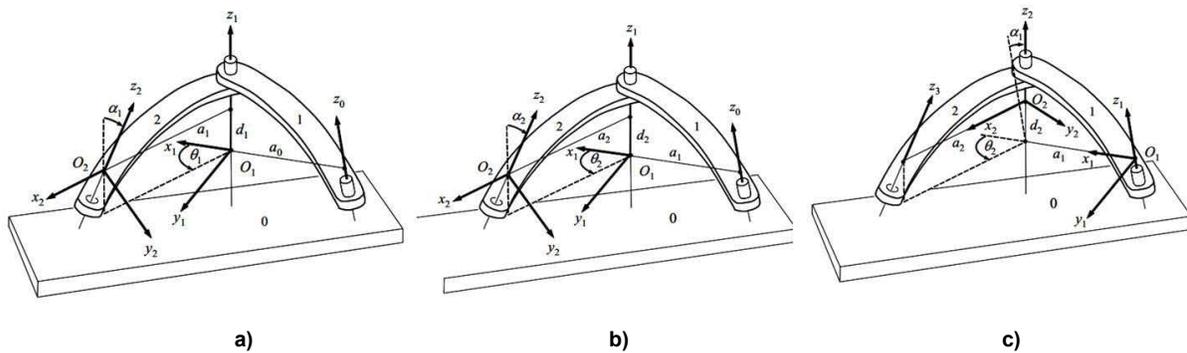


Figure 2- 10 Différences entre les notations des modèles.
a) DH, b) Paul et c) Craig. [Lipkin05].

Toutes ces notations et conventions de repères peuvent présenter des difficultés pour modéliser des robots aux géométries spéciales [Lipkin05]. Dans la suite, d'autres méthodes de définition de modèles géométriques de robots sont présentées.

Modèle de Khalil.

En 1986, Khalil et Kleinfinger ont fait des améliorations du modèle de DH en raison des ambiguïtés vis à vis des robots avec des structures fermées ou arborescentes [Khalil99]. Ils ont aussi proposé une méthode pour des robots avec des architectures ouvertes simples.

Pour des robots à structure ouverte, la convention suivante est proposée : le repère R_j est fixe avec la liaison j , l'axe de l'articulation j est l'axe z_j et l'axe x_j est aligné avec la perpendiculaire commune aux axes d'articulation actuels j et suivantes $j+1$. (Figure 2- 11)

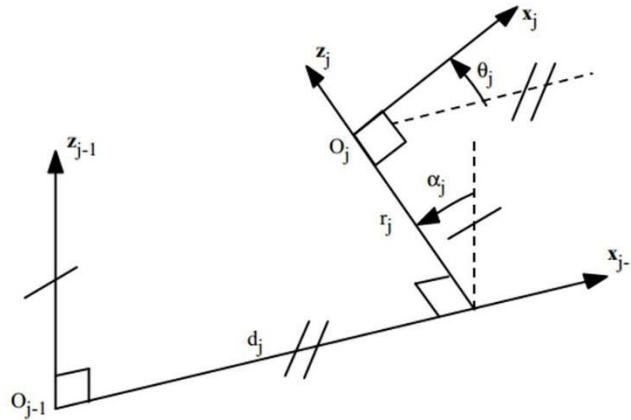


Figure 2- 11 Notation de Khalil et Kleinfinger [Khalil99].

Avec cette convention l'équation de la matrice de transformation du repère $j-1$ au repère j est :

$${}^{i-1}\mathbf{T}_j = Rot(\mathbf{x}_{j-1}, \alpha_j)Trasl(\mathbf{x}_{j-1}, d_j)Rot(\mathbf{z}_j, \theta_j)Trasl(\mathbf{z}_j, r_j) \quad 2-9$$

où :

θ_j est l'angle entre \mathbf{x}_{j-1} et \mathbf{x}_j autour l'axe \mathbf{z}_j .

r_j est la distance entre \mathbf{x}_{j-1} et \mathbf{x}_j le long de \mathbf{z}_j .

d_j est la distance entre \mathbf{z}_{j-1} et \mathbf{z}_j le long \mathbf{x}_{j-1} , et

α_j est l'angle entre \mathbf{z}_{j-1} et \mathbf{z}_j autour \mathbf{x}_{j-1} .

La matrice de transformation de repère j relative au repère $j-1$ est :

$${}^{i-1}\mathbf{T}_j = \begin{bmatrix} c\theta_j & -s\theta_j & 0 & d_j \\ c\alpha_j s\theta_j & c\alpha_j c\theta_j & -s\alpha_j & -r_j s\alpha_j \\ s\alpha_j s\theta_j & s\alpha_j c\theta_j & c\alpha_j & r_j c\alpha_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 2-10$$

Pour des robots à structure fermée, la matrice de transformation du repère de l'effecteur final au repère de base du robot (${}^0\mathbf{T}_{ef}$) est la composition des matrices de transformation en prenant le chemin le plus court entre le repère de l'effecteur final (R_{ef}) et le repère de la base du robot (R_0) [Khalil99].

Pour le cas des structures fermées de type parallélogramme Khalil et Kleinfinger appliquent une méthode simple en utilisant le fait que les droites \mathbf{C}_1 , \mathbf{C}_2 , \mathbf{C}_3 et \mathbf{C}_4 forment un parallélogramme, (voir Figure 2- 12) dans ce cas les matrices d'orientation entre les repères R_1 et R_3 du parallélogramme son constantes.



Figure 2- 12 Structure du type parallélogramme dans le robot ABB IRB 6660.

Le modèle de Khalil-Kleininger et les modèles précédents sont dérivés de la notation de DH et, en général, sont les plus répandus pour la modélisation des robots. D'autres travaux s'intéressent à l'ajout de paramètres géométriques au modèle de DH

Modèle de Hayati et variantes.

Hayati a réalisé que, par rapport à la méthode de DH, si deux axes de rotation ont un écart angulaire β petit, alors des erreurs d'identification sur les paramètres de DH θ_i , d_i et r_i apparaissent [Hayati85].

Dans sa méthode, il remplace le paramètre d_i de translation sur l'axe z_i et il propose une matrice de transformation supplémentaire $Rot(y_i, \beta_i)$ par rapport au modèle de DH dans le cas où les axes de rotation consécutifs sont nominalement parallèles. Cette matrice représente les erreurs d'alignement des axes des liaisons (Figure 2- 13).

La matrice de transformation supplémentaire $Rot(y_i, \beta_i)$ est donnée par :

$$Rot(y_i, \beta_i) = \begin{bmatrix} \cos \beta_i & 0 & -\sin \beta_i & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \beta_i & 0 & \cos \beta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

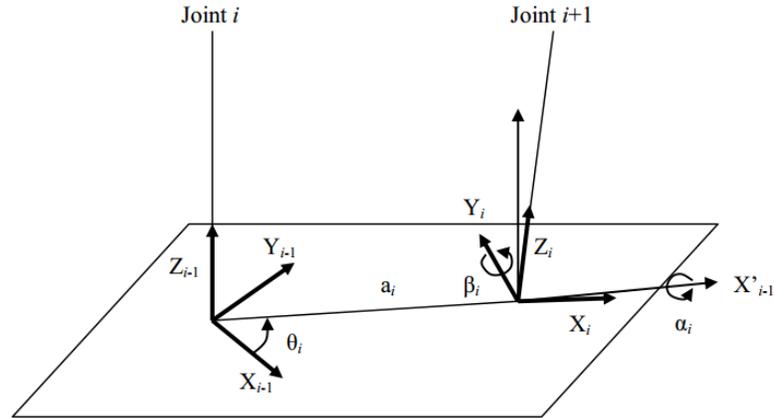


Figure 2- 13 Illustration de la convention des repères du modèle de Hayati [Horne12].

De cette manière la matrice de passage ${}^{j-1}\mathbf{T}_j$ est définie comme :

$${}^{i-1}\mathbf{T}_i = Rot(\mathbf{z}_{i-1}, \theta_i) Trasl(\mathbf{x}_i, d_i) Rot(\mathbf{x}_i, \alpha_i) Rot(\mathbf{y}_i, \beta_i) \quad 2-12$$

Avec cette même idée Veitschegger et Wu [86] proposent, pour l'identification d'un robot PUMA 560, un modèle avec cinq paramètres pour modéliser les axes de rotation consécutifs nominalement parallèles.

Cette notation est définie avec l'équation :

$${}^{i-1}\mathbf{T}_i = Rot(\mathbf{z}_{i-1}, \theta_i) Trasl(\mathbf{z}_i, d_i) Trasl(\mathbf{x}_i, r_i) Rot(\mathbf{x}_i, \alpha_i) Rot(\mathbf{y}_i, \beta_i) \quad 2-13$$

Alici utilise la considération de Veitschegger et Wu pour estimer des erreurs de position d'un robot Motoman SK 120 du fait des erreurs d'alignements. Il travaille avec la méthode de DH pour représenter le passage d'un repère à un autre repère consécutif. Toutefois, il utilise la notation de Veitschegger et Wu dans le cas où les axes de rotation consécutifs sont nominalement parallèles en ajoutant une matrice de rotation $Rot(\mathbf{y}, \beta)$ entre ces axes [Alici05].

D'autres modèles avec plus de 4 paramètres apparaissent dans la littérature scientifique selon la configuration du robot ou selon le point de vue de l'auteur.

Ainsi, avec six paramètres Whitney et Lozinski [Whitney86] présentent un modèle géométrique où la matrice de passage de la repère $j-1$ à la repère j est donnée par :

$${}^{i-1}\mathbf{T}_i = Rot(\mathbf{y}, \theta_j) Trasl(\mathbf{y}, y') Trasl(\mathbf{z}, z') Rot(\mathbf{z}, \phi_j) Rot(\mathbf{y}, \Omega_j) Rot(\mathbf{x}, \varphi_j) \quad 2-14$$

Où θ_j est le déplacement angulaire de l'articulation autour de l'axe y , y' et z' sont des déplacements de translation sur les axes y et z respectivement, et ϕ_j, Ω_j et φ_j sont les angles de rotation autour l'axe z , y et x respectivement.

La matrice de passage d'un repère à l'autre est composée de six paramètres où la rotation est définie par les angles roulis, tangage et lacet (ou : roll, pitch et yaw en anglais).

En contraste avec le modèle de DH, le modèle de Whitney et Lozinski est considérablement plus complexe avec l'implémentation de six paramètres par articulation, cependant, selon Stone [Stone87] ce modèle a une grande flexibilité dû, en partie, à l'application des règles d'assignation de placement des repères adaptables aux cas particuliers.

Le S-model est une autre modèle géométrique développé par Stone [Stone87]. Ce modèle est basé sur le modèle du *circle-point* [Gines10] et utilise six paramètres pour chaque liaison en ajoutant deux paramètres au modèle de DH et permet de placer les repères de façon arbitraire autour de l'axe z de l'articulation [Wu14] la matrice de passage est, alors :

$${}^{i-1}\mathbf{T}_j = Rot(\mathbf{z}_{j-1}, \beta'_j) Trasl(\mathbf{z}_{j-1}, d'_j) Trasl(\mathbf{x}_{j-1}, a_j) Rot(\mathbf{x}_j, \alpha_j) Rot(\mathbf{z}_j, \gamma_j) trasl(\mathbf{z}_j, b_j) \quad 2-15$$

où γ_j est l'angle entre les axes x de la repère selon le modèle de DH et l'axe x du repère du S-model, b_j est la distance entre l'origine de la repère de DH et l'origine du repère du S-model. La Figure 2- 14 illustre les paramètres du S-model.

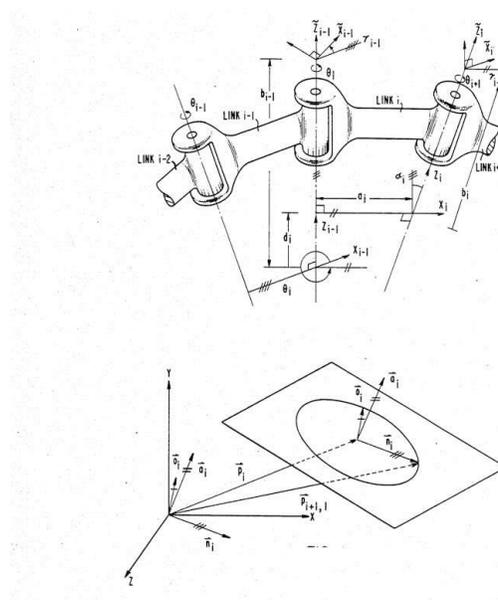


Figure 2- 14 S-model [Stone87].

Une approche qui ne prend pas en compte le formalisme de DH est le modèle Zéro-référence présenté par Mooring et Tang [84]. Ce modèle est basé sur les équations de rotation de Rodrigues et consiste en définir un système de référence fixe qui est établi entre un point de l'espace de travail du robot et un autre système de référence de l'outil qui est attaché à l'effecteur final.

Entre ces deux systèmes de référence (système de référence fixe et système de référence outil) des vecteurs unitaires sont placés suivant chaque axe de rotation du robot. Un point est défini de façon arbitraire sur chaque vecteur unitaire. A posteriori, nous multiplions les matrices de passages de repères d'un vecteur unitaire à l'autre pour obtenir la matrice de passage du système de référence fixe au système de référence de l'outil.

Les paramètres du model Zero-référence sont ainsi les orientations du vecteur unitaire et la position du point origine de ce vecteur. Six paramètres sont nécessaires pour ce modèle. Dans la Figure 2- 15, Mooring présente le travail réalisé avec le model Zero-référence sur un robot PUMA 560.

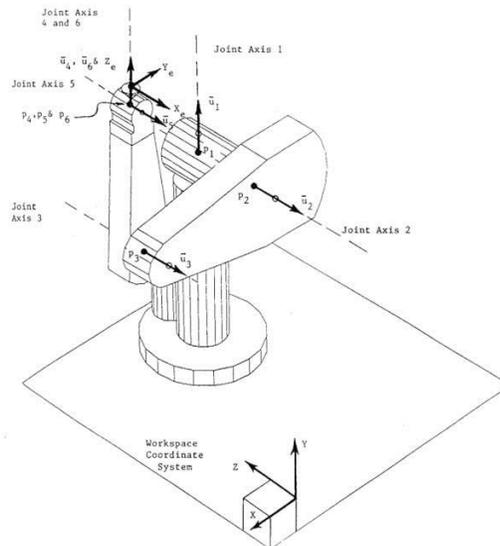


Figure 2- 15 Model Zéro-référence avec le robot PUMA 560 [Mooring91].

En résumé, le modèle Zéro-référence est une approche alternative qui n'est pas relié au formalisme de DH et qui peut être utilisé dans la majorité des configurations des robots.

Modèle Travelling Coordinate System (TCS).

Un autre modèle est le modèle TCS qui a été développé dans les travaux de Gogu [Gogu97]. L'objectif de cette méthode est d'exprimer les positions et orientations relatives des éléments d'une chaîne cinématique ouverte.

Dans cette méthode un système de coordonnées (repères) se déplace ou « voyage » sur les éléments cinématiques du robot en partant de l'élément de référence (fixe) jusqu'à l'élément final ou effecteur final ; le système glisse sur les éléments de la chaîne cinématique du robot et effectue les déplacements relatifs de rotation et de translation dans les couples cinématiques au passage d'un élément à l'autre.

La position et l'orientation du repère final par rapport au repère de référence (\mathbf{A}_{0n}) est identifiée grâce un produit matriciel :

$$\mathbf{A}_{0n} = \prod_{i=0}^n \mathbf{A}_{i-1,i} \quad 2-16$$

Où $\mathbf{A}_{i-1,i}$ est la matrice 4x4 qui exprime la position et l'orientation du repère i par rapport au repère $i-1$.

Un des avantages de cette méthode est qu'elle permet une simplification des calculs et apporte une souplesse des notations.

La méthode *TCS* est détaillée dans [Gogu97].

Conclusion

En résumé, la modélisation est la première étape du processus d'identification du comportement géométrique d'un robot. Le modèle géométrique est basé sur une relation entre, par exemple, les déplacements des articulations du robot et la pose de l'effecteur final. La méthode de Denavit-Hartenberg est largement utilisée dans la littérature. Des modifications sont proposées pour améliorer la précision finale de certaines structures particulière comme le modèle de Khalil-Kleinfinger ou le modèle de Hayati.

D'autres méthodes sont aussi développées notamment en incluant plus de paramètres comme le cas des modèles de Veitschegger et Wu, Whitney et Lozinski et le S-model afin de considérer plus de défaut géométrique.

Dans le cas de notre étude, notre analyse est basée sur le modèle de Khalil-Kleinfinger au vu de la structure fermée en parallélogramme que propose le robot étudié. Le modèle proposé sert de modèle initial dans notre étude.

3.2 *La mesure.*

L'étape suivante consiste à la mesure d'un ensemble de points dans un espace de travail donné du robot pour déterminer ou mesurer directement la position et/ou orientation réelle de l'effecteur final. L'objectif de cette étape est de mesurer ou d'estimer la pose réelle de l'effecteur pour une configuration articulaire du robot donnée.

Dans le cas de robots existants et non équipés de systèmes de mesure interne, des moyens de mesure extéroceptifs sans contact sont généralement privilégiés [Renaud04]

Différents systèmes de mesure ont été utilisés pour l'étalonnage des robots dans la littérature. Dans la suite, nous détaillons les moyens de mesure tels que la mesure par Théodolite, Laser Tracker, vision et BallBar.

Théodolite

Le système de mesure par théodolite est un système de mesure sans contact utilisé pour déterminer la localisation spatiale de l'effecteur du robot. La détermination de la pose de l'effecteur est basée sur une technique de triangulation 3D.

Malgré le temps de mise en œuvre et sa fragilité dans son usage au milieu industriel, Zhuang l'utilise pour l'étalonnage des robots [Zhuang95]

Un théodolite est constitué par : une base, une alidade et une télescope ; la base est généralement montée sur un trépied. La Figure 2- 16 présente un théodolite de la société Leica, le TMC100A.



Figure 2- 16 Théodolite TMC100A [Leica].

La détermination de la position d'un point ainsi que l'orientation d'un axe de l'effecteur se fait à l'aide de 3 mesures réalisées par deux théodolites. A chaque mesure les angles horizontal et vertical sont enregistrés (Figure 2- 17) [Jiang96]

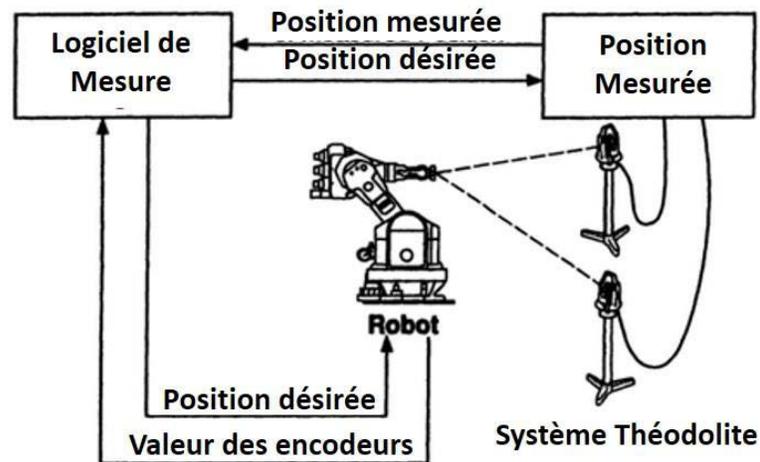


Figure 2- 17 Système Théodolite [Bernhardt93].

Laser Tracking

Le Laser Tracker est basé sur l'utilisation d'un instrument de mesure de longueurs qui est orienté afin de viser une mire positionnée au niveau du point à mesurer. Cet instrument mesure une distance et deux angles (verticalité et horizontalité).

L'appareil envoie un faisceau laser vers une cible rétro réfléchissante maintenue au niveau du point à mesurer. Il existe plusieurs cibles rétro réfléchissantes, mais le rétro réflecteur monté sur une sphère (SMR) est le plus communément utilisé. Le dispositif de mesure de la distance de la source laser au rétro réflecteur peut être soit un interféromètre, soit un appareil de mesure de distance absolue (ADM) [Chen09]. Le constructeur Leica a initié cette technologie en 1989, mais, aujourd'hui d'autres constructeurs sont dans le marché comme API et FARO. La Figure 2- 18 présente un Laser Tracker du fabricant FARO.



Figure 2- 18 Laser Tracker FARO [FARO].

Avec les récents progrès de la technologie, les Laser Tracker proposent une précision de l'ordre de $\pm 0.01\text{mm}$. Sa versatilité permet de réaliser les tâches d'étalonnage et d'optimisation de la précision de positionnement de l'effecteur final des robots.

Sa pertinence d'utilisation dans le domaine de la robotique est basée sur sa possibilité de couverture de tout l'espace de travail du robot, sa capacité de mesure sur site et en temps réel pendant que le robot est en mouvement et une analyse complète et rapide des mesures réalisées [Chao87], [Lau86], [Nubiola13], [Wu15], [Alici05].

Vision

Un système de vision est basé sur l'utilisation d'une ou plusieurs caméras permettant de localiser un objet de façon à estimer la position et orientation d'un objet connu par rapport à un repère lié à la ou les caméras [Renaud03].

Il existe essentiellement deux configurations typiques pour l'étalonnage du robot basé sur la vision : la première consiste à fixer des caméras dans les environs du robot pour que la caméra puisse encadrer une cible de calibrage ou mire montée sur l'effecteur de robot. L'autre configuration repose sur le montage de la caméra sur l'effecteur du robot (Figure 2-19).

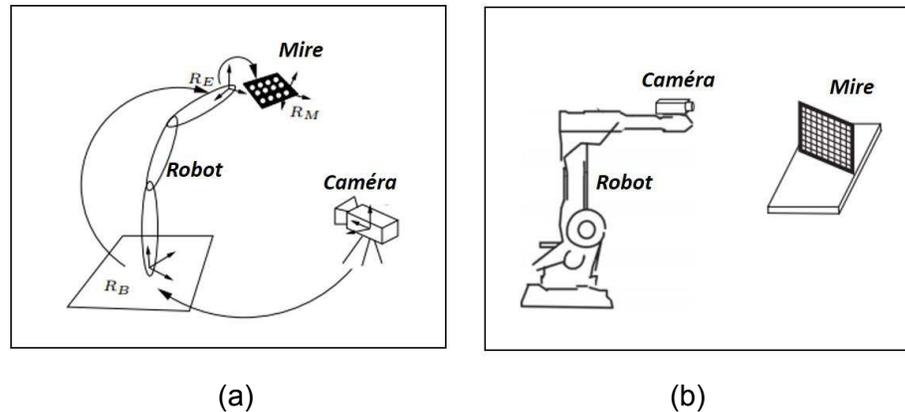


Figure 2- 19 Mesure par vision, (a) caméra dans les environs du robot [Renaud03] (b) caméra montée sur l'effecteur du robot [Guanglog13].

Cette configuration peut utiliser une seule caméra ou une paire de caméras. L'emploi d'une caméra unique présente les avantages d'un grand champ de vue avec une profondeur de champ potentiellement importante, et un matériel et un logiciel peu complexe [Motta01].

Le calcul de pose fournit une information directement exploitable pour l'identification géométrique de mécanismes [Renaud03]. Toutefois, les précisions de mesure obtenues de l'ordre de $50\mu\text{m}$ ne permettent pas une utilisation dans le cas d'opérations d'usinage.

BallBar

Le Ballbar n'est pas un moyen de mesure sans contact. Mais les masses faibles embarquées au vu de la taille des robots usineurs peuvent rendre son influence négligeable.

Créé en 1980 par James Bryan, le Ballbar se compose de deux billes d'acier qui sont soutenues et séparées l'une de l'autre par un montage télescopique.

Le principe du BallBar est de mesurer la distance entre deux points matérialisés par des sphères, le BallBar mesure l'écart par rapport à un rayon prédéfini au moyen d'un capteur LVDT [Diomez07], [Bryan84].

Une bille est fixée à la table de la machine, l'autre est positionnée à la place de l'outil. La machine exécute alors une trajectoire circulaire dont la bille fixée à la table est le centre. (Figure 2- 20)

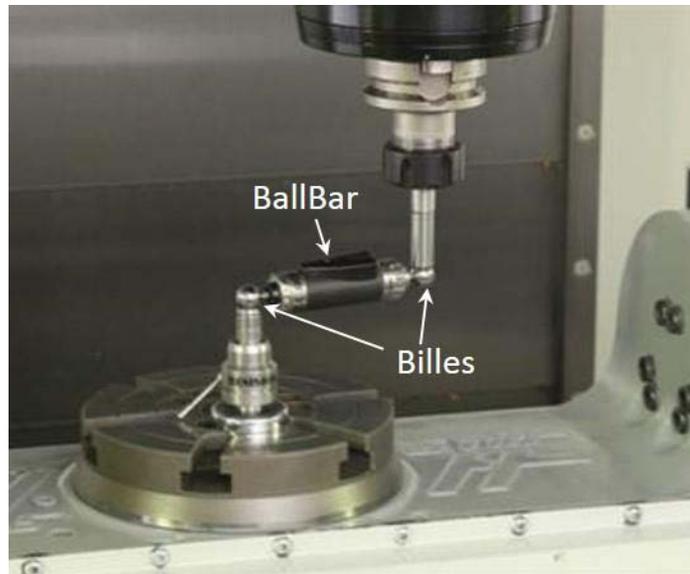


Figure 2- 20 Mesure avec BallBar [Renishaw].

L'évolution de la distance entre les deux billes à intervalles régulières est enregistrée, fournissant ainsi une signature du défaut radial de réalisation d'une trajectoire circulaire en fonction des défauts géométriques et d'asservissement de la machine. (Figure 2- 21)

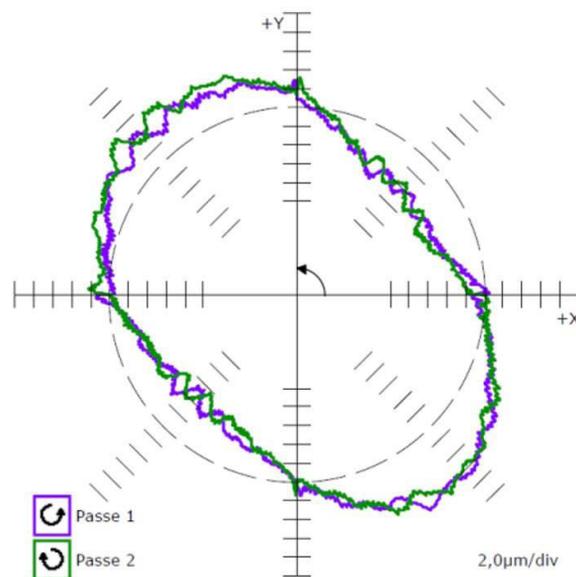


Figure 2- 21 Exemple de mesure au BallBar [Prevost11].

Des travaux d'identification des paramètres d'un robot réalisé par Goswami utilisant un Ballbar ont abouti à des précisions de pose de l'ordre de 0,08 mm. [Goswani93].

Conclusion

Différents moyens de mesure applicable au robot existent. Ces moyens ont un coût certain. Dans le cadre de cette thèse, un système de type Laser Tracker est utilisé au vu des moyens à disposition au Centre de Transfert de Technologie (CTT) de Sigma-Clermont. Au vu de l'analyse bibliographique, l'utilisation de ce moyen pour l'étalonnage des robots usineurs est pertinente.

3.3 L'identification.

Une fois que le modèle du robot a été développé et que les données de mesure ont été collectées, l'étape suivante consiste à déterminer la valeur de l'ensemble des paramètres du modèle permettant de minimiser l'écart avec les données mesurées. Ce processus est nommé l'identification. Dans la suite nous présentons les méthodes classiquement utilisées pour l'étalonnage des robots.

Le principe général selon Maurine et Quine [Maurine13] est le suivant : pour chaque pose de l'outil mesuré k ($k=1 \dots m$) l'écart ${}^0\mathbf{E}_n^k$ entre la position commandée au robot ${}^0\mathbf{S}_n$ et la position réellement atteinte ${}^0\mathbf{S}_n^R$ est défini par la relation :

$${}^0\mathbf{E}_n^k = {}^0\mathbf{S}_n^R - {}^0\mathbf{S}_n \quad 2-17$$

La mesure de cet écart étant réalisée avec des erreurs, l'équation peut se réécrire comme :

$${}^0\mathbf{E}_n^{k,mes} = {}^0\mathbf{S}_n^R - {}^0\mathbf{S}_n - \mathbf{e}_n^{k,mes} \quad 2-18$$

Où, $\mathbf{e}_n^{k,mes}$ est le vecteur de bruit sur la mesure de ${}^0\mathbf{E}_n^k$.

Si la mesure des écarts est complète (position et orientation) :

$${}^0\mathbf{E}_n^{k,mes} = \begin{bmatrix} {}^0\mathbf{E}p_n^{k,mes} & {}^0\mathbf{E}\phi_n^{k,mes} \end{bmatrix} \quad 2-19$$

Où, ${}^0\mathbf{E}p_n^{k,mes}$ et ${}^0\mathbf{E}\phi_n^{k,mes}$, sont respectivement les composants de position et de orientation de ${}^0\mathbf{E}_n^{k,mes}$.

Finalement les erreurs $\mathbf{e}_n^{k,mes}$ sont liées aux paramètres du modèle ξ et aux variables articulaires q^k pour la relation du modèle géométrique direct (MGD) :

$${}^0\mathbf{E}_n^{k,mes} = g(q^k, \xi) \quad 2-20$$

Où, g est la fonction à minimiser.

Les méthodes d'identification des paramètres géométriques partent de cette équation et différentes approches peuvent être considérées sur la linéarisation de la fonction f ou sur le facteur bruit de mesure ${}^0\mathbf{e}_n^{k,mes}$.

Ainsi, dans le cas où le facteur de bruit est négligé, l'estimation de vecteur $d\xi$ des erreurs sur les paramètres géométriques est fondée sur la minimisation du critère quadratique suivant :

$$C(\xi) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m {}^0\mathbf{E}_n^{k,mesT} {}^0\mathbf{E}_n^{k,mes} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m (\mathbf{s}_n^R - {}^0\mathbf{s}_n)^T (\mathbf{s}_n^R - {}^0\mathbf{s}_n) \quad 2-21$$

Cette minimisation non-linéaire peut être réalisée en utilisant des méthodes classiques d'optimisation comme la méthode de Newton, la méthode du gradient, la méthode des directions conjuguées ou la méthode de Levenberg-Marquardt. Cependant, ces méthodes de minimisation sont sensibles aux minima locaux de la fonction coût et nécessitent une attention particulière au choix de la solution initiale. De même, afin de limiter les problèmes de convergence les écarts entre les valeurs des paramètres nominaux et identifiés doivent être faibles.

Pour plus d'informations, sur les méthodes de minimisation le lecteur peut s'intéresser à la littérature scientifique : [Mooring91][Maurine13] [Bernhardt93].

La phase d'identification permet d'affecter une valeur à chaque paramètre. Toutefois, les paramètres du modèle peuvent être de différents ordres de grandeur (angle ou distance par exemple) et être plus au moins influents sur le critère à minimiser. Pour améliorer la convergence de l'étape d'identification et minimiser les erreurs d'identification, il est alors pertinent de réaliser une étude de sensibilité [Chanal12] [Patel00].

4 Problématique.

4.1 Constat

Les robots sériels ont plusieurs avantages par rapport aux machines-outils pour réaliser des opérations d'usinage parce qu'ils proposent de grands espaces de travail et sont versatiles au niveau de la commande pour suivre des trajectoires programmées, néanmoins ils manquent de précision au niveau de la pose de l'outil à cause de divers phénomènes.

Pendant l'usinage, le robot doit se positionner à un point spécifique pour faire l'opération demandée et suivre la trajectoire pilotée de l'outil ceci avec une précision attendue sur le contour programmé.

Une des raisons du manque de précision de ces robots est liée aux erreurs structurelles comme les erreurs provenant de la fabrication et de l'assemblage des pièces composants le robot.

Une autre cause est la non concordance entre les valeurs nominales des paramètres géométriques et les valeurs réelles, c'est ce qui rend le pilotage de l'effecteur final imprécis.

Dans ce travail, nous cherchons à améliorer la précision des robots sériels utilisés pour des opérations d'usinage à partir de l'identification des paramètres géométriques du robot. Nous analysons aussi la pertinence du choix d'un modèle géométrique propice pour atteindre la précision attendue.

En effet, le choix d'un modèle géométrique adéquat nous permet de réduire le modèle aux paramètres géométriques strictement nécessaires au respect de la précision exigée par la tâche à réaliser.

Pour cela, nous utilisons une analyse de sensibilité des paramètres géométriques introduits par rapport à chacun des axes de repère du robot avant de réaliser l'identification des paramètres géométriques influents.

Différents modèles géométriques de robots sont proposés et plusieurs techniques de calibration ont été développées dans le domaine scientifique, mais pas directement avec des exigences proches du procédé d'usinage.

Le fait de réaliser l'identification des paramètres dans un espace de travail restreint nous permettra d'évaluer la pertinence de l'identification des paramètres géométriques dans un espace local vis-à-vis d'une identification globale dans tout l'espace de travail du robot.

En effet, la littérature présente des approches sur l'identification globale des paramètres géométriques. Ainsi, nous présentons le gain en précision apporté par une méthode d'identification locale dans un espace de travail restreint.

Dans ces travaux nous proposons une méthodologie pour l'amélioration de la précision des robots en tant que robots utilisés pour l'usinage à partir de plusieurs points de vue : selon le modèle géométrique utilisé dans la commande du robot, selon l'espace de travail du robot et selon les contraintes liées à l'assemblage des pièces du robot.

5 Objectif des travaux

L'objectif de ces travaux de thèse est d'améliorer la performance d'un robot sériel en terme de précision de pose de l'outil à partir de l'application d'une identification des

paramètres géométriques dans le but de le rendre capable de réaliser des opérations d'usinage conformes au niveau de précision requis.

Pour cela, nous appliquons la méthode suivante :

En premier lieu nous développons des modèles mathématiques pour modéliser le comportement géométrique d'un robot sériel. La comparaison des paramètres géométriques introduits se fait vis-à-vis du résidu après identification de ces paramètres. Ensuite, nous réalisons une identification géométrique pour chaque modèle afin de déterminer les paramètres géométriques identifiés et les comparer avec les paramètres nominaux. Cette étape est constituée par la mesure de points dans une espace de travail prédéfinie et par l'optimisation des paramètres géométriques à partir de la minimisation de la relation des erreurs des valeurs mesurées et des valeurs atteintes.

De plus, l'analyse de sensibilité nous permet de simplifier les modèles géométriques développés et de proposer un nouveau modèle réduit en conformité avec les objectifs de précision souhaités.

En somme, nous obtenons un modèle géométrique qui nous permet d'obtenir une précision de pose de l'outil compatible avec les spécifications et la précision de fabrication des pièces du robot.

Chapitre 3

Evaluation de la précision d'un robot d'usinage.

Dans ce chapitre nous réalisons l'évaluation de la précision d'un robot utilisé pour l'usinage ou le parachèvement. Nous allons travailler avec un robot d'ASEA Brown Boveri (ABB), le robot IRB 6660. Ce robot est implanté dans le Centre de Transfert de Technologie (CTT) à Sigma-Clermont. La modélisation géométrique de ce robot en chaîne ouverte et fermée est présentée. Ensuite une méthodologie de mesure de la pose de l'outil est développée. Nous détaillons les étapes de cette méthode pour déterminer les erreurs de précision initiales du robot.

La trajectoire suivie par un robot est directement liée au mouvement des axes motorisés, aux dimensions et à l'agencement des éléments constituant la structure. Le calcul des consignes imposées aux axes motorisés se fait généralement à l'aide du modèle géométrique inverse. Ainsi, la cohérence entre le modèle géométrique et le comportement géométrique réel est un facteur clé permettant d'assurer une précision importante de suivi de trajectoire.

Cette cohérence peut être assurée :

- en proposant un modèle géométrique contenant des paramètres géométriques adaptés aux erreurs géométriques influentes de la structure du robot.
- en identifiant la valeur de ces paramètres à l'aide d'une mesure du comportement géométrique réel du robot.

Ce chapitre présente ainsi une modélisation géométrique classique des robots à structure sériel basé sur le formalisme de Denavit-Hartenberg modifié. Une méthode de mesure de la pose réelle d'un robot à l'aide d'un Laser Tracker est alors proposée afin d'évaluer les erreurs de pose initiales du robot et d'identifier les paramètres géométriques du modèle proposé.

Dans la suite de ce chapitre, nous présentons dans un premier temps le support de l'étude, le robot ABB IRB 6660. Puis nous exposons le protocole de mesure de la pose

réelle du robot, la mesure de précision dans un espace de travail avec 66 points est ensuite montrée et, en dernier lieu, nous présentons l'identification des modèles géométriques.

1 Présentation du robot ABB IRB 6660.

1.1 Introduction.

Le robot ABB IRB 6660 est un robot de type sériel à six axes. Il est actuellement conçu pour des opérations de pré-usinage et de parachèvement de pièces.

Le modèle géométrique du robot IRB 6660-205/1.9 permet de positionner le point piloté d'un outil monté dans une broche d'usinage dans le repère du robot.

Dans la suite de ce paragraphe, nous décrivons la structure du robot IRB 6660.

1.2 Description du robot ABB IRB 6660.

Le robot IRB 6660 est composé d'une structure sérielle avec une structure en parallélogramme pour améliorer la rigidité globale du robot [ABB] [Guo15]. Le robot est composé de six axes motorisés (de 1 à 6) et trois axes non motorisés (7, 8 et 9) (Figure 3-1). Les axes 3, 7, 8 et 9 font partis de la structure en parallélogramme.

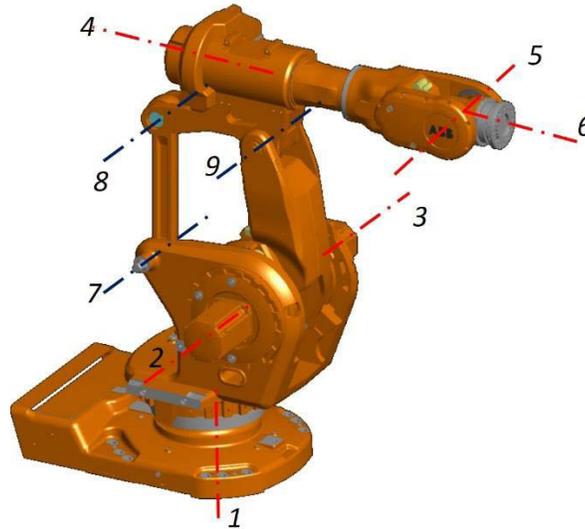


Figure 3- 1 Axes du robot ABB IRB 6660.

Les dimensions géométriques nominales du robot sont représentées sur la Figure 3- 2.

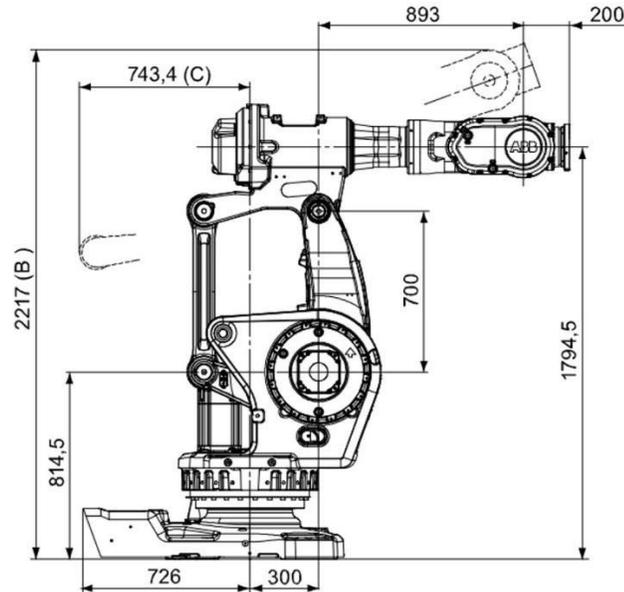


Figure 3- 2 Dimensions géométriques du robot ABB IRB 6660.

Ce robot est un robot sériel à chaîne cinématique fermé simple. Il est ainsi considéré par Khalil comme un robot complexe [Kalil99], car il possède au moins un solide positionné par plus de deux articulations.

Le robot étudié est aussi équipé d'une broche au niveau du dernier axe afin de pouvoir réaliser des opérations de pré-usinage. Cette broche est une broche de l'entreprise Précise France modèle Fisher MFW-1412 (Figure 3- 3). Ses caractéristiques sont présentées dans le Tableau 3- 1.

<i>Dimension Douille (mm)</i>	140
<i>Longueur (mm)</i>	463
<i>Vitesse Max. (tr/min)</i>	36.000
<i>Poids (Kg)</i>	36
<i>Fréquence Max. (Hz)</i>	1200
<i>Puissance (Kw)</i>	15.2

Tableau 3- 1 Caractéristiques de la broche [Fisher].



Figure 3- 3 Broche Fisher MFW-1412 [Fisher].

Le modèle mathématique représentant le comportement géométrique du robot doit permettre de prédire la position du point piloté de la broche dans le repère du robot.

1.3 Modélisation géométrique du robot ABB 6660

Comme nous avons mentionnée dans le chapitre 1, il y a plusieurs méthodes pour définir le modèle géométrique d'un système. Dans ces travaux, nous allons choisir la méthode de Khalil et Kleinfinger qui permet de modéliser le comportement géométrique des robots avec des mécanismes fermés. Cette méthode est basée sur la méthode de Denavit-Hartenberg qui est la plus utilisée dans le domaine de la robotique pour construire le modèle géométrique [Guo15], [Gürsel05], [Gürsel06], [Nubiola13a], [Ginani11], [Olabi11]. Cette méthode permet de définir un nombre minimum de paramètres géométriques nécessaires pour décrire le comportement géométrique de robots avec des architectures simples et fermées [Khalil99].

Le formalisme de Khalil-Kleinfinger permet de représenter la transformation d'un repère de référence à un autre attachée à chaque liaison du robot (eq. 2.9).

Les paramètres sont illustrés sur la Figure 3- 4.

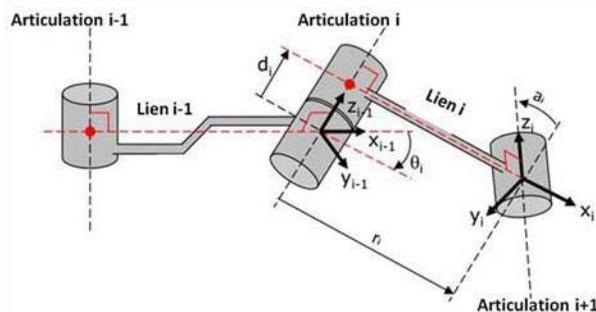


Figure 3- 4 Paramètres géométriques, formalisme de Khalil-Kleinfinger.

Dans une première approche, nous allons développer un modèle géométrique initial en considérant le robot comme une chaîne ouverte, c'est-à-dire, sans envisager la partie de la boucle fermée du parallélogramme et, puis, dans le chapitre suivant nous développons le modèle complet avec la structure en parallélogramme.

1.4 Modèle sérielle ouvert.

Pour le robot ABB IRB 6660 à 6 degrés de liberté, la matrice de transformation du repère de base du robot au 6^{ème} axe est calculée ainsi (voir Figure 3- 5) :

$${}^0\mathbf{T}_6 = {}^0\mathbf{T}_1 {}^1\mathbf{T}_2 {}^2\mathbf{T}_3 {}^3\mathbf{T}_4 {}^4\mathbf{T}_5 {}^5\mathbf{T}_6 \quad 3-1$$

La Figure 3- 5 montre la configuration « géométrique » initiale du robot où toutes les variables articulaires q_i sont nulles. Cette figure met en évidence les 6 paramètres géométriques du robot (RL_1 , d_2 , d_3 , d_4 , RL_4 et RL_6) déterminés par la méthode de DH-modifiée. Le Tableau 3- 2 illustre les paramètres introduits et liés à chaque articulation.

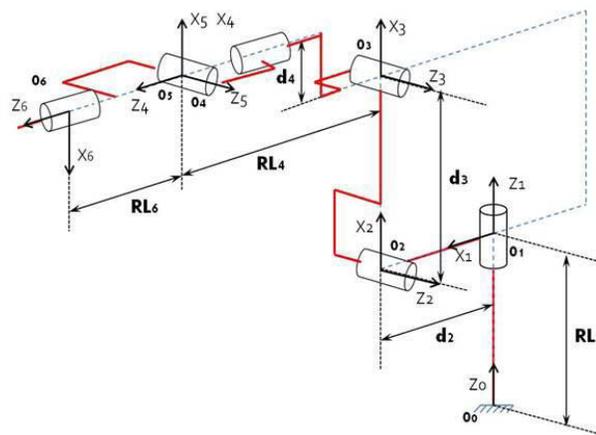


Figure 3- 5 Modèle sériel du robot.

j_i	a_i	d_i	θ_i	r_i
1	0°	0	q_1	RL_1
2	-90°	d_2	$q_2 - \pi/2$	0
3	0°	d_3	$q_3 - q_2$	0
4	-90°	d_4	q_4	RL_4
5	90°	0	q_5	0
6	-90°	0	$q_6 + \pi$	RL_6

Tableau 3- 2 Paramètres du robot.

Les matrices de passage d'un repère du robot à un autre sont présentées ci-dessous :

$${}^0\mathbf{T}_1 = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & -\sin(q_1) & 0 & 0 \\ \sin(q_1) & \cos(q_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & RL_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 3-2$$

$${}^1\mathbf{T}_2 = \begin{bmatrix} \cos(q_2 - \pi/2) & -\sin(q_2 - \pi/2) & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin(q_2 - \pi/2) & -\cos(q_2 - \pi/2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 3-3$$

$${}^2\mathbf{T}_3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3 - q_2) & -\sin(\theta_3 - q_2) & 0 & d_3 \\ \sin(\theta_3 - q_2) & \cos(\theta_3 - q_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 3-4$$

$${}^3\mathbf{T}_4 = \begin{bmatrix} \cos(q_4) & -\sin(q_4) & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 1 & RL_4 \\ -\sin(q_4) & -\cos(q_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 3-5$$

$${}^4\mathbf{T}_5 = \begin{bmatrix} \cos(q_5) & -\sin(q_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin(q_5) & -\cos(q_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 3-6$$

$${}^5\mathbf{T}_6 = \begin{bmatrix} \cos(q_6 + \pi) & -\sin(q_6 + \pi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & RL_6 \\ -\sin(q_6 + \pi) & -\cos(q_6 + \pi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 3-7$$

La matrice de transformation homogène qui permet d'exprimer la pose du repère final du robot R_6 par rapport au repère de base R_0 du robot est obtenue par la multiplication de ces matrices comme l'indique l'équation 3-2.

Afin de considérer la broche du robot, une matrice de passage supplémentaire est introduite. Elle permet de considérer la position et l'orientation de l'effecteur final dans le repère de la broche. Nous définissons le repère R_b comme fixe par rapport à la broche. Nous exprimons la matrice de transformation homogène 0T_6 comme la matrice de passage de R_b au repère lié à l'axe 6 du robot, le repère R_6 .

Ainsi, le nouveau modèle géométrique est obtenu par :

$${}^0T_b = {}^0T_6 {}^6T_b \quad 3-8$$

où 6T_b est la matrice de transformation du système de coordonnées de la broche R_b dans le repère de l'axe 6, R_6 (Figure 3- 6).

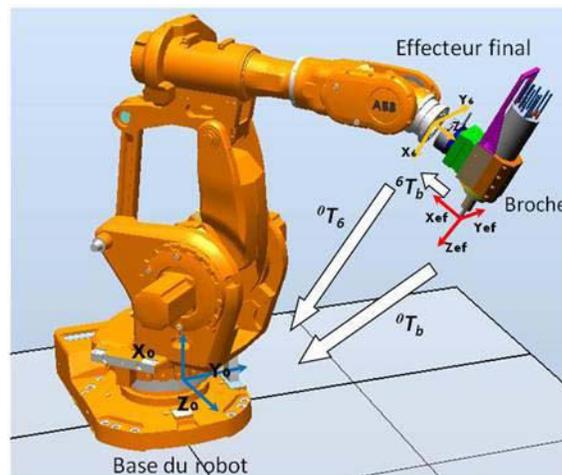


Figure 3- 6 Position et orientation du repère de référence de la broche par rapport au repère de la base du robot.

Si nous considérons que la position et l'orientation de la broche par rapport au repère R_6 est la suivante :

$$Position = \begin{cases} x_{Broche} = 144,876mm \\ y_{Broche} = 0,587mm \\ z_{Broche} = 316,783mm \end{cases} \quad Orientation = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad 3-9$$

Alors la matrice de transformation 6T_b est :

$${}^6T_b = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & x_{Broche} \\ 0 & 1 & 0 & y_{Broche} \\ -1 & 0 & 0 & z_{Broche} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 3-10$$

Dans le cas de l'ajout d'un outil à la broche, l'expression de sa position et son orientation par rapport au repère broche est :

$$Position = \begin{cases} x_{Outil} = 0 \\ y_{Outil} = 0 \\ z_{Outil} = J_{Outil} \end{cases} \quad Orientation = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 3-11$$

Où J_{Outil} est la longueur de l'outil utilisée.

Finalement, la pose de l'outil ou de l'effecteur final par rapport au repère lié à l'axe 6 est donnée par :

$${}^6T_{ef} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & x_{ef} = x_{Broche} + J_{Outil} \\ 0 & 1 & 0 & y_{ef} = y_{Broche} \\ -1 & 0 & 0 & z_{ef} = z_{Broche} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 3-12$$

La Figure 3- 7 illustre les dimensions que nous venons d'expliquer.

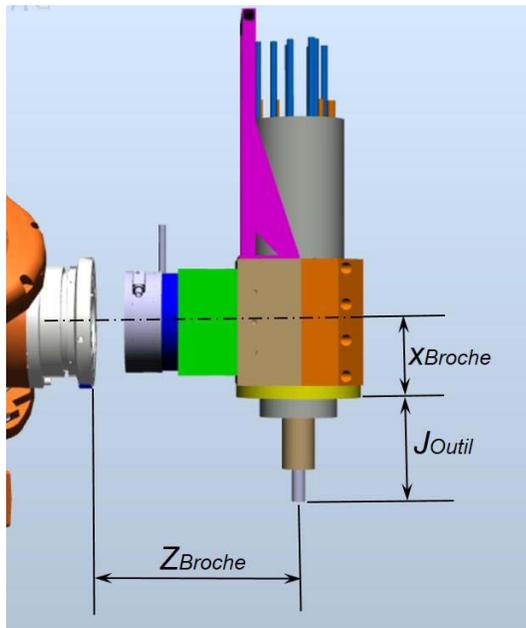


Figure 3- 7 Dimensions de la Broche.

Pour améliorer la précision du modèle géométrique proposé ci-dessus une identification des paramètres géométriques est réalisée par la suite. Dans cette étude nous proposons aussi d'étudier la différence des paramètres géométriques introduits suivant la

- $\mathbf{T}_{jk}^i(d)$ représente une translation d suivant l'axe i pour passer du repère j au repère k .
- $\mathbf{R}_{jk}^i(\psi_{kj})$ représente une rotation ψ_{kj} suivante autour de l'axe i pour passer du repère j au repère k .
- Il faut noter que $\psi_{33'}$ représente une rotation de q_3' qui est donné par :

$$q_3' = q_3 - q_2$$

3-14

Comme nous avons mentionné dans le chapitre 2, cette notation de la méthode du *TCS* permet de réduire les opérations élémentaires. Toutefois, le nombre de paramètres introduits et leur nature est identique entre la méthode TCS et DH et l'introduction de paramètres supplémentaires sur le modèle TCS est plus délicate car l'orientation de chaque repère est différente suivant l'élément considéré.

2 Protocole de mesure de la pose réelle du robot

Des essais de mesure sont conduits sur le robot ABB IRB 6660 du CTT afin de mesurer la pose réelle du robot. Ces essais ont pour objectif de nous permettre d'obtenir les données nécessaires afin d'estimer la précision initiale du robot et de réaliser l'identification des paramètres du robot. L'idée dans cette partie est de définir un protocole de mesure permettant d'estimer l'écart entre la pose réelle de l'effecteur final et la pose de l'effecteur désirée à l'aide d'un système de mesure extéroceptif.

Un descriptif du protocole d'essais est présenté dans la Figure 3- 9.

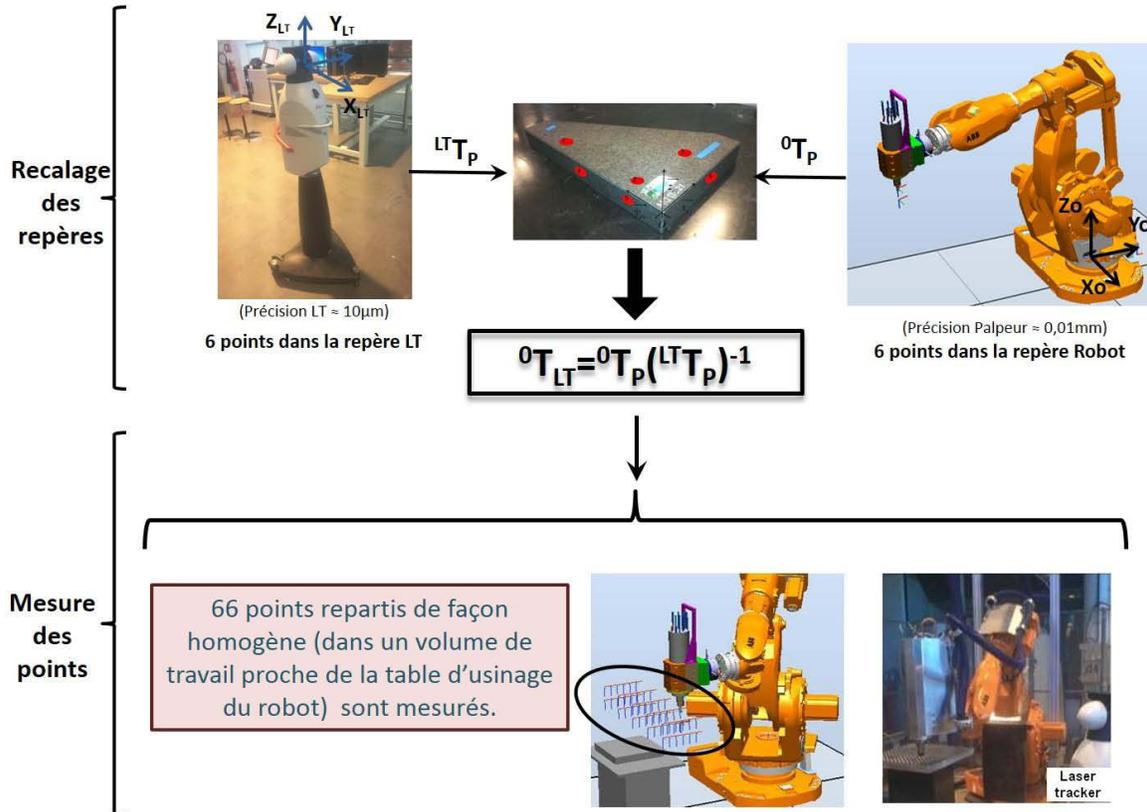


Figure 3- 9 Résumé protocole d'essais.

La pose réelle doit être mesurée par un système de métrologie permettant une mesure complète (position et orientation) ou une mesure partielle (position ou orientation) de l'effecteur. Cette phase définit, en partie, la performance, le temps et le coût de l'identification [Maurine13], [Ginani11], [Elatta04].

La technologie utilisée pour cette étape est un système de mesure par Laser Tracker, Leica ATD-901 (Figure 3- 10). Les performances en termes de précision de mesure de la position de la mire sont de $\pm 15\mu\text{m} + 6\mu\text{m}/\text{m}$.



Figure 3- 10 Laser Tracker Leica ATD-901.

La première étape du protocole de mesure consiste à recalibrer le repère de mesure du Laser Tracker avec le repère de base du robot. Ce recalage se fait par l'identification de la matrice de passage entre le repère de mesure du Laser Tracker et le repère de base du robot. Nous choisissons de mesurer un repère (R_{eq}) associé à une équerre de métrologie en marbre à l'aide de 6 points avec le robot et le Laser Tracker. L'équerre en marbre est placée sur la table d'usinage du robot au niveau de l'espace de travail considéré (Figure 3-11).

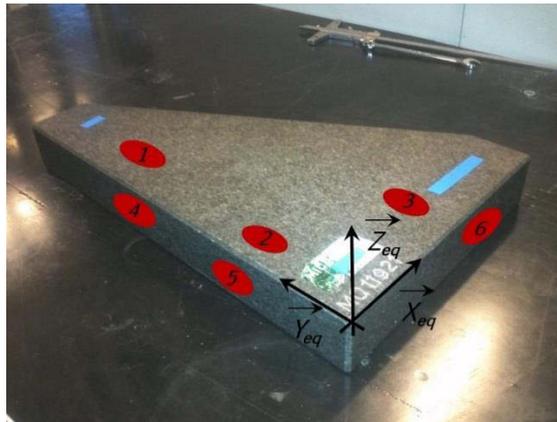


Figure 3- 11 Repères équerre.

La mesure du repère de l'équerre par le robot se fait à l'aide d'un palpeur ayant une précision de l'ordre de 0,01 mm (Figure 3- 12).

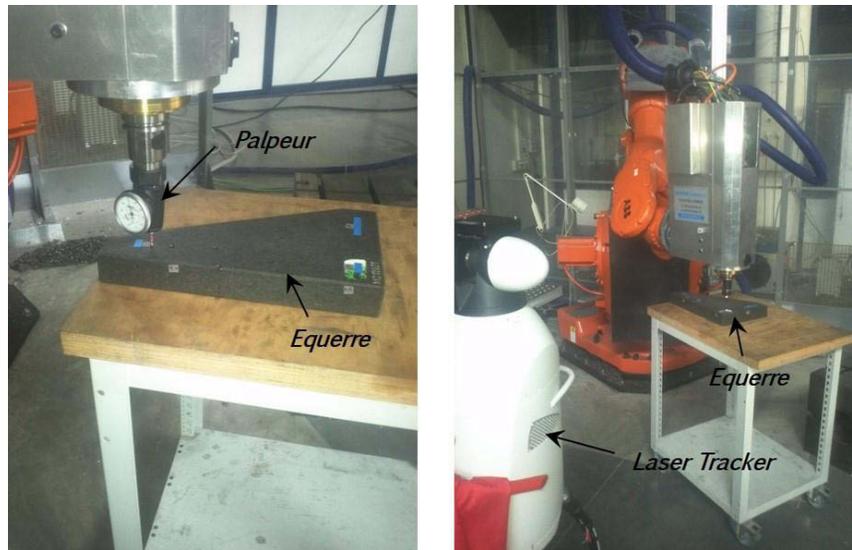


Figure 3- 12 Disposition de l'équerre, le Laser Tracker et le palpeur.

La mesure des 6 points de l'équerre avec le Laser Tracker permet de définir la matrice de passage (${}^{LT}\mathbf{T}_{eq}$) entre le repère de l'équerre et le repère de mesure du Laser Tracker.

De la même manière nous mesurons 6 points sur l'équerre à partir du palpeur pour obtenir la matrice de passage (${}^0\mathbf{T}_{eq}$) entre le repère de l'équerre et le repère de base du robot.

Ainsi nous déduisons la matrice de transformation du repère de base du robot par rapport au repère de mesure du Laser Tracker (${}^0\mathbf{T}_{LT}$) à partir de l'équation :

$${}^0\mathbf{T}_{LT} = {}^0\mathbf{T}_{eq} \left({}^{LT}\mathbf{T}_{eq} \right)^{-1} \quad 3-15$$

Une fois la matrice de transformation du repère robot par rapport au Laser Tracker () obtenue, nous pouvons réaliser des mesures de pose de l'effecteur final pour déterminer l'erreur de position initiale du robot.

Le choix du nombre de mesures et de la configuration du robot pendant l'étalonnage a été largement discuté, ainsi des auteurs comme Barati [Barati11] et Nubiola [Nubiola13b] indiquent qu'un grand nombre de mesures peut contribuer à réduire l'effet de bruit sur la mesure et aussi améliorer la convergence de l'algorithme.

Ye et autres, [Ye06], utilisent seulement 20 configurations pour la calibration du robot ABB IRB 2400/L servant à la soudure, et obtient une réduction de 48,85% et 47,55% sur l'erreur moyenne et la moyenne quadratique respectivement. Dans le travail d'Alici [Alici05],

85 points ont été sélectionnés pour l'identification de 18 paramètres géométriques d'un robot Motoman SK 120. Ses résultats sont extrapolés à tout l'espace de travail du robot, et amène une réduction de 60% de l'erreur moyenne et 57% sur l'erreur moyenne quadratique. Pour la calibration d'un robot Motoman P-8 et avec 27 paramètres à identifier, Everet [Everet87] propose 367 configurations du robot et obtient 70,2% de réduction d'erreur moyenne quadratique.

Ainsi, la sélection de pose de l'effecteur final doit être précédée d'une étude pour déterminer l'adéquation entre le nombre de mesures réalisées et les exigences en termes de précision pour une structure de robot et une application données.

Dans le cas de robots utilisés pour des opérations d'usinage la précision attendue est étroitement liée à la qualité de la pièce usinée positionnée dans un espace de travail donné.

Dans ces travaux, nous considérons que les opérations de perçage, de découpe, d'ébavurage ou de meulage, par exemple, sont à réaliser autour d'une table d'usinage. Nous choisissons ainsi de mesurer le comportement du robot dans un espace de travail spécifique proche de la table d'usinage du robot. Nous avons choisi de réaliser les essais sur deux espaces de travail différents pour comparer le comportement du robot dans les deux espaces choisis. La Figure 3- 13 montrent les deux espaces de travail considérés.

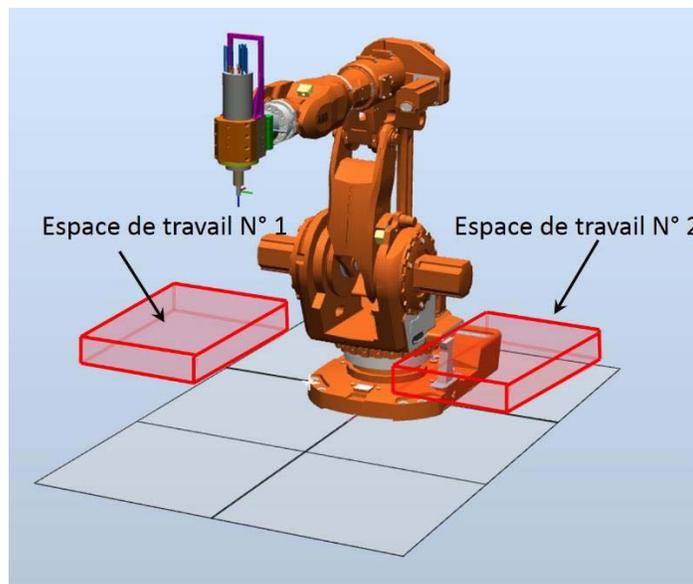


Figure 3- 13 Les espaces de travail étudiés.

Dans ces espaces de travail, nous proposons de mesurer 66 points répartis de façon homogène afin de balayer la totalité du volume de l'espace de travail. La distribution de ces 66 points est montrée dans la Figure 3- 14.



Figure 3- 14 Les 66 points sur l'espace de travail.

Dans la suite, nous réalisons les mesures de pose de l'effecteur final dans ces 66 points, que nous détaillons ci-dessous.

3 Mesure de la pose des 66 points.

Le recalage du repère du Laser Tracker avec le repère du robot permet d'exprimer les positions des 66 points mesurés dans le repère du robot (Figure 3- 15).



Figure 3- 15 Le robot et le Laser Tracker dans la phase de mesure.

Les 66 poses mesurées sont associées aux valeurs articulaires commandées. Les 66 points sont positionnés dans l'espace de travail considéré pour réaliser une opération d'usinage. La mesure est réalisée avec un Laser Tracker en mesure stationnaire, c'est-à-dire que la détermination de la position d'un point est réalisée à partir de la moyenne de 500 mesures effectuées pendant un temps donné. L'écart type de ces 500 points permet d'estimer un critère de répétitivité de la mesure.

Les résultats de ces mesures sont présentés sur la Figure 3- 16 qui détaille les erreurs de position initiale entre la position désirée et la position obtenue dans l'espace de travail n°1.

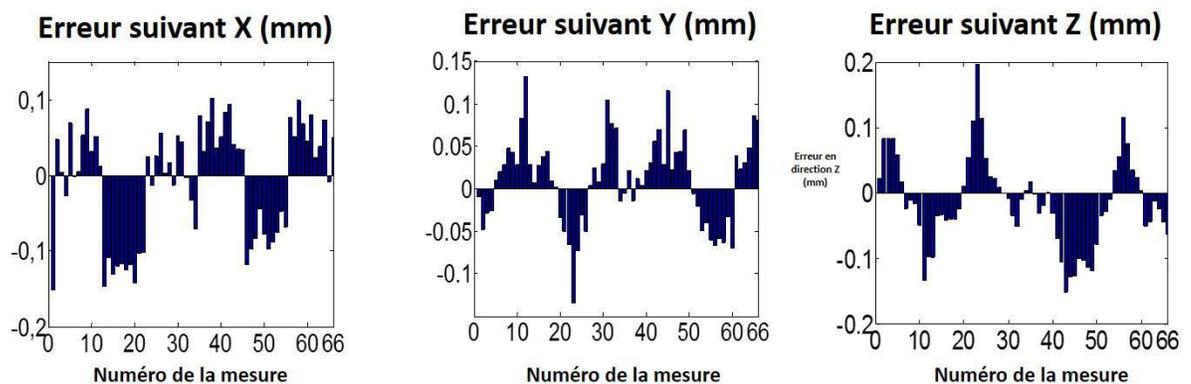


Figure 3- 16 Erreur de position initiale dans l'espace de travail n°1.

Sur les Figure 3- 17 à la Figure 3- 19 sont tracées les surfaces représentant la différence entre la position de l'outil mesuré avec le Laser Tracker et la position de l'outil commandé au robot.

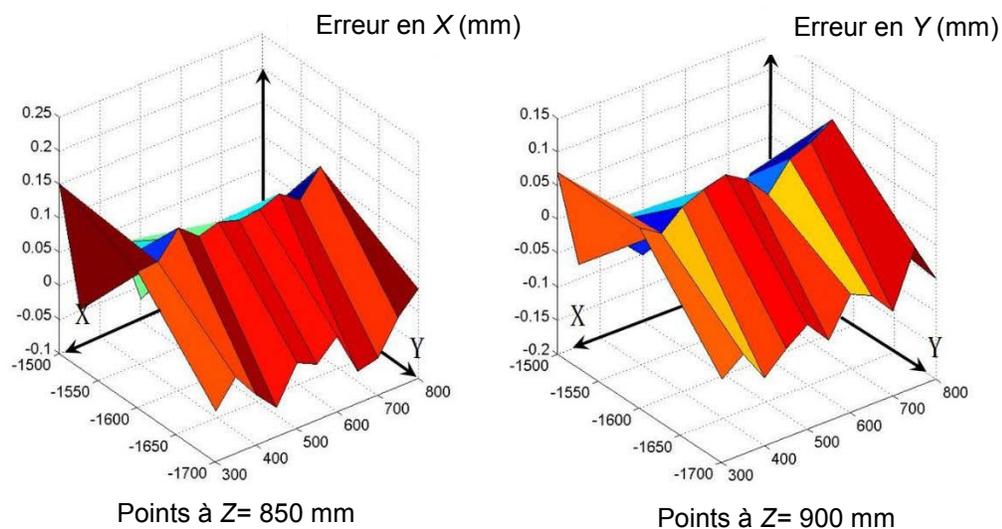


Figure 3- 17 Surfaces des erreurs de position initiale dans l'axe X, essai N°1.

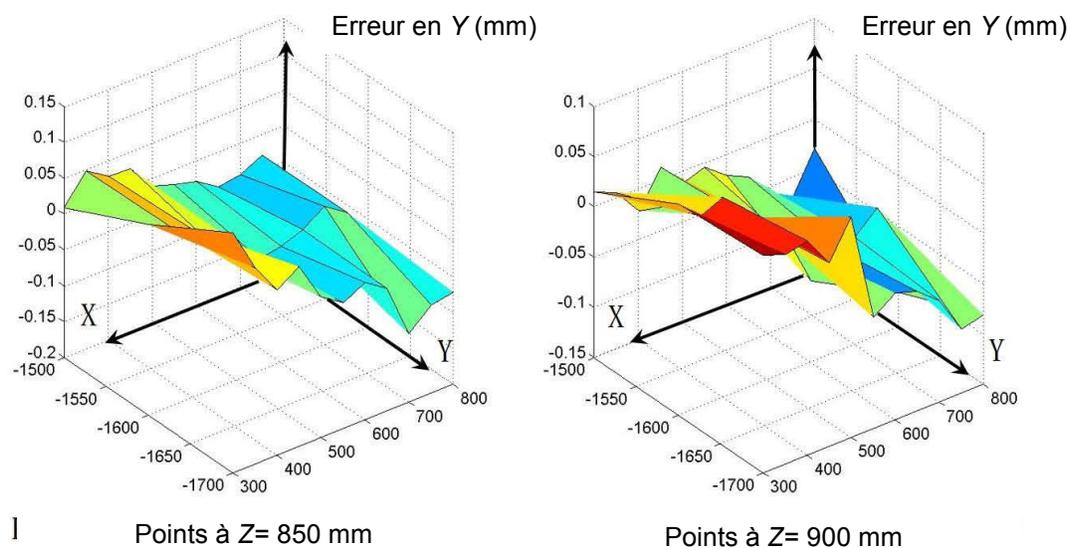


Figure 3- 18 Surfaces des erreurs de position initiale dans l'axe Y, essai N°1.

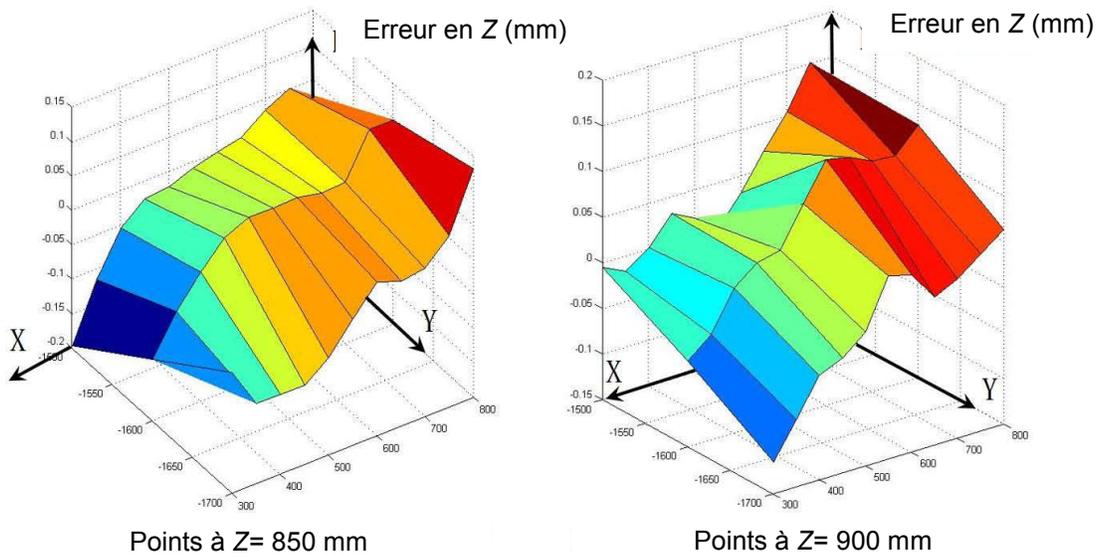


Figure 3- 19 Surfaces des erreurs de position initiale dans l'axe Z, essai N°1.

La Figure 3- 20 montre les erreurs sur l'espace de travail n°2. Sur les Figure 3- 21 à la Figure 3- 23 sont tracées les surfaces qui représentent la différence entre la position de l'outil avec la mesure du Laser Tracker et la position de l'outil commandé au robot.

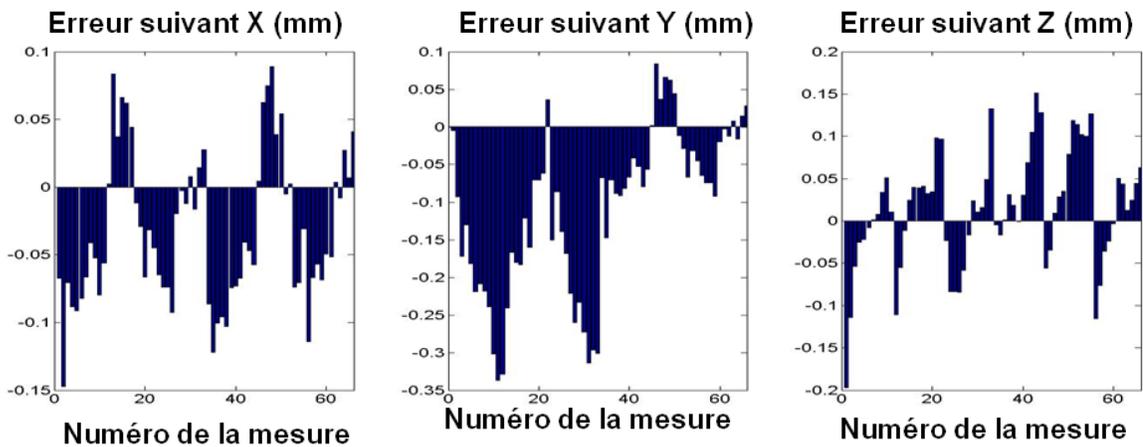


Figure 3- 20 Erreur de position initiale essai N°2.

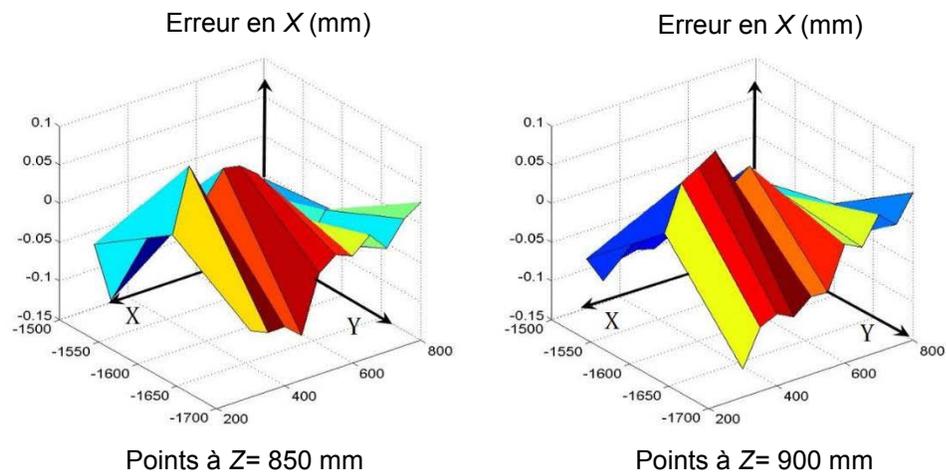


Figure 3- 21 Surfaces des erreurs de position initiale dans l'axe X, essai N°2.

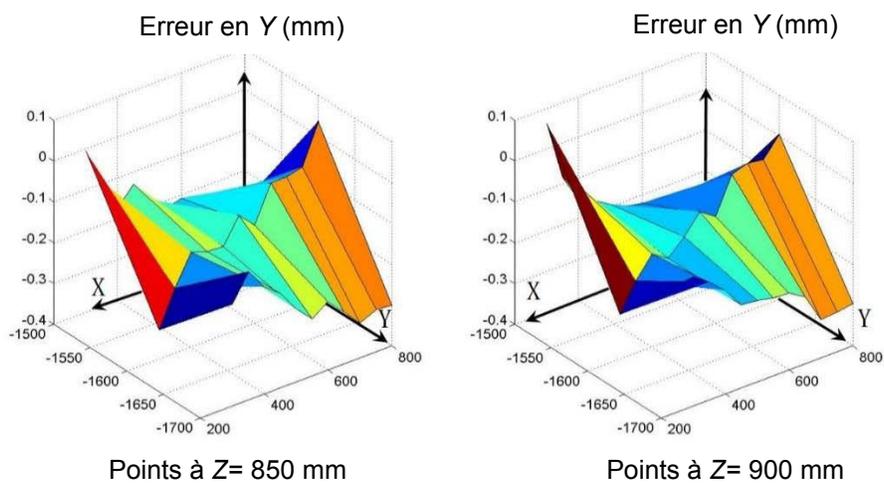


Figure 3- 22 Surfaces des erreurs de position initiale dans l'axe Y, essai N°2.

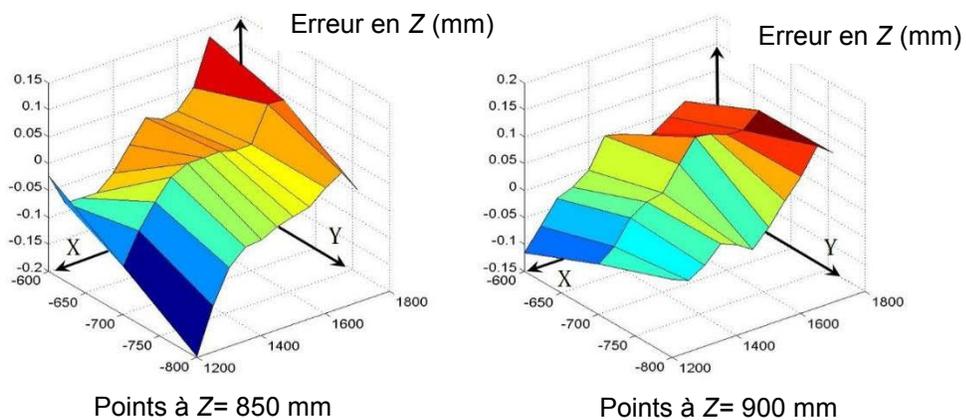


Figure 3- 23 Surfaces des erreurs de position initiale dans l'axe Z, essai N°2.

En observant les figures nous pouvons remarquer que l'erreur initiale maximum de position de l'effecteur final est de l'ordre de 0,283 mm pour l'espace de travail n°1 et de 0,378 mm pour le n°2, pendant que la moyenne est de l'ordre de 0,105 mm et 0,199 mm pour le premier et deuxième espace de travail respectivement.

Nous constatons aussi que les valeurs des erreurs selon l'axe *Z* sont les plus importantes.

De plus, une étude de l'intervalle de confiance est effectuée sur la mesure de ces erreurs initiales avec une erreur de 5%. Cet intervalle de confiance montre le degré de précision des moyennes des données.

Les résultats obtenus sur cette mesure sont montrés dans le Tableau 3- 3 et le Tableau 3- 4.

Essai N°1	Erreur Maximale en X (mm)	Erreur Maximale en Y (mm)	Erreur Maximale en Z (mm)
	0,146	0,132	0,151
	Erreur Moyenne en X (mm)	Erreur Moyenne en Y (mm)	Erreur Moyenne en Z (mm)
	0,003	0,011	0,015
	Écart-type en X	Écart-type en Y	Écart-type en Z
	0,075	0,051	0,067
	Intervalle de confiance en 5% en X	Intervalle de confiance en 5% en Y	Intervalle de confiance en 5% en Z
0,018	0,012	0,016	

Tableau 3- 3 Résumé des résultats des mesures de la précision initial du robot Essai N°1.

Essai N°2	Erreur Maximale en X (mm)	Erreur Maximale en Y (mm)	Erreur Maximale en Z (mm)
	0,088	0,33	0,14
	Erreur Moyenne en X (mm)	Erreur Moyenne en Y (mm)	Erreur Moyenne en Z (mm)
	0,031	0,109	0,08
	Écart-type en X	Écart-type en Y	Écart-type en Z
	0,055	0,093	0,037
	Intervalle de confiance en 5% en X	Intervalle de confiance en 5% en Y	Intervalle de confiance en 5% en Z
0,013	0,023	0,009	

Tableau 3- 4 Résumé des résultats des mesures de la précision initial du robot Essai N°2.

Nous pouvons constater que les erreurs de pose de l'effecteur sont identiques suivant l'axe *Z* pour les essais N°1et N°2. En effet, la configuration du robot et l'orientation de l'effecteur est similaire dans les deux cas, ce qui permet de considérer les défauts liés aux déformations dues au poids des éléments du robot comme similaires (Figure 3- 13). Toutefois, les erreurs en *X* et *Y* sont modifiées du fait d'un changement d'orientation de l'axe 1 du robot par rapport au repère de base.

Les erreurs mesurées lors de ces essais nous servent par la suite de référence afin d'évaluer les apports de nos méthodes de modélisation géométrique.

4 Identification du modèle

A partir de la mesure des 66 points, nous procédons à l'identification du modèle géométrique du robot déterminé précédemment. Cette identification permettra d'estimer, à l'aide de la valeur du résidu, la précision maximale atteignable.

Le modèle utilisé pour cette première identification est le modèle géométrique développé au paragraphe 1.3. Nous avons ainsi 6 paramètres à identifier, RL_1 , d_2 , d_3 , d_4 , RL_4 et RL_6 , pour la structure du robot. Pour la broche, nous utilisons les paramètres nominaux renseignés dans le pupitre de commande de la cellule robotisé du CTT de Sigma-Clermont à savoir, $X_{Broche} = 144,786 \text{ mm}$, $Y_{Broche} = 0,587 \text{ mm}$ et $Z_{Broche} = 316,783 \text{ mm}$.

L'identification numérique est basée sur la comparaison de la pose mesurée sur l'ensemble des 66 points de l'espace du travail à l'égard de la pose estimée avec le modèle géométrique. Nous évaluons la position de l'effecteur simulée avec le modèle géométrique direct (X_d) avec la position réelle évaluée par les mesures du laser tracker (X_r). Cette comparaison est réalisée en minimisant une fonction coût confrontant les deux estimations de l'état du robot:

$$f_{erreur}(\xi_k) = \min_{\xi_k} \left(\sum_{i=1}^{66} \|X_{di}(q_i, \xi_k) - X_{ri}\|^2 \right) \quad 3-16$$

où ξ_k sont les paramètres de l'optimisation basée sur la fonction coût. Les paramètres géométriques identifiés ξ_{geom} minimisent la fonction coût.

La méthode d'identification à utiliser est la méthode de Levenberg-Marquardt, algorithme d'optimisation non linéaire de moindres carrés implémenté sur le logiciel Matlab avec la fonction *lsqnonlin*. Dans un premier temps, les valeurs initiales des paramètres géométriques sont les valeurs nominales.

Les paramètres identifiés après l'identification numérique du modèle à six paramètres correspondent uniquement à la structure du robot et ne prennent pas en compte les valeurs des paramètres géométriques de la broche.

L'erreur résiduelle entre les positions simulées avec les *MGD* à 6 paramètres et les positions mesurées pour des valeurs identiques de positions articulaires sont présentés

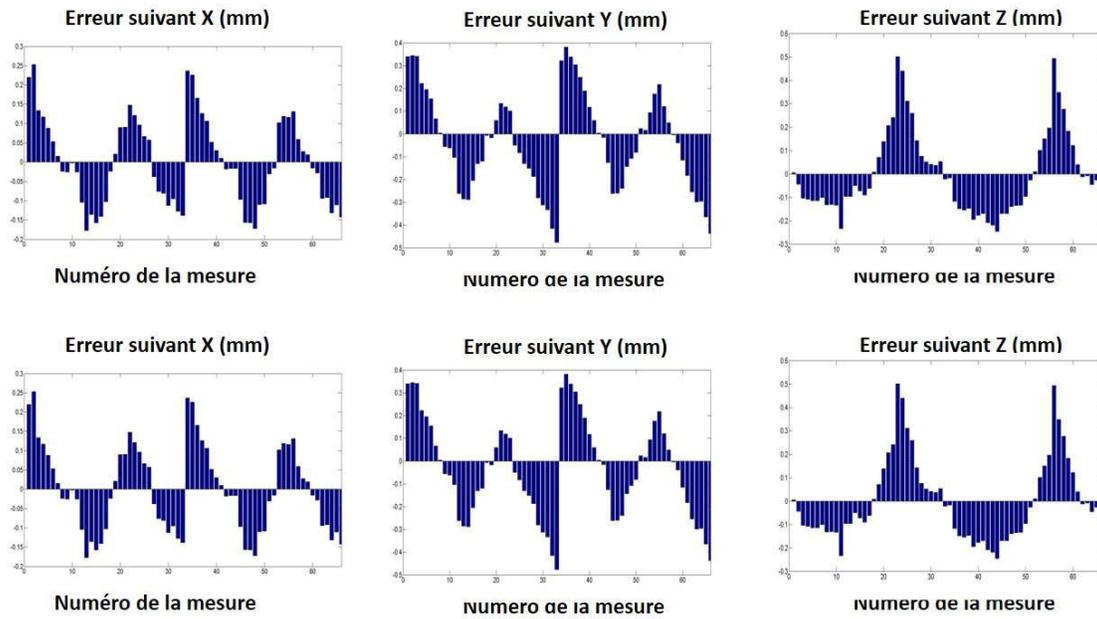


Figure 3- 24 pour l'essai dans l'espace n°1 et Figure 3- 25 pour l'espace n°2.

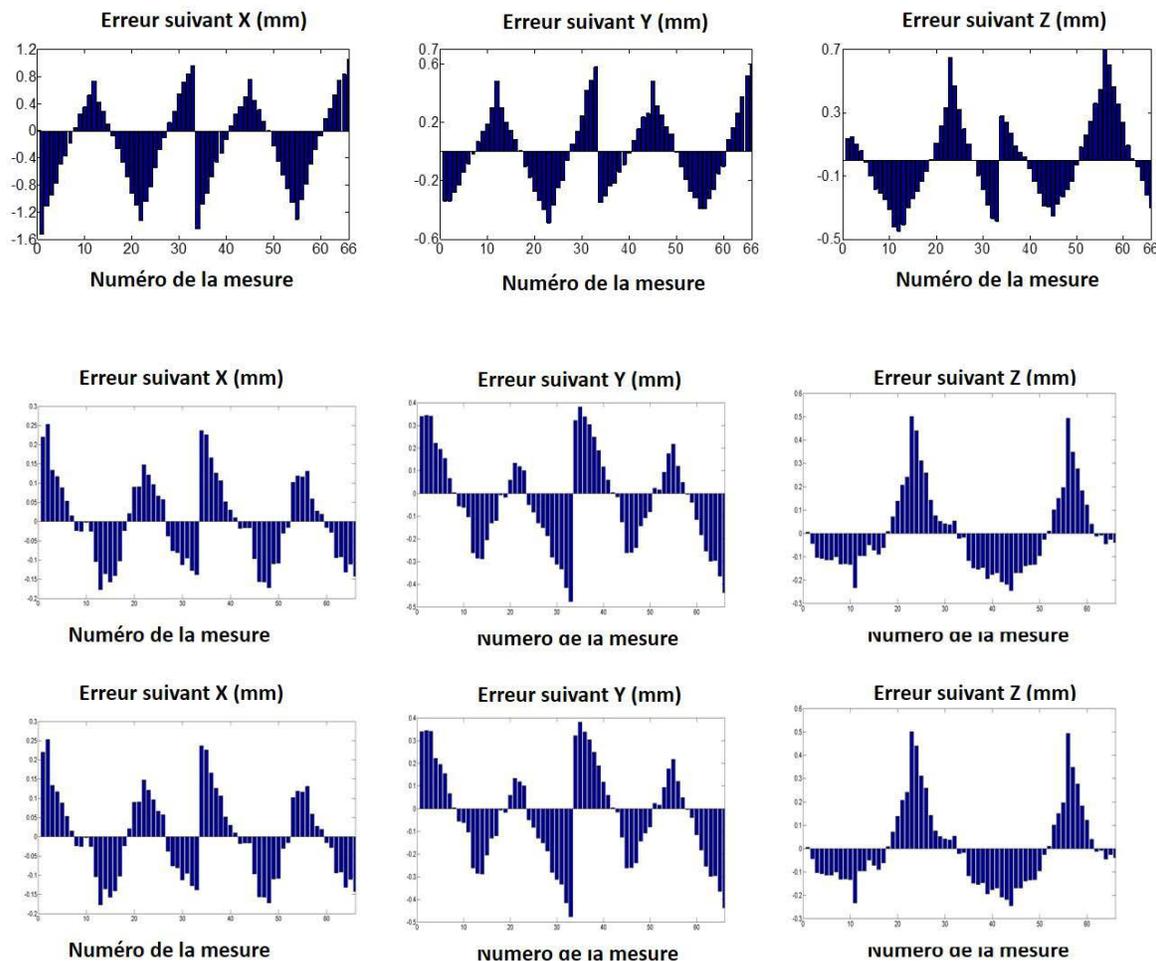


Figure 3- 24 Erreur de position résiduelle pour le modèle à 6 paramètres, espace n°1.

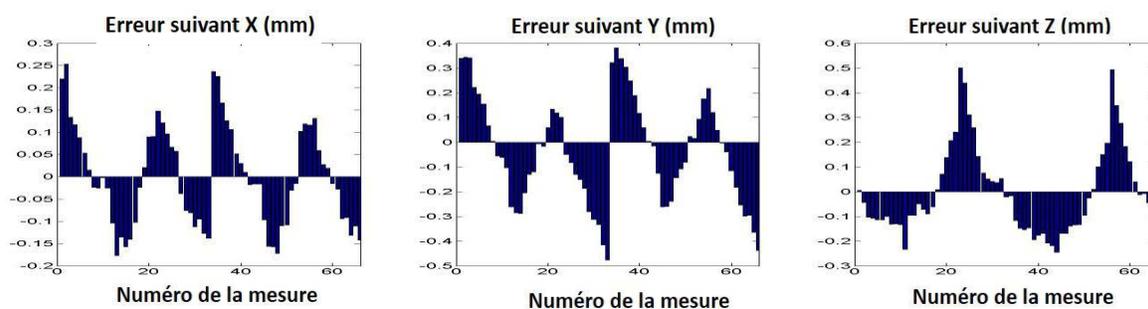


Figure 3- 25 Erreur de position résiduelle pour le modèle à 6 paramètres, espace n°2.

5 Conclusions

Cette évaluation de la précision initiale du robot nous a permis de prendre conscience des erreurs de position du robot. En effet, dans les deux espaces de travail étudiés nous

avons constaté que la position moyenne de la position de l'effecteur final est de l'ordre de entre 0,283 mm et 0,378 pour les espaces de travail évalués.

Cette analyse montre que la différence entre les valeurs mesurées et les valeurs de la commande du robot sont plus grandes que les valeurs attendues lors d'un processus d'usinage, à savoir de l'ordre de 50 μm .

Après la phase d'identification des paramètres géométriques du modèle à 6 paramètres, des erreurs de position résiduelles importantes sont présentes. Ces erreurs résiduelles sont plus grandes que l'erreur initiale mesurée du robot dans le paragraphe 3. Ce constat montre l'intérêt de travailler sur la détermination du nombre de paramètres géométriques influents sur le comportement géométrique du robot afin d'améliorer la précision de pose de l'outil porté par le robot.

Ainsi, cette étude nous permet d'envisager une définition des paramètres géométriques à partir de l'analyse du modèle géométrique du robot. En effet, à partir de la réduction du modèle avec une analyse basée sur l'étude de la matrice de sensibilité et de son rang.

Chapitre 4

Proposition d'un modèle géométrique des robots d'usinage en fonction de l'espace de travail

Dans ce chapitre, nous réalisons différentes modélisations géométriques du robot ABB IRB 6660 pour identifier les paramètres géométriques influents et améliorer la précision de pose finale du robot. Dans ce contexte, nous développons différents modèles du robot à partir de l'étude de la configuration géométrique de sa structure. De plus, nous présentons des modèles de robot avec une configuration uniquement sérielle et avec une configuration sérielle et parallèle, ce qui nous permettra d'évaluer la pertinence de ces deux approches. Ensuite, nous réalisons une étude de sensibilité des paramètres introduits avant de réaliser l'identification des paramètres géométriques avec un processus d'optimisation. Finalement nous présentons un modèle adapté à la structure du robot afin d'améliorer la précision de pose de l'effecteur.

Plusieurs méthodes de modélisation géométrique de la structure d'un robot existent. Ces méthodes sont basées sur un certain nombre d'hypothèses et/ou des approches empiriques. Toutefois, le manque de formalisation de la précision de pose attendue et de l'impact sur la précision d'assemblage et de fabrication des éléments de la structure du robot rend leur application directe pour des opérations d'usinage délicates.

Ainsi, dans ce chapitre, nous déterminons des pistes permettant de formaliser la modélisation géométrique d'un robot en fonction du type de structure et de la nature des paramètres introduits.

Nous proposons une analyse de la modélisation et une identification géométrique d'un robot sériel utilisé pour l'usinage. Un nouveau modèle géométrique permettant d'améliorer la précision de la pose de l'outil est défini. Ce modèle est établi à partir de la matrice de sensibilité et de son rang.

1 Analyse de la structure du robot ABB IRB 6660

Afin de proposer un modèle cohérent avec le robot ABB IRB 6660, il est nécessaire d'analyser, dans un premier temps, les particularités de sa structure.

1.1 Analyse de l'architecture du robot.

Le mécanisme du robot est composé de plusieurs pièces avec des liaisons dans le but de réaliser des mouvements programmés dans son espace de travail.

L'analyse de l'architecture du robot proposé ci-dessous est faite dans le but de déterminer la mobilité du mécanisme pour établir les conditions géométriques dont dépend le bon fonctionnement du système.

Pour initier l'étude, un schéma cinématique est présenté dans la Figure 4- 1.

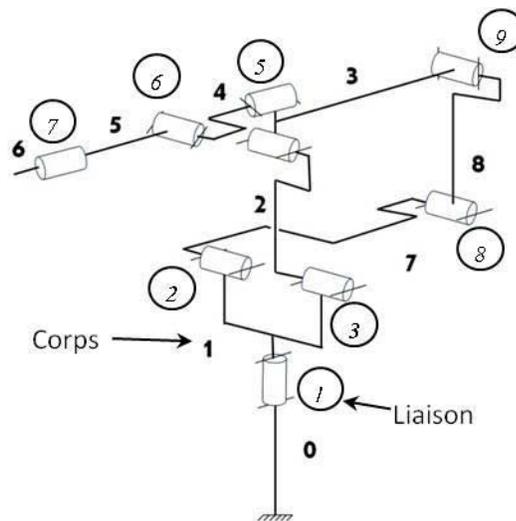


Figure 4- 1 Schéma cinématique du robot.

Sur cette figure, 8 corps sont mis en place avec 9 liaisons pivots. Le graphe des liaisons de la Figure 4- 2 schématise ce système.

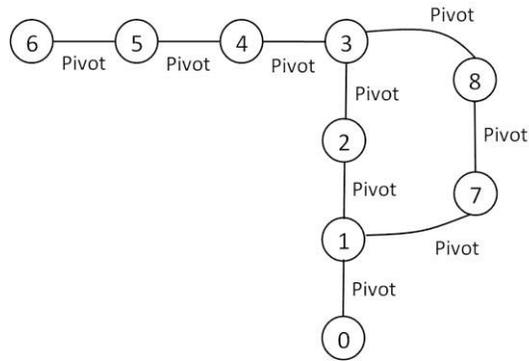


Figure 4- 2 Graphe de liaisons du mécanisme du robot.

L'étude du comportement particulier du mécanisme est réalisée afin de calculer le degré de mobilité du mécanisme.

Pour déterminer le nombre de chaînes fermées indépendantes nous utilisons la théorie des graphes [Fournier11].

Le nombre de chaînes fermées indépendantes dans un graphe est donné par le cyclomatique du graphe (μ) :

$$\mu = N_L - N_C + 1 \quad 4-1$$

Où : N_L est le nombre d'arcs ou de liaisons et N_C est le nombre de corps.

Dans notre cas, pour le robot ABB IRB 6660, $N_L = 9$ et $N_C = 9$, d'où $\mu = 1$, c'est-à-dire que le robot a une chaîne fermée indépendante.

Le degré d'hyperstativité d'un mécanisme est un terme qui indique le nombre de liaisons surabondantes vis-à-vis des degrés de liberté du mécanisme. Un mécanisme est généralement hyperstatique afin d'améliorer sa rigidité.

Le degré d'hyperstativité (h) d'une chaîne cinématique est donné par l'équation suivante :

$$h = I_S - (E_S - m) \quad 4-2$$

Où : I_S est le nombre d'inconnues statiques dues aux liaisons, E_S est le nombre total d'équations issues de la modélisation statique et m les mobilités du mécanisme. Les liaisons du robot sont de type pivot, ainsi pour chaque liaison il y a 5 inconnues statiques. Pour l'ensemble des liaisons le nombre d'inconnues est de 45.

Le nombre total d'équations issues de la modélisation statique est de :

$$E_S = d(N_C - 1)$$

4-3

Pour le robot E_S est égal à 48 et le degré de mobilité est égal à 6, donc le degré d'hyperstaticité du robot est égal de 3.

Ce degré d'hyperstaticité veut dire que le robot a une structure avec 3 liaisons surabondantes. Il y a ainsi des contraintes dimensionnelles et des contraintes géométriques à imposer pour que le mécanisme fonctionne correctement [Schneider99]. Pour le robot, les liaisons surabondantes sont liées aux liaisons du parallélogramme, c'est-à-dire aux liaisons liées aux trois variables passives dans les axes 7, 8 et 9. Ainsi, il faut imposer des conditions dimensionnelles et/ou géométriques aux liaisons du parallélogramme afin que leurs axes soient parallèles et que ce mécanisme fonctionne correctement. Cette contrainte doit être prise en compte lors du développement du modèle géométrique du robot. Ainsi, nous considérons que l'erreur d'orientation des axes des liaisons 7, 8 et 9 ne sont pas prises en compte dans le modèle géométrique du robot et que leur parallélisme est assuré par les contraintes de fabrication et d'assemblage.

Cette analyse de la structure du robot nous permet de réaliser des modèles géométriques plus proches du comportement réel de l'architecture du robot.

2 Modèles géométriques du robot.

A partir du modèle géométrique à 6 paramètres présenté dans le chapitre 3, nous développons des modèles géométriques en ajoutant des paramètres géométriques. Une analyse de sensibilité permet de déterminer les paramètres influents sur la précision du robot.

2.1 Modèles sériel du robot

Le modèle initial étudié est le modèle à 6 paramètres présenté dans le chapitre 3. Ce modèle ne prend pas en compte la transformation de mouvement généré par le mécanisme en parallélogramme. Par la suite, ce modèle est complété par l'ajout de paramètres supplémentaires.

Le robot est doté d'une broche comme effecteur final. L'outil est monté sur cette broche. Des paramètres permettent de positionner et d'orienter la broche dans le repère du 6^{ème} et dernier axe du robot.

La matrice de transformation homogène représentant le passage du repère de l'axe 6 du robot au repère de l'extrémité de l'outil est définie comme ${}^6\mathbf{T}_b$.

Trois hypothèses peuvent être faites sur la formulation de la matrice de transformation ${}^6\mathbf{T}_b$:

- Si nous considérons que l'orientation et la position de l'effecteur vis-à-vis du repère de l'axe 6 est maîtrisée alors :

$${}^6\mathbf{T}_b = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & x_{ef} = x_{Broche} + jauge_{Outil} \\ 0 & 1 & 0 & y_{ef} = y_{Broche} \\ -1 & 0 & 0 & z_{ef} = z_{Broche} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 4-4$$

où x_{Broche} , y_{Broche} et z_{Broche} sont les coordonnées du point piloté de la broche par rapport au système de coordonnées de l'axe 6 et leur valeur est connue précisément, et $jauge_{Outil}$ est la longueur de l'outil utilisée si le centre d'outil est le point piloté. La phase d'identification du robot consiste à déterminer les valeurs des 6 paramètres géométriques liés à la structure du robot : RL_1 , d_2 , d_3 , d_4 , RL_4 et RL_6 définies déjà comme modèle à 6 paramètres.

- Si nous considérons que seule l'orientation de l'effecteur vis-à-vis du repère de l'axe 6 est maîtrisée nous devons identifier 9 paramètres : RL_1 , d_2 , d_3 , d_4 , RL_4 , RL_6 , x_{broche} , y_{broche} et z_{broche} . Voir Figure 4- 3.

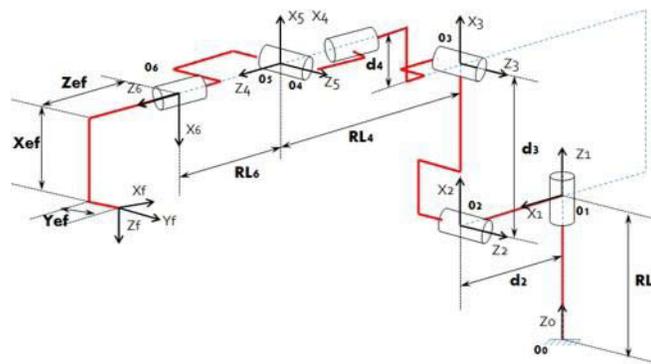


Figure 4- 3 Modèle à 9 paramètres.

- Si nous considérons que ni la position, ni l'orientation de l'effecteur vis-à-vis du repère de l'axe 6 n'est maîtrisée alors il faut aussi identifier les paramètres permettant d'orienter l'axe de la broche par rapport au repère de l'axe 6 :

$$\vec{z}_{ef} = i\vec{x}_6 + j\vec{y}_6 + k\vec{z}_6$$

avec : $i^2 + j^2 + k^2 = 1$; $i > 0$

Nous devons ainsi identifier 11 paramètres : $RL_1, d_2, d_3, d_4, RL_4, RL_6, x_{Broche}, y_{Broche}$ et z_{Broche} , (Figure 4- 4). Dans ce cas une pondération de 100 est appliquée sur les paramètres j et k (coordonnées d'un vecteur unitaire) pour les rendre homogènes avec les paramètres de longueur.

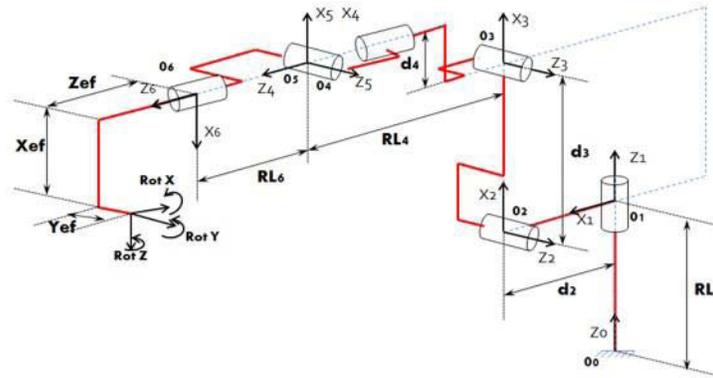


Figure 4- 4 Modèle à 11 paramètres.

Ainsi, suivant les hypothèses faites sur la maîtrise des défauts de fabrication et d'assemblage de la broche sur le robot, 2 modèles de plus peuvent être proposés en considérant le robot comme un robot sériel.

Les 3 modèles géométriques proposés ci-dessus sont établis à partir des hypothèses de la méthode de Khalil et Kleinfinger. Ainsi, les défauts de concordance ou d'alignement des axes des liaisons pivots ne sont pas considérés. Cette hypothèse impose une maîtrise de ces défauts lors des phases d'usinage et d'assemblage de la structure du robot. Par la suite, nous nous proposons d'introduire des paramètres supplémentaires afin d'ajouter ces défauts dans la phase d'identification.

Ainsi, un modèle à 21 paramètres est introduit. Il prend en compte les erreurs de position de chaque liaison pivot dans le repère précédent dans les 3 directions. Ainsi pour chaque liaison du robot, nous introduisons 3 paramètres géométriques, soit 18 paramètres pour la structure du robot auquel nous ajoutons 3 paramètres pour positionner le point piloté de l'outil. Le quatrième modèle proposé en considérant uniquement la structure sérielle est ainsi de 21 paramètres.

Ces paramètres sont présentés dans la Figure 4- 5.

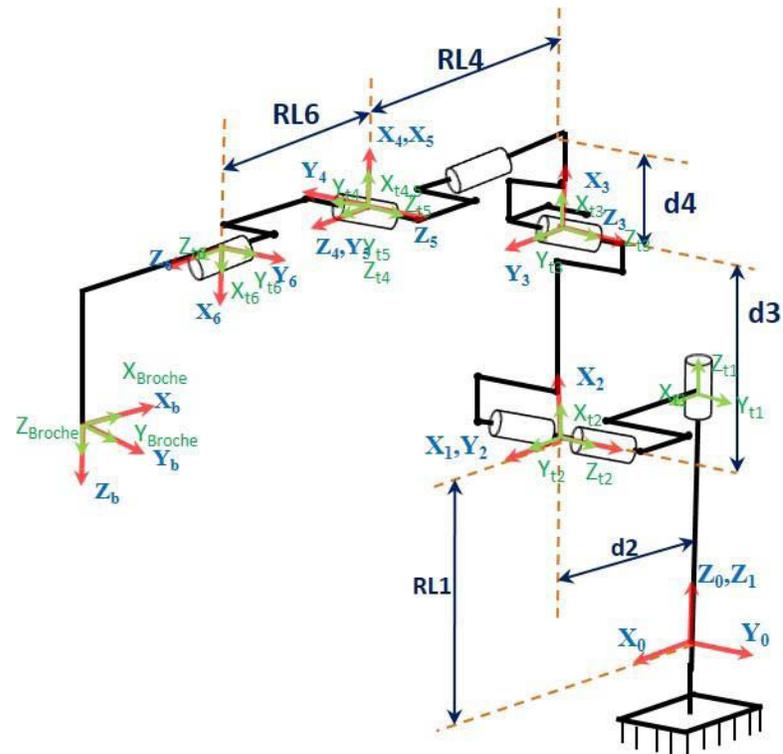


Figure 4- 5 Modèle de DH en bleu et modèle à 21 paramètres en vert.

Pour comparer les méthodes de modélisation, nous complétons l'étude par un modèle obtenu avec la méthode *TCS* présenté dans le chapitre 2. 3 modèles sont obtenus avec cette méthode : un modèle avec 6 paramètres correspondant à la structure du robot, un modèle à 9 paramètres avec la prise en compte des paramètres géométriques de la broche (x_{Broche} , y_{Broche} et z_{Broche}) et un modèle 21 paramètres qui correspondent à 3 erreurs de position entre chaque repère lié à chaque liaison avec la méthode de DH.

Dans ce paragraphe, nous proposons ainsi 7 modèles différents (deux modèles à 6 paramètres, deux à 9 paramètres, un à 11 paramètres et deux à 21 paramètres) en considérant uniquement la partie sérielle du robot. Dans le paragraphe suivant, nous nous intéressons au développement de modèles intégrant le comportement géométrique du parallélogramme.

2.2 Modèle avec parallélogramme.

Le robot ABB IRB 6660 est composé d'une structure mécanique en parallélogramme conçue pour être plus rigide et résistante qu'une architecture série traditionnelle.

Une figure du modèle du parallélogramme avec les paramètres considérés est présentée sur la Figure 4- 6.

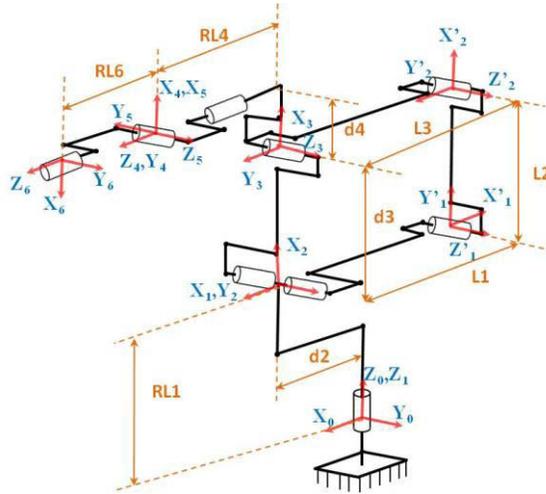


Figure 4- 6 Modèle parallèle du robot.

La transmission du mouvement à l'articulation 3 est obtenue par le système de type parallélogramme. La variable articulaire q_3 se trouve au niveau de l'articulation 2, la relation entre q_3 , les paramètres géométriques du parallélogramme et l'angle θ_3 de l'articulation 3 doivent alors être déterminée.

La Figure 4- 7 illustre la modélisation du système de type parallélogramme proposée. Nous faisons l'hypothèse que le système est plan et que l'ensemble des axes des liaisons sont parallèles afin d'être cohérent avec les hypothèses de la méthode de Denavit-Hartenberg.

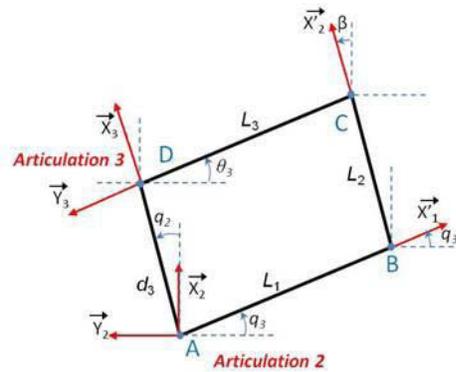


Figure 4- 7 Relations des paramètres du parallélogramme.

La relation entre q_3 et θ_3 est donnée par l'équation suivante :

$$\theta_3 = 2 \tan^{-1} \left(\frac{2B \pm \sqrt{4B^2 + 4A^2 - 4C^2}}{2(A+C)} \right) \quad 4-6$$

où :

$$A = -L_1 \cos(q_3) - d_3 \sin(q_2) \quad 4-7$$

$$B = -L_1 \sin(q_3) - d_3 \cos(q_2) \quad 4-8$$

$$C = \frac{L_2^2 - A^2 - L_3^2 - B^2}{2L_3} \quad 4-9$$

A partir de l'équation 4-6, nous avons la relation entre les valeurs des variables articulaires q_2 et q_3 et l'angle θ_3 et les paramètres géométriques du parallélogramme. Cette modélisation est ainsi utilisée pour exprimer des modèles géométriques prenant en compte la structure en parallélogramme du robot.

Dans un premier temps, le modèle développé est un modèle prenant en compte les paramètres liés à la structure du robot uniquement. Nous considérons dans ce cas que les valeurs de position et d'orientation de la broche par rapport au robot sont maîtrisées. Pour ce modèle, les consignes appliquées aux moteurs ($q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$) sont exprimées à partir de la pose de l'outil et des 9 paramètres géométriques : $RL_1, d_2, d_3, d_4, RL_4, RL_6, L_1, L_2$, et L_3 .

Si nous considérons que la position de la broche n'est pas maîtrisée alors le modèle développé est constitué de 12 paramètres, les 9 paramètres précédents et les paramètres de position de la broche : x_{Broche}, y_{Broche} et z_{Broche} .

A noter que les valeurs nominales des paramètres sont : $RL_1=814,5\text{mm}$, $d_2=300\text{mm}$, $d_3=700\text{mm}$, $d_4=280\text{mm}$, $RL_4=893\text{mm}$, $RL_6=200\text{mm}$, $L_1=500\text{mm}$, $L_2=700\text{mm}$, $L_3=500\text{mm}$, $x_{Broche}=144,876\text{mm}$, $y_{Broche}=0,58\text{mm}$ et $z_{Broche}=316,783\text{mm}$. Comme précédemment, deux autres modèles sont introduits afin de rendre compte des erreurs de concordance et d'alignement des axes des liaisons pivots en considérant la position et l'orientation de la broche maîtrisée.

Deux nouveaux modèles sont alors considérés en ajoutant des erreurs de position et/ou d'orientation des axes de chaque liaison pivot dans le repère précédent dans les 3 directions. Un modèle à 21 paramètres et un à 42 paramètres sont alors considérés. La Figure 4- 8 présente les paramètres pris en compte par ces deux modèles.

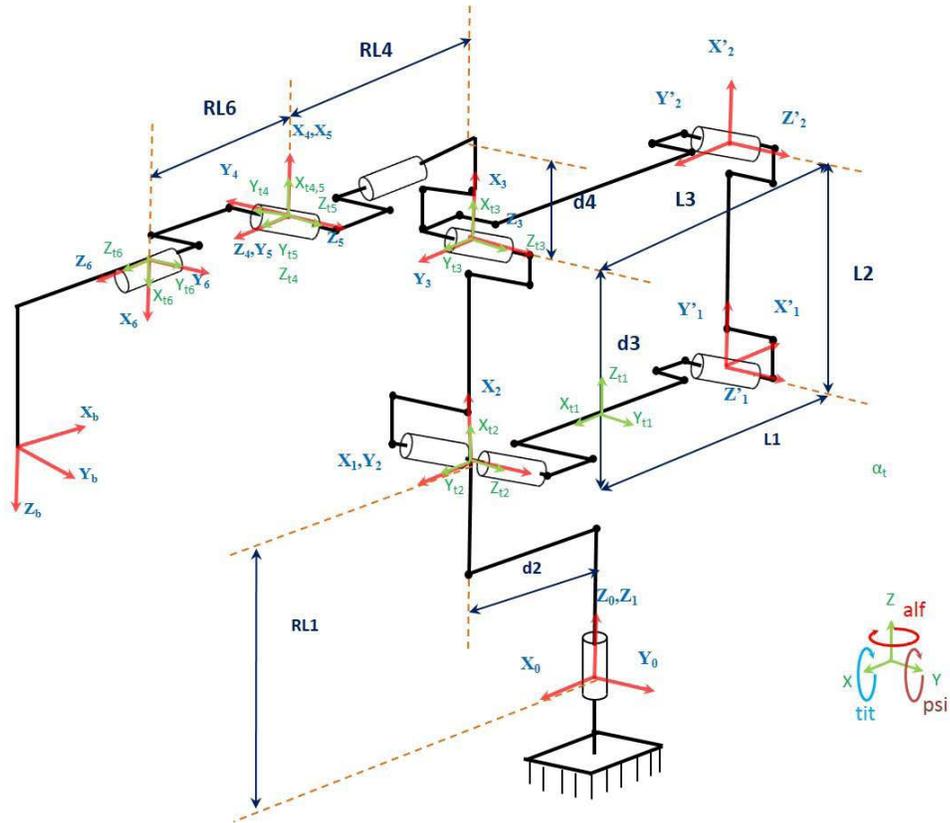


Figure 4- 8 Modèle à 42 paramètres avec les erreurs de position et d'orientation.

Les paramètres de l'ensemble des modèles proposés sont identifiés et les résidus obtenus après le processus d'identification sont comparés. Le Tableau 4- 1 reprend les différents modèles proposés.

Nom du modèle	Configuration du modèle	Nombre de paramètres	Observations
S_6	Structure sérielle	6	Géométrie du robot
S_9		9	Géom. du robot + Posit. broche
S_11		11	Géom. du robot + Posit et Orient. broche
S_21		21	Erreurs de position+ Posit. broche
P_9	Structure sérielle et structure en parallélogramme	9	Géométrie du robot
P_12		12	Géom. du robot + Posit. broche.
P_21		21	Erreurs de position
P_42		42	Erreurs de position et orientation.
TCS_6	Structure sérielle	6	Géométrie du robot
TCS_9		9	Géom. du robot + Posit. broche
TCS_21		21	Erreurs de position

Tableau 4- 1 Modèles développés du robot.

Dans le paragraphe suivant nous nous intéressons à l'identification de l'ensemble des modèles proposés.

3 Identification des paramètres.

La phase d'identification du robot consiste à déterminer les valeurs des paramètres géométriques liés à la structure du robot et éventuellement à la broche.

Comme nous avons mentionné dans le chapitre 3 pour l'identification du modèle initial, l'identification des modèles proposés est réalisée avec les 66 positions mesurées avec le Laser Tracker et comparés avec les positions simulées avec le *MGD*. Ainsi, en minimisant la fonction coût avec la fonction *lsqnonlin* de Matlab, nous obtenons les paramètres géométriques identifiés du modèle.

L'erreur résiduelle entre les positions simulées avec les paramètres identifiés et les positions mesurées est présentée dans les figures de la Figure 4- 9 à la Figure 4- 19.

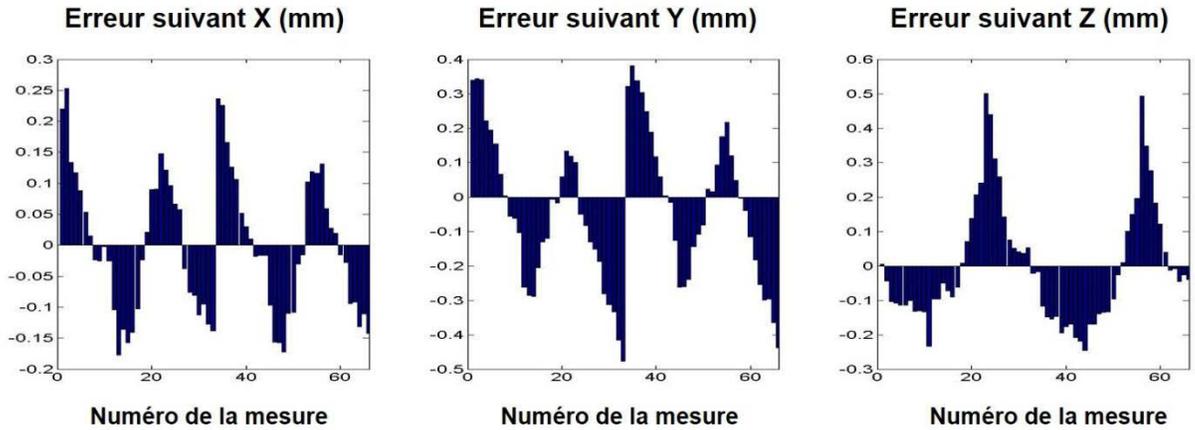


Figure 4- 9 Erreur résiduelle du modèle à 6 paramètres S_6.

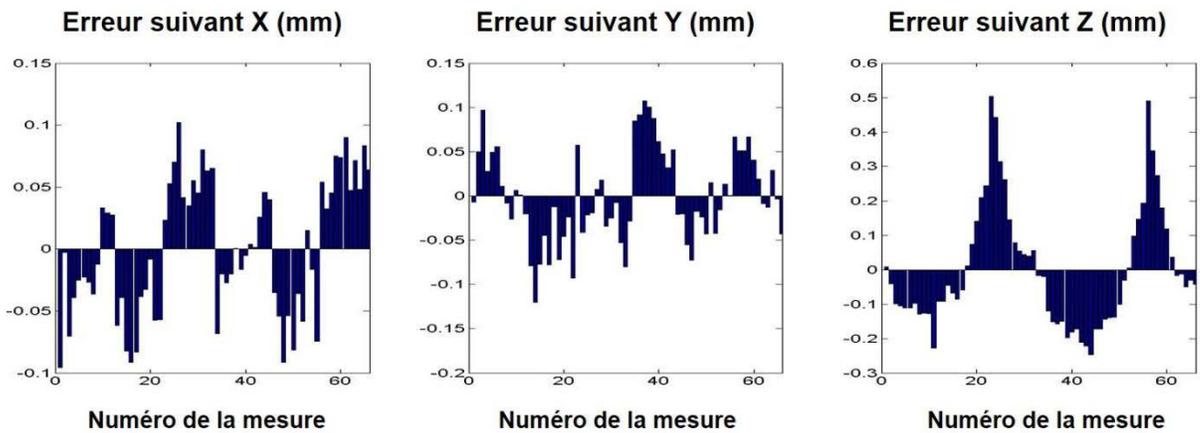


Figure 4- 10 Erreur résiduelle du modèle à 9 paramètres S_9.

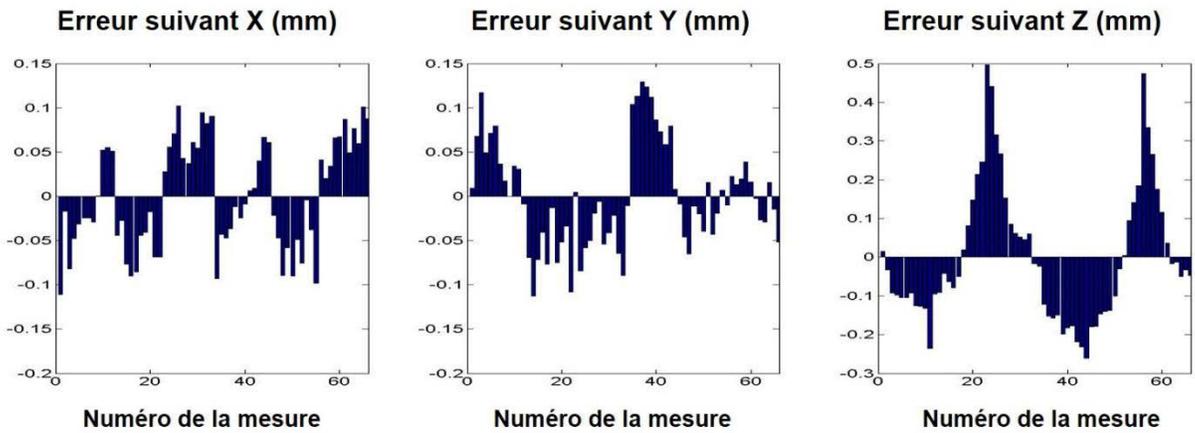


Figure 4- 11 Erreur résiduelle du modèle à 11 paramètres S_11.

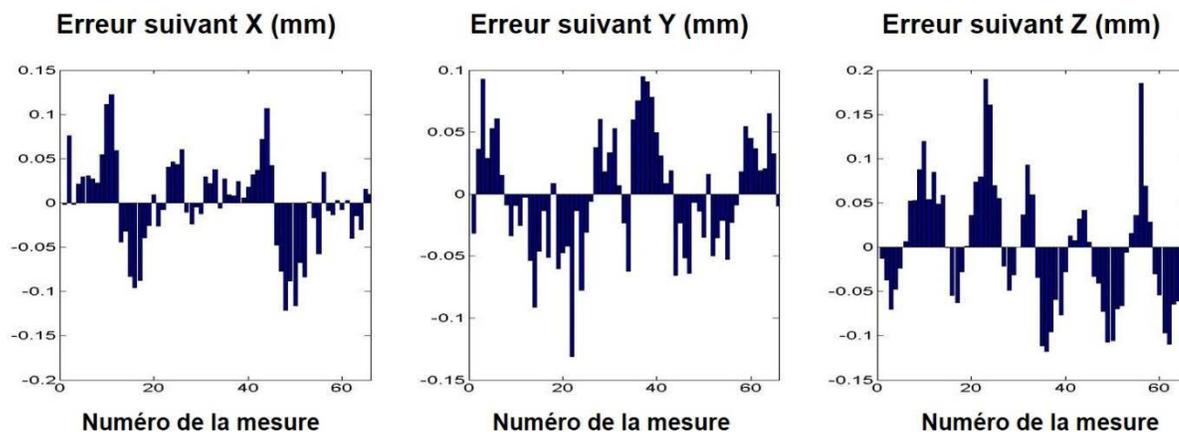


Figure 4- 12 Erreur résiduelle du modèle à 21 paramètres S_21.

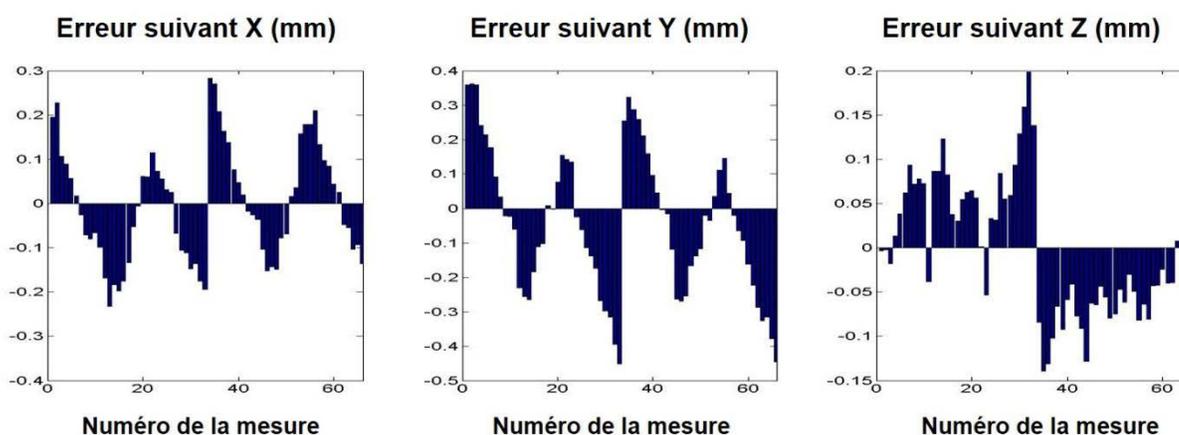


Figure 4- 13 Erreur résiduelle du modèle à 9 paramètres P_9.

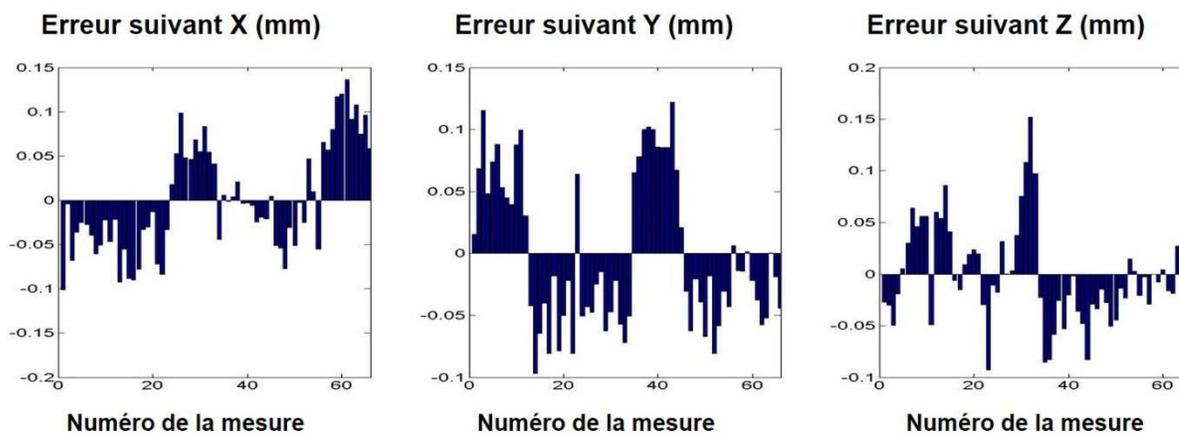


Figure 4- 14 Erreur résiduelle du modèle à 12 paramètres P_12.

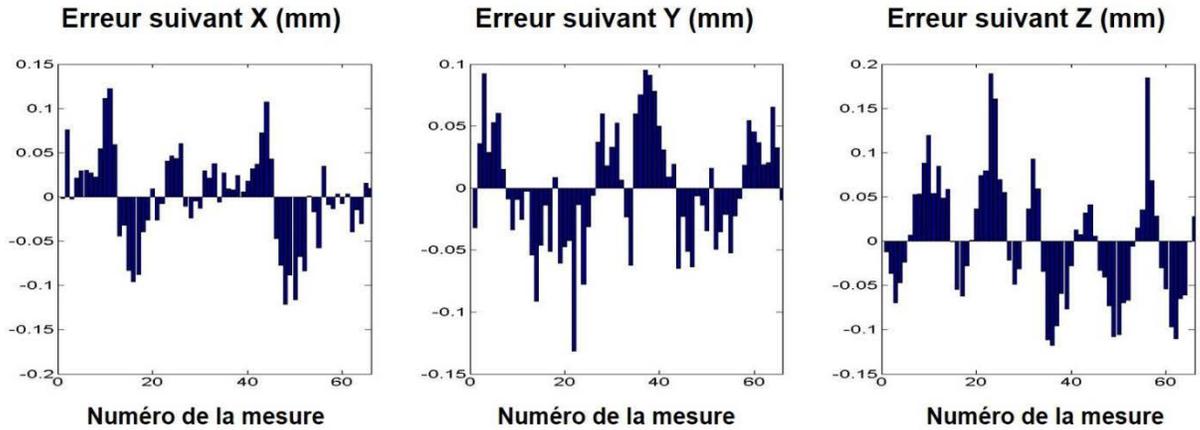


Figure 4- 15 Erreur résiduelle du modèle à 21 paramètres P_21.

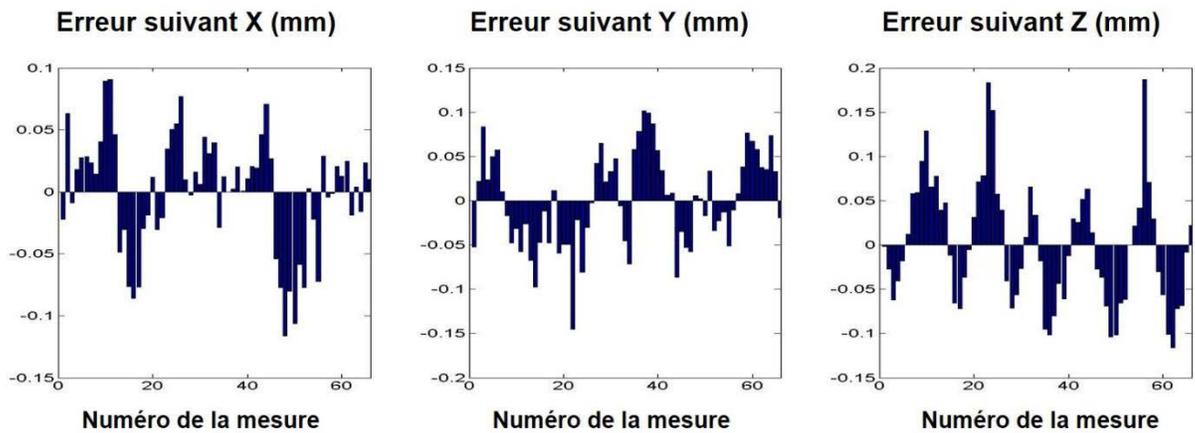


Figure 4- 16 Erreur résiduelle du modèle à 42 paramètres P_42.

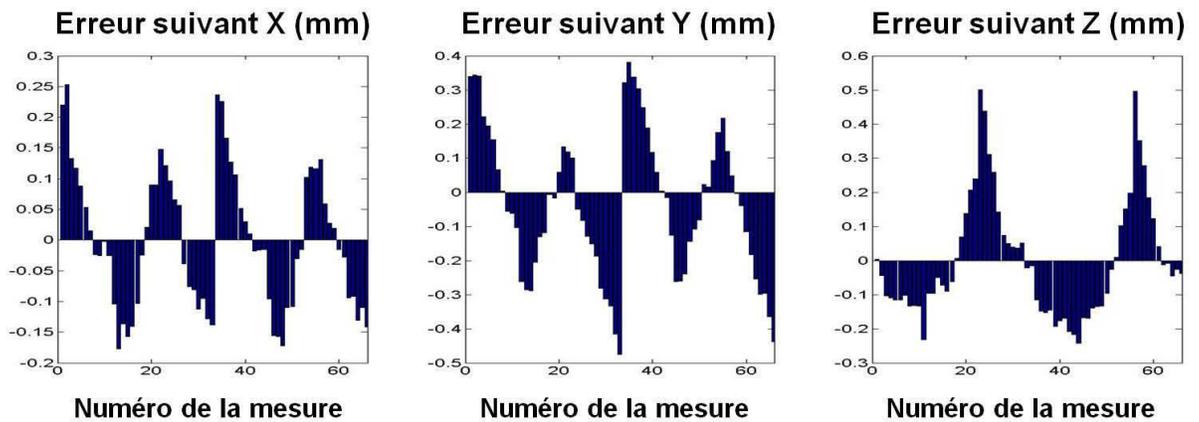


Figure 4- 17 Erreur résiduelle du modèle TCS_6.

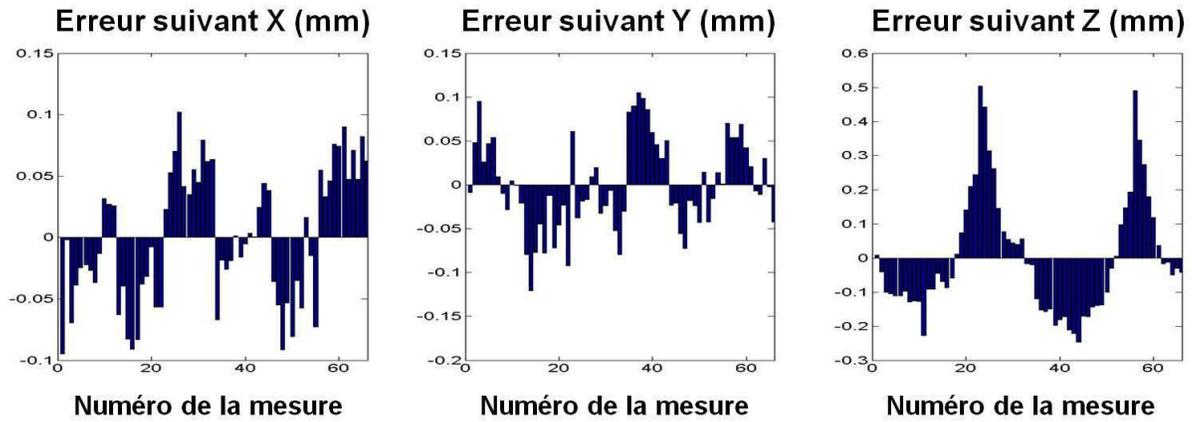


Figure 4- 18 Erreur résiduelle du modèle TCS_9.

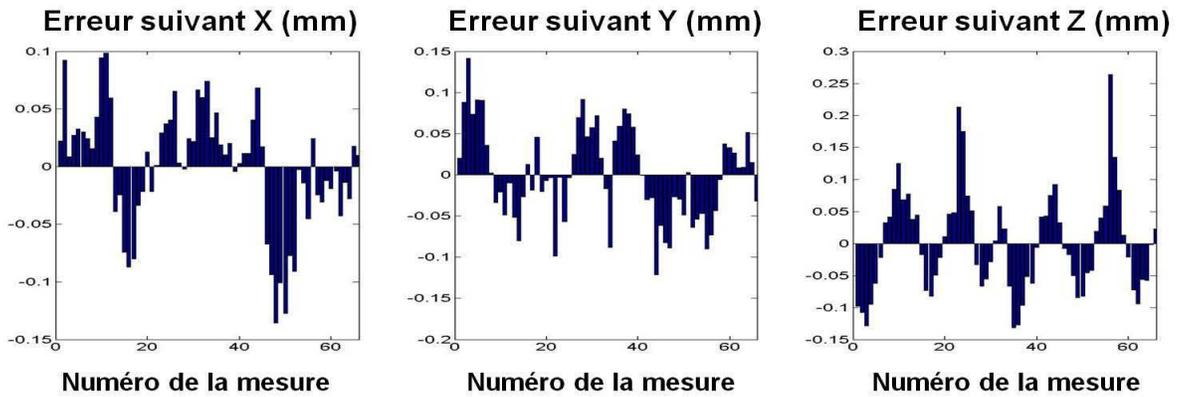


Figure 4- 19 Erreur résiduelle du modèle TCS_21.

Un résumé des valeurs caractéristiques des erreurs résiduelles sont présentés dans la Figure 4- 20 et dans le Tableau 4- 2.

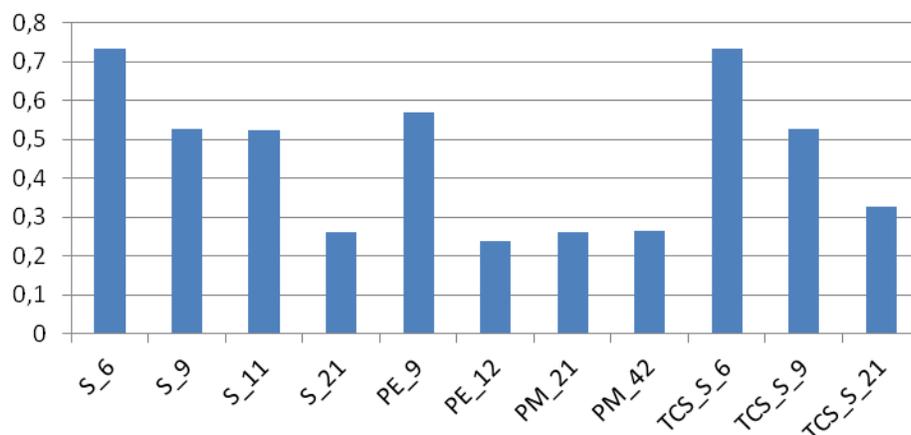


Figure 4- 20 Erreur maximale de position des modèles.

Nom du modèle	Configuration du modèle	Nombre de paramètres	Erreur (mm)			
			Axe X	Axe Y	Axe Z	Globale
S_6	Sériel	6	0,2531	0,4761	0,5002	0,7355
S_9		9	0,1019	0,12	0,5038	0,5279
S_11		11	0,1107	0,1294	0,4972	0,5256
S_21		21	0,1222	0,1313	0,1896	0,261
P_9	Parallèle	9	0,2834	0,4521	0,1983	0,5693
P_12		12	0,1365	0,1222	0,1521	0,2381
P_21		21	0,1224	0,1316	0,1894	0,2611
P_42		42	0,1161	0,1448	0,1868	0,2634
TCS_6	Sériel	6	0,2529	0,4761	0,5006	0,7357
TCS_9		9	0,1029	0,1205	0,5042	0,5285
TCS_21		21	0,1355	0,1416	0,2637	0,3286

Tableau 4- 2 Erreur spatiale maximale de position du point piloté de l'outil pour chacun des modèles.

Nous pouvons constater, après le processus d'identification que, malgré le processus d'optimisation, l'erreur de position de l'outil reste assez grande par rapport aux valeurs initiales mesurés sur le robot.

En effet, dans le cas des modèles où nous prenons en compte seulement les valeurs géométriques de la partie sérielle du robot et les valeurs géométriques de la broche (modèles S_6, S_9 et S_11) l'erreur globale est de l'ordre de 0,5mm. Par contre si nous prenons en compte la partie parallèle du robot et les valeurs géométriques de la broche (modèle P_12) la valeur globale de l'erreur diminue approximativement de moitié (0,2381mm)

Dans le cas d'une identification des paramètres avec un modèle avec des erreurs de position, les erreurs résiduelles sont de l'ordre de 0,26 mm avec le modèle considérant

uniquement la structure sérielle du robot ou la structure sérielle et la structure en parallélogramme (modèles S_21 et P_21). L'ajout des erreurs de position et d'orientation maintient l'erreur dans le même ordre de grandeur, approximativement 0,26 mm (modèle P_42).

Nous avons constaté que l'identification des paramètres géométriques ne repose pas seulement sur l'optimisation d'une fonction coût mais aussi sur le choix des paramètres à optimiser.

Toutefois, la mise en place d'un modèle géométrique avec un grand nombre de paramètres ne garantit pas l'amélioration de la précision finale du robot. En effet, le modèle obtenu est plus sensible aux erreurs d'identification [Chanal09]. Dans notre cas, nous pouvons constater que le résidu du modèle P_21 est sensiblement faible que celui du modèle P_42.

Pour étayer ce propos, nous réalisons dans le paragraphe suivant une étude de sensibilité afin de déterminer les paramètres influents sur la précision de pose de l'effecteur finale.

4 Analyse de sensibilité des paramètres géométriques

L'analyse de sensibilité va nous permettre d'évaluer l'influence des paramètres géométriques sur la position de l'effecteur final du robot. Elle va aussi nous permettre de discuter le nombre de paramètres optimum à introduire.

Dans le cas de notre étude, nous réalisons l'analyse de sensibilité sur le modèle le plus complet, le modèle géométrique à 42 paramètres. Le *MGD* à 42 paramètres est représenté par :

$$\mathbf{X} = MGD(\mathbf{Q}, \xi) \quad 4-10$$

où \mathbf{X} est le vecteur de position qui correspond aux coordonnées X , Y et Z du point piloté de l'effecteur final du robot par rapport au repère de la base du robot.

\mathbf{Q} est le vecteur des variables articulaires du robot (q_1, q_2, q_3, q_4, q_5 et q_6).

Pour l'analyse de sensibilité nous allons différentier le *MGD* :

$$d\mathbf{X} = \frac{\partial MGD(\mathbf{Q}, \xi)}{\partial \mathbf{Q}} d\mathbf{Q} + \frac{\partial MGD(\mathbf{Q}, \xi)}{\partial \xi} d\xi \quad 4-11$$

Dans cette équation $d\xi$ représente le vecteur des variations de paramètres géométriques avec 42 coordonnées et $d\mathbf{X}$ représente un vecteur de variation de la position de l'effecteur final.

Dans notre cas, nous étudions l'influence des paramètres géométriques sur la pose de l'outil pour des valeurs données des consignes moteurs. Ainsi, si nous considérons la consigne articulaire comme parfaitement répétable.

Finalement l'équation 4-9 devient :

$$d\mathbf{X} = \frac{\partial MGD(\mathbf{Q}, \xi)}{\partial \xi} d\xi \tag{4-12}$$

La matrice de sensibilité \mathbf{S} est alors :

$$\mathbf{S} = \frac{d\mathbf{X}}{d\xi} = \frac{\partial MGD(\mathbf{Q}, \xi)}{\partial \xi} \tag{4-13}$$

La matrice de sensibilité est une matrice de 3*42 éléments où le terme S_{ij} représente l'influence du paramètre i sur la coordonnée j de la pose de l'outil.

Dans cette première partie nous allons réaliser l'analyse de sensibilité sur l'espace de travail utilisé pour la mesure des 66 points (figure 3-14). L'influence maximum dans cet espace est représenté sur la Figure 4- 21.

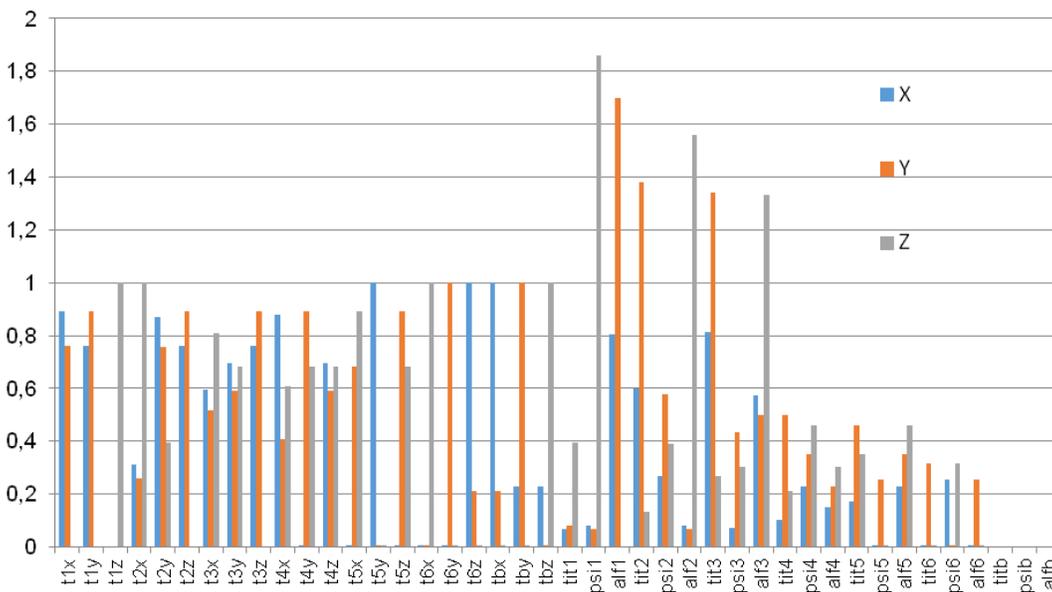


Figure 4- 21 Influence maximum des paramètres dans l'axe X, Y et Z pour 66 points.

Nous complétons cette étude par une analyse de sensibilité dans tout l'espace de travail du robot, ce que nous permet d'évaluer la pertinence d'une identification locale vis-

partie suivante nous nous intéressons aux critères à mettre en place pour déterminer un modèle géométrique adapté à l'espace de travail considéré.

5 Identification d'un nouveau modèle.

La précision finale obtenue après identification des paramètres géométriques ne dépend pas seulement du nombre de paramètres introduits mais de la pertinence du choix de ces paramètres, c'est pour cela qu'une étude du rang des matrices de sensibilité est effectuée.

Le rang d'une matrice A (noté rgA) peut être défini comme le nombre de lignes non nulles dans sa forme échelonnée en lignes. Pour obtenir le rang de la matrice de sensibilité, il suffit d'effectuer une réduction de Gauss de cette matrice et de compter le nombre de lignes non nulles. Cela nous permettra d'obtenir le nombre maximal de vecteurs lignes (ou colonnes) linéairement indépendants.

Pour le cas d'un espace de travail à 66 points le rgS est égal à 30, c'est-à-dire qu'il existe 12 paramètres nuls ou redondants. Sur la figure 4-21 nous pouvons observer que les paramètres t_{1b} , psi_{1b} et alf_{1b} sont nuls et correspondent à des erreurs des valeurs d'angles de l'effecteur final. En effet, ces valeurs n'apportent pas d'amplitude d'erreurs dans la position de l'effecteur final. Les 9 paramètres restants sont des paramètres redondants vis-à-vis de la matrice de sensibilité.

Après une analyse de la matrice de sensibilité transformée avec la méthode du pivot de Gauss, nous observons que les paramètres t_{2z} , t_{3z} , t_{4z} , t_{5z} , t_{6z} , tbx , tby , tbz et psi_{5} sont des paramètres redondants et nous pouvons établir des relations entre ces paramètres et les paramètres du modèle.

Dans le Tableau 4- 4 sont présentées ces relations.

Paramètre redondants	Paramètres associés
t_{2z}	t_{1y}
t_{3z}	t_{1y}
t_{4z}	t_{3y}
t_{5z}	t_{4y}
t_{6z}	t_{5y}
tbx	t_{5y}
tby	t_{6y}
tbz	t_{6x}
alf_{6}	psi_{5}

Tableau 4- 4 Identification des paramètres redondants.

Ces relations sont cohérentes avec la géométrie du robot. Par exemple, les axes des coordonnées des erreurs t_{2z} et t_{3z} sont directement co-linéaires avec l'axe de l'erreur t_{1y} pour la configuration du robot permettant de balayer les 66 points de mesure. Des conclusions similaires peuvent être faites sur les autres paramètres redondants. A partir de ces résultats, nous proposons un nouveau modèle sans les paramètres redondants et nuls, c'est-à-dire, sans les paramètres : t_{2z} , t_{3z} , t_{4z} , t_{5z} , t_{6z} , t_{bx} , t_{by} , t_{bz} , alf_6 , $titb$, $psib$ et $alfb$. Le nouveau modèle contient 30 paramètres.

Le processus d'identification est alors réalisé. Les résultats sont montrés dans la Figure 4- 23.

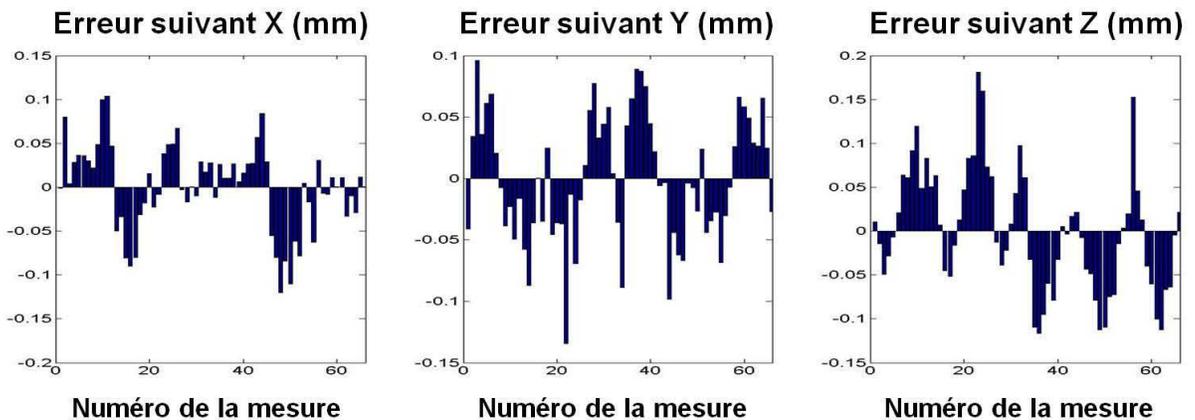


Figure 4- 23 Erreur résiduelle du nouveau modèle.

Les valeurs maximales des erreurs résiduelles sont les suivantes : 0,12 mm sur l'axe X , 0,134 mm sur l'axe Y et 0,189 mm sur l'axe Z , avec une erreur maximale de position spatiale est de 0,256 mm. Cette valeur est cohérente avec les valeurs déterminées dans le tableau 4-2.

Dans le cas d'un espace de travail de 18750 points le rgS est égal à 37 où les paramètres $titb$, $psib$ et $alfb$ sont nuls et correspondent, comme pour l'espace de travail de 66 points, à des erreurs des valeurs d'angles de l'effecteur final.

Les deux autres paramètres redondants sont : t_{by} et t_{bz} , et correspondent, comme le cas pour les 66 points, aux paramètres t_{6x} et t_{6y} respectivement.

Nous pouvons noter, alors qu'une analyse de sensibilité dans un espace de travail locale donne de résultats différents à une analyse pour tout l'espace de travail du robot.

6 Généralisation de la méthodologie de modélisation

La méthode proposée dans ces travaux de thèse peut être appliquée à d'autres structures de robot ou d'autres tâches. La méthode se déroule en 6 étapes :

- Etape 1 : à partir du schéma cinématique du robot, calcul du degré de mobilité et du degré d'hyperstatisme afin d'identifier les contraintes mécaniques de fonctionnement de la structure du robot.
- Etape 2 : développement du modèle géométrique initial du robot avec la méthode de Khalil Kleinfinger. Cette étape permet de définir les repères associés à chaque liaison afin d'introduire l'ensemble des défauts géométrique.
- Etape 3 : Introduction entre chaque repère défini à l'étape 2 de 6 défauts de position et d'orientation.
- Etape 4 : Analyse de sensibilité des défauts introduits sur la position et/ou l'orientation de l'effecteur en fonction de la tâche à réaliser. L'objectif de cette étape est de définir les paramètres géométriques influents sur la qualité de réalisation de la tâche, ce qui impose une formalisation de la qualité de la tâche vis-à-vis de la pose de l'effecteur et de l'espace de travail considéré.
- Etape 5 : Réduction du modèle en fonction de l'étude précédente.
- Etape 6 : Identification des paramètres géométriques influents dans la zone de travail nécessaire à la réalisation de la tâche.

La méthode proposée peut aussi varier au niveau de l'étape 5. En effet, les paramètres géométriques peuvent être soit identifiés soit maîtrisés par un tolérancement adapté des pièces à fabriquer et à assembler. Ainsi, dans le cas de notre étude, nous avons choisi d'identifier les paramètres associés à des défauts d'orientation des repères. Toutefois, il se pose le problème de la différence de nature des paramètres identifiés, ce qui nous a imposé d'ajouter des pondérations sur les paramètres d'orientation.

Ainsi, nous pouvons à l'aide de notre méthode définir un tolérancement adapté sur les éléments fonctionnels permettant de maîtriser les défauts d'orientation au niveau des liaisons. Pour cela, il nous faut estimer l'erreur d'orientation acceptable en fonction du niveau de précision de pose de l'effecteur acceptable.

Dans notre cas, nous considérons une erreur de position δ_{posi} de l'effecteur acceptable de 0,02 mm et nous faisons l'hypothèse que l'erreur d'orientation « fabricable » δ_{α} est identique pour toutes les liaisons. Nous pouvons alors calculer l'erreur d'orientation acceptable comme :

$$\delta_{\alpha} = \frac{\delta_{posi}}{\sqrt{(\sum \max(S_{\alpha_i, X}))^2 + (\sum \max(S_{\alpha_i, Y}))^2 + (\sum \max(S_{\alpha_i, Z}))^2}} \quad 4-14$$

Avec $S_{\alpha_i, j}$ les termes de la matrice de sensibilité entre les paramètres d'orientation α_i et les erreurs de position de l'effecteur.

Ainsi, pour respecter une erreur de position du bout de l'outil de 0,02mm, nous déterminons qu'une erreur $\delta_{\alpha} = 1,5.10^{-3}$ rad est acceptable.

7 Conclusions.

Dans ce chapitre une nouvelle approche pour l'identification des paramètres géométrique influents d'un robot sériel est développée. Cette méthode a été développée suivant plusieurs étapes : premièrement nous avons développé différents modèles géométriques du robot ABB IRB 6660, ces modèles ont été conçus pour inclure des paramètres géométriques adaptés à la structure du robot ; ensuite nous identifions les paramètres géométriques des modèles et nous avons obtenu des valeurs d'erreur de position de l'effecteur final. Finalement nous avons fait une analyse de la matrice de sensibilité et rang pour déterminer les paramètres les plus influents dans le modèle.

Malgré l'étude de sensibilité et la réduction du modèle de 42 paramètres à 30 paramètres l'erreur de position reste toujours importante. En effet, pour le modèle réduit à 30 paramètres l'erreur résiduelle maximale est de l'ordre de 0,25 mm sur la position de l'effecteur final, laquelle est un peu supérieure aux résultats obtenus pour le modèle prenant en compte les 21 paramètres liés au robot et la broche avec une configuration en parallèle (de l'ordre de 0,23 mm). En effet, la prise en compte de paramètres de nature différente dans le modèle à 30 paramètres peut expliquer cet écart ainsi que l'orientation fixe de l'outil dans l'espace considéré. Toutefois, la méthode de modélisation proposée peut être appliquée à différents espaces de travail en position et en orientation.

Toutefois, le modèle géométrique mis en place peut être utilisé en temps réel pour calculer des points de passage pour le suivi de trajectoire.

Une proposition de méthode générique est faite avec une exploitation afin de déterminer les erreurs acceptables lors de la phase de fabrication des éléments de la structure du robot.

Conclusions et perspectives

Ces travaux de recherche ont abouti au développement d'une méthode d'amélioration de la précision de la position de l'effecteur final des robots sériels utilisés pour l'usinage. L'étude réalisée est illustrée sur le robot ABB IRB 6660.

Dans un contexte industriel, les robots sériels ont été utilisés pour des opérations basiques avec une précision et suivi de trajectoire faible. Toutefois, ces robots proposent un espace de travail et une dextérité rendant leur utilisation pertinente pour l'usinage. Ainsi, la conception des robots sériels a évolué afin de pouvoir réaliser des opérations de pré-usinage et de parachèvement de pièces. Toutefois, une faible précision de suivi de trajectoire persiste.

Une première campagne de mesure permet de mettre en avant la précision initiale du robot avec les réglages et la méthode de compensation « usine ». La méthode utilisée par ABB pour maîtriser la précision du robot est basée sur un savoir faire empirique. L'objectif de ces travaux de thèse est alors de formaliser une méthode de modélisation géométrique adapté aux tâches de grande précision.

Dans un premier temps, nous avons modélisé le robot ABB IRB 6660 avec une méthode classique. Les modèles développés ont consisté en l'ajout de paramètres afin de considérer un nombre croissant de défauts géométriques. Ainsi, des modèles prenant en compte uniquement la partie sérielle du robot et de modèles prenant en compte la partie sérielle et parallèle du robot ont été étudiés. L'étude de l'architecture du robot nous a permis de mettre en avant des contraintes géométriques dans les liaisons constituant le système en parallélogramme

Après l'analyse des modèles, les erreurs résiduelles obtenues ont mis en évidence que le processus d'identification de paramètres géométriques n'est pas un processus simple sur lequel le grand nombre des paramètres est synonyme de l'amélioration de la précision.

Un nouveau modèle est proposé par simplification des modèles précédents. Ce modèle a été développé à partir de l'étude de la matrice de sensibilité du modèle avec le plus grand nombre de paramètres et à partir de l'analyse du rang de la matrice de sensibilité.

Nous avons pu identifier les paramètres sans influence sur la précision de position de l'outil et les paramètres redondants. Ces paramètres ne sont ainsi pas pris en compte dans le modèle géométrique final. En effet, en observant la géométrie du robot nous pouvons regrouper des paramètres redondants.

Les résultats obtenus ont permis de constater que malgré l'amélioration de la précision avec le nouveau modèle développé, les erreurs restent équivalentes aux erreurs initiales mesurées. Ces erreurs résiduelles limitent la précision atteignable des robots anthropomorphes.

Une réflexion est ouverte sur l'évolution de la conception d'un modèle géométrique permettant d'améliorer significativement la précision des robots. Ce modèle géométrique doit permettre de faire évoluer les tolérances de fabrication et d'assemblage de la structure du robot.

En effet, ces travaux peuvent être approfondis en ce qui concerne l'adéquation des paramètres géométriques aux tolérances de fabrication des pièces du robot. Cette étude doit permettre d'identifier les limites en termes de précision géométrique du robot. Ces travaux amènent une contribution à l'amélioration de la précision d'usinage des robots. Notamment, ces travaux montrent le gain d'une identification locale vis-à-vis d'une identification globale par la diminution du nombre de paramètres influents.

Ces travaux peuvent amener différentes perspectives sur la conception des robots et sur l'amélioration de la précision de suivi de trajectoire. Ainsi, il est maintenant nécessaire de comparer le comportement du robot piloté avec un modèle géométrique adapté avec la méthode industrielle actuelle.

Références bibliographiques

- [ABB] <http://new.abb.com/products/robotics>, accès le 12-04-2015.
- [Alici05] **ALICI G., SHIRINZADEH B., A systematic technique to estimate positioning errors for robot accuracy improvement using laser interferometry based sensing**, Mechanism and Machine Theory, Vol 40, pp. 879-906, 2005.
- [Andreff06] **ANDREFF N., Des droits et des robots. Modélisation, identification et commande références vision des machines complexes**, HDR, Université Blaise Pascal, 2006.
- [Bernhardt93] **BERNHARDT R., ALBRIGHT S. L., Robot Calibration**, Ed. Chapman & Hall, 1996.
- [Bonet14] **BONET I., NOISEUX Y., Notes de cours GPA**, 2014.
- [Bryan84] **BRYAN J., Telescoping Magnetic Ball Bar test gage**, Brevet 4,435,905, Etats Unis.
- [Chanal06] **CHANAL H., Etude de l'emploi des machines-outils à structure parallèle en usinage**, Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal, septembre 2006.
- [Chanal09] **CHANAL H., DUC E., HASCOËT J.-Y.; PASCAL R., Reduction of a parallel kinematics machine tool inverse kinematics model with regard to machining behaviour**, Mechanism and Machine Theory,44,7,1371-1385,2009,Elsevier
- [Chanal12] **CHANAL H., PACCOT F., DUC E., Sensitivity analysis of an overconstrained parallel structure machine tool**, the Tripteor X7, Applied Mechanics and Materials Vol. 162, pp.:394-402., 2012
- [Chen09] **CHEN F., BROWN G., SONG M., Three-Dimensional Shape Measurement**, Handbook of Optical metrology, principles and applications, Ed. Toru Yoshizawa, 2009
- [Conrad00] **CONRAD K., SHIAKOLAS P., YIH T., Robotics calibration issues: accuracy, repeatability and calibration**. 8th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED 2000), Grèce, 2000.
- [Craig05] **CRAIG J., Introduction to robotics**. Ed. Pearson, pp. 19-61, USA, 2005.

- [Craig86] **CRAIG J., Introduction to robotics-mechanics and control**, Addison-Wesley, Reading, MA, 1986.
- [Deblaise06] **DEBLAISE D., Contribution à la modélisation et à l'étalonnage élasto-géométriques des manipulateurs parallèles**, thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, 2006.
- [Denavit55] **DENAVIT J., HARTENBERG R.S., A kinematic notation for lower pair mechanisms based on matrices**. Transaction of the ASME, journal of Applied Mechanics, vol. 22, pp. 215-221, 1955.
- [Denkena13] **DENKENA B., LITWINSKI K., SCHÖNHERR M., Innovative drive concept for machining robots**, 2ème CIRP Global Web Conference, pp. 67-72, 2013.
- [Diolez07] **DIOLEZ D., Geometric position control : towards new tools more efficient**, these de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2007.
- [Dolinsky01] **DOLINSKY J-U, The development of a genetic programming method for kinetic robot calibration**, Thèse de Doctorat, Liverpool John Moores University, mars 2001.
- [Elatta04] **ELATTA A., GEN L., ZHI F., DAOYUAN Y., FEI L., An overview of robot calibration**, Information Technology Journal, Volume 3, pp. 74-78, 2004
- [ERM] <http://www.erm-automatismes.com/d0000FE-cellule-d-usinage-cnc-robotique-6-axes.pdf> accès le 22-04-2015.
- [Everet87] **EVERET L., DRIELS M., MOORING B., Kinematic modeling for robot calibration**, IEEE International Conference in Robot Automation, 1987.
- [Facenda06] **FACENDA N., Calibration of high-precision flexure parallel robots**, thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2006.
- [Fanuc] http://robot.fanucamerica.com/robotics-articles/robotic_accuracy_improves_aerospace_manufacturing.aspx, accès le 05-05-2015.
- [FARO] <http://www.faro.com/fr-fr/produits/metrologie/faro-laser-tracker/apercu>, accès le 22-11-2016
- [Fisher] http://shop.fischerspindle.com/epages/fp.sf/fr_FR/?ObjectPath=/Shops/fp/Produits/116388, accès le 12/06/2015
- [Fournier11] **FOURNIER J., Théorie des graphes et applications**, Lavoisier, France, 2011, ISBN : 978-2-7462-3215-0

- [Ginani11] **GINANI L. et MOTTA J. Theoretical and practical aspects of robot calibration with experimental verification**, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences & Engineering, volume 33, pp15-21, 2011.
- [Gines10] **GINES M. Identificación de parámetros cinemáticos de un brazo robot mediante el método de circle-point. Simulación y validación experimental**, Memoir de Master, Université de Zaragoza, 2010.
- [Gogu 97] **GOGU G., COIFFET P., BARRACO A. Représentation des déplacements des robots**, Hermès, 1997.
- [Goswami93] **GOSMANI A., QUAID A., PESHKIN M., Complete parameter identification of a robot from partial pose information**, Control Systems, Volume 13, 1993
- [Guanglong13] **GUANGLONG D., PING Z., Online robot calibration based on vision measurement**, Robotics and computer-Integrated Manufacturing, Vol. 29, pp. 484-492, 2013.
- [Guo15] **GUO Y., SHIBIN Y., YONGJIE R., JIGUI Z., SHOURUI Y., SHENGHUA Y., A multilevel calibration technique for an industrial robot with parallelogram mechanism**, Precision Engineering, Volume 40, pp 261-272, 2015
- [Gürsel05] **GÜRSEL A., A systematic technique to estimate positioning errors for robot accuracy improvement using laser interferometry based sensing**, Mechanism and Machine Theory, Volume 40, pp 879-906, 2005
- [Gürsel06] **GÜRSEL A., Prediction of geometric errors of robot manipulators with Particle Swarm Optimisation method**, Robotics and Autonomus Systems, Volume 54, pp. 956-966, 2006
- [Hage12] **HAGE H., Identification et simulation physique d'un robot Stäubli TX90 pour le fraisage à grande vitesse**, Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, mai 2012.
- [Haruiko81] **HARUIKO A., TAKEO K., Design of Direct-Drive Mechanical Arms**, Carnegie-Mellon University, 1981.
- [Hereter10] **HERETER J., Étalonnage des robots industriels**, Mémoires et annexes, Université du Quebec, 2010.
- [Horne12] **HORNE A., Simulated and experimental kinematic calibration of a 4 degrees of freedom parallel manipulator**, Theses Master, Queen's University, decembre, 2012.
- [IFRa] <http://www.ifr.org/news/ifr-press-release/global-survey-703/>, accès le 20-04-2015.

- [IFRb] <http://robohub.org/wp-content/uploads/2013/04/>, accès le 20-04-2015.
- [Isios] http://www.isios.de/produkte4_en.htm, accès le 06/11/2015.
- [Ismail08] *ISMAIL A. R., HASSAN A., SYAMSUDDIN S., NUAWI M. Z., ABDULLAH S., IBRAHIM H. M.* **The repeatability analysis of industrial robot under loaded conditions and various distances.** International Conference on Robotics, Control and Manufacturing Technology, China, 2008.
- [Jawale13] *JAWALE H. P., THORAT H. T.,* **Positional error estimation in serial link manipulator under joint clearances and backlash,** Journal of Mechanisms and Robotics, Vol 5, 2013.
- [Jiang96] *JIANG B., BLACK J., DURAISAMY R.,* **A review of recent developments in robot metrology,** Journal of Manufacturing Systems, Vol. 07, N° 04, 1996.
- [Judd90] *JUDD R., KNASINSKY A.,* **A technique to calibrate industrial robot with experimental verification,** IEEE Transactions on robotics and Automation, Vol. 6, N° 1, pp. 20-30, 1990.
- [Karan94] *KARAN B., VUKOBRATOVIC M.,* **Calibration and accuracy of manipulation robot models – an overview.** Mechanism and Machine Theory, vol 29, pp. 479-500, 1994.
- [Kazerooni86] *KAZEROONI H., HOUPPT P. K., SHERIDAM T. B.,* **The fundamental concepts of robust compliant motion for robot manipulators.** International conference on robotics and automation, California, pp. 418-427, 1986.
- [Khalil09] *KHALIL W., BESNARD S., LEMOINE P.,* **Comparison study of the geometric parameters calibration methods,** International Journal of Robotics and Automation, 2009.
- [Khalil86] *KHALIL W., KLEINFINGER J. F.,* **A new geometric notation for open and close-loop robots,** Conference International on Robotics and Automation, pp. 1174-1179, USA, 1986.
- [Khalil99] *KHALIL W., DOMBRE E.,* **Modeling identification and control of robots,** Ed. Hermes, Paris, 1999.
- [KUKA] [http://www.kukarobotics.com/res/robotics/Solutions/PDF/ES/KUKA_WP_WZ M_es.pdf](http://www.kukarobotics.com/res/robotics/Solutions/PDF/ES/KUKA_WP_WZ_M_es.pdf) accès le 22-04-2015.
- [Leica] http://www.leica-geosystems.fr/downloads123/m1/metrology/general/brochures/Leica%20Geosystems%20Metrology%20Products_catalog_en.pdf, accès le 12/06/2015
- [Lipkin05] *LIPKIN H.,* **A note on Denavit-Hartenberg notation in robotics,** International design Engineering Technical Conferences & computers and information in engineering conference, 2005.

- [Maurine13] *MAURINE P., QUINE J.-F., L'étalonnage des robots manipulateurs industriels*, Ed. Hermes, Paris, 2013, ISBN : 978-2-7462-4524-2.
- [Merlet06] *MERLET, J.-P., Parallel robots*, Springer, Pays Bas, 2006, ISBN: 1-4020-4132-2.
- [Milutinovic10] *MILUTINOVIC D., GLAVONJIK M., SLAVKOVIC N., DIMIC Z., ZINANOVIC S., KOKOTOVIC B., TANOVIC L. Reconfigurable robotic machining system controlled and programmed in a machine tool manner*. International Journal Advanced In Manufacturing Technologie, London, 2010.
- [Mooring84] *MOORING B. W., TANG G. R., An improved method for identifying the kinematic parameters in a six-axis robot*, International Computers in Engineering Conference and Exhibit, pp. 79-84, 1984.
- [Mooring91] *MOORING B., ROTH Z., DRIELS M., Fundamentals of Manipulator Calibration*, Editorial John Wiley & sons, Inc. USA, 1991.
- [Motta01] *MOTTA J., CARVALHO G., McMASTER R., Robot calibration using a 3D vision-based measurement system with a single camera*, Robotics and computer-integrated Manufacturing, Vol. 17, pp. 487-497, 2001.
- [NOF99] *NOF S., Handbook of Industrial Robotics*, Editorial John Wiley & sons, Inc., Canada, 1999.
- [Nubiola13] *NUBIOLA A., BONEV I., Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker*. Robotics and computer-integrated Manufacturing, volume 19, pp. 236-245, 2013.
- [Nubiola13a] *NUBIOLA A., SLAMANI M., BONEV I., A new method for measuring a large set of poses with a single telescoping ballbar*, Precision Engineering, Volume 37, pp. 451-460, 2013.
- [Nubiola13b] *NUBIOLA A., Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 29, pp. 236-245, 2013
- [Olabi11] *OLABI A., Amélioration de la précision des robots industriels pour des applications d'usinage à grande vitesse*. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Paris-Tech, novembre, 2011.
- [Olofsson15] *OLOFSSON B., Topics in machining with industrial robot manipulators and optimal motion control*, Thèse de Doctorant, Université Lund (Suède), 2015.
- [Patel00] *PATEL A., EHMANN K., Calibration of a hexapod machine tool using a redundant leg*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 40, n° 04, pp.: 489-512, 2000.
- [Paul81] *PAUL R. P., Robot manipulators-mathematics*, programming and control, MIT Press, Cambridge, MA, 1981.

- [Prevost11] **PREVOST D., Modélisation avancée du couple Machine-Outil / Commande numérique dans un contexte UGV pour l'optimisation du calcul de trajectoires multiaxes**, these de Doctorat, Ecole National Supérieure de Cachan, 2011.
- [Pritschow02] **PRITSCHOW G., EPPLER C., GARBER T., Influence of the dynamic stiffness on the accuracy of PKM**, 3rd Chemnitz Parallel Kinematic Seminar, pp. 313-333, 2002.
- [Renaud03] **RENAUD P., Apport de la vision pour l'identification géométrique de mécanismes parallèles**, thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal, 2003.
- [Renishaw] <http://www.renishaw.fr/fr/theorie-et-pratique-des-tests--6818>, accès le 26/01/2016.
- [Schneider99] **SCHNEIDER F., Tolérancement géométrique- Interprétation**, Document de cours, Université de Metz, 1999
- [Sciavicco00] **SCIAVICCO L., SICILIANO B., Modelling and control of robots manipulators**, Ed. Springer, pp. 21-37, London.
- [STAUBLI] <http://www.staubli.com/fr/robotique/robots-4-et-6-axes/robots-specialises/robots-dusinage/> accès le 08/10/2015.
- [Stone87] **STONE H., Kinematic modeling, identification and control of robotics manipulators**, Ed. Kluwer Academic Publishers, pp. 15-17, The Netherlands, 1987, ISBN-13: 978-1-4612-9193-0.
- [Tsai99] **TSAI, L., Robot analysis, the mechanics of serials and parallel manipulators robots**, Ed. Wiley-Interscience, pp 19-21, Canada, 1999, ISBN: 0-471-32593-7.
- [Veitschegger86] **VEITSCHEGGER W., WU C.H., Robot accuracy analysis based on kinematic**, IEEE Journal Robotics and Automation, vol 2, pp. 171-179, 1986.
- [Whitney86] **WHITNEY D., LOZINSKI C., ROURKE J., Industrial robot forward calibration method and results**, Journal of dynamic systems measurement and control, 1986.
- [Wu14] **WU Y., Optimal pose selection for the identification of geometric and elastostatic parameters of machining robots**. Thèse de Doctorat, Ecole National Supérieure des Mines de Nantes, 2014.
- [Wu15] **WU Y., Geometric calibration of industrial robots using enhanced partial pose measurements and design of experiments**. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 35, pp. 151-168, 2015
- [Ye06] **YE S., WANG Y., REN Y., LI D., Robot Calibration using iteration and differential kinematics**, International Symposium on Instrumentation Science Technology, 2006.

- [Young00] *YOUNG K., PICKIN C.G., Accuracy assessment of the modern industrial robots.* Industrial Robot, volume 27, pp. 427 – 436, 2000.
- [Zhong95] *ZHONG X., LEWIS J., A new method for autonomous robot calibration,* IEEE Int. Conf. on Robotic and Automation, pp. 1790-1795, 1995.
- [Zhuang93] *ZHUANG H., ROTH Z., Robot calibration using the CPC error model,* Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, Vol 9, N° 3, pp. 227-237, 1992.
- [Zhuang95] *ZHUANG H., MASORY O., YAN J., Kinematic calibration of a Stewart platform using pose measurements obtained by a single theodolite,* Proceedings of the IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 329-334, 1995.
- [Ziegert88] *ZIEGERT J., DATSERIS P., Basics considerations for robot calibrations,* International Conference of Robotics and Automation, Philadelphia, pp. 932-938, 1998.

Titre :

Modélisation et identification géométrique de robots utilisés pour des opérations d'usinage.

Résumé :

Ce travail de recherche présente les résultats concernant à la modélisation et identification des paramètres d'un robot sériel pour une utilisation en usinage dans le but d'améliorer la précision de la position de l'outil dans un espace de travail dédié. Dans ce sens, les travaux présentés permettent de proposer une méthodologie de modélisation géométrique pertinente avec la précision de la tâche et la maîtrise des erreurs d'assemblage et de fabrication des éléments du robot. Avec l'utilisation des modèles géométriques appliqués au robot ABB IRB 6660 nous avons développés des modèles avec des paramètres liés à la structure physique du robot et nous avons complémenté ces modèles avec la modélisation des paramètres géométriques d'une broche dédié à l'usinage implémenté dans le dernier axe du robot.

Mots clés : Robots, modèle géométrique, usinage, précision.

Title:

Modeling and geometric identification of robots used for machining operations

Summary:

This work presents the results concerning the modeling and identification of the parameters of a serial robot for use in machining in order to improve the precision of the position of the tool in a dedicated workspace. In this sense, the presented works allow to propose a methodology of geometrical modeling pertinent with the precision of the task and the control of the errors of assembly and manufacture of the elements of the robot. With the use of the geometric models applied to the ABB IRB 6660 robot we have developed models with parameters related to the physical structure of the robot and we complemented these models with the modeling of the geometric parameters of a spindle dedicated to the machining implemented in the last axis of the robot.

Keywords: Robots, Geometric model, machining, precision.