

Contribution sur l'étude de répétabilité en position des robots industriels

par

Hemza KHIRANI

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE
M.Sc.A.

MONTREAL, LE 20 AVRIL 2021

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Antoine S. Tahan, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Ilian A. Bonev, codirecteur
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Michel Rioux, président du jury
Département de génie de système à l'École de technologie supérieure

M. Lucas Hof, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 14 AVRIL 2021

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de mémoire Pr Antoine Tahan. Je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé, conseillé et pour sa disponibilité. J'adresse également mes sincères remerciements à mon co-directeur Pr Ilian Bonev pour m'avoir fourni cette opportunité. Je remercie Pr Mohamed Slamani pour son soutien, son encouragement et sa présence en tout le temps.

Je remercie ensuite l'ensemble des membres du jury, qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir étudier avec attention mon travail : M. Lucas Hof pour avoir accepté d'être jury de cette thèse, et M. Michel Rioux pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider ce jury.

Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été présents pour moi, « Vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé ni efforts. Vous m'avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Je suis redevable d'une éducation dont je suis fier ».

Enfin, je remercie tous mes ami(e)s que j'aime tant, pour leur sincère amitié et confiance, et à qui je dois ma reconnaissance et mon attachement. À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Contribution sur la répétabilité en position des robots industriels

Hemza KHIRANI

RÉSUMÉ

L'erreur de répétabilité quantifie le niveau de dispersion spatiale de la pose programmée d'un robot. C'est une caractéristique métrologique très importante d'un robot industriel. Les recommandations pour calculer la répétabilité des robots industriels sont présentées dans la norme ISO 9283.

Deux robots, LR Mate 200iD de FANUC et KR6 de KUKA, sont utilisés dans le cadre du présent projet. Leurs répétabilités sont estimées par un dispositif TriCal selon la méthode ISO 9283. Ce dispositif portable de mesure 3D peut être utilisé pour calibrer le robot, évaluer sa précision de position ou simplement pour mesurer sa répétabilité de position. En effet, notez que la répétabilité des robots industriels est typiquement mesurée avec un laser tracker, mais n'est pas suffisamment précise pour mesurer des erreurs de position de l'ordre de 0,020 mm, et moins. En revanche, notre TriCal est précis à quelques micromètres lorsqu'il s'agit de mesurer des erreurs de position allant jusqu'à 1 mm.

Ce mémoire présente les résultats et les analyses statistiques d'une étude consacrée à l'estimation de la répétabilité. L'influence de trois facteurs (temps de réchauffement, chargement et effet de la flexibilité) est étudiée.

On a mesuré la répétabilité dans cinq positions selon le cube ISO 9283, en utilisant 300 répétitions par position pour chaque test différent. Un plan factoriel complet d'expériences (DOE) à deux facteurs et trois niveaux a été adopté. Les deux principaux facteurs (chargement et le temps de réchauffement) sont investigués. Par la suite, trois positions sont choisies, une lorsque le robot est complètement étendu (donc plus flexible), une lorsque le robot est replié (donc plus rigide) et une autre entre les deux premières, pour voir l'effet de la flexibilité du robot sur la répétabilité.

Les résultats montrent que les deux robots se comportent globalement de la même manière, et les dispersions les plus mauvaises sont présentées à froid. La dispersion atteint des valeurs allant jusqu'à 0,27 mm et 0,15 mm pour les robots FANUC et KUKA, respectivement. Après au moins 2 heures d'échauffement, les écarts sont améliorés pour atteindre des valeurs inférieures à 0,005 mm. On a trouvé aussi que la dispersion est fortement affectée par le chargement pendant la période d'état froid. Cependant, cet effet disparaît progressivement au fil du temps, en particulier lorsque le robot atteint la période de stabilité thermique. De plus, la période d'état froid et les positions P2 et P3 offrent la pire répétabilité pour les deux robots (effet de facteur de la flexibilité). Après utilisation de l'analyse ANOVA pour voir l'effet de facteur

VIII

de la flexibilité sur les deux robots, on a trouvé que ce facteur a un effet plus important sur le robot FANUC.

Mots-clés : répétabilité, ISO 9283, robot sériel

Contribution of The Repeatability in Industrial Robots

Hemza KHIRANI

ABSTRACT

The repeatability error quantifies the level of spatial dispersion of a robot's programmed pose. This is a very important meteorological characteristic of an industrial robot. The recommendations for calculating the repeatability of industrial robots are presented with the ISO 9283 standard.

Two robots, LR Mate 200iD from FANUC and KR6 from KUKA, are used in this project. Their repeatability is measured by a Trical device according to the ISO 9283 method. This portable 3D measuring device can be used for calibrating the robot, evaluating its position accuracy, or simply for measuring its position repeatability. Indeed, note that the repeatability of industrial robots is typically measured with a laser tracker, but a laser tracker is not accurate enough to measure position errors in the range of 0.020 mm or less. In contrast, our Trical is accurate to a few micrometers when it comes to measuring position errors of up to 1 mm.

This project presents the results and statistical analyses of a study devoted to the estimation of repeatability. The influence of three factors (warm-up, loading and flexibility) is studied. We measure repeatability in five positions according to the ISO 9283 cube, by taking 300 measurements (per position) for each different test. A two-factor, three-level Complete Factorial Design of Experiments (DOE) was adopted in these experiments. The two main factors (loading and warming up) are investigated. Three positions are chosen for further analyses, one when the robot is folded (therefore more rigid), one when it is stretched (therefore more flexible), and one in between to see the effect of flexibility on repeatability.

The results show that the two robots behave globally in the same way, and the worst dispersions are presented when the robots are cold. The dispersion reaches a value of up to 0.27 mm and 0.15 mm for the FANUC and KUKA robots, respectively. After at least 2 hours of warmup, the differences are improved to reach values of less than 0.005 mm. It was also found that dispersion is strongly affected by loading during the cold period. However, this effect gradually disappears over time, especially when the robot reaches the period of thermal stability. In addition, the cold state period and the P2 and P3 positions provide the worst repeatability for the two robots (flexibility factor). After using the ANOVA analysis to see how the flexibility factor influences the two robots, we found that this factor is affecting the FANUC robot more.

Keywords: Repeatability, ISO 9283, serial robots

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 GÉNÉRALITÉ SUR LES ROBOTS	3
1.1 Définition des robots.....	3
1.2 Programmation.....	4
1.2.1 Programmation en ligne.....	4
1.2.2 Programmation hors-ligne	5
1.3 L'étalonnage d'un robot	7
1.4 Méthodes d'étalonnage géométrique	8
1.4.1 Étalonnage par la méthode directe.....	8
1.4.2 Étalonnage par la méthode inverse	9
CHAPITRE 2 ANALYSE DE RÉPÉTABILITÉ DU ROBOT	11
2.1 Introduction.....	11
2.2 Méthodologies pour estimer l'erreur de répétabilité.....	13
2.2.1 Méthode d'ellipsoïdes stochastiques.....	13
2.2.2 Méthode de Taguchi	15
2.2.3 Méthode de la norme ISO 9283	18
2.2.3.1 Précision absolue de la position.....	18
2.2.3.2 Précision absolue de l'orientation.....	20
2.2.3.3 Répétabilité de la position.....	21
2.2.3.4 Répétabilité de l'orientation.....	22
2.2.3.5 Distance de la précision absolue.....	23
2.2.3.6 Distance de la répétabilité.....	26
2.2.4 Utilisation de l'Interféromètre laser Renishaw XL-80 et l'indicateur digital Mitutoyo Absolute Digimatic ID	27
2.3 Instruments de mesure	29
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE - PLANIFICATION D'EXPÉRIENCE.....	35
3.1 Choix des robots	35
3.2 Dispositif de mesure	36
3.3 Identification des cinq positions dans le volume de travail	37
3.4 Sélection des facteurs.....	39
CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET DISCUSSION	41
4.1 Introduction.....	41
4.2 Analyse préliminaire.....	42
4.3 Analyse statistique descriptive.....	54

4.4	Analyse ANOVA	56
	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	63
	LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	65

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1 Erreur maximale et erreur moyenne de différents instruments de mesure	32
Tableau 3.1 DOE avec deux facteurs et trois niveaux	39
Tableau 3.2 Les paramètres de la charge du robot KUKA KR6 R700 Sixx	40
Tableau 3.3 Les paramètres du robot FANUC LR Mate 200iD	40
Tableau 4.1 Récapitulatif de la distance D_j pour le robot FANUC	47
Tableau 4.2 Récapitulatif de la distance D_j pour le robot KUKA	47
Tableau 4.3 Récapitulatifs de la répétabilité (en mm) obtenue pour le robot KUKA et FANUC	55
Tableau 4.4 Récapitulatifs de la répétabilité (en mm) obtenue pour le robot KUKA et FANUC par position	55
Tableau 4.5 Informations sur les facteurs du robot FANUC	58
Tableau 4.6 Informations sur les facteurs du robot KUKA	58
Tableau 4.7 ANOVA pour les positions 1, 2 et 5 du robot FANUC	60
Tableau 4.8 Anova pour les trois positions du robot KUKA	61

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Robot SCARA (Adept Technology) tiré de NABAT (2007)	3
Figure 1.2 Robot parallèle à deux degrés de liberté (Mitsubishi) tiré de Merlet, (1997).....	4
Figure 1.3 Programmation hors ligne tiré de CAI 2014.....	5
Figure 1.4 La méthodologie de la Programmation hors-ligne.....	6
Figure 1.5 Illustration de l'erreur de l'articulation tiré de Meggiolaro (2000)	7
Figure 1.6 La position commande et la position réelle tirée de Hafezi (2015)	8
Figure 2.1 Précision absolue de pose versus répétabilité tiré de Shiakolas (2002) ...	12
Figure 2.2 Précision absolue et la répétabilité de la position tiré de Dandash (2010).....	18
Figure 2.3 Exemples de précision absolue tiré de Joubair (2012,p.18).....	19
Figure 2.4 Précision absolue et la répétabilité de l'orientation tiré de Dandash (2010,p.2).....	20
Figure 2.5 Exemple de répétabilité tiré de Joubair (2012,p.18).....	22
Figure 2.6 Distance entre la pose programmée et la pose obtenue tiré d'ISO 9283(1998, p.25).....	23

Figure 2.7	Position du cube ISO tiré de Kuric et al (2018, p.3).....	27
Figure 2.8	Les positions des points de mesure tiré de Kuric et al (2018, p.4)	28
Figure 2.9	Indicateur digital tiré de Kuric et al (2018, p.3)	28
Figure 2.10	Laser Tracker	30
Figure 2.11	La caméra CCD.....	31
Figure 2.12	Capteur optique de mesure [tiré de ftmesures.com]	31
Figure 3.1	FANUC LR Mate 200iD Tiré de fanuc.eu.....	35
Figure 3.2	Robot KUKA KR 6 R700 Sixx tiré de robots.com.....	36
Figure 3.3	Appareil Trical	37
Figure 3.4	Cube inscrit dans l'espace de travail tiré d'ISO 9283(1998,p.14).....	38
Figure 3.5	Cube de la norme ISO 9283 tiré d'ISO 9283(1998,p15).....	38
Figure 4.1	Installation virtuelle avec le robot KUKA et les 5 positions choisies	42
Figure 4.2	Distance entre la pose atteinte et le barycentre des poses obtenues pour le robot FANUC pour les 300 répétitions aux cinq positions sélectionnées.....	43

Figure 4.3	Distance entre la pose atteinte et le barycentre des poses obtenues pour le robot KUKA pour les 300 répétitions aux cinq positions sélectionnées.....	44
Figure 4.4	Intervalles de confiance (pour les moyennes) et boîte à moustaches de la distance D_j pour le robot FANUC pour les 300 répétitions aux cinq positions sélectionnées.....	45
Figure 4.5	Intervalles de confiance (pour les moyennes) et boîte à moustaches de la distance D_j pour le robot KUKA pour les 300 répétitions aux cinq positions sélectionnées.....	46
Figure 4.6	Répétabilité en fonction du chargement du robot FANUC	48
Figure 4.7	Répétabilité en fonction de temps de réchauffement du robot FANUC ...	48
Figure 4.8	Répétabilité en fonction de chargement du robot KUKA.....	49
Figure 4.9	Répétabilité en fonction de temps de réchauffement du robot KUKA	49
Figure 4.10	Répétabilité du robot FANUC pour les cinq positions sélectionnées.....	50
Figure 4.11	Intervalles de confiance (moyenne) et boîte à moustache de la répétabilité du robot KUKA.....	51
Figure 4.12	Intervalles de confiance (moyenne) et boîtes à moustache de la répétabilité du robot FANUC.....	52
Figure 4.13	Répétabilité du robot KUKA pour les cinq positions sélectionnées.....	53

Figure 4.14	Contributions en pourcentage du temps de réchauffe et du chargement sur la répétabilité du robot FANUC.....	57
Figure 4.15	Contributions en pourcentage du temps de réchauffe et du chargement sur la répétabilité du robot KUKA.....	58
Figure 4.16	Maquette virtuelle du robot KUKA avec les trois positions choisies	59
Figure 4.17	Diagramme des interactions pour la répétabilité pour le robot FANUC ..	62
Figure 4.18	Diagramme des interactions pour la répétabilité pour le robot KUKA	62

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

Camera CCD	Charge Coupled Device
CAO	Conception assistée par ordinateur
CoRo	Laboratoire de commande et de robotique
Ddl	Dégrés de liberté
DH	Denavit-Hartenberg
DOE	Factorial Design of Experiment
ÉG	Étalonnage géométrique
ÉTS	École technologie supérieur
GREAH	Groupe de Recherche en Électrotechnique et Automatique du Havre
ISO	International Organization for Standardization
Les CMM	Coordinate measuring machines
LT	Laser Tracker
MGD	Modélisation géométrique directe
MGI	Modélisation géométrique inverse
R	Rotation
S/N ratio	Rapport signal sur bruit
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
T	Translation
TCP	Tool Centre Point

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

\bar{D}	Moyenne arithmétique des distances euclidiennes pour une position donnée
D_j	La distance euclidienne entre les points et le barycentre
RP_i	La répétabilité de la pose
S_i	L'écart-type estimé de la variable aléatoire D_j
$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$	Les coordonnées du barycentre du nuage de points obtenus pour la même pose répétée n fois.
x_j, y_j, z_j	Les coordonnées de la $j^{ème}$ pose atteinte.

INTRODUCTION

Depuis quelques décennies, les industries manufacturières ont de plus en plus recours à des robots pour remplacer les humains dans des tâches simples, répétitives et dangereuses. Les avancées dans la fabrication de composants pour robot ont rendu les robots plus précis.

La précision absolue (« *accuracy* » en anglais) d'un robot industriel est affectée par des erreurs systématiques dont les causes sont généralement connues et peuvent être facilement compensées par des actions correctives lors de l'étalonnage (calibration). Cependant, la répétabilité est généralement affectée par des erreurs de nature aléatoire, difficiles à modéliser et ne pouvant être compensées de manière permanente en raison justement de leur nature aléatoire. Pour cette raison, la répétabilité est considérée comme l'une des spécifications les plus importantes à prendre en compte lors de la sélection d'un robot.

Les robots industriels sont devenus un moyen essentiel de l'automatisation pour accroître la productivité. Ils jouent un rôle actif dans la mouvance de l'Industrie 4.0. De nos jours, la demande de robots industriels offrant une meilleure répétabilité et, par conséquent, une précision accrue est exigée constamment dans les industries de fabrication. Plusieurs compagnies s'intéressent à connaître le comportement de la répétabilité du robot en fonction du temps et en fonction des conditions d'utilisation (ex. la charge, l'usure). La réalisation de ce projet présente donc une contribution majeure à l'industrie canadienne et montréalaise en particulier Bombardier, Pratt & Whitney, L3 Com, Bell Helicopter, etc.

Ce projet de maîtrise vise à mieux comprendre l'influence de différentes conditions sur la répétabilité(répétitivité) des robots industriels et à identifier les facteurs les plus importants qui affectent le niveau de cette variation sur la base d'une approche expérimentale utilisant la norme 9283 sur deux robots (LR Mate 200iD de FANUC et KR 6 de KUKA) à l'aide de l'instrument de mesure TriCal, conçu au laboratoire CoRo de l'ÉTS [Icli, 2020].

Dans le but de répondre aux objectifs, ce mémoire a été subdivisé en quatre chapitres principaux. En premier lieu le chapitre 1 présente les concepts généraux sur les robots industriels ainsi que la programmation en ligne et hors ligne. Le chapitre 2 présente l'état de l'art de la répétabilité des robots et les différentes méthodes pour la calculer. Le chapitre 3 présente les deux robots expérimentaux, le dispositif utilisé, et la planification d'expérience. Le chapitre 4 présente les résultats expérimentaux et les analyses.

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉ SUR LES ROBOTS

1.1 Définition des robots

Le dramaturge tchèque Karel a introduit le terme « robot » pour la première fois dans sa pièce de théâtre Rossum's Universal Robots en 1920 [Čapek, 2011]. Le terme robot a été appliqué à une grande variété de dispositifs mécaniques. Selon la norme internationale ISO 8373, « un robot industriel est un manipulateur multiapplication reprogrammable commandé automatiquement, programmable sur trois axes ou plus, qui peut être fixe sur place ou mobile, destiné à être utilisé dans des applications d'automatisation industrielle ».

Les robots peuvent être classés en deux groupes :

1. Les robots sériels : ils ont une seule chaîne cinématique constituée de plusieurs liens reliés en série par des articulations et fixée au sol à la base fixe et l'extrémité libre (effecteur terminal), comme montré à la Figure 1.1;

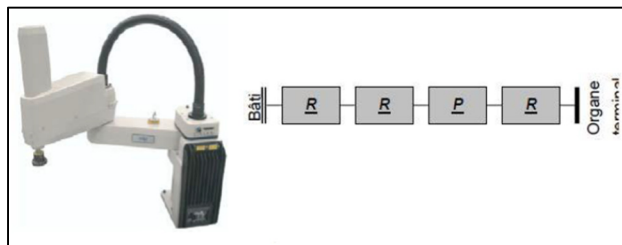


Figure 1.1 Robot SCARA (Adept Technology)
tiré de NABAT (2007)

2. Les robots parallèles : ils ont plus d'une chaîne cinématique fermée dont l'organe terminal est relié à la base par plusieurs chaînes cinématiques (Figure 1.2).

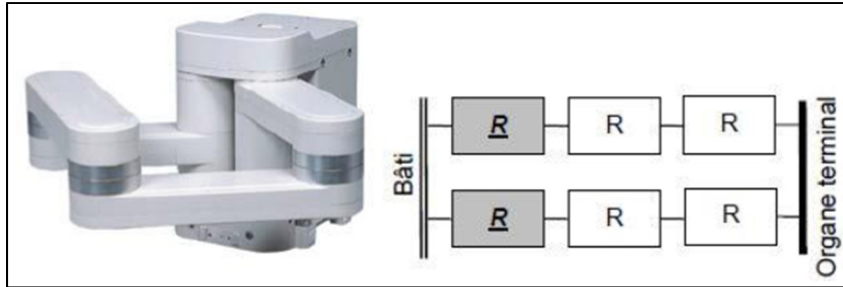


Figure 1.2 Robot parallèle à deux degrés de liberté (Mitsubishi)
tiré de Merlet, (1997)

1.2 Programmation

Il y a deux méthodes de programmation des robots manipulateurs : programmation en ligne et programmation hors ligne, cela dépend de l'application à laquelle le robot est destiné.

1.2.1 Programmation en ligne

Cette méthode, appelée communément *teach-in*, est en fait la programmation par apprentissage. Elle consiste à montrer manuellement au robot ce qu'il doit faire à l'aide de l'opérateur. Plus précisément, l'opérateur va déplacer l'effecteur du robot sur plusieurs poses et les enregistrer au fur et à mesure, et cette opération continue jusqu'à ce que la trajectoire couvre toute la surface à revêtir. Cette série de points est ensuite enregistrée selon l'ordre d'exécution dans la mémoire du contrôleur de robot.

Cette méthode, qui s'avère la plus utilisée dans les applications industrielles, est très pratique, car elle permet de réaliser la programmation rapidement et facilement pour un personnel non qualifié [Joubair, 2012].

Il y a des inconvénients dans la programmation en ligne :

- Il faut arrêter la tâche en cours au moment de la programmation;

- Dans des pièces ou des trajectoires compliquées, il est difficile d'acquérir précisément les points des trajectoires manuellement dans un espace 3D ou avec des distances ou des angles de projection constants. Même dans une pièce très simple, dès qu'il y a une trajectoire de courbe et d'angle droit, il est très difficile ou même impossible de paramétrer manuellement la trajectoire de façon précise [Joubair 2012].

1.2.2 Programmation hors-ligne

Dans la programmation hors-ligne, le robot n'est pas physiquement utilisé comme la programmation en ligne, ce qui ne cause donc aucun arrêt de production. Cette méthode consiste à programmer le robot et simuler les trajectoires en utilisant des logiciels de CAO générés avec un logiciel sur ordinateur, notamment le logiciel virtuel comme Robot Studio, RoboDK (Figure 1.3). Ce type de programmation est de plus en plus populaire pour de nombreuses applications robotiques [CAI 2014].

Le principe de la programmation hors ligne est de produire un modèle de la pièce compliquée en 3D avec un logiciel CAO. Par la suite, on importe ce modèle dans le logiciel de programmation hors ligne. Ensuite, on crée une trajectoire à partir du modèle 3D et enregistre en format du code pour qu'elle puisse être exécutée par le robot ou on peut l'exécuter directement via un logiciel comme RoboDK [Joubair 2012].

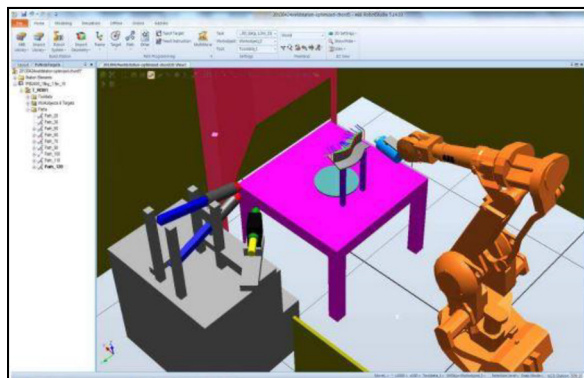


Figure 1.3 Programmation hors ligne
tiré de CAI 2014

On peut décrire la méthodologie de la programmation hors-ligne (Figure 1.4).

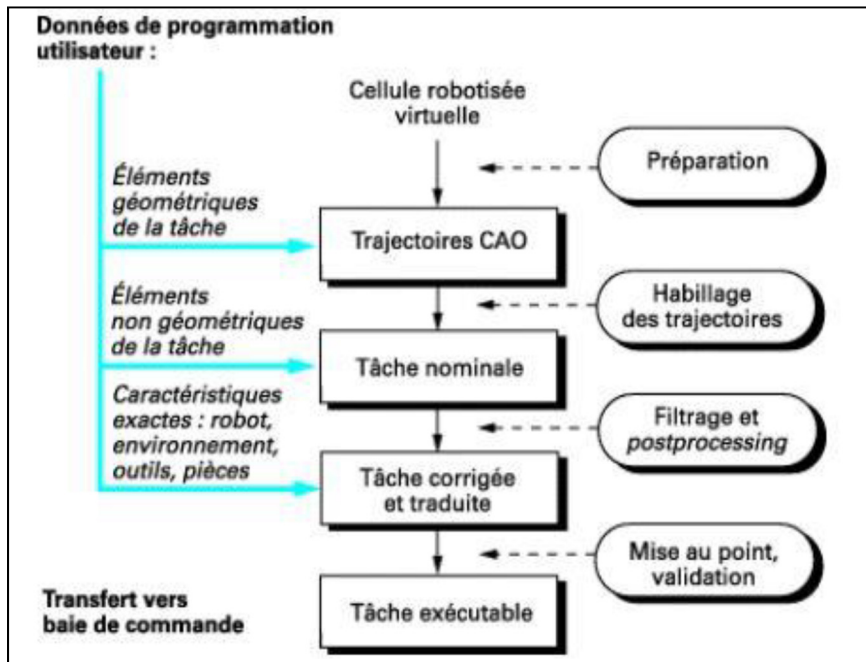


Figure 1.4 La méthodologie de la Programmation hors-ligne
tiré de CAI (2014)

Il y a beaucoup d'avantages dans la programmation hors-ligne :

- Assurer la sécurité humaine, matérielle et environnementale;
- Réduire le temps de préparation, car on peut préparer la programmation du robot malgré l'indisponibilité du robot et on peut continuer la production sans arrêter le robot durant la programmation;
- Rapprocher le modèle mathématique du modèle réel du robot et améliorer ainsi sa précision absolue utilisant ÉG (étalonnage géométrique);
- Diminuer le choc entre la pièce et les outils.

1.3 L'étalonnage d'un robot

Les robots industriels sont hautement reproductibles (petite erreur aléatoire), mais non précis (erreur systématique). Par conséquent, la précision d'un robot peut être améliorée grâce à son étalonnage. L'étalonnage d'un robot est le processus d'identification des valeurs réelles de certains paramètres dans la structure cinématique d'un robot industriel, tels que la position relative des liaisons du robot. En fonction du type d'erreur modélisé, l'étalonnage peut être classé de trois manières différentes.

L'étalonnage de **niveau 1** modélise seulement les différences entre les valeurs fournies par les encodeurs des actionneurs (θ_d) et les mouvements articulaires réels (θ_r)(voir Figure 1.5).

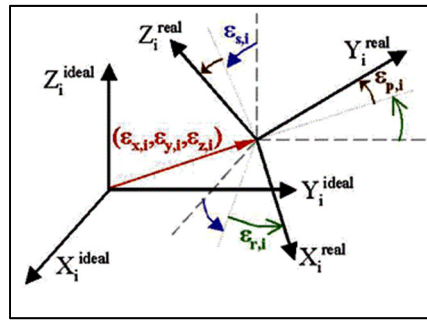


Figure 1.5 Illustration de l'erreur de l'articulation tiré de Meggiolaro (2000)

Dans un modèle nominal on considère que $\theta_d = \theta_r$, mais réellement, nous avons une relation complexe $\theta_r = f(\theta_d)$. Cette relation est difficile à trouver, mais nous pouvons obtenir de bonnes approximations avec des fonctions linéaires comme :

$$\theta_r = k_1 \theta_d + k_0 \quad (1.1)$$

L'étalonnage de **niveau 2**, aussi connu sous le nom *étalonnage géométrique*, concerne l'ensemble des paramètres géométriques du robot, ce qui inclut les décalages d'angle, les longueurs

et excentricités des joints cinématiques en tant que paramètres d'erreur à la conception nominale du robot. En même temps, on peut utiliser le modèle niveau 1 dans le modèle niveau 2 pour étalonner les articulations.

L'étalonnage de **niveau 3**, également appelé étalonnage non géométrique, il modélise les erreurs autres que les valeurs géométriques comme la rigidité, le frottement, le jeu, les paramètres dynamiques, etc. L'étalonnage de niveau 3 est généralement associé à un étalonnage de niveau 2 et 1. Les étalonnages de robot les plus courants incluent la cinématique complet (niveau 2) et parfois l'inclusion de quelques paramètres décrivant la rigidité du bras du robot (niveau 3).

1.4 Méthodes d'étalonnage géométrique

1.4.1 Étalonnage par la méthode directe

Cette méthode appelée *méthode en boucle ouverte*, elle est généralement utilisée pour identifier les paramètres du robot en utilisant les équations du MGD. Le principe de cette méthode est basé sur la mesure de la position et l'orientation de l'effecteur terminal (pose mesurée X^M) après déplacement de l'effecteur à une pose commandée X^C en commandant des mouvements articulaires aux actionneurs du robot. En principe, X^C (Nominal position) et X^M (Actual position) doivent être identiques pour avoir un robot idéal (Figure 1.6).

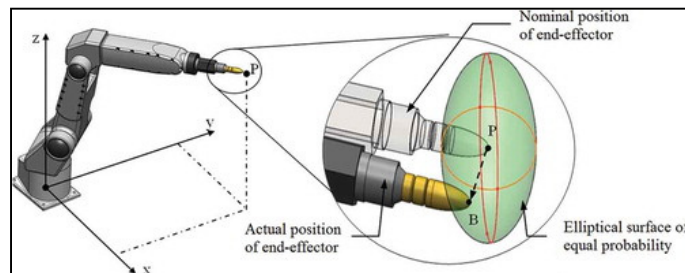


Figure 1.6 La position commande et la position réelle
tirée de Hafezi (2015)

L'objectif de cette méthode est de trouver le vecteur réel \mathbf{v}_{real} qui minimise les erreurs de pose (Éq. 1.6).

$$\text{Erreur de pose} = X^M - X^C \quad (1.2)$$

Avec X^C qui est exprimée en fonction des ρ_i (valeurs connues).

$$X^C = f(\mathbf{v}_{real}, \rho_i) \quad (1.3)$$

Dans l'équation 1.7, les paramètres du robot sont des inconnues. Notre but est d'agir sur les paramètres géométriques afin de rendre l'erreur de positionnement le plus petit possible.

1.4.2 Étalonnage par la méthode inverse

La deuxième méthode est plus compliquée. Elle utilise les équations MGI au lieu de MGD. Le but de cette méthode est de minimiser les erreurs des mouvements des articulations en utilisant une pose de référence connue X_r . Les coordonnées articulaires ρ_i^C sont calculées en fonction de X^R (valeurs connues) et des paramètres \mathbf{v}_{real} (valeurs inconnues, à identifier) en utilisant les équations du MGI :

$$\rho_i^C = fct(\mathbf{v}_{real}, X^R) \quad (1.4)$$

Cette méthode est généralement utilisée pour les robots parallèles à six (6) ddl

CHAPITRE 2

ANALYSE DE RÉPÉTABILITÉ DU ROBOT

2.1 Introduction

La robotique a considérablement évolué au cours des dernières années, devenue de plus en plus performante, efficace et précise. Cette précision robotique est la clé des applications futures. Certains robots (comme le Meca500 de Mecademic) affichent des valeurs de répétabilité de 5 micromètres.

Depuis les débuts de l'automatisation industrielle, la précision des robots a parcouru un long chemin. Aujourd'hui, les robots assistent de plus en plus les opérations sensibles comme la chirurgie. Le système chirurgical robotique clinique le plus largement utilisé comprend un bras de caméra et des bras mécaniques avec des instruments chirurgicaux attachés à eux. L'étude a révélé que les robots étaient dix fois plus précis qu'un chirurgien humain. Le robot peut effectuer des mouvements précis à moins de 1 μm . Dans le futur, les robots seront capables d'accomplir des tâches complexes avec plus de précision que les humains.

Malgré cette évolution et tous ces travaux de recherche, aucun robot ou processus de fabrication n'est précis à 100%. Il y a toujours une marge d'erreur. L'erreur de positionnement moyenne d'un robot détermine sa précision et les types de tâches qu'il peut effectuer. Au fil du temps, cette erreur moyenne a considérablement diminué en raison de diverses améliorations technologiques.

Le robot reçoit l'ordre d'aller vers une position spécifique, mais quand on refait cette tâche plusieurs fois dans les mêmes conditions, on remarque que les poses obtenues ne sont pas exactement les mêmes que la pose demandée. On observe d'ailleurs des erreurs qui sont responsables de cette différence dans la position et l'orientation de l'outil. La norme ISO 9283

(Robots manipulateurs industriels — Critères de performance et méthodes d'essai correspondantes) présente deux indices de précision : la répétabilité et l'exactitude (précision absolue de la pose).

La répétabilité est la capacité du robot à revenir à la même pose. La précision absolue est la différence entre la pose programmée (désirée) et la pose que le robot a réellement atteinte. Selon ISO 9283, la précision absolue est la distance entre la pose programmée et la moyenne de 30 poses réellement atteintes. Elle est utilisée pour calculer l'exactitude de la position ou de l'orientation. La Figure 2.1 explique les effets de répétabilité et la précision absolue de pose (P.S. Shiakolas, K.L. Conrad & T.C. Yih, 2002).

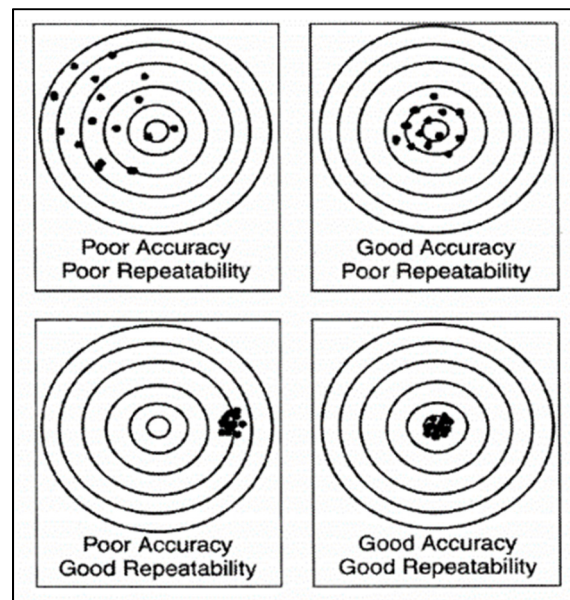


Figure 2.1 Précision absolue de pose versus répétabilité, tiré de Shiakolas (2002)

2.2 Méthodologies pour estimer l'erreur de répétabilité

Il existe plusieurs approches et méthodes pour modéliser et calculer la répétabilité d'un robot. Parmi les méthodes les plus couramment utilisées, on retiendra la méthode d'ellipsoïdes stochastiques, la méthode de Taguchi (ratio signal/bruit), et la méthode de la norme ISO 9283.

2.2.1 Méthode d'ellipsoïdes stochastiques

Les ellipsoïdes stochastiques consistent en une théorie pour modéliser la répétabilité développée par GREAH (Groupe de Recherche en Électrotechnique et Automatique du Havre). Cette théorie est utilisée pour repérer les points, ou pour choisir les axes les plus adaptés pour commander le robot en vitesse (Assoumou Nzue, Brethé, Vasselin, Lefebvre, 2011).

Dans le même contexte, Brethé et al. (2005) ont utilisé cette approche avec la matrice de covariance angulaire pour modéliser et calculer la répétabilité d'un robot KUKA. Plus précisément, cette approche a été utilisée pour étudier l'influence de l'espace de travail et la charge sur la répétabilité. Assoumou Nzue et al. (2011) ont notamment utilisé cette théorie pour la comparaison des robots manipulateurs sériels et parallèles.

La cinématique directe d'un robot transforme les coordonnées des articulations θ en coordonnées de l'outil dans l'espace de travail, X , exprimées par :

$$X = F(\theta). \quad (2.1)$$

La matrice jacobienne relie le vecteur vitesse articulaire au vecteur vitesse cartésienne. Elle est exprimée par :

$$dX = J(\theta)d\theta \quad (2.2)$$

Où, $d\theta$ est le vecteur vitesse articulaire. C'est l'erreur articulaire transformée vers l'espace de travail dX .

La variation de $d\theta$ est le premier responsable de l'erreur de répétabilité. Pour une position θ_0 , on peut évaluer la limite supérieure ou minimiser l'erreur de ΔX en connaissant l'intervalle de chaque articulation $\Delta\theta_i$, en utilisant la matrice jacobienne:

$$\Delta X = |J(\theta_0)|\Delta\theta \quad (2.3)$$

L'inconvénient de cette méthode est qu'il est difficile de la relier la mesure expérimentale de la répétabilité R à ΔX . Pour cette raison Brethé et Dakyo (2002) ont développé une approche pour établir une relation entre la répétabilité (R) et la sensibilité du capteur du robot. Après les essais sur un robot SCARA, ils ont découvert que la densité de probabilité de la position angulaire de l'articulation du robot obéit à la loi de Gausse. Les variables aléatoires articulaires sont des vecteurs gaussiens, dont la matrice diagonale de covariance D :

$$D = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_n^2 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

La matrice de covariance C est calculée comme:

$$C = JDJ^T \quad (2.5)$$

Les longueurs des demi-axes de l'ellipsoïde sont les racines carrées des valeurs de matrice C . Les directions des axes principaux des ellipsoïdes stochastiques sont les valeurs propres de la matrice C .

La densité de probabilité des positions cartésiennes est donnée par :

$$g(dX) = k \cdot e^{-\frac{1}{2}dX^T C^{-1} dX} \quad (2.6)$$

où, k est un facteur qui peut être calculé en normalisant la fonction de densité.

Les surfaces iso densité de probabilité sont des ellipsoïdes, appelés ellipsoïdes stochastiques, modélisés par l'équation :

$$d\mathbf{X}^T \mathbf{C}^{-1} d\mathbf{X} = cte \quad (2.7)$$

Et l'ellipsoïde stochastique de référence :

$$d\mathbf{X}^T \mathbf{C}^{-1} d\mathbf{X} = 1 \quad (2.8)$$

Les avantages de la théorie des ellipsoïdes stochastiques sont les suivants :

- La théorie décrit la distribution spatiale des erreurs de l'espace de travail autour de la position moyenne.
- Les résultats sont facilement calculés et conduisent à des nombres caractéristiques.
- Les résultats peuvent être visualisés graphiquement avec des ellipsoïdes stochastiques.
- Peu de mesures expérimentales sont nécessaires pour construire le modèle.
- Le modèle stochastique peut être utilisé pour l'optimisation de la conception d'un robot ou l'agencement de tâches d'assemblage.
- Possibilité de choisir le meilleur emplacement dans l'espace de travail pour effectuer la tâche.

2.2.2 Méthode de Taguchi

La méthode de Taguchi est utilisée pour trouver les meilleures configurations et positions qui donnent une meilleure précision absolue et une meilleure répétabilité. Cette méthode a été employée pour la première fois par Gong et Kao (1997). Ils ont utilisé le ratio S/N (rapport signal sur bruit) pour élaborer la précision absolue de la pose et la répétabilité des robots dans l'espace

de travail. Ils ont également utilisé le ratio S/N pour élaborer la robustesse et la qualité de la conception technique en changeant les facteurs de contrôle.

Pour mesurer la précision absolue, ils ont défini l'erreur de position absolue dans l'espace cartésien comme,

$$\Delta l_a = \sqrt{2w(\Delta x_a)^2 + 2(1-w)(\Delta y_a)^2} \quad (2.9)$$

où, $1 \geq w \geq 0$ est un coefficient de pondération, $\Delta x_a = x - x_d$ et $\Delta y_a = y - y_d$ sont les erreurs sur les directions x et y par rapport à la position désirée. Les points (x, y) et (x_d, y_d) sont les positions réelles et souhaitées de l'effecteur terminal.

Le coefficient de pondération w est utilisé quand on veut allouer une importance différente pour les erreurs dans les directions x et y . Par exemple, si on veut se concentrer sur la précision suivant la direction y beaucoup plus que sur la direction x , on définit $w < 0.5$.

La ratio S/N pour erreur de pondération, employée ici comme une variable de réponse, est exprimé par :

$$\sigma_a^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\Delta l_a)_i^2}{N} \quad (2.10)$$

$$\eta_a = -10 \log_{10} \sigma_a^2 \quad (2.11)$$

où Δl_a est la différence entre la position commandée et la position réelle de l'effecteur final défini dans l'équation (2.9). L'équation (2.11) mesure seulement l'exactitude de l'effecteur final. Quand le ratio S/N est élevé, la précision absolue est bien meilleure. De plus, σ_a est l'écart type et η_a est le S/N ratio pour l'exactitude. La valeur moyenne de Δl_a est:

$$\overline{\Delta l_a} = \frac{\sum_{i=1}^N (\Delta l_a)_i}{N} \quad (2.12)$$

Pour mesurer la répétabilité, la première étape est de trouver la position centrale de ces N positions exprimées par :

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}, \quad y_c = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \quad (2.13)$$

La deuxième étape consiste à définir les erreurs de position relative par rapport au centroïde par la formule suivante :

$$\Delta l_r = \sqrt{2w(\Delta x_r)^2 + 2(1-w)(\Delta y_r)^2}. \quad (2.14)$$

avec $\Delta x_r = x - x_c$ et $\Delta y_r = y - y_c$ qui sont les erreurs sur les directions x et y par rapport à la position du centroïde.

Le rapport S/N pour l'erreur de la pondération est employé ici comme une variable de réponse, et est exprimé par :

$$\sigma_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\Delta l_r)_i^2}{N} \quad (2.15)$$

$$\eta_r = -10 \log_{10} \sigma_r^2 \quad (2.16)$$

Où Δl_r est la différence entre la position réelle et le centroïde défini dans l'équation (2.14). L'équation (2.17) mesure la répétabilité de l'effecteur terminal. Quand le rapport S/N est élevé, la répétabilité de l'effecteur terminal est meilleure, σ_r est l'écart type η_r est le ratio S/N. La valeur moyenne de Δl_r est

$$\overline{\Delta l_r} = \frac{\sum_{i=1}^N (\Delta l_r)_i}{N} \quad (2.17)$$

2.2.3 Méthode de la norme ISO 9283

ISO 9283 fait partie d'une série de normes internationales traitant des robots manipulateurs industriels. Elle vise à aider les utilisateurs et les fabricants de robots pour avoir une bonne compréhension et communication entre eux. Elle donne également un protocole pour définir les caractéristiques de performance d'un robot manipulateur.

2.2.3.1 Précision absolue de la position

Selon cette norme, la précision absolue de la position AP est la différence entre la pose commandée (x_c, y_c, z_c) et le barycentre des positions $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ atteintes selon la même direction, comme on peut le voir dans la figure 2.2.

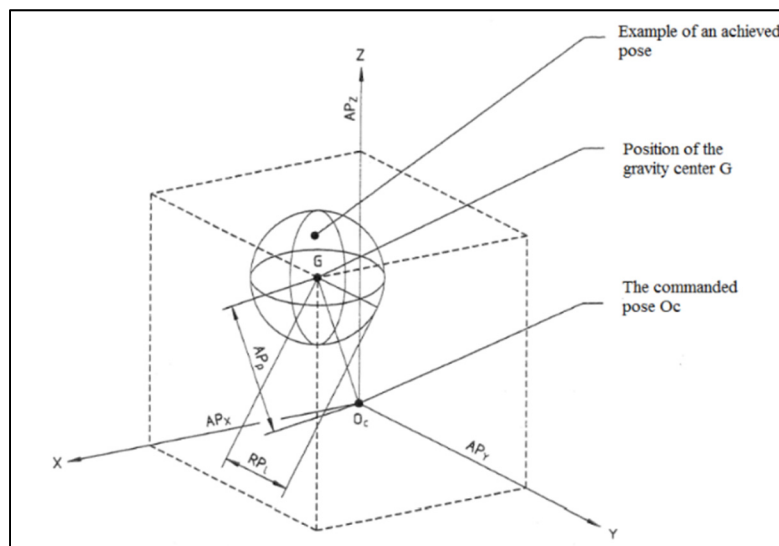


Figure 2.2 Précision absolue et la répétabilité de la position
tiré de Dandash (2010)

Elle est exprimée par :

$$AP_p = \sqrt{(AP_x)^2 + (AP_y)^2 + (AP_z)^2} \quad (2.18)$$

$$AP_x = (\bar{x} - x_c) \quad (2.19)$$

$$AP_y = (\bar{y} - y_c) \quad (2.20)$$

$$AP_z = (\bar{z} - z_c) \quad (2.21)$$

Avec,

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \quad (2.22)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j \quad (2.23)$$

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j \quad (2.24)$$

où $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ sont les coordonnées du barycentre pour la même pose répétée 30 fois, et x_c, y_c, z_c sont les coordonnées de la pose programmée, x_j, y_j, z_j sont les coordonnées de la $j^{ème}$ pose atteinte.

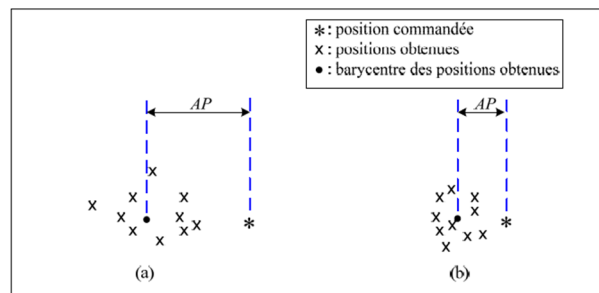


Figure 2.3 Exemples de précision absolue,
tiré de Joubair (2012,p.18)

La figure 2.3 montre deux exemples de la mesure de précision absolue.

2.2.3.2 Précision absolue de l'orientation

D'après la norme ISO, la précision absolue de l'orientation est la différence entre l'orientation d'une pose commandée de l'outil du robot et la moyenne des orientations obtenues. Les coordonnées d'orientation a, b, c doivent être choisies pour représenter l'orientation de l'outil, comme montré dans la figure 2.4.

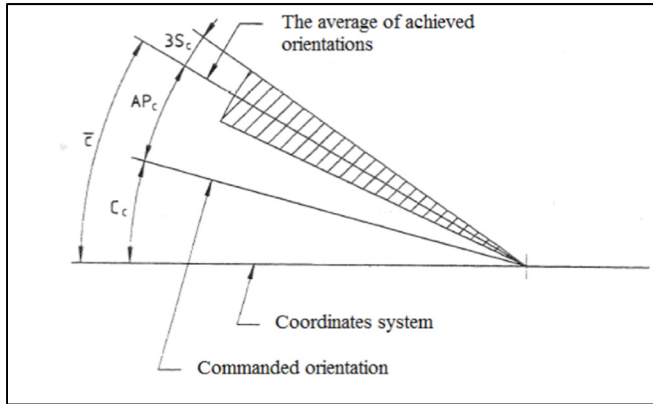


Figure 2.4 Précision absolue et la répétabilité de l'orientation, tiré de Dandash (2010,p.2)

La précision absolue en orientation est exprimée par :

$$AP_a = (\bar{a} - a_c) \quad (2.25)$$

$$AP_b = (\bar{b} - b_c) \quad (2.26)$$

$$AP_c = (\bar{c} - c_c) \quad (2.27)$$

Où,

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_j, \quad (2.28)$$

$$\bar{b} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_j, \quad (2.29)$$

$$\bar{c} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_j, \quad (2.30)$$

a_c, b_c et c_c sont les coordonnées angulaires de la pose commandée, et a_j, b_j et c_j sont les coordonnées angulaires de la $j^{ème}$ pose atteinte.

Morozov et al. (2016) ont utilisé les équations de la précision absolue de l'orientation et la position pour étudier la précision du robot KUKA KR5 Arc HW. Ce robot est utilisé pour effectuer des contrôles de qualité des composants de formes complexes. Slamani et al. (2012) ont utilisé la norme ISO 9283 et les équations de la précision absolue pour évaluer la performance de la position d'un robot à six axes (ABB IRB 1600), utilisant différents instruments de mesure tels que, la barre à billes, l'interféromètre laser et le laser de poursuite (« laser tracker »).

2.2.3.3 Répétabilité de la position

La répétabilité de la pose mesure la diffusion entre les points lorsque le robot est programmé pour atteindre une cible et répété plusieurs fois, comme illustré à la figure 2.5 (Dandashet al., 2010). Il est défini par :

$$RP_L \triangleq \bar{l} + 3S_L, \quad (2.31)$$

Où,

$$\bar{l} = 1/n \sum_{j=1}^n l_j, \quad (2.32)$$

$$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2}, \quad (2.33)$$

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n-1}}, \quad (2.34)$$

et l est la distance entre les points et le barycentre, S_L l'écart-type de la variable aléatoire l .

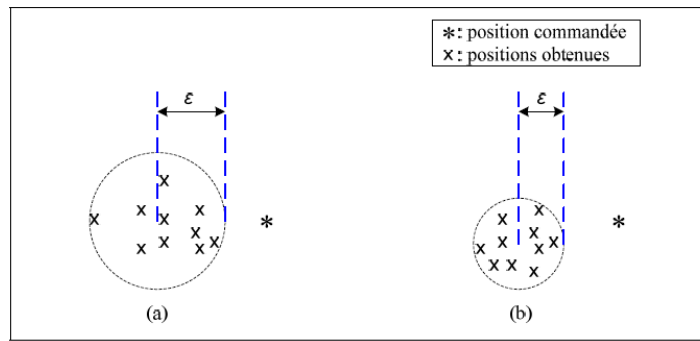


Figure 2.5 Exemple de répétabilité,
tiré de Joubair (2012,p.18)

La figure 2.5 montre la différence entre la mauvaise et la bonne répétabilité de la position.

2.2.3.4 Répétabilité de l'orientation

La répétabilité de l'orientation est la variation angulaire de l'écart autour des valeurs a, b et c .

Elle est définie par les équations suivantes :

$$RP_a = \pm 3S_a = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (a_j - \bar{a})^2}{n-1}} \quad (2.35)$$

$$RP_b = \pm 3S_b = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (b_j - \bar{b})^2}{n-1}} \quad (2.36)$$

$$RP_c = \pm 3S_c = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (c_j - \bar{c})^2}{n - 1}} \quad (2.37)$$

où S_a , S_b et S_c sont les écarts-types autour des valeurs a , b et c .

Pour connaître la distance entre la pose commandée et la pose obtenue (figure 2.6), il faut avoir recours à des équations approuvées par la norme ISO 9283.

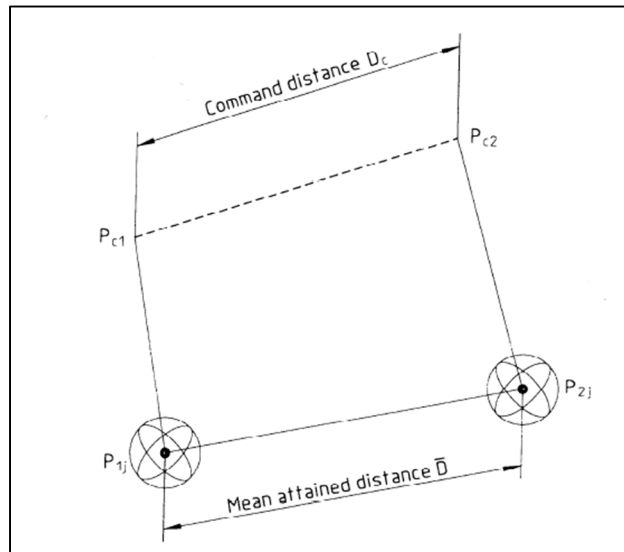


Figure 2.6 Distance entre la pose programmée et la pose obtenue, tiré d'ISO 9283(1998, p.25)

2.2.3.5 Distance de la précision absolue

La distance de la précision absolue exprime l'écart de positionnement et d'orientation entre la distance commandée et la moyenne des distances obtenues. Comme exprimé dans la figure 2.6, la distance de positionnement est la différence entre P_{c1}, P_{c2} (Pose commandée) et P_{j1}, P_{j2} (pose atteinte).

La distance de la précision absolue est formulée par deux facteurs :

- La distance de la précision absolue de l'orientation ;
- La distance de la précision absolue de position.

La distance de la précision absolue de position AD_p (ISO 9283) est exprimée par :

$$AD_p = \overline{D} - D_c \quad (2.38)$$

Où,

$$\overline{D} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_j, \quad (2.39)$$

$$D_j = |P_{1j} - P_{2j}| = \sqrt{(x_{1j} - x_{2j})^2 + (y_{1j} - y_{2j})^2 + (z_{1j} - z_{2j})^2}, \quad (2.40)$$

$$D_c = |P_{c1} - P_{c2}| = \sqrt{(x_{c1} - x_{c2})^2 + (y_{c1} - y_{c2})^2 + (z_{c1} - z_{c2})^2}, \quad (2.41)$$

(x_{c1}, y_{c1}, z_{c1}) sont les coordonnées de la position P_{c1} , (x_{c2}, y_{c2}, z_{c2}) sont les coordonnées de la position P_{c2} , (x_{1j}, y_{1j}, z_{1j}) sont les coordonnées de la position P_{1j} , (x_{2j}, y_{2j}, z_{2j}) sont les coordonnées de la position P_{2j} et n est le numéro de la répétition.

La distance de la précision absolue le long d'un axe (x, y ou z) est donnée par :

$$AD_x = \overline{D_x} - D_{cx}, \quad (2.42)$$

$$AD_y = \overline{D_y} - D_{cy}, \quad (2.43)$$

$$AD_z = \overline{D_z} - D_{cz}, \quad (2.44)$$

Où,

$$\overline{D_x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_{xj} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |x_{1j} - x_{2j}|, \quad (2.45)$$

$$\overline{D_y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_{yj} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |y_{1j} - y_{2j}|, \quad (2.46)$$

$$\overline{D_z} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_{zj} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |z_{1j} - z_{2j}|, \quad (2.47)$$

et,

$$D_{cx} = |X_{c1} - X_{c2}|, \quad (2.48)$$

$$D_{cy} = |y_{c1} - y_{c2}|, \quad (2.49)$$

$$D_{cz} = |z_{c1} - z_{c2}|. \quad (2.50)$$

La distance de la précision absolue de l'orientation AD_a , est exprimée par :

$$AD_a = \overline{D_a} - D_{ca}, \quad (2.51)$$

$$AD_b = \overline{D_b} - D_{cb}, \quad (2.52)$$

$$AD_c = \overline{D_c} - D_{cc}, \quad (2.53)$$

Où,

$$\overline{D_a} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_{aj} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |a_{1j} - a_{2j}|, \quad (2.54)$$

$$\overline{D_b} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_{bj} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |b_{1j} - b_{2j}|, \quad (2.55)$$

$$\overline{D_c} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_{cj} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |c_{1j} - c_{2j}|, \quad (2.56)$$

et,

$$D_{ca} = |a_{c1} - a_{c2}|, \quad (2.57)$$

$$D_{cb} = |b_{c1} - b_{c2}|, \quad (2.58)$$

$$D_{cc} = |c_{c1} - c_{c2}|, \quad (2.59)$$

(a_{c1}, b_{c1}, c_{c1}) est l'orientation de la position commandée P_{c1} , (a_{c2}, b_{c2}, c_{c2}) est l'orientation de la position commandée P_{c2} , (a_{1j}, b_{1j}, c_{1j}) est l'orientation de la position commandée P_{1j} , (a_{2j}, b_{2j}, c_{2j}) est l'orientation de la position commandée P_{2j} et n est la valeur de la répétition.

2.2.3.6 Distance de la répétabilité

La distance de la répétabilité est la proximité entre plusieurs distances obtenues pour la même distance programmée, répétée n fois dans la même direction. La répétabilité de la distance inclut la répétabilité de positionnement et de l'orientation. La distance de la répétabilité de position RD est exprimée par :

$$RD = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{xj} - \bar{D}_x)^2}{n-1}}, \quad (2.60)$$

$$RD_x = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{xj} - \bar{D}_x)^2}{n-1}}, \quad (2.61)$$

$$RD_y = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{yj} - \bar{D}_y)^2}{n-1}}. \quad (2.62)$$

La répétabilité d'orientation est exprimée par :

$$RD_a = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{aj} - \bar{D}_a)^2}{n-1}}, \quad (2.63)$$

$$RD_b = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{bj} - \bar{D}_b)^2}{n-1}}, \quad (2.64)$$

$$RD_c = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{cj} - \overline{D_c})^2}{n-1}}. \quad (2.65)$$

2.2.4 Utilisation de l'Interféromètre laser Renishaw XL-80 et l'indicateur digital Mitutoyo Absolute Digimatic ID

Kuric, Tlach, Sagova, Cisar (2018) ont utilisé l'Interféromètre laser Renishaw XL-80 et l'indicateur digital Mitutoyo Absolute Digimatic ID pour mesurer la répétabilité de robot FANUC basée sur un cube ISO imaginaire, le tout ayant été placé dans l'espace de travail du robot (figure 2.7). La répétabilité de pose du robot industriel a été mesurée par cet appareil en utilisant le mode mesure linéaire. Le principe de la mesure linéaire est de déplacer le miroir mobile le long du faisceau laser transmis. Dans leur article, ils ont mesuré cinq points situés sur le plan incliné défini par la norme ISO 9283. La taille et la position de cube ISO sont choisies au maximum pour couvrir l'espace de travail du robot.

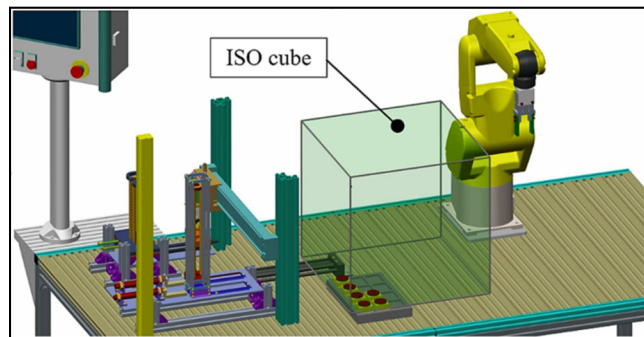


Figure 2.7 Position du cube ISO
tiré de Kuric et al (2018, p.3)

La méthode consiste à mettre trois mesures séparées selon les axes X , Y et Z du référentiel de la base du robot, qui sont parallèles aux côtés du cube. Le point O (0,0,0) et la position P_0 sont représentés à la figure 2.8a. Pour chaque test, cinq mesures espacées sur le long des bords du cube ISO ont été sélectionnées ($P_1 - P_5$). P_0 et P_6 ont été utilisées par le programme de

mesure Renshaw Laser XL pour détecter un cycle de mesure récurrent. Cependant, la mesure n'est pas effectuée à ces points.

Le TCP (*Tool Centre Point*) du robot se déplace entre P_0 et P_6 et saisit la mesure dans les deux directions. En utilisant ce type de mesure, Kuric et al. (2018) ont remarqué que les valeurs mesurées permettent d'observer, notamment, l'effet du jeu sur les articulations du robot. Les cinq positions ($P_1 - P_5$) sont mesurées 30 fois dans la direction positive ($P_0 - P_6$) et la direction négative ($P_6 - P_0$). Ils ont ajouté des poids dans l'organe terminal, comme représenté à la figure 2.8b.

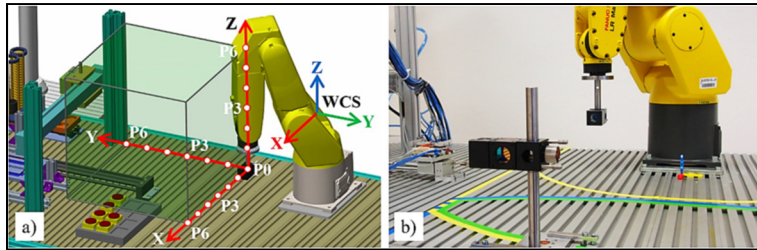


Figure 2.8 Les positions des points de mesure,
tiré de Kuric et al (2018, p.4)

Par la suite, un indicateur pour mesurer les critères de performance des robots industriels (Mitutoyo Absolute Digimatic ID-F) est utilisé pour trouver la répétabilité. Le contact indicateur est appliqué sur la bride de CUBE ISO pendant la mesure au moyen de laquelle la pince est serrée sur l'extrémité du bras du robot, comme on peut le voir à la figure 2.9.



Figure 2.9 Indicateur numérique,
tiré de Kuric et al (2018, p.3)

Les programmes AP & RP ont été utilisés pour traiter et évaluer les données mesurées. La répétabilité a été calculée en utilisant la formule d'ISO 9283.

Après la comparaison de résultats, ils ont trouvé que dans les deux axes mesurés, une meilleure répétabilité est obtenue lorsque l'indicateur numérique est utilisé. Et ils ont trouvé aussi que la répétabilité du robot dans la zone sélectionnée de son espace de travail correspond à la valeur de répétabilité indiquée par le fabricant ($\pm 0,02$ mm).

2.3 Instruments de mesure

Il est bien connu que les robots industriels sont hautement répétables, mais non précis. Par conséquent, la précision d'un robot industriel peut être améliorée grâce à un étalonnage approprié. Généralement, la précision nominale d'un robot dépend de la marque et du modèle du robot. Comme montré précédemment (Tableaux 2.1, 2.2 et 2.3), l'étalonnage améliore la précision du robot significativement, étant donné que parfois l'erreur maximale et l'erreur moyenne peuvent être diminuées jusqu'à 10 fois (allant de quelques millimètres à une dizaine de micromètres).

Afin d'étalonner un robot et compenser ses erreurs, un système de mesure est nécessaire. Les mesures peuvent être obtenues, soit sur le positionnement de l'organe terminal (mesures externes), soit sur les actionneurs (mesures internes).

Les mesures externes sont généralement utilisées pour mesurer la position et l'orientation (pose) de l'effecteur afin d'identifier les paramètres du robot en utilisant les équations du MGD, de commander des mouvements articulaires et de minimiser les erreurs résiduelles de poses. Cette méthode est souvent appelée étalonnage en boucle ouverte.

La deuxième méthode est la méthode inverse, qui consiste à mesurer les valeurs des coordonnées articulaires (θ_i) par les encodeurs internes du robot, sans avoir recours aux mesures externes. Ensuite, en utilisant les équations du MGI, les paramètres du robot sont identifiés en minimisant les erreurs de mouvements des articulations.

Il y a beaucoup d'instruments de mesure externes qui fournissent les distances, les angles ou les coordonnées cartésiennes tels que le Laser Tracker (Gong *et al.*, 2000; Meng *et al.*, 2003; Corbel *et al.*, 2006; Blaise *et al.*, 2010; Feng *et al.*, 2011) (Figure 2.10).



Figure 2.10 Laser Tracker

Les Lasers Tracker (LT) sont des instruments de mesure permettant de réaliser des mesures rapides et très précises en trois dimensions dans plusieurs domaines comme l'aéronautique, l'automobile, la robotique, etc. Le principe de fonctionnement est que l'appareil envoie un faisceau laser vers une cible rétro réfléchissante (appelée SMR, et qui est une bille avec trois miroirs orthogonaux) maintenue sur l'objet à mesurer. Les coordonnées cartésiennes sont obtenues en assemblant les mesures de distance et d'angles. La distance est mesurée avec un laser et les angles avec des codeurs optiques situés dans la tête du LT.



Figure 2.11 La caméra CCD

En raison de ses avantages tels que son large champ de vision, sa répétabilité élevée, son faible coût et sa facilité d'installation et de montage sur un robot (sans régler ses paramètres intrinsèques), la caméra CCD présentée à la Figure 2.11 (Motta et al., 2001; Watanabe et al., 2006) est devenue largement utilisée en tant qu'appareil de mesure. Cette caméra a été utilisée par Mauricio (2001) pour modéliser l'exécution de processus d'étalonnage de robot avec programmation hors ligne.

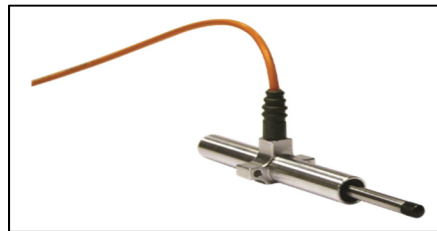


Figure 2.12 Capteur optique de mesure,
[tiré de ftmesures.com]

Bai et Teo (2003) ont utilisé les capteurs de position optique (Fig. 2.12) pour décrire les erreurs d'étalonnage du manipulateur parallèle. Un modèle d'erreur a été établi.

Les distances et les angles peuvent être mesurés comme suite :

- L'interféromètre laser (Majarena et al., 2011), les télémètres laser (Liu, 2010);
- Les jauges de distance (Abtahi et al., 2010);

- les barres à billes (Ota et al., 2000; Kim, 2005);
- les inclinomètres (Besnard et Wisama, 1999; Ren et al., 2009a; Ren et al., 2009b);
- les théodolites (Berg, 1992; Schroer, 1994);

Le Tableau 2.1 montre les performances de différentes technologies de mesure sur les robots en se basant sur les travaux de Nubiola et Bonev (2013), Nubiola (2014), Nubiola et Bonev (2014), Nubiola et al. (2014) et Fillion (2015). Ces études ont toutes été effectuées dans les mêmes conditions de travail avec un même robot ou un robot similaire.

Tableau 2.1 Erreur maximale de différents instruments de mesure

Instrument	Robot	Erreur maximale
Trical/Laser Tracker	IRB 120	0.481 mm
Artéfact triangulaire/Laser Tracker	IRB 120	0.437 mm
Artéfact triangulaire /C-Track	IRB 120	0.492 mm
Artéfact spatial/C-Track	IRB 120	0.428 mm
Artéfact triangulaire /Laser Tracker	LRMate 200 iC	0.490 mm
Barre à billes/Laser Tracker	LR MATE 200 iC	1.666 mm
Artéfact triangulaire /MaxSHOT 3D	LR Mate 200iC	0.619 mm

Il y a différentes façons pour mesurer la répétabilité, mais le test que la norme ISO 9283 demande ne peut pas être effectué qu'avec un laser tracker. Or, la précision d'un laser tracker est de l'ordre de 5 $\mu\text{m/m}$, alors l'appareil ne peut pas distinguer des erreurs de quelques micromètres. Or, les robots d'aujourd'hui peuvent avoir une répétabilité d'à peine 5 à 10 micromètres. Il y a des chercheurs qui ont utilisé différentes façons de mesurer la répétabilité, comme

Kuric (2018) qui a utilisé l'interféromètre laser Renishaw XL-80 et l'indicateur digital Mitutoyo Absolute Digimatic ID pour mesurer la répétabilité de robot FANUC basée sur un cube ISO imaginaire, ou comme (Jain (2019) qui a utilisé une caméra monoculaire montée sur l'effecteur terminal du robot pour mesurer la répétabilité du robot LBR iiwa 7 R800. Bringmann (2005) a proposé un nouvel artefact qui permet des mesures spatiales avec une incertitude de mesure totale étendue ($k = 2$) inférieure à $5 \mu\text{m}$ dans un grand volume de travail tridimensionnel de $500 \times 500 \times 150 \text{ mm}^3$. Cet appareil de mesure permet de tester et d'étalonner rapidement des machines-outils, des robots et des machines de mesure de coordonnées avec trois mouvements linéaires avec une incertitude de mesure inférieure à $5 \mu\text{m}$. Les erreurs sont mesurées dans les trois degrés de liberté X, Y, Z aux points de mesure formant une grille tridimensionnelle régulière, permettant ainsi une compensation d'erreur spatiale. Aussi Weikert (2004) pour étalonner les erreurs de paramètres comme le *backlash*, l'erreur de positionnement. Il a utilisé le R-Test qu'il se compose de trois sondes incrémentales analogiques disposées orthogonalement, les unes par rapport aux autres de manière être uniformément inclinées par rapport au plan horizontal. Il a utilisé des géométries de contact nominale plates ($\text{Ø}12 \text{ mm}$) entre les sondes et la sphère à toucher, le déplacement du centre de la sphère est directement transféré aux déplacements des trois sondes. Les trois valeurs de mesure conduisent directement au déplacement 3-D de la sphère. Icli (2020) a étalonné un robot KUKA KR6 R700 sixx utilisant une nouvelle méthode et appareil de mesure portable. Ensuite, il valide ses résultats avec un laser tracker.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE - PLANIFICATION D'EXPÉRIENCE

3.1 Choix des robots

Dans le présent projet, on a retenu deux robots pour réaliser les investigations expérimentales, soit le Robot FANUC LR Mate 200iD et le KUKA KR 6 R700 Sixx. Le FANUC LR Mate 200iD est un robot compact à 6 axes, tels que représentés à la Figure 3.1. Il combine une bonne capacité de charge (7 kg) avec un indice de protection IP67. Ce robot est considéré parmi les meilleurs et les plus fiables pour l'automatisation des processus dans de nombreuses industries.



Figure 3.1 FANUC LR Mate 200iD,
Tiré de fanuc.eu

Le KUKA KR 6 R700 Sixx est un robot compact à 6 axes, tels que représentés à la Figure 3.2. Il est connu pour ses vitesses élevées et sa précision, ce qui le rend adapté pour

les tâches de manutention. Il s'agit d'un robot polyvalent, conçu pour fonctionner dans de nombreuses configurations. Il possède une capacité de charge 6 kg et un indice de protection IP54.



Figure 3.2 Robot KUKA KR 6 R700 Sixx, tiré de robots.com

Ces deux robots sont disponibles au Laboratoire de commande et de robotique (CoRo).

3.2 Dispositif de mesure

La diapositive utilisée dans cette expérience est le Trical, comme représenté à la figure 3.3 [Icli, 2020]. Il est composé de trois comparateurs numériques Mitutoyo ID-C112XB montés de façon orthogonale. Ces comparateurs ont une précision affichée de 0.003 mm et possèdent une tige amovible permettant une étendue de mesure de 0 à 12.7 mm. Selon la norme ISO 9283, seul un laser tracker peut être utilisé pour mesurer la répétabilité du robot. Le problème avec les lasers trackers, bien entendu, est qu'ils sont coûteux (>100 000 \$CAN), mais aussi que leur précision n'est pas assez pour mesurer la répétabilité de robots d'aujourd'hui. L'appareil Trical développé au laboratoire CoRo est beaucoup plus abordable [Joubair, 2012] et plus précis. Par contre, il ne permet pas de mesurer la répétabilité en

position pour une pose donnée en arrivant à cette pose par n'importe quelle direction. Ainsi, il n'est pas possible de respecter la norme ISO 9283 à la lettre si on utilise le Trical.

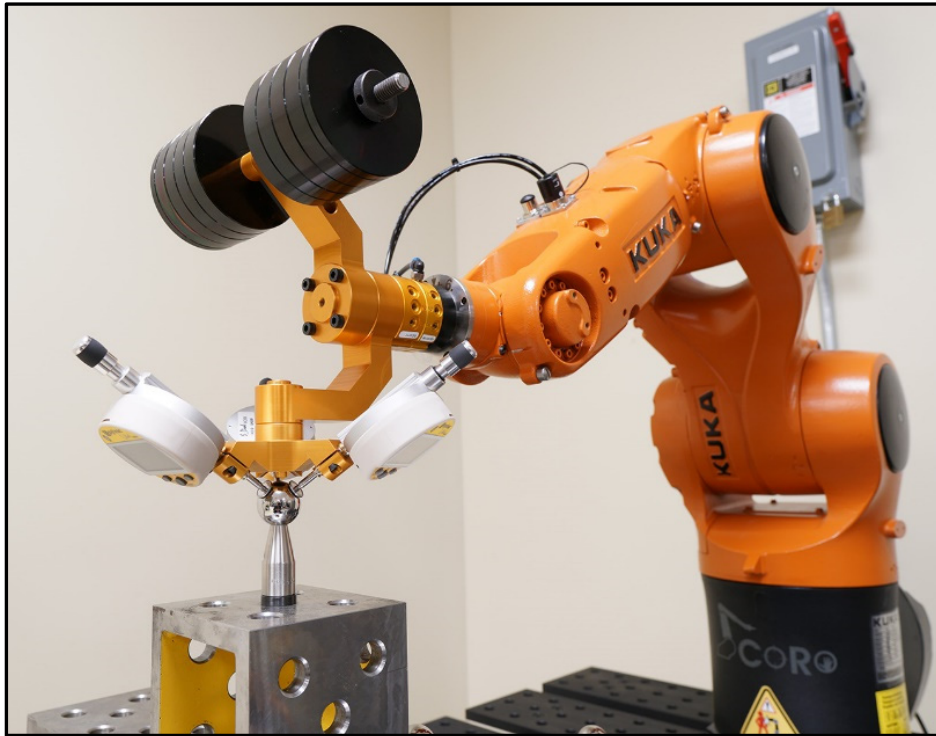


Figure 3.3 Appareil Trical

3.3 Identification des cinq positions dans le volume de travail

Une attention spéciale a été portée pour le choix des positions de pose lors des analyses de répétabilité. Selon la norme ISO 9283, on doit créer un cube désignant les points C1 à C8, tel que représenté à la figure 3.4. Ce cube doit être situé dans l'espace de travail du robot le plus susceptible d'être employé. On doit donc viser le plus grand volume possible et les arêtes doivent être parallèles aux axes du système de coordonnées de la base. Dans notre cas, on a deux robots à 6 axes, alors on choisit le cube de plan 1.

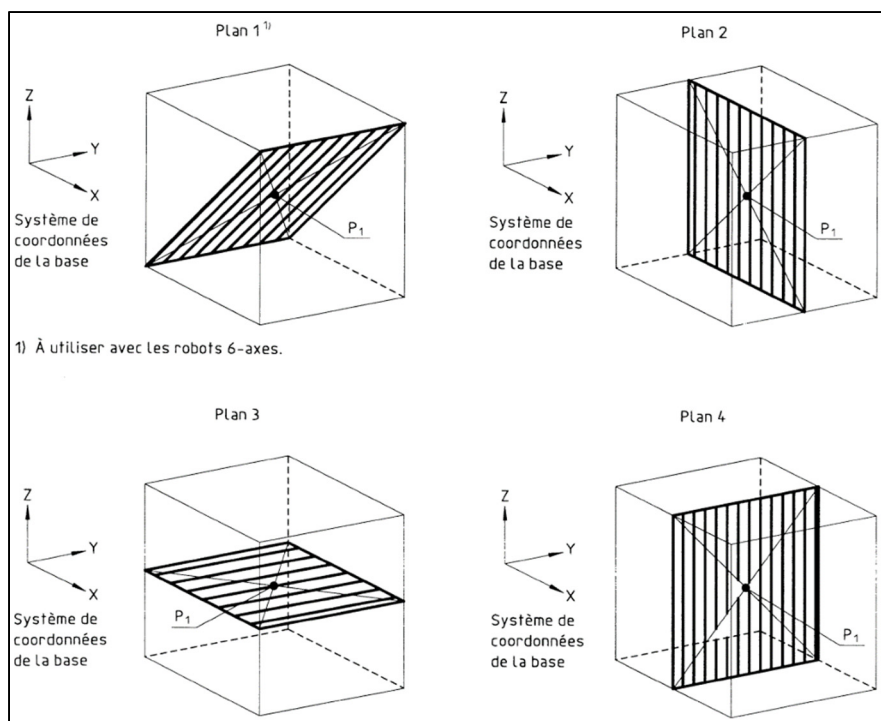


Figure 3.4 Cube inscrit dans l'espace de travail,
tiré d'ISO 9283(1998,p.14)

Après avoir inscrit le cube dans l'espace de travail, on va positionner cinq points (P1 à P5) de mesure sur les grandes diagonales du plan de mesure.

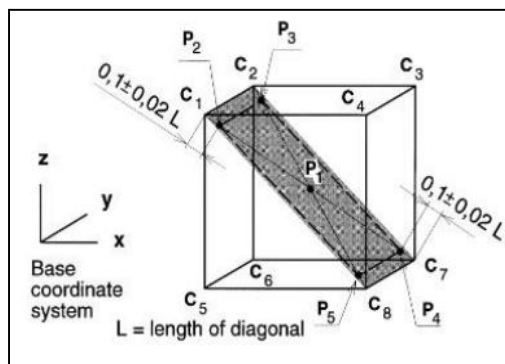


Figure 3.5 Cube de la norme ISO 9283,
tiré d'ISO 9283(1998,p.15)

Les cinq points (P1 à P5) sont situés dans le cube comme illustré dans la Figure 3.5, tandis que les points P2 à P5 sont situés à une distance de $0.1 \pm 0.02L$, où L est la longueur des diagonales, telles que représentées à la figure 3.5.

3.4 Sélection des facteurs

Un plan factoriel complet d'expériences (DOE) pour deux facteurs ($k = 2$) et trois niveaux ayant donné lieu à 9 essais a été utilisé au cours de ces expériences. Les deux principaux facteurs sont le chargement [kg] et de temps de réchauffement [heures]. Pour le facteur charge, trois niveaux sont considérés (faible, moyen et élevé (charge maximale)) en fonction de la charge utile maximale du robot testé. Le tableau 3.1 résume le plan expérimental utilisé dans ce test. Le test est répété 300 fois dans les cinq (5) positions (P1 à P5) dans l'espace de travail. Lors de chaque répétition, les réponses de sortie, à savoir les écarts de position dans les directions X, Y et Z, ont été mesurées à l'aide du Trical. Cet appareil fournit l'écart de position qui est défini comme la différence entre la pose atteinte (pose réelle) et la pose désirée.

Tableau 3.1 DOE avec deux facteurs et trois niveaux

Facteurs	Type	Niveaux		
		Low	Medium	High
Charge	Fanuc	1.5 kg	3.5 kg	7.0 kg
	Kuka	1.5 kg	3.0 kg	6.0 kg
Préchauffe	Fanuc	à froid	2 heures	4 heures
	Kuka			

Les deux Tableaux 3.2 et 3.3 montrent les charges (centre de gravité) et les inerties des deux robots FANUC et KUKA dans les différentes conditions.

Tableau 3.2 Les paramètres de la charge du robot
KUKA KR6 R700 Sixx

#	Charge (kg)	Pré-chauffe (heures)	Centre X (mm)	Centre Y (mm)	Centre Z (mm)
1	1.5	0	-13	-32	88
2	1.5	2			
3	1.5	4			
4	3	0	12	29	111
5	3	2			
6	3	4			
7	6	0	14	34	98
8	6	2			
9	6	4			

Tableau 3.3 Les paramètres du robot FANUC LR Mate 200iD

#	Charge (kg)	Pré-chauffe (heures)	Centre X (mm)	Centre Y (mm)	Centre Z (mm)
1	1.5	0	-24	-24	88
2	1.5	2			
3	1.5	4			
4	3.5	0	-28	-28	114
5	3.5	2			
6	3.5	4			
7	7	0	-45	-45	122
8	7	2			
9	7	4			

CHAPITRE 4

RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Introduction

La mesure a été réalisée sur cinq (5) positions sélectionnées (P_1, \dots, P_5) tel qu'illustré à la figure 4.1 et dans la vidéo https://youtu.be/hYueiQNrM_M. Pour chaque position, la distance euclidienne entre la position théorique (telle que programmée) et la position réelle (telle que mesurée) représente l'erreur en position. Les figures 4.2 et 4.3 montrent les mesures de ces distances euclidiennes D_j mesurées pour chaque position programmée et le barycentre des positions atteintes. L'indice $j = 1, \dots, n$ indique la répétition (dans notre cas, $n = 300$ et aucune donnée n'a été écartée).

Selon la norme ISO 9283, la distance euclidienne doit être calculée comme suit :

$$D_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2} \quad (4.1)$$

où $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ sont les coordonnées du barycentre du nuage de points obtenus pour la même pose répétée n fois.

Pour une pose donnée i ($1, 2, \dots, 5$), la répétabilité RP s'exprime par :

$$RP_i = \bar{D} + 3S_i \quad (4.2)$$

où S_i est l'écart type des variations et \bar{D} la moyenne arithmétique des distances euclidiennes pour une position donnée.



Figure 4.1 Installation virtuelle avec le robot KUKA et les 5 positions choisies

4.2 Analyse préliminaire

Les figures 4.2 à 4.5 et les tableaux 4.1 et 4.2 montrent que les deux robots se comportent globalement de la même manière ; toutes les courbes obtenues suivent les mêmes formes. Les dispersions les plus mauvaises sont présentées à froid (figures 4.2a, 4.2b, 4.2c, 4.3a, 4.3b et 4.3c). La dispersion atteint des valeurs allant jusqu'à 0,27 mm et 0,15 mm pour les robots FANUC et KUKA, respectivement. Ces courbes montrent que le niveau de dispersion diminue rapidement (jusqu'à la 80^e répétition environ) pour atteindre la valeur la plus basse, puis augmente légèrement par la suite.

Après 2 h et 4 h d'échauffement, les figures 4.2d à 4.2i et 4.3d à 4.3i montrent que les écarts sont améliorés pour atteindre des valeurs inférieures à 0,005 mm. Les figures 4.2 et 4.3 montrent également que la dispersion est fortement affectée par le chargement pendant la période d'état froid. Cependant, cet effet disparaît progressivement au fil du temps, en particulier lorsque le robot atteint la période de stabilité thermique.

Les figures 4.4 et 4.5 montrent que les deux robots sont affectés par le temps de réchauffement par rapport au poids.

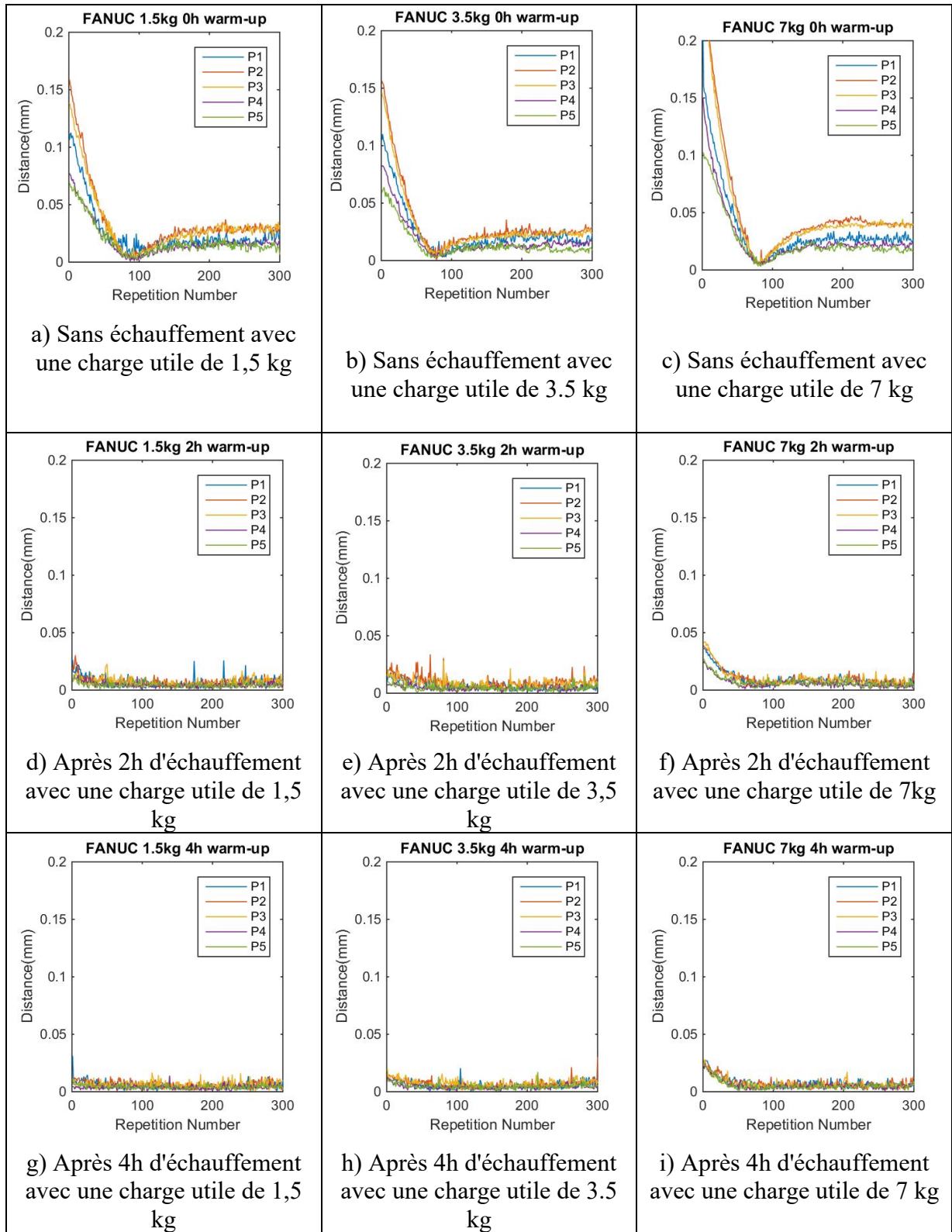


Figure 4.2 Distance entre la pose atteinte et le barycentre des poses obtenues pour le robot FANUC pour les 300 répétitions aux cinq positions sélectionnées.

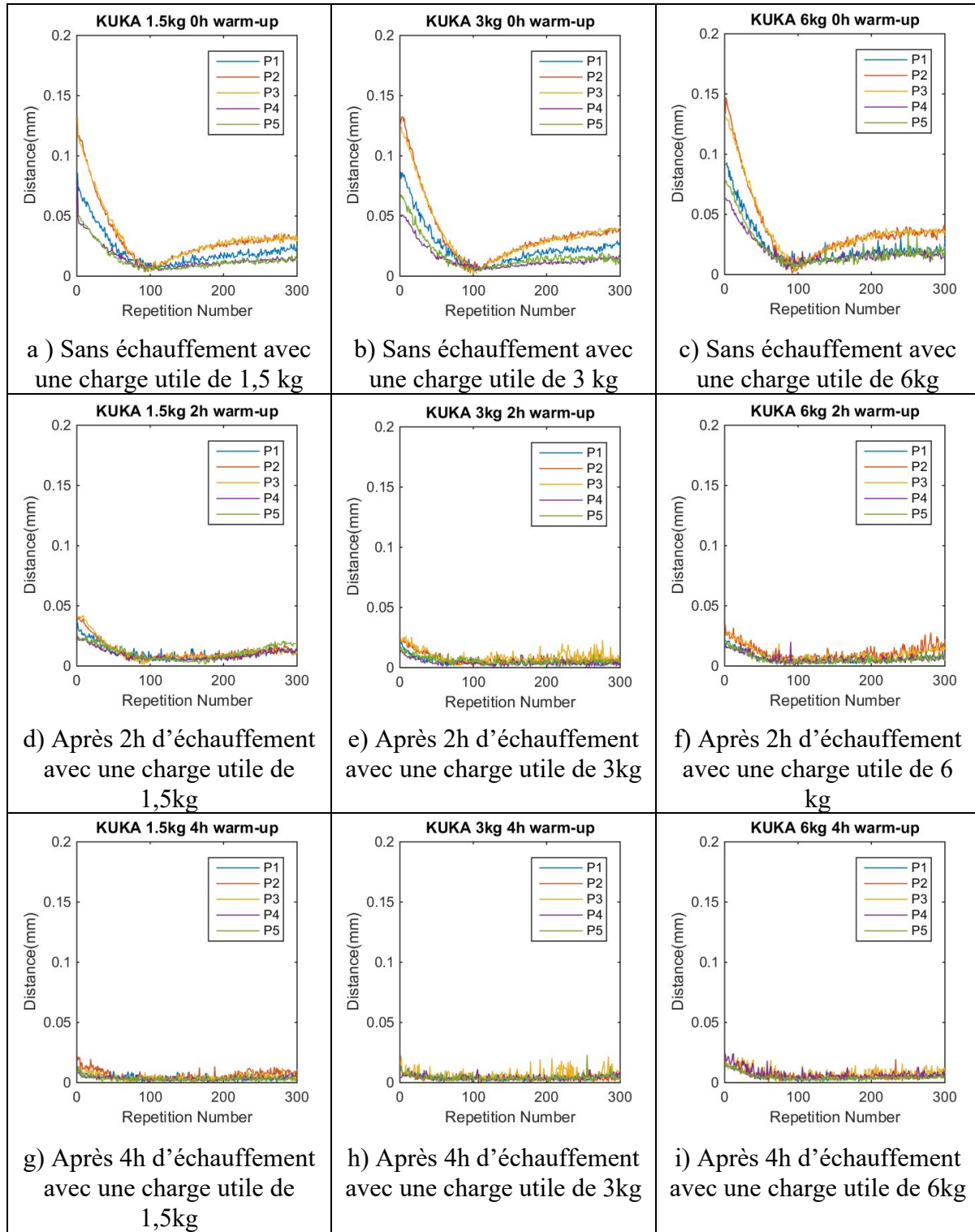


Figure 4.3 Distance entre la pose atteinte et le barycentre des poses obtenues pour le robot KUKA pour les 300 répétitions aux cinq positions sélectionnées

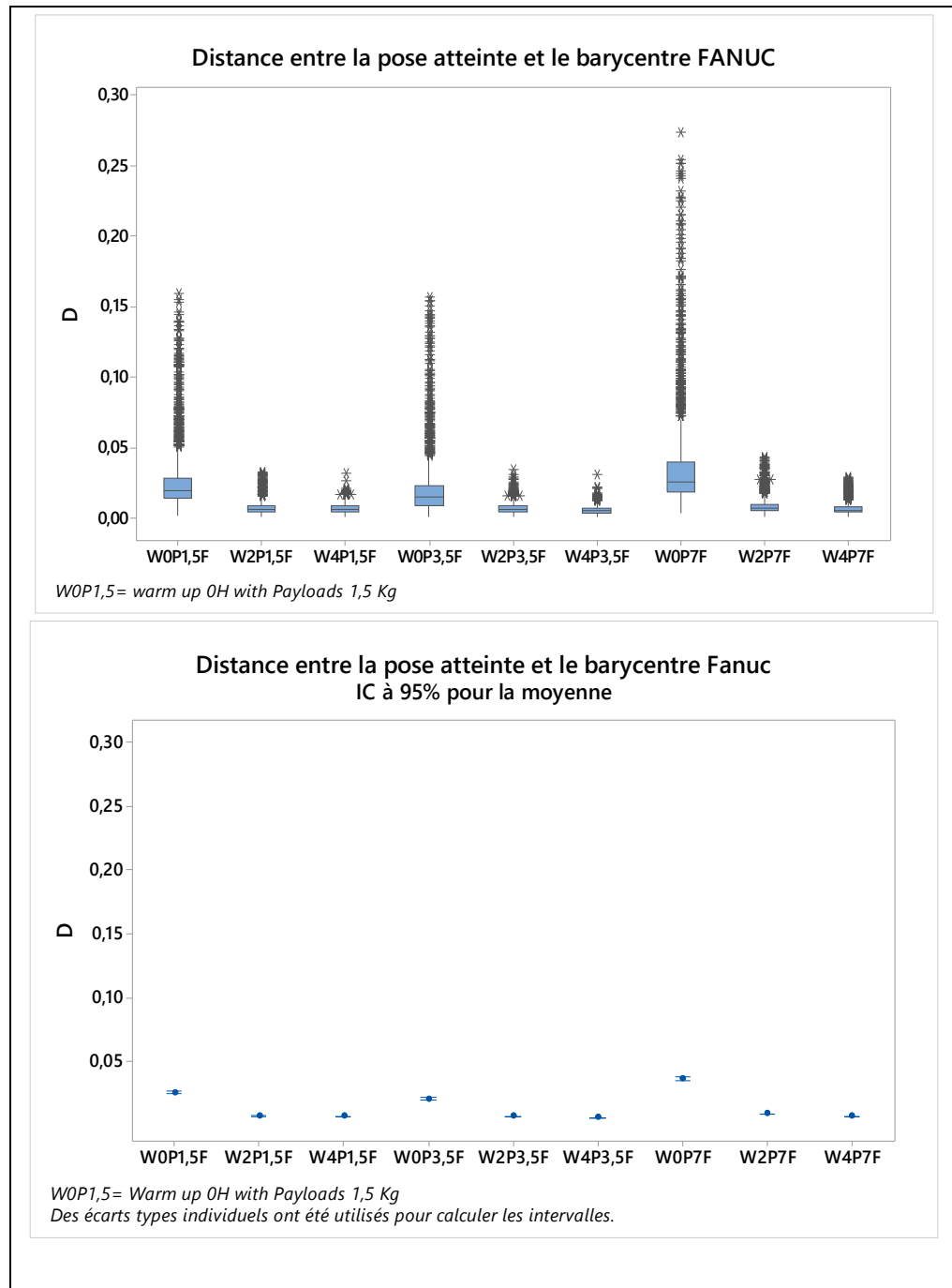


Figure 4.4 Intervalles de confiance (pour les moyennes)
et boîte à moustaches de la distance D_j pour
le robot FANUC pour les 300 répétitions aux cinq positions sélectionnées

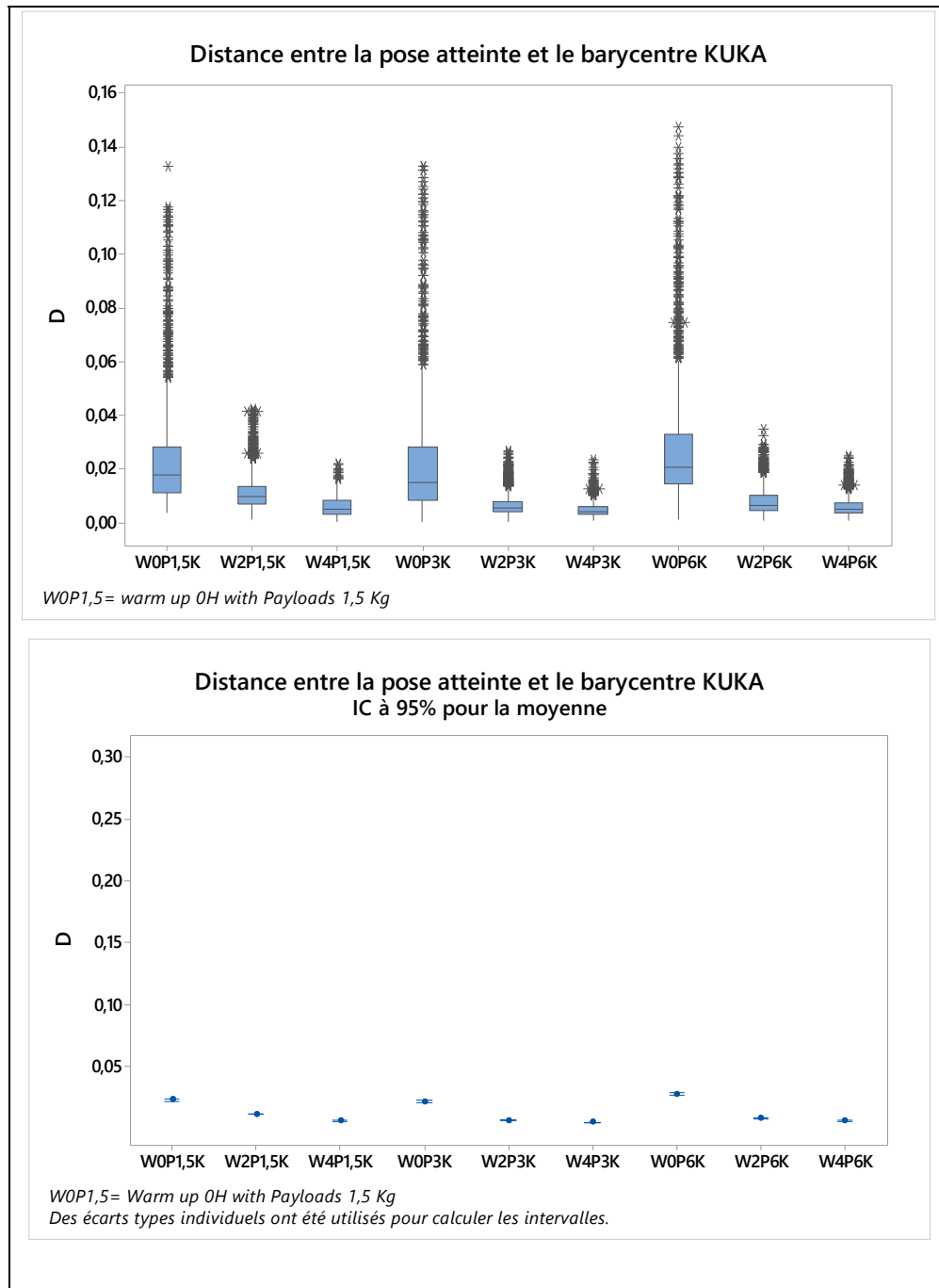


Figure 4.5 Intervalles de confiance (pour les moyennes) et boîte à moustaches de la distance D_j pour le robot KUKA pour les 300 répétitions aux cinq positions sélectionnées

Tableau 4.1 Récapitulatif de la distance $D[mm]$ pour le robot FANUC

FANUC									
V\C	W0P1.5	W2P1.5	W4P1.5	W0P3.5	W2P3.5	W4P3.5	W0P7	W2P7	W4P7F
Minimum	0.004	0.002	0.004	0.004	0.003	0.003	0.005	0.003	0.003
Moyenne	0.026	0.006	0.007	0.099	0.007	0.006	0.038	0.008	0.006
Écart type	0.021	0.002	0.001	0.017	0.002	0.002	0.034	0.005	0.004
Médiane	0.021	0.005	0.007	0.015	0.006	0.005	0.029	0.007	0.005
Maximum	0.110	0.016	0.016	0.095	0.016	0.013	0.198	0.034	0.025

Tableau 4.2 Récapitulatif de la distance $D[mm]$ pour le robot KUKA

KUKA									
V\C	W0P1.5	W2P1.5	W4P1.5	W0P3	W2P3	W4P3	W0P6	W2P6	W4P6
Minimum	0.006	0.004	0.002	0.004	0.003	0.002	0.006	0.003	0.002
Moyenne	0.023	0.011	0.006	0.021	0.006	0.004	0.027	0.008	0.006
Écart type	0.016	0.006	0.002	0.015	0.003	0.002	0.02	0.004	0.003
Médiane	0.019	0.009	0.005	0.083	0.005	0.004	0.023	0.007	0.005
Maximum	0.092	0.032	0.015	0.077	0.019	0.012	0.102	0.023	0.018

Les figures 4.6 à 4.9 montrent le niveau de répétabilité (calculée selon l'équation (4.2)) en fonction du chargement et de temps de réchauffement pour les cinq positions sélectionnées pour les robots FANUC et KUKA, respectivement. Les résultats montrent que la répétabilité du robot FANUC est plus affectée par le chargement que le robot KUKA. Cependant, la séquence de temps de réchauffement a un effet similaire sur la répétabilité du robot testé. Les figures 4.6 à 4.9 montrent également que la répétabilité dégrade (augmente) à mesure que le chargement augmente et s'améliore (diminue) à mesure que la période de temps de réchauffement augmente. Elle se stabilise autour de sa valeur la plus basse une fois la stabilité thermique est atteinte. De plus, la période d'état froid et les positions P2 et P3 offrent la pire répétabilité pour les deux robots.

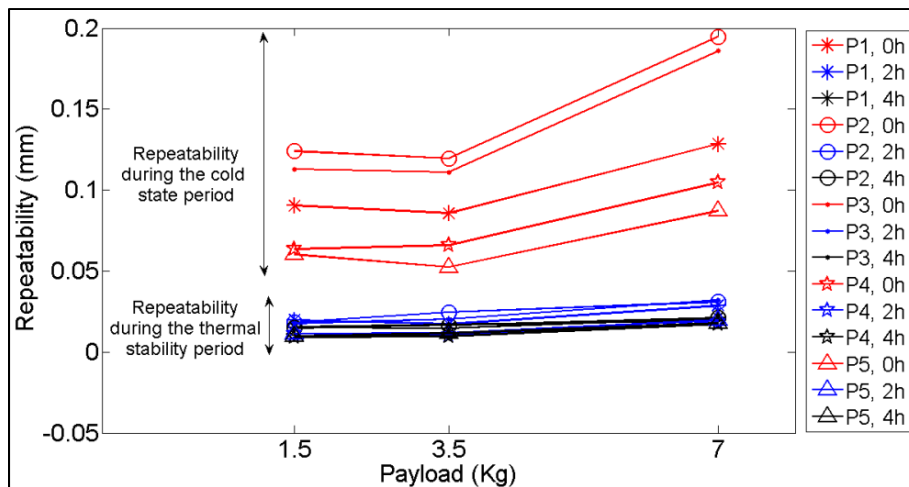


Figure 4.6 Répétabilité en fonction du chargement du robot FANUC

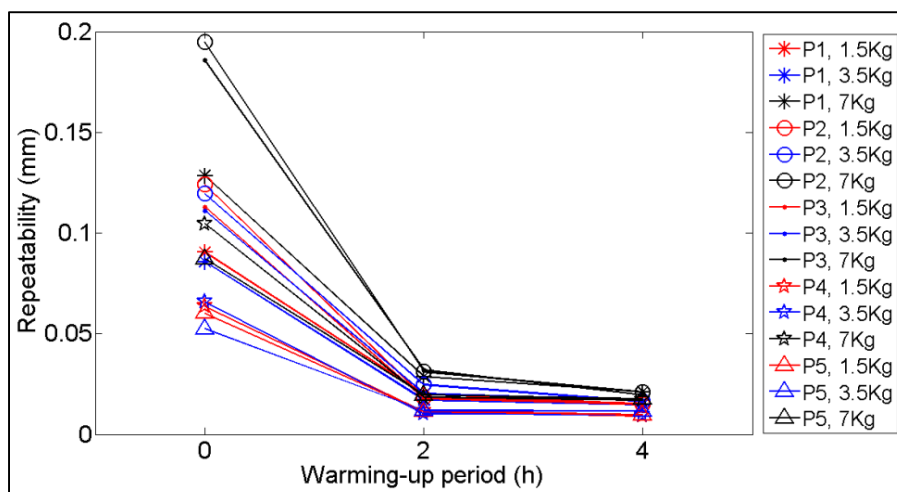


Figure 4.7 Répétabilité en fonction de temps de réchauffement du robot FANUC

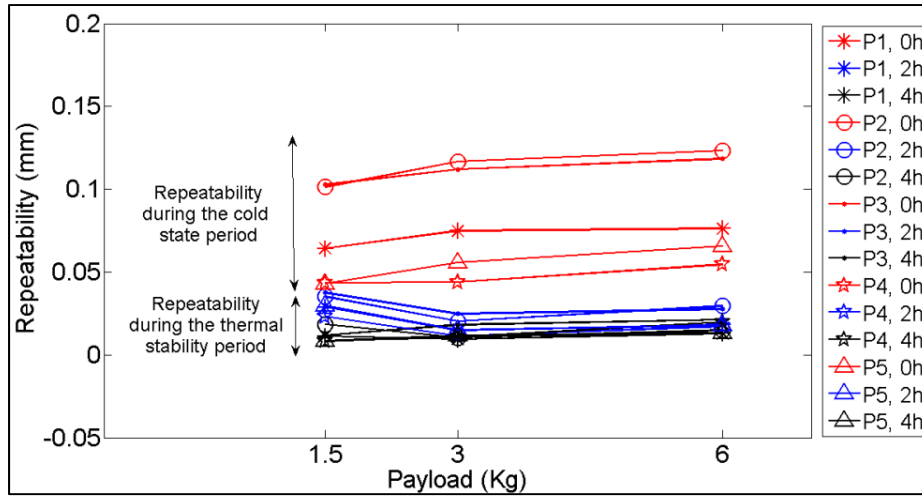


Figure 4.8 Répétabilité en fonction de chargement du robot KUKA

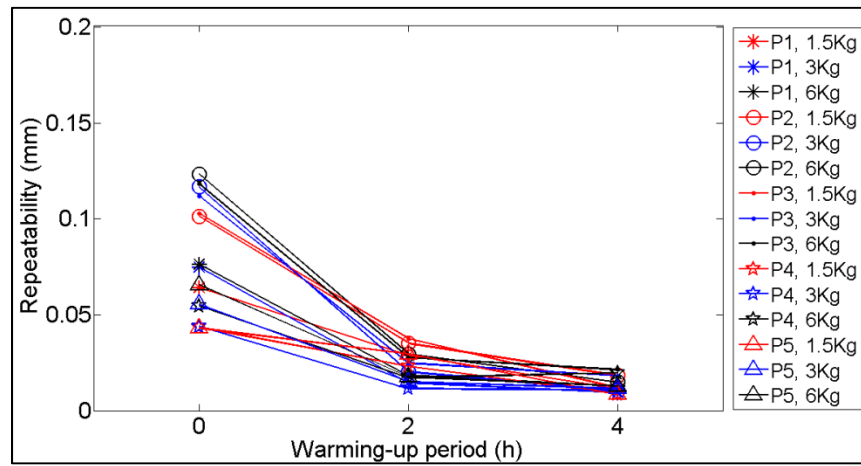


Figure 4.9 Répétabilité en fonction de temps de réchauffement du robot KUKA

Les figures 4.10a, 4.10b, 4.10c, 4.13a, 4.13b et 4.13c montrent que le facteur de temps de réchauffement affecte la répétabilité beaucoup plus que le facteur de poids. Les résultats montrent aussi que la position cible dans l'espace de travail a également un effet sur la répétabilité. Les pires valeurs de répétabilité ont été observées aux positions P_1 , P_2 et P_3 pour les deux robots. Les figures 4.11 et 4.12 confirment cette analyse.

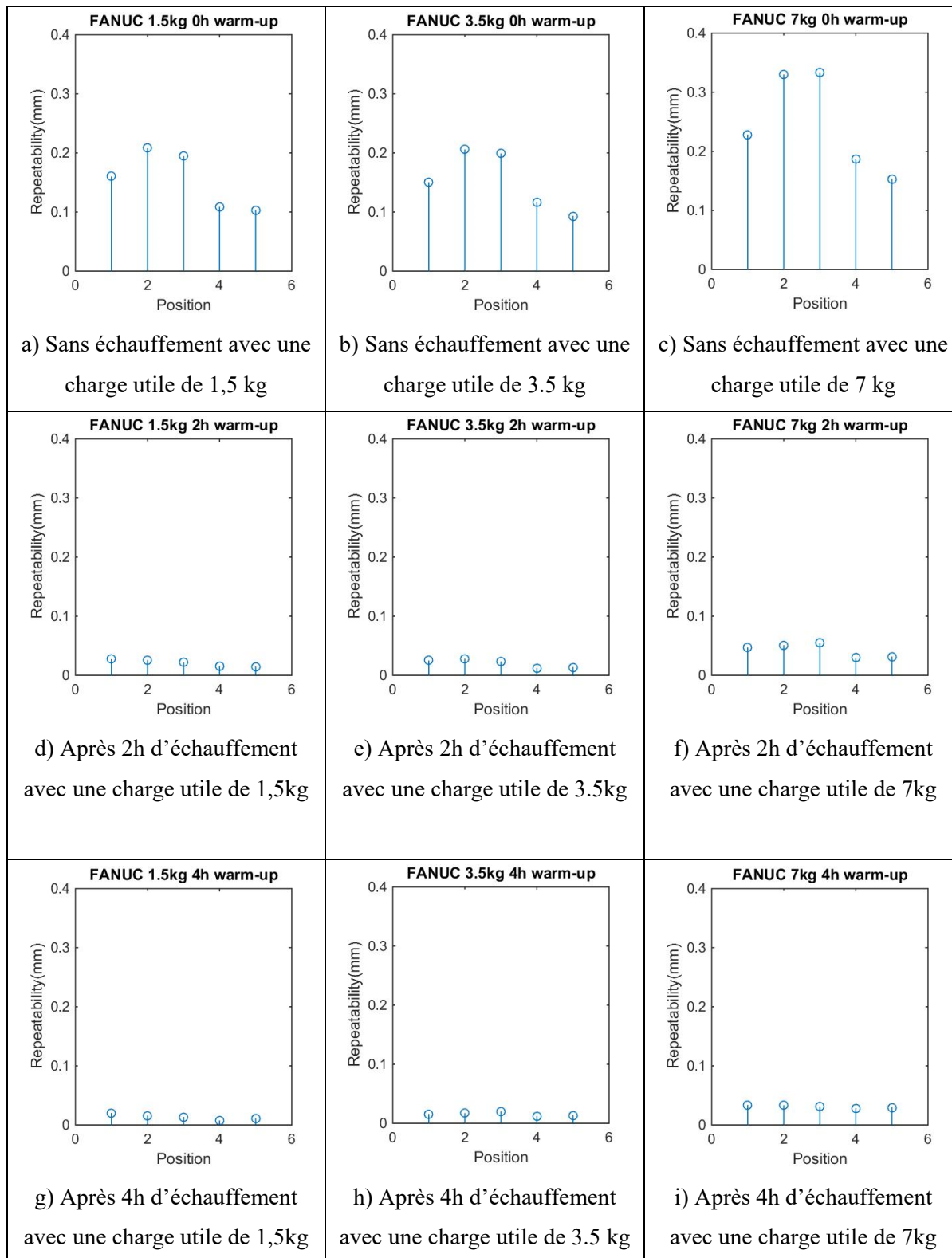


Figure 4.10 Répétabilité du robot FANUC pour les cinq positions sélectionnées

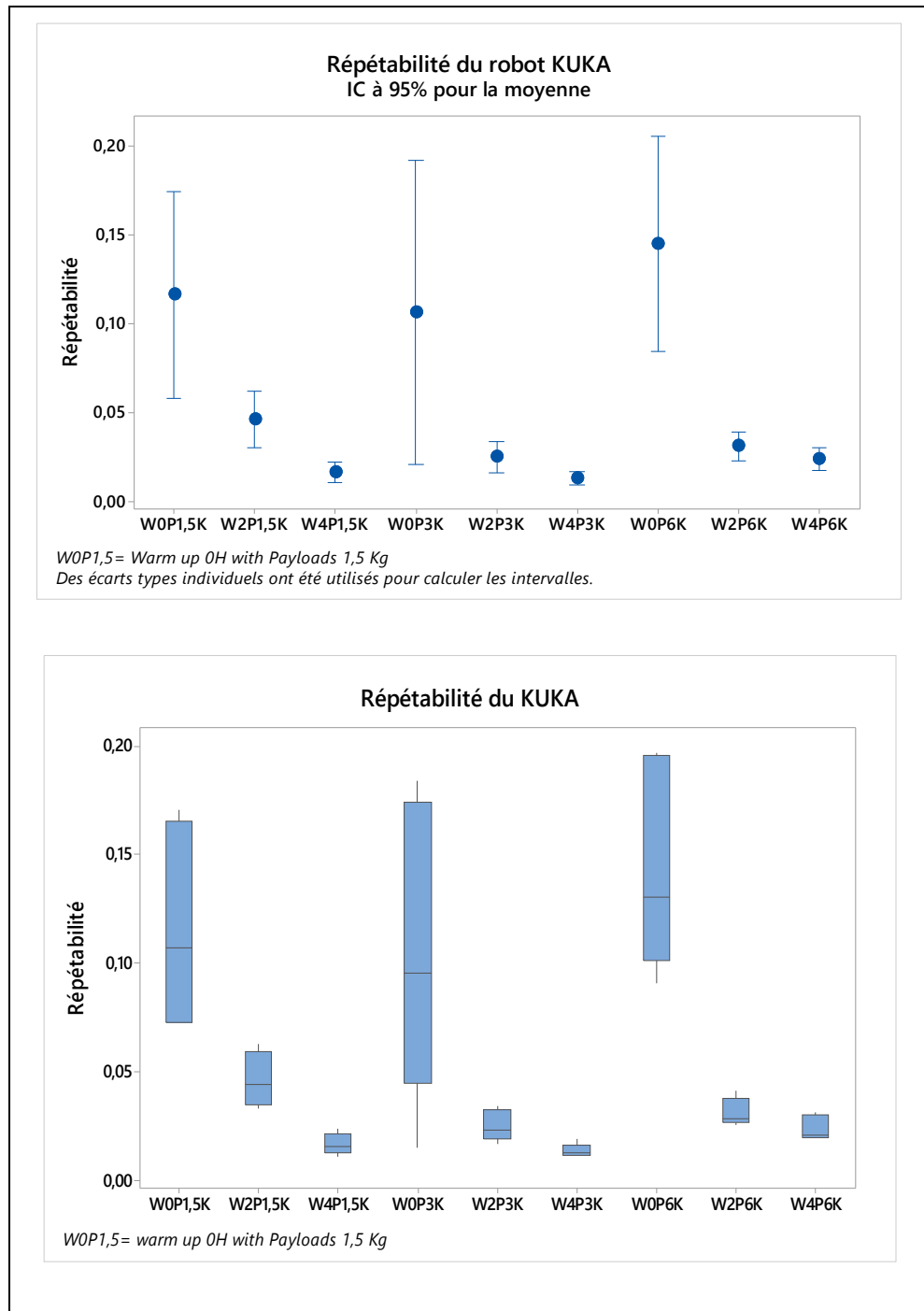


Figure 4.11 Intervalles de confiance (moyenne) et boîte à moustache de la répétabilité du robot KUKA

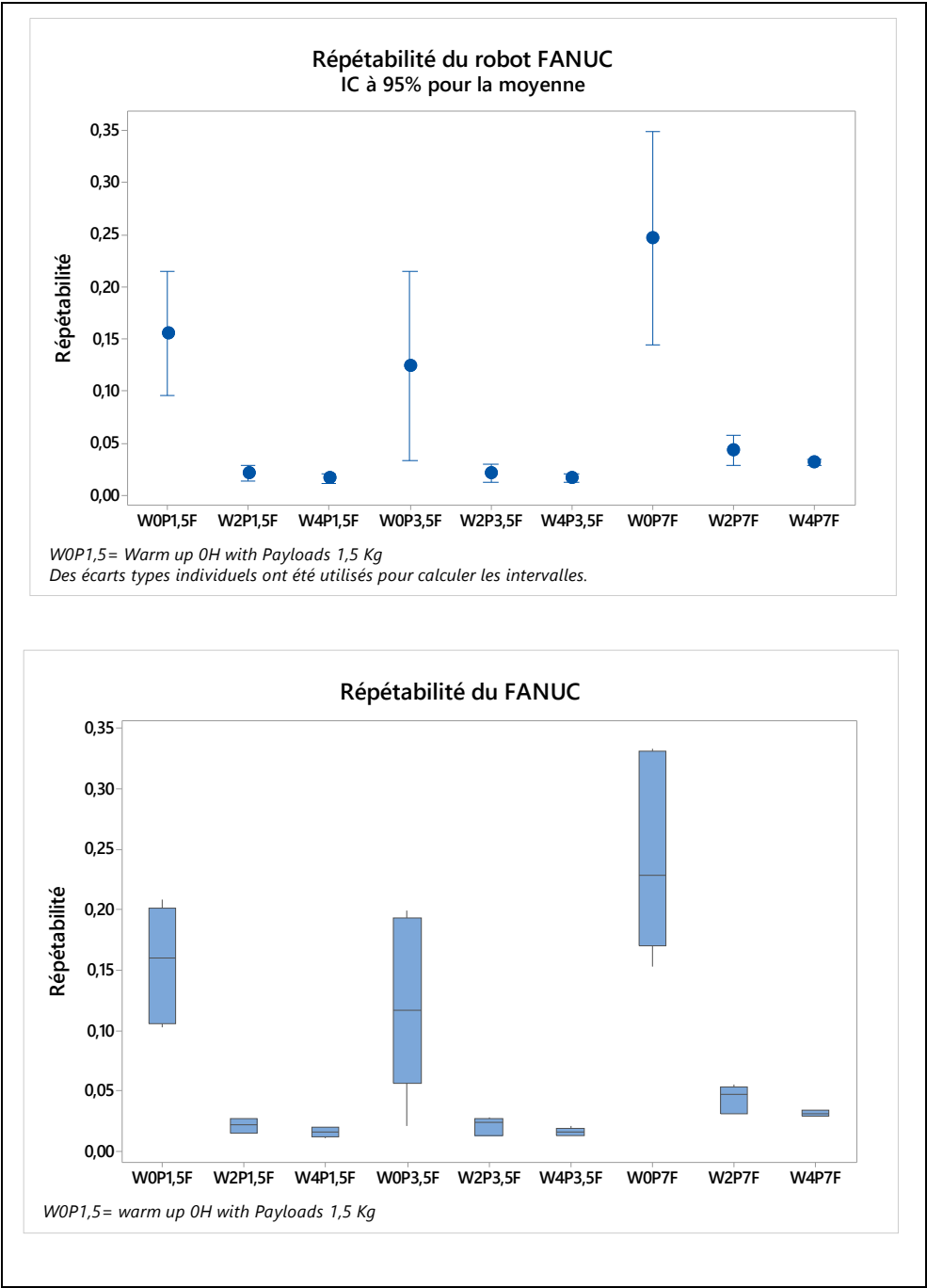


Figure 4.12 Intervalles de confiance (moyenne) et boîtes à moustache de la répétabilité du robot FANUC

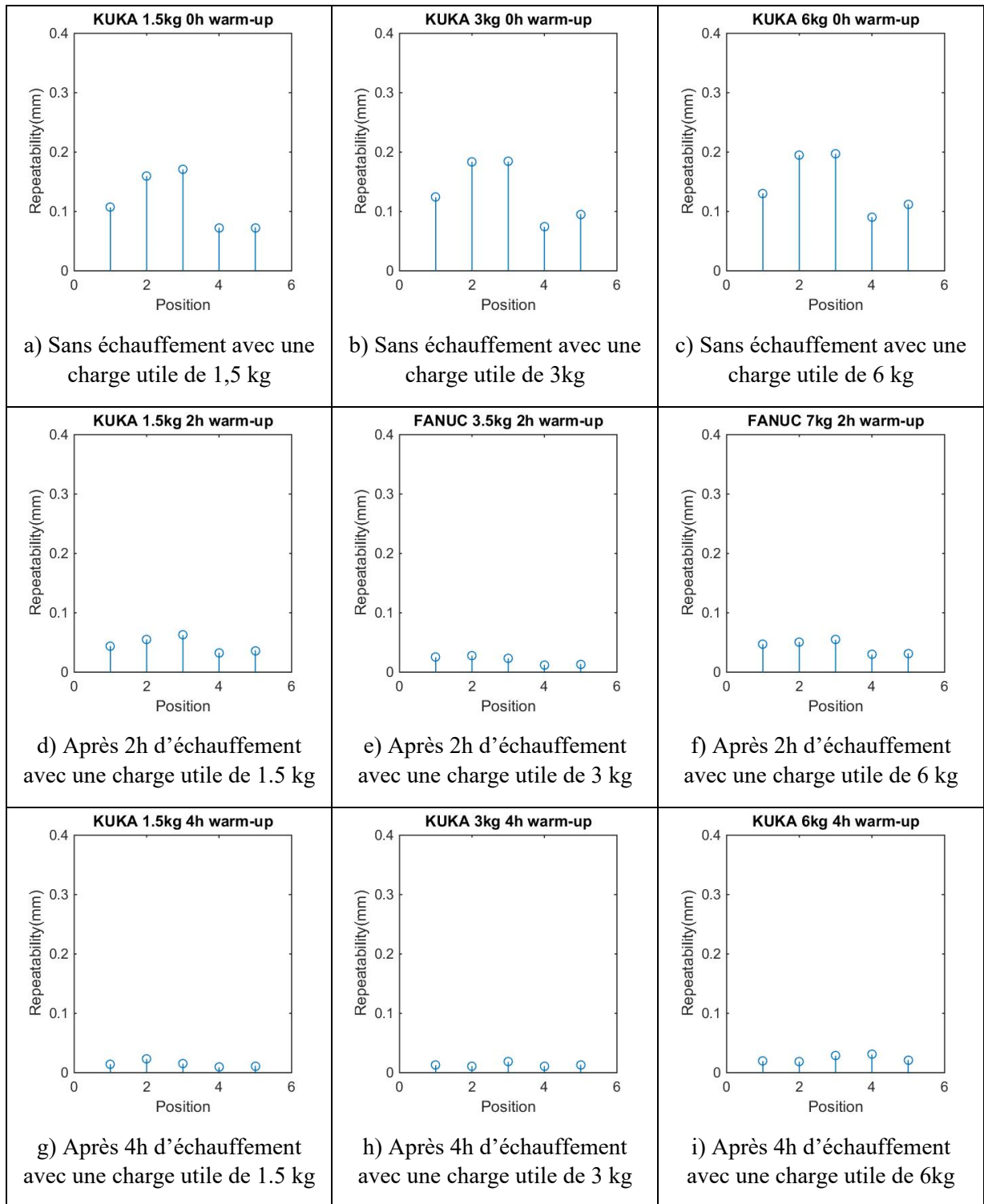


Figure 4.13 Répétabilité du robot KUKA pour les cinq positions sélectionnées

4.3 Analyse statistique descriptive

Pour donner suite à cette première analyse où on a étudié chaque robot seul et identifié les effets de deux facteurs : temps de réchauffe et chargement sur l'erreur (distance entre la position atteinte et le barycentre) ainsi que la répétabilité, nous poursuivons en examinant les comportements des deux robots dans différentes conditions en examinant le facteur de flexibilité. Ce dernier facteur est plutôt qualitatif et désigne l'effet si les bras du robot sont déployés (flexible) ou pas (rigide).

D'après l'analyse récapitulative et le test de normalité (test d'Anderson-Darling) sur la répétabilité du robot FANUC et KUKA avec Minitab® on voit sur les deux Tableaux 4.3 et 4.4 les résultats suivants :

- Le comportement de l'erreur de répétabilité des deux robots ne suit pas une loi normale. Le test de normalité d'Anderson-Darling affiche pour le robot FANUC un $P_value = 0.009$ et pour le robot KUKA un $P_value = 0.026$, deux valeurs en dessous du seuil significatif de 0.05;
- On constate que l'intervalle de confiance (au niveau de confiance de 95%) pour l'écart type est de [0.0555; 0.1574] pour le robot FANUC, par contre, pour le robot KUKA [0.0339; 0.0962]. Par conséquent, on peut constater que la répétabilité de robot KUKA est, globalement, légèrement meilleure (mais pas significativement) que le robot FANUC;
- On constate également que la moyenne de la répétabilité de robot FANUC est de 0.074 mm et pour KUKA est 0.058mm (IC de 95 % égal à 0.011 mm et 0.137 mm pour FANUC, et pour KUKA 0.019 mm et 0.096 mm);

Rapport : σ_1/σ_2 Les méthodes de Bonett et de Levene sont valides pour toute loi de distribution continue. Test Hypothèse nulle $H_0 : \sigma_1^2 / \sigma_2^2 = 1$ Hypothèse alternative $H_1 : \sigma_1^2 / \sigma_2^2 \neq 1$ Seuil de signification $\alpha = 0.05$				
Méthode	Statistique du test	DL1	DL2	Valeur de P
Bonett	0.71	1		0.399
Levene	0.39	1	16	0.542
Statistiques descriptives				
Variable	N	EC TYP	Variance	IC à 95% pour σ^2
Robot FANUC	9	0.082	0.007	(0.001;0.059)
Robot KUKA	9	0.050	0.003	(0.001;0.012)
Rapport des Variances				
Rapport estimé		IC à 95% pour le rapport utilisant Bonett		IC à 95% pour le rapport utilisant Levene
2.67486		(0.142;19.306)		(0.005;66.107)

4.4 Analyse ANOVA

Pour évaluer l'effet du temps de réchauffe et du chargement sur la répétabilité, un test ANOVA (avec niveau de confiance de 95%) a été appliqué, puis la contribution en pourcentage de chaque facteur étudié dans le test a été calculée.

Les figures 4.14 et 4.15 montrent respectivement le pourcentage de contribution des robots FANUC et KUKA. Il ressort de nos expériences que la contribution de chaque facteur varie d'un robot à l'autre. Le robot KUKA est principalement affecté par le temps de *réchauffe* avec un pourcentage de contribution allant de 60,4% à 98,14%.

Par contre le pourcentage de contribution sur l'effet du facteur de chargement et l'interaction de Temps de réchauffe & chargement sont dans certains cas presque négligeables sur le robot KUKA, ils varient entre 1,5% -24,19% et 0% -15,4% respectivement (Fig.4.15).

Cependant, par rapport au robot FANUC, les résultats montrent que le pourcentage de contributions de chargement est plus important, ils varient entre 34% et 49,7%. L'effet d'interaction de chargement et de réchauffe se retrouve également significatif, leur pourcentage de contribution varie entre 11,3% et 23,5%. Par ailleurs, le pourcentage de contribution de Temps de réchauffe reste le plus important, il varie entre 26,7% et 53% (Fig4.14).

Comme présenté ci-dessus, les deux robots testés par différentes comportent liés au pourcentage de contribution de la sensibilité de chargement.

Cette réponse peut s'expliquer par la 'mauvaise rigidité' du robot FANUC, qui induit une déflexion sur l'effecteur qui est principalement affectée par le changement de la charge utile. Cela décrit la forte dépendance de la répétabilité au TCP et de la rigidité. La mauvaise rigidité du robot FANUC peut être responsable aussi du pourcentage élevé de la contribution de la charge utile dans les positions P2, P3 et P4 (figure 4.9).

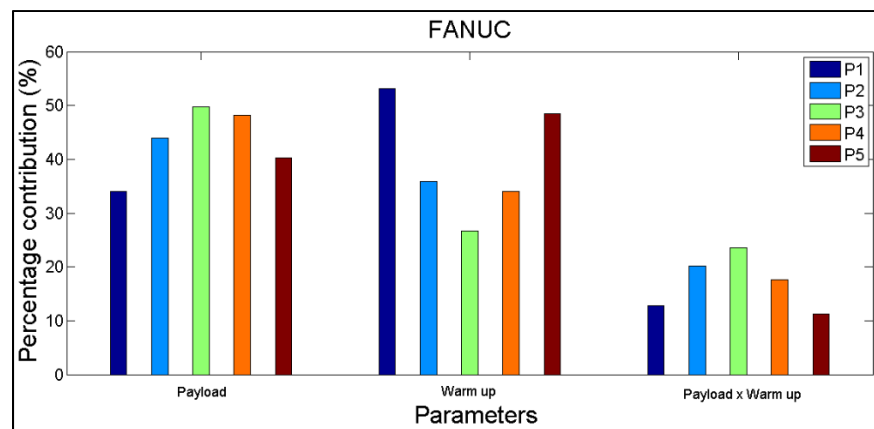


Figure 4.14 Contributions en pourcentage du temps de réchauffe et du chargement sur la répétabilité du robot FANUC

Les Tableaux 4.5 et 4.6 montrent les facteurs (temps de réchauffe, chargement, flexibilité) qui seront analysés en utilisant un DOE Factoriel complet et leurs niveaux pour les robots FANUC et KUKA respectivement.

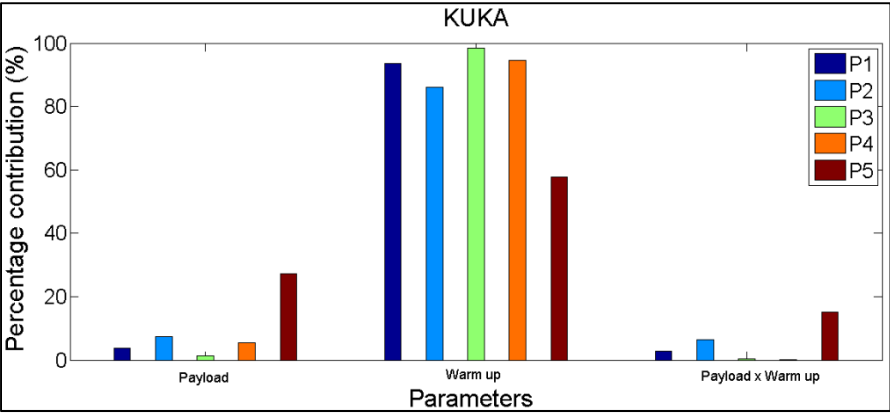


Figure 4.15 Contributions en pourcentage du temps de réchauffe et du chargement sur la répétabilité du robot KUKA

Tableau 4.5 Informations sur les facteurs du robot FANUC

Facteur	Niveaux	Valeurs
Temps de réchauffe	3	0;2;4
Chargement	3	1.5;3.5;7
Flexibilité	3	-1;0;1

Tableau 4.6 Informations sur les facteurs du robot KUKA

Facteur	Niveaux	Valeurs
Temps de réchauffe	3	0;2;4
Chargement	3	1.5;3;6
Flexibilité	3	-1;0;1

On a choisi trois positions (1, 2 et 5) (voir Figure 4.16) pour identifier l’effet du facteur de la flexibilité avec les autres facteurs (temps de réchauffe, chargement).

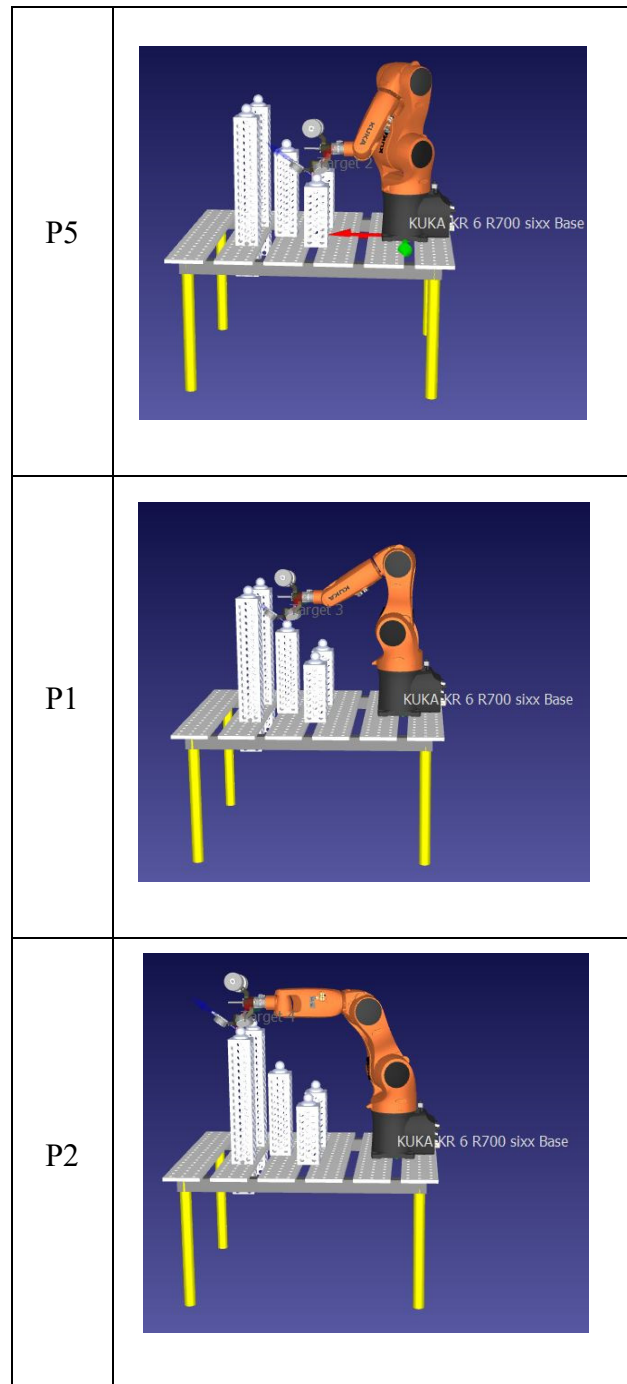


Figure 4.16 Maquette virtuelle du robot KUKA avec les trois positions choisies

Les tableaux 4.7 et 4.8 montrent l'analyse de variance de ces facteurs et leur interaction (par méthode ANOVA) pour les deux robot FANUC et KUKA respectivement. Nous allons commencer par les termes linéaires et termes non linéaires (croisé). Uniquement les termes significatifs ont été retenus dans l'analyse.

Le tableau 4.7 montre l'analyse de variance de ces facteurs et leurs interactions (par la méthode ANOVA) pour le robot FANUC. On voit que les valeurs de P_Value pour temps de réchauffe, flexibilité et chargement sont de 0, 0.005 et 0.001 respectivement c'est-à-dire que les trois facteurs sont significatifs. Les valeurs P de l'interaction entre chargement et temps de réchauffe et entre temps de réchauffe et flexibilité sont 0.012 et 0.006, respectivement. Ces valeurs sont, elles aussi, significatives.

Le Tableau 4.8 nous montre la réaction du robot KUKA avec les facteurs choisis et leur interaction (ANOVA). La valeur temps de réchauffe et flexibilité est 0 et 0.012 respectivement donc on peut dire que les deux facteurs sont significatifs. Ce tableau aussi nous montre que les interactions à deux facteurs les plus importants sont le temps de réchauffe et la flexibilité comme le robot FANUC avec une valeur de p égale à 0.021.

Tableau 4.7 ANOVA pour les positions 1, 2 et 5
du robot FANUC

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	14	0.175162	0.012512	18.52	0.000
Linéaires	6	0.144674	0.024112	35.69	0.000
Chargement	2	0.015935	0.007967	11.79	0.001
Temps de réchauffe	2	0.117412	0.058706	86.89	0.000
Flexibilité	2	0.011327	0.005664	8.38	0.005
Interactions à 2 facteurs(s)	8	0.030488	0.003811	5.64	0.004
Chargement*Temps de réchauffe	4	0.013931	0.003483	5.16	0.012
Temps de réchauffe*Flexibility	4	0.016556	0.004139	6.13	0.006
Erreur	12	0.008108	0.000676		
Total	26	0.183269			

Tableau 4.8 ANOVA pour les trois positions
du robot KUKA

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	8	0.066778	0.008347	15.15	0.000
Linéaires	4	0.058476	0.014619	26.53	0.000
Temps de réchauffe	2	0.052141	0.026070	47.31	0.000
Flexibility	2	0.006335	0.003167	5.75	0.012
Interactions à 2 facteurs(s)	4	0.008302	0.002076	3.77	0.021
Temps de réchauffe*Flexibility	4	0.008302	0.002076	3.77	0.021
Erreur	18	0.009920	0.000551		
Total	26	0.076697			

Les diagrammes d'interaction dans les figures 4.17 et 4.18 pour les deux robots FANUC et KUKA respectivement, suggèrent que le temps de réchauffe peut avoir un fort effet par rapport au chargement et la flexibilité. On peut voir aussi qu'il y a un phénomène non linéaire dans les facteurs temps de réchauffe et chargement pour le robot FANUC et aussi un phénomène non linéaire dans les trois facteurs temps de réchauffe, chargement et flexibilité pour le robot KUKA, on peut confirmer cette réponse par des tests sur d'autres niveaux.

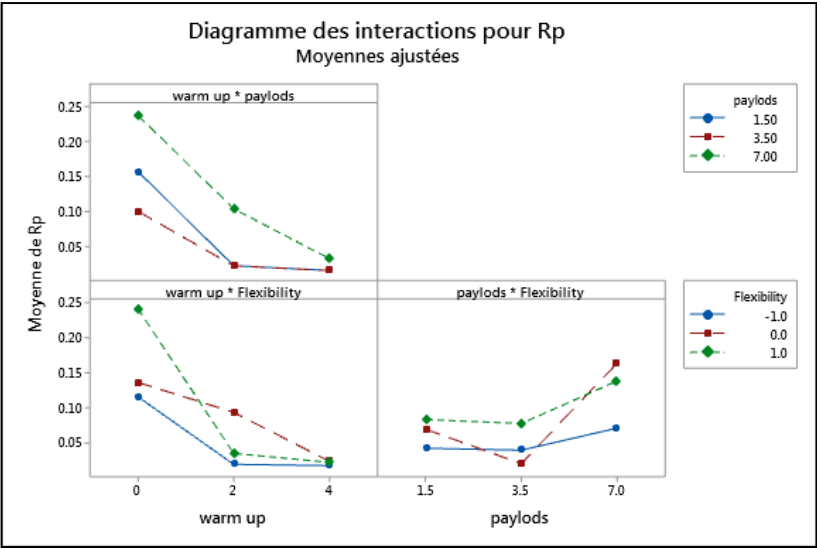


Figure 4.17 Diagramme des interactions pour la répétabilité pour le robot FANUC

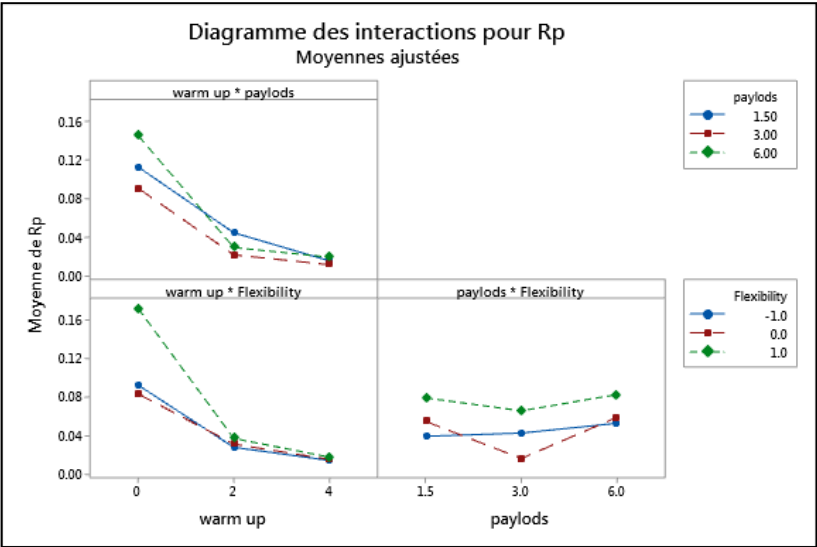


Figure 4.18 Diagramme des interactions pour la répétabilité pour le robot KUKA

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La répétabilité et l'exactitude constituent deux indices très importants pour la performance de robots. Plusieurs recherches et méthodes ont été développées dans ce domaine pour améliorer la précision de robots et estimer avec précision la pose finale.

La norme ISO 9283 (Robots manipulateurs industriels — Critères de performance et méthodes d'essai correspondantes) n'approuve qu'une seule méthode pour calculer la répétabilité et l'exactitude. De plus, les autres méthodes proposées par la communauté des chercheurs ne sont que des approches, néanmoins, elles peuvent être exploitées pour aider à modéliser la répétabilité. C'est ce que nous avons exploré dans ce mémoire.

Sur la base des résultats obtenus, les principales conclusions sont :

- Le niveau de dispersion diminue en fonction du temps (comportement asymptotique) pour atteindre sa valeur la plus faible, puis se stabilise à une valeur quasi constante;
- Les valeurs de répétabilité augmentent à mesure que le chargement augmente et diminuent à mesure que le temps de réchauffement augmente;
- La pire répétabilité a été obtenue à l'état froid en raison de l'instabilité thermique. Par conséquent, lorsqu'un niveau élevé de répétabilité est requis, il est suggéré de prolonger la période de réchauffement;
- La période de réchauffement est le facteur le plus important affectant le niveau de répétabilité.

Dans des travaux futurs, il serait intéressant de voir, la relation entre la configuration du robot (même pose avec différentes configurations) et répétabilité et d'étudier la relation entre la vitesse TCP et la répétabilité. Il pourrait également être intéressant de voir l'effet de ces facteurs

sur la précision absolue. En terminant, il serait aussi intéressant d'utiliser la méthode d'incertitude et essayer d'améliorer la norme ISO 9823.

Ces recommandations permettraient de comprendre les comportements des robots dans différentes conditions et d'améliorer les techniques de calcul de la répétabilité et la précision absolue.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abtahi, Mansour, Pendar Hodjat, Alasty Aria et Vossoughi, G.R., 2010, « Experimental kinematic calibration of parallel manipulators using a relative position error measurement system », *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 26, no. 6, pages 799-804,.
- Adam, KrzyzakJerzy, Sasiadek, 1989, « Identification of hammerstein systems by the hermite series estimate with application to flexible robot manipulators control », *IEEE International Conference on Control and Applications*, Jerusalem, Palestine, 1989.
- Agheli, Mahdi et Nategh, M. J., 2009, « Identifying the kinematic parameters of hexapod machine tool », *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, Vol. 3, No. 4 2009.
- Berg, J.O., 1992, « Robot accuracy: A matter of programming », *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 17, no. 4, pages 193-197.
- Besnard, S., Wisama, K., 1999, « Calibration of parallel robots using two inclinometers », *In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Detroit, USA, vol. 3, pages 1758-1763.
- Blaise, J., Bonev, I., Monsarrat, B. et Briot, S.; Lambert, Jason, M.; Perron, C., 2010, « Kinematic characterisation of hexapods for industry », *Industrial Robot: An International Journal*, vol 37, no. 1, pages 79-88..
- Bonev, I. et Noiseux, Y., 2020, *Notes de cours GPA546*.
- Borm, J., Menq, C., 1989, « Experimental study of observability of parameter errors in robot calibration », *International Conference on Robotics and Automation*, Scottsdale, AZ, 1989, vol. 1, pages. 587-592.
- Borm, J.-H., C.-H. Menq., 1991, « Determination of optimal measurement configurations for robot calibration based on observability measure », *The International Journal of Robotics Research*, vol. 10, no. 1, p. 51-63, Février 1991.
- Bouri, M. et Clavel, R., 2017, *Généralités robots sériels et parallèles*.
- Brethé, Jean-François et Dakyo, Brayima., 2002, « A Stochastic ellipsoid approach to repeatability modelisation of industrial manipulator robots », *Conference: Intelligent Robots and Systems, IEEE/RSJ International Conference*, vol. 2, pages. 1608-1613.

- Brethé, Jean-François, Vasselin Eric et Dakyo Brayima., 2005 «Determination of the repeatability of a kukarobot using the stochastic ellipsoid approach», *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation Barcelona*, Spain, Avril 2005, pages 4339-4344.
- Bringmann, B., Küng, A., Knapp, W., 2005, «A Measuring artefact for true 3d machine testing and calibration », *CIRP Annals*, Vol. 54, no. 1, 2005, Pages 471-474.
- Cong, Dacheng, Yu Dayong et Han Junwei., 2006, «Kinematic calibration of parallel robots using cmm», *6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Dalian, 2006, pages 8514-8518.
- Corbel, David, Nabat Vincent et Maurine Patrick., 2006, «Geometrical calibration of the high-speed robot par4 using a laser tracker», *12th IEEE International Conference, Methods and Models in Automation and Robotics*, dzydroje, Poland, August 2006, pages 687-692.
- Dandash, Diala, Brethé Jean-François et Vasselin Eric., 2010, «Modeling of the orientation repeatability for industrial manipulators», *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, October 2010, pages 2970-2975.
- Daney, David, Papegay Yves et Madeline Blaise., 2005, «Choosing measurement poses for robot calibration with the local convergence method and tabusearch», *The International Journal of Robotics Research*, juin 2005, vol.24, No.6, pages. 501-518.
- Demouveau, H., 2006, « Initiation a la modélisation et aux performances des robots ».
- Feng, J., Gao F., Zhao, X., 2011, « Calibration of a six-DOF parallel manipulator for chromosome dissection ». *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 226, pages. 1084-1096.
- Filion, Alexandre, Joubair Ahmed, Tahan Antoine et Bonev Ilian., 2018, « Robot calibration using a portable photogrammetry system », *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Montreal, Quebec, Canada, vol.49, pages 77-87.
- Galo, Mauricio, Hasegawa Júlio, Tommaselli Antonio et Imai Nilton., 2006, «Registration analysis and inner calibration of a three CCD multispectral frame camera», *EUROCOW – International Calibration and Orientation Workshop*, Janvier 2006, 10.13140/2.1.4827.3922.

- Gaudreault Martin, Joubair Ahmed et Bonev Ilian., 2018, «Self-calibration of an industrial robot using a novel affordable 3D measuring device», *Sensors (Basel)*, October.
- Georges Pagis., 2015, « Augmentation de la taille de l'espace de travail opérationnel des robots parallèles en traversant les singularités de Type 2 : Génération de trajectoires optimales et commande avancée », *L'École centrale de Nantes sous le label de l'Université de Nantes Angers Le Mans*, avril 2015.
- Gong, C. et Kao, I., 1997, «Design for accuracy and repeatability for robots using taguchi methods», *CE CONCURRENT ENGINEERING Research and Applications*, New York at Stony Brook, Stony Brook, USA, Juin 1997, Vol. 5, no. 3, page 263-277.
- Gong Chunhe, Yuan Jingxia et Ni Jun., 2000, «Nongeometric error identification and compensation for robotic system by inverse calibration», *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2000, vol. 40, no. 14, Pages 2119-2137.
- Hafezipour M. et Khodaygan, S., 2017, « An uncertainty analysis method for error reduction in end-effector of spatial robots with joint clearances and link dimension deviations », *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2017, vol. 30, no. 6, pages. 653–663, <http://dx.doi.org/10.1080/0951192X.2016.1187298>.
- Hanqi Zhuang et Jiahua Yanl., 1998, « Calibration of stewart platforms and other parallel manipulators by minimizing inverse kinematic residuals », *Journal of Robotic Systems*, Mars 1998, vol.15, no.7, pages.395-405.
- Hoai-Nhan Nguyen, Jian Zhou et Hee-Jun Kang., 2015, «A calibration method for enhancing robot accuracy through integration of an extended Kalman filter algorithm and an artificial neural network», *Elsevier: Neurocomputing*, vol.151, pages. 996–1005.
- Hoai-Nhan Nguyen, Phu-Nguyen Le et Hee-Jun Kang., 2019, «A new calibration method for enhancing robot position accuracy by combining a robot model-based identification approach and an artificial neural network-based error compensation technique» *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 11(1) 1–11.
- Icli, C., Stepanenko, O. et Bonev, I., 2020, «New method and portable measurement device for the calibration of industrial robots», *Sensors* 2020, 20, 5919.
- ISO 8373 : Robots et composants robotiques.
- ISO 9283, Manipulating industrial robots - Performance criteria and related test methods, Switzerland, Second edition 1998-04-01.

- Ivan Kuric, Vladimír Tlach, Zuzana Ságová, Miroslav Císar et Igor Gritsuk. 2018.« Measurement of industrial robot pose repeatability ». *MATEC Web of Conferences* 244, 01015.
- Jain Aditya, Singh Hardeep, Bobby Riby, Saha Subir, Kumar Swagat et Dutta Roy, Sumantra., 2019, «Repeatability measurement and kinematic identification of LBR iiwa 7 R800 using monocular camera», Chennai, India,1-6. 10.1145/3352593.3352617.
- Joubair Ahemd., 2012,« Contribution à l'amélioration de la précision absolue des robots parallèles », *École Technologie Supérieure*,Montreal, Canada, Aout 2012.
- Joubair Ahmed , Nubiola Albert et Bonev Ilian., 2013,«Calibration efficiency analysis based on five observability indices and two calibration models for a six-axis industrial robot»,SAE Int. J. Aerosp., pages 161-168.
- Joubair.A. et Bonev, I., 2014, « Non-kinematic calibration of a six-axis serial robot using planar constraints », *Precision Engineering*, vol.40, no.0141-6359, pages 325-333.
- Kelma, V. C. et Laub, A.J., 1980, «The singular value decomposition: its computation and some applications»,*IEEE Transactions on Automatic control*, vol.25, no.2, pages. 164-176.
- Kim, H.S., 2005, « Kinematic calibration of a cartesian parallel manipulator », *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 3, no.3, pages. 453-460.
- Kozakiewicz C., Ogiso, T. et Miyake,N. P.,1990, «Calibration analysis of a direct drive robot»,IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, Towards a New Frontier of Applications, Ibaraki, Japan, 1990, vol.1, pages 213-220.
- Kuric Ivan, Tlach Vladimír, Sagova Zuzana, Císar Miroslav et Gritsuk Igor., 2018,«Measurement of industrial robot pose repeatability»,*MATEC Web of Conferences*, Ukraine.
- Liu Y., Liu H., Ni F., Xu W. et Han, F., 2010, « Self-calibration of a stewart parallel robot with a laser ranger », *International Conference on Mechatronics and Automation*, Harbin, 2007, pages. 2495-2500.
- Majarena A.C., Santolaria J., Samper D. et Aguilar, J.J., 2011, « Modelling and calibration of parallel mechanisms using linear optical sensors and a coordinate measuring machine»,*Measurement Science and Technology*, vol. 22, no. 10.
- Meggiolaro M. A., et Dubowsky, S., 2000, « An analytical method to eliminate the redundant parameters in robot calibration », *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference*.

- IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065)*, San Francisco, CA, USA, 2000, vol.4 , pages.3609-3615.
- Meggiolaro M.A., Dubowsky S. et Mavroidisz, C.,2004,«Erroridentification and compensation in large manipulators with application in cancer proton therapy », *Sba: Controle&Automação Sociedade Brasileira de Automatica.*, vol.15, no.1, pages. 71-77.
- Meng G., Tiemin L. et Wensheng, Y.,2003, « Calibration method and experiment of stewart platform using a laser tracker », *In Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, (Virginia, USA, Oct. 5-8 2003 Washington, DC, 2003, vol.3 , pages.2797-2802.
- Merlet Jean-Pierre ., 1997, « Les robots parallèles ».
- Morozov M. et al., 2016,«Assessing the accuracy of industrial robots through metrology for the enhancement of automated non-destructive testing»,*IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*, Baden-Baden, 2016, pages. 335-340.
- Motta J.M.S.T., Carvalho G.C. et McMaster, R.S.,2001, « Robot calibration using a 3D vision-based measurement system with a single camera », *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, aout 2001, vol. 17, no.6, pages. 487-497.
- Nguyen Hoai-Nhan, Le Phu Nguyen et Kang Hee-Jun., 2019,«A new calibration method for enhancing robot position accuracy by combining a robot model–based identification approach and an artificial neural network–based error compensation technique», *Advances in Mechanical Engineering*, December 2018, vol.11, 168781401882293. 10.1177/1687814018822935.
- Nguyen Hoai-Nhan, Zhou Jian et Kang, Hee-Jun., 2015, «A calibration method for enhancing robot accuracy through integration of an extended Kalman filter algorithm and an artificial neural network», *Neurocomputing*, South Korea, Mars 2014, vol 151,no. pages. 996-1005. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.03.085>..
- Nubiola A. et Bonev I.A., 2013,«Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker»,*Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 29,no.1, pages. 236-245.
- Nubiola A., Slamani M., Joubair A. et Bonev, I., 2014, « Comparison of two calibration methods for a small industrial robot based on an optical CMM and a laser tracker», *Robotica*, vol.32, pages. 447-466.

- Nubiola Albert et Bonev Ilian., 2014, «Absolute robot calibration with a single telescoping ball bar», *Precision Engineering*, vol.38, no.3, pages 472-480.
- Nzue R.-M.A., Brethé Jean-François et Vasselin, Eric., 2010, «Comparative analysis of the repeatability performance of a serial and parallel robot», *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Taipei, pages.63 - 68.
- Ota H., Shibukawa T. et Uchiyama, M.,2000, « Forward kinematic calibration method for parallel mechanism using pose data measured by a double ball bar system », *In Proceedings of the Year 2000 Parallel Kinematic Machines International Conference*, (Ann Arbor, Michigan, USA, vol.216, pages. 57-62.
- Qi Junde, Zhang Dinghua, Li Shan et Chen Bing., 2017, «Modeling of the working accuracy for robotic belt grinding system for turbine blades», *Advances in Mechanical Engineering*, vol. pages. 1–12.
- Ren X.-D., Feng Z.-R. et Su C.-P., 2009a, « Self-calibration of parallel manipulators using an orientation constraint », *In 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, (ICIEA 2009), (Xi'an, China, May 25-27 2009), pages. 2841-2844.
- Ren X.-D., Feng Z.-R. et Su, C.-P., 2009b, « A new calibration method for parallel kinematics machine tools using orientation constraint », *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, vol.49, no.9, pages. 708-721.
- Rudd K., Foderaro G., Zhu P. et Ferrari S., 2017, «A Generalized reduced gradient method for the optimal control of very-large-scale robotic systems », *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 33, no. 5, pages. 1226-1232.
- Rui Li, Xinghua Qu, Yonggang Deng, et Bende, Liu., 2013, « The combined measurement and compensation technology for robot motion error », *Proc. SPIE 8916, Sixth International Symposium on Precision Mechanical Measurements*,.
- Sabsch Jan, Hanses Magnus, Zug Sebastian et Elkmann Norbert., 2017, «Towards improving the absolute accuracy of lightweight robots by nonparametric calibration», *22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, pages 1-4.
- Schroer K., 1994, « Robocal-the IPK robot calibration package », *Industrial Robot : An International Journal*, vol.21, no.6. Pages. 35-39.
- Shaoping Bai et Ming Yeong Teo, 2003, «Kinematic calibration and pose measurement of a medical parallel manipulator by optical position sensors», *7th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, Singapore, vol.1, pages. 419-424.

- Shi J., Yu C. et Li Z., 2011, «Kinematic model identification of planar delta manipulator using Random Levenberg-Marquardt algorithm», 9th World Congress on Intelligent Control and Automation, Taipei, Taiwan, 2011, pages. 1097-1102.
- Shiakolas, P.S., Conrad K.L. et Yih, T.C., 2002, « On the accuracy, repeatability, and degree of influence of kinematics parameters for industrial robots », *International Journal of Modelling and Simulation*, vol. 22, no. 3, 2002.
- Shuxiang Guo, Yuxin Wang, Nan Xiao, Yan Zhao, Yuwen Zeng et Jiaqing Wu., 2018, « A novel master-slave robotic system with close loop control for vascular interventional surgery », *Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation* August 5 - 8, Changchun, China, pages. 591-596.
- Slamani Mohamed, Nubiola Albert et Bonev Ilian., 2012, « Assessment of the positioning performance of an industrial robot », *Industrial Robot: An International Journal*. Vol. 39. pages. 57-68.
- Tsail L., W., 1999, «Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators», *New York: John Wiley & Sons, Inc.*, 1999.
- Tuomo Kivelä, Saarinen H., Mattila J., Hämäläinen V., Siuko M. et Semeraro L., 2011, «Calibration and compensation of deflections and compliances in remote handling equipment configurations », *Fusion Engineering and Design*, vol. 86, pages. 2043–2046.
- Vincent Nabat., 2007, « Robots parallèles à nacelle articulée Du concept à la solution industrielle pour le pick-and-place », *Université Montpellier*, France.
- Watanabe A., Sakakibara S., Ban K., Yamada M., Shen G. et Arai, T., 2006, « Kinematic calibration method for industrial robots using autonomous visual measurement », *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 55, no. 1, pages. 1-6.
- Weikert S., 2004, «R-Test, a new device for accuracy measurements on five axis machine tools», *CIRP Annals*, vol. 53, Issue. 1, Pages. 429-432, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60732-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60732-X).
- Xiaoyan Chen, Qiuju Zhang et Yilin Sun, 2019, «Non-kinematic calibration of industrial robots using a rigid-flexible coupling error model and a full pose measurement method», *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, vol. 57, Pages. 46-58, ISSN. 0736-5845, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.07.002>.
- Yang Juqing, Wang Dayong, Fan Baixing, Dong Dengfeng et Zhou Weihua., 2017, «Online absolute pose compensation and steering control of industrial robot based on six degrees of freedom laser measurement», *Optical Engineering*, vol. 56, pages 034111.

- Yauheni Veryha et Jerzy Kurek., 2002, « Implementation and computer simulation of robot joint error maximum mutual compensation», Department of Mechatronics Warsaw University of Technology Chodkiewicza Str. 8, 02-525, Warsaw POLAND.
- Ying Cai, Peijiang Yuan, Zhenyun Sh, Dongdong Chen et Shuangqian, Cao., 2019, «Application of universal kriging for calibrating offline-programming industrial robots», *Journal of Intelligent & Robotic Systems* , vol.94, pages.339–348.
- Yuanfan, Zeng , Wei Tian et Wenhe Liao., 2016, «Positional error similarity analysis for error compensation of industrial robots», *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* vol.42, pages.113–120.
- Yung Ting, Ho-Chin et JarChun-Chung Li ., 2007, «Measurement and calibration for Stewart micromanipulation system», *Precision Engineering*, vol.31, pages.226–233.
- Zhenhua Cai., 2014, « Programmation robotique en utilisant la méthode de maillage et la simulation thermique du procédé de la projection thermique », Université de Technologie de Belfort – Montbéliard, 27 février 2014.
- Zhong, X.L., Lewis, J.M. et Rea, H., 1994, «Neuro-accuracy compensator for industrial robots», *IEEE*. Dept. of Mechanical, Manufacturing, and Software Engineering Napier University, vol.5, pages. 2797-2802.
- Zhu Weidonga, Li Guanhuaa, Dong Huiyuea et Ke Yinglina., 2019, «Positioning error compensation on two-dimensional manifold for robotic machining», *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*. Vol.59, pages.394–405.
- Zoran Pandilov et Vladimir Dukovski., 2014, « Comparison of the characteristics between serial and parallel robots».

