

Nouvelle stratégie d'insertion haute vitesse basée sur l'inclinaison en robotique collaborative

par

Sébastien PALMIERI

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

MONTRÉAL, LE 18 DÉCEMBRE 2022

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Sébastien Palmieri, 2022



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

M. Vincent Duchaine, directeur de mémoire
Département du génie des systèmes

M. Maarouf Saad, président du jury
Département du génie électrique

M. Ilian Bonev, membre du jury
Département du génie des systèmes

M. Eric Barnett, examinateur externe
Robotique

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

LE 16 DÉCEMBRE 2022

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

J'ai eu la chance de côtoyer des gens formidables lors de ma maîtrise que j'aimerais souligner.

Je voudrais tout d'abord remercier grandement mon directeur et mentor, M. Vincent Duchaine. Je lui suis très reconnaissant de m'avoir donné l'opportunité de travailler sur un projet si intéressant. Je tiens à remercier Pier-Luc Belizle de Robotiq, pour m'être fourni le soutien durant cette recherche. Ses compétences et sa minutie furent une contribution significative pour cette recherche.

J'aimerais remercier particulièrement mes camarades de laboratoire : Alexandre, Chandra, Étienne, Guillaume, Jennifer, Jean-Christophe et Jean-Simon. Ils m'ont soutenu tout au long de mon travail et je n'ai aucune honte à dire que cette recherche aurait été impossible sans leur aide et leur amitié.

J'aimerais remercier mes parents Robert et Geneviève pour leur éternel amour et support. J'aimerais aussi souligner la patience que ma soeur Gabrielle a eue pour toutes mes fautes de français, une professeur exemplaire que j'ai la chance de côtoyer. Finalement mes amis proches qui ont toujours cru en moi, même dans les moments les plus difficiles.

Nouvelle stratégie d'insertion haute vitesse basée sur l'inclinaison en robotique collaborative

Sébastien PALMIERI

RÉSUMÉ

Lors de cette maîtrise, nous avons contribué à la recherche en assemblage pour la robotique collaborative par la conceptualisation et réalisation d'une nouvelle stratégie d'insertion basée sur le principe de l'inclinaison. Son effet sur les forces et positions du robot a permis d'élaborer un vecteur solution, candidat à une direction vers un alésage dont la position est initialement inconnue.

Les insertions ont été analysées minutieusement pour aider le robot dans la recherche de trou et éliminer l'effet de hasard de l'insertion en spirale. Ceci a rendu le robot plus intelligent sans avoir à utiliser un système de contrôle rigide ou un capteur externe.

Nous avons pu effectuer l'insertion de nombreux types de chevilles, telles que des matériaux différents, des diamètres différents et longueurs différentes avec des performances qui dépassent ce qui se trouve sur le marché.

Mots-clés: Insertion en robotique, Robotique collaborative

New High Speed insertion Strategy Based on Tilt for Collaborative Robots

Sébastien PALMIERI

ABSTRACT

During this master, we have contributed to the research by designing and integrating a new insertion strategy based on tilt. Its effect on the robot position, as well as the force applied on the wrist was analyzed carefully to form a solution vector, with its direction aligned with the hole centre of unlocated bore.

The effect was analyzed to reduce the effect of randomness of prior strategy, as to generate more robotic intelligence in the assembly cells. The strategy was created without any external tools to the robot used.

We were able to make the insertion of many types of shafts, including different materials, diameter and length. The different environment study was crucial for the flexibility of a new strategy if implemented in the assembly lines. The results showed that the new strategy was faster than the spiral search, while retaining similar insertion performance and capability.

Keywords: Robotic insertion, collaborative robots

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURES SUR LES INSERTIONS EN ROBOTIQUE COLLABORATIVE	3
1.1 Introduction	3
1.2 La recherche de trou dans l'industrie	3
1.3 Insertions en robotique collaborative	6
1.3.1 Approche en force	8
1.3.2 Approche en vision	9
1.3.3 Approche avec mécanismes externes	10
1.3.4 Approche sans capteur externe	11
CHAPITRE 2 RECHERCHE DE TROU PAR INCLINAISON	13
2.1 Contexte de la recherche et problématique	13
2.2 Inclinaison avec compliance passive	14
2.2.1 Mécanisme passif : Développement	14
2.2.2 Résultat du mécanisme passif et analyse	15
2.3 Développement d'une stratégie d'insertion	16
2.4 Théorie de l'insertion inclinée	17
2.4.1 Mathématique de l'effet d'inclinaison	17
2.4.2 Contrôle théorique	22
2.4.3 Mathématique de pose vers position	23
2.5 Expérimentations	26
2.5.1 Premier test d'observation : quatre points de contact	27
2.5.2 Deuxième test d'observation : rotation fluide	28
2.5.2.1 Cadre de l'expérimentation	28
2.5.2.2 Résultat et discussion	29
2.5.3 Élimination du préhenseur de l'équation : environnement rigide	33
2.5.4 Mesure des deux approches possibles : en force au TCP ou en position du TCP	35
2.5.4.1 Différence du point de vue mathématique	37
2.5.5 Comparaison initiale entre la recherche en spirale et le TCP	41
2.5.5.1 Étude de la recherche en spirale	41
2.5.5.2 Étude de la recherche en inclinaison	43
CHAPITRE 3 APPROFONDISSEMENT DES PARAMÈTRES	49
3.1 Vitesse de déplacement : Acquisition de données réduites	50
3.2 Précision de l'opération : angle d'inclinaison	52
3.2.1 Effet de l'inclinaison sur l'insertion	53
3.2.1.1 Résultat et analyse de l'inclinaison	53

3.3	Performance de l'algorithme	55
3.3.1	Créer une solution générale d'insertion avec une marge d'erreur	55
3.3.2	Plan de déplacement dans l'espace TCP	60
3.3.3	Résultat et discussion	62
CHAPITRE 4 IMPLÉMENTATION DE LA SOLUTION DANS LE CONTEXTE INDUSTRIEL : ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL		65
4.1	Jonction entre spirale et inclinaison : Une étude de diamètre	65
4.2	Effet des matériaux et leurs propriétés sur l'insertion robotique	69
4.3	Longueur différente de cheville	71
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		75
ANNEXE I DONNÉES D'INSERTIONS ADDITIONNELLES		77
BIBLIOGRAPHIE		83

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1	Vitesse au contact de l'environnement 16
Tableau 2.2	Moyenne des insertions en spirales 42
Tableau 2.3	Moyenne des insertions en inclinaison 44
Tableau 2.4	Définition d'erreur dans la stratégie 48
Tableau 3.1	Réduction du nombre de points d'acquisitions et leur effet sur la vitesse et la performance 51
Tableau 3.2	Force et succès en fonction de l'angle 54
Tableau 3.3	Performance avec mouvement sinusoïdal 63
Tableau 4.1	Temps et succès d'insertion en inclinaison en fonction du diamètre pour 1mm de chevauchement 66
Tableau 4.2	Temps et succès d'insertion en inclinaison en fonction du diamètre pour 95% du diamètre de chevauchement 67
Tableau 4.3	Temps et succès d'insertion en spirale en fonction du diamètre pour 1mm de chevauchement 67
Tableau 4.4	Temps et succès d'insertion en spirale en fonction du diamètre pour 95% du diamètre de chevauchement 67
Tableau 4.5	Plastique PLA (Polyactic Acid) 69
Tableau 4.6	Acier 1045 (acier au carbone) 70
Tableau 4.7	Aluminium 6065 (Magnésium-Silice) 70
Tableau 4.8	Tableau des forces de contact de différents matériaux en fonction de l'angle 71

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Les quatre étapes de l'insertion	4
Figure 1.2 Différentes stratégies d'insertions et leur temps d'opérations moyens en robotique industriel	5
Figure 1.3 Répétabilité vs Précision	6
Figure 1.4 Schéma de contrôle d'un robot avec une approche macro-mini distribuée	11
Figure 2.1 Modèle de compliance passive pour insertion	15
Figure 2.2 Matrice de transformation pour pose homogène de UR	18
Figure 2.3 Rotation selon un point	19
Figure 2.4 Déplacement standard robotique en vitesse	20
Figure 2.5 Changement d'axes nécessaires à l'inclinaison	24
Figure 2.6 Signal théorique et illustration représentative	26
Figure 2.7 Test initial avec points pré-programmés	27
Figure 2.8 Plan d'expérimentation	29
Figure 2.9 Premier test d'une rotation fluide	30
Figure 2.10 Position en Z et force en Z lors de la rotation fluide	31
Figure 2.11 Moment X et Y lors de la rotation lors de la rotation fluide	31
Figure 2.12 Rotation X et Y du robot lors de la rotation fluide	32
Figure 2.13 Rotation avec pose inverse	32
Figure 2.14 Expérimentation sans préhenseur en force	34
Figure 2.15 Expérimentation sans préhenseur en position	34
Figure 2.16 Filtre passe haut appliqué sur la position du robot	36
Figure 2.17 Filtre passe haut appliqué sur la force du robot	36

Figure 2.18	D.C.L à plat.	38
Figure 2.19	D.C.L force inclinaison sur plat.	39
Figure 2.20	D.C.L force inclinaison dans un trou.	40
Figure 2.21	Mouvement en spirale pour insertion.	41
Figure 2.22	Courbes des résultats de la recherche en spirale.	43
Figure 2.23	Courbes des résultats de la recherche en inclinaison	45
Figure 2.24	Erreur de vecteur calculée	46
Figure 2.25	Position du trou à 180 degrés, Δ angulaire de 2.52.	47
Figure 3.1	Chanfrein avec défaut	50
Figure 3.2	Points d'acquisition et de position réduite : réduction de la résolution de l'inclinaison	51
Figure 3.3	Points d'acquisition et de position réduite : résultats de vitesse et succès	52
Figure 3.4	Signal théorique et illustration représentative	54
Figure 3.5	Le vecteur solution à 45 degrés avec limite haute et basse	56
Figure 3.6	Différentiel de position de trou en fonction d'un vecteur solution unique	57
Figure 3.7	Déplacement du robot dans le contexte de la spirale continue	58
Figure 3.8	Déplacement du robot pour obtenir la spirale sectionnée	59
Figure 3.9	Déplacement sinus proposé	62
Figure 4.1	Limite de l'inclinaison	66
Figure 4.2	Performance des stratégies avec diamètres différents	68
Figure 4.3	Erreur de hauteur	72
Figure 4.4	Rotation avec erreur de hauteur	73
Figure 4.5	Spectre de force et position lorsque le TCP est mal ajusté	73

Figure 4.6	Taux de succès en fonction de l'erreur TCP	74
------------	--	----

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ETS	École de Technologie Supérieure
ROS	Robotic Operating System
TCP	Tool Center Point
UR	Universal Robot
RCC	Remote Center Compliance
FDCC	Foward Dynamic Center Compliance
PLA	Polyactic Acid
RL	Reinforcement Learning

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

θ	Angle en degrés (°)
Θ	Diamètre en millimètres (mm)
α	Angle de rotation autour de l'axe x (°)
β	Angle de rotation autour de l'axe y (°)
ζ	Angle de rotation autour de l'axe z (°)
mm	millimètre
m	mètre
N	Newtons
Hz	Hertz
MPa	MegaPascal
GPa	GigaPascal
HRB	Dureté Rockwell B
HRC	Dureté Rockwell C

INTRODUCTION

Depuis le développement de la robotique collaborative, le nombre de tâches effectuées par les robots se fait de plus en plus grand et celles-ci gagnent en complexité. La variété de ces tâches donne à la robotique collaborative sa touche de flexibilité, contrairement à son homologue industriel. Cette flexibilité vient du besoin de l'industrie pour des robots collaboratifs eux-mêmes. Le cadre de ces tâches se retrouve principalement dans le contexte où l'humain est présent dans l'environnement de travail. En effet, la robotique collaborative a été conceptualisée dans le but de pouvoir interagir avec l'être humain. La robotique collaborative est l'interface entre la robotique et le domaine principalement relié à l'humain. Elle se doit donc d'être flexible, tout en respectant la sécurité des opérateurs sur le terrain ou le plancher d'une usine. Afin de s'outiller, les cobots utilisent une panoplie d'outils et d'algorithmes que la recherche a préalablement testée pour rester compétitifs. Le grand défi de la robotique collaborative est donc de s'assurer de marier grande flexibilité de tâches et facilité d'intégration tout en donnant à l'opérateur une précision qui est intéressante. Présentement, la robotique collaborative tente de percer dans le secteur de l'assemblage. Ce domaine d'application, contrairement aux manipulations standard de fabrication ou le chargement et déchargement de pièces dans une machine-outil, demande de la compliance dans le système. Cette compliance peut se présenter en une compliance passive, comme un ressort ou une partie permettant un déplacement dû à une force externe, ou encore comme un algorithme avec des capteurs externes qui peuvent communiquer avec le robot afin d'ajuster une trajectoire. L'assemblage collaboratif est une tâche complexe, car les outils pour positionner une pièce dans l'espace peuvent être onéreux et complexes. L'industrie de l'assemblage est donc beaucoup plus flexible et la position d'une pièce dans l'espace sera plus variable que l'industrie de la fabrication. L'une des tâches requises pour un assemblage réussi est l'insertion de pièces. Puisque les robots collaboratifs doivent effectuer la tâche monumentale de remplir le manque de main-d'œuvre grandissant dans l'industrie, les fabricants de robots tentent de trouver des solutions simples pour des tâches humaines qui sont complexes lorsque

décortiquées. L'insertion semble à priori une tâche relativement simpliste, mais elle requiert de nombreux apports tactiles et visuels par l'humain pour obtenir une insertion adéquate. La robotique doit obtenir un niveau de précision équivalent ou meilleur avec un potentiel d'information qui est réduit.

La recherche en robotique collaborative s'est penchée sur le sujet il y a quelques années. L'objectif était alors de trouver la position de l'insertion qui pouvait varier d'un ordre de grandeur trop élevé pour une insertion préprogrammée. Les résultats préliminaires s'articulaient autour de la recherche en spirale, un type de recherche efficace en robotique collaborative puisqu'il permet des erreurs de position lors de l'approche en appliquant une force constante contre une surface. Lorsque les axes s'alignent, la force dans l'axe devient nulle au poignet et l'insertion est réussie. Ce procédé est fastidieux et long. Il émule une seule partie du processus normal qu'un humain effectue lors de la recherche d'un trou. Le robot réagit avec son environnement rigide tout en étant rigide lui-même, ce qui donne une insertion qui est très sensible aux variations externes. Il est possible d'avoir de l'information additionnelle sur la géométrie du trou lors de la recherche. Il faut prendre en considération ces informations lors de l'insertion. Cette recherche portera principalement sur l'acquisition de données géométrique du trou en fonction d'une rotation autour d'un point. La recherche par inclinaison, nommée ainsi par son mouvement autour d'un alésage, fait l'objet de ce mémoire. Dans le cadre de ce projet, il y aura une étude sur l'inclinaison et la théorie derrière la possibilité de trouver la position d'un trou en analysant des données importantes telles que la position et la force sur l'outil. La stratégie sera mise à l'épreuve face à la stratégie la plus utilisée dans l'industrie, l'insertion en spirale. Il y aura aussi une étude sur les différents paramètres employés lors de la recherche et comment améliorer une stratégie d'insertion par des facteurs clés. Finalement, la stratégie sera employée dans différents environnements de travail, tel que les matériaux, formes et erreurs d'installation pour voir l'impact de facteurs externes sur les insertions.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURES SUR LES INSERTIONS EN ROBOTIQUE COLLABORATIVE

1.1 Introduction

Les avancées scientifiques autour des insertions en robotique collaborative ont tout d'abord hérité du fil conducteur de la recherche en robotique industrielle. En effet, le premier intérêt exploré fut la précision robotique et la rigidité d'assemblage. Ce champ de recherche mena tout naturellement les scientifiques à se tourner vers la compliance. La compliance est une mesure de souplesse pour le robot. La plupart des robots qu'ils soient industriels ou collaboratifs sont rigides naturellement. Plusieurs éléments de programmation peuvent être mis à profit afin d'intégrer la compliance dans un système rigide. Des techniques, telles que la compliance active, ont été développées dans le but de pouvoir générer différentes tâches demandant un semblant de souplesse. Le chapitre présenté ici démontrera les avancées récentes dans le domaine de la compliance robotique, ainsi qu'une revue critique des techniques utilisées. Cette revue de littérature guidera ce mémoire sur les barèmes et spécificités générés. Elle servira aussi de référence vers la méthodologie employée afin de développer les concepts de base de l'insertion.

1.2 La recherche de trou dans l'industrie

La recherche de trou est en premier lieu abordée sérieusement dans la robotique par Whitney (1982). L'insertion selon Whitney, soit de faire la liaison entre des pièces rigides, se fait en quatre étapes distinctes.

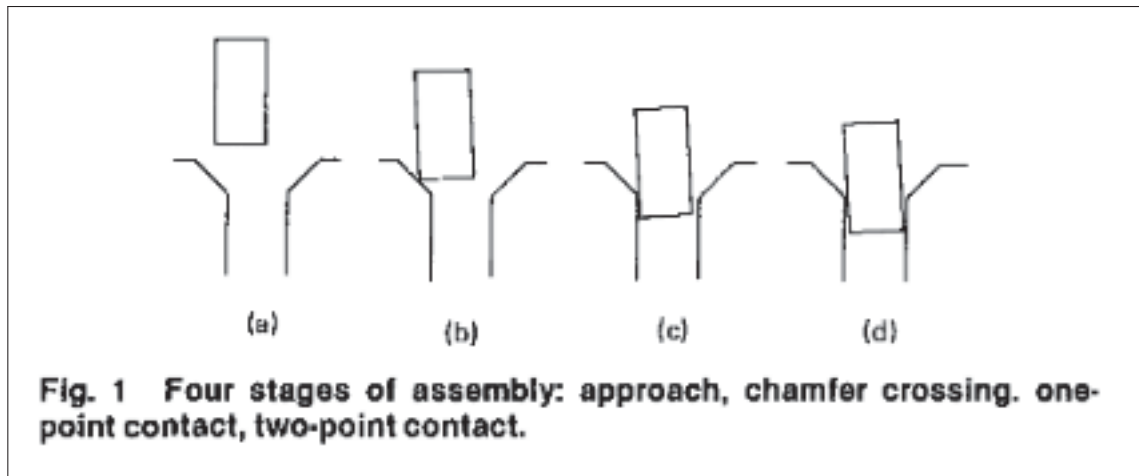


Figure 1.1 Les quatre étapes de l'insertion
Tirée de Whitney (1982)

Ces étapes sont tout d'abord l'approche, qui selon Whitney (1982) se trouve à la position (a). L'approche est dépendante du robot utilisé et de la stratégie de mouvement. Le (b) est le croisement de chanfrein. Il permet de faire un contact avec un chanfrein si la pièce reste axialement statique. Il peut aussi être obtenu si la pièce est inclinée et si la bordure de la pièce touche à la surface d'insertion. Le (c) représente le point de contact singulier. Cette position nous divulgue de précieuses données. Tout d'abord, la résultante de la force aura toujours une orientation vers le centre du trou. Ensuite, l'axe de la pièce et du trou coïncide dans l'espace 3D. Il est possible, avec une inclinaison plus prononcée d'atteindre le (d), soit le point de contact à deux surfaces cette position est quasi-statique en translation. Il n'y a qu'un degré de liberté, c'est-à-dire qu'il est possible d'inférer l'emplacement du trou plus facilement avec cette position. La recherche récente s'appuie sur ce principe, qui est considéré comme la position optimale pour faire la recherche de trou. Cependant, cette position est rigide et demande de l'admittance, soit la capacité à recevoir et répondre à des forces externes pour atteindre cette position. De ces étapes de base, la recherche s'est concentrée autour des moyens qui permettent d'atteindre plus rapidement et efficacement la position convoitée du point de contact à deux surfaces. Bruzzone *et al.* (2002) ont développé initialement en 2002 une liste des différentes stratégies et leur performance en robotique industrielle. Bien que la liste ne soit plus d'actualité avec

les technologies d'aujourd'hui, elle permet toutefois de cerner comment les ingénieurs et le développement de stratégies d'insertion se sont articulés au fil des années suivantes.

Assembly strategy	Clearance (mm)	Chamfer required	Operational time (s)
RCC	0.01-0.03	Yes	20
Air steam	0.04-0.06	Yes	4
Vibratory methods	0.75		16
Visual sensor	0.4-3		2.5-4
Proximity sensor	0.01-0.04		40
Force sensor	0.01-0.02		2-4
Elastic cable-driven manipulator	0.03		4
Displacement sensor	0.05-0.15		40

Figure 1.2 Différentes stratégies d'insertions et leur temps d'opérations moyens en robotique industrielle
Tirée de Bruzzone *et al.* (2002)

En effet, selon la figure 1.2, il est possible d'identifier le capteur d'effort ainsi que le système de vision qui sont les deux stratégies les plus prometteuses. La seule réserve que nous avons en lien avec l'article est que les systèmes proposés ont toujours les robots industriels mis de l'avant. Dans leur recherche, un robot parallèle a été utilisé pour effectuer les tests. Les solutions utilisent donc des systèmes de positions rigides. À l'heure actuelle, les robots industriels, tels qu'un ABB 2400 par exemple, offrent une précision adéquate pour des instruments qui permettent seulement une petite erreur de position, principalement entre 0.1-0.4mm (ABB, 2021). Cette erreur, acceptable dans le contexte industriel, ne respecte pas les erreurs de position dans le contexte de la robotique collaborative. Par exemple, un robot de style ABB IRB 120 a une précision d'environ 5mm (Joubair, Bonev, Zhao & Bigras, 2015) lorsque non calibré avec des algorithmes de précision.

Il est important de faire la différence entre la précision robotique et la répétabilité, puisque les deux notions, quoique similaires, se distinguent particulièrement dans le domaine de la robotique collaborative.

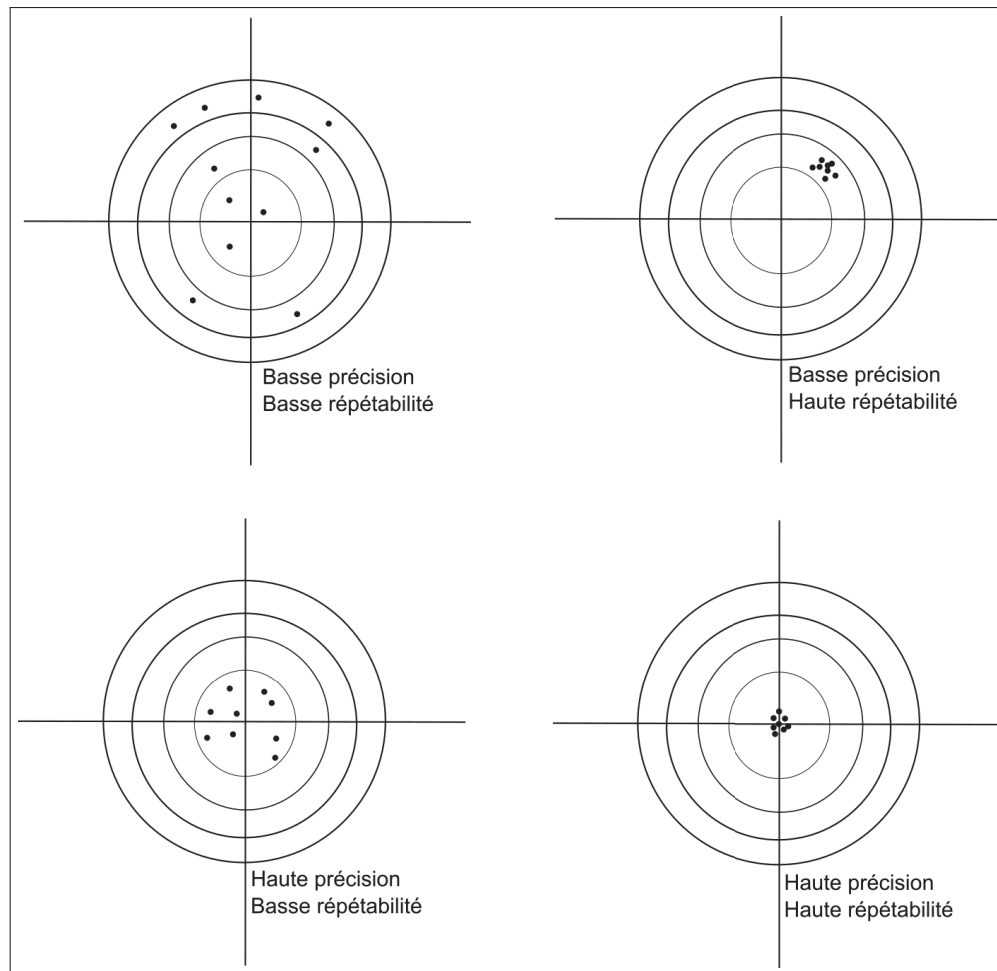


Figure 1.3 Répétabilité vs Précision

1.3 Insertions en robotique collaborative

La robotique collaborative se distingue tout d'abord par sa flexibilité autour de la complétion de tâches de différentes natures (Retisoft, 2021). Un robot collaboratif est conçu dans sa programmation pour permettre la réalisation de travaux variés. Ensuite, sa facilité d'intégration aide les plus petites compagnies à pouvoir intégrer un robot collaboratif dans leur ligne de production. L'entraînement des employés est plus facile qu'avec son homologue industriel.

Finalement, son travail de collaboration avec les humains permet aux employés de chaînes de production de voir le robot comme un outil pour leur travail plutôt qu'un ennemi à leur emploi. Malgré les avantages intéressants, la robotique collaborative est victime de son succès au niveau de la précision. Tous les bienfaits et avantages que la technologie offre au marché sont souvent contrebalancés par leur manque de force, ou leur manque de précision. Afin de pallier à ce manque, des chercheurs tels que Seriani, D'Attanasio, Gallina & Debortoli (2018) utilisent des moyens alternatifs, comme utiliser le courant dans les joints pour générer un vecteur de force qui aide à trouver la position de l'alésage et son orientation. c'est à dire qu'il est possible avec tout les courants aux joints et le voltage de mesurer les efforts à chaque actionneurs. Cette solution novatrice n'augmente pas la précision des robots. Elle permet d'avoir plus de données sur son environnement grâce à un semblant de sens du toucher. En utilisant le courant dans les joints, le contrôleur peut mesurer une force appliquée au poignet avec une transposition des différents courants jusqu'au TCP (Tool Center Point). Les approches pour les insertions sont variées et présentent des avantages et inconvénients qui peuvent être exploités dans différents domaines d'application. L'approche la plus courante pour les insertions en robotique collaborative est l'approche en force. Elle utilise un capteur d'effort au poignet quelconque pour mesurer l'impact d'un déplacement sur la cheville. L'insertion en spirale, qui est la plus utilisée actuellement sur le marché de l'assemblage, est une insertion qui utilise l'approche en force. L'insertion en spirale effectue le mouvement sous-entendu par son nom, soit une spirale. Durant le déplacement, la force le long de l'axe de descente est analysée. Si elle baisse en dessous d'une valeur donnée (par exemple 10 Newtons), le robot a trouvé un candidat potentiel pour un trou et effectue une descente le long de l'axe. Récemment, d'autres types d'approches ont été explorées. L'approche par vision utilise un système de caméra ou de laser afin d'améliorer la précision de position du robot. L'approche sans capteur externe tente d'utiliser les données envoyées par le robot dans le but de favoriser les insertions. Des mécanismes externes ont été développés dans l'optique d'améliorer les propriétés flexibles de la robotique collaborative pour accélérer les processus d'insertion. Dans tous les cas, l'intelligence artificielle est fortement mobilisée dans tous les axes de recherche mentionnée ci-haut. Schoettler, Nair, Ojea, Levine & Solowjow (2020b) ont développé de l'intelligence artificielle pour améliorer les insertions sans avoir à générer des

ensembles de données qui sont souvent coûteux. Les insertions ont aussi été intelligemment implantées avec l'analyse de mouvement robotique pour prévoir des tâches d'insertions (Roberge, 2019)

1.3.1 Approche en force

L'approche en force, bien qu'elle soit la plus populaire pour l'industrie de la robotique, est tout de même d'actualité pour la recherche. Plusieurs ingénieurs et scientifiques tentent d'améliorer les propriétés des capteurs pour représenter la sensibilité tactile de l'humain afin d'effectuer des tâches complexes comme l'insertion. Selon Zhang (2017), il serait possible d'utiliser un capteur d'effort pour redresser l'axe d'insertion des pièces rondes. Le système utilise une plaque à deux chevilles dans le but de rendre plus difficile l'insertion. L'analyse de contact permet de réajuster l'axe d'insertion d'une position qui serait considérée comme un contact à trois points. Il y a deux inconvénients à ce genre de mécanisme : le premier est l'utilisation d'un système rigide de contrôle en force ne permettant aucune permutation géométrique de la pièce. Le second est la vitesse d'exécution qui est entravée par la fréquence d'acquisition d'un tel système. Tous les contrôles en force en temps réel avec une machine sont rigides. Donc si les mouvements sont complexes, contrairement à ceux utilisés par Zhang (2017), le robot doit agir plus lentement pour compenser à la connexion environnement-pièce totalement rigide et au contrôle très sensible.

Il est possible d'utiliser les capteurs d'efforts pour réduire l'erreur de précision de robot compliant, comme le démontre Zhang, Zheng, Ota & Huang (2017). L'utilisation du capteur d'effort permet à un robot de style Baxter d'assembler deux pièces ensemble, suivant un contrôle assez développé. Utiliser un capteur d'effort avec des bras compliants est la technique qui a le plus de similitudes avec le fonctionnement humain. Des chercheurs ont produit une analyse des forces de contact de chevilles cylindriques pour permettre au robot de se réajuster en temps réel, en utilisant des moments de contact calculés lors de déplacement en un point de contact ou deux-points de contact (Shirinzadeh, Zhong, Tilakaratna, Tian & Dalvand, 2011). Le principe d'inclinaison est abordé par Chhatpar & Branicky (2001). Les chercheurs proposent une grande inclinaison, soit 30 degrés lors de la descente. En mesurant à quelle hauteur la pièce entre en

contact, ils sont capables d'inférer la position du trou. Le système mesure les forces de contact aussi pour trouver l'orientation générale du trou.

Il est aussi possible d'effectuer une boucle de retour de force pour répondre directement à l'environnement et réajuster la position du robot (Broenink & Tierneho, 1996). Cependant cette technologie est lente et très sensible aux variations externes. On peut donc utiliser un contrôle hybride force/position pour répondre à l'analyse de contact entre l'environnement et le robot (Park *et al.*, 2017). Le système n'utilise pas de boucle de retour de force pour effectuer son contrôle, mais plutôt intègre les étapes cruciales de l'insertion et l'analyse des forces sur le robot pour reconnaître la position du robot dans le processus.

1.3.2 Approche en vision

Récemment, plusieurs systèmes robotiques utilisent l'intelligence artificielle et la vision, qui sont tous deux en essor depuis quelques années. La vision, par exemple, permet la visualisation d'un plan de travail pour intégrer des positions sans programmation préalable. Tout d'abord, Qiao, Wang, Su, Jia & Li (2015) utilisent un système de caméras permettant de trouver des régions de positionnement potentielles pour l'insertion d'un arbre dans un roulement. En utilisant les quatre étapes de Whitney vues précédemment, il est possible d'obtenir de l'information sur la position relative de l'alésage avec son arbre. L'article présente une technique qui utilise le contact à deux points, principalement pour atteindre le "Three-point contact". Tel que vu précédemment, le point de contact à 3 points est favorable à une insertion de sa position statique. (Nozu & Shimonomura, 2018) ont créé un système qui permet d'insérer des vis dans des trous de positionnement. Pour ce faire, cet article décrit un mécanisme utilisant de l'information tactile ainsi que des caméras pour localiser la position du trou. Bien que le système soit composé d'un robot industriel, les méthodes employées sont similaires à celles de la robotique collaborative. Il est possible d'utiliser l'apprentissage profond pour améliorer les techniques de vision lors de l'insertion. En effet, avec le «Reinforcement Learning» (RL) on peut utiliser des images préalables pour renforcer le contrôle de mouvement jusqu'à son insertion parfaite (Schoettler

et al., 2020a). Le système d'intelligence artificielle permet de réajuster en temps réel des petites erreurs de positions.

1.3.3 Approche avec mécanismes externes

Il est possible de créer des mécanismes avec ou sans de la compliance pour améliorer les insertions robotiques. Entre autres, des mécanismes de RCC ont été développés (Cheng & Chen, 2002) permettant des erreurs angulaires de pièces prismatiques. Une analyse dynamique de vibration (Kilikevicius & Baksys, 2011) a permis de mieux formuler la précision d'un RCC dans une pièce avec un chanfrein. Bien que la stratégie d'un RCC se résume à l'utilisation d'un chanfrein comme environnement externe pour les insertions, il est possible de créer une formulation que la force résultante d'un appui en inclinaison provoque en un vecteur pointant dans la direction du centre d'un alésage.

L'approche qui est très intéressante pour l'assemblage est l'approche macro-mini. Il serait possible d'effectuer des tâches en travaillant avec la grande inertie d'un robot pour les mouvements à basse fréquence haute amplitude, et des actuateurs haute-fréquence basse amplitude pour les mouvements précis (Zinn, Roth, Khatib & Salisbury, 2004). En effet, le contrôle d'un tel robot permettrait de grands mouvements de pièce, puis des petits et précis mouvements pour l'insertion, tel que présenté dans le schéma de contrôle de la figure 1.4.

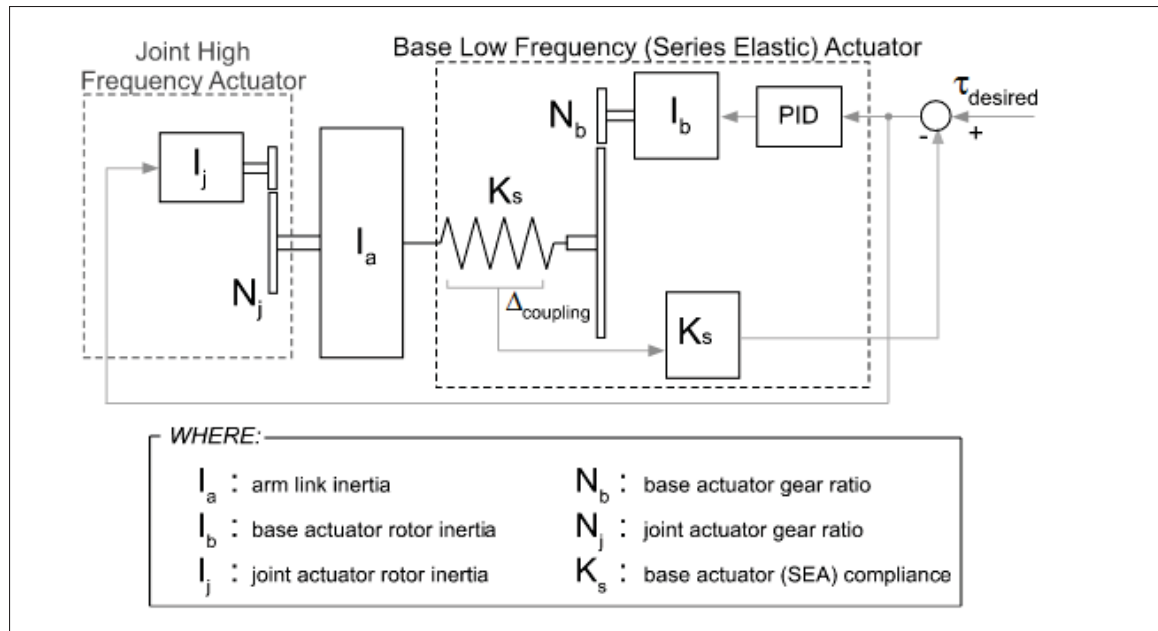


Figure 1.4 Schéma de contrôle d'un robot avec une approche macro-mini distribuée
Tirée de Zinn *et al.* (2004)

D'autres techniques employées, comme un RCC à multiple axes Wang, Chen, Xu & Wang (2019) démontrent qu'un principe d'inclinaison avec un RCC offrirait des résultats assez convaincant pour l'insertion. Cependant, ce genre de mécanisme est assez volumineux et coûteux.

1.3.4 Approche sans capteur externe

L'approche sans capteur est intéressante pour le domaine industriel. Elle permet d'avoir une solution qui ne requiert pas de coûteux accessoires et utilise les robots dans leur état initial. La recherche sans mécanismes externes a incité certains chercheurs à créer des systèmes de compliance actifs pour un contact entre l'environnement et le robot (Scherzinger, Roennau & Dillmann, 2017). En effet, en créant un RCC virtuel avec un contrôle hybride position et force, il est possible de créer un FDCC (Forward Dynamic Compliance Center). C'est un contrôle qui mesure l'impact de l'environnement rigide et réagit avec une boucle de contrôle fermé. Pour créer un capteur d'effort virtuel, il est possible d'utiliser les courants dans les joints. C'est principalement l'avenue utilisée par les chercheurs pour éliminer le besoin d'un accessoire externe (Park, 2011).

Par des mathématiques matricielles, il est possible d'obtenir la force au TCP. Cependant, cette force est calculée par un ordinateur ou contrôleur et n'est pas un capteur directement au poignet. Il faut donc être vigilant des données reçues par le contrôle.

CHAPITRE 2

RECHERCHE DE TROU PAR INCLINAISON

2.1 Contexte de la recherche et problématique

Les robots collaboratifs utilisent principalement la recherche en spirale pour éliminer le besoin de la précision et garder la versatilité du robot. Cette recherche est lente et fastidieuse. Surtout, elle n'exploite pas les avantages qu'offre un robot à 6 degrés de liberté standard, soit des rotations de TCP et des mouvements rapides. L'environnement de l'assemblage en collaboration avec un humain peut être variable. Les robots collaboratifs travaillent principalement sur des lignes de production qui ne requiert pas de positionnement précis. La précision est le domaine des robots industriels. Actuellement, les robots collaboratifs avec leur versatilité accrue permettent une coopération dans l'environnement de travail plus humain, c'est-à-dire un environnement moins rigide. Les robots collaboratifs ont accès à des outils tels que des capteurs d'efforts ou des caméras à multiples axes qu'ils utilisent entre autres pour la planification de mouvement. Dans le contexte de l'assemblage, le robot est efficace jusqu'à l'insertion. Les insertions ralentissent significativement le processus d'assemblage. Il est donc intéressant de pouvoir mesurer l'impact qu'une stratégie plus optimale en vitesse pourrait avoir sur les assemblages pour la robotique collaborative. Récemment, les développements de stratégie de programmation rapide pour les robots collaboratifs ont poussé l'industrie dans la bonne voie. Il est maintenant possible de programmer des déplacements rapidement, sans le besoin de connaissances développées en programmation robotique. Des bouchons technologiques se sont développés avec la facilité de programmation. L'insertion en est une. Il faut donc trouver des solutions alternatives pour améliorer la vitesse et l'efficacité de telles opérations tout en gardant la flexibilité et l'agilité du robot.

2.2 Inclinaison avec compliance passive

La recherche de trou peut s'effectuer à l'aide de deux outils qui créent une compliance mécanique. Tout d'abord, des mécanismes passifs peuvent être utilisés. Entre autres, des mécanismes de style RCC (Remote Center Compliance) ont été étudiés dans le contexte de la robotique industrielle, ainsi que la robotique collaborative. Par exemple, la compliance passive industrielle est étudiée dans le contexte d'un ressort programmable (Bigge & Harvey, 2007). Il est possible de générer des insertions plus précises à l'aide d'un ressort avec une constante K qui se modifie au besoin de l'assemblage. Cependant, la boucle de la compagnie ATI Industrial Automation offre un RCC pour des petits déplacements de l'échelle de la dimension du chanfrein. On peut remarquer que le principe est plutôt simple, et surtout requiert un chanfrein permettant la bonne insertion de la pièce dans sa position finale. Ceci est dû à la robotique de précision qu'offre la robotique industrielle. Elle est très rigide dans la position du trou dans l'espace. Elle requiert donc une analyse de mouvement exhaustive ainsi que des outils de positionnement précis. En robotique collaborative, il existe aussi des RCC. En effet, des compagnies, comme ATI, ont conceptualisé et fabriqué l'équivalent. Cependant le manque de rigidité d'assemblage en robotique collaborative due à sa nature d'aide aux humains, n'offre pas la même performance qu'un RCC normal. La recherche s'est donc penchée sur le sujet pour créer des outils spécialisés qui aident à l'assemblage.

2.2.1 Mécanisme passif : Développement

Un système de compliance passive a tout d'abord été étudié dans le contexte des insertions en robotique collaborative. Un poignet compliant a été conceptualisé, puis mis en place sur un robot collaboratif. Avoir une compliance peut être favorable pour accélérer le processus d'approche lors de l'insertion.

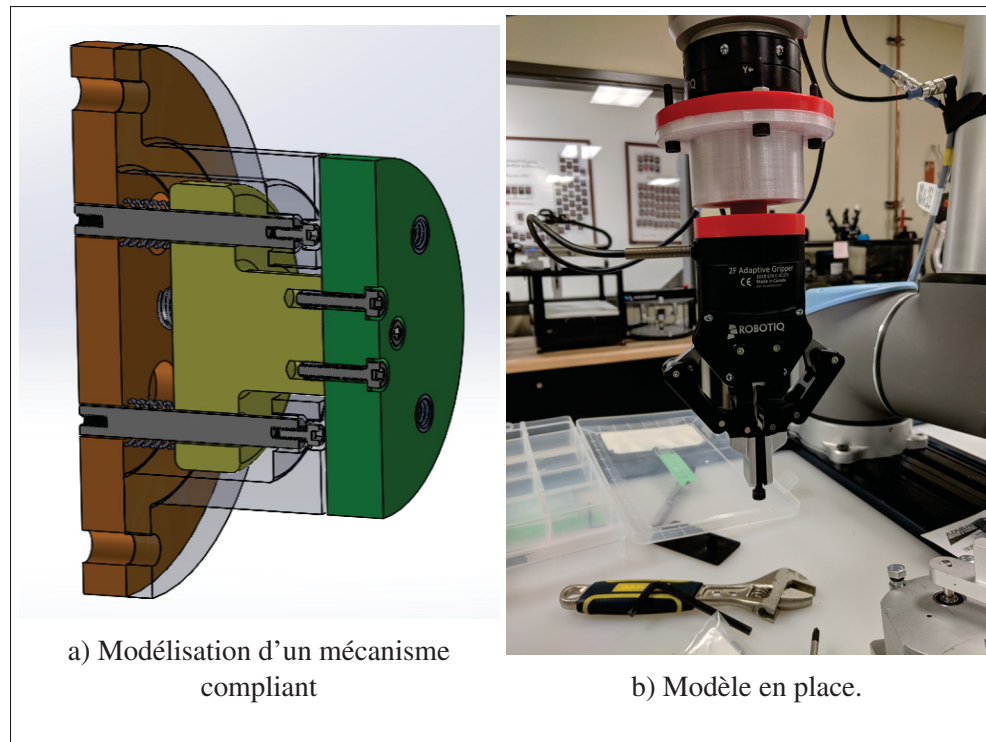


Figure 2.1 Modèle de compliance passive pour insertion

La compliance passive a permis d'accélérer les approches du robot lors de l'insertion de façon significative. Elle est directement reliée à la constante de ressort K . Les ressorts utilisés dans l'application ont une constante de 1751 N/m , avec une butée à 8mm . Les ressorts sont précompressés à une distance de $3,026\text{mm}$, soit $5,29\text{N}$ pour offrir une certaine rigidité initiale au système.

2.2.2 Résultat du mécanisme passif et analyse

Il est possible de représenter les approches avec un tableau d'un système ayant une compliance passive. L'évènement déclencheur du frein est de 10N .

L'inconvénient majeur d'un système passif est les propriétés fixes du mécanisme. En effet, les ressorts et autres pièces compliantes éliminent la rigidité du robot. Dans le contexte de l'approche, cette souplesse aide à l'accélération. Pour les déplacements standards, une mauvaise optimisation rend le robot beaucoup moins précis et répétable. Il élimine aussi la force d'insertion

Tableau 2.1 Vitesse au contact de l'environnement

Vitesse du robot (mm/s)	Force à l'arrêt (N)	Déplacement du ressort (mm)
2	10.129	5,78e-6
10	10.578	6.21e-3
25	7.843	1
50	12.322	3
75	14.036	2.30
100	16.041	3.45
300	17.004	4.00
900	20.506	6.00

qui est nécessaire dans bien des cas. La solution n'est pas convenable comme solution générale, mais peut offrir certains avantages dans certaines situations.

Afin de s'attaquer au problème plus important de l'insertion, il faut donc se tourner vers une solution logiciel de contrôle.

2.3 Développement d'une stratégie d'insertion

Puisque la cible première de ce travail est de faire la conception d'une nouvelle stratégie d'insertion, il faut établir les variables qui s'appliquent lors de l'insertion, ainsi que les possibilités d'utiliser ces variables et l'espace contraint dans lequel elles travaillent. Par exemple, une insertion en spirale fait varier la position X et Y , tout en prenant comme capteur la force F_z . Bien que la stratégie soit généraliste dans son application, la variable pour capter la position du trou est uniaxiale. Ce qui ralentit la stratégie réduit la flexibilité. Plusieurs incertitudes de position influencent la position absolue entre la pièce et la pince robotiques. Par exemple, lors de l'assemblage de pièce, la position de la pièce à assembler serait déplacée de quelques millimètres. Surtout dans le contexte de la robotique collaborative, ou de par sa nature, l'environnement d'assemblage est très flexible. Afin de remédier au problème de position, plusieurs concepts et solutions différents ont été abordés. Par exemple Seriani *et al.* (2018) propose une solution qui n'utilise pas de capteur d'effort ou de torque. Ils se fient plutôt au courant dans les joints. Cette

solution est intéressante de par sa généralité, mais elle doit employer des forces de contact de plus de 60N qui sont assez élevées dans le contexte de l'assemblage de pièce.

2.4 Théorie de l'inclinaison

La stratégie proposée est basée sur l'inclinaison. La théorie derrière l'inclinaison stipule qu'il serait possible de pouvoir ressentir les effets de la géométrie du trou sur la pièce en introduisant deux ou trois axes de déplacement. Cette augmentation améliore la résolution de données dans le système, puisqu'il fait interagir des axes autres que celui du trou.

La stratégie a été mentionnée dans le concept du RCC, qui se fie aux forces axiales imposées par les chanfreins pour mesurer une résultante qui est toujours orientée vers le centre du trou. Chhatpar & Branicky (2001) démontre que l'inclinaison peut être employée lorsque les pièces ont un chanfrein.

La première expérience réalisée dans le contexte de l'insertion était de vérifier s'il était possible de mesurer une différence lors de différents angles d'inclinaison selon le robot utilisé, dans le cas présent le UR5e.

2.4.1 Mathématique de l'effet d'inclinaison

Les premières équations à utiliser sont celles de l'inclinaison. Puisque le TCP du robot est décalé selon la pince et la pièce, il faut tourner la pièce autour du point final de la cheville ou la pièce à insérer. Par exemple, si le pince industriel ainsi que la pièce mesurent 210 centimètres, il sera primordial d'imposer un TCP à cet endroit. Une fois le TCP initialisé, on peut introduire les éléments de rotation du robot.

Le robot fera des rotations selon un signal sinusoïdal sur ses axes de rotation $R_x (\alpha)$ et $R_y (\beta)$. Les rotations devront aussi inclure une certaine inclinaison, soit combien de degrés la cheville sera inclinée en fonction de son axe Z. Pour avoir une inclinaison sur la pièce, la formule est la suivante :

$$Pose = [X, Y, Z, \sin(t \cdot 2 \cdot \pi \cdot Inclinaison), \cos(t \cdot 2 \cdot \pi \cdot Inclinaison), rZ] \quad (2.1)$$

où t = fraction d'un tour complet entre 0 et 1.

X, Y, Z = Position de contact avec le trou dans l'espace du TCP.

rZ = Rotation du poignet dans l'espace du TCP

t est une variable intéressante qui augmente la résolution de mouvement alentour d'un point. Une pose est une méthode utile pour avoir une matrice de transformation à partir d'information qui se retrouve sous une forme simplifiée de rotation et de translation. Une pose se décompose de cette façon suivante dans une pose homogène :

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & Dx \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & Dy \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & Dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Figure 2.2 Matrice de transformation pour pose homogène de UR

Pour les Universal Robots utilisées, les matrices de transformation spatiale sont de type axe-axe ou Axis-Axis. Les rotations données par la pose ne sont donc pas des angles d'Euler. Le cercle reste théorique, puisque le mouvement se fait dans l'axe de R_x (α) et R_y (β), ce qui donne deux signaux de rotation comme stipulé par le mouvement. Il faut bien cerner que c'est l'orientation de la cheville que l'on module. Le signal ne déplace pas le robot dans l'espace translationnel.

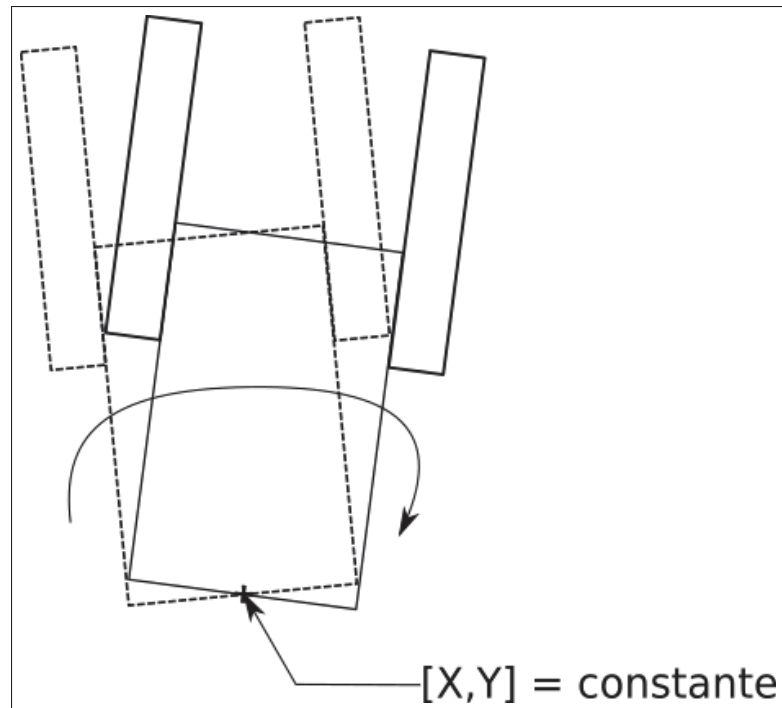


Figure 2.3 Rotation selon un point

On peut donc représenter l'orientation de l'inclinaison par un cercle qui couvrirait toute la rotation du bras robotique autour d'un point C . En utilisant la commande en position du robot, ce genre de rotation doit avoir un TCP qui se trouve au bout de la pièce utile, ou la charge du robot. Les robots UR5 de base ont un contrôle qui fonctionne à 125Hz, ce qui veut dire que la résolution de points se fera au maximum avec un intervalle de 0.008 seconde. Les fonctions standards de robot, telles que MoveL et MoveJ, utilisent une stratégie de mouvement similaire à celui présenté ci-dessous :

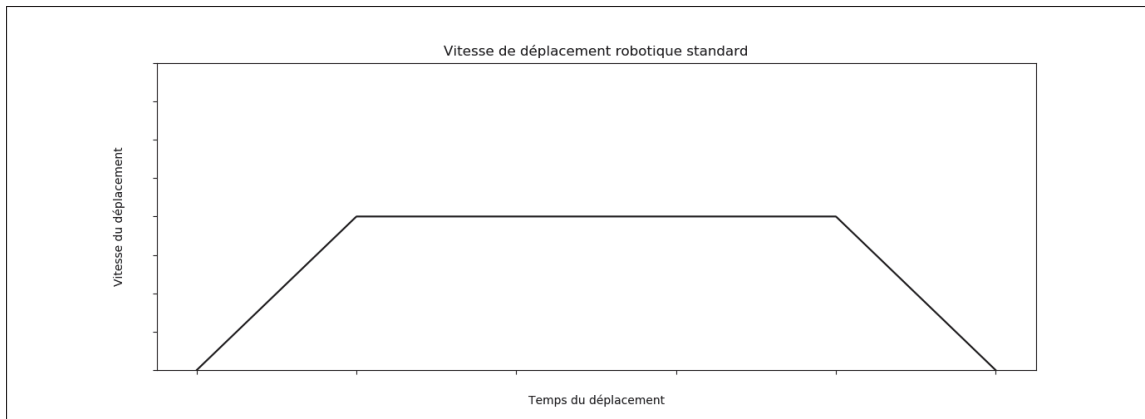


Figure 2.4 Déplacement standard robotique en vitesse

La figure 2.4 ne contient pas d'unité sur les axes, car ces unités sont variables. Elle ne fait que représenter le mouvement robotique standard dans un contexte de temps standard et une vitesse variable aussi. Ce qu'il faut retenir, c'est que le mouvement contient une période d'accélération et de décélération à chaque pose envoyée au robot.

Le déplacement robotique dans le contexte de MoveL et MoveJ fonctionne avec deux rampes, une d'accélération et une de décélération comme sur la figure 2.4. Ceci crée un mouvement discontinu, qui à faibles incréments, crée beaucoup de vibrations. Dans le cas de la recherche par inclinaison, il faut fonctionner avec de très petits incréments de déplacement et rotation. Ainsi utiliser les mouvements standards du robot ne pourrait pas fonctionner dans le contexte de cette recherche.

Il est donc primordial d'utiliser une méthode de déplacement différente à celle standard. Ainsi, des stratégies de déplacement telles que ServoJ et SpeedL peuvent être employées. En effet, ces deux types de mouvements sont utiles dans un contexte de rotation autour d'un point modulaire. Ces deux stratégies emploient un temps de fonction plutôt qu'une position fixe dans l'espace. Pour bien décrire le fonctionnement de ces deux mouvements, voici un bref sommaire de la fonction servoJ :

$$\text{ServoJ}(q, a, v, t) \quad (2.2)$$

avec :

q = Pose en fonction du TCP $[x,y,z]$

a = Accélération des joints (rendu caduque dans la version courante)

v = Vitesse des joints (rendu caduque dans la version courante)

t = Temps auquel la fonction ne retourne pas dans le programme

Avec cette programmation de base, il est possible de créer un code plus robuste, tel que créée par la Southern Denmark University (SDU, 2021). Voici la fonction ServoJ créée par SDU Robotic :

$$\text{ServoJ}(q, \text{speed}, \text{acceleration}, \text{time}, \text{lookahead_time}, \text{gain}) \quad (2.3)$$

Les éléments additionnels de ce mouvement sont le lookahead_time et le gain. Ces deux éléments permettent d'adoucir les mouvements abrupts entre deux points. Voici un bref sommaire de la fonction SpeedL :

$$\text{SpeedL}(q, a, v, t) \quad (2.4)$$

avec :

q = Vecteur de vitesse selon le TCP

a = Accélération des joints (rendu caduque dans la version courante)

v = Vitesse des joints (rendu caduque dans la version courante)

t = Temps auquel la fonction ne retourne pas dans le programme

Puisque SpeedL naturellement n'offre pas de gain, lorsque le robot se déplace en mouvement rigide, il n'est pas possible d'avoir un mouvement qui suit une bonne rotation. Le SpeedL dans le contexte d'un mouvement robotique avec contact est donc à proscrire.

2.4.2 Contrôle théorique

Le contrôle effectué par une stratégie telle que l'inclinaison suivrait le même principe que celui de la spirale. L'approche du robot se fait tout près du trou enseigné. Par la suite, le robot doit toucher à la surface, soit par un évènement de force, ou de mesurer les courants dans les joints pour atteindre son environnement rigide. La très petite compliance robotique peut permettre d'utiliser d'autres stratégies qu'un capteur d'effort pour avoir un contact environnement robot sécuritaire pour les moteurs et engrenages. Cette compliance est active, donnée par le contrôleur du robot dû à des forces externes. Le contrôleur se permet de petites variations de position avant d'entrer en faute. Dans notre cas, l'utilisation du capteur d'effort intégré dans le déplacement sera utile pour créer un évènement dans le contrôleur et ainsi avoir trouvé la surface de l'environnement. Par la suite, le robot se déplacera selon une inclinaison donnée ainsi qu'un mouvement continue. Lors du mouvement, on prendra en note la position du robot ainsi que la force appliquée au poignet. Ces deux données seront importantes pour trouver le vecteur solution donnant l'orientation du trou versus la cheville d'insertion. Le contrôle suivant montre le procédé si nous prenons la position comme donnée à analyser.

Algorithme 2.1 Contrôle de recherche de trou

```

1 Algorithme : Solution Vector Control
   Input : Force from FT300  $F = \{f_x, f_y, f_z\}$ , Moment from FT300  $M = \{m_x, m_y, m_z\}$ ,
           TCP position  $\mathcal{P} = \{p_x, p_y, p_z\}$ , rotations  $\mathcal{R} = \{r_x, r_y, r_z\}$ 
   Output : Central Hole points  $\mathcal{D} = \{d_x, d_y\}$  for analysis

2 Initialize U as Hole found variable ( $U = False$ );
3 Initialize  $p_{min}$  as a flexible variable for solution vector;
4 Get into hole position for Force Control;
5 Move to hole until  $f_z = k$ 
6 while  $U$  not True do
7   | Apply constant force TCP with  $f_z = k$ ;
8   | Rotate  $r_x$ ;
9   | Rotate  $r_y$ ;
10  | Record  $p_z$  and  $f_z$ ;
11  | if  $d_z < TCP_{initialisation}$  and  $d_{min}$  then
12  |   |  $U = True$ 
13  |   |  $p_{min} = p_z$ ;
14  | end if
15 end while
16 Create  $\mathcal{D}$  with  $p_{min}$  pose;
17 Move to hole candidate  $\mathcal{D}$  orientation
18 Move  $d_x$  and  $d_y$ 
19 while Moving  $d_x$  and  $d_y$  to hole do
20 |  $r_x, r_y$  and  $d_z$  impedance control for right orientation of axis
21 end while

```

Une fois le vecteur candidat du trou trouvé, il est possible de se déplacer dans son orientation initiale vers le centre du trou.

2.4.3 Mathématique de pose vers position

Pour avoir un vecteur solution adéquat, il faut caractériser mathématiquement les résultats pour pouvoir les analyser et trouver un vecteur direction dans l'axe du TCP. Le vecteur solution est en fait une position du robot dans l'espace qui doit être réorganisé pour envoyer des mouvements en translation dans la bonne orientation. Observons tout d'abord comment avoir la force à un point précis par le signal envoyé par le capteur d'effort.

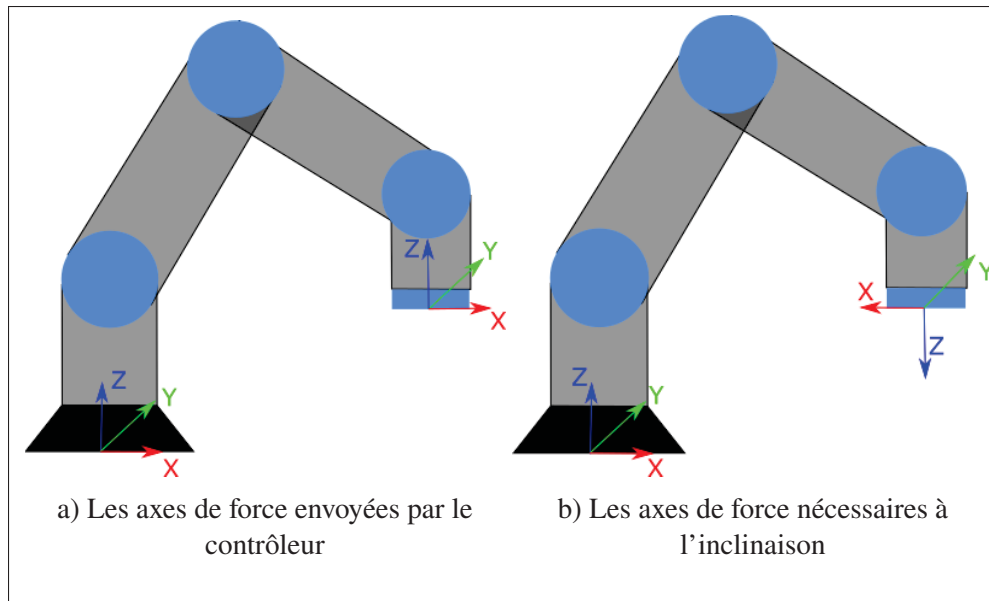


Figure 2.5 Changement d'axes nécessaires à l'inclinaison

Le besoin de modifier l'orientation de la force est nécessaire lorsque les insertions ne sont pas parallèles à la base. Il est donc essentiel d'effectuer les mathématiques suivantes pour réajuster les données en une orientation non dépendante de la surface.

$$Sig = [F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z] \quad (2.5)$$

Ces signaux sont exprimés dans le référentiel rotationnel de la base. Il faut donc les transposer au TCP. Il est possible de l'effectuer avec ces formules mathématiques matricielles :

$$TCP_{base} = \vec{q} = [D_x, D_y, D_z, \alpha, \beta, \zeta] \quad (2.6)$$

où :

D_x = Position en x du TCP en fonction de l'outil (Tool)

D_y = Position en y du TCP en fonction de l'outil (Tool)

D_z = Position en z du TCP en fonction de l'outil (Tool)

α = rotation en x du TCP en fonction du TCP de référence (base)

β = rotation en y du TCP en fonction du TCP de référence (base)

ζ = Rotation en z du TCP en fonction du TCP de référence (base)

$$Force_{Base} = \vec{F} = [F_x, F_y, F_z, 0, 0, 0] \quad (2.7)$$

$$Torque_{Base} = \vec{M} = [M_x, M_y, M_z, 0, 0, 0] \quad (2.8)$$

$$TCP_{Rotation} = \vec{r} = [0, 0, 0, \alpha, \beta, \zeta] \quad (2.9)$$

$$Force_{Tool} = \vec{F}^{(-1)} \cdot \vec{r} \quad (2.10)$$

$$Moment_{Tool} = \vec{M}^{(-1)} \cdot \vec{r} \quad (2.11)$$

$$FT_{Tool} = p[Force_{Tool}[0], Force_{Tool}[1], Force_{Tool}[2], Moment_{Tool}[0], \\ Moment_{Tool}[1], Moment_{Tool}[2]] \quad (2.12)$$

La fonction $p[x,y,z,rx,ry,rz]$ transforme le vecteur en pose pour que le contrôleur puisse l'envoyer au robot comme une pose robotique.

Le profil de force devrait ressembler, si le capteur d'effort est capable de repérer la force émise par l'environnement, à un signal sinus qui aura pour borne les deux arêtes du trou.

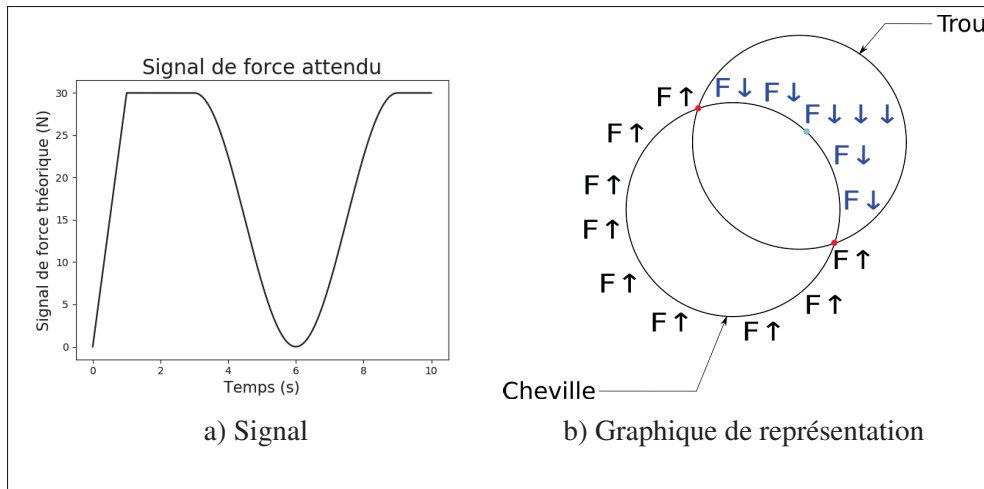


Figure 2.6 Signal théorique et illustration représentative

La pente initiale est l'inclinaison jusqu'à la position de départ. Si la surface est parfaite, le signal devrait rester constant pour atteindre la première arête du trou. Par la suite, la force diminuera lorsque la pièce aura sa rotation inscrite dans le cercle du trou. Par la suite, la force fera une pente remontante pour atteindre la seconde arête du trou. Pour une meilleure visualisation, la figure 2.6b accompagne le signal.

Le point le plus important se retrouve à l'intersection entre la cheville de rotation et le centre du trou. Si la théorie s'applique bien dans le contexte d'une expérimentation réelle, il serait possible de trouver l'orientation du trou en fonction de la position d'application de la pièce.

2.5 Expérimentations

Comme preuve de concept pour une rotation complète, il est primordial de démontrer que le robot mesure une variation de force ou de position en TCP en fonction du trou, comme démontré par les mathématiques. La variation de position, si existante, sera proportionnelle à la force. Cette variation pourrait provenir du contrôleur du robot qui ajuste sa position en fonction de la force appliquée au poignet, ou une réponse de la compliance du robot réagissant sous une force externe. Dans tous les cas, ces variations, si elles peuvent être mesurées, pourraient être exploitées par un algorithme permettant de repérer la position du centre du trou.

2.5.1 Premier test d'observation : quatre points de contact

Le premier test effectué est plus axé vers la preuve de concept. Le robot s'est déplacé autour d'un point fixe sur une pièce prismatique. Pour réaliser ce type de mouvement, il est possible de programmer directement la tablette tactile du robot aux positions souhaitées. Le robot a donc été programmé à l'aide de logiciel mis en place directement par le fabricant.

Par la suite, il est possible d'utiliser un noeud ROS (Robotic operating system) pour prendre en mesure les valeurs de positions ou de force du capteur d'effort. Similaire aux noeuds ROS, la librairie Python permet de recueillir de façon similaire les forces lors du déplacement.

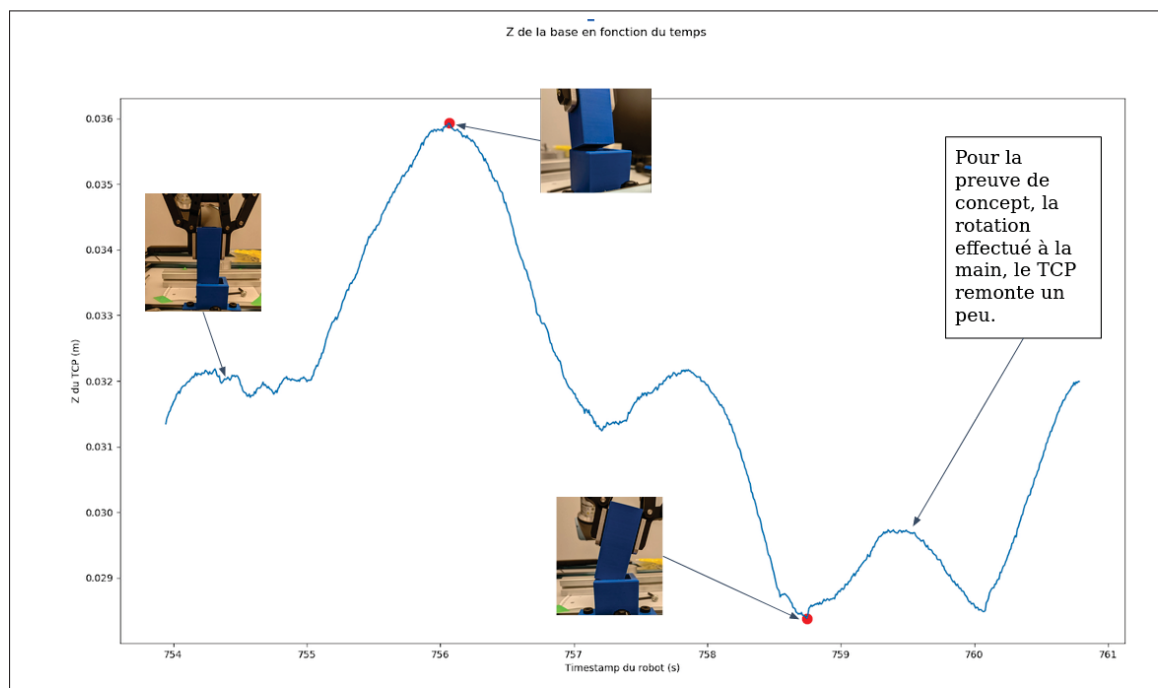


Figure 2.7 Test initial avec points pré-programmés

Le mouvement du robot était plus prismatique. On peut remarquer un premier sommet, là où la position du robot était appuyée sur la surface du prisme. Un second sommet, cette fois négatif, lorsque la pièce était insérée dans son trou. Le graphique est clair cependant. La force lorsque la pièce est insérée partiellement est plus faible que lorsque la pièce est orientée à l'extérieur. Il

serait donc possible d'exploiter cette conséquence mécanique pour trouver la position du trou dans l'espace.

2.5.2 Deuxième test d'observation : rotation fluide

La rotation effectuée en quatre points cardinaux a démontré qu'il est possible de mesurer les changements de force de contact entre une pièce et son trou respectif. La prochaine étape est d'effectuer une rotation en un mouvement fluide et de mesurer l'impact de cette rotation sur la force de contact F_z .

2.5.2.1 Cadre de l'expérimentation

Dans le cadre de l'expérimentation, il faut tout d'abord émettre les bornes de l'environnement de travail. La cheville utilisée sera d'environ 25.0mm de diamètre, pour être insérée dans un trou de 25.2mm de diamètre. Cette configuration offre un jeu de 0.2mm entre la cheville et son trou. Le matériau utilisé sera du PLA, imprimé dans une machine à impression additive. Le socle du trou est solidarisé sur la table par des boulons. La cheville est maintenue dans la main robotique. Le robot est un robot UR5, avec un capteur d'effort intégré au poignet (eSeries). Le préhenseur robotique est un Robotiq 2F-85 gripper. Durant les premiers tests, le préhenseur sera omis pour éliminer des variables telles que la rigidité de la main.

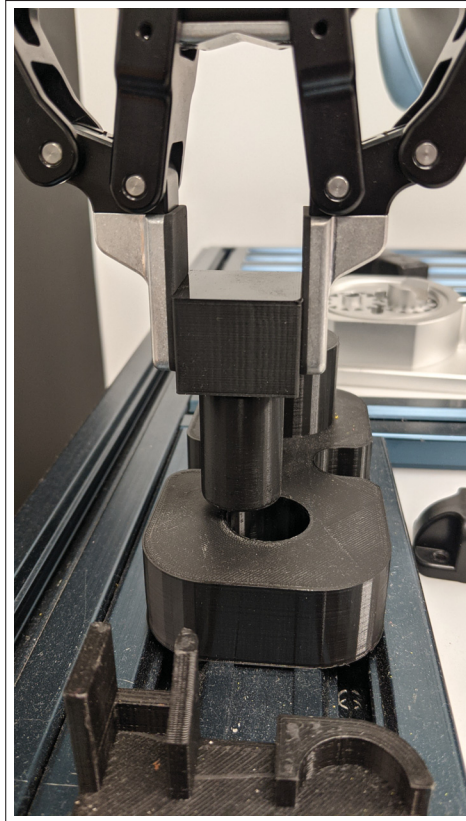


Figure 2.8 Plan d'expérimentation

La position présentée est à 50% de chevauchement. Bien que cela ne représente pas nécessairement le domaine industriel, l'exagération du chevauchement permettra une meilleure visualisation de la force en fonction de l'angle.

2.5.2.2 Résultat et discussion

Voici les résultats de la rotation fluide avec une centaine de points pour faire la rotation.

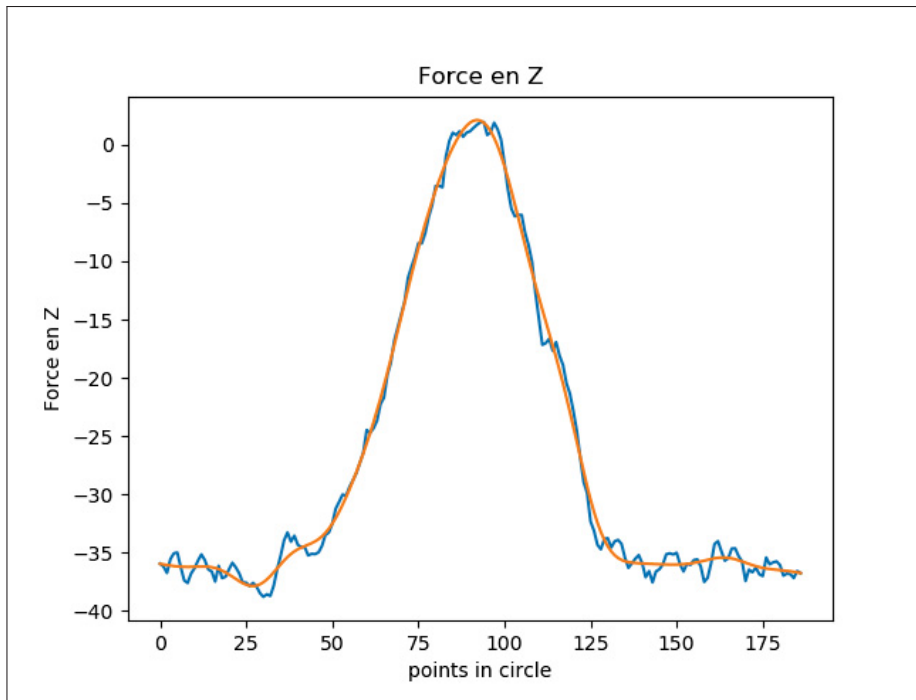


Figure 2.9 Premier test d'une rotation fluide

Le pic vers le haut est l'orientation du trou. Le système robotique a pu identifier un vecteur solution permettant de trouver l'orientation de la pièce avec un mouvement fluide. 180 points représentent 1 point par 2 degrés. Cependant, ce genre d'acquisition de données et de mouvement robotique ne fonctionne pas en incrémental. Il faut donc créer un système de fil d'exécution ou «Threads». Cette méthode de programmation permet deux programmes de travailler en parallèle.

Une programmation en fil d'exécution est bien plus intéressante à étudier, car les données envoyées par le robot sont beaucoup plus précises. Il est possible de refaire le test effectué précédemment pour analyser une seconde fois les résultats :

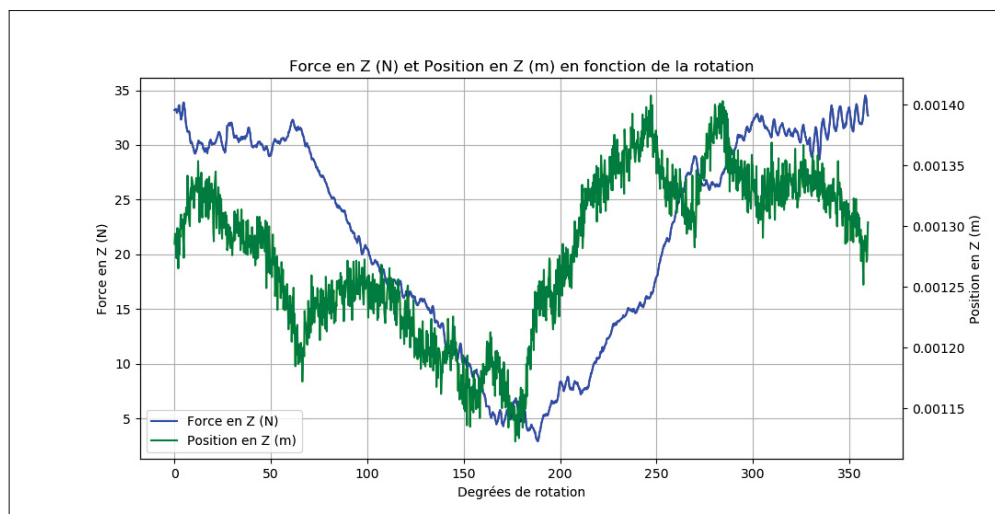


Figure 2.10 Position en Z et force en Z lors de la rotation fluide
Le minimum est la position pratique du trou

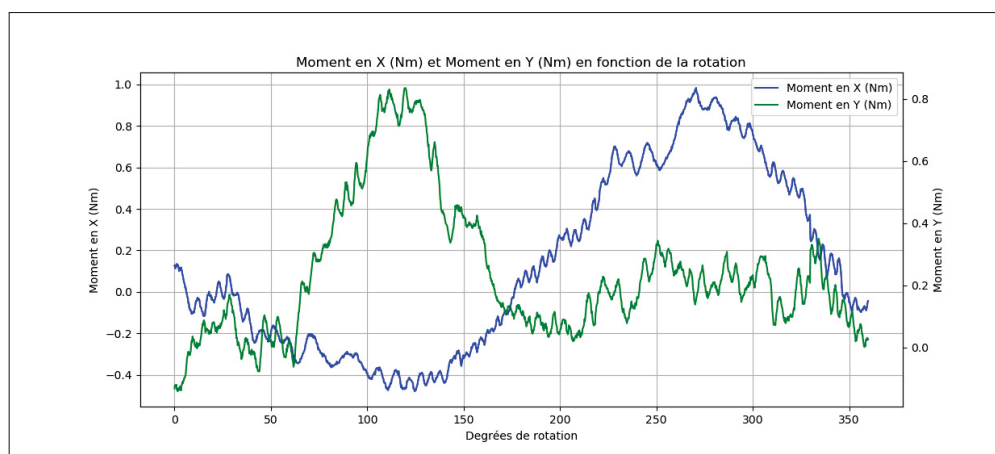


Figure 2.11 Moment X et Y lors de la rotation lors de la rotation fluide

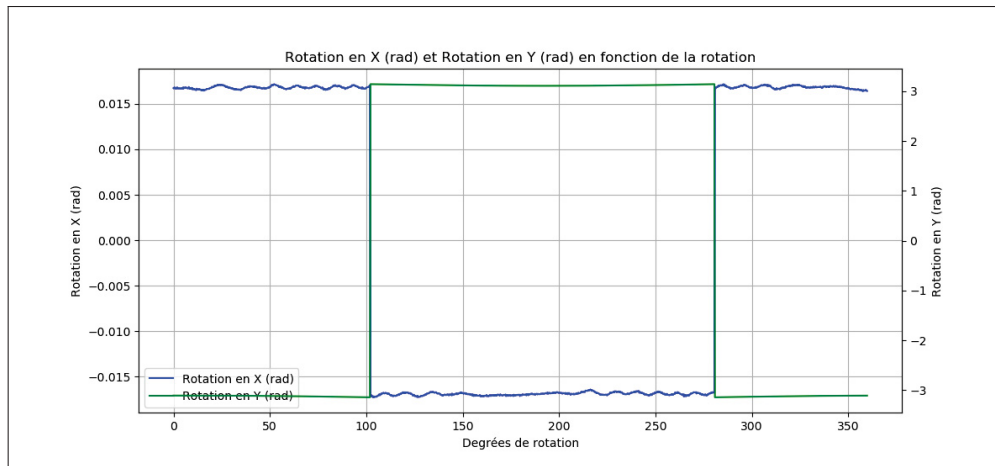


Figure 2.12 Rotation X et Y du robot lors de la rotation fluide

Avec le «threading», nous avons pu augmenter la résolution de points initiale à 1500 points, ainsi améliorer la précision tout en gardant la même vitesse.

La rotation de X et Y est en fonction de l'orientation de la base. C'est pourquoi ils sont binaires (entre 0.016 rad et -0.016 rad). On peut réorienter les rotations avec la même formule que la force et les moments, avec leur orientation de la base vers le TCP. Cela donne un graphique qui effectue deux signaux sinusoïdaux :

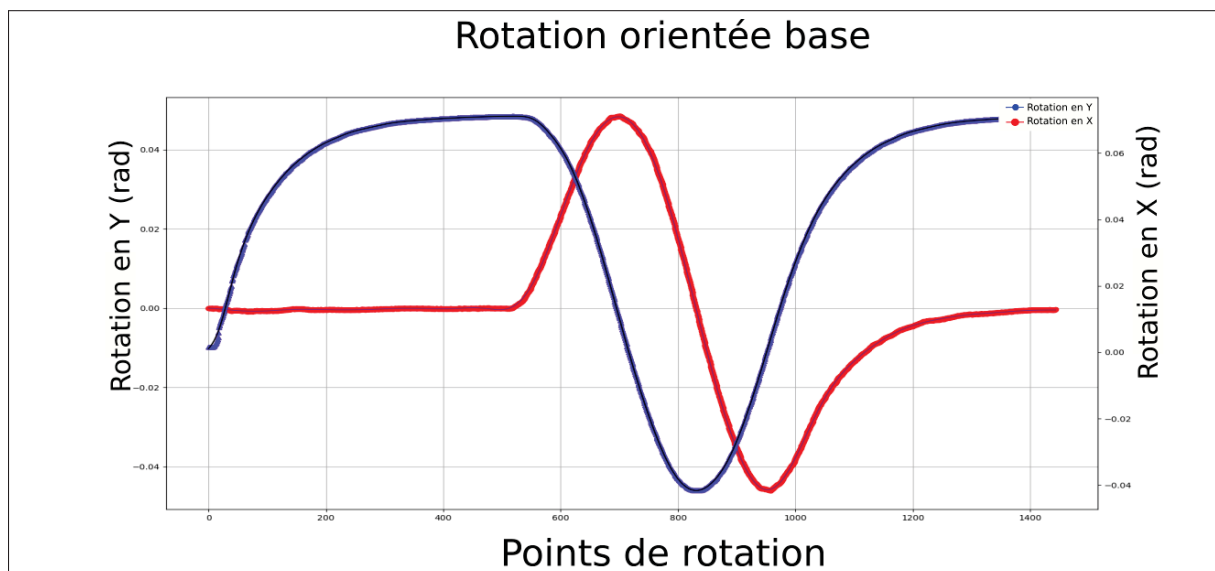


Figure 2.13 Rotation avec pose inverse

Les deux rotations ont leur maximum là où la rotation est à son minimum pour les autres axes, ce qui est représentatif d'une rotation autour d'un point standard.

Toutes les données du robot sont présentées ci-dessus. Le premier graphique soit la figure 2.10 représente les deux données primaires pour trouver le vecteur solution. Il est possible de repérer le minimum de la force de contact se retrouve aux alentours de 180 degrés, à moins de 5N. La position en Z la plus faible est d'environ 0.00115 mètre (1.15mm) aux alentours de 177.5 degrés. La différence entre les deux s'explique par deux facteurs. Le premier est le contrôle du robot (le PID intégré au robot) qui ajuste la position du TCP lorsque la force de réaction est trop grande, ainsi que l'inertie du capteur d'effort. Le capteur d'effort répond plus lentement aux effets de force externe.

2.5.3 Élimination du préhenseur de l'équation : environnement rigide

De toute évidence, la pince peut être un élément de l'environnement qui peut causer une impédance au système. Il est donc intéressant d'effectuer un test sans aucun actionneur ni élément possible à modifier l'impédance des capteurs de position et d'effort sur le robot. Pour ce faire, il faut effectuer un test de rotation autour d'un point sans aucun outil au poignet robotique. Pour analyser cette approche, une surface rigide pour recréer un environnement lors d'une application normale est importante. Elle permet d'éliminer toute forme de variations possibles de positions dues à l'environnement sur le robot. Le robot a donc été positionné à 90° du trou sans pince et a effectué ses rotations avec le centre du poignet du robot comme point de rotation. L'importance de ce test nous permettra de prendre en considération la position Z comme une variable qui peut être la représentation de la géométrie du trou dans l'espace. Les deux graphiques représentent le robot avec les données acquises en force puis en position respectivement avec un filtre passe bas pour réduire le bruit :

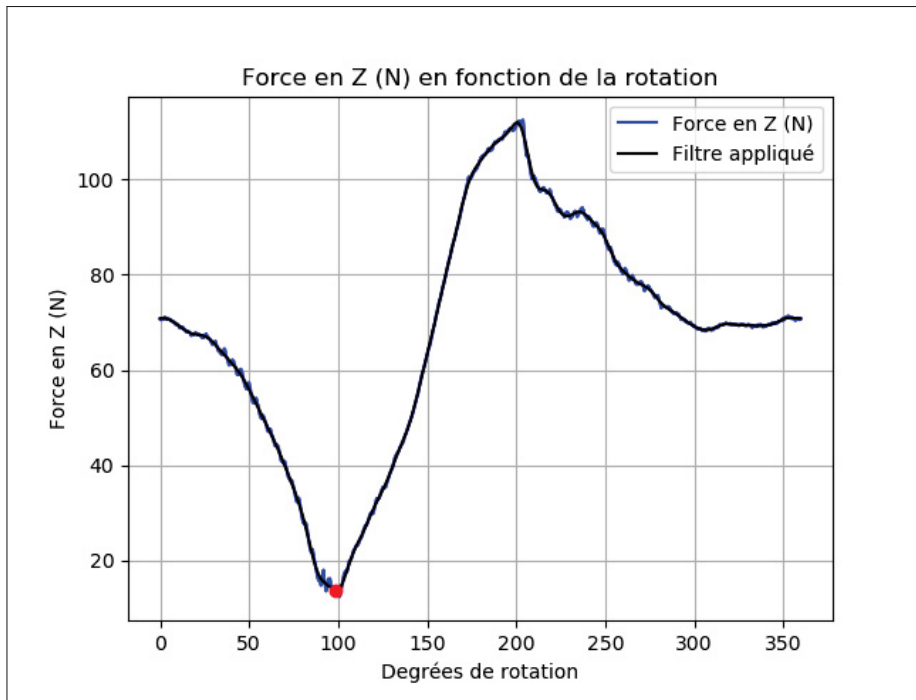


Figure 2.14 Expérimentation sans préhenseur en force

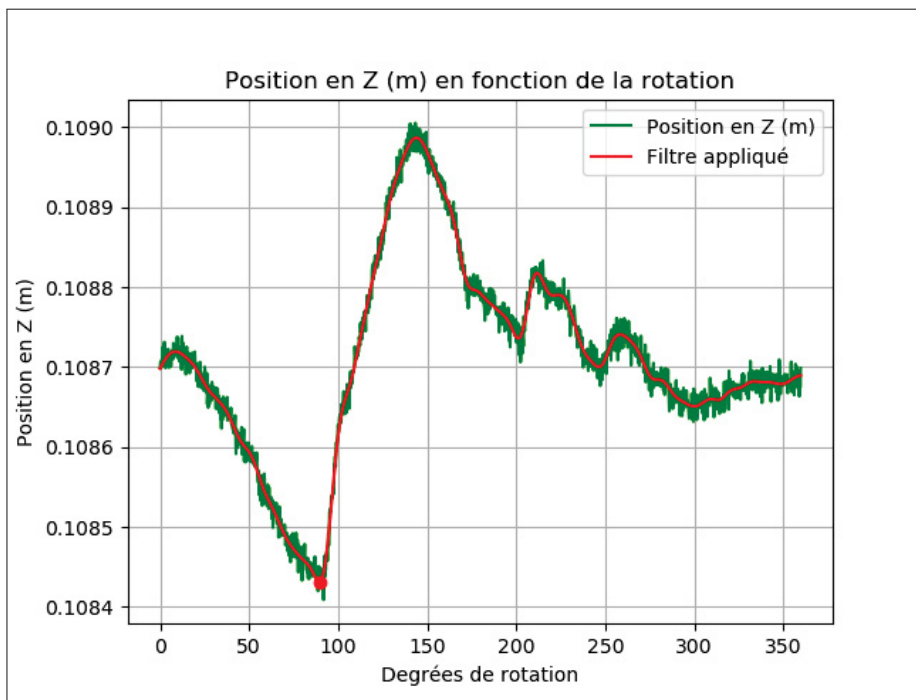


Figure 2.15 Expérimentation sans préhenseur en position

Le point rouge représente le minimum obtenu par la recherche

Les deux graphiques démontrent clairement que le robot a découvert la plus faible force et la position en Z du robot la plus faible aux alentours de 90° . La force a établi une position du trou à 97.38° tandis que la position en Z a établi le trou à 89.38° .

2.5.4 Mesure des deux approches possibles : en force au TCP ou en position du TCP

Deux approches ont été avancées pour trouver le vecteur solution. La force, qui mesure une conséquence du mouvement et le mouvement du robot, qui réagit aux forces de l'environnement.

La façon classique d'aborder ce problème serait d'utiliser un capteur d'effort, soit un appareil impédant qui mesure les variations de forces ainsi que la force appuyée sur le poignet robotique. En effet, la force appliquée sur le poignet est entre autres, le manipulateur robotique, l'environnement et les accélérations causés par le déplacement. L'approche en force semble être en retard versus la vraie valeur mesurée lors de déplacement.

L'approche en position se distingue par l'absence de capteur d'effort ou autre outil externe. Par le fait même, les capteurs d'efforts ont une boucle de performance qui peut différer de celle du robot. L'approche en position semble être plus précise à priori, mais le contrôle interne du robot pourrait affecter la précision de la stratégie à plus haute vitesse. Si la vitesse du robot dépasse la vitesse de contrôle, il ne sera pas possible de prendre en compte la position du robot comme valeur adéquate pour trouver un vecteur solution.

Pour comparer les deux approches, il est possible d'effectuer un filtre passe-haut (High Pass Filter) pour mesurer l'impact du bruit lors de mouvement d'une position de contact entre le robot et l'environnement. Pour ce faire nous pouvons prendre les données de l'image 2.10 et passer un filtre haut :

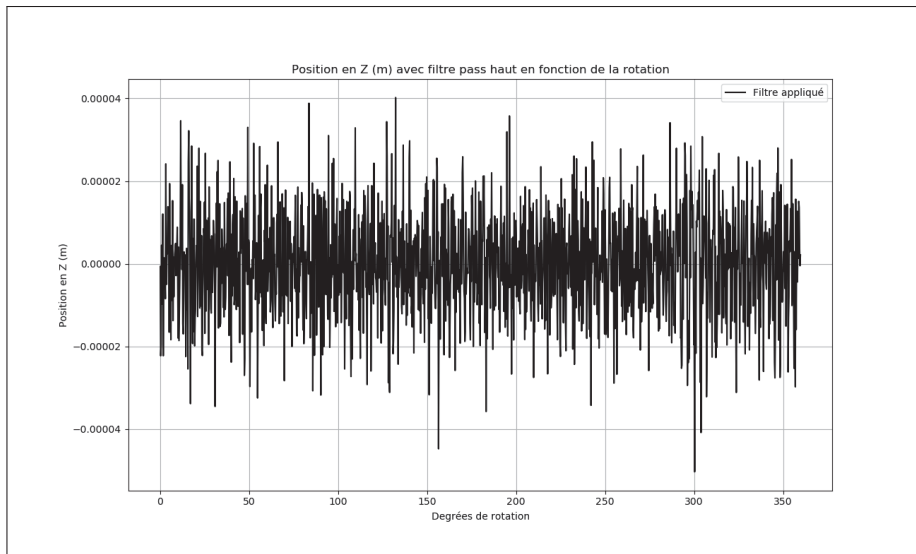


Figure 2.16 Filtre passe haut appliqué sur la position du robot.
Notez que la moyenne du bruit donne environ 0, du bruit blanc

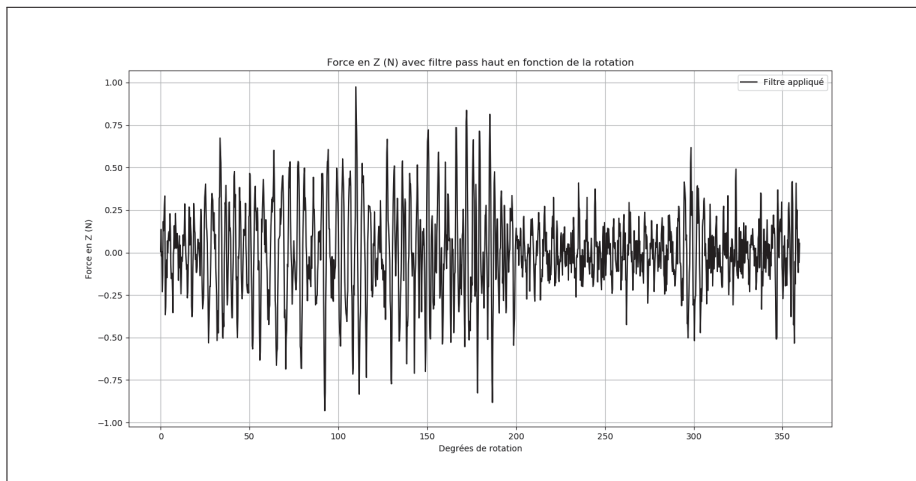


Figure 2.17 Filtre passe haut appliqué sur la force du robot.
Notez que la moyenne du bruit donne environ 0 aussi.

Le signal de force était de 0.00020m avec un bruit de 0.00006m, donc nous pouvons faire un ratio entre le signal et le bruit :

$$\text{Ratio} = \frac{\text{noise}}{\text{Signal}} \quad (2.13)$$

La position a un ratio de 3% du signal en bruit. La force avait un signal de 30N avec un bruit de 1N, ce qui donne 3.33% de bruits pour la force. Malgré que le spectre de force semble plus bruyé, l'analyse de vibrations ne permet pas avec certitude de discréditer la force ou la position en fonction du bruit dans les capteurs.

Les deux approches démontrées lors des expérimentations sont valides pour trouver la position du trou avec quelques différences notables. Tout d'abord, l'expérimentation s'effectue avec un capteur d'effort provenant du poignet robotique d'UR. Ce genre de capteur n'est pas dans toutes les applications de robotique collaborative. En effet, la plupart des robots considérés comme des cobots n'ont pas de capteur d'effort installé sur le robot à la manufacture. L'approche en force sera donc fortement déconseillée surtout si la valeur économique d'un robot du style cobot est importante pour l'entreprise.

2.5.4.1 Différence du point de vue mathématique

D'un point de vue mathématique, les deux valeurs représentent une différence, mais la position est une conséquence et la force est une cause. Dans le contexte d'un D.C.L (diagramme de corps libre), la force appliquée par un environnement rigide sur une pièce maintenue dans un poignet aura la forme de l'image 2.18 :

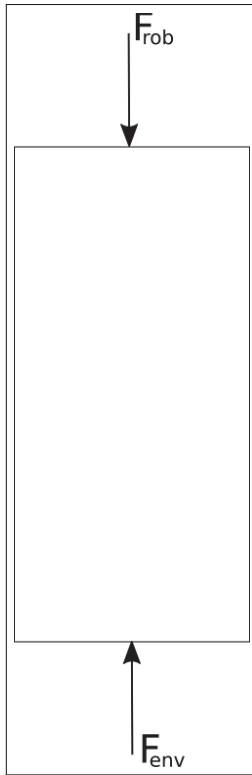


Figure 2.18 D.C.L à plat.

Suite à une inclinaison, la force appliquée sur la cheville prendra la forme d'un vecteur qui suit une résultante qui est dépendante de sa position dans l'espace. Par exemple, lorsque la pièce est inclinée sur une surface plane, la force résultante reste la même que le premier D.C.L, ce qui change les forces dans le poignet robotique.

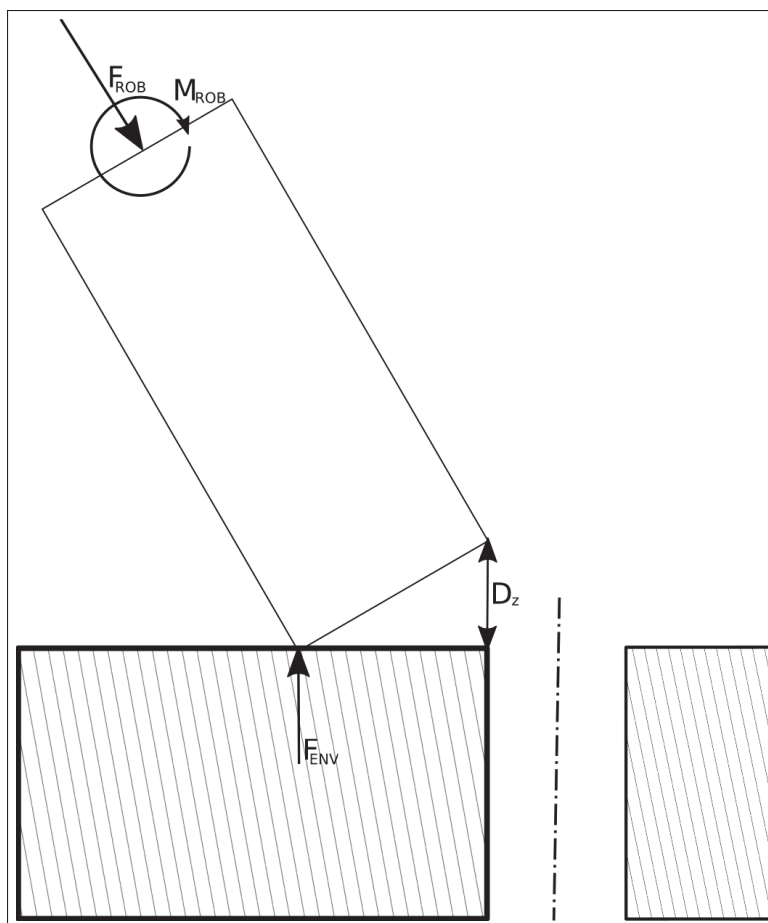


Figure 2.19 D.C.L force inclinaison sur plat.

Lorsque la pièce se retrouve en partie dans un trou, le D.C.L de force devient plus intéressant en ce qui a trait à la localisation. En effet, la force résultante sera une force beaucoup plus faible dans l'axe des Z . Cette force diminuée peut être mesurée et enregistrée par le contrôleur. La force minimum sera lorsque la cheville sera inclinée vers le centre du trou. On peut observer une fonction sinusoïdale de la force en fonction de la rotation de la cheville sur la surface.

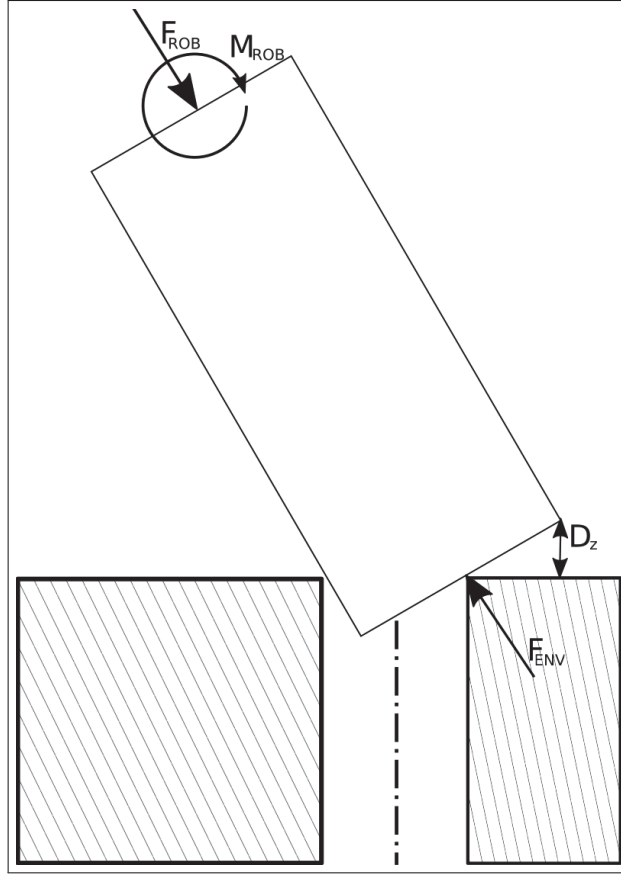


Figure 2.20 D.C.L force inclinaison dans un trou.

Le contrôleur prend en mesure les forces appliquées au poignet robotique en fonction de la position en Z demandé par le programme. Le contrôleur, tout dépendant de la force mesurée, peut envoyer un signal de lever ou abaisser le robot, avec un contrôleur actif très rigide. Un contrôleur actif PD tel que vu avec *Gosselin (2006)*, est représenté par la fonction suivante :

$$u_x = \ddot{x}_d + K_v(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_p(x_d - x) \quad (2.14)$$

Il y a donc deux façons d'utiliser l'équation de contrôle pour mesurer la position du trou : soit d'utiliser la position et la variation $x_d - x$ de cette dernière pour prendre une orientation qui sera près du trou, soit de prendre la force qui est la résultante.

2.5.5 Comparaison initiale entre la recherche en spirale et le TCP

La spirale est la stratégie la plus utilisée en robotique collaborative de sa nature flexible et sa permissivité d'avoir un vaste champ d'inexactitude. Lors des tests préliminaires, une étude portée sur la vitesse d'assemblage entre la spirale et l'inclinaison est intéressante pour comparer la performance versus la vitesse d'exécution.

2.5.5.1 Étude de la recherche en spirale

Pour faire la recherche en spirale, la programmation va demander tout d'abord les positions requises pour le bon fonctionnement, comme la position d'approche ainsi que la position du fond du trou. Par la suite, la fonction demande principalement le pas de la spirale ainsi que le rayon maximum que la spirale va atteindre avant d'échouer. Il est possible d'observer le déplacement du robot avec un mouvement standard tel que celui présenté avec l'image ci-dessous :

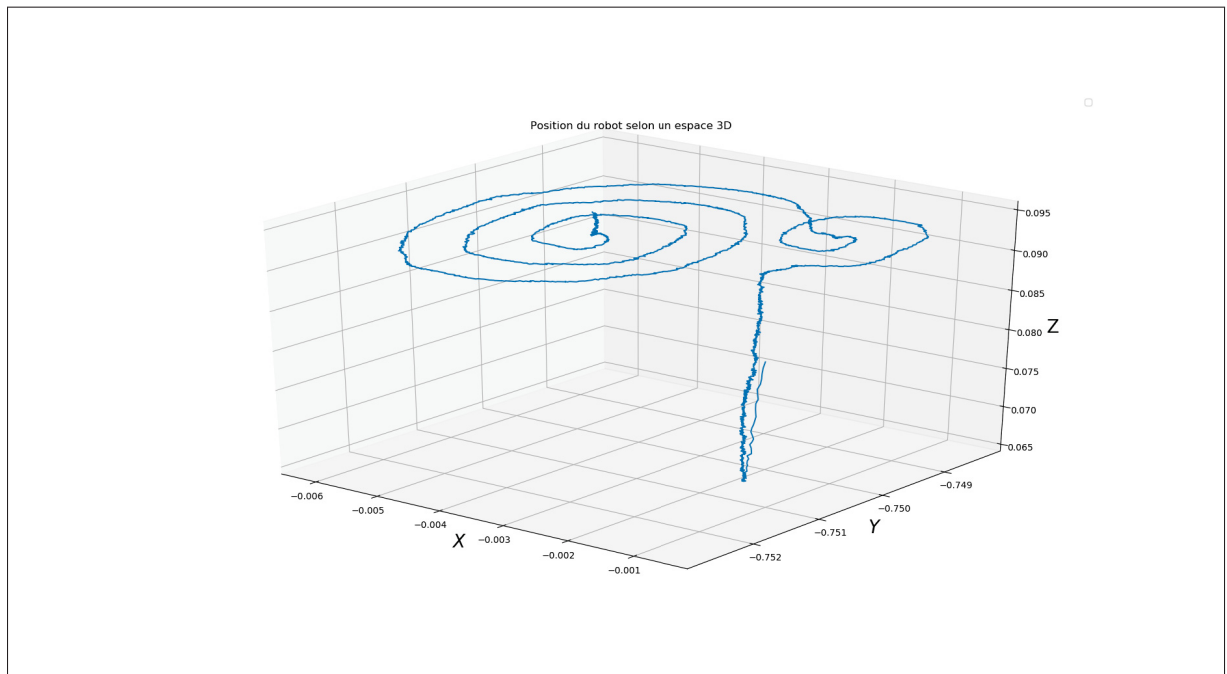


Figure 2.21 Mouvement en spirale pour insertion.

Le contrôle s'occupe de déplacer le robot avec une force constante en Z du TCP de l'outil.

Avec les paramètres standards industriels (ROB, 2021), les résultats obtenus sont reportés au tableau 2.2

Tableau 2.2 Moyenne des insertions en spirales

décentrage (mm)	temps moyen (s)	Échecs
1	4.28	0
2	6.51	0
3	7.84	1
4	12.32	3
5	12.87	3
6	15.86	3
7	22.23	4
10	34.06	4

On peut observer que la moyenne augmente avec une progression non linéaire en fonction du décentrage de la cheville et du trou. La mesure du temps a été prise lorsque le mouvement en spirale a été initialisé jusqu'à la fin du mouvement, lorsque le robot démarre son mouvement d'insertion en Z. On omet donc les mouvements hors recherche de trou. Avec ce tableau, il est possible de construire une courbe suivant une équation polynomiale :

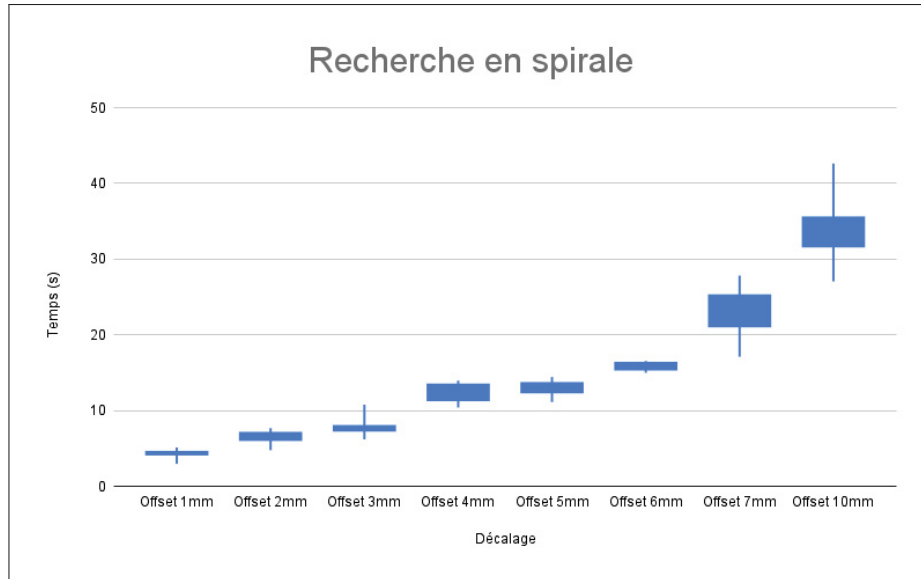


Figure 2.22 Courbes des résultats de la recherche en spirale.

On peut relever deux points intéressants. Tout d'abord, lors de grands décalages, les valeurs deviennent disparates. Ceci est dû au mouvement de spirale. Si le robot ne capte pas le trou, il fera un cercle additionnel, augmentant considérablement le temps d'opération. La courbe de tendance est d'ordre 2, puisque que la spirale fonctionne avec une formule mathématique qui régit comme suit :

$$x(t) = a \cdot t \cdot \cos(t), y(t) = a \cdot t \cdot \sin(t) \quad (2.15)$$

$$x^2 + y^2 = a^2 [\arctan(y/x)]^2 \quad (2.16)$$

Il est donc possible d'inférer que la position d'un point x_n dans la spirale est au carré d'une autre position x_{n+1} . La spirale est donc dépendante de la précision de la position initiale de l'insertion.

2.5.5.2 Étude de la recherche en inclinaison

Les résultats de l'insertion en inclinaison se sont faits selon les mêmes bornes d'expérimentation de l'insertion en spirale. Simplement dit, le temps est pris au tout début de la recherche jusqu'au mouvement de l'insertion dans le trou. Pour effectuer la recherche avec une résolution intéressante

de points, la stratégie présente 1500 points pour la rotation complète. Les tests sont normalisés à 100 essais pour chaque jalon. Aussi, la même combinaison de cheville et de trou a été utilisée pour uniformiser les résultats. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2.3 Moyenne des insertions en inclinaison

décalage (mm)	temps moyen (s)	Échecs
1	4.51	18
2	4.81	20
3	5.03	19
4	5.45	32
5	5.73	19
6	5.92	24
7	6.12	14
10	7.54	29

Les résultats peuvent être ensuite établis sur une courbe comme les résultats de l'insertion en spirale.

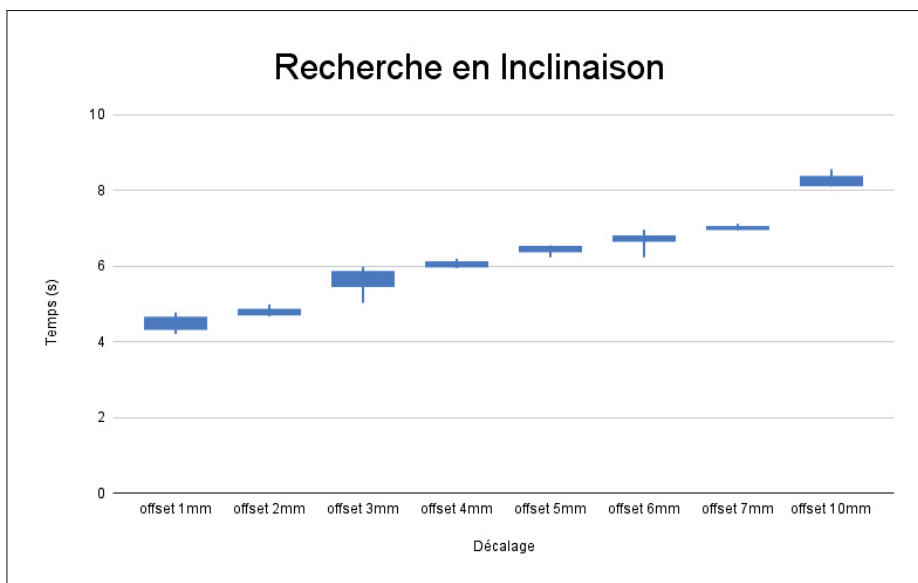


Figure 2.23 Courbes des résultats de la recherche en inclinaison

La courbe de la figure est beaucoup plus linéaire que la courbe de la recherche en spirale. Ceci est dû à la linéarité du mouvement de solution lorsque l'inclinaison a trouvé un vecteur direction. Les résultats sont aussi prometteurs. En effet, sans aucune optimisation, la rapidité de la recherche de trou permet à la stratégie d'atteindre des résultats similaires à bas décalage, et bien supérieurs à haut décalage. En moyenne, des 100 essais réussis, le décalage de 5mm a donné une moyenne de 5.73 secondes, en comparaison des 12.87 secondes de la spirale, soit une amélioration de 55,47% sur la stratégie en spirale employée par les robots collaboratifs. La précision de la stratégie reste à être améliorée. Il y a minimum 14 échecs pour chacune des étapes, ce qui veut dire un taux de succès variable entre 83,33% pour les plus petits décalages à 71,4% pour les plus grands. Il est possible de condenser les erreurs à des problèmes précis. Les erreurs sont principalement de 3 types. Le premier type d'erreur est relié aux problèmes géométriques du trou ou de la cheville. Cela cause une erreur du vecteur direction, car le système est très sensible aux variations.

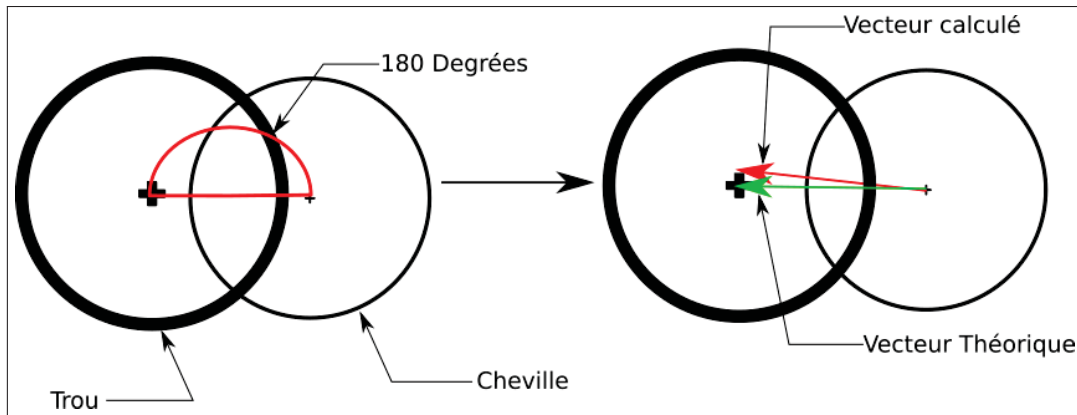


Figure 2.24 Erreur de vecteur calculée

L'image 2.24 montre un graphique où la pièce d'essai était à 180 degrés du trou. L'approche utilisée est celle de la position en Z, puisque la précision est plus intéressante à des vitesses plus lentes telles que mentionnées plus haut :

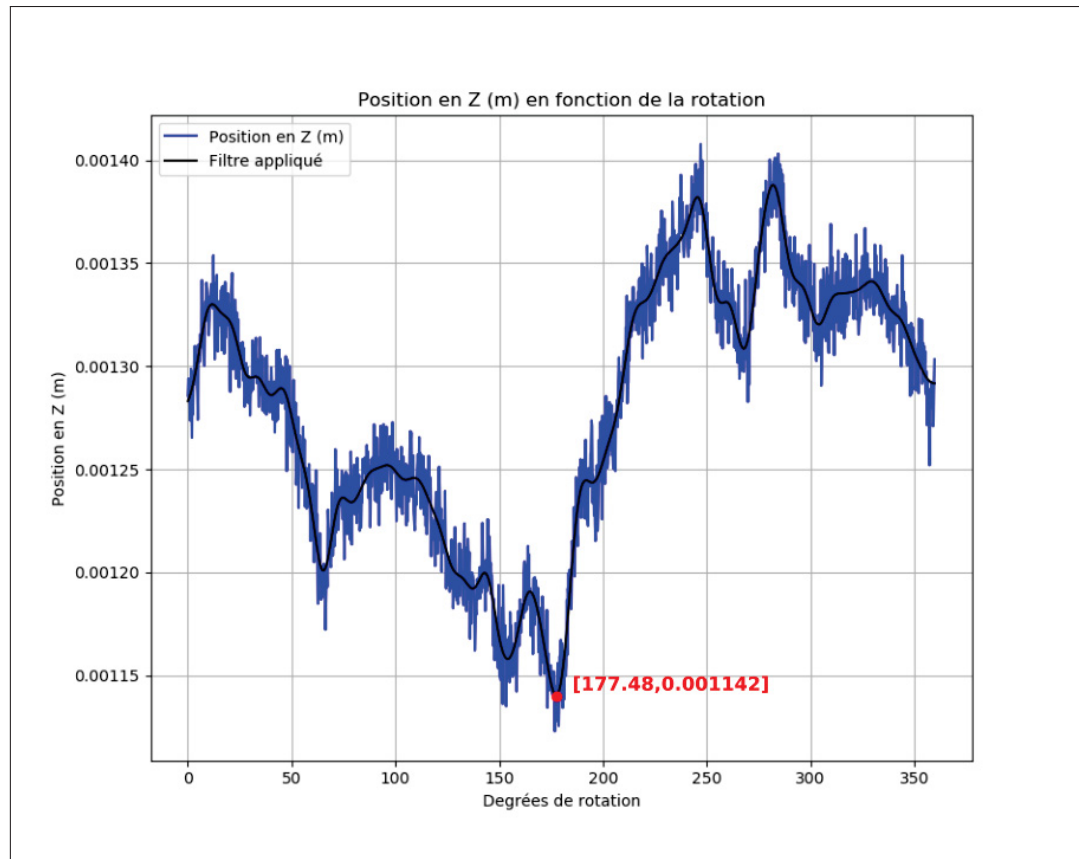


Figure 2.25 Position du trou à 180 degrés, Δ angulaire de 2.52.

L'erreur angulaire de 2.52 degrés n'est pas négligeable lorsque le décalage dépasse 10% du diamètre. Ceci explique pourquoi les essais qui ont échoué se retrouvent principalement avec la déviation angulaire.

La deuxième erreur est une erreur d'installation. Pour que le programme fonctionne adéquatement, l'installation doit avoir le TCP au bout de la pièce d'installation. Cette erreur est appelée hauteur de TCP. Lorsque le TCP n'est pas ajusté correctement (En Dz principalement), il n'offre pas la résolution adéquate pour un bon vecteur solution. Cette erreur survient principalement lorsqu'une cheville différente est installée.

Finalement, la troisième erreur principale était un contact trop fort. Si la force retenue par le robot $F_{Resultante}$ est trop grande, le robot tombe en arrêt. Selon les tests effectués durant les tâches d'insertions, une force qui dépasse 60N semble mettre en arrêt le robot.

Tableau 2.4 Définition d'erreur dans la stratégie

Type d'erreur	Nombres d'évènements
Mauvais angle	113
Hauteur de T.C.P mal ajustée	46
Contact trop fort	16

En regroupant les erreurs, nous pourrions mieux cerner des solutions pour améliorer la stratégie et ainsi la rendre plus performante sur plusieurs types d'environnement de travail. Les erreurs seront discutées lors des chapitres suivants. Ils seront traités pour améliorer la performance de l'algorithme de solution.

CHAPITRE 3

APPROFONDISSEMENT DES PARAMÈTRES

Afin d'approfondir la stratégie, il faut définir les variables appliquées dans la performance générale d'une stratégie robotique. Tout d'abord, les différentes stratégies sont toujours comparées à leur homologue présente sur le marché. Puisque la recherche en spirale est la plus utilisée dans l'industrie actuellement, ce sera ses paramètres qui seront mis de l'avant.

Le premier paramètre important est la vitesse d'exécution. En effet, si une stratégie se veut compétitive, elle doit présenter une amélioration de la vitesse d'exécution dans le domaine temporel. Le chapitre présentera les avancées en vitesse du système lors des expérimentations, afin d'être plus compétitif que l'insertion en spirale standard.

Le deuxième paramètre est la précision. La précision dans le domaine de l'insertion peut même être considérée comme binaire. Soit une insertion est réussie ou elle est ratée, quelque soit où se trouve le trou en relation avec la cheville d'insertion. Les nuances de la précision se retrouvent avec la plus petite valeur de dégagement entre la cheville et son trou. Le chapitre présentera les différentes stratégies employées pour améliorer la résolution du système sans créer ou conceptualiser un système mécanique qui répondrait au besoin. Le but premier est de pouvoir réaliser un tel système avec le moins possible d'ajouts externes au robot.

Le troisième paramètre est le paramètre de performance. Par exemple, si le robot est terriblement précis, mais que la surface d'acquisition ne l'est pas, il faut trouver une stratégie qui sera assez flexible pour permettre une certaine variation entre un trou théoriquement parfait et fabriqué avec les erreurs qu'entraîne la fabrication moderne. Par exemple, un chanfrein mal fabriqué (figure 3.1) entraînera un pic dans la force qui n'est pas nécessairement voulu dans le système. Le chapitre présentera les concepts et les idées développés pour assurer l'insertion facile d'une cheville, sans se fier à une recherche de trou lente.

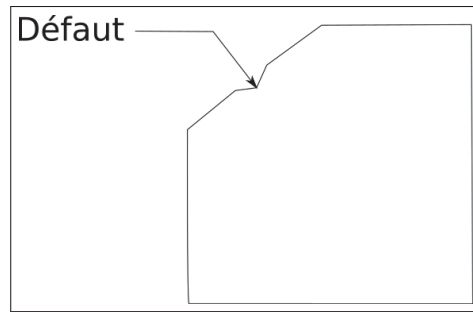


Figure 3.1 Chanfrein avec défaut

3.1 Vitesse de déplacement : Acquisition de données réduites

Dans cette section, le programme sera testé avec de moins en moins de points pour faire le déplacement. Puisque le robot fonctionne avec une fréquence de contrôle à 500 Hz (Eseries), il est possible de réduire le nombre de points acquis lors du déplacement, augmentant ainsi la vitesse de déplacement. Ce genre de stratégie se travaille en dépit du déplacement du robot. Si, par exemple, on réduit le nombre de points pris pour effectuer le cercle à quatre, le cercle sera plutôt un carré. En somme, la stratégie perd de la résolution au profit de la vitesse. Lors de l'expérimentation pour accélérer la vitesse, le but était d'observer à quel point il était possible de se déplacer en inclinaison rapidement avec une efficacité similaire au premier test, c'est-à-dire environ 70% d'efficacité pour les insertions.

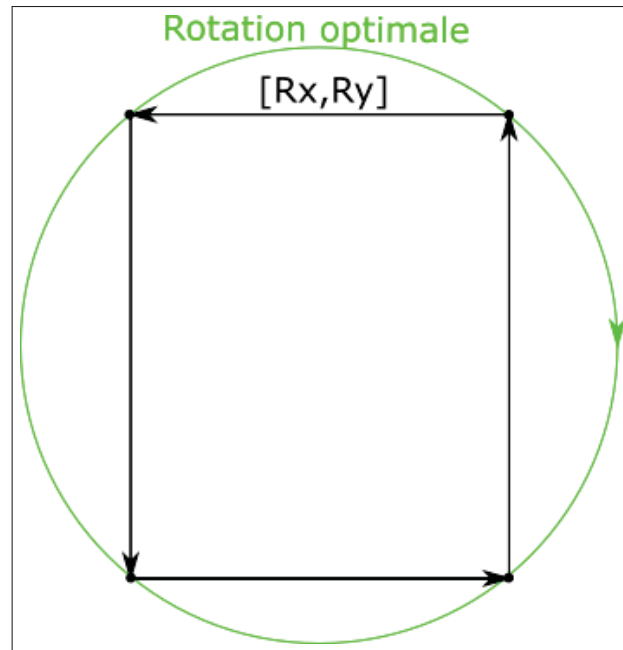


Figure 3.2 Points d'acquisition et de position réduite : réduction de la résolution de l'inclinaison

Les résultats avec l'efficacité lors des insertions avec résolution réduite sont présentés dans le tableau 3.1 :

Tableau 3.1 Réduction du nombre de points d'acquisitions et leur effet sur la vitesse et la performance

Nombre de points d'acquisition	Temps d'insertion (s)	Succès (%)
1500	5.03	89
1250	4.58	80
1000	4.09	75
750	3.62	70
500	3.17	39
250	2.97	7

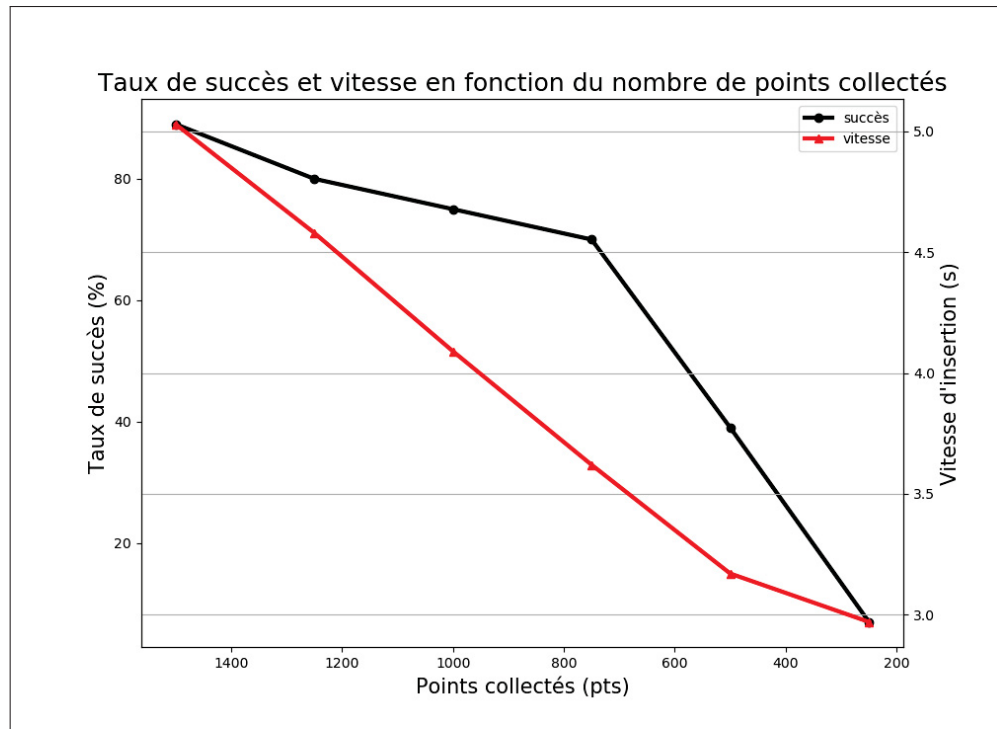


Figure 3.3 Points d'acquisition et de position réduite : résultats de vitesse et succès

Un phénomène intéressant s'est produit lorsque le système s'est retrouvé sous la barre des 750 points d'acquisitions. Le système est tombé avec une réaction beaucoup plus similaire à un mécanisme ressort sans amortisseur normal, avec une réponse en vibration relativement classique. Le phénomène s'explique par la rapidité auquel l'environnement applique ses forces de réaction et le contrôle du robot qui ne peut pas réagir à temps.

3.2 Précision de l'opération : angle d'inclinaison

Le principal problème que l'insertion par inclinaison présente est la précision. À titre d'analogie, imaginons un lancer de fléchettes dans le noir. Si nous connaissons la position de la cible, mais que nous sommes aveugles, nous allons certainement lancer la fléchette dans la direction générale de la cible, mais sans nécessairement en atteindre le centre. Dans la même veine, la technique de l'inclinaison offre un vecteur directionnel qui est précis vers le centre du trou, mais plusieurs variables s'accumulent pour créer une petite erreur qui peut compromettre la position du centre versus le robot. Afin de réduire les variables appliquées au système, nous avons effectué des

expérimentations qui ont mesuré l'impact de certains de ces paramètres sur la précision absolue du robot. La vitesse de déplacement en fonction de la précision du point a permis de cerner un des problèmes, soit la vitesse affecte grandement la précision. La deuxième hypothèse est que l'angle d'inclinaison aura un effet sur la précision de l'insertion. Une expérimentation est donc proposée pour bien mesurer l'impact sur l'exactitude du vecteur solution.

3.2.1 Effet de l'inclinaison sur l'insertion

Augmenter ou réduire l'inclinaison serait un grand facteur de la précision du vecteur. En effet, selon le DCL de l'inclinaison (figure 2.20), plus l'angle θ est prononcé, plus la valeur de la force F_z résultante sera élevée, du principe de la réaction de l'environnement rigide sur le robot avec une certaine forme de contrôle en impédance. D'augmenter la force permettrait une meilleure pente d'insertion et une meilleure définition du résultat. Cependant, la robotique collaborative et l'industrie de l'assemblage ne permettent pas des forces de contact élevées. Donc pour pallier ce problème, il faut donc trouver l'angle optimal pour la situation.

L'angle θ dans le cas présent est l'angle d'inclinaison entre la cheville d'insertion et la surface plane.

3.2.1.1 Résultat et analyse de l'inclinaison

L'expérimentation a utilisé le même environnement de travail. La force et la résolution en fonction de l'angle est présenté dans le tableau 3.2 :

Tableau 3.2 Force et succès en fonction de l'angle

θ (deg)	Force maximale moyenne (N)	Taux de succès (%)
0.5	9.32	35
1.0	14.76	39
1.5	18.86	49
2.0	20.18	68
2.5	24.43	88
3.0	28.56	92
3.5	36.87	94
4.0	45.36	95

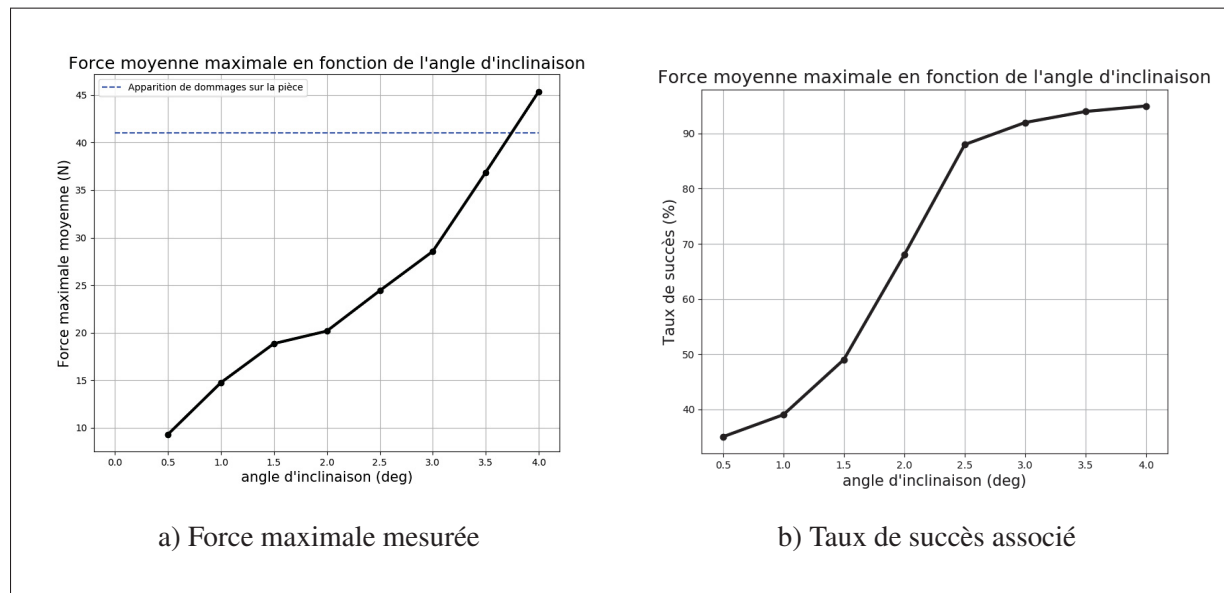


Figure 3.4 Signal théorique et illustration représentative

Selon les tests effectués, entre 2.5 et 3 degrés semble être idéal pour mesurer avec précision la position du trou. Au-delà de 2.5 degré, l'inclinaison n'offre pas une amélioration considérable, mais la force continue d'augmenter. La plupart des applications en robotique collaborative effectuent un contact rigide aux alentours de 10N. Avec les tests présents, les pièces en PLA ont eu des marques apparentes avec des forces au-delà de 41N, en dépassant la résistance élastique du matériau.

3.3 Performance de l'algorithme

L'algorithme, bien qu'optimisé dans le contexte de la mécanique de l'insertion, doit être également optimisé en programmation. Il pourra ainsi permettre de la flexibilité pour l'utilisateur. L'idée ici n'est pas de créer une solution clé en main pour une stratégie d'insertion, mais plutôt de comprendre le fonctionnement d'un programmeur novice ou avancé dans le contexte de l'assemblage.

3.3.1 Créer une solution générale d'insertion avec une marge d'erreur

Il sera question dans cette section d'un élément important de ce genre de stratégie. En effet, les expérimentations précédentes ont démontré que la recherche en inclinaison donne un vecteur d'orientation strict et direct. Ce vecteur, une seule solution, ne prend pas tout à fait en compte des petites erreurs géométriques au niveau du trou ou de la cheville, ce qui veut dire qu'un chanfrein ayant une entaille ou toute autre défectuosité aura un impact négatif sur la performance d'une telle recherche de trou. Il est donc impératif de trouver une solution pour accommoder l'erreur angulaire possible due à l'irrégularité des pièces.

Tout d'abord, la solution donnée par ce genre d'algorithme peut être augmentée par les éléments qui améliorent la précision de la stratégie. La précision, bien que souhaitée dans tous les cas, ralentit le processus d'assemblage. Augmenter la précision de l'algorithme ne peut pas non plus régler les problèmes de géométrie inhérents aux pièces de travail. De ce fait, la solution proposée ici est un sous-produit de la recherche en spirale. Elle utilise l'avantage de la recherche en inclinaison de connaître l'orientation de la pièce dans le plan cartésien. Avec ce vecteur orientation, il est possible de former un secteur de possible solution à la position du trou, beaucoup plus précise qu'une spirale. Cette zone se retrouve entre deux vecteurs décalés de façon angulaire en opposition au vecteur direction, de sorte que l'erreur commise lors des expérimentations est prise en considération.

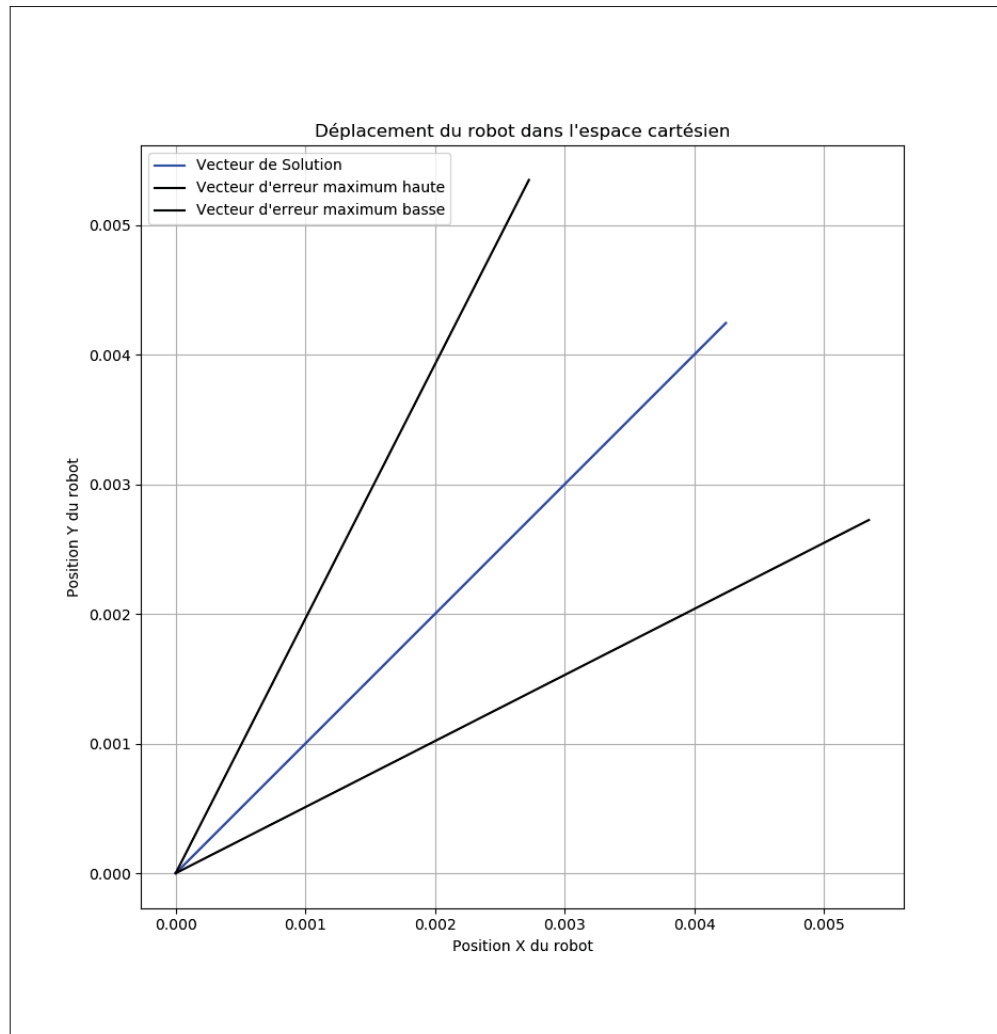


Figure 3.5 Le vecteur solution à 45 degrés avec limite haute et basse

Le déplacement du robot se retrouve donc un peu dans le principe d'une tranche seulement d'un mouvement en spirale normale, c'est-à-dire que le mouvement se fera dans l'intention de fouiller la zone découverte par la recherche en inclinaison. Cette solution implémente donc la flexibilité du déplacement de spirale permettant tout types d'erreurs, ainsi que la rapidité de la recherche par inclinaison. Afin de mieux visualiser l'importance de la flexibilité de position, il est possible d'effectuer une expérimentation qui borne les angles pour l'insertion. Pour ce faire, au lieu de montrer une multitude de vecteurs direction, nous pouvons visualiser l'erreur d'angle en fonction d'un différentiel de position avec un vecteur solution qui est toujours au

même angle. Donc si le robot avait toujours le même vecteur solution et c'était la position du trou qui changeait au lieu, les positions ressembleraient à celui-ci :

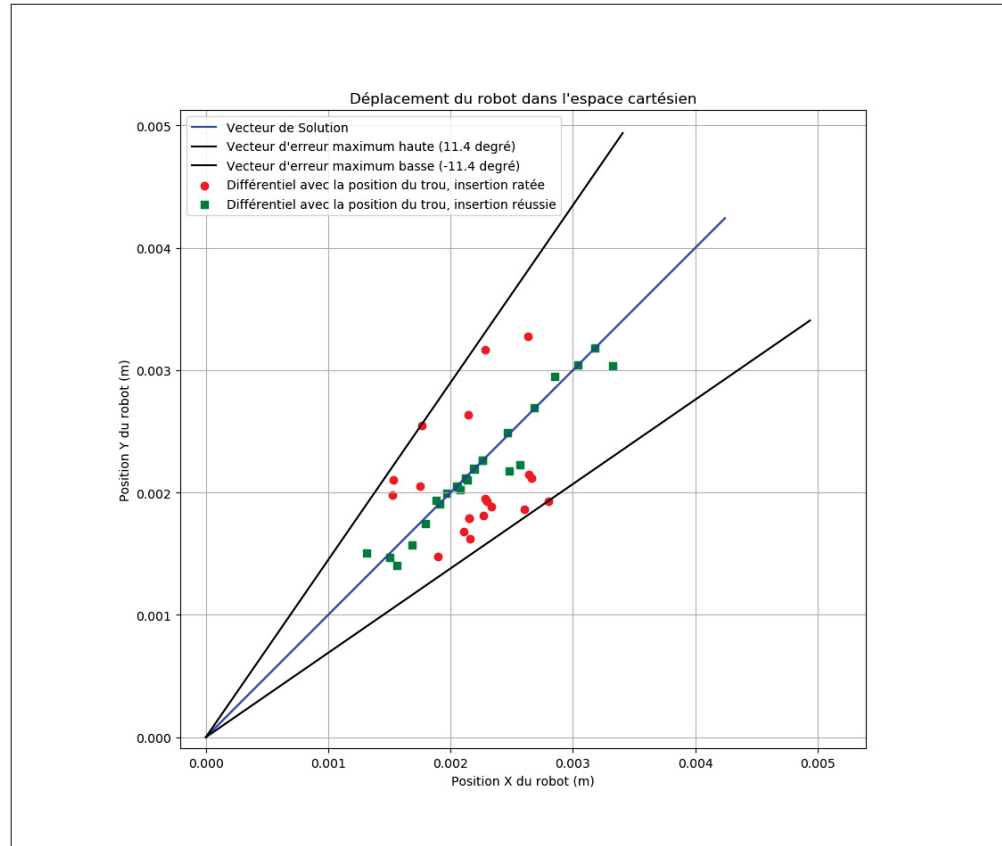


Figure 3.6 Différentiel de position de trou en fonction d'un vecteur solution unique

Il est donc possible d'intégrer toutes les positions dans un espace qui se trouvent entre ± 11.4 degrés de la position du vecteur solution trouvée. On peut aussi répertorier que l'erreur angulaire maximum avec un jeu de 0.2mm est de ± 5 degrés pour des insertions réussies.

Pour générer un mouvement similaire à la spirale, on peut observer que de prendre une tranche de la spirale ressemblerait à des cercles concentriques à différents rayons R mais au même θ .

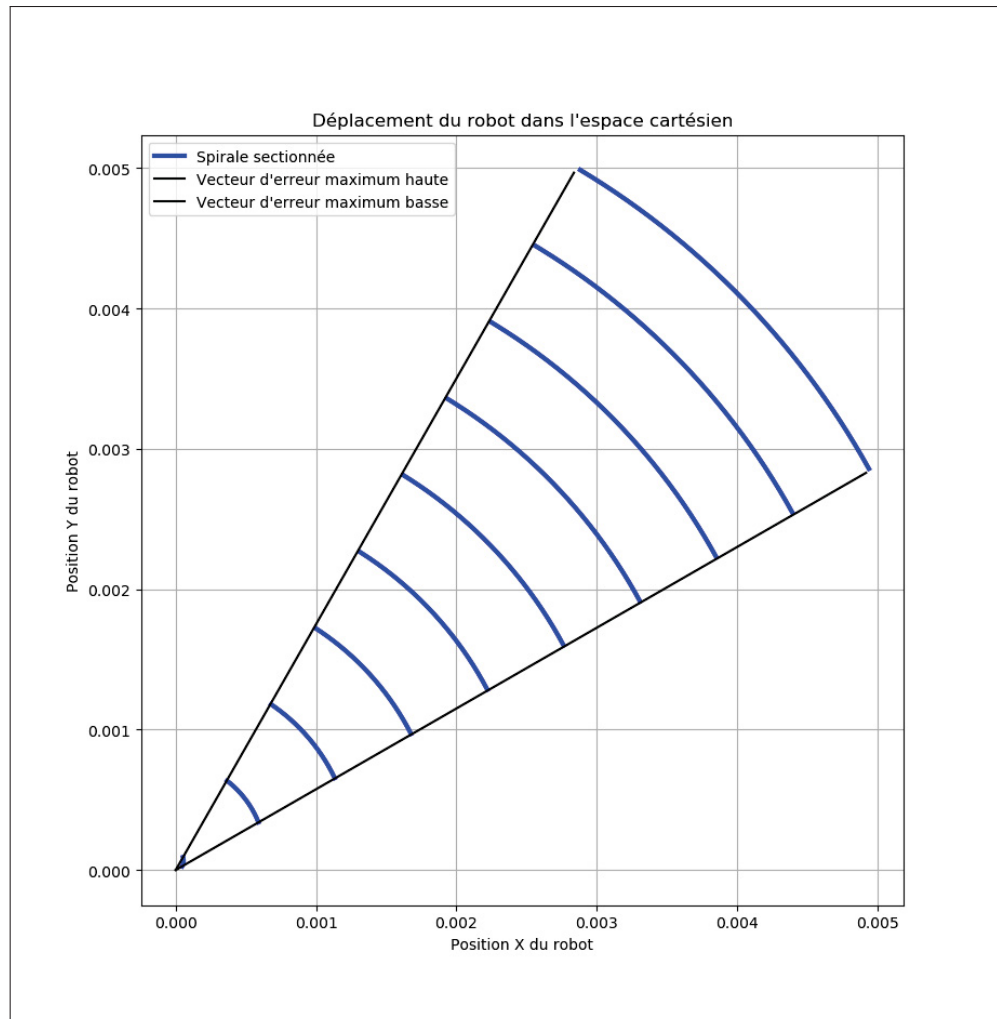


Figure 3.7 Déplacement du robot dans le contexte de la spirale continue

Cette configuration de mouvement, s'il était possible dans le contexte, pourrait être préférable. Le mouvement restreint de la spirale, donné par la recherche en inclinaison, serait plus efficace que la spirale, car la tranche d'angle prise est plus petite. Cependant, dans la réalité de commande robotique, un tel mouvement continu n'est pas possible ni désirable. En effet, pour effectuer ce genre de mouvement, il faudrait que le robot démontre soit un mouvement avec de hautes accélérations, ou un mouvement qui s'avérerait moins performant. Par exemple, il serait possible de se déplacer de cercle en cercle avec des pics d'accélérations élevées, comme démontré ici :

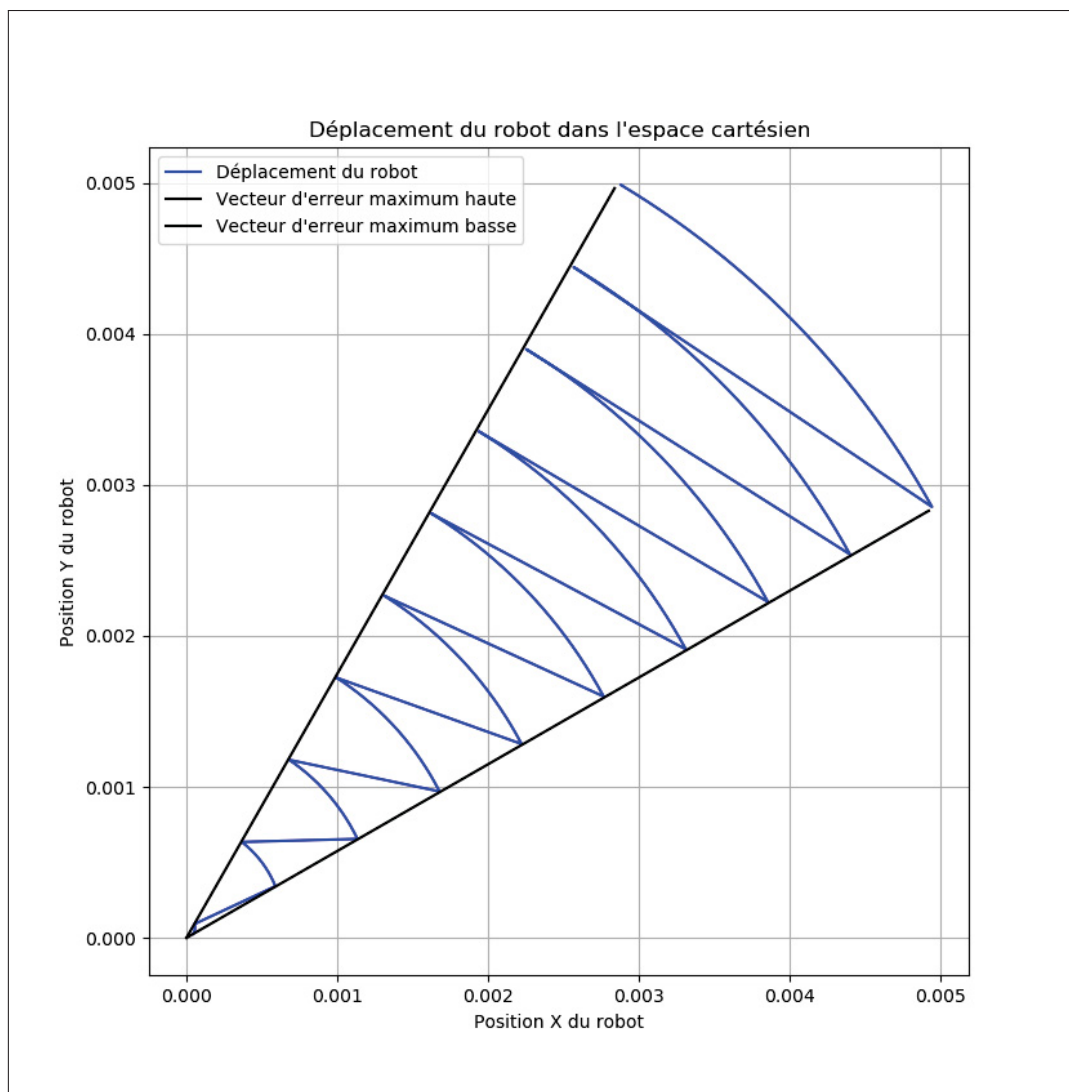


Figure 3.8 Déplacement du robot pour obtenir la spirale sectionnée

On peut remarquer que les accélérations causées par le robot seraient élevées au point de déplacement du robot vers les section de spirale. Elles abîmeraient les équipements dans le long terme.

Il est possible de penser à un mouvement différent qui permettrait des déplacements sans pics d'accélération comme présenté dans le sous-chapitre 3.3.2.

3.3.2 Plan de déplacement dans l'espace TCP

Pour effectuer le mouvement, une fonction sinusoïdale avec une amplitude linéairement proportionnelle serait appliquée à une matrice de rotation de deux dimensions. La matrice de rotation sera l'angle du vecteur solution trouvée lors de la recherche en inclinaison. La fonction ordinaire d'un sinus amplifié est la suivante :

$$f_{(x)} = a * x \cdot \sin(x) \quad (3.1)$$

Si l'on veut modifier cette fonction avec une matrice de rotation, il faut que la courbe de déplacement soit paramétrique, soit les valeurs de x et y sont selon une variable commune, c'est-à-dire t dans le cas présent :

$$x = t \quad (3.2)$$

$$y = a \cdot t \cdot \sin(t) \quad (3.3)$$

Ensuite on peut appliquer la matrice de rotation standard :

$$x' = x \cdot \cos(\theta) - y \cdot \sin(\theta) \quad (3.4)$$

$$y' = x \cdot \sin(\theta) + y \cdot \cos(\theta) \quad (3.5)$$

sur la fonction initiale :

$$x' = t \cdot \cos(\theta) - a \cdot t \cdot \sin(t) \cdot \sin(\theta) \quad (3.6)$$

$$y' = t \cdot \sin(\theta) + a \cdot t \cdot \sin(t) \cdot \cos(\theta) \quad (3.7)$$

En transformant la fonction sinusoïdale en fonction paramétrique, on évite le problème d'écrasement de la fonction dans le cas d'une rotation. En effet, la rotation d'une fonction sinusoïdale écrase son élongation sur la courbe lors de la rotation. Lorsque la matrice de rotation est appliquée sur la fonction paramétrique, il est possible de se retrouver avec une fonction intéressante considérant le vecteur solution proposée plus haut dans les chapitres précédents avec une marge d'erreur permettant un déplacement considérablement plus général.

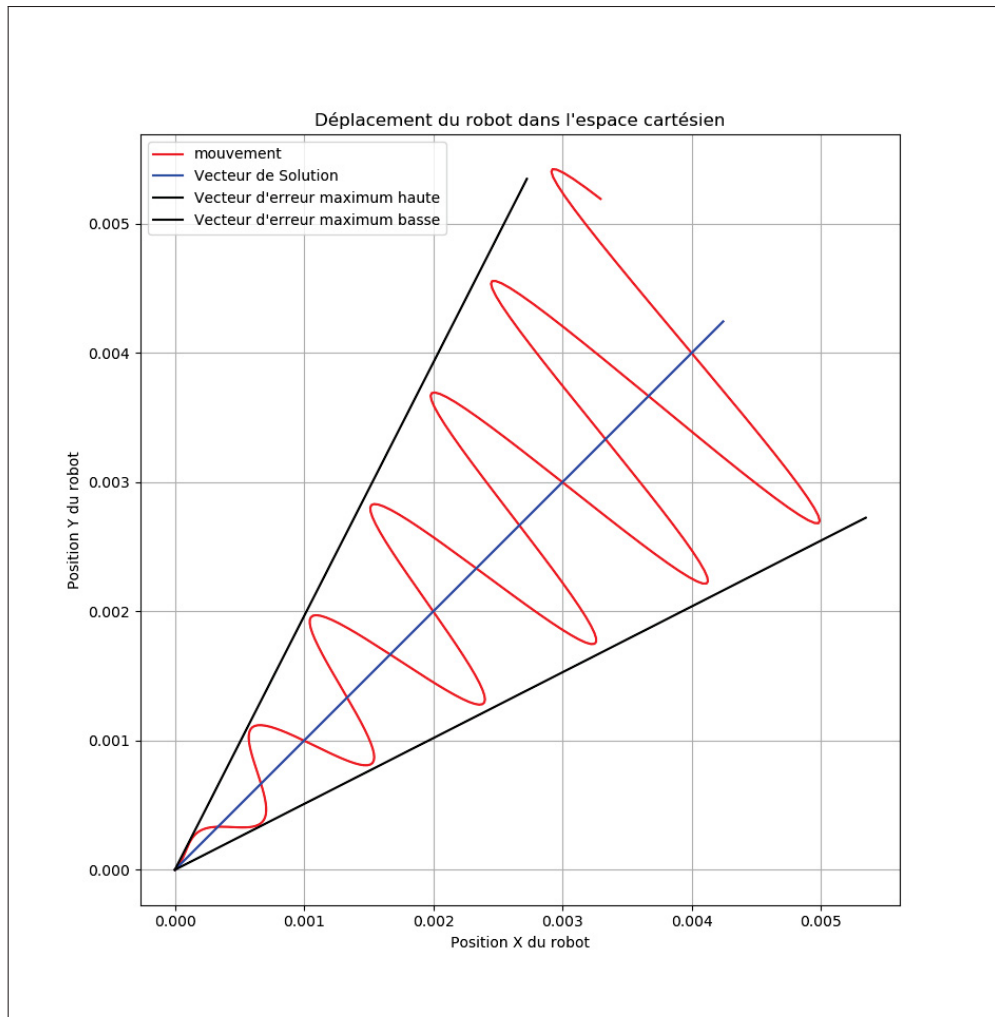


Figure 3.9 Déplacement sinus proposé

3.3.3 Résultat et discussion

Suite au plan de déplacement proposé, nous avons décidé d'employer cette méthode avec le vecteur solution du chapitre 2. Les tests ont été effectués avec les mêmes instruments. Pour optimiser le déplacement en sinus, la fonction utilise les paramètres de séparation de spirale standard. La spirale standard dans les UR caps est de Θ de diamètre, y chevauchement. Il est possible de rendre paramétrique l'équation de la fonction de spirale comme suit :

$$f(x) = c \cdot \cos(w \cdot t) \quad (3.8)$$

$$f_{(y)} = c \cdot \sin(w \cdot t) \quad (3.9)$$

Les résultats sont présentés ici dans le tableau 3.3 :

Tableau 3.3 Performance avec mouvement sinusoïdal

Décentrage (mm)	Temps avec stratégie (s)	Succès avec stratégie (%)	Temps sans stratégie (s)	Succès sans stratégie (%)
1	4.51	89	4.45	86
2	4.85	90	4.78	82
3	4.90	91	4.87	78
4	5.12	93	5.04	76
5	5.40	92	5.34	77

La nouvelle stratégie de mouvement offre un plus grand taux de succès lorsque le trou est décentré par rapport au mouvement initial de la ligne droite. Aussi, il est possible de garder le mouvement en note pour continuer le déplacement si le trou est suivi d'un lamage. En effet, le lamage ne serait pas adéquat pour ce genre de stratégie si le robot ne pouvait pas effectuer de mouvement suivant une trajectoire prédéterminée. En gardant le mouvement de spirale tranchée, on peut éviter le problème du lamage entièrement, comme la spirale recommence sa spirale si elle trouve une obstruction en Z.

CHAPITRE 4

IMPLÉMENTATION DE LA SOLUTION DANS LE CONTEXTE INDUSTRIEL : ENVIRONNEMENT DE TRAVAIL

Pour rendre la solution réaliste dans le contexte industriel, la stratégie doit répondre à des critères qui sont intéressants à explorer du point de vue de la recherche. Pour ce faire, il faut contrôler certains paramètres cruciaux. Tout d'abord, l'effet du diamètre sur la stratégie. Lors des tests théoriques et d'optimisation, une cheville standard de 1 pouce, soit 25mm environ a été utilisée. Lorsque le diamètre réduit, la force résultante de l'environnement sera plus faible aussi. Il faut donc être en mesure de quantifier jusqu'à quel diamètre le robot peut calculer son vecteur solution. Le problème majeur relié aux diamètres plus petits est l'obligation à l'inclinaison d'avoir un chevauchement. En effet, l'inclinaison ne peut pas détecter la position d'un trou s'il n'y a pas de chevauchement avec la cheville d'insertion. Ensuite, les matériaux ont un effet sur la stratégie. L'aluminium, l'acier et le plastique ont tous une rigidité différente qui affecte la stratégie. Finalement, la 2e cause d'erreur initiale de la stratégie est une erreur d'installation. Le chapitre discutera des erreurs d'installation possible et de leur impact sur la stratégie.

4.1 Jonction entre spirale et inclinaison : Une étude de diamètre

Les chapitres 2 et 3 ont démontré que l'inclinaison est utile pour trouver un vecteur direction. Ce vecteur améliore grandement les insertions, tant en vitesse qu'en précision, car le secteur géométrique où se trouve le trou n'est pas une série de cercles concentriques, mais plutôt une tranche d'angle de solutions probables.

La jonction entre la spirale et l'inclinaison se situe lorsque le chevauchement entre la cheville et le trou est nul.

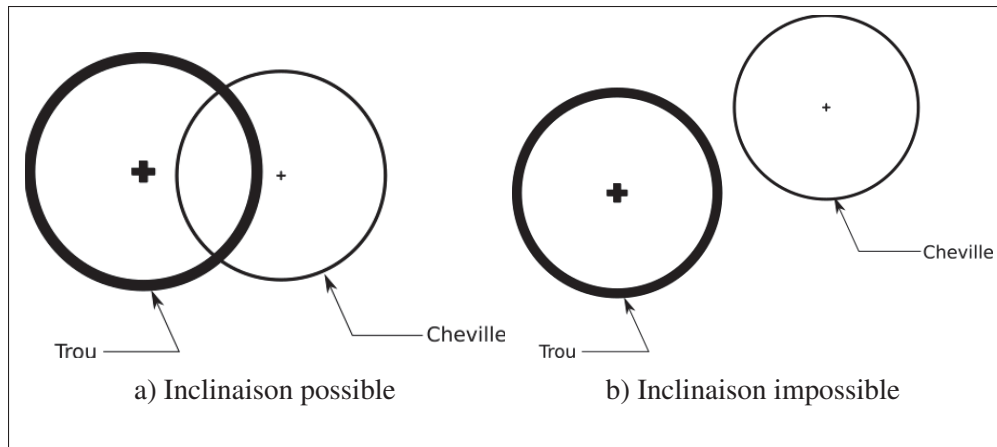


Figure 4.1 Limite de l'inclinaison

Il y a donc une jonction où l'insertion par inclinaison est moins intéressante que l'insertion par spirale, car il est trop difficile d'obtenir un chevauchement. Pour connaître cette limitation, il faut effectuer une expérimentation qui permettrait de mesurer le plus petit diamètre possible avec l'inclinaison, et utiliser la précision des capteurs de position, telle qu'une caméra, pour observer les erreurs de position d'une pose pour le robot.

L'expérimentation est de créer de différents alésages pour de différents diamètres de chevilles, et comparer lorsque le chevauchement est de deux événements possibles : 1mm et moins (grand chevauchement) et chevauchement minimal (95% du diamètre). Les diamètres utilisés lors de l'expérimentation sont le 3mm, 5mm, 7mm, 10mm, 15mm, 20mm. Les résultats sont présentés dans les tableaux 4.1, 4.2, 4.3 et 4.4.

Tableau 4.1 Temps et succès d'insertion en inclinaison en fonction du diamètre pour 1mm de chevauchement

Diamètre (mm)	Temps (s)	Succès (%)	Chevauchement (%)
3	3.3	70	33.3
5	3.62	79	20.0
7	3.84	87	16.7
10	5.67	92	10.0
15	6.42	94	6.7
20	6.64	94	5.0

Tableau 4.2 Temps et succès d'insertion en inclinaison
en fonction du diamètre pour 95% du diamètre de
chevauchement

Diamètre (mm)	Temps (s)	Succès (%)	Chevauchement (mm)
3	2.80	62	0.15
5	2.89	78	0.25
7	2.92	76	0.35
10	2.97	84	0.5
15	3.15	87	0.75
20	3.72	87	1.0

Pour comparaison, les mêmes expérimentations ont été réalisées avec l'insertion en spirale.

Tableau 4.3 Temps et succès d'insertion en spirale en
fonction du diamètre pour 1mm de chevauchement

Diamètre (mm)	Temps (s)	succès (%)	chevauchement (%)
3	4.03	92	33.3
5	7.03	91	20.0
7	11.34	90	16.7
10	12.56	90	10.0
15	21.45	91	6.7
20	33.98	89	5.0

Tableau 4.4 Temps et succès d'insertion en spirale en
fonction du diamètre pour 95% du diamètre de
chevauchement

Diamètre (mm)	Temps (s)	succès (%)	chevauchement (mm)
3	1.34	90	0.15
5	1.78	92	0.25
7	2.04	96	0.35
10	3.48	91	0.5
15	3.93	90	0.75
20	5.40	94	1.0

Les résultats démontrent qu'une stratégie variable d'insertion en fonction du diamètre est essentielle pour l'amélioration des tâches d'assemblage en robotique collaborative. Pour visualiser la différence, voici un graphique de la performance des deux méthodes selon le diamètre.

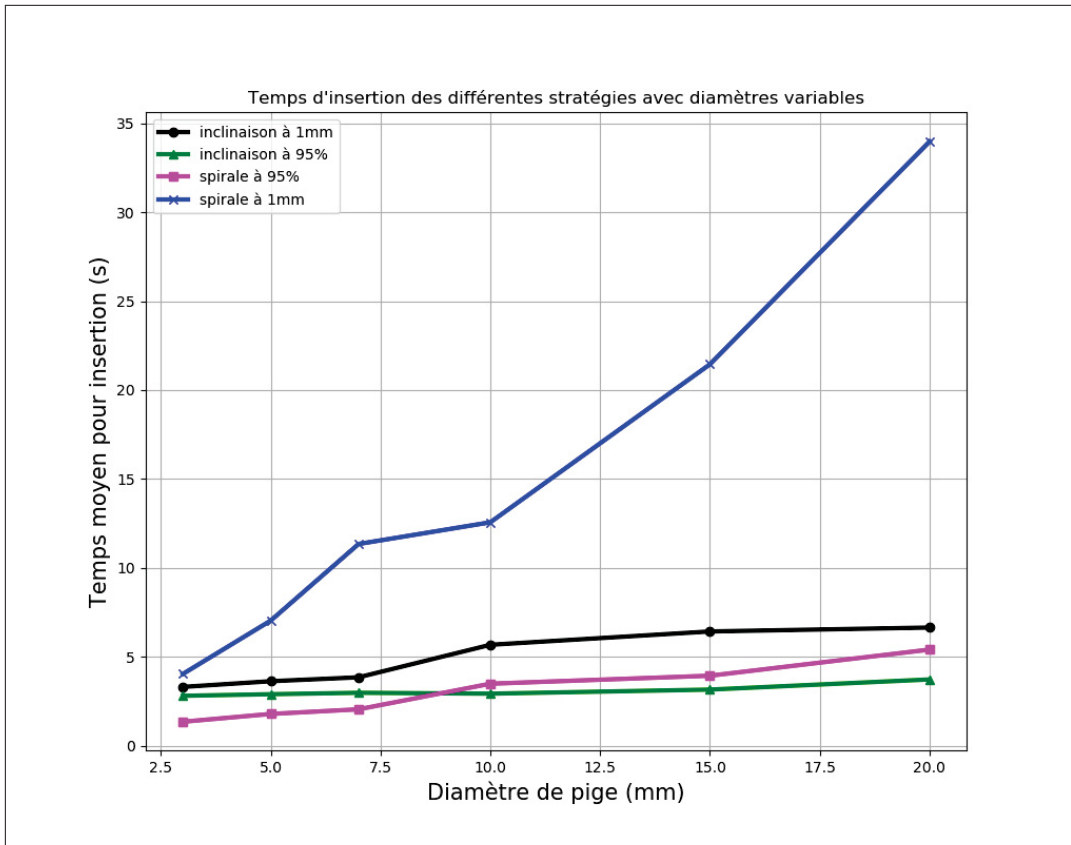


Figure 4.2 Performance des stratégies avec diamètres différents

On peut remarquer que même lors de la situation la plus idéale demandant une stratégie d'insertion (1mm), l'inclinaison talonne la spirale. Il est possible d'établir une relation entre le diamètre de la pige et sa stratégie préconisée. En effet, puisque les performances à faible diamètre affectent négativement la performance de l'inclinaison, il est possible d'avancer qu'au-delà de 7mm, à n'importe quel chevauchement, l'inclinaison devient plus intéressante que la spirale. L'intervalle de temps entre les deux chevauchements est beaucoup plus performant avec l'inclinaison. Il y a un différentiel de plus de 9.3 secondes entre un petit et un grand

chevauchement lors des piges de 7mm, tandis que l'inclinaison offre un différentiel beaucoup plus stable de 0.92 seconde.

4.2 Effet des matériaux et leurs propriétés sur l'insertion robotique

Les matériaux ont des propriétés différentes, telles que la rigidité, la malléabilité ou l'élasticité. Ces propriétés ont un effet sur la stratégie d'insertion. Un matériau plus rigide offrira des résultats plus convaincants qu'un matériau souple. Puisque l'insertion est en admittance, le programme doit avoir à tenir compte du type d'environnement sur lequel il agit pour éviter de tomber en faute, ou d'utiliser la stratégie d'admittance pour reconnaître son environnement.

Les matériaux utilisés pour les tests sont l'acier 1045, le PLA (Acide polylactique) et l'aluminium 6065-T6. Afin de cerner les caractéristiques des matériaux, voici un tableau synthèse avec les éléments soutirés du site web Matweb (<http://www.matweb.com>) :

Tableau 4.5 Plastique PLA (Polyactic Acid)

Caractéristiques	Valeurs (unités)
Dureté (Rockwell R)	104-108 (HRR)
Dureté Résistance Ultime (moyenne)	27.9 (MPa)
Module de Young (moyenne)	2.27 (GPa)
Éirement à la cassure (moyenne)	2%

Malheureusement, le PLA a des propriétés changeantes dépendantes de la température d'impression. Puisqu'une imprimante 3D n'est pas assez précise pour prévaloir des imperfections de température, la moyenne de résistance a été choisie pour faire l'étude de la comparaison. Dans un contexte d'étude plus élaboré, le matériau devrait être testé dans un test de traction avec un échantillon pour bien noter les caractéristiques mécaniques du plastique à l'étude.

L'acier 1045 est un des plus populaires alliages d'acier tout-usage dans l'industrie. Il est plus rigide que l'aluminium et le PLA. Il offre des résistances intéressantes pour l'assemblage. Son faible coût est un atout. Il est cependant lourd et offre une résistance/masse volumique faible.

Tableau 4.6 Acier 1045 (acier au carbone)

Caractéristiques	Valeurs (unités)
Dureté (Rockwell B)	84 (HRB)
Résistance élastique	450 (MPa)
Résistance ultime	585 (MPa)
Module de Young	206 (GPa)
Éirement à la cassure (moyenne)	12%

Tableau 4.7 Aluminium 6065 (Magnésium-Silice)

Caractéristiques	Valeurs (unités)
Dureté (Rockwell B)	60 (HRB)
Résistance élastique	276 (MPa)
Résistance ultime	310 (MPa)
Module de Young	68.9 (GPa)
Éirement à la cassure (moyenne)	17%

L'aluminium 6065 est un alliage à base de silice et magnésium. Il est très populaire dû principalement à son plus faible coût et sa résistance/masse volumique intéressante. Il fait donc partie de cette étude en partie grâce à sa grande utilisation dans l'assemblage.

Avec des angles d'insertion variables et le même diamètre de pign de 25.2mm, voici les résultats d'une inclinaison entre la cheville et son environnement :

Les données parlent d'elles-mêmes, plus un environnement est rigide, plus le vecteur solution est renforcé. Ceci est dû au module de rigidité (module de Young) de la pièce. En effet, il est possible d'utiliser l'environnement plus impédant pour avoir de meilleurs résultats. Cependant, la force de l'environnement a un impact négatif sur la cheville d'insertion. Lors de l'expérimentation, seule la cheville avait un matériau différent. L'insertion s'est effectuée avec le même alésage en plastique. Donc, s'il faut insérer des pièces avec une interface d'acier/plastique, la stratégie doit réduire son angle d'insertion pour ne pas dépasser la limite élastique du matériau et endommager les surfaces.

Tableau 4.8 Tableau des forces de contact de différents matériaux en fonction de l'angle

Matériau	Force maximale moyenne (N)	Angle θ (deg)	Taux de succès (%)
PLA (Plastique)	20.18	2.0	91
PLA (Plastique)	24.43	2.5	93
PLA (Plastique)	28.56	3.0	94
Acier 1045	32.65	2.0	93
Acier 1045	40.12	2.5	95
Acier 1045	47.34	3.0	97
Aluminium 6065	23.61	2.0	92
Aluminium 6065	26.79	2.5	93
Aluminium 6065	29.12	3.0	95

4.3 Longueur différente de cheville

La stratégie offre une alternative intéressante à la spirale conformément à son efficacité et sa rapidité. Cependant, elle propose un défi qui peut s'avérer plus complexe dans un environnement flexible. La rotation R_y et R_x doit s'appliquer sur une valeur de TCP qui est précise au bout de la pièce. Cette valeur est appelée « TCP offset » ou décalage. En général, lorsqu'un robot prend une pièce, son décalage est précalculé avec la pièce de travail. Il n'est pas rare que le décalage soit au centre de la pince robotique. Ainsi, toutes les valeurs de positions et de rotation sont effectuées avec un point central entre les doigts pour simplifier à l'utilisateur le besoin de programmer à chaque opération le décalage, ou d'effectuer une opération de recalcul de TCP. Pour effectuer la stratégie, il est essentiel de connaître la position du bout de la pièce. Si la pièce ne change pas trop de dimensions, d'avoir un TCP constant est possible, mais des pièces avec des formes variables aura comme conséquence de faire varier la position du TCP. Si la pièce n'a pas le même TCP que la programmation, des situations comme l'image peuvent se produire.

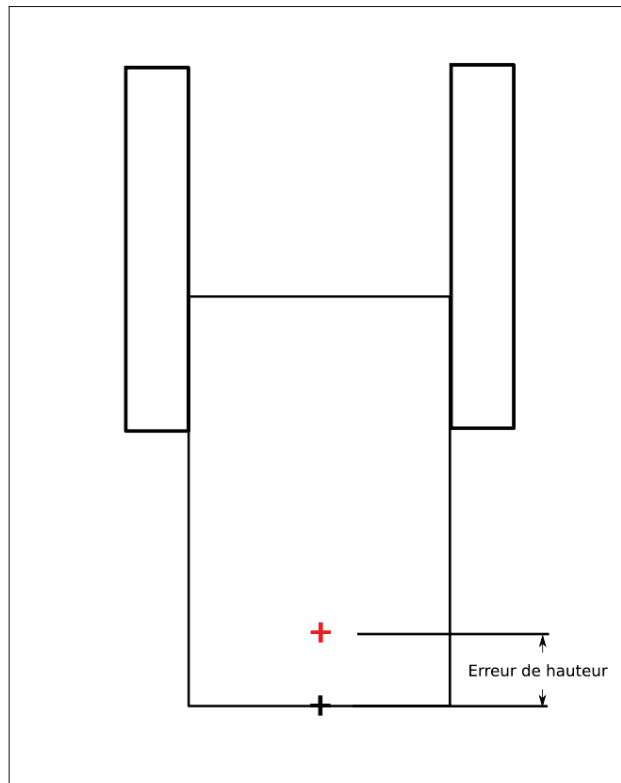


Figure 4.3 Erreur de hauteur

Si une telle erreur survient, la rotation effectuée n'offrira pas le résultat escompté par la stratégie. Par exemple, avec le même décalage en Z, voici ce à quoi pourrait ressembler une rotation autour d'un point en incluant une erreur de hauteur :

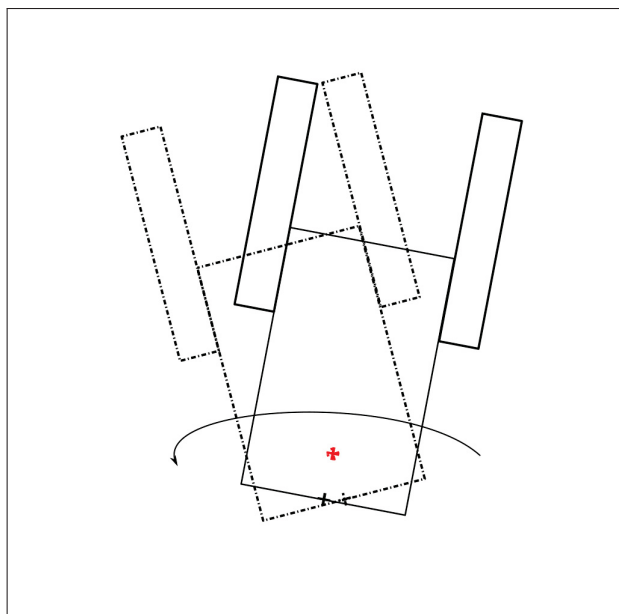


Figure 4.4 Rotation avec erreur de hauteur

Dans le contexte de la rotation autour d'un point précis (la coordonnée $[X,Y,Z]$ fixe), il faut être en contrôle de la position du TCP au bout de la pièce pour une rotation adéquate. Si cette opération n'est pas effectuée, les résultats de l'insertion ne seront pas ceux escomptés par la stratégie.

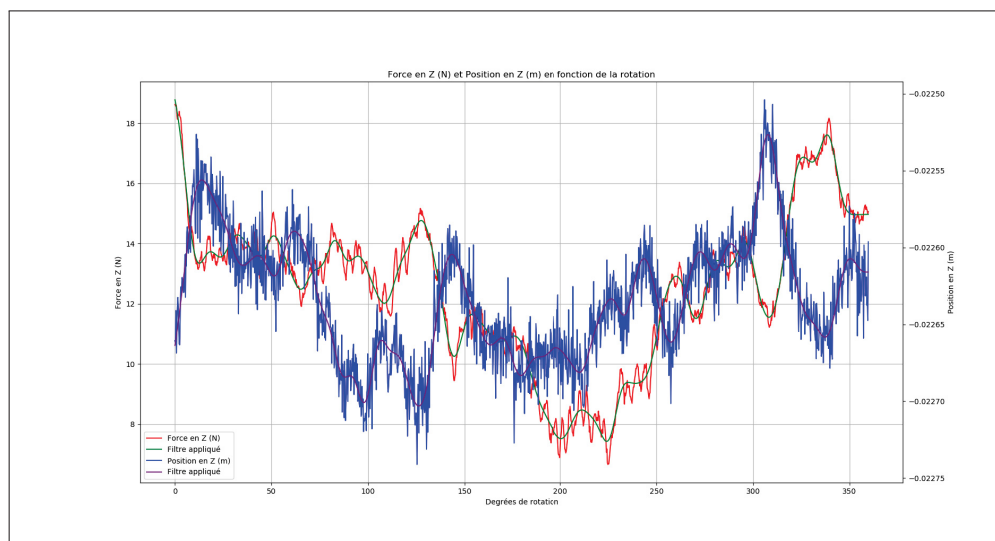


Figure 4.5 Spectre de force et position lorsque le TCP est mal ajusté

L'image ci-dessus démontre le problème d'un TCP mal ajusté. On peut remarquer que les valeurs des minimums de la force et de la position ne coïncident pas et les résultats sont complètement brouillés. Le graphique ci-dessous montre les résultats des tests effectués avec des décalages mal ajustés pour démontrer les limitations d'un environnement mal contraint. La cheville utilisée mesure 25mm de diamètre avec un alésage de 25.2mm standard.

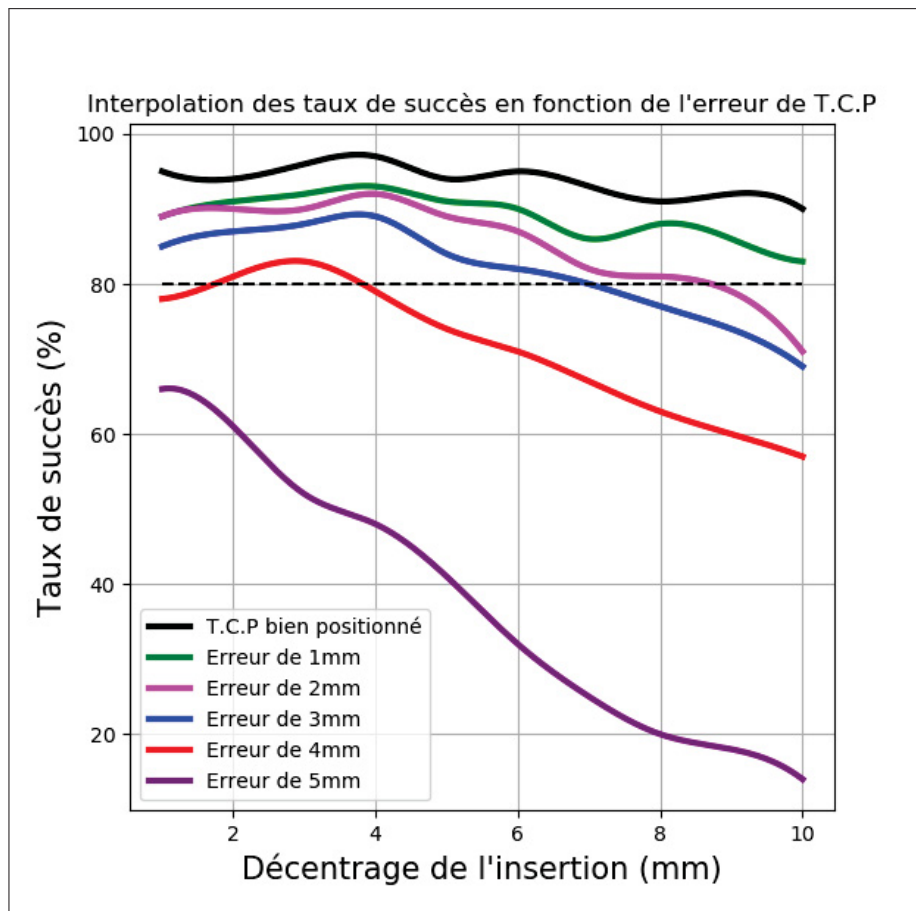


Figure 4.6 Taux de succès en fonction de l'erreur TCP

Lors des expérimentations avec l'erreur de longueur, la stratégie fonctionnait avec une performance adéquate (80%) jusqu'à une erreur d'environ 3mm. L'erreur de 4mm et 5mm est inacceptable, car même avec des positionnements idéals de 1 ou 2mm de décentrage, le taux de succès tient à peine le barème de performance. Comme mentionné plus haut, une opération additionnelle de mesure de cheville avec un plan préprogrammé règle le problème de hauteur.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

En guise de conclusion, nous avons effectué lors de ce mémoire une introduction aux différentes stratégies d'assemblages présentement sur le marché. Nous avons établi qu'une compliance passive serait utile pour des approches agressives en robotique collaborative, mais qu'elle ne permettrait pas sans modification majeure une amélioration des insertions. Nous avons exploré l'idée d'une insertion par inclinaison, permettant de trouver la position du trou de façon consistante et intelligente. La stratégie s'est avérée efficace pour des positions avec chevauchement de trou. Après plusieurs paramètres optimisés, nous avons pu rendre très compétitive cette stratégie versus la stratégie la plus utilisée présentement dans l'industrie, celle de l'insertion en spirale. Nous avons par la suite appliqué la stratégie aux différents environnements de travail pour observer les effets de paramètres externes sur la stratégie d'insertion. Les résultats furent concluants pour une nouvelle stratégie d'insertion permettant de rendre le robot plus intelligent face à son environnement et plus rapide pour répondre aux critères de l'industrie d'assemblage.

Lors de travaux futurs, il serait intéressant de créer un outil d'assemblage général, qui permettrait aux robots collaboratifs d'utiliser les résultats de la recherche présentée pour créer des solutions d'assemblages clef en main, avec une panoplie d'environnements et de pièces différentes. Pour ce faire, il sera intéressant de tester des techniques telles que l'approche macro-mini, qui est déjà utilisée par l'humain dans un contexte d'assemblage normal entre deux personnes.

ANNEXE I

DONNÉES D'INSERTIONS ADDITIONNELLES

1. Premiers tests d'insertions par inclinaison

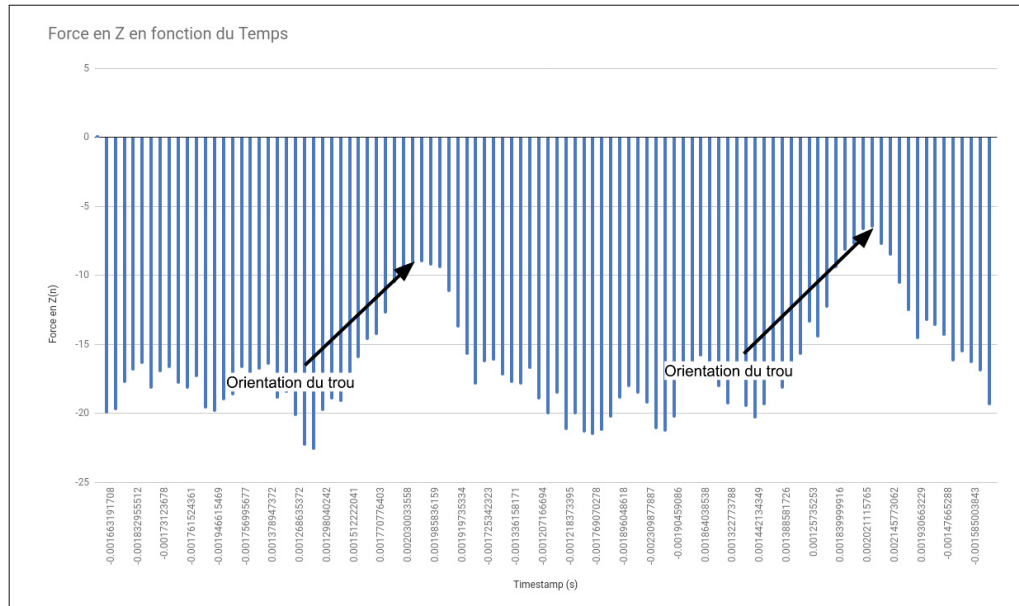


Figure-A I-1 Test avec deux inclinaisons pour orientation du trou

2. Test de rotation fluide : données additionnelles



Figure-A I-2 Rotation en Z

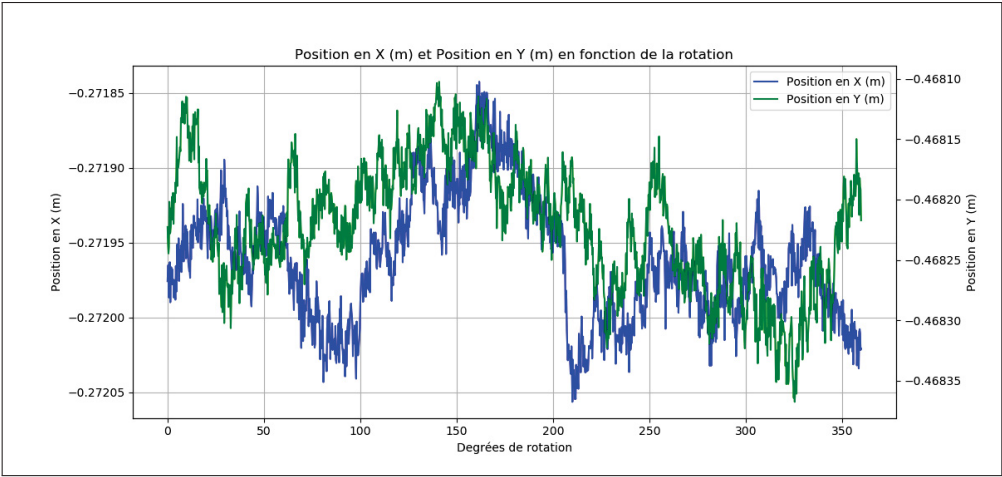


Figure-A I-3 Position en X et Y du robot lors de la rotation.

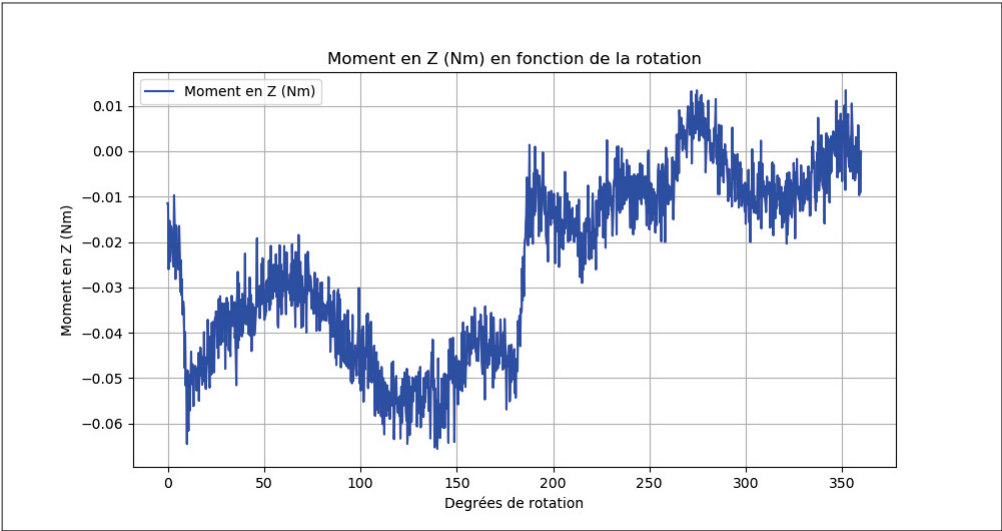


Figure-A I-4 Moment en Z lors de la rotation.

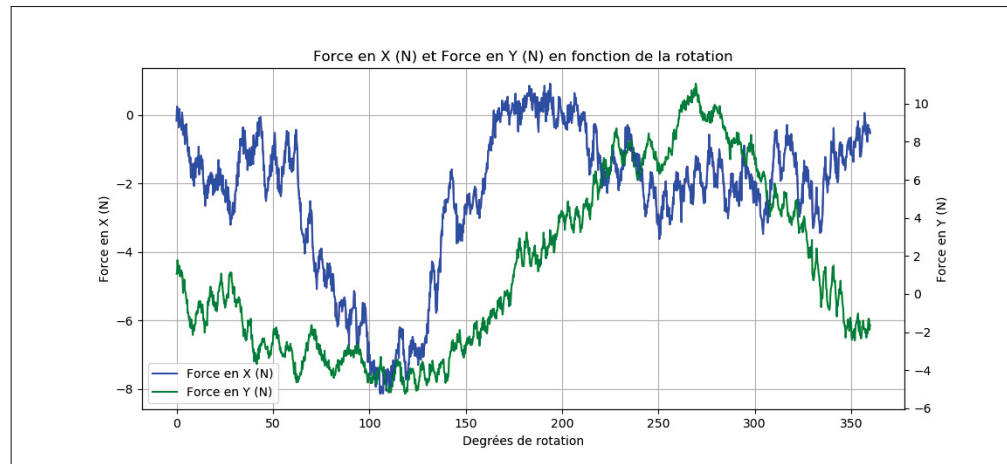


Figure-A I-5 Force en X et Y lors de la rotation fluide. À noter que les forces n'ont pas d'impact sur le vecteur direction.

2.1 Décentrage de 1mm

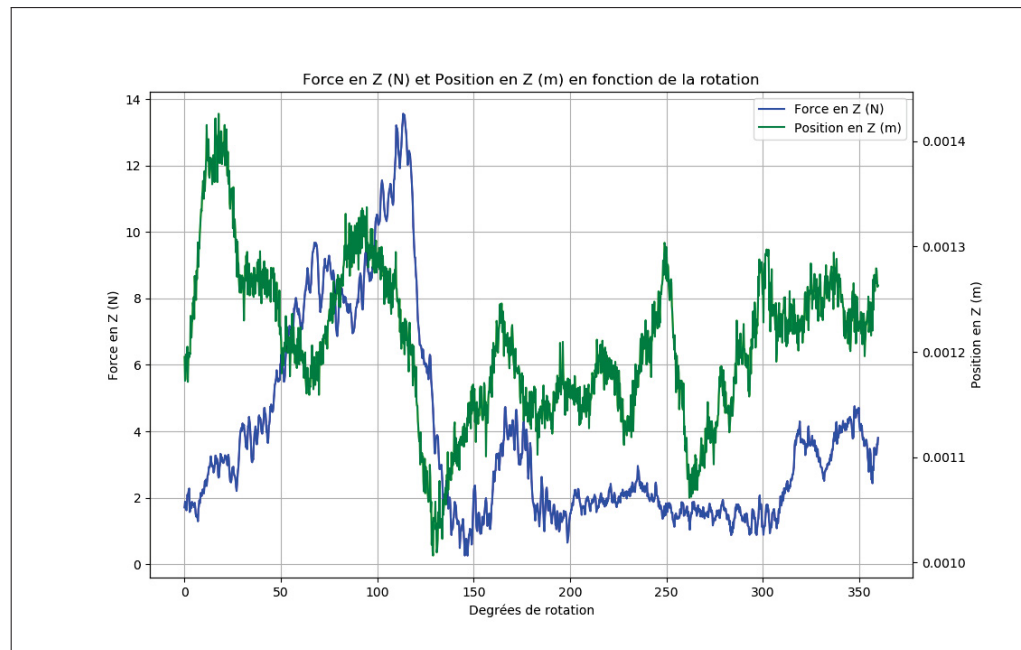


Figure-A I-6 Position vs Force pour 1mm de décentrage sur 25mm de cheville

3. Tables en annexe

Tableau-A I-1 Résultat test décentrage en spirale
(initiale)

1mm	2mm	3mm	4mm	5mm	6mm	7mm	10mm
3	7.63	10.81	10.42	13.42	16.53	21.65	27.05
4.34	4.79	6.88	13.98	12.9	16.58	21.34	29.73
4.61	6.78	7.83	11.25	14.45	16.10	21.20	33.94
5.15	6.9	8.24	12.47	12.76	16.38	21.14	34.27
4.23	7.71	7.66	11.38	12.34	15.81	22.30	35.58
3.79	5.21	6.22	13.76	11.15	15.22	17.12	42.62
4.56	7.12	7.56	13.98	11.38	15.00	26.19	35.25
4.54	6.08	7.34	11.48	13.71	15.37	17.91	33.10
4.36	6.39	8.01	12.17	12.84	15.93	27.84	33.50
4.51	6.73	7.76	12.11	13.76	15.71	26.61	37.52

Tableau-A I-2 Résultat test décentrage en inclinaison
(initiale)

1mm	2mm	3mm	4mm	5mm	6mm	7mm	10mm
4.21	4.40	5.12	6.11	6.31	6.81	6.92	8.41
4.29	4.54	5.01	6.10	6.22	6.25	7.01	8.21
4.66	4.59	5.41	6.02	6.23	6.81	7.11	8.59
4.42	4.72	5.45	6.12	6.41	6.56	6.81	8.13
4.48	4.81	5.22	5.96	6.46	6.45	6.92	8.29
4.45	4.98	5.12	5.93	6.36	6.41	7.12	8.31
4.51	4.84	5.19	6.05	6.31	6.73	6.71	8.27
4.56	4.82	5.23	6.16	6.39	6.83	6.99	8.59
4.59	4.77	5.29	6.23	6.27	6.67	7.04	8.61
4.61	4.71	5.45	5.89	6.45	6.63	6.89	8.71

Tableau-A I-3 Résultat test décentrage en inclinaison
(second test)

1mm	2mm	3mm	4mm	5mm	6mm	7mm	10mm
4.20	4.45	5.05	6.04	6.34	6.78	7.02	8.56
4.42	4.70	5.29	6.13	6.25	6.34	7.13	8.54
4.61	4.71	5.33	5.98	6.41	6.90	7.03	8.78
4.49	4.75	5.29	5.99	6.26	6.78	6.98	8.45
4.82	4.73	5.31	6.06	6.22	6.96	6.95	8.13
4.52	4.82	5.16	6.21	6.31	6.74	6.87	8.34
4.34	4.85	5.21	6.11	6.20	6.72	6.74	8.45
4.21	4.86	5.36	6.03	6.28	6.71	6.79	8.54
4.23	4.81	5.21	5.98	6.40	6.66	7.12	8.56
4.29	4.78	5.38	6.01	6.43	6.56	7.02	8.51

BIBLIOGRAPHIE

- ABB. (2021). Productspecification IRB 2400 [Fiche technique]. Repéré à <https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-2400>.
- Bigge, B. & Harvey, I. R. (2007). Programmable Springs : Developing Actuators with Programmable Compliance for Autonomous Robots. *Robot. Auton. Syst.*, 55(9), 728–734. doi : 10.1016/j.robot.2007.05.013.
- Broenink, J. F. & Tiernego, M. L. (1996). Peg-in-hole assembly using impedance control with a 6 dof robot. *Proceedings of the 8th European Simulation Symposium*, pp. 504–508.
- Bruzzzone, Luca, Molfino, Rezia, Zoppi & Matteo. (2002). Modelling and control of peg-in-hole assembly performed by a translational robot. *International Conference Modelling, Identification and Control*, 512-517.
- Cheng, C.-C. & Chen, G.-S. (2002). A multiple RCC device for polygonal peg insertion. *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 45(1), 306–315.
- Chhatpar, S. R. & Branicky, M. S. (2001). Search strategies for peg-in-hole assemblies with position uncertainty. *Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (Cat. No. 01CH37180)*, 3, 1465–1470.
- Gosselin, C. M. (2006). GMC-64388 : Mécanique des Manipulateurs. Université Laval.
- Joubair, A., Boney, I., Zhao, L. F. & Bigras, P. (2015). Absolute accuracy analysis and improvement of a hybrid 6-DOF medical robot. *Industrial Robot*, 42(1), 44-53. doi : 10.1108/IR-09-2014-0396.
- Kilikevicius, S. & Baksys, B. (2011). Dynamic analysis of vibratory insertion process. *Assembly Automation*.
- Matweb. (2022). Online Materials Information Resource [Site Web]. Repéré à <https://matweb.com/>.
- Nozu, K. & Shimonomura, K. (2018). Robotic bolt insertion and tightening based on in-hand object localization and force sensing. 310–315. doi : 10.1109/AIM.2018.8452338. ISSN : 2159-6255.

- Park, H., Park, J., Lee, D.-H., Park, J.-H., Baeg, M.-H. & Bae, J.-H. (2017). Compliance-based robotic peg-in-hole assembly strategy without force feedback. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(8), 6299–6309.
- Park, J. (2011). The relationship between controlled joint torque and end-effector force in underactuated robotic systems. *Robotica*, 29(4), 581–584.
- Qiao, H., Wang, M., Su, J., Jia, S. & Li, R. (2015). The Concept of “Attractive Region in Environment” and its Application in High-Precision Tasks With Low-Precision Systems. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(5), 2311-2327. doi : 10.1109/T-MECH.2014.2375638.
- Retisoft. (2021). The advantage and drawbacks of collaborative robots [Site Web]. Repéré à <https://retisoft.com/the-advantages-and-drawbacks-of-collaborative-robotics/#>.
- Roberge, E. (2019). *Développement d'un système de programmation par démonstration de tâches d'insertion pour la robotique collaborative*. (Thèse de doctorat, École de technologie supérieure).
- ROBOTIQ. (2021). *Robotiq Force Copilot & FT300-S Sensor Intruction Manual*. ROBOTIQ. St-Nicholas : ROBOTIQ.
- Scherzinger, S., Roennau, A. & Dillmann, R. (2017). Forward Dynamics Compliance Control (FDCC) : A new approach to cartesian compliance for robotic manipulators. 4568–4575. doi : 10.1109/IROS.2017.8206325. ISSN : 2153-0866.
- Schoettler, G., Nair, A., Luo, J., Bahl, S., Aparicio Ojea, J., Solowjow, E. & Levine, S. (2020a). Deep Reinforcement Learning for Industrial Insertion Tasks with Visual Inputs and Natural Rewards. *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 5548-5555. doi : 10.1109/IROS45743.2020.9341714.
- Schoettler, G., Nair, A., Ojea, J. A., Levine, S. & Solowjow, E. (2020b). Meta-reinforcement learning for robotic industrial insertion tasks. *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 9728–9735.
- SDU. (2021). RTDE Control Interface [Librairie de fonction]. Repéré à https://sdurobotics.gitlab.io/ur_rtde/api/api.html.
- Seriani, S., D’Attanasio, S., Gallina, P. & Debortoli, L. (2018). Peg-in-hole operation with a cobot without using external sensors. *Materials Today : Proceedings*, 5(13, Part 2), 26551–26557. doi : <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.08.115>.

- Shirinzadeh, B., Zhong, Y., Tilakaratna, P. D. W., Tian, Y. & Dalvand, M. M. (2011). A hybrid contact state analysis methodology for robotic-based adjustment of cylindrical pair. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 52(1-4), 329–342. doi : 10.1007/s00170-010-2705-4.
- Vysocky, A. & Novak, P. (2016). Human-Robot collaboration in industry. *MM Science Journal*, 9(2), 903–906.
- Wang, S., Chen, G., Xu, H. & Wang, Z. (2019). A robotic peg-in-hole assembly strategy based on variable compliance center. *IEEE Access*, 7, 167534–167546.
- Whitney. (1982). Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 104(1), 65-77.
- Xeryon. (2022). Understanding precision : accuracy, repeatability, precision [Site Web]. Repéré à <https://xeryon.com/technology/understanding-precision/>.
- Zhang, a. (2017). Force control for a rigid dual peg-in-hole assembly. *Assembly automation*, 37(2), 200-207. doi : 10.1108/AA-09-2016-120.
- Zhang, X., Zheng, Y., Ota, J. & Huang, Y. (2017). Peg-in-Hole Assembly Based on Two-phase Scheme and F/T Sensor for Dual-arm Robot. *Sensors*, 17, 2004-2023. doi : 10.3390/s17092004.
- Zinn, M., Roth, B., Khatib, O. & Salisbury, J. K. (2004). A new actuation approach for human friendly robot design. *The international journal of robotics research*, 23(4-5), 379–398.