UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Mécanique

THESE DE DOCTORAT (LMD)

En Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

CONTRIBUTION A LA COMPENSATION DES ERREURS DE PRECISION DES ROBOTS. APPLICATIONS INDUSTRIELLES

Par

Billel LOUNICI

Devant le jury composé de :

Rachid TIBERKAK	Professeur., U. Blida1	Président
Mohammed OUALI	Professeur., U. Blida1	Directeur de Thèse
Ali MAHIEDDINE	M.C.A., U. Khemis-Miliana	Examinateur
Adel ZEMIRLINE	M.C.A., U. Médéa	Examinateur
Mustapha TEMMAR	Professeur., U. BLIDA1	Examinateur

Blida, Septembre 2023

RESUME

Dans ce travail, l'influence de l'effort du contact de l'effecteur du robot avec l'environnement sur la précision de suivi de trajectoire a été analysée par une simulation numérique sous Matlab, tout en tenant compte des conditions réelles de fonctionnement. Par la suite, deux techniques d'optimisation ont été choisie, y compris la technique d'optimisation par l'algorithme génétique mono-objectif (GA) et la technique multi-objectif (MOGA) pour minimiser l'erreur de positionnement des deux robots à 3 et à 6 degrés de liberté respectivement. Afin de contribuer à l'amélioration de la programmation hors ligne des tâches robotiques, l'outil de simulation "Analyse de Mouvement" de logiciel SOLIDWORKS a été utilisé pour prédire sur un interface CAO le comportement du robot avec précision en tenant compte les résultats de Matlab.

ملخص

في هذا العمل، تم تحليل تأثير قوة التلامس بين أداة الروبوت والبيئة المحيطة به على دقة تتبع المسار بواسطة محاكاة عددية باستعمال Matlab، مع مراعاة ظروف التشغيل الحقيقية. بعد ذلك، تم اختيار طريقتين للتحسين بما في ذلك تقنية تحسين بواسطة الخوارزمية الجينية أحادية الهدف (GA) وتقنية الخوارزمية الجينية المتعددة الأهداف (MOGA) لتقليل خطأ التموضع لروبوتين ذو ثلاث درجات (3) وستة (6) درجات حرية على التوالي. من أجل المساهمة في تحسين البرمجة غير المتصلة بالإنترنت للمهام الروبوت بدة (6) درجات حرية على التوالي. من أجل المساهمة في تحسين البرمجة غير المتصلة بالإنترنت للمهام الروبوتية، تم استخدام أداة المحاكاة "درجات (3) وستقدام أداة المحاكاة "درجات (5) وستة (6) درجات حرية على التوالي. من أجل المساهمة في تحسين البرمجة غير المتصلة بالإنترنت للمهام الروبوتية، تم استخدام أداة المحاكاة "تحليل الحركة" لبرنامج المساهمة في تحسين الترمجة على واجهة CAD بسلوك الروبوت بدقة باستعمال النتائج المتحصل عليها من Matlab.

ABSTRACT

In this work, the impact of the contact force of the robot end effector with the environment on the trajectory tracking accuracy was analyzed by numerical simulation in Matlab, while taking into account the real operating conditions. Subsequently, two optimization techniques were chosen, including the single-objective genetic algorithm (GA) optimization technique and the multi-objective technique (MOGA) to minimize the positioning error of the two robots with 3 and 6 degrees of freedom respectively. In order to contribute to the improvement of the offline programming of robotic tasks, the simulation tool "Motion Analysis" of SOLIDWORKS software was used to predict on a CAD interface the robot behavior with accuracy taking into account the Matlab results.

DEDICACE

À qui je ne peux rendre leur faveur, mes chers parents :

LOUNICI Mohammed et TALBI Fatma

A mon frère à l'étranger : BAROUD Abd El Malek

A mes chères sœurs

A tous ceux qui m'ont rendu service.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Allah le tout puissant.

J'exprime toute ma gratitude aux membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont manifesté à ce travail, en acceptant de l'examiner.

Je remercie mon encadrant, monsieur **Mohammed OUALI** pour leur soutien durant toute la période de réalisation de cette thèse.

D'autre part, j'exprime ma gratitude au grand monsieur **El Hadi OSMANI** et mon frère **Abd El Malek BAROUD** pour son soutien et son aide durant toutes ma carrière de doctorat.

Je remercie plus particulièrement, le monsieur **Ghalem BAROUD** pour leur encouragement et d'avoir eu le temps de corriger et de contribuer dans ce travail.

Mes vifs remerciements vont également à tous mes enseignants en graduation, et tous le personnel de département de mécanique. J'adresse un amical remerciement le plus sincère à tous mes collègues et mes amis.

Je remercie tous ceux qui m'ont aidé et soutenu de près ou de loin.

Grand merci à tous

TABLE DES MATIERES

Résumé	1
Dédicace	2
Remerciements	3
Table des matières	4
Liste des symboles et abréviations	8
Liste des illustrations, graphiques et tableaux	12
INTRODUCTION	19
1. ROBOTISATION DES SYSTEMES INDUSTRIELS	23
1.1 Introduction	23
1.2 Robotique industriel	24
1.2.1 Définition	24
1.2.2 Evolution des robots industriels	25
1.2.3 Spécification du robot	26
1.3 Procédés industriel robotisés	29
1.3.1 Manutention	29
1.3.2 Soudage	30
1.3.3 Assemblage	32
1.3.4 Peinture	33
1.3.5 Traitement	33
1.4. Critères de performances des robots	35
1.4.1 Précision et Répétabilité de pose	35
1.4.2 Variation de la précision de pose multidirectionnelle	36
1.4.3 Précision de distance et répétabilité de distance	37
1.4.4 Temps de stabilisation de position	38
1.4.5 Dépassement de position	38
1.4.6 Dérive des caractéristiques de pose	38
1.4.7 L'interchangeabilité	39
1.4.8 Précision et répétabilité de la trajectoire	40
1.4.9 Précision de trajectoire lors de la réorientation	41
1.4.10 déviations de virage	41

1.4.11 Caractéristiques de vitesse de trajectoire	42
1.4.12 Temps minimum de pose	43
1.4.13 Conformité statique	44
1.4.14 Ecarts de tissage	44
1.5 Sources de perturbations de précision des robots	45
1.5.1 Erreurs dépendantes du robot	45
1.5.1.1 Erreurs géométriques	46
1.5.1.2 Erreurs non géométriques	46
1.5.1.3 Erreurs du système	47
1.5.2 Erreurs liées à l'environnement	48
1.5.3 Erreurs dépendant du processus	50
1.5.4 Erreur de modélisation	51
1.6 Contribution	51
1.7 Conclusion	56
2. MODELISATION DU ROBOT INDUSTRIEL FLEXIBLE	58
2.1. Introduction	58
2.2. Terminologies et Notions Base	58
2.2.1 Repères et Matrice de Transformation	59
2.2.2 Description de Denavit-Hartenberg Modifier	62
2.2.3 Description du robot Stäubli TX-90	64
2.3 Modèles géométriques	65
2.3.1 Modèle Géométrique Direct (MGD)	67
2.3.2 Modèle Géométrique Inverse (MGI)	68
2.4 Modèles cinématiques	71
2.4.1 Modèle cinématique direct (MCD)	72
2.4.2 Modèle cinématique inverse du premier ordre	74
2.4.3 Modèle cinématique inverse du deuxième ordre	74
2.5 Modèle dynamique	74
2.5.1 Modèle dynamique inverse (MDI)	75
2.5.2 Application au TX-90	78
2.6 Modèle de déformation	79
2.7 Conclusion	81

3.	MODELISATION DU CONTACT ROBOT ENVIRONNEMENT	83
	3.1 Introduction	83
	3.2. Procédé de fraisage	83
	3.2.1. Types et formes de fraisage	85
	3.2.1.1 Travail en opposition (Up-milling)	85
	3.2.1.2 Travail en avalant ou en concordance (Down-milling)	86
	3.2.2. Paramètres de coupe	86
	3.3. Modélisation des efforts de coupe	88
	3.3.1. Calcul de l'épaisseur instantanée du copeau	88
	3.3.2. Formulation du modèle d'effort de coupe	91
	3.4. Application et validation du modèle	92
	3.5 Conclusion	96
4.	PREDICTION ET SIMULATION DE TRAJECTOIRE DU ROBOT	97
	4.1 Introduction	97
	4.2 Simulation des systèmes robotiques	97
	4.2.1 Simulateurs de constructeurs des robots	98
	4.2.2 Simulateurs pour la robotique	99
	4.2.3 CAO des systèmes multi-corps	99
	4.3 Description de simulateur	101
	4.3.1 Fonctionnement de simulateur	101
	4.3.2 Vérification de fiabilité de simulateur	104
	4.4 Application au fraisage de l'épaulement	106
	4.5 Validation	110
	4.6 Conclusion	112
5.	MINIMISATION DE L'ERREUR DE POSITIONNEMENT DU ROBOT	114
	PAR LES TECHNIQUES D'OPTIMISATION	114
	5.1 Introduction	114
	5.2 Méthode d'optimisation des erreurs de positionnement	114
	5.2.1 Optimisation mono-objectif à l'aide de l'algorithme génétique	115
	5.2.2 Optimisation multi-objectifs à l'aide de l'algorithme génétique	116
	5.3 Optimisation d'erreur du robot plan redondant a 3 ddl :	117
	5.3.1 Configuration du robot	118
	5.3.2 Application et résultats	121

5.4 Optimisation d'erreur du robot Stäubli TX-90	129
5.4.1 Configuration du robot	129
5.4.2 Application et résultats	132
5.5 Optimisation des erreurs du robot Stäubli TX-90 pour différentes	120
solutions du MGI	
5.6 Comparaison des résultats optimaux pour les différentes solutions du	155
MGI	100
5.7 Conclusion	157
CONCLUSION	158
REFERENCES	162

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

RIA	Institue américaine de robotique
GMAW	Soudage à l'arc sous gaz
CAO/FAO	Conception assiste par ordinateur/Fabrication assiste par ordinateur
TCP	Point centre de l'outil
AP	Précision de pose
RP	Répétabilité de pose
vAP	Variation de la précision de pose multidirectionnel
AD	Précision de distance
RD	Répétabilité de distance
t	Temps de stabilisation de position
OV	Dépassement de position
dAP	Dérive de précision de pose
dRP	Dérive de répétabilité de pose
E	Interchangeabilité
AT	Précision de trajectoire
RT	Répétabilité de trajectoire
AV	Précision de la vitesse de trajectoire
RV	Répétabilité de la vitesse de la trajectoire
FV	Fluctuation de la vitesse de trajectoire
WS	L'erreur de course de tissage
WF	L'erreur de fréquence de tissage
FFT	Transformée de Fourier rapide
DHM	Denavit-Hartenberg modifiée
MGD	Modèle géométrique direct
MGI	Modèle géométrique inverse
MCD	Modèle cinématique direct
MCI	Modèle cinématique inverse

MDI	Modèle dynamique inverse	
ddl	Degrés de liberté	
GA	Algorithme génétique	
MOGA	Algorithme génétique multi-objectif	
σ	Type de l'articulation j	
a _j	Vecteur unitaire	
Nj	rapport de réduction de l'axe j.	
Nt	Nombre de dents de l'outil	
Nd	Nombre de discrétisation de l'outil	
Rj	Repère orthonormé	
x y, z	Coordonnées linéaires le long de des axes x, y, z	
ⁱ Tj	Matrice de transformation homogene	
in		
'Pj	Vecteur position de la j ^{ene} articulation	[m]
'A _j	Matrice rotation de la j ^{eme} articulation	[rad] ou [°]
α_j	L'angle entre Z $_{j-1}$ et Z $_{j}$ autour de X $_{j-1}$	[rad] ou [°]
dj	Distance entre Z_{j-1} et Z_j le long X_{j-1}	[m]
θ	L'angle entre X $_{j-1}$ et X $_j$ Autour de Z $_j$	[rad] ou [°]
r _j	Distance entre X_{j-1} et X_j le long Z_j	[m]
Cj	Cosinus de l'angle (θ_j)	[rad] ou [°]
Sj	Sinus de l'angle (θ_j)	[rad] ou [°]
q_j	Vecteur des variables articulaires	[rad] ou [°]
ģ	Vecteur des vitesses articulaire	[rad/s]
q	Vecteur des accélérations articulaires	[rad/s ²]
Ż	Vitesse des variables opérationnelles	[m/s]
X	Accélération cartésiennes	[m/s²]
J(q)	Matrice jacobienne	[m]
Г	Vecteur des couples/forces des actionneurs	[N.m]
Vn	Vitesse de translation	[m/s]
ω _n	Vitesse de rotation	[rad/s]

E	Energie cinétique	[N.m]
U	Energie potentielle	[N.m]
Mj	Masse du j ^{eme} corps	[kg]
la _j	Moments d'inertie de j ^{eme} actionneur	[N.m/rad/s ²]
jm	Moment d'inertie du rotor de l'actionneur j ;	[kg.m ²]
ⁱ Vj	Vecteur de vitesses linéaire	[m/s]
ⁱ ωj	Vecteur de vitesses angulaire	[rad/s]
Γ _{fj}	Couple de frottements	[N.m]
F _{sj}	Frottement sec	[N.m]
F_{vj}	Frottement visqueux	[N.m/rad/s]
K _θ	Matrice de rigidité des articulations.	[N.m/rad]
$\Delta \boldsymbol{\theta}$	Différence entre la position souhaitée et la position réel	[rad] ou [°]
Fe	Force extérieur	[N]
ΔX	Déviation cartésienne	[m]
K _X	Matrice de rigidité cartésienne.	[N/m]
K _c	Matrice de rigidité complémentaire	[N.m/rad]
Vc	Vitesse de coupe	[m/min]
V _f	Vitesse d'avance	[mm/min]
a _p	Profondeur de coupe axiale	[mm]
a _e	Profondeur de coupe radiale	[mm]
fz	Avance par dent	[mm/dent]
D	Diamètre d'outil de fraisage	[mm]
β	Angle d'hélice d'outil de fraisage	[°]
Φ _j (z)	Position angulaire de l'outil lors de contact outil/matière	; [°]
Ω	Vitesse de rotation de la fraise	[tr/min]
dt	Temps nécessaire à la fraise pour une rotation.	[s]
hj	L'épaisseur instantanée du copeau	[mm]
Φ _e , Φ _s	Angles d'entrée et de sortie du segment de dent dans l matériau	e [°]
dF _t , dF _r , dF _a	Les efforts de coupe tangentielles, radiales et axiales respectivement	[N]

K _{tc} , K _{rc} , K _{ac}	Coefficients des forces de coupe spécifiques dans les	
	directions tangentielle, radiale et axiale,	[N/mm²]
	respectivement.	
	coefficients des efforts de coupe pour chaque arête,	
K _e , K _{re} ,	dans les directions tangentielle, radiale et axiale,	[N/mm]
Nae	respectivement.	
(D. (D.	Variables de décision initial et final pour le robot	٢٥١
Ψ_0 , Ψ_f	redondant a 3 ddl	[]
ΔP	Déviation cartésienne globale	[mm]
$\Delta \mathbf{x}$	Déviation cartésienne sur la direction \overrightarrow{OX}	[mm]
$\Delta \mathbf{y}$	Déviation cartésienne sur la direction \overrightarrow{OY}	[mm]
Δz	Déviation cartésienne sur la direction \overrightarrow{OZ}	[mm]
F1, F2,	Constient objectives neur la technique d'entimination m	ulti-objectif
F3	Fonctions objectives pour la technique d'optimisation m	
$X_t, Z_t, \gamma,$	Variables de décision nour la rabat Stäubli TV 00	
β, x, y, z		

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.1 : Principal composent d'un environnement robotique	25
Figure 1.2 : Caractéristiques d'un robot manipulateur	26
Figure 1.3 : Robot industriel à six axes	27
Figure 1.4 : Différents structure des robots industriels	27
Figure 1.5 : Limites articulaires du robot industriel	27
Figure 1.6 : Espace de travail du robot	28
Figure 1.7 : Charge utile supporté par le robot (jaune)	28
Figure 1.8 : Différentes tâches de manutention robotise	29
Figure 1.9 : Soudage MIG robotisé	31
Figure 1.10 : Assemblage robotisé des composantes électroniques	32
Figure 1.11 : Robot de peinture	33
Figure 1.12 : Robot d'usinage	34
Figure 1.13 : Répartition de l'utilisation des robots industriels par application	34
Figure 1.14 : Précision et répétabilité de pose	35
Figure 1.15 : Précision et répétabilité d'orientation	36
Figure 1.16 : Variation de la précision de la pose multidirectionnelle	37
Figure 1.17 : Précision des distances	37
Figure 1.18 : Temps de stabilisation et dépassement de pose	38
Figure 1.19 : Dérive des caractéristiques de pose	39
Figure 1.20 : Interchangeabilité	39
Figure 1.21 : Précision et répétabilité de la trajectoire	40
Figure 1.22 : Définition des changements d'orientation	41
Figure 1.23 : Dépassement en courbe et erreur d'arrondi en courbe dans	10
un virage serré	42
Figure 1.24 : Caractéristiques de vitesse de la trajectoire	43
Figure 1.25 : Trajectoire de tissage commandé et atteinte	45
Figure 2.1 : Repères utilisés en robotique	59
Figure 2.2 : Transformation des repères	60
Figure 2.3 : Transformation d'un vecteur	60

Figure 2.4 : Transformation de translation pure	61
Figure 2.5 : Transformation de rotation pure autour des axes principaux	62
Figure 2.6 : Description de la méthode DHM	63
Figure 2.7 : Configuration Zéro "géométrique" de Stäubli TX-90	65
Figure 2.8 : Schéma cinématique de Stäubli TX-90.	66
Figure 2.9 : Solutions possibles de MGI du Stäubli TX-90	68
Figure 2.10 : Flexibilités localisées dans les articulations.	79
Figure 3.1 : Différents type d'outil : a) Outil à arêtes coupantes b) Outil à plaquettes	84
Figure 3.2 : Mouvement d'avance : a) assuré par le robot, b) assuré par la pièce	84
Figure 3.3 : Types de fraisage : a) fraisage en bout, b) fraisage en roulant	85
Figure 3.4 : Mode de travail en opposition : a) fraisage en bout, b) fraisage en roulant	86
Figure 3.5 : Mode de travail en avalant : a) fraisage en bout, b) fraisage en roulant	86
Figure 3.6 : Vitesse de Coupe V_c .	87
Figure 3.7 : Vitesse d'Avance V_f .	87
Figure 3.8 : Modélisation de l'effort de contact outil/matériau.	89
Figure 3.9 : Cas d'usinage : a _e < D/2	90
Figure 3.10 : Cas d'usinage : D/2 < ae < D	90
Figure 3.11 : Cas d'usinage : ae = D	90
Figure 3.12 : Étapes du calcul de l'effort de coupe	92
Figure 3.13 : Effort de coupe correspondant à un tour d'outil : (a) modèle utilisé ; (b) référence [10].	93
Figure 3.14 : Illustration partielle de la variation de l'effort de coupe pendant l'usinage.	94
Figure 3.15 : Efforts de coupe calculés sur le plan XY : a) direction 'X', b) direction 'Y'	95
Figure 3.16 : Efforts de coupe calculés sur le plan XZ : a) direction 'X', b) direction 'Z'	95
Figure 3.17 : Efforts de coupe calculés sur le plan YZ : a) direction 'Y', b) direction 'Z'	95

Figure 4.1 : Schéma fonctionnel de l'outil de simulation choisi.	101
Figure 4.2 : Corps du robot	102
Figure 4.3 : Choix du moteur	102
Figure 4.4 : Emplacement choisi pour le moteur	103
Figure 4.5 : Calcul du robot et simulation dynamique	103
Figure 4.6 : Position de l'articulation calculée par Matlab	104
Figure 4.7 : Vitesse des articulations calculées par Matlab	105
Figure 4.8 : Accélération articulaire calculée par Matlab	105
Figure 4.9 : Positions articulaires simulées par SolidWorks	105
Figure 4.10 : Vitesses articulaires simulées par SolidWorks	106
Figure 4.11 : Accélérations articulaires simulées par SolidWorks	106
Figure 4.12 : Fraisage robotisé : (a) configuration initiale et finale du robot,	107
(b) aperçu de l'outil de coupe	107
Figure 4.13 : Erreurs articulaires pendant l'usinage	107
Figure 4.14 : Erreurs de position cartésienne pendant l'usinage	108
Figure 4.15 : Erreurs d'orientation cartésienne pendant l'usinage	108
Figure 4.16 : Trajectoire souhaitée (vert) et obtenue (rouge) dans le	110
processus d'usinage	115
Figure 4.17 : Trajectoire TCP obtenue par le simulateur proposé.	110
Figure 4.18 : Résultats pour le robot planaire à deux DOF : (a) méthode	111
proposée ; (b) référence [45].	
Figure 4.19 : Résultats pour le robot à six DOF : (a) méthode proposée ;	112
(b) référence [46].	112
Figure 5.1 : Organigramme de l'algorithme génétique utilisé	115
Figure 5.2 : Solutions du front de Pareto pour les deux fonctions objectives	117
(F1, F2)	
Figure 5.3 : Robot plan redondant a 3 ddl	118
Figure 5.4 : Définition des intervalles de ϕ_0 et ϕ_f géométriquement	118
Figure 5.5 : Flexibilités articulaires du robot 3R plan	120
Figure 5.6 : Effort de coupe correspondant à un tour d'outil	121
Figure 5.7 : Solution minimale et variables optimales mono-objectif	122
Figure 5.8 : Solution maximale et variables optimales mono-objectif	123

Figure 5.9 : Configurations du robot obtenues par la technique mono objectif	123
Figure 5.10 : Trajectoire souhaitée obtenue par la technique mono objectif	124
Figure 5.11 : Front de Pareto de solutions multi-objectif minimales et maximales	124
Figure 5.12 : Erreur minimal pour ϕ_0 =-38.67°, ϕ_f =-35.92°	125
Figure 5.13 : Erreur maximale pour ϕ_0 =69.6°, ϕ_f =72.43°	126
Figure 5.14 : Configurations du robot obtenues par la technique multi- objectif	127
Figure 5.15 : Trajectoire souhaitée obtenue par la technique multi-objectifs	128
Figure 5.16 : Comparaison des ΔP mono- et multi-objectifs.	128
Figure 5.17 : Comparaison des Δx et Δy mono- et multi-objectifs.	129
Figure 5.18 : Approximation de l'espace de travail en 3D.	130
Figure 5.19 : Variables de l'outil utiliser pour l'optimisation	130
Figure 5.20 : Représentation du cube limitant le domaine d'étude dans l'espace de travail	131
Figure 5.21 : Efforts de coupe calculés sur le plan XY : a) direction 'X', b) direction 'Y'	132
Figure 5.22 : Efforts de coupe calculés sur le plan YZ : a) direction 'Y', b) direction 'Z'	132
Figure 5.23 : Efforts de coupe calculés sur le plan XZ : a) direction 'X', b) direction 'Z'	133
Figure 5.24 : Erreur d'avance minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 1 ^{ere} solution du MGI	133
Figure 5.25 : Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 1 ^{ere} solution du MGI	134
Figure 5.26 : Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 1 ^{ere} solution du MGI	134
Figure 5.27 : Erreur globale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 1 ^{ere} solution du MGI	135
Figure 5.28 : Erreur d'avance maximale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 1 ^{ere} solution du MGI	136

Figure 5.29	Erreur Transversale maximale obtenue dans tous les plans	126
	et les directions d'usinage pour la 1 ^{ere} solution du MGI	130
Figure 5.30 :	Erreur de profondeur maximale obtenue dans tous les plans	107
	et les directions d'usinage pour la 1 ^{ere} solution du MGI	137
Figure 5.31 :	Erreur globale maximale obtenue dans tous les plans et les	138
	directions d'usinage pour la 1 ^{ere} solution du MGI	150
Figure 5.32 :	Erreur d'avance minimale obtenue dans tous les plans et les	120
	directions d'usinage pour la 2 ^{eme} solution du MGI	159
Figure 5.33 :	Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et	130
	les directions d'usinage pour la 2 ^{eme} solution du MGI	129
Figure 5.34 :	Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans	140
	et les directions d'usinage pour la 2 ^{eme} solution du MGI	
Figure 5.35	Erreur globale minimale obtenue dans tous les plans et les	140
	directions d'usinage pour la 2 ^{eme} solution du MGI	140
Figure 5.36 :	Erreur d'avance minimale obtenue dans tous les plans et les	141
	directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI	
		1/10
Figure 5.37 :	Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et	142
Figure 5.37 :	Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI	142
Figure 5.37 : Figure 5.38 :	Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans	142 142
Figure 5.37 : Figure 5.38 :	Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI	142 142
Figure 5.37 : Figure 5.38 : Figure 5.39 :	Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur globale minimale obtenue dans tous les plans et les	142 142 143
Figure 5.37 : Figure 5.38 : Figure 5.39 :	Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur globale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI	142 142 143
Figure 5.37 : Figure 5.38 : Figure 5.39 : Figure 5.40 :	Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur globale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur d'avance minimale obtenue dans tous les plans et les	142 142 143 143
Figure 5.37 : Figure 5.38 : Figure 5.39 : Figure 5.40 :	Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur globale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur d'avance minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 4 ^{eme} solution du MGI	142 142 143 143
Figure 5.37 : Figure 5.38 : Figure 5.39 : Figure 5.40 : Figure 5.41 :	Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur globale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur d'avance minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 4 ^{eme} solution du MGI Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les	 142 142 143 143 143 144
Figure 5.37 : Figure 5.38 : Figure 5.39 : Figure 5.40 : Figure 5.41 :	Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur globale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur d'avance minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 4 ^{eme} solution du MGI Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 4 ^{eme} solution du MGI	142 142 143 143 144
Figure 5.37 : Figure 5.38 : Figure 5.39 : Figure 5.40 : Figure 5.41 : Figure 5.42 :	Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur globale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur d'avance minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 4 ^{eme} solution du MGI Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 4 ^{eme} solution du MGI Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 4 ^{eme} solution du MGI Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et	 142 142 143 143 144 144 144
Figure 5.37 : Figure 5.38 : Figure 5.39 : Figure 5.40 : Figure 5.41 : Figure 5.42 :	Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur globale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur d'avance minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 4 ^{eme} solution du MGI Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 4 ^{eme} solution du MGI Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 4 ^{eme} solution du MGI Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 4 ^{eme} solution du MGI	142 142 143 143 144 144
Figure 5.37 : Figure 5.38 : Figure 5.39 : Figure 5.40 : Figure 5.41 : Figure 5.42 : Figure 5.43 :	Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur globale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur d'avance minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 4 ^{eme} solution du MGI Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 4 ^{eme} solution du MGI Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 4 ^{eme} solution du MGI Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 4 ^{eme} solution du MGI Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans	 142 142 143 143 144 144 144 145
Figure 5.37 : Figure 5.38 : Figure 5.39 : Figure 5.40 : Figure 5.41 : Figure 5.42 : Figure 5.42 :	Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur globale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur d'avance minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 4 ^{eme} solution du MGI Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 4 ^{eme} solution du MGI Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 4 ^{eme} solution du MGI Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 4 ^{eme} solution du MGI Erreur globale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 4 ^{eme} solution du MGI	 142 142 143 143 144 144 144
Figure 5.37 : Figure 5.38 : Figure 5.39 : Figure 5.40 : Figure 5.41 : Figure 5.42 : Figure 5.43 : Figure 5.43 :	Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur globale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 3 ^{eme} solution du MGI Erreur d'avance minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 4 ^{eme} solution du MGI Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 4 ^{eme} solution du MGI Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 4 ^{eme} solution du MGI Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 4 ^{eme} solution du MGI Erreur globale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 4 ^{eme} solution du MGI Erreur globale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 4 ^{eme} solution du MGI Erreur globale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 4 ^{eme} solution du MGI	 142 142 143 143 144 144 144 145 146

Figure 5.45 :	Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et	146
	les directions d'usinage pour la 5 ^{eme} solution du MGI	
Figure 5.46 :	Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans	147
	et les directions d'usinage pour la 5 ^{eme} solution du MGI	171
Figure 5.47	Erreur globale minimale obtenue dans tous les plans et les	147
	directions d'usinage pour la 5 ^{eme} solution du MGI	171
Figure 5.48 :	Erreur d'avance minimale obtenue dans tous les plans et les	1/0
	directions d'usinage pour la 6 ^{eme} solution du MGI	140
Figure 5.49 :	Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et	140
	les directions d'usinage pour la 6 ^{eme} solution du MGI	149
Figure 5.50 :	Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans	1 4 0
	et les directions d'usinage pour la 6 ^{eme} solution du MGI	149
Figure 5.51 :	Erreur globale minimale obtenue dans tous les plans et les	450
	directions d'usinage pour la 6 ^{eme} solution du MGI	150
Figure 5.52 :	Erreur d'avance minimale obtenue dans tous les plans et les	450
	directions d'usinage pour la 7 ^{eme} solution du MGI	150
Figure 5.53 :	Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et	151
	les directions d'usinage pour la 7 ^{eme} solution du MGI	151
Figure 5.54 :	Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans	454
	et les directions d'usinage pour la 7 ^{eme} solution du MGI	151
Figure 5.55 :	Erreur globale minimale obtenue dans tous les plans et les	450
	directions d'usinage pour la 7 ^{eme} solution du MGI	152
Figure 5.56 :	Erreur d'avance minimale obtenue dans tous les plans et les	450
	directions d'usinage pour la 8 ^{eme} solution du MGI	153
Figure 5.57 :	Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et	450
	les directions d'usinage pour la 8 ^{eme} solution du MGI	153
Figure 5.58 :	Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans	450
	et les directions d'usinage pour la 8 ^{eme} solution du MGI	153
Figure 5.59 :	Erreur globale minimale obtenue dans tous les plans et les	
	directions d'usinage pour la 8 ^{eme} solution du MGI	154
Figure 5.60 :	Erreur d'avance minimale obtenue par les huis solutions du	4 - -
	MGI	155

Figure 5.61 : Erreur Transversale minimale obtenue par les huis solutions du MGI	156
Figure 5.62 : Erreur de profondeur minimale obtenue par les huis solutions du MGI	156
Figure 5.63 : Erreur globale minimale obtenue par les huis solutions du MGI	156
Tableau 2.1 : Paramètres de Denavit-Hartenberg Modifier (DHM) du Stäubli TX-90	66
Tableau 2.2 : Valeurs identifiées des paramètres la _j du TX-90	77
Tableau 2.3 : Valeurs identifiées des paramètres F_{vj} et F_{sj} du TX-90	77
Tableau 2.4 : Eléments de la matrice de rigidité de l'articulation de Stäubli TX-90	80
Tableau 3.1 : Paramètres d'usinage utilisés lors de simulation.	92
Tableau 4.1 : Paramètres souhaités de l'application de traçage	104
Tableau 4.2 : Positions initiales des articulations dans la référencegéométrique	107
Tableau 5.1 : Paramètres de Denavit-Hartenberg modifié du robot 3dd	119
Tableau 5.2 : Éléments de la matrice de rigidité des articulations du robot planaire à trois axes	121
Tableau 5.3 : Paramètres d'usinage utilisés lors de la simulation	121
Tableau 5.4 : Résultats de la minimisation multi-objectifs	125
Tableau 5.5 : Résultats de la maximisation multi-objectifs	126
Tableau 5.6 : Intervalles des variables de décision	131
Tableau 5.7 : Tolérances commerciales des procédés d'usinage	138

INTRODUCTION

L'usine du future est basée sur l'intégralité de l'intelligence artificielle dans les différents secteurs et domaines de l'industrie. Pour atteindre cet objectif, de nombreux verrous technologiques doivent être levés afin d'assurer la compatibilité avec les algorithmes complexes de l'intelligence artificielle. Les moyens techniques mis en œuvre dans plusieurs secteurs de l'industrie d'aujourd'hui sont assez faibles pour suivre la technologie de 'l'industriel 4.0'', qui consiste à moderniser les étapes de production par l'installation des capteurs sur les machines et les équipements afin d'assurer la surveillance et la commande en temps réel (en ligne). Souvent, la plupart des procédés industriels utilisent des machines conventionnelles. Cependant, ces machines ont des difficultés pour fabriquer les pièces de grandes dimensions ou de formes compliquées.

Avec le développement croissant du secteur de la robotique et sa diversité pour couvrir plusieurs domaines, ces machines spéciales peuvent être remplacées par des robots industriels poly-articulés. Les multiples degrés de liberté de la structure du robot lui permettent de s'adapter à un large éventail de tâches et d'environnements. Donc, la robotisation des systèmes industriels joue un rôle crucial dans l'amélioration et l'adaptation de ces domaines avec la technologie 4.0. Cette dernière réduit les coûts d'investissement et fournit un volume de travail élevé pour produire des pièces de grandes dimensions et de géométries 3D complexes, ainsi que les performances technico-économiques de la production qui peuvent être grandement améliorées.

Afin de réduire le temps de programmation et minimiser le taux d'investissement, la programmation hors-ligne des robots industriels permet d'évaluer plusieurs scénarios avant de construire la cellule automatisée et d'éviter les erreurs faites par méthodes d'apprentissage traditionnel, ceci à travers la programmation par des logiciels de simulation sans la nécessité d'arrêter le robot, hors de l'environnement de production.

Sous l'effet des efforts de contact du robot avec son environnement, le comportement géométrique, statique et dynamique de ce dernier est influencé au

cours du fonctionnement. Des déformations au niveau de la structure et/ou niveau des articulations sont créées, ce qui entraîne, par la suite, des déviations de trajectoire de l'effecteur final. D'une part, la précision de suivi de la trajectoire des robots par rapport aux machines à commande numérique dans les tâches robotisées présente des limites de performance en termes de précision de réalisation de la tâche et de qualité de produit final. D'autre part, une grande partie des erreurs des robots provient de la différence qui s'établit entre le robot réel et son modèle CAO, ainsi que de la transformation cinématique inverse qui résulte des incohérences entre le comportement du modèle géométrique implanté dans la commande du robot.

Afin de réaliser les opérations des différents procédés industriels dans de bonnes conditions de précision et de qualité, cette déviation de la trajectoire de l'outil peut être corrigée par les méthodes d'optimisation à base de l'algorithme génétique. En effet, l'objectif n'est pas de garantir la précision absolue de pose du robot dans tout son espace de travail, mais plutôt de se concentrer sur la précision de la réalisation de la tâche. Pour ce faire, nous devons nous concentrer sur le choix de la localisation optimale de l'effecteur dans l'espace de travail. Ce rapport de thèse s'intéresse à l'étude de l'impact des efforts extérieurs sur la précision de la trajectoire de robots sériels lors des tâches qui nécessite l'interaction outil / matière, par la suite, nous proposons une méthodologie de correction de l'erreur en position et en orientation de l'outil tout en tenant compte des paramètres qui peuvent affecter la précision du robot durant le fonctionnement.

Notre travail est divisé en cinq chapitres, sur lesquels cette thèse est organisée :

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique. L'objectif de ce chapitre introductif est de mettre en évidence l'utilité des robots manipulateurs et leur contribution à l'amélioration de la qualité de production industrielle. D'abord, des spécifications du robot sont présentées suite à un bref historique de l'évolution des robots manipulateurs ainsi que de la robotisation de procédés industriels ; puis nous traitons les critères de performance indiqués par la norme ISO 9283. Il nous faut aussi regrouper les différentes sources de perturbation qui influent directement

sur la précision du robot. Enfin, une proposition pour minimiser certaines erreurs afin d'améliorer les performances du robot dans des tâches imposées.

En fonction des objectifs, des contraintes de la tâche et des performances souhaitées, le développement de différents modèles mathématiques qui représentent le mieux possible le comportement du robot sont nécessaires. Donc, pour une commande et simulation performante du robot, il est nécessaire de connaître les modèles de transformation entre l'espace opérationnel et l'espace articulaire.

Dans le deuxième chapitre, les différents éléments de modélisation pour le robot manipulateur sériel Stäubli TX-90 à six degrés de liberté sont abordés. "Le choix de robot est justifié ; ainsi des notations de base et des méthodes de modélisation sont définies et détaillées". Nous distinguons les modèles géométriques, les modèles cinématiques et les modèles dynamiques. Lorsque le robot est soumis à des sollicitations importantes, les déformations du corps et des éléments de guidage ne sont pas négligeables. Par conséquent, il est nécessaire d'intégrer un modèle de déformation au modèle dynamique.

Pour une programmation hors ligne efficace, il faut modéliser le processus souhaité en nous rapprochant le plus possible de la réalité. À cette fin, certaines conditions du procédé d'usinage doivent être respectées et/ou garanties.

Le chapitre trois concerne la modélisation des efforts de contact du robot avec son environnement. Ceci nous permet de prédire les efforts sans la mise en place de l'usinage réel. L'objectif de ce chapitre est donc de développer un modèle du procédé qui sert à connaitre les efforts de coupe en fonction des paramètres de pilotage du procédé. De plus, ce modèle permet d'étudier la stabilité de la trajectoire du robot et d'établir des méthodes de minimisation des erreurs de son positionnement.

Pour simuler dynamiquement les procédés robotisés avec un contrôle optimal pendant la programmation hors ligne, il est nécessaire de mettre en œuvre un outil de simulation aussi précis que possible et capable de déterminer le comportement du robot pendant son fonctionnement. La création d'un outil logiciel permettant d'identifier le plus précisément possible le comportement du robot est le sujet du quatrième chapitre. L'objectif est d'améliorer la qualité globale et la rapidité du processus de maintenance robotique.

Afin d'améliorer la précision du robot et de minimiser l'erreur de positionnement de l'effecteur final pendant l'opération de fraisage, le chapitre cinq présente les techniques d'optimisation utilisées avec des fonctions objectives originales basées sur l'algorithme génétique mono et multi-objectif. Ces techniques seront présentées et comparées. La fiabilité de chaque technique doit être testée. Pour atteindre cet objectif, l'erreur de positionnement de deux architectures différentes du robot sera minimisée par les deux techniques. Nous notons que chaque architecture possède des variables de décisions différentes. Les résultats de cette partie nous permettent de prédire, avec précision, la quantité des erreurs de positionnement de l'effecteur final dans les tâches nécessitant une interaction avec l'environnement.

CHAPITRE 1

ROBOTISATION DES SYSTEMES INDUSTRIELS

1.1 Introduction :

Dans le but d'augmenter le volume de production et améliorer la qualité du produit dans les procédés industriels hautement automatisés, les robots manipulateurs sont largement utilisés dans divers procédés, souvent : le soudage, l'assemblage, l'usinage et levage... L'amélioration des performances techniques et économiques d'un procédé industriel par l'utilisation d'un système robotique nécessite la présence de certains critères définis dans la norme ISO 9283. Ces critères permettent d'identifier les capacités des robots industriels et leur adaptation à certaines applications.

Pour atteindre les performances souhaitées, il est nécessaire d'éviter certaines sources de perturbations qui affectent la précision du robot durant le fonctionnement, et, donc des erreurs de précision seront créées à plusieurs niveaux, souvent : des erreurs au niveau des articulations, au niveau de la structure du robot... Les travaux de recherche actuelle cités dans la présente section basent sur la détection des sources de perturbation, ainsi que prédire l'erreur résultante pour aboutir à la correction de ces erreurs comme dernière étape.

L'objectif de ce chapitre introductif est de mettre en évidence l'utilité des robots manipulateurs et leurs contributions à l'amélioration de la qualité de production industrielle. Pour cela, des spécifications du robot sont présentées suite à un bref historique de l'évolution des robots manipulateurs ainsi que la robotisation de procédés industriels ; une 2^{eme} section traitant les critères de performance indiquent la norme ISO 9283. L'état de l'art est présenter dans la 3^{eme} section qui regroupe les différentes sources de perturbation qui influent directement sur la précision du robot, à la fin, une proposition pour minimiser certaines erreurs afin d'améliorer les performances du robot dans des tâches imposées.

1.2 Robotique industrielle :

La robotique est un domaine relativement jeune de la technologie moderne qui dépasse les frontières traditionnelles de l'ingénierie. Elle s'intéresse à l'étude des machines qui peuvent remplacer les êtres humains dans l'exécution d'une tâche, tant au niveau de l'activité physique que de la prise de décision.

1.2.1 Définition :

Le robot industriel est une machine ayant une polyvalence et une flexibilité importantes. Selon la définition communément admise par RIA (Robot Institute of America), un robot est un manipulateur reprogrammable et polyvalent conçu pour déplacer des matériaux, des composants, des outils ou des dispositifs spécialisés au moyen de mouvements programmés modifiables pour l'exécution d'une variété de tâches. Cette définition, de 1980, rend bien compte de l'état actuel de la technologie robotique. En raison de sa programmabilité, le robot industriel est un composant typique des systèmes automatisés programmables [1].

Le robot industriel est né de la combinaison de deux technologies précédentes : les téléopérateurs et les machines à commande numérique. Les téléopérateurs, parfois appelés systèmes maître-esclave, ont été inventés pendant la Seconde Guerre mondiale pour manipuler des matériaux radioactifs. En raison de la grande précision requise pour l'usinage de certains produits, tels que les composants d'avions à haute performance, la commande numérique par ordinateur (CNC) a été créée. Les premiers robots industriels couplaient simplement les liaisons mécaniques des téléopérateurs avec l'autonomie et la programmabilité des machines CNC [2]. Un robot industriel est principalement composé :

- D'une structure mécanique : ou manipulateur composé d'une série de corps rigides (maillons) reliés par des articulations (joints) ; un manipulateur se distingue par un bras qui assure la mobilité, un poignet qui offre la dextérité, et un effecteur final qui exécute la tâche requise du robot.
- Des actionneurs : qui mettent le manipulateur en mouvement en actionnant les articulations ; les moteurs utilisés sont généralement électriques et hydrauliques, mais peuvent également être pneumatiques.

- Des capteurs : qui mesurent l'état du manipulateur et, si nécessaire, l'état de l'environnement.
- D'un système de commande : qui permet de contrôler et de superviser le mouvement du manipulateur.





1.2.2 Evolution des robots industriels :

Le terme "Robot" a été utilisé pour la première fois en 1921 par Karel Capek dans sa pièce "Rossum's Universal Robots". Le mot Robot dérive du mot tchèque robota, qui signifie esclavage ou travail forcé. En 1942, l'écrivain de science-fiction américain d'origine russe Isaac Asimov a utilisé le terme "robotique" pour la première fois dans son court roman Runabout. Asimov avait une perspective beaucoup plus positive de la position du robot dans la civilisation humaine [3].

La robotique est passée de la fiction à la réalité et combine des domaines tels que l'informatique, le génie électrique, le génie mécanique et l'intelligence artificielle (IA) durant ces dernières années. L'objectif principal de la robotique est de construire des machines qui accomplissent des tâches définies par l'utilisateur.

Les progrès de la robotique sont influencés par les avancées techniques, telles que les inventions du transistor [4], de l'ordinateur numérique [5], du système de commande numérique [6] et des circuits intégrés [7]. Ces progrès techniques ont amélioré les qualités des robots, leur permettant de passer de dispositifs mécaniques ou hydrauliques à des systèmes programmables qui peuvent même être conscients de leur environnement. La robotique, comme d'autres avancées techniques, a progressé et s'est modifiée en réponse aux besoins de la société.

1.2.3 Spécification du robot :

Les spécifications des robots fournissent les qualités précises d'un robot industriel. Il n'existe pas deux robots industriels exactement identiques. Chacun diffère en termes de charge utile, de portée, d'axe et de capacité d'application, entre autres.

Avec autant d'éléments à prendre en compte, le choix d'un robot peut sembler décourageant, mais ce n'est pas forcément le cas. Comprendre les caractéristiques de chaque robot peut nous aider à sélectionner le meilleur robot industriel pour optimiser le processus de production souhaitée :



Figure 1.2 : Caractéristiques d'un robot manipulateur

1.2.3.1 Axes : Un degré de liberté est représenté par un axe du robot. Un degré de liberté détermine la capacité du robot à se déplacer indépendamment. Plus un robot possède d'axes, plus il est flexible ou mobile.



Figure 1.3 : Robot industriel a six axes

1.2.3.2 Structure : La structure indique le type de robot. Les types de robots industriels les plus répandus sont les robots articulés, delta, SCARA et les robots portiques. Cette norme est importante car elle détermine l'enveloppe de fonctionnement d'un robot.



Figure 1.4 : Différents structure des robots industriels

1.2.3.3 Plage d'amplitude et de vitesse : Cette spécification exprime la plage de mobilité de chaque axe de robot en degrés. La vitesse de déplacement de chaque axe de robot est définie par les degrés parcourus par seconde.



Figure 1.5 : Limites articulaires du robot industriel

1.2.2.4 Espace de travail : L'espace de travail d'un robot est défini comme l'espace accessible par l'effecteur final. Le nombre de degrés de liberté, la longueur des corps du robot, la disposition des articulations, les limitations des articulations (telles que les butées mécaniques) et l'interférence mécanique entre ses parties influencent tous la taille de l'espace de travail [8].



Figure 1.6 : Espace de travail du robot

1.2.3.5 Masse du robot : Le poids d'un robot est défini comme sa masse. Il est souvent donné en kilogrammes et concerne exclusivement le poids du manipulateur robotique. Si nous souhaitons installer un robot sur une étagère, une table ou au plafond, il faut y penser.

1.2.3.6 Charge utile : La charge utile d'un bras manipulateur est la plus grande quantité de poids qu'il peut supporter, souvent exprimée en kilogrammes. La charge utile varie considérablement d'un robot industriel à l'autre, allant de 0,5 kg à plus de 1000 kg. Le poids des effecteurs intégrés du robot, ainsi que le poids des pièces à traiter, nous permet de sélectionner un robot ayant une capacité de charge utile appropriée.



Figure 1.7 : Charge utile supporté par le robot (jaune)

1.2.3.7 Répétabilité : La capacité d'un robot à revenir à la même position exacte à plusieurs reprises. En d'autres termes, elle indique le degré de précision d'un robot. Pour évaluer la marge d'erreur du robot, la répétabilité est exprimée en millimètres, plus ou moins le point de l'altération.

1.3 Procédés industriel robotisés :

Les multiples degrés de liberté de la structure du robot lui permettent de s'adapter à un large éventail de tâches et d'environnements. Parmi les diverses utilisations possibles des robots industriels, des études de cas sélectionnées sur des applications robotiques à fort potentiel seront brièvement décrites.

1.3.1 Manutention :

La manutention désigne toute activité consistant à porter et à déplacer une charge qui nécessite l'effort physique d'une ou plusieurs personnes pour la soulever, la placer, la pousser, la tirer ou la transporter. Pour éviter les risques propres à la manutention manuelle, il existe plusieurs équipements de levage et de transport permettant d'améliorer les conditions de travail, tels que les palans, les poulies, les transpalettes, les chariots automoteurs à conducteur porté, et en particulier les systèmes robotiques. Le procédé de manutention robotisé comprend la saisie, le transfert, l'emballage, la palettisation et le prélèvement. Le domaine d'application des robots le plus courant est la manutention, qui est présente dans tous les domaines de la fabrication.



Figure 1.8 : Différentes tâches de manutention robotisé

La conception du préhenseur et les techniques de préhension associées, compte tenu : les propriétés physiques de la pièce, taux de production, l'incertitude

concernant la géométrie et l'emplacement de l'objet, est un aspect essentiel et un défi majeur de l'ingénierie des systèmes de manipulation robotique [9].

Parmi les applications actuelles à fort potentiel des systèmes de manutention robotisés, on peut citer : le maintien des machines CNC pour les équipes sans travailleur [10], la palettisation et le levage d'objets pour des raisons ergonomiques ou lorsque les limites spécifiées dans les réglementations sur la manutention des charges sont dépassées [11], pour des raisons de propreté, comme c'est souvent le cas dans les industries alimentaire, pharmaceutique et des semi-conducteurs [12-14], pour éviter le travail monotone et la tension psychologique, et pour garantir la qualité de la logistique par l'inspection des pièces ou des objets [15].

1.3.2 Soudage.

ISO/TR 25901-1 définie le soudage comme étant une procédure qui permet d'assembler deux ou plusieurs pièces en établissant une continuité de matériau(x) au moyen de chaleur, de pression ou des deux, avec ou sans utilisation d'un produit d'apport [16].

Le soudage manuel nécessite des employés qualifiés car des imperfections dans la soudure peuvent avoir des effets majeurs. De plus, les soudeurs sont soumis à des conditions de travail dangereuses (fumées, mauvaises postures de travail ergonomiques, chaleur et bruit), c'est pourquoi l'utilisation de robots dans les opérations de soudage à l'arc est devenue avantageuse.

Dans l'industrie de fabrication, le soudage par résistance par points, notamment dans l'assemblage de carrosseries automobiles, et le soudage à l'arc sous gaz protecteur (GMAW) sont classés dans la catégorie du soudage robotisé les plus populaires. En plus, ces procédés sont différents en termes de principe de fonctionnement.

Pour obtenir de bonnes performances et une bonne qualité de soudure, trois phases distinctes du processus de soudage doivent être soigneusement prises en compte lors de la construction d'un système de soudage robotique entièrement automatisé [17] :

Phase préparation : Au cours de cette étape, l'opérateur de soudage met en place la cellule robotisée, les composants à souder, les paramètres de soudage.

Un préprogramme de soudage robotisé est accessible et mis en ligne lorsque la CAO/FAO ou une autre programmation hors ligne est utilisée. Par conséquent, le programme robotique peut ne nécessiter qu'un ajustement mineur de l'étalonnage, ce qui peut être accompli facilement par l'opérateur de soudage qui effectue quelques simulations en ligne du processus de soudage.

Phase de soudage : L'équipement automatique doit posséder les mêmes capacités que le soudage manuel, notamment la capacité de suivre les joints, d'effectuer des changements de paramètres de soudage en temps réel et de maintenir une orientation de la torche qui suit la trajectoire souhaitée (qui peut être différente de la trajectoire désirée).

Phase d'analyse : Généralement une phase post-soudage, implique que l'opérateur de soudage évalue la soudure pour déterminer si elle est satisfaisante ou si des révisions des deux premières étapes sont nécessaires. L'exécution de cette phase en ligne pendant le processus de soudage est rendue possible par l'utilisation de capteurs de pointe, telles que des caméras laser 3D.



Figure 1.9 : Soudage MIG robotisé

Des entreprises spécialisées fournissent des sources d'énergie électrique, des torches et des équipements périphériques pour le nettoyage et l'entretien automatiques de la torche GMAW (anti-éclaboussures, coupe-fil, changeur d'outil, etc.). Des capteurs sont fréquemment utilisés pour détecter les écarts de soudure et mesurer les cordons de soudure avant ou pendant le processus de soudage ; ce qui permet d'ajuster la trajectoire du robot en présence de changements et de déformations de la pièce [9].

1.3.3 Assemblage :

L'assemblage dans la fabrication fait référence au processus de combinaison de sous-systèmes ou de composants en systèmes plus grands. Les processus d'assemblage dans la fabrication sont divisés en quatre catégories : l'assemblage, la manipulation, l'inspection et les opérations auxiliaires (nettoyage, ajustement, marquage, etc.) [18].

Selon la taille du lot, le produit et la cadence, la combinaison de ces quatre rôles peut varier : des cellules de travail d'assemblage aux lignes d'assemblage à haut débit. Les méthodes d'assemblage représentent jusqu'à 80 % du coût de fabrication d'un produit et fournissent le plus grand avantage concurrentiel [19].

Par conséquent, l'optimisation de l'assemblage englobe plusieurs aspects interconnectés : la conception de l'assemblage, la conception de la cellule de travail et de la chaîne de montage, ainsi que la logistique et la gestion de la fabrication [20].



Figure 1.10 : Assemblage robotisé des composantes électroniques

Les robots industriels ont d'abord été utilisés pour l'automatisation de l'assemblage, notamment sur les lignes de production à grande vitesse. Les robots, en revanche, sont de plus en plus utilisés dans des cellules de travail hautement flexibles et feront leur entrée sur le lieu de travail agile de la production allégée en tant qu'instruments adaptables entre les mains des travailleurs humains.

1.3.4 Peinture :

En 1969, l'entreprise norvégienne 'Trallfa', a mis au point des robots de peinture au pistolet pour pulvériser les parechocs et autres pièces en plastique dans l'industrie automobile, en réponse aux conditions de travail dangereuses pour les opérateurs humains. Initialement alimentés par un système pneumatique pour assurer la protection contre les explosions, les robots d'aujourd'hui sont entièrement électriques. Les tuyaux de gaz et de peinture sont logés dans des poignets creux, ce qui permet des mouvements rapides et agiles. Les pistolets de pulvérisation robotisés ont considérablement évolué afin d'offrir une qualité constante tout en utilisant le moins possible de peinture et de solvant, ainsi que pour passer d'une couleur de peinture à l'autre. Au départ, les robots de peinture imitaient les mouvements des employés humains. Aujourd'hui, la plupart de la programmation de la peinture robotisée se fait hors ligne car les plates-formes de programmation modernes fournissent des simulations de processus intégrées pour optimiser le dépôt, l'épaisseur et la couverture de la peinture [21].



Figure 1.11 : Robot de peinture

1.3.5 Traitement :

Le meulage, l'ébavurage, le fraisage et le perçage sont des procédures d'enlèvement de matières qui sont de plus en plus prises en charge par des robots industriels à cinématique sérielle car ils allient dextérité, adaptabilité et rentabilité. Comme la forme du composant implique souvent des tolérances dans les qualités géométriques ou matérielles, les outils de traitement utilisés sont souvent intégrés avec une conformité passive ou un contrôle de force actif [22]. Toutefois, la précision des robots (plage + 0,5 mm) n'est guère comparable à celle des machines-outils normales (plage + 0,01 mm) [23]. Pour la précision, les fréquences naturelles inférieures et les coefficients d'amortissement des structures mécaniques doivent être aussi élevés que possible : les fraiseuses ont des fréquences naturelles inférieures de l'ordre de 50-100 Hz, contre 20-30 Hz pour les robots industriels typiques [24, 25].





Figure 1.12 : Robot d'usinage

Les noyaux de commande numérique (CN) qui partagent les composants de commande des robots telles que les interfaces utilisateurs, les transformations cinématiques et les fonctions de sécurité sont intégrés dans les commandes de robots modernes.



Figure 1.13 : Répartition de l'utilisation des robots industriel par application [26]

1.4 Critères de performances des robots :

Les robots sériels étaient initialement utilisés pour des opérations industrielles simples telles que l'assemblage, la manipulation, la découpe, la peinture et la soudure de pièces. En effet, ces opérations nécessitent un niveau relativement faible de précision de repositionnement et de suivi de trajectoire. Dans le monde industriel d'aujourd'hui, l'utilisation des robots pour des tâches de fabrication complexes est de plus en plus importante. Par conséquent, une précision absolue est plus que nécessaire. La répétabilité et la précision de pose sont deux indicateurs critiques pour évaluer les performances d'un robot industriel. Ces indicateurs, ainsi que d'autres critères, sont documentés en détail dans la norme ISO 9238 [27].

La Norme internationale ISO 9238 décrit les méthodes de spécification et d'essai des caractéristiques de performance qui permettent d'identifier les capacités des robots industriels et de les adapter à des applications spécifiques. L'ensemble des caractéristiques des robots industriels évalués par la présente norme sont :

1.4.1 Précision et répétabilité de pose :

La précision de pose (AP) en robotique est la capacité de positionnement de l'effecteur final en un point cible dans l'espace de travail du robot [28]. Cette précision qualifie l'écart entre la position désirée et la moyenne des positions atteintes.



Figure 1.14 : Précision et répétabilité de pose
La répétabilité de pose (RP) représente la capacité du robot à atteindre la même pose de l'outil avec les mêmes consignes de positions articulaires et suivant la même trajectoire d'approche dans les mêmes conditions expérimentales [29].



Figure 1.15 : Précision et répétabilité d'orientation

La précision des robots industriels est inférieure à leur répétabilité car ils ont été développés pour effectuer des actions répétées. Les précisions typiques des manipulateurs industriels sont de l'ordre de ±1 mm [30,31], mais des valeurs aussi basses que 0,3 mm peuvent être atteintes avec une compensation précise [32]. La répétabilité varie de 0,01 à 0,03 mm [33].

1.4.2 Variation de la précision de pose multidirectionnelle :

La programmation par apprentissage spécifie la pose de commande. L'écart maximal entre les différentes poses moyennes atteintes par le point TCP du robot (barycentre du groupe de points atteints), obtenu pour la même pose de commande, N fois répétée, dans trois directions perpendiculaires, est défini comme la variation multidirectionnelle de la précision de la pose (vAP). Les axes du système de coordonnées de base sont parallèles aux trois directions perpendiculaires [34].

(vAP) est la plus grande distance entre les barycentres du groupe de points atteints par le TCP du robot pour la pose de la commande TCP, après avoir effectué N répétitions dans trois directions différentes (généralement perpendiculaires).



Figure 1.16 : Variation de la précision de pose multidirectionnel

La variation de la précision de l'orientation multidirectionnelle (vAPa, vAPb, vAPc) est décrite comme le plus grand écart angulaire entre les valeurs médianes des orientations angulaires atteintes, répétées N fois dans différentes directions (généralement trois) pour la même orientation souhaitée.

1.4.3 Précision de distance et répétabilité de distance :

La précision de distance (AD) mesure les différences de distance entre deux points de commande et deux ensembles de positions moyennes atteintes. La répétabilité de distance (RD) est la variation des distances causées par une séquence de mouvements répétés du robot entre deux endroits [35].



Figure 1.17 : Précision des distances

Le test de précision de la distance est effectué à la charge maximale de l'effecteur du robot, qui doit être déplacé 30 fois entre les points P2 et P4 du cube de mesure.

1.4.4 Temps de stabilisation de position :

Le temps de stabilisation de position (t) est l'intervalle de temps entre le moment où le robot envoie le signal " pose atteinte " et celui où le mouvement oscillatoire ou amorti de l'effecteur du robot se situe dans une limite spécifiée par le fabricant [31].



Figure 1.18 : Temps de stabilisation et dépassement de pose

1.4.5 Dépassement de position :

Le dépassement de position (OV) est une caractéristique comparable, comme le montre la Figure 1.18. La plus grande divergence entre la trajectoire de l'effecteur final en approche et la pose obtenue après que le robot a émis le signal "pose atteinte" est définie comme le dépassement de pose. La figure 1.18 montre un dépassement négatif dans le premier cas et un dépassement positif dans le second. Le signal de " pose atteinte " a été fourni pour atteindre le point t = 0. Les circonstances de mesure sont les mêmes que lorsque le temps de stabilisation est testé [31].

1.4.6 Dérive des caractéristiques de pose :

La dérive de précision de pose (dAP) est la variation de la précision de la pose sur une période donnée.

La dérive de répétabilité de pose (dRP) est la variation de la répétabilité de la pose sur une période donnée.

Tout retard de mesure, comme le temps d'arrêt et le temps de mesure, doit être documenté dans le rapport d'essai.



Figure 1.19 : Dérive des caractéristiques de pose

1.4.7 L'interchangeabilité :

La variation des barycentres, lorsque différents robots du même type sont échangés dans les mêmes conditions d'environnement, de montage mécanique et d'application du même programme de travail est exprimée comme l'interchangeabilité.

La valeur E est la distance entre les barycentres des deux robots présentant la plus grande divergence lors des essais (voir figure 1.20).



Figure 1.20 : Interchangeabilité

Les tolérances mécaniques, les problèmes de calibrage des axes et les erreurs d'installation du robot contribuent tous à l'interchangeabilité.

Les postures d'essai d'interchangeabilité sont P1, P2, P3, P4 et P5, et doivent être les mêmes pour tous les robots testés.

Les postures de commande pour les cinq points doivent être établies avec le premier robot et doivent être maintenues pour les autres robots pendant le test.

L'essai doit être effectué sur cinq robots du même type à 100 % de la charge nominale et à 100 % de la vitesse nominale.

1.4.8 Précision et répétabilité de la trajectoire :

La précision de la trajectoire décrit la capacité d'un robot à déplacer son interface mécanique dans la même direction le long de la trajectoire de commande N fois. La précision de la trajectoire est déterminée par deux facteurs :

- La différence entre les positions de la trajectoire de commande et la ligne de barycentre du groupe de positions de trajectoire atteintes (c'est-à-dire la précision de la trajectoire de positionnement, AT, dans la figure 1.21);
- La différence entre les orientations de commande et la moyenne des orientations atteintes (c'est-à-dire la précision de la trajectoire d'orientation).
- La plus grande déviation de la trajectoire le long de la trajectoire obtenue pour le positionnement et l'orientation est la précision de la trajectoire.



Figure 1.21 : Précision et répétabilité de la trajectoire

La répétabilité de la trajectoire représente le degré de concordance entre les chemins réalisés pour le même chemin de commande répété N fois.

La répétabilité de la trajectoire s'exprime comme suit pour une trajectoire donnée parcourue N fois dans la même direction :

- RT est égal au rayon d'un cercle dans le plan normal avec son centre sur la ligne du barycentre (voir figure 1.21).

- Le maximum des angles dispersés autour de la valeur moyenne aux différents points calculés.

1.4.9 Précision de trajectoire lors de la réorientation :

Pour enregistrer l'impact des changements d'orientation tri-directionnels sur une trajectoire linéaire de manière directe ; c'est-à-dire, en mesurant simplement la précision de la trajectoire de positionnement (ATp), il faut utiliser le test suivant, comme le montre la figure 1.22.



Figure 1.22 : Définition des changements d'orientation

1.4.10 Déviations de virage :

Les écarts de virage peuvent être divisés en deux types : les virages serrés et les virages arrondis.

Pour créer des virages serrés, il faut tolérer des fluctuations de vitesse tout en maintenant un contrôle exact de la route. Cela entraîne généralement des variations importantes de la vitesse. L'arrondissement des coins est nécessaire pour maintenir une vitesse continue. Les angles vifs sont obtenus lorsque le robot passe de la première trajectoire à la seconde orthogonale à la première sans délai et avec une vitesse de trajectoire constante prédéterminée. La variation de la vitesse autour du virage dépend du type de système de commande et doit être documentée. (Dans certaines circonstances, la diminution peut être d'environ 100 % de la vitesse d'essai appliquée).

Les angles arrondis sont utilisés pour minimiser les dépassements importants et pour maintenir les contraintes mécaniques dans des limites définies. Les trajectoires discrètes, telles que les rayons ou les fonctions splines (méthodes de lissage), sont programmables ou seront employées automatiquement en fonction du système de contrôle. Dans ce cas, une chute de la vitesse n'est pas souhaitée et, sauf indication contraire, elle est limitée à un maximum de 5 % de la vitesse d'essai appliquée [27]. La méthode de lissage utilisée dans la programmation doit être spécifiée dans le rapport d'essai.



Figure 1.23 : Dépassement en courbe et erreur d'arrondi en courbe dans un virage serré

1.4.11 Caractéristiques de vitesse de trajectoire :

Trois critères sont utilisés pour classer les performances d'un robot en termes de vitesse de déplacement. Ils sont les suivants :

- Précision de la vitesse de trajectoire (AV) : La précision de la vitesse de la trajectoire est définie comme la différence entre la vitesse de commande et la valeur moyenne des vitesses atteintes obtenues au cours de N traversées répétées de la trajectoire, représentée en pourcentage de la vitesse de commande.

- Répétabilité de la vitesse de la trajectoire (RV) : La répétabilité de la vitesse de la trajectoire est une mesure de la proximité des vitesses obtenues pour la même vitesse de commande. La répétabilité de la vitesse de la trajectoire est exprimée en % de la vitesse de commande, sauf indication contraire. La répétabilité de la vitesse de trajectoire doit être évaluée en utilisant le même processus d'essai que la précision de la vitesse de trajectoire.

- La fluctuation *de la vitesse de trajectoire (FV) :* La plus grande variation de la vitesse pour chaque réplication est définie comme la fluctuation de la vitesse de la trajectoire. La fluctuation de la vitesse de la trajectoire doit être mesurée en utilisant le même processus de test que la précision de la vitesse de la trajectoire.



Figure 1.24 : Caractéristiques de vitesse de la trajectoire

La figure 1.24 représente un graphique idéalisé de ces exigences. Les caractéristiques de vélocité du chemin sont évaluées sur le même chemin linéaire que la correction du chemin (voir 1.4.8). Avec N = 10, les AV, RV et FV sont calculés.

1.4.12 Temps minimum de pose :

Le temps de pose est le temps nécessaire pour passer d'un état stationnaire à un autre tout en parcourant une distance donnée et/ou en balayant un angle prédéterminé dans le cadre d'une gestion de pose à pose. Le temps nécessaire à un robot pour se stabiliser dans une position donnée, est inclus dans le temps de pose globale. Sauf indication contraire, le robot doit être capable d'atteindre la précision et la répétabilité de pose données lorsqu'il se déplace entre les poses d'essai dans le temps de pose minimale fourni. Le temps de pose est une fonction non linéaire de la distance parcourue. Les vitesses d'essai doivent être de 100 % de la vitesse nominale, et l'essai doit être effectué avec des vitesses optimales pour chaque phase du cycle ; le cas échéant, afin d'obtenir un temps de pose plus court. Les vitesses employées doivent être précisées dans le rapport d'essai.

1.4.13 Conformité statique :

La plus grande quantité de déplacements par unité de charge appliquée est définie comme la conformité statique. La charge doit être appliquée au contact mécanique et le déplacement doit être mesuré. Par rapport au système de coordonnées de base, la conformité statique doit être exprimée en millimètres par newton (mm/N).

Les forces doivent être appliquées dans trois directions, à la fois positives et négatives, parallèlement aux axes du système de coordonnées de base. Les forces doivent être augmentées par incréments de 10 % jusqu'à 100 % de la charge nominale, une direction à la fois. Le déplacement est calculé pour chaque force et chaque direction. La mesure doit être effectuée avec les servos allumés et les freins coupés.

1.4.14 Ecarts de tissage :

Le tissage est une technique qui combine un ou plusieurs mouvements superposés sur un parcours et est surtout utilisé pour le soudage à l'arc.

Les qualités de performance d'un robot en termes d'écarts de tissage sont divisées en deux catégories :

- *Erreur de la course de tissage (WS) :* l'erreur de course de tissage, en pourcentage, est calculée en soustrayant la course de tissage de commande Sc de la course de tissage moyenne mesurée Sa, comme illustré à la figure 1.25.

 Erreur de fréquence de tissage (WF) : l'erreur de fréquence de tissage, exprimée en pourcentage, est calculée en soustrayant la fréquence de tissage de commande Fc et la fréquence de tissage obtenue Fa.



Figure 1.25 : Trajectoire de tissage commandé et atteinte

1.5 Sources de perturbations de précision des robots :

L'analyse de l'état de l'art nous permet de classer les différentes sources d'erreurs qui perturbent la précision du robot, selon plusieurs facteurs ; chaque facteur à ses propres raisons :

- Erreurs dépendantes du robot ;
- Erreurs liées à l'environnement ;
- Erreurs dépendant de la tâche ;
- Erreur de modélisation.

Pour clarifier les sources, il faut d'abord distinguer les sources d'erreurs dans le robot lui-même (sa structure mécanique, et son système de commande...) ou liées à son environnement (cellule et dispositifs auxiliaires), et les sources liées au processus (ou à la tâche).

1.5.1 Erreurs dépendantes du robot :

Les erreurs géométriques et les défauts non géométriques peuvent être différenciés dans le cadre des robots mécaniques [36]. Les premières comprennent toutes les déviations causées par des géométries défectueuses, des défauts d'accouplement ou d'assemblage, ces défauts se produisent que le robot soit en mouvement ou non. Les seconds comprennent toutes les sources liées au comportement dynamique du robot. De plus, contrairement aux premières, leur importance fluctue dans le temps et tout au long des opérations du manipulateur. Ces deux sources ont pour principal impact de produire des disparités entre le

robot réel et son modèle cinéto-statique et dynamique, à partir duquel ses caractéristiques sont formées [37] et sur lequel la commande est basée [38].

1.5.1.1 Erreurs géométriques : Les tolérances de fabrication des composants des robots, les défauts de parallélisme et de perpendicularité des axes, et la mauvaise connaissance des équivalences entre zéro électronique et zéro mécanique pour chacun des axes (offsets articulaires) [39], créé des imprécisions géométriques, qui entraînent des différences dans la géométrie des liaisons, ainsi qu'une certaine variation de l'orientation des articulations après l'assemblage des liaisons et des non-linéarités dans les réducteurs [40, 41]. Ces erreurs sont rarement prises en compte dans les équations cinématiques qui décrivent le mécanisme du robot ; au lieu de cela, les valeurs du mécanisme CAO sont utilisées. Cela donne des calculs cinématiques proches mais non parfaits. Les défauts les plus dangereux sont ceux qui entraînent une erreur angulaire (orthogonalité et parallélisme). La distance entre le sommet de l'angle et le point d'intérêt, qui est généralement l'articulation suivante, amplifie les imprécisions angulaires. Ces erreurs sont fréquemment ignorées [42].

Les erreurs géométriques ne sont pas uniquement dues aux tolérances des maillons. Les erreurs dans l'axe d'articulation sont causées par le jeu dans les systèmes de transmission [43, 44], l'usure des roulements, lors de la construction des différents composants de l'articulation. Le jeu est causé par le désalignement des axes des réducteurs lorsqu'ils sont accouplés. Ces erreurs peuvent avoir un impact considérable sur la précision du positionnement du robot, peut-être plus que les tolérances géométriques [45, 46].

1.5.1.2 Erreurs non géométriques : Les erreurs non géométriques surviennent également dans un contexte local et ne peuvent être corrigées par l'étalonnage du robot. Elles sont causées par les déformations structurelles des composants de transmission, des liaisons et des dispositifs de transformation de l'énergie, ainsi que par l'usure et les effets non linéaires des servomoteurs [47, 48].

Les erreurs de compliance sont causées par la compliance des liaisons et des articulations sous l'effet des charges inertielles et externes. La rigidité en torsion de la boîte de vitesses et de l'arbre d'entraînement de sortie actionnant l'articulation, en particulier, provoque la compliance de l'articulation. En outre, les effets gravitationnels produisent un couple supplémentaire sur les engrenages en raison des masses des maillons qui provoquent des erreurs au niveau des liaisons. Les forces, notamment lors du fraisage, augmentent les contraintes sur les engrenages et produisent une déformation supplémentaire sur le système de transmission [49]. La compliance des liaisons et des articulations, qui provoque la déviation des liaisons et, en fin de compte, du TCP, contribue jusqu'à 8-10% des défauts de position et d'orientation du TCP [36].

En outre, la compliance des articulations et, dans une moindre mesure, des liaisons, produit des vibrations dans la structure du robot lorsqu'il se déplace. Le robot industriel présente des vibrations considérables induites par le mécanisme de réduction de vitesse, en particulier lorsqu'il fonctionne à des vitesses élevées [50]. En outre, les phénomènes de résonance apparaissent lorsque la charge sur le TCP varie soudainement ou lorsque le robot se déplace rapidement. Les deux influences les plus puissantes des engrenages et des entraînements d'un robot sont la compliance et le jeu. L'amortissement inhérent à ces systèmes est assez faible, ce qui entraîne une décroissance progressive typique des oscillations de torsion [48, 51, 52]. En outre, le jeu produit de grandes impulsions de couple, qui peuvent provoquer des vibrations de torsion.

La cause la plus importante d'imprécision dans les opérations d'usinage robotique est la déviation de la structure du robot induite par la force. Même si tous les composants d'un robot industriel ont une compliance inhérente, ce sont les engrenages qui ont le plus de compliance. L'usure des composants et les sources de chaleur internes telles que les moteurs et les roulements sont également des sources importantes de défauts à l'intérieur de la structure mécanique [53]. L'usure des pièces est étroitement liée au frottement [39], qui est affectée par la température [40], le couple appliqué par l'articulation et la vitesse de rotation [41].

1.5.1.3 Erreurs du système : Cette catégorie comprend les erreurs causées par un calibrage incorrect, les erreurs de mesure du capteur, les défauts de mise en œuvre de la commande et les erreurs d'arrondi numérique dans l'ordinateur de contrôle [54]. Les erreurs de capteur sont causées par la résolution et l'installation du capteur, ils sont souvent insignifiants. L'axe 1 a le plus d'influence sur le TCP en raison du plus grand levier. Le modèle géométrique appliqué dans le contrôleur est lié aux erreurs de commande et d'algorithme. Les modèles de non-linéarité doivent être exacts et précis, en particulier pour les commandes à base de modèles [55]. De plus, surtout dans une situation en temps réel, le temps d'échantillonnage du contrôleur est ajouté à ces imprécisions [56].

D'une part, des logiciels de réglage capable de reconnaître et d'afficher les systèmes sous-amortis, les systèmes sur-amortis, les erreurs en régime permanent, les oscillations et d'autres paramètres permettent de détecter les servomoteurs mal réglés. Les boucles d'asservissement de la plupart des robots commerciaux sont réglées en usine pour un état de charge nulle ou minimale. Si un scénario de charge considérablement modifié est utilisé dans une application de robot, les servomoteurs peuvent avoir besoin d'être réaccordés [42].

D'autre part, la définition des modèles de commande du robot, ainsi que le passage d'un modèle de commande analytique à un modèle numérique se fait par des approximations. Ces approximations résultent de la discrétisation temporelle et de l'arrondissement des valeurs de gains de commande, ainsi que des interpolations [57].

Les charges dynamiques liées aux déplacements du robot pendant le fonctionnement produisent des erreurs dites "erreurs dynamiques" en raison de la contrainte inertielle et de la résonance structurelle causées par le mouvement. Comme la prédiction de leurs conséquences est compliquée et coûteuse en calcul, ce sont peut-être les formes d'erreurs les plus difficiles à corriger. La plupart des robots ne tiennent pas compte de ces erreurs car elles se produisent principalement le long de la ligne de mouvement plutôt qu'aux points d'extrémité statiques. Cependant, si l'on s'intéresse au contrôle basé sur la trajectoire, les erreurs dynamiques peuvent devenir primordiale [42].

1.5.2 Erreurs liées à l'environnement :

Le mouvement du robot est affecté par les perturbations liées à l'environnement. Ces erreurs sont les plus détectables lors de mesures de l'ordre du micromètre, [58] déduire ce résultat après un essai expérimental basé sur l'utilisation d'un environnement typique d'une usine de fabrication avec des perturbations créées par des transpalettes et le passage des personnes. Les signaux représentent le mouvement relatif d'un capteur laser 1D LK-G87 de Keyence et le robot, tous deux couplés au banc de la machine 14-t. Une transformée de Fourier rapide (FFT) des données indique que les résonances primaires sont identiques aux résonances du robot.

Les perturbations de la chaîne de transmission se poursuivent avec le matériau du sol et la fixation du robot au sol. De petites déformations dans la base provoquent de grandes déviations sur l'outil en raison du grand levier de la base à l'outil. La température est un autre facteur qui ne doit pas être négligé. Dans un robot industriel, différents matériaux avec des coefficients différents sont utilisés, ce qui entraîne des déformations imprévisibles [59]. La conformité du porte-outil doive également être prises en compte. En général, leurs contributions à la conformité du système ne peuvent être négligées. En outre, le calibrage des cellules est un problème important qui a un impact direct sur la qualité finale atteinte [60]. Les cellules robotiques actuelles utilisent des approches de programmation hors ligne pour les opérations robotiques complexes tels que le fraisage ou le meulage. Pour la création autonome d'itinéraires, les logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO) et de fabrication assistée par ordinateur (FAO) de pointe [61] doivent assurer une correspondance étroite entre le modèle CAO de la cellule de travail et son environnement réel.

Les charges statiques (poids propre de la structure et charges thermiques) ont un impact sur la position finale de l'organe terminal, ce qui entraîne une erreur de précision, une déformation élastique due au poids et une déformation thermique [62]. Les éléments de la structure robotique agissent différemment sur les articulations en fonction de la disposition du robot.

La chaleur interne générée pendant le fonctionnement et la chaleur de l'environnement de travail provoquent une dilatation thermique de la structure du robot. Les principales causes de l'auto-échauffement du robot sont les moteurs et les systèmes d'entraînement. Elle dépend évidemment des coefficients de dilatation thermique des différents composants et se traduit par une erreur de précision du robot [57]. Cherif et al [63], ont estimé cette imprécision à 1,4 mm pour un robot Kuka KR 240 avec un rayon d'action de 2,7 m. Cependant, Gong et

al [64] affirment que la plus grande imprécision causée par la dilatation thermique survient après plusieurs heures de fonctionnement du robot.

1.5.3 Erreurs dépendant du processus :

Les conditions de travail du robot, ainsi que les sources de chaleur provenant des systèmes de transmission et/ou des moteurs, les changements de température ambiante et les charges externes appliquées à l'effecteur final peuvent tous affecter le comportement du robot [65]. Les phénomènes liés à des chargements dynamiques provoquent des déformations élastiques dues aux contraintes d'usinage, aux vibrations et aux erreurs de suivi de trajectoire [27].

La force d'usinage est la source la plus courante d'inexactitudes de position dans les applications d'usinage. Dans une opération de fraisage d'aluminium, la force d'usinage peut atteindre des centaines de newtons, et, par conséquent, l'imprécision induite par la force peut atteindre des valeurs allant jusqu'à 1 mm [66]. Les applications d'usinage traditionnelles maintiennent une avance constante malgré les variations de la profondeur et de la largeur de coupe [67]. Cela se traduira par un changement significatif du taux d'enlèvement de matière, qui entraînera des modifications importantes de la force d'usinage, et donc, sur la trajectoire désirée du robot.

Un autre composant critique est le système de lubrification, notamment en termes de qualité de la pièce. L'huile de lubrification diminue le coefficient de friction de contact entre la pièce et l'outil de coupe, ce qui permet d'éviter la première forme de broutage. Les impacts sont visibles sur la qualité de surface finale de la pièce usinée (par exemple, la rugosité). Le broutage est l'un des principaux obstacles à l'utilisation des robots dans le processus d'usinage [68]. En raison des effets thermomécaniques sur la formation des copeaux (broutage primaire) et de la régénération de l'ondulation de la surface de la pièce causée par la vibration du couteau (broutage secondaire), l'amplitude de la force de coupe augmente et produit de fortes vibrations sur le robot puis sur le TCP qui interagit avec la pièce [69]. En conséquence, la surface de la pièce devient rugueuse.

Le contact outil/ matière lors de l'opération d'usinage crée des vibrations au niveau des corps du robot dont l'amplitude d'excitation s'approche des fréquences propres de la structure. Le phénomène de broutement concrétisé par l'apparition de vibration de la structure du robot pendant la coupe ; donc la rigidité dynamique du robot est liée aux modes propres de la structure [70]. La rigidité dynamique de la structure est déterminée par sa configuration immédiate.

Une analyse quantitative doit être menée pour compléter la compréhension de ces aspects et saisir les facteurs les plus pertinents. Plusieurs analyses quantitatives des erreurs pour diverses architectures de robots peuvent être trouvées dans la littérature [71-73].

1.5.4 Erreur de modélisation :

Pour déterminer les consignes à appliquer à chaque articulation en fonction de la tâche à effectuer, le système de commande utilise le modèle géométrique ou cinématique de la structure robotique. Les approximations ou simplifications utilisées dans le calcul de ce modèle introduisent des écarts par rapport au comportement réel. Ostring [74], par exemple, présente une description approximative du modèle dynamique d'un robot industriel composé de trois masses couplées par des ressorts et des amortisseurs. Les erreurs de modélisation portent généralement sur la longueur des segments, la position des centres et la direction des axes des articulations. En raison de défauts dans la construction de ses composants, ces valeurs ne peuvent être estimées.

Les erreurs de suivi de trajectoire sont causées par les méthodes de calcul utilisées pour générer des mouvements et des consignes de référence en position, vitesse et accélération. Les trajectoires souhaitées ne sont pas dynamiquement réalisables, et la commande ne vérifie pas si elles tiennent compte de la capacité de couple et sa compatibilité avec les tâches requises, la saturation de la vitesse/accélération aux articulations et les limites admissibles des canaux d'actionnement (butées, actionneurs, convertisseurs, etc.) [39].

1.6 Contribution :

Les performances des robots doivent être évaluées afin d'identifier les perturbations et les sources d'erreur qui affectent la précision du robot. Pour ce faire, il existe plusieurs instruments dont la qualité mesurable varie. Dans ce but, [75] a utilisé l'outil de suivi laser FARO pour évaluer la répétabilité de différents robots industriels, dont le FANUC LR Mate 200i. La plupart des fabricants de

robots industriels utilisent cet instrument pour fournir la position complète dans l'espace cartésien en mode dynamique, ou la pose complète de l'effecteur du robot en mode statique.

Le système d'interféromètre laser RENISHAW mesure les erreurs de position le long d'une trajectoire linéaire horizontale à cinq positions le long des axes X, Y et Z. Cet équipement est utilisé pour évaluer les performances statiques (précision statique et répétabilité) des robots, ainsi que les essais unidirectionnels AP et RP conformément à la norme ISO 9283 [76].

D'autres auteurs utilisent la barre à billes télescopique QC20-W RENISHAW avec technologie sans fil Bluetooth, qui a été développée pour évaluer la précision des machines dans lesquelles le mouvement circulaire est généré par le mouvement simultané de deux axes linéaires orthogonaux, comme dans les machines-outils [77], et qui est limitée pour les robots en série [78].

En utilisant trois dispositifs de mesure précédents, [79] évalue les performances de positionnement de trois robots industriels, et conclut que le laser de poursuite est le meilleur outil pour évaluer la précision des robots, étant simple à utiliser, polyvalent, et répondant à la majorité des critères de performance de la norme ISO 9283. L'interféromètre laser, quant à lui, présente un taux de répétabilité optimal, mais est trop compliqué à utiliser ; il ne peut mesurer aucun des critères de performance décrits dans la norme ISO 9283. Le Ball-bar télescopique est le choix optimal pour mesurer les performances dynamiques d'un robot industriel, le test circulaire fourni par le Ball-bar de Renishaw pour évaluer la précision ou la répétabilité statique est insuffisant.

La triade d'indicateurs numériques (TriCal) est un instrument de métrologie par contact à faible coût qui peut être utilisé pour mesurer et modéliser la répétabilité positionnelle de robots en série [80]. L'efficacité du TriCal est proche de celle d'un laser tracker, lorsqu'il s'agit de calibrer un petit robot industriel [81].

La machine de mesure photogrammétrique C-Track 780 de CREAFORM suit la position et l'orientation de l'effecteur du robot en temps réel afin d'aider à corriger avec précision la pose dynamique du robot en fonction de la pose souhaitée [82]. Dans des travaux connexes, [83] présente un autre équipement, le système de photogrammétrie portable (MaxSHOT3D), et compare la précision obtenue avec les résultats du laser tracker, et trouve des résultats similaires. Indiquant que ce dispositif évaluant les performances du robot est fiable. Certains types d'erreurs peuvent être modifiés par une procédure connue sous le nom de calibration du robot. Pour compenser les erreurs non-géométriques et améliorer la précision absolue du robot ABB IRB-2400, [84] a proposé une méthode de calibration cinématique basée sur la linéarisation d'une fonction qui combine tous les paramètres géométriques et cinématiques du robot. Contrairement aux travaux précédents, les erreurs de positionnement sur les points cibles sont mesurées et stockées pour compensation, et l'espace articulaire est divisé en une série de cellules en éventail. En revanche, [85] a proposé une méthode de calibration élasto-géométrique pour mesurer les erreurs de position causées par les forces et les couples appliqués à l'effecteur du robot afin d'identifier les paramètres de rigidité de l'articulation.

Les auteurs de la référence [86] ont proposé d'utiliser un modèle d'erreur linéarisé dans lequel la mesure de la position est construite à l'aide d'une technique de mesure de pose partielle, et l'influence des erreurs de mesure est éliminée à l'aide d'un algorithme de recherche séquentielle flottante avant. La méthode des moindres carrés est utilisée pour identifier les paramètres cinématiques. Les erreurs de l'effecteur final sont compensées par un algorithme d'itération jacobienne inverse exécuté dans l'espace articulaire du robot. Tandis que [87] a utilisé une méthode de calibration basée sur un réseau neuronal pour corriger les erreurs géométriques et non-géométriques du robot Tri-pyramid en combinant la position de l'effecteur final calculée par le modèle géométrique et les erreurs non-géométriques prédites par le réseau neuronal entraîné. La précision du robot peut être augmentée de 60% en utilisant la méthode proposée. Des expériences sont utilisées pour déterminer les valeurs des actionneurs ainsi que les mesures de la position relative de l'effecteur final, tandis que la méthode des moindres carrés non linéaires est utilisée pour identifier les paramètres structurels du robot.

La perturbation de la trajectoire programmée du robot lors de tâches nécessitant des charges externes importantes, tels que l'ébavurage, le soudage par friction-malaxage (FSW) et l'usinage, est principalement due à la flexibilité des pièces du robot. Cette flexibilité peut être due à la souplesse des liaisons du robot [88], ou localisée dans les articulations [89, 90], ou les deux simultanément [91].

Selon l'analyse expérimentale de la référence [92], l'élasticité des pièces du robot est principalement concentrée autour de l'axe Z, ce qui représente environ 25% des perturbations de déplacement de l'effecteur. Les rotations localisées dans les articulations provoquent environ 75% des perturbations de déplacement de l'effecteur. Par conséquent, nous pouvons conclure que les articulations sont principalement responsables de la flexibilité du robot.

Certaines erreurs peuvent être évitées grâce au processus de calibration du robot. Par exemple, [93] a proposé une méthode de calibration cinématique basée sur la linéarisation d'une fonction qui combine tous les paramètres géométriques et cinématiques du robot afin de compenser les erreurs non géométriques et d'améliorer la précision absolue du robot ABB IRB-2400. Les erreurs de positionnement sur les points cibles sont mesurées et stockées pour être compensées, et l'espace articulaire est divisé en une série de cellules en éventail.

Une méthode de calibration élasto-géométrique pour mesurer les erreurs de position causées par les forces et les couples appliqués à l'effecteur du robot est proposée dans [94], afin d'identifier les paramètres de rigidité des articulations. Dans la référence [95], les auteurs ont proposé d'utiliser un modèle d'erreur linéarisé dans lequel la mesure de la position est construite en utilisant une technique de mesure de pose partielle ; les effets des erreurs de mesure sont éliminés en utilisant un algorithme de recherche séquentielle flottante avant. La méthode des moindres carrés est utilisée pour identifier les paramètres cinématiques. Les erreurs de l'effecteur final sont compensées par un algorithme d'itération jacobienne inverse exécuté dans l'espace articulaire du robot. Dans un travail connexe [96], les auteurs ont proposé un outil de modélisation tridimensionnelle qui combine SolidWorks et SimMechanics (une boîte à outils logicielle MATLAB[®]) pour évaluer les trajectoires d'un manipulateur de robot en utilisant les paramètres cinématiques de référence [97], tout en tenant compte des

effets de charge et des déformations. Dans [98], une méthode de calibration basée sur un réseau neuronal est utilisée pour corriger les erreurs géométriques et non-géométriques du robot Tri-pyramid, en combinant la position de l'effecteur final calculée par le modèle géométrique et les erreurs non-géométriques prédites par le réseau neuronal entraîné. La précision du robot peut être augmentée de 60% en utilisant la méthode proposée. Des expériences sont utilisées pour obtenir des données sur les actionneurs ainsi que des mesures de la position relative de l'effecteur final, tandis que la méthode des moindres carrés non linéaires est utilisée pour identifier les paramètres structurels du robot.

Dans [99], les auteurs proposent une méthode qui compense les sources d'erreurs géométriques et non géométriques et augmente la précision de positionnement du robot en utilisant une approche basée sur un réseau de neurones, mais un ensemble de données à grande échelle est nécessaire pour atteindre les objectifs souhaités. Dans [100], les auteurs ont proposé une stratégie expérimentale impliquant des configurations à vitesse de déplacements variables et un chemin de retour supplémentaire pour améliorer la qualité du cordon de soudure robotisé. Les résultats expérimentaux montrent que cette stratégie peut améliorer de manière significative la précision géométrique au début et à la fin de diverses pièces.

Selon la revue de la littérature, il n'y a pas de recherche qui combine l'évaluation de la trajectoire ainsi que la correction des erreurs de positionnement de l'effecteur final pendant le fraisage robotisé avec un traitement complètement hors ligne en même temps. L'objet est d'identifier la principale source d'erreur du positionnement du robot et de proposer une méthodologie de prise en compte de cette erreur dans le modèle de la simulation, en vue de la corriger.

Pour cela, la position dynamique (suivi de trajectoire) du manipulateur a été prédite dans cette thèse, tout en prenant en compte les charges appliquées à son effecteur final et son comportement élasto-statique (rigidité des articulations), qui sont supposés être situés au niveau des articulations du robot. Contrairement aux travaux cités, la méthode de correction proposée est une méthode simple basée sur des algorithmes d'optimisation. Deux méthodes seront présentées et discutées

pour justifier ce choix. La première méthode utilise une optimisation mono-objectif pour minimiser l'erreur de positionnement globale ΔP pendant l'usinage, tandis que la seconde utilise une optimisation multi-objectifs pour corriger l'erreur de positionnement dans les différentes directions du d'usinage Δx , Δy et Δz . D'une part, les résultats de cette recherche nous permettent de prédire avec précision la quantité d'erreur de positionnement de l'effecteur final dans les tâches nécessitant une interaction avec l'environnement. D'autre part, les méthodes de correction proposées offrent une manipulation simple pour obtenir les meilleures configurations du robot dans n'importe quelle condition de travail, afin de minimiser cette erreur et d'obtenir une trajectoire similaire à celle désirée, et ainsi contribuer à l'amélioration de la programmation hors ligne des robots industriels. Cette solution nous permet de réaliser des tests sur des simulateurs plutôt que sur des robots réels, ce qui réduit les délais d'initialisation et de calibrage, tout en minimisant les dommages causés par l'interaction avec l'environnement. En conséquence, le processus de maintenance est optimisé en termes de coût et de qualité.

1.7 Conclusion :

En résumé, les robots industriels sont des dispositifs flexibles reprogrammables qui sont principalement utilisés pour l'automatisation industrielle afin d'améliorer la productivité et la qualité des produits, et sont fréquemment employés pour le soudage, l'assemblage, l'usinage et le levage... Chaque robot diffère en termes de charge utile, de portée, d'axe et de capacité d'application, entre autres. Comprendre les caractéristiques de chaque robot peut nous aider à sélectionner le meilleur robot industriel pour optimiser le processus de production souhaitée

La norme internationale ISO9238 décrit les méthodes de spécification et d'essai des caractéristiques de performance qui permettent d'identifier les capacités des robots industriels et de les adapter à des applications spécifiques.

Aujourd'hui, dans le monde industriel, l'utilisation des robots pour des tâches de fabrication complexes est de plus en plus importante. Par conséquent, une précision absolue est plus que nécessaire. D'où la nécessité d'identifier et d'éviter au maximum les sources de perturbations qui affectent la précision du robot manipulateur durant le fonctionnement.

La simulation de diverses tâches robotiques est une étape critique avant la mise en œuvre sur les robots réels, ce qui réduit considérablement la durée de l'étalonnage tout en minimisant les risques de dommages causés par l'interaction avec l'environnement réel. En conséquence, le processus de programmation hors ligne sera optimisé en termes de coût et de qualité.

Pour atteindre nos objectifs, nous devons assurer les axes suivants :

- Le choix des méthodes de modélisation du robot et la tâche souhaitée pour la réaliser ;
- La prédiction avec précision le chemin suivi lors de l'interaction du robot avec son environnement ;
- L'optimisation par minimisation de l'erreur créée pendant le fonctionnement du robot.

CHAPITRE 2

MODELISATION DU ROBOT INDUSTRIEL FLEXIBLE

2.1 Introduction :

En fonction des objectifs, des contraintes de la tâche et des performances souhaitées, le développement de différents modèles mathématiques qui représentent le mieux possible le comportement du robot industriel sont nécessaires. Donc, pour une commande et simulation performante du robot, il est nécessaire de connaître les modèles de transformation entre l'espace opérationnel (dans lequel est définie la situation de l'effecteur) et l'espace articulaire (dans lequel est définie la configuration du robot). Nous distinguons les modèles géométriques qui expriment la relation entre les positions articulaires du robot et les positions cartésiennes de l'effecteur.

Les modèles cinématiques expriment la relation entre les vitesses des articulations et les vitesses de l'effecteur. Les modèles dynamiques définissent la relation entre les accélérations articulaires, les vitesses articulaires, les positions, les efforts extérieurs exercés par l'environnement d'une part, et les couples articulaires d'autre part.

Lorsque le robot est soumis à des sollicitations importantes, les déformations de corps et d'éléments de guidage ne sont pas négligeables. Par conséquent, il est nécessaire d'intégrer un modèle de déformation au modèle dynamique.

Dans ce chapitre, les différents éléments de modélisation pour le robot manipulateur sériel Stäubli TX-90 à six degrés de liberté sont abordés. Le choix de robot est justifié ; ainsi des notations de base et des méthodes de modélisation sont définies et détaillées.

2.2 Terminologies et notions de base :

Quelques notions fondamentales propres à la modélisation des robots manipulateurs sont décrites dans cette section.

2.2.1 Repères et matrice de transformation :

La modélisation et la programmation d'un robot sont basées sur les notions de la transformation des repères. Donc, chaque articulation du robot et chaque objet de la cellule de travail doivent attribuer un ou plusieurs repères. Cela nous permet de :

- Calculer l'emplacement, la position et l'orientation des liaisons du robot les unes par rapport aux autres.
- Décrire la position et l'orientation des objets.
- Spécifier la trajectoire et la vitesse de l'effecteur d'un robot pour une tâche donnée.
- Décrire et contrôler les forces lorsque le robot interagit avec son environnement.
- Mettre en œuvre un contrôle sensoriel en utilisant les informations fournies par divers capteurs, chacun ayant son propre repère de référence.



Figure 2.1 : Repères utilisés en robotique [29]

Faisons subir un mouvement quelconque de translation et/ou de rotation au repère R_i , transformation qui l'amène sur le repère R_j (figure 2.2). En outre, effectuer des transformations de coordonnées.



Figure 2.2 : Transformation des repères

Cette transformation est définie par une matrice ${}^{i}T_{j}$ dite matrice de transformation homogène de dimension (4 x 4). Les transformations homogènes combinent les opérations de rotation et de translation en une seule multiplication matricielle.

$${}^{i}T_{j} = \begin{bmatrix} {}^{i}s_{j} & {}^{i}n_{j} & {}^{i}a_{j} & {}^{i}P_{j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{x} & n_{x} & a_{x} & P_{x} \\ s_{y} & n_{y} & a_{y} & P_{y} \\ s_{z} & n_{z} & a_{z} & P_{z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{i}A_{j} & {}^{i}P_{j} \\ {}^{i}A_{j} & {}^{i}P_{j} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(2.1)

Soit un vecteur ${}^{j}P_{1}$ définissant le point P_{1} dans le repère R_{j} (figure 2.3). Compte tenu de la définition des coordonnées homogènes, nous calculons les coordonnées du point P_{1} dans le repère R_{i} par l'équation suivante :

$$^{i}p1 = ^{i}(O_{i} P1) = ^{i}T_{j} ^{i}p1$$
 (2.2)

La matrice ⁱT_j permet donc d'exprimer dans le repère **R**_i les coordonnées d'un point données dans le repère **R**_j.



Figure 2.3 : Transformation d'un vecteur

Soit **Trans** (P_x , P_y , P_z) la notation de vecteur position iP_j , où a, b, et c désignent les composantes de la translation le long des axes **x**, **y** et **z** respectivement.

Dans le cas où le repère R_i subit une translation seulement, nous disons que la transformation de repère R_i qui ramène au repère R_j est une transformation de translation pure, et la matrice ⁱ T_j est écrite comme suit :

$${}^{i}T_{j} = \mathbf{Trans}(a,b,c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_{x} \\ 0 & 1 & 0 & P_{y} \\ 0 & 0 & 1 & P_{z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(2.3)

La matrice **Trans** (P_x , P_y , P_z) peut être décomposée en un produit de trois matrices **Trans** (\mathbf{x} , P_x) **Trans** (\mathbf{y} , P_y) **Trans** (\mathbf{z} , P_z), l'ordre des multiplications étant quelconque.



Figure 2.4 : Transformation de translation pure

Soit **Rot** (u, θ) la notation de la matrice rotation ⁱ**A**_j, où u, θ désignent l'axe et l'angle de rotation respectivement.

Dans le cas où le repère \mathbf{R}_i subit une rotation seulement, nous disons que la transformation de repère \mathbf{R}_i qui ramène au repère \mathbf{R}_j est une transformation de rotation pure, et la matrice ⁱ \mathbf{T}_j est écrite comme suit :

$${}^{i}T_{j} = \mathbf{Rot}(u, \theta) = \begin{bmatrix} {}^{i}sx_{j} & {}^{i}nx_{j} & {}^{i}ax_{j} & 0\\ {}^{i}sy_{j} & {}^{i}ny_{j} & {}^{i}ay_{j} & 0\\ {}^{i}sz_{j} & {}^{i}nz_{j} & {}^{i}az_{j} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(2.4)

Comme les vecteurs de base sont des vecteurs unitaires et que le produit scalaire de deux vecteurs unitaires est le cosinus de l'angle qui les sépare, les composantes sont communément appelées cosinus directeur. Une rotation élémentaire du Rj autour de l'axe xi d'un angle θ est :

$${}^{i}\mathsf{T}_{j} = \mathbf{Rot}(\mathbf{x},\,\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathsf{C}\theta & -\mathsf{S}\theta & 0 \\ 0 & \mathsf{S}\theta & \mathsf{C}\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(2.5)

Alors que la même rotation autour de l'axe yi est :

$${}^{i}T_{j} = \mathbf{Rot}(y, \theta) = \begin{bmatrix} C\theta & 0 & S\theta & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ -S\theta & 0 & C\theta & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(2.6)

Et autour de l'axe zi est :

$${}^{i}T_{j} = \mathbf{Rot}(z, \theta) = \begin{bmatrix} C\theta & -S\theta & 0 & 0\\ S\theta & C\theta & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(2.7)





Nous combinons ensuite ces deux concepts pour construire des matrices de transformations homogènes, qui peuvent être utilisées pour représenter simultanément la position et l'orientation des articulations du robot.

2.2.2 Description de Denavit-Hartenberg Modifiée :

Le suivi de la description morphologique (mouvement des articulations) de robot lors de l'exécution systématique de la tâche nécessite l'utilisation d'une méthode de modélisation appropriée pour assurer un suivi correct. Dans la littérature, plusieurs méthodes ont été proposées. La méthode Denavit-Hartenberg modifiée [101] est la plus connue pour les robots ayant une structure similaire à celle du TX-90 (figure 2.7).

Denavit-Hartenberg Modifié est une convention souvent utilisée pour choisir le système de référence d'un corps en robotique. Pour ce travail, nous rappelons la description de DHM :



Figure 2.6 : Description de la méthode DHM

- L'axe Z_j est confondu avec l'axe de l'articulation j ;
- L'axe X_j est la perpendiculaire commune à Z_j et Z $_{j+1}$;
- L'axe Y_j est choisi de manière à créer un repère orthonormé direct avec (O_j X_j Y_j Z_j).
- Le repère R_j lié au corps C_j , à l'origine O_j , défini par : $R_j = (O_j X_j Y_j Z_j)$.

Nous définissons quatre paramètres géométriques qui permettent le passage du repère R_{j-1} au repère R_j:

- α_j : L'angle entre Z_{j-1} et Z_j correspondant à une rotation autour de X_{j-1};
- d_j: La distance entre Z_{j-1} et Z_j le long X_{j-1}
- θ_j: L'angle entre les axes X_{j-1} et X_j correspondant à une rotation autour de , Z_j;
- r_j : La distance entre X _{j-1} et X _j le long Z _j.

Nous associons la variable articulaire q_j à la $j^{\acute{e}me}$ articulation (j = 1, ..., 6) : $q_j = \overline{\sigma_j}$. $\theta_j + \sigma_j$. r_j σ_i : définit le type de l'articulation j :

- σ_i = 0 si l'articulation j est rotoïde ;
- σ_i=1 si l'articulation j est prismatique ;
- $\sigma_i = 2$ si l'articulation j est fixe.

La matrice de transformation homogène $j^{-1}T_j$ regroupe les paramètres de DHM de la j^{eme} articulation, et est définie par :

 $^{j-1}T_j = Rot(x, \alpha_j) Trans(x, d_j) Rot(z, \theta_j) Trans (z, r_j)$

$${}^{j-1}T_{j} = \begin{bmatrix} C\theta_{j} & -S\theta_{j} & 0 & d_{j} \\ C\alpha_{j}S\theta_{j} & C\alpha_{j}C\theta_{j} & -S\alpha_{j} & -r_{j}S\alpha_{j} \\ S\alpha_{j}S\theta_{j} & S\alpha_{j}C\theta_{j} & C\alpha_{j} & r_{j}C\alpha_{j} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & & \\ & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(2.8)

Avec : $C\theta_j = \cos \theta_i$, $S\theta_j = \sin \theta_j$, $C\alpha_j = \cos \alpha_j$, $S\alpha_j = \sin \alpha_j$

Dans la suite du présent chapitre, le robot manipulateur étudié est un robot considéré flexible aux articulations avec 6 axes et 7 corps, y compris un corps représentant l'effecteur. Nous présenterons les définitions nécessaires concernant la modélisation du robot Stäubli TX-90 ainsi que le calcul détaillé de ces modèles.

2.2.3 Description du robot Stäubli TX-90 :

Selon l'application, nous pouvons trouver deux types de robots dans le domaine de la robotique industrielle : les robots spécialisés qui sont limités à une tâche spécifique, et qui sont optimisés pour l'application pour laquelle ils ont été conçus, et les robots polyvalents, qui peuvent effectuer une variété de tâches en fonction de leur effecteur final. Un robot polyvalent est plus utile dans le domaine de la recherche et du développement de technologies industrielles robotiques, car sa géométrie reste constante, seuls les paramètres liés à l'application changent. Par conséquent, le robot Stäubli TX-90 est considéré comme le choix optimal pour la présente étude.

Le robot Stäubli TX-90 est un manipulateur industriel à structure série avec six articulations rotoïdes (figure 2.7) :

 Les trois premières articulations (épaule, bras et coude) constituent le support du robot ; • Les trois dernières articulations (l'avant-bras, le doigt et la bride de l'outil) forment le poignet, qui est composé de trois axes concourants.

Il a une charge utile maximale de 20 kg et une portée du bras de 1000 *mm*. Il peut être monté au sol, au mur ou au plafond. C'est une option pour réduire les coûts. Contrairement aux modèles TX-40 et RX-90, les deux dernières articulations du TX-90 sont couplées [102].





Nous avons construit un modèle du robot dans la première partie de ce chapitre en avançant les hypothèses suivantes : les corps sont rigides, les liaisons entre les corps ne sont pas élastiques, les paramètres géométriques nominaux fournis par le constructeur sont précis.

2.3 Modèles géométriques :

La géométrie du robot est décrite dans la position où tous les axes sont à zéro par rapport au repère de base R0. Nous avons utilisé la méthode de DHM pour fixer les repères des articulations du robot, figure 2.8.

Dans la modélisation géométrique, l'architecture mécanique du robot ainsi que ses dimensions géométriques sont considérées comme connues.



Figure 2.8 : Schéma cinématique de Stäubli TX-90.

D'un point de vue méthodologique, d'abord, les axes Z_j sont placés sur les axes de mouvement des articulations du robot, puis les axes X_j selon les conventions mentionnées précédemment. Ensuite, nous déterminons les paramètres géométriques définissant chaque repère R_j par rapport au repère R_{j+i} . Enfin les repères reliés à chaque articulation sont indiqués sur la figure 2.8 et les paramètres géométriques sont donnés dans le tableau 2.1.

j	σ_{j}	α _j	d _j	θj	r _j		
1	0	0	0	θ_1	0		
2	0	-π/2	d ₂ =50mm	θ2	0		
3	0	0	d ₃ =425mm	θ_3	r ₃ =50mm		
4	0	π/2	0	θ_4	r ₄ =425mm		
5	0	-π/2	0	θ_5	0		
6	0	π/2	0	θ ₆	0		

Tableau 2.1 : Paramètres de Denavit-Hartenberg Modifier (DHM) du Stäubli TX-90

2.3.1 Modèle Géométrique Direct (MGD) :

Le MGD permet d'exprimer l'attitude (la position et l'orientation) du repère outil R_t dans le repère de base R0 en fonction des variables articulaires q. Nous avons : X = f(q);

Nous devons calculer les positions Pj et les rotations Aj de chaque articulation en fonction des déplacements angulaires q par la matrice de transformation ^{j-1}T_i:

⁰ T ₁ =	C1 S1 0 0	-S1 C1 0 0	0 0 1 0	0 0 0 1	$^{1}T_{2}=\begin{bmatrix} 0\\ - \end{bmatrix}$	C2 0 S2 0	-S2 0 -C2 0	0 1 0 0	d2 0 0 1	² T ₃ =	[C3 S3 0 0	-S3 C3 0 0	0 0 1 0	d3 0 r3 1
³ T ₄ =	[C4 0 S4 0	-S4 0 C4 0	0 -1 0 0) 0 1 -r4) 0) 1 -	⁴ T ₅ =	[C5 0 -S5 0	-S5 0 -C5 0	0 1 0 0	0 0 0 1	⁵ T ₆ =	C6 0 S6 0	-S6 0 C6 0	0 -1 0 0	0 0 0 1

La représentation de la situation de l'organe terminal dans le repère de référence R₀ peut être obtenue en multipliant respectivement les matrices T_j^{j-1} relatives à chaque articulation :

$T_6^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_4^4 T_5^5 T_6^5$

Avec : P_6^0 La position de point central de l'outil projeté sur le repère de référence.

A₆⁰ L'orientation du point central de l'outil projeté sur le repère de référence.

Finalement:
$${}^{0}T_{6} = \begin{bmatrix} s_{x} & n_{x} & a_{x} & P_{x} \\ s_{y} & n_{y} & a_{y} & P_{y} \\ s_{z} & n_{z} & a_{z} & P_{x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{0}A_{6} & {}^{0}P_{6} \\ & & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
 (2.9)

Avec:

$$\begin{split} s_x &= C1.(C23.(C4.C5.C6 - S4.S6) - S23.S5.C6) - S1.(S4.C5.C6 + C4.S6) \\ n_x &= C1.(C23.(-C4.C5.S6 - S4.C6) + S23.S5.S6) - S1.(-S4.C5.S6 + C4.C6) \\ a_x &= C1.(C23.C4.S5 + S23.C5) - S1.S4.S5 \\ P_x &= C1.(S23.r_4 + d_2 + d_3 .C2) - S1.r_3 \\ s_y &= S1.(C23.(C4.C5.C6 - S4.S6) - S23.S5.C6) + C1.(S4.C5.C6 + C4.S6) \end{split}$$

$$\begin{split} n_y = &S1.(C23.(-C4.C5.S6 - S4.C6) + S23.S5.S6) + C1.(-S4.C5.S6 + C4.C6) \\ a_y = &S1.(C23.C4.S5 + S23.C5) + C1.S4.S5 \\ P_y = &S1.(S23.r_4 + d_2 + d_3 .C2) + C1. r_3 \\ s_z = &-S23.(C4.C5.C6 - S4.S6) - C23.S5.C6 \\ n_z = &-S23.(-C4.C5.S6 - S4.C6) + C23.S5.S6 \\ a_z = &-S23.C4.S5 + C23.C5 \\ P_z = &C23.r_4 - d_3 .S2 \end{split}$$

2.3.2 Modèle Géométrique Inverse (MGI) :

Le problème inverse consiste à calculer les configurations articulaires du robot en fonction à une coordonnée cartésienne de l'organe terminal, soit : q = f'(X);

Contrairement à l'unicité des solutions de MGD, pour une seule situation donnée de l'effecteur, le robot pourra obtenir plusieurs configurations possibles. Donc nous parlons d'une solution multiple. Pour le cas d'un robot sériel à six ddl, il existe huit configurations articulaires possibles pour chaque position cartésienne.



Figure 2.9 : Solutions possibles de MGI du Stäubli TX-90

Avant de résoudre un MGI, il faut vérifier deux conditions cruciales :

 La situation désirée soit dans la zone accessible du robot, sinon nous n'aurons pas de solution réelle au MGI; Éviter les configurations singulières pour ne pas avoir une infinité de solutions au MGI.

La méthode de Paul [103] nous a permis de calculer les coordonnées articulaires correspondantes à la trajectoire souhaitée, pour les positions de l'articulateur (q_i).

Soit U₀ la situation désirée du robot, tel que :

$$U_0 = {}^0 T_6 = \begin{bmatrix} {}^0 A_6 & {}^0 P_6 \\ \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(2.10)

Dans les robots ayant une poignée rotule à celle de Stäubli TX-90, le vecteur position de MGD donnée par : ${}^{0}P_{6} = {}^{0}P_{4}$.

Par l'identification, terme à terme, de la 4^{ime} colonne du produit des transformations la 4^{ime} colonne de U₀, nous obtenons:

$$\begin{bmatrix} \mathsf{P}_{\mathsf{x}} \\ \mathsf{P}_{\mathsf{y}} \\ \mathsf{P}_{\mathsf{z}} \\ \mathsf{1} \end{bmatrix} = {}^{\mathsf{0}} \mathsf{T}_{\mathsf{4}} \cdot \begin{bmatrix} \mathsf{0} \\ \mathsf{0} \\ \mathsf{0} \\ \mathsf{1} \end{bmatrix} = {}^{\mathsf{0}} \mathsf{T}_{\mathsf{1}} \cdot {}^{\mathsf{1}} \mathsf{T}_{\mathsf{2}} \cdot {}^{\mathsf{2}} \mathsf{T}_{\mathsf{3}} \cdot {}^{\mathsf{3}} \mathsf{T}_{\mathsf{4}} \cdot \begin{bmatrix} \mathsf{0} \\ \mathsf{0} \\ \mathsf{0} \\ \mathsf{1} \end{bmatrix}$$
(2.11)

Nous pré-multiplions les deux membres par ${}^{1}T_{0}$, et nous identifions, terme à terme, les deux membres. Nous aurons :

$$C1.Px + S1.Py = S23.r4 + C2.d3 + d2$$

-S1.Px + C1.Py = r3 (2.12)
 $Pz = C23.r4 - S2.d3$

 θ_1 =atan2 (S₁, C₁), Si P_x²+P_y²≠0

$$\begin{cases} S1 = \frac{-(P_x) \cdot r_3 + (P_y) \cdot \sqrt{P_x^2 + P_y^2 - r_3^2}}{P_x^2 + P_y^2} \\ C1 = \frac{(P_y) \cdot r_3 - (-P_x) \cdot \sqrt{P_x^2 + P_y^2 - r_3^2}}{P_x^2 + P_y^2} \end{cases}$$
(2.13)

Nous pré-multiplions les deux membres par ${}^{2}T_{1}$, et nous identifions, terme à terme, les deux membres. Nous aurons:

C2.
$$(C1.Px) + C2. (S1.Py) - S2.Pz - d2.C2 = S3.r4 + d3$$

-S2. $(C1:Px) - S2. (S1.Py) - C2.Pz + d2.S2 = -C3.r4$ (2.14)

S1.Px + C1.Py = r3

Nous déterminons θ_2 et θ_3 , après avoir multiplié par le carré les côtés de l'égalité puis l'addition des deux premières équations. Nous obtenons une équation de la forme :

$$X S2 + Y C2 = Z$$
 (2.15)

Avec :

 $X=-2.P_z.d_3$

 $Y=2.B.d_3$

$$Z = B^2 + P_z^2 + d_3^2 - r_4^2$$

 $B=C1.P_x+S1.P_y-d_2$

$$\begin{cases} S2 = \frac{X.Z + \varepsilon.Y.\sqrt{X^2 + Y^2 - Z^2}}{X^2 + Y^2} \\ C2 = \frac{Y.Z - \varepsilon.X\sqrt{X^2 + Y^2 - Z^2}}{X^2 + Y^2} \end{cases} \text{ avec : } \varepsilon \pm 1 \end{cases}$$
(2.16)

$$\theta_2 = \operatorname{atan2}(Z, \sqrt{(X^2 + Y^2 - Z^2) - \operatorname{atan2}(Y, X)}$$
 (2.17)

 θ_2 =atan2 (S2,C2)

$$\begin{cases} S3=C2.B-S2.P_z-d_3 \\ C3=S2.B+C2.P_z \end{cases}$$
(2.18)

$$\theta_3 = atan2 (S3, C3)$$
 (2.19)

L'orientation de U_0 est donnée par :

$${}^{0} A_{6} = [s n a]$$

$$s = [s_{x} s_{y} s_{z}]^{T}$$

$$n = [n_{x} n_{y} n_{z}]^{T}$$

$$a = [a_{x} a_{y} a_{z}]^{T}$$

Nous pré-multiplions les deux membre par ${}^{3}A_{0}$, nous aurons :

$${}^{3}A_{0}(\theta_{1}, \theta_{2}, \theta_{3}).[s \quad n \quad a] = {}^{3}A_{6}(\theta_{4}, \theta_{5}, \theta_{6})$$
$${}^{3}A_{0}(\theta_{1}, \theta_{2}, \theta_{3}).[s \quad n \quad a] = \begin{bmatrix} F_{x} & G_{x} & H_{x} \\ F_{y} & G_{y} & H_{y} \\ F_{z} & G_{z} & H_{z} \end{bmatrix}$$

Ce qui est équivalent à :

$$[F G H] = {}^{3}A_{6}(\theta_{4}, \theta_{5}, \theta_{6})$$
(2.20)

Les variables (θ_1 , θ_2 , θ_3) étant connues, il suffit de pré-multiplier les deux membres de l'équation par ⁴ A₃. Nous identifions, terme à terme, les deux membres. Nous aurons trois systèmes d'équations qui nous permettront d'avoir successivement θ_4 , θ_5 *et* θ_6 tels que :

$$F = [F_{x}, F_{y}, F_{z}]^{T}$$

$$F = [C23.(C1.s_{x}+S1.s_{y})-S23.s_{z},-S23.(C1.s_{x}+S1.s_{y})-C23.s_{z},-S1.s_{x}+C1.s_{y}]^{T}$$

$$G = [G_{x}, G_{y}, G_{z}]^{T}$$

$$G = [C23.(C1.n_{x}+S1.n_{y})-S23.n_{z},-S23.(C1.n_{x}+S1.n_{y})-C23.n_{z},-S1.n_{x}+C1.n_{y}]^{T}$$

$$H = [H_{x}, H_{y}, H_{z}]^{T}$$
(2.21)

$$H = \left[C23.(C1.a_{x}+S1.a_{y})-S23.a_{z},-S23.(C1.a_{x}+S1.a_{y})-C23.a_{z},-S1.a_{x}+C1.a_{y}\right]^{T}$$
(2.23)

Résolution de θ_4 :

$(-H_x).S4 + (H_z).C4 = 0$	
$\begin{cases} H_x = C23.(C1.a_x + S1.a_y) - S23.a_z \\ H_z = -S1.a_x + C1.a_y \end{cases}$	
θ_4 =atan2(H _z , H _x)	(2.24)
Résolution de θ_5 : H _y =- S23.(C1.a _x +S1.a _y)-C23.a _z	
$\begin{cases} S5=C4. H_x+S4. H_z \\ C5=-H_y \end{cases}$	
θ ₅ =atan2(S5, C5)	(2.25)
Résolution de θ_6 :	
$\begin{cases} S6=-S4.F_x+C4.F_z\\ C6=-S4.G_x+C4.G_z \end{cases}$	
θ_6 =atan2(S6, C6)	(2.26)

2.4 Modèles cinématiques :

Le modèle cinématique a pour but de connaitre les vitesses cartésiennes de l'outil dans le repère fixe en fonction des vitesses angulaires de chaque
articulation et vice-versa. Les modèles cinématiques direct et inverse vont être détaillés dans cette partie.

2.4.1 Modèle cinématique direct (MCD) :

La solution du modèle cinématique direct (MCD) correspond aux vitesses angulaires et linaires de l'organe terminal attaché au robot. Ces vitesses sont exprimées en fonction des vitesses articulaires q_j et des positions articulaires q_j, ainsi que des paramètres géométriques du robot.

Le modèle cinématique direct d'un robot poly-articulé rigide est défini par l'expression suivante :

$$\dot{X} = J(q). \dot{q} = \begin{bmatrix} V_n \\ \omega_n \end{bmatrix}$$
(2.27)

- J(q) : Matrice jacobienne du mécanisme de dimension (*m* x *n*).
- V_n: Vitesse de translation du repère R_n, est égale à la dérivée par rapport au temps du vecteur P_n.
- ω_n: Vitesse de rotation du repère R_n, mais n'est pas égale à la dérivée des paramètres d'orientation.

La vitesse de l'outil et la modification de son orientation sont reliées directement aux vitesses articulaires du robot par la matrice J(q). La détermination des singularités du robot est aussi faite en utilisant la matrice J(q). L'obtention de la matrice jacobienne se réalise par deux méthodes :

1. Nous pouvons calculer la matrice jacobienne en dérivant le MGD (X = f(q))

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i(q)}{\partial q_j}$$
(2.28)

où J_{ii}: est l'élément (i,j) de la matrice jacobienne J(q)

2. La seconde méthode, plus pratique dans le cas du TX-90, consiste à calculer la matrice jacobienne de base, qui est fondée sur la relation entre les éléments du torseur cinématique (V_n et ω_n) du repère R_n , et les vitesses articulaires (q):

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} V_n \\ \omega_n \end{bmatrix} = J_n \cdot \dot{q} = J_n \cdot \dot{q}$$
(2.29)

La vitesse q_k de la k^{ème} articulation produit les vitesses linéaires et angulaires ($V_{k,n}$ et $\omega_{k,n}$ respectivement) au niveau du repère terminal Rn :

$$\begin{cases} V_{k,n} = [\sigma_k a_k + \overline{\sigma}_k (a_k \wedge L_{k,n})]\dot{q}_k \\ \omega_{k,n} = \overline{\sigma}_k a_k \dot{q}_k \end{cases}$$
(2.30)

Soient :

• L_{k,n} désigne le vecteur d'origine O_k et d'extrémité O_n ;

 $\bullet \, a_k$ est le vecteur unitaire porté par l'axe $Z_k \, de$ la $k^{\grave{e}me}$ articulation ;

• $\sigma_k = 0$ car l'articulation rotoïde , $\overline{\sigma}_k = 1$;

Le produit vectoriel $a_k \wedge L_{k,n}$ peut se transformer en $\hat{a}_k L_{k,n}$, et la k^{ème} colonne de ⁱ J_n notée ⁱ J_{n,k} devient :

$$^{i} J_{n,k} = \begin{bmatrix} \sigma_{k} & i_{a_{k}} + & \overline{\sigma}_{k} & i_{A_{k}} & k_{\hat{a}_{k}} & .^{k} L_{k,n} \\ & \overline{\sigma}_{k} & i_{a_{k}} \end{bmatrix}$$
(2.31)

En notant que : ${}^{k}a_{k} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{T}$, et ${}^{k}L_{k,n} = {}^{k}P_{n}$

En développant, et on obtient :

$$^{i} J_{n,k} = \begin{bmatrix} \sigma_{k}^{i} a_{k} + \overline{\sigma}_{k} ({}^{k} P_{ny}^{i} s_{k} + {}^{k} P_{nx}^{i} n_{k}) \\ \overline{\sigma}_{k}^{i} a_{k} \end{bmatrix}$$
(2.32)

Où ${}^{k}P_{nx}$ et ${}^{k}P_{ny}$ sont respectivement les composantes x et y du vecteur ${}^{k}P_{n}$

 ${}^{0}J_{n} = {}^{0}J_{6}$. Chaque colonne de matrice ${}^{i}J_{6}$ s'écrit (au point O_{6} et dans le repère R_{0}) de la forme suivante :

$${}^{0}J_{6,k} = \begin{bmatrix} {}^{k}P_{6y} & {}^{0}s_{k} + {}^{k}P_{6x} & {}^{0}n_{k} \\ & {}^{0}a_{k} \end{bmatrix}$$
(2.33)

Nous présentons aussi les colonnes de la matrice Jacobienne ${}^{0}J_{6}$ du robot TX-90 :

$${}^{0}J_{6,1} = \begin{bmatrix} -r_{3}.C1 - (S23.r_{4} + d_{2} + d_{3}.C2).S1 \\ -r_{3}.S1 + (S23.r_{4} + d_{2} + d_{3}.C2).C1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} {}^{0}J_{6,2} = \begin{bmatrix} C3.r_{4}(C1.C2) - (S3.r_{4} + d_{3})(C1.C2) \\ C3.r_{4}(S1.C2) - (S3.r_{4} + d_{3})(S1.C2) \\ -C3.r_{4}.S2 - (S3.r_{4} + d_{3}).C2 \\ -S1 \\ C1 \\ 0 \end{bmatrix}$$



2.4.2 Modèle cinématique inverse du premier ordre :

Le modèle cinématique inverse (MCI) du premier ordre permet de déterminer la vitesse des variables articulaires (\dot{q}) de chaque axe à partir de la vitesse des variables opérationnelles (\dot{X}) et des positions articulaires (q) de chaque axe :

$$X = J(q)q$$
(2.34)

$$\dot{q} = J^{-1} (q) \dot{X}$$
 (2.35)

2.4.3 Modèle cinématique inverse du deuxième ordre :

Nous déduisons : le modèle cinématique inverse du second ordre par dérivation de la relation (2.34) lie les accélérations articulaires et cartésiennes, mais il faut éviter les points singuliers :

$$\ddot{X} = J(q)\ddot{q} + \dot{j}(q,\dot{q})\dot{q}$$
(2.36)

$$\ddot{q} = J^{-1}(q) [\ddot{X} - \dot{J}(q, \dot{q})\dot{q}]$$
 (2.37)

$$\dot{J}(q,\dot{q}) = \frac{\partial J(q)}{\partial q}. \dot{q}$$
(2.38)

$$\ddot{q} = J^{-1}(q) \left[\ddot{X} - \frac{\partial J(q)}{\partial q} \cdot \dot{q}^2 \right]$$
(2.39)

2.5 Modèle dynamique :

L'équation (2.40) décrit la relation entre les couples (et/ou forces) appliqués aux actionneurs et les positions, vitesses et accélérations articulaires. Nous représentons le modèle dynamique par :

$$\Gamma = f(q, \dot{q}, \ddot{q}, fe)$$
(2.40)

Avec :

 Γ : vecteur des couples/forces des actionneurs.

q : vecteur des positions articulaires.

 \dot{q} : vecteur des vitesses articulaires.

q : vecteur des accélérations articulaires.

fe : vecteur représentant l'effort extérieur (force moment) qu'exerce le robot sur l'environnement.

2.5.1 Modèle dynamique inverse (MDI) :

Pour obtenir le modèle dynamique des robots, plusieurs formalismes ont été utilisés [8]. Nous citons :

- Le formalisme de Lagrange.
- Le formalisme de Newton-Euler.

Dans le cadre de ce travail, nous avons choisi d'utiliser le formalisme qui se base sur les équations de Lagrange. Le modèle de Lagrange est converti en une paramétrisation indépendante à l'aide de l'équation suivante. En supposant des corps rigides, un frottement et des forces externes exercées sur l'outil sont nuls :

$$\Gamma_{j} = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_{j}} - \frac{\partial L}{\partial q_{j}}$$
(2.41)

Avec : L=E-U : lagrangien du système ;

E : L'énergie cinétique ;

U : L'énergie potentielle.

L'équation de l'énergie cinétique, de corps j s'écrit sous la forme suivante :

$$E_{j} = \frac{1}{2} \left[{}^{j}\omega_{j}^{T} {}^{j}J_{j} {}^{j}\omega_{j} + M_{j} {}^{j}V_{j}^{T^{j}}V_{j} + 2 {}^{j}MS_{j}^{T} ({}^{j}V_{j} {}^{j}\omega_{j}) \right]$$
(2.42)

$${}^{j}\omega_{j} = {}^{j}A_{j-1} {}^{j-1}\omega_{j-1} + \overline{\sigma}_{j} \dot{q}_{j} {}^{j}a_{j} = {}^{j}\omega_{j-1} + \overline{\sigma}_{j} \dot{q}_{j} {}^{j}a_{j}$$
(2.43)

$${}^{j}V_{j} = {}^{j}A_{j-1}({}^{j-1}V_{j-1} + {}^{j-1}\omega_{j-1}{}^{n-j-1}P_{j}) + \sigma_{j}\dot{q}_{j}{}^{j}a_{j}$$
(2.44)

- $V_0=0$ et $\omega_0=0$: Pour un robot dont la base est fixe :.
- ^jA_{j-1} : Matrice rotation inverse de la j^{eme} articulation :

$${}^{1}A_{0} = \begin{bmatrix} C1 & S1 & 0 \\ -S1 & C1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} {}^{2}A_{1} = \begin{bmatrix} C2 & 0 & -S2 \\ -S2 & 0 & -C2 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} {}^{3}A_{2} = \begin{bmatrix} C3 & S3 & 0 \\ -S3 & C3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$${}^{4}A_{3} = \begin{bmatrix} C4 & 0 & S4 \\ -S4 & 0 & C4 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} {}^{5}A_{4} = \begin{bmatrix} C5 & 0 & -S5 \\ -S5 & 0 & -C5 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} {}^{6}A_{5} = \begin{bmatrix} C6 & 0 & S6 \\ -S6 & 0 & C6 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

• ^{j-1}P_j: Vecteur de position de la j^{eme} articulation :

$${}^{0}\mathsf{P}_{1} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} {}^{1}\mathsf{P}_{2} = \begin{pmatrix} d_{2} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} {}^{2}\mathsf{P}_{3} = \begin{pmatrix} d_{3} \\ 0 \\ r_{3} \end{pmatrix} {}^{3}\mathsf{P}_{4} = \begin{pmatrix} 0 \\ -r_{4} \\ 0 \end{pmatrix} {}^{4}\mathsf{P}_{5} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} {}^{5}\mathsf{P}_{6} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

- M_j : Masse du corps C_j ;
- ${}^{j}MS_{j}$: Premier moment d'inertie du corps C_{j} autour de l'origine du repère R_{j} .

 $M_{j}S_{j} = [MX_{j} MY_{j} MZ_{j}]^{T}$

^jJ_j: La matrice (3x3) associée au tenseur d'inertie du corps C_j exprimée au point O_j dans le repère R_j:

$$\label{eq:Jj} {}^{j}J_{j} = \begin{bmatrix} IXX_{j} & IXY_{j} & IXZ_{j} \\ IXY_{j} & IYY_{j} & IYZ_{j} \\ IXZ_{j} & IYZ_{j} & IZZ_{j} \end{bmatrix}$$

L'équation totale de l'énergie cinétique s'écrit comme suit :

 $E_{j \text{ (total)}} = E_{j \text{ (corps)}} + E_{j \text{ (actionneurs)}}$

L'énergie cinétique du rotor de j^{eme} actionneur est définie par : $\frac{1}{2}$ lajq_j².

Le paramètre inertiel la_j peut s'écrire : $la_j=N_j^2 j_{mj}$

- j_{mi} : est le moment d'inertie du rotor de l'actionneur j ;
- N_j : est le rapport de réduction de l'axe j.

L'énergie cinétique totale est donc :

$$E_{j} = \frac{1}{2} \left[{}^{j}\omega_{j}^{T} {}^{j}J_{j} {}^{j}\omega_{j} + M_{j}^{j}V_{j}^{T} {}^{j}V_{j} + 2 {}^{j}MS_{j}^{T} ({}^{j}V_{j} {}^{j}\omega_{j}) + Ia_{j}.\dot{q}_{j}{}^{2} \right]$$
(2.45)

L'équation de l'énergie potentielle de corps j s'écrit sous la forme suivante :

$$U_{j} = -{}^{0}g^{T} (M_{j} {}^{0}P_{j} + {}^{0}A_{j} {}^{j}MS_{j}) = -[{}^{0}g^{T} \ 0] {}^{0}T_{j} \begin{bmatrix} {}^{j}MS_{j} \\ M_{j} \end{bmatrix}$$
(2.46)

Lagrangien de système peut s'écrit comme :

$$L = \frac{d}{dt} \frac{\partial E}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial E}{\partial q_j} + \frac{\partial U}{\partial q_j}$$
(2.47)

Différents modèles de modélisation de frottement existent dans la littérature. Nous reprenons le même modèle proposé dans [8] et dont l'expression est :

$$\Gamma_{\rm fj} = F_{\rm sj} \operatorname{Sign}\left(\dot{q}_{\rm j}\right) + F_{\rm vj} \dot{q}_{\rm j} \tag{2.48}$$

- Γ_{fj} : couple de frottements ;
- **F**_{sj} : Frottement sec ;
- F_{vj} : Frottement visqueux.

Les valeurs identifiées des moments d'inertie la_j des actionneurs du TX-90 sont présentées dans le tableau 2.2.

j	I a _j		
(Unité)	N.m /rad/s ²		
1	80		
2	165,6		
3	30,6		
4	6,3		
5	2		
6	0,5		

Tableau 2.2 : Valeurs identifiées des paramètres la_i du TX-90 [39]

Les valeurs identifiées des paramètres de frottement F_{vj} et F_{sj} du TX-90 sont présentées dans le tableau 2.3.

j	F _{vj}	F _{sj}
Unité	N.m /rad /s	N.m
1	28,4	49,9
2	40,3	28,7
3	5	3
4	10	4,7
5	6,6	4,7
6	5	1,7

Tableau 2.3 : Valeurs identifiées des paramètres F_{vj} et F_{sj} du TX-90 [39]

2.5.2 Application au TX-90 :

1. Calcul de la vitesse de rotation :

$${}^{0}\omega_{0} = \begin{bmatrix} 0\\ 0\\ 0 \end{bmatrix} {}^{1}\omega_{1} = \begin{bmatrix} 0\\ 0\\ q_{1} \end{bmatrix} {}^{2}\omega_{2} = \begin{bmatrix} -S2 \ q_{1}\\ -C2 \ q_{1}\\ q_{2} \end{bmatrix} {}^{3}\omega_{3} = \begin{bmatrix} -S23 \ q_{1}\\ -C23 \ q_{1}\\ q_{2} + q_{3} \end{bmatrix}$$

$${}^{4}\omega_{4} = \begin{bmatrix} -C4.S23.\dot{q}_{1} + S4(\dot{q}_{2} + \dot{q}_{3})\\ S4.S23. \ \dot{q}_{1} + C4(\dot{q}_{2} + \dot{q}_{3})\\ C23.\dot{q}_{1} + \dot{q}_{4} \end{bmatrix} {}^{5}\omega_{5} = \begin{bmatrix} -C5.C4.S23. \ \dot{q}_{1} + C5.S4(\dot{q}_{2} + \dot{q}_{3}) - S5(C23.\dot{q}_{1} + \dot{q}_{4})\\ S5.C4.S23.\dot{q}_{1} - S5.S4(\dot{q}_{2} + \dot{q}_{3}) - C5(C23.\dot{q}_{1} + \dot{q}_{4})\\ S4.S23.\dot{q}_{1} + C4(\dot{q}_{2} + \dot{q}_{3}) \end{bmatrix} {}^{6}\omega_{6} = \begin{bmatrix} -C6.C5.C4.S23. \dot{q}_{1} + C6.C5.S4(\dot{q}_{2} + \dot{q}_{3}) - C6.S5(C23.\dot{q}_{1} + \dot{q}_{4}) + S6.S4.S23.\dot{q}_{1} + S6.C4(\dot{q}_{2} + \dot{q}_{3}) + S6.\dot{q}_{5}\\ S6.C5.C4.S23.\dot{q}_{1} - S6.C5.S4(\dot{q}_{2} + \dot{q}_{3}) + S6.S5(C23.\dot{q}_{1} + \dot{q}_{4}) + S6.S4.S23.\dot{q}_{1} + S6.C4(\dot{q}_{2} + \dot{q}_{3}) + S6.\dot{q}_{5}\\ -S5.C4.S23. \ \dot{q}_{1} + S5S4(\dot{q}_{2} + \dot{q}_{3}) + C5(C23.\dot{q}_{1} + \dot{q}_{4}) + \dot{q}_{6} \end{bmatrix}$$

2. Calcul de la vitesse de translation :

$${}^{0}V_{0} = \begin{bmatrix} 0\\0\\0 \end{bmatrix} {}^{1}V_{1} = \begin{bmatrix} 0\\0\\0 \end{bmatrix} {}^{2}V_{2} = \begin{bmatrix} 0\\0\\d_{2}.\dot{q}_{1} \end{bmatrix} {}^{3}V_{3} = \begin{bmatrix} -C23.r_{3}.\dot{q}_{1}+S3.d_{3}.\dot{q}_{2}\\S23.r_{3}.\dot{q}_{1}+C3.d_{3}.\dot{q}_{2}\\C2.d_{3}.\dot{q}_{1}+d_{2}.\dot{q}_{1} \end{bmatrix}$$

$${}^{4}V_{4} = \begin{bmatrix} C4\left(-C23.r_{3}.\dot{q}_{1}+S3.d_{3}.\dot{q}_{2}+r_{4}(\dot{q}_{2}+\dot{q}_{3})\right)+S4\left(C2.d_{3}.\dot{q}_{1}+d_{2}.\dot{q}_{1}+S23.r_{4}.\dot{q}_{1}\right)\\-S4\left(-C23.r_{3}.\dot{q}_{1}+S3.d_{3}.\dot{q}_{2}+r_{4}(\dot{q}_{2}+\dot{q}_{3})\right)+C4\left(C2.d_{3}.\dot{q}_{1}+d_{2}.\dot{q}_{1}+S23.r_{4}.\dot{q}_{1}\right)\\-S23.r_{3}.\dot{q}_{1}-C3.d_{3}.\dot{q}_{2} \end{bmatrix}$$

$${}^{5}V_{5} = \begin{bmatrix} C5.C4\left(-C23.r_{3}.\dot{q}_{1}+S3.d_{3}.\dot{q}_{2}+r_{4}(\dot{q}_{2}+\dot{q}_{3})\right)+S4.C5\left(C2.d_{3}.\dot{q}_{1}+d_{2}.\dot{q}_{1}+S23.r_{4}.\dot{q}_{1}\right)+S5.S23.r_{3}.\dot{q}_{1}+S5.C3.d_{3}.\dot{q}_{2}}{-S4\left(-C23.r_{3}.\dot{q}_{1}+S3.d_{3}.\dot{q}_{2}+r_{4}(\dot{q}_{2}+\dot{q}_{3})\right)-S5.S4\left(C2.d_{3}.\dot{q}_{1}+d_{2}.\dot{q}_{1}+S23.r_{4}.\dot{q}_{1}\right)+C5.S23.r_{3}.\dot{q}_{1}+C5.C3.d_{3}.\dot{q}_{2}}{-S4\left(-C23.r_{3}.\dot{q}_{1}+S3.d_{3}.\dot{q}_{2}+r_{4}(\dot{q}_{2}+\dot{q}_{3})\right)+C4\left(C2.d_{3}.\dot{q}_{1}+d_{2}.\dot{q}_{1}+S23.r_{4}.\dot{q}_{1}\right)} \end{bmatrix}$$

 ${}^{6}\mathsf{V}_{6} = \begin{bmatrix} {}^{6}\mathsf{V}_{6,1} \\ {}^{6}\mathsf{V}_{6,2} \\ {}^{6}\mathsf{V}_{6,3} \end{bmatrix}$

$${}^{6}V_{6,1} = C6 \left(C5.C4 \left(-C23 \\ .r_{3}.\dot{q_{1}} + S3.d_{3}.\dot{q_{2}} + r_{4} (\dot{q_{2}} + \dot{q_{3}}) \right) \right) + C6 (S4.C5 (C2.d_{3}.\dot{q_{1}} + d_{2}.\dot{q_{1}} + S23.r_{4}.\dot{q_{1}})) + C6 (S5.S23.r_{3}.\dot{q_{1}} + S5.C3.d_{3}.\dot{q_{2}}) + S6 (-S4 \left(-C23.r_{3}.\dot{q_{1}} + S3.d_{3}.\dot{q_{2}} + r_{4} (\dot{q_{2}} + \dot{q_{3}}) \right) + S6 (C4 (C2.d_{3}.\dot{q_{1}} + d_{2}.\dot{q_{1}} + S23.r_{4}.\dot{q_{1}}))$$

$${}^{6}V_{6,2} = -S6 \left(C5.C4 \left(-C23.r_{3}.\dot{q_{1}} + S3.d_{3}.\dot{q_{2}} + r_{4} (\dot{q_{2}} + \dot{q_{3}}) \right) \right) - S6 \left(S4.C5 (C2.d_{3}.\dot{q_{1}} + .d_{2}.\dot{q_{1}} + S23.r_{4}.\dot{q_{1}}) \right)$$

$$-S6 \left(S5.S23.r_{3}.\dot{q_{1}} + S5.C5.d_{3}.\dot{q_{2}} \right) + C6 \left(-S4 \left(-C23.r_{3}.\dot{q_{1}} + S3.d_{3}.\dot{q_{2}} + r_{4} (\dot{q_{2}} + \dot{q_{3}}) \right) \right)$$

$$+ C6.C4 (C2.d_{3}.\dot{q_{1}} + d_{2}.\dot{q_{1}} + S23.r_{4}.\dot{q_{1}})$$

$${}^{6}V_{6,3} = S5.C4 \left(-C23.r_{3}.\dot{q_{1}} + S3.d_{3}.\dot{q_{2}} + r_{4}(\dot{q_{2}} + \dot{q_{3}})\right) + S5.S4 \left(C2.d_{3}.\dot{q_{1}} + d_{2}.\dot{q_{1}} + S23.r_{4}.\dot{q_{1}}\right)$$
$$-C5.S23.r_{3}.\dot{q_{1}} - C5.C3.d_{3}.\dot{q_{2}}$$

2.6 Modèle de déformation :

Les erreurs statiques de positionnement et les erreurs de poursuite de trajectoire peuvent avoir plusieurs sources. C'est pourquoi, nous devons enrichir le modèle dynamique du robot supposé, précédemment, rigide par le modèle élasto-statique.

Le comportement élasto-statique d'un robot définit sa réponse lorsqu'une charge (force et moment) est appliquée à son effecteur. Cette réponse est utilisée pour définir la rigidité du robot.

Nous supposons que les liaisons du robot sont rigides et que seuls les axes du moteur présentent une rigidité en torsion. Nous parlons alors de flexibilités localisées dans les articulations (figure 2.10). Par conséquent, un écart variant dans le temps est introduit entre la position de l'actionneur d'entraînement et la position de l'articulation.

Pour faciliter la modélisation de comportement du robot, l'élasticité de l'articulation est représentée comme un ressort de torsion linéaire pour les articulations rotoïdes et un ressort linéaire pour les articulations prismatiques.



Figure 2.10 : Flexibilités localisées dans les articulations.

Pour un robot avec des articulations flexibles, le modèle dynamique peut être représenté comme suit [2] :

⁻ =Κ _θ .Δθ	(2.49)

 $\Delta \theta = q_m - q$

(2.50)

Où : K_{θ} est la matrice de rigidité des articulations. Elle est diagonale, positive, et constante pour toute charge externe quelle que soit la configuration du robot. Les éléments de la matrice de rigidité articulaire $K_{\theta j}$ sont présentés dans le tableau 2.4. $\Delta \theta$ est la différence entre la position souhaitée et la position réelle causée par la rigidité des articulations.

j	1	2	3	4	5	6
K _{θj} [N.m/rad]	1.7 10 ⁶	5.9 10 ⁶	1.8 10 ⁶	2.9 10 ⁵	9.3 10 ⁵	4.9 10 ⁵

Tableau 2.4 : Eléments de la matrice de rigidité de l'articulation de Stäubli TX-90[104].

Cependant, lorsque nous adoptons l'approche de la dualité entre l'espace articulaire et l'espace cartésien, le couple articulaire nécessaire pour équilibrer la force externe F_e devient :

$$\Gamma = J^{T}(q)F_{e} \tag{2.51}$$

En raison de l'absence d'un capteur fournissant la position réelle de l'effecteur dans le cas de la programmation hors ligne, $\Delta \theta$ ne peut pas être identifié par l'Eq. 2.50. Une autre méthode utile pour calculer les erreurs d'articulation en fonction des charges externes [104, 105] consiste à identifier l'Eq. 2.49 et l'Eq. 2.51. L'erreur articulaire peut être estimée comme suit :

$$\Delta \boldsymbol{\theta} = \mathbf{K}_{\boldsymbol{\theta}}^{-1} \mathbf{J}^{\mathsf{T}}(\mathbf{q}) \mathbf{F}_{\mathbf{e}}$$
(2.52)

La déviation cartésienne peut être obtenue à partir de l'erreur articulaire comme suit :

$$\Delta X = J(q) \ \Delta \theta \tag{2.53}$$

Elle peut également être calculée en fonction de la force extérieure Fe par :

$$\Delta X = K_x^{-1} F_e$$
(2.54)

 K_X est la matrice de rigidité cartésienne. Contrairement à K_{θ} , la matrice K_X dépend de la configuration du robot. L'équation 2.52 est incluse dans l'équation 2.53, puis par identification avec l'équation 2.54, K_X peut être obtenue :

$$K_{x} = J^{-T} K_{\theta} J^{-1}$$
(2.55)

Un modèle avancé proposé par [106] prend en compte le changement de configuration du robot en ajoutant une matrice de rigidité complémentaire K_c :

$$K_{c} = \left[\frac{\delta J}{\delta q_{1}} F_{e} \frac{\delta J}{\delta q_{2}} F_{e} \frac{\delta J}{\delta q_{3}} F_{e}\right]$$
(2.56)

Enfin, la déviation cartésienne du robot s'écrit comme suit :

$$\Delta X = J(q) \left(K_{\theta}^{-} K_{c} \right)^{-1} J^{T}(q) F_{e}$$
(2.57)

Le modèle dynamique inverse utilisé par la suite est basé sur l'équation de Lagrange, y compris le couple de frottement sec et visqueux, l'inertie des moteurs qui alimentent le robot, le couple des efforts de contact avec l'environnement, et le modèle élasto-statique :

$$\Gamma_{j} = \frac{d}{dt} \frac{\partial E}{\partial \dot{q}_{j}} - \frac{\partial E}{\partial q_{j}} + \frac{\partial U}{\partial q_{j}} + F_{sj} \operatorname{Sign}(\dot{q}_{j}) + F_{vj} \dot{q}_{j} + J^{T} F_{e} + K_{\theta} \Delta \theta$$
(2.58)

2.7 Conclusion :

Dans le présent chapitre, les modèles de robot Stäubli TX-90, y compris les modèles géométriques, les modèles cinématiques et le modèle dynamique, tout en tenant compte des flexibilités articulaires représentées par le modèle élasto-statique ont été présentées et détaillées.

Les positions du robot dans son espace articulaire et opérationnel ont été développées en utilisant les notions de changement de repères et les matrices de transformation, tandis que la méthode de Denavit-Hartenberg Modifier est souvent utilisée pour choisir le système de référence du robot Stäubli TX-90. Nous avons aussi calculé le modèle géométrique inverse par la méthode de Paul afin de déterminer les positions des articulations en fonction d'une position et orientation de l'outil donné.

Le torseur cinématique a été utilisé pour calculer la matrice jacobienne de base qui assure la combinaison entre les vitesses articulaires q_j et la vitesse de l'outil. En connaissant les emplacements et les vitesses cartésiennes à l'extrémité de l'outil, l'inversement de modèle cinématique direct nous permet

d'obtenir les vitesses des articulations. Tandis que la dérivation de ces vitesses et la connaissance de l'accélération de l'outil nous permettent de calculer les accélérations articulaires.

En outre, le modèle dynamique inverse a été développé pour calculer les couples articulaires en fonction des positions, vitesses et accélérations articulaires. Nous avons aussi tenu compte de l'inertie des moteurs du robot, du modèle de frottement des articulations et des efforts du contact outil/ environnement. Pour compléter le modèle dynamique inverse, nous avons ajouté le modèle de déformation qui a été présenté et démontré.

CHAPITRE 3

MODELISATION DU CONTACT ROBOT/ENVIRONNEMENT

3.1. Introduction :

Pour une programmation hors ligne efficace, il faut modéliser le processus souhaité en se rapprochant le plus possible de la réalité. À cette fin, certaines conditions du procédé d'usinage doivent être respectées et/ou garanties.

Ce chapitre concerne la modélisation des efforts de contact du robot avec son environnement, ceci nous permet de prédire les efforts sans la mise en place de l'usinage réel. Dans la suite de cette thèse, les efforts prédits seront retenus pour calculer la déflexion du robot. L'objectif de ce chapitre est donc de développer un modèle du procédé qui sert à connaitre les efforts de coupe en fonction des paramètres de pilotage du procédé. De plus, ce modèle permet d'étudier la stabilité de la trajectoire du robot et d'établir des méthodes de minimisation des erreurs de son positionnement.

Une première partie introduit des notions sur le procédé traité et les différents paramètres nécessaires pour modéliser ce procédé. Une deuxième partie présente un modèle de prédiction des efforts de coupe en fonction de la géométrie de l'outil, les paramètres de coupe, et les caractéristiques de la pièce à usiner. L'opération d'usinage considérée dans ce travail consiste en un détourage d'une pièce en Ti₆Al₄V.

3.2. Procédé de fraisage :

Le fraisage étant un procédé de fabrication par enlèvement de matière, où la génération de surfaces plane résulte de la combinaison de deux mouvements : un mouvement de coupe et un mouvement d'avance. Le mouvement de coupe est assuré par l'outil (la fraise), cet outil peut :

- Avoir une ou plusieurs dents dont la fonction est d'enlever la matière ;
- Être animé d'un mouvement de rotation imposé par la machine-outil assimilable au mouvement de coupe.

Comme la plupart des procédés de coupe des métaux, chaque opération ou forme nécessite un outil spécifique. Pour effectuer le choix de l'outil, nous prenons en compte les paramètres suivants :

- Matière de la pièce, usinabilité.
- Configuration de la pièce : forme, dimension, surépaisseurs d'usinage.
- Limitations : tolérances, état de surface.
- Machine : type, puissance, conditions d'utilisation et caractéristiques.
- Stabilité, rigidité de la pièce.



Figure 3.1 : différents type d'outil : a) Outil à arêtes coupantes b) Outil à pastilles





Selon le type de la machine-outil utilisée, la définition de profil de la pièce est assurée par un mouvement complémentaire (rectiligne ou non) appelé *mouvement d'avance*. Ce mouvement est animé parfois par la pièce à usiner, ou par la machine elle-même. La combinaison de ces deux mouvements permet d'obtenir une pièce conforme au dessin de définition.

3.2.1. Types et formes de fraisage :

Selon plusieurs critères, à savoir : le profil de surface à usiner, l'état de surface souhaité, la position des surfaces sur la machine, et d'autres critères, il existe deux types de fraisage :

- Le fraisage de face ou en bout : où l'axe de la fraise est perpendiculaire à la surface usinée.
- Le fraisage de profil ou en roulant : l'axe de la fraise est parallèle à la surface usinée.



Figure 3.3 : Types de fraisage : a) fraisage en bout, b) fraisage en roulant

Dans la pratique, pour chaque type de fraisage, il existe deux modes utilisés de travail :

3.2.1.1 Le travail en opposition (Up-milling) : Dans le processus de fraisage ascendant (en opposition), la fraise a tendance d'enlever la matière en partant du bas en allant vers le haut. En d'autres termes, la largeur du copeau commence à zéro et augmente. Comme la fraise rencontre une épaisseur de copeau minimale lorsqu'elle commence à pénétrer dans la pièce, le frottement au début de la coupe provoquera une couche d'écrouissage excessive dans la pièce et cette condition générera une température plus faible autour de l'arête de coupe et de la surface du copeau par rapport au fraisage en avalant en raison d'une interface de friction moindre entre l'outil et le copeau [107].



Figure 3.4 : Mode de travail en opposition : a) fraisage en bout, b) fraisage en roulant

3.2.1.2 Le travail en avalant ou en concordance (Down-milling) : Par rapport à l'opération de fraisage en opposition, le processus de fraisage descendant (en avalant) aura tendance d'enlever la matière en commençant par le haut en allant jusqu'au bas. Dans cette méthode, les copeaux produits sont des copeaux dentelés discontinus, et sont généralement plus gros (environ deux fois plus gros que dans le cas du fraisage en opposition) en raison de la force élevée pendant le contact ; elle peut produire une meilleure finition de surface avec une réduction d'usure de l'outil par rapport à l'opération de fraisage en opposition [108].





3.2.2. Paramètres de coupe :

Pour pouvoir réaliser une pièce par enlèvement de matière, trois grandeurs doivent être réunies, regroupées sous le nom de 'paramètres de coupe'.

3.2.2.1 Vitesse de coupe V_c : La vitesse de coupe est un paramètre fondamental pour la formation du copeau. Elle dépend de la configuration d'usinage, du procédé et du couple outil/matière. La définition de la vitesse de coupe est très importante car elle détermine la vitesse de rotation de l'outil en fonction de son diamètre [109].



Figure 3.6 : Vitesse de Coupe V_c.

3.2.2.2 Profondeur de passe a_p : La profondeur de passe correspond à la longueur de l'arête de coupe engagée dans la matière, dans le cas du fraisage, a_p est différent entre l'épaisseur de la pièce avant et après usinage. La profondeur de coupe est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas suivant l'arête de l'outil [110].



Figure 3.7 : Vitesse d'Avance V_f.

3.2.2.3 Vitesse d'avance V_f, avance par tour f_z : La vitesse d'avance V_f est la vitesse à laquelle la machine déplace la pièce par rapport au bâti. L'avance par tour fz est la valeur du déplacement de la pièce, lorsque l'outil a effectué une révolution. C'est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée. Elle varie suivant le diamètre de la fraise, le matériau de la pièce et l'opération de fraisage.

L'avance influe non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent.

3.3. Modélisation des efforts de coupe :

Lors de l'interaction outil/matière, en fonction de la géométrie de l'outil et des conditions de coupe choisies, chaque dent de l'outil de coupe va suivre une trajectoire hélicoïdale, entraînant l'apparition périodique de copeaux d'épaisseurs variables ; cette génération de copeaux correspond à chaque intervalle de passage de la dent dans le matériau.

Selon des conditions de coupe bien définies, le contact entre l'outil et le matériau génère ce que l'on appelle un effort de coupe, qui peut entraîner une déformation plastique de la pièce.

D'après ce qui précède, pour modéliser le processus de fraisage aussi précisément que possible, il faut modéliser les principaux critères, à savoir l'effort de coupe et l'épaisseur du copeau.

Pour prédire l'interaction outil / matière lors de la simulation de l'usinage robotisé, le processus de fraisage doit être modélisé avec précision. L'approche suivie [111] nécessite la connaissance de la géométrie de l'outil, les caractéristiques de la pièce et les conditions de coupe.

3.3.1. Calcul de l'épaisseur instantanée du copeau :

Pour un outil de fraisage (figure 3.8) de diamètre *D* avec un angle d'hélice β et N_t dents, divisées en N_d disques en fonction de la profondeur axiale de coupe a_p à usiner, la relation qui permet de déterminer la position angulaire Φ_j (*z*) du *j*^{ème} segment de dent du *k*^{ème} disque d'épaisseur *dz* est donnée par [112] :

$$\Phi_{j}(z) = \Omega dt + (j-1)\frac{2\pi}{N_{t}} - \left((k-1)dz + \frac{dz}{2}\right)\frac{2\tan\beta}{D}$$
(3.1)

j=1..., Nt et k=1..., Nd.

Où Ω représente la vitesse de rotation de la fraise, *dt* est le temps nécessaire à la fraise pour une rotation.



Figure 3.8 : Modélisation de l'effort de contact outil/matériau

Contrairement aux procédés de tournage, dans le fraisage, l'épaisseur instantanée du copeau (h) varie périodiquement en fonction d'une immersion variable dans le temps. Pour cela, Tlusty et Macneil [113] ont proposé un modèle statique des efforts de coupe qui permet de calculer analytiquement les efforts de coupe. L'avantage de ce modèle est qu'il permet de calculer les efforts résultants rapidement avec les formulations intégrées. Selon son hypothèse, l'épaisseur instantanée du copeau h_i peut être calculée par :

$$h_j(\Phi, z) = f_z \sin \Phi_j(z)$$
(3.2)

L'équation 3.2 a été modifiée pour mieux modéliser la variation de h_j (Φ ,z) en dehors et plein contact avec le matériau :

$$h_{j}(\Phi, z) = f_{z} \sin \Phi_{j}(z) g\left(\Phi_{j}(z)\right)$$
(3.3)

Notez que :
$$\begin{cases} si \ \Phi_e \leq \Phi_j(z) \leq \Phi_s & g\left(\Phi_j(z)\right) = 1 \\ sinon & g\left(\Phi_j(z)\right) = 0 \end{cases}$$
(3.4)

Avec f_z l'avance par dent, Φ_e , Φ_s les angles d'entrée et de sortie du segment de dent dans le matériau par rapport à l'axe Y. On distingue trois cas possible pour calculer les angles Φ_e et Φ_s :

 Le cas d'usinage par lequel le centre de l'outil passe hors de la matière, donc nous avons : a_e < D/2



Figure 3.9 : Cas d'usinage : ae < D/2

• Le cas d'usinage par lequel le centre de l'outil passe dans la matière, mais toujours un contact partiel entre l'outil et la pièce, donc nous avons : D/2 < a_e < D



Figure 3.10 : Cas d'usinage : D/2 < ae < D

• Le cas d'usinage par lequel l'outil passe entièrement dans de la matière, donc nous avons : $\mathbf{a}_e = \mathbf{D}$.



Figure.3.11 : Cas d'usinage : ae = D

3.3.2. Formulation du modèle d'effort de coupe :

La variation des forces de contact outil/matériau est proportionnelle à : la géométrie de l'outil, les spécifications de la matière usinée et les paramètres de coupe.

Les forces de coupe tangentielles dFt, radiales dFr, et axiales dFa indiquées dans la figure 3.8b appliquées au j^{ème} segment de dent du k^{ème} disque (figure 3.8a), peuvent être écrites comme [114] :

K_{tc}, K_{rc}, et K_{ac} sont les coefficients des forces de coupe spécifiques dans les directions tangentielle, radiale et axiale, respectivement. K_{te}, K_{re}, et K_{ae} sont les coefficients des efforts de coupe pour chaque arête, respectivement.

Selon la référence (O, x, y, z), les forces de coupe élémentaires peuvent être écrites comme suit :

$$\begin{bmatrix} dF_{x,j}(\Phi,z) \\ dF_{y,j}(\Phi,z) \\ dF_{z,j}(\Phi,z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \Phi_j(z) & -\sin \Phi_j(z) & 0 \\ \sin \Phi_j(z) & -\cos \Phi_j(z) & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF_{t,j}(\Phi,z) \\ dF_{r,j}(\Phi,z) \\ dF_{a,j}(\Phi,z) \end{bmatrix}$$
(3.6)

Pour les moments de coupe élémentaire :

$$dC_{x,j}(\Phi,z)=0$$

$$dC_{y,j}(\Phi,z)=0$$

$$dC_{z,j}(\Phi,z)=\frac{D}{2} dF_{t,j}(\Phi,z)$$
(3.7)

La résultante des efforts de coupe et des moments de coupe est calculée en additionnant les efforts appliqués à la dent Nt et à tous les disques élémentaires Nd

$$F_{x}(\Phi) = \sum_{k=1}^{N_{d}} \sum_{j=1}^{N_{t}} dF_{x,j}(\Phi, z) F_{y}(\Phi) = \sum_{k=1}^{N_{d}} \sum_{j=1}^{N_{t}} dF_{y,j}(\Phi, z) F_{z}(\Phi) = \sum_{k=1}^{N_{d}} \sum_{j=1}^{N_{t}} dF_{z,j}(\Phi, z) C_{x}(\Phi) = \sum_{k=1}^{N_{d}} \sum_{j=1}^{N_{t}} dC_{x,j}(\Phi, z) C_{y}(\Phi) = \sum_{k=1}^{N_{d}} \sum_{j=1}^{N_{t}} dC_{y,j}(\Phi, z) C_{z}(\Phi) = \sum_{k=1}^{N_{d}} \sum_{j=1}^{N_{t}} dC_{z,j}(\Phi, z)$$
(3.8)



Efforts de coupe dF_t, dF_r, dF_a

Figure 3.12 : Étapes du calcul de l'effort de coupe.

Afin de modéliser la variation des forces de contact outil/matériau requises pour le fraisage, un algorithme est développé dans MATLAB qui combine les équations de l'Eq. 3.1 à Eq. 3.8 permet de prédire les forces de coupe. La figure 3.12 montre une représentation des étapes proposées à suivre pour le calcul de la force de coupe.

3.4. Application et validation du modèle :

Le robot guide la broche fixée à son effecteur final le long d'une ligne droite de 200 mm pour une opération de fraisage d'épaulement sur une pièce de Ti6Al4V. Les caractéristiques de la pièce [115], la géométrie de l'outil et les conditions de coupe [116] sont présentées dans le tableau 3.1.

Caractéristiques de la pièce	Géométrie de l'outil	Condition de coupe
Kt _c =1478 N/mm ²	Diamètre de la fraise D=18.1mm	Vitesse de coupe : v _c =30 m/min
Kr _c =247 N/mm ²	Nombre de dents N _t =4	Avance par dent : fz=0.05 mm/tooth
Ka _c =577 N/mm²	Angle d'hélice β=30 deg	Vitesse de rotation : Ω =527.6 tr/min
Kt _e =24 N/mm		Vitesse d'avance : v _a =105.5 mm/min
Kr _e =43 N/mm		Profondeur de passe : a_p =5.08 mm
Ka _e =0 N/mm		Profondeur radial : $a_e=9.05 \text{ mm}$

Tableau 3.1 : Paramètres d'usinage utilisés lors de simulation.

Tout d'abord, concentrons-nous sur la prédiction des forces de coupe requises pour le processus d'usinage sélectionné, puis nous examinerons les décalages entre les trajectoires souhaitées et enfin entre celles obtenues après l'intégration de la flexibilité des articulations.



Figure 3.13 : Effort de coupe correspondant à un tour d'outil : (a) modèle utilisé ; (b) référence [116].

Pour évaluer la précision du modèle de force utilisé, les résultats simulés seront comparés au modèle de référence [116]. Les forces de coupe sont calculées pour une plage de rotation de l'outil de 0° à 360° (figure 3.13a), ainsi qu'une Illustration partielle de 0.02 min pendant la période l'usinage (figure 3.14).

Sur la base des conditions d'usinage indiquées dans le tableau 3, les forces de coupe résultantes le long des axes X, Y et Z sont les suivantes : une force latérale moyenne d'environ Fy= 115,5346 N, une force dans le sens de l'avance de Fx= - 383,1733 N, et une force Fz= - 86,6818 N.

Les courbes de force de coupe obtenues par simulation sont identiques à celles de référence. Par conséquent, on peut dire que le modèle de prédiction est fiable.



Figure 3.14 : Illustration partielle de la variation de l'effort de coupe pendant l'usinage.

Le contact périodique des dents de l'outil de coupe pendant le fraisage provoque une discontinuité du contact outil/matière, ce qui entraîne une variation de l'effort de coupe, comme l'illustrent les figures (3.13, 3.14).

Les opérations de fraisage ascendant avec contact partiel entre l'outil et le matériau sont celles qui provoquent un effort de coupe maximale dans la direction transversale Fy et un effort moyen dans la direction axiale opposée (l'axe d'avance Fx).

Selon les caractéristiques de la pièce, l'effort de coupe dans la direction radiale est relativement nul (axe d'appui Fz), ceci s'explique par le fait que l'enlèvement de matière dans ce type d'opérations nécessite la présence d'efforts de coupe uniquement dans le plan d'usinage et ne nécessite donc pas d'effort d'appui.

L'adaptation de la matrice d'orientation décrite dans l'équation 3.6 selon les différents plans d'usinage (XY, XZ, YZ) nous permet de trouver les efforts de coupe nécessaires pour chaque direction dans chaque plan d'usinage :



Figure 3.15 : Efforts de coupe calculés sur le plan XY : a) direction 'X', b) direction



Figure 3.16 : Efforts de coupe calculés sur le plan XZ : a) direction 'X', b) direction



Figure 3.17 Efforts de coupe calculés sur le plan YZ : a) direction 'Y', b) direction 'Z'

3.5 Conclusion :

Nous proposons un modèle d'effort de coupe pour les procédés d'usinage basés sur l'approche de [39]. L'objectif principal de ce chapitre est de chercher et d'adapter des modèles d'effort pour qu'ils soient exploitables pour prédire des erreurs de positionnement du robot lors de l'usinage robotisé. Le modèle proposé nous permet de calculer les efforts en fonction des conditions de coupe de fraisage. De plus, cela nous aide à analyser plus facilement l'influence des différents paramètres du procédé.

L'objectif principal de ce chapitre était la mise en place d'un modèle permettant la simulation, l'analyse de procédé d'usinage. Dans la première partie, nous avons présenté des notions sur le procédé traité et les différents paramètres nécessaires pour modéliser ce procédé. La deuxième partie présente le modèle suivi pour la prédiction des efforts de coupe nécessaires en fonction de la géométrie de l'outil, les paramètres de coupe et les caractéristiques de la pièce à usiner. L'opération d'usinage considérée dans ce travail consiste en un détourage d'une pièce en Ti₆Al₄V. Par la suite, nous avons comparé les résultats de modèle d'effort avec certains résultats expérimentaux.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons le modèle suivi pour prédire la déviation de l'outil de sa trajectoire, ainsi que le simulateur proposé pour visualiser la description physique du robot et la perturbation de la trajectoire de l'outil lors de l'opération de détourage (shoulder milling operation).

CHAPITRE 4

PREDICTION ET SIMULATION DE TRAJECTOIRE DU ROBOT

4.1 Introduction :

Pour simuler dynamiquement les procédés robotisés avec un contrôle optimal pendant la programmation hors ligne, il est nécessaire de mettre en œuvre un outil de simulation aussi précis que possible et capable de déterminer le comportement du robot pendant son fonctionnement. Le choix d'un outil logiciel permettant d'identifier le plus précisément possible le comportement du robot est le sujet de ce chapitre. L'objectif est d'améliorer la qualité globale et la rapidité du processus de maintenance robotique.

Dans la première section du présent chapitre, un ensemble des simulateurs physiques d'environnement robotique existant, y compris les simulateurs fournis par les constructeurs des robots industriels, les simulateurs destinés à la robotique, ainsi que les logiciels de CAO des systèmes multi-corps.

Ensuite, l'outil de simulation, dont la fonctionnalité bien détaillée, sera présenté dans le cadre de cette thèse ; puis sa fiabilité sera vérifiée par la suite.

Une application de fraisage d'épaulement sera effectuée en intégrant les équations du chapitre 2, pour prédire la déformation correspondante aux conditions de travail choisi dans cette section. Les résultats obtenus seront intégrés dans l'outil de simulation proposé, afin d'illustrer les perturbations de trajectoire d'usinage la plus précisément possible.

Enfin, pour vérifier la validité de l'outil proposé, une comparaison du modèle mathématique utilisé dans le chapitre 2, et les résultats du simulateur seront donnés avec des références.

4.2 Simulation des systèmes robotiques :

Les simulateurs de robots permettent la programmation hors ligne des robots. Ils permettent de tester les programmes ou les trajectoires des robots sans perturber la production ni endommager le robot. Cette section présente certaines des simulateurs robotiques les plus populaires.

4.2.1 Simulateurs de constructeurs des robots :

KUKA.Sim (KUKA) : le KUKA.Sim permet de faire des simulations aux applications robotisées avant l'installation et la mise en service ; il permet de représenter, analyser et optimiser les déplacements du robot hors ligne. Des fonctions tels que le test d'accessibilité et la détection de collisions confirment la réalisabilité des programmes de robots et les modèles de cellules de travail. La simulation numérique garantit une sécurité de planification des processus de fabrication tout en maintenant des coûts et travaux minimum [117].

RobotStudio (ABB) : RobotStudio[®] est l'outil de programmation et de simulation hors ligne le plus populaire au monde pour les applications robotiques. Il permet de voir en simulation le même comportement du robot en réel permettant de construire, tester et d'affiner l'installation robotique dans un environnement virtuel ; il permet donc d'accélérer considérablement le temps de mise en service et la productivité [118].

RoboGuide (FANUC) : RoboGuide simule les commandes de mouvements et d'application du robot et réduit sensiblement le temps nécessaire pour créer de nouvelles configurations de mouvements. Pour garantir un minimum d'impact sur la production, les cellules peuvent être conçues, testées et modifiées entièrement hors ligne. Les modèles de pièces peuvent être importés à partir de données CAO. Il possède aussi une vaste bibliothèque permet aux utilisateurs de sélectionner et de modifier les pièces et les dimensions selon leurs besoins. Intuitif, il ne requiert qu'une formation minime (voire aucune) pour être utilisé [119].

Robotics Suite (Stäubli) : Robotics Suite est un vaste environnement logiciel pour PC qui simplifie la gestion du système robotisé. Il permet d'améliorer facilement et en permanence les applications robotiques. Il guide l'utilisateur clairement à travers le processus de simulation, de développement et de débogage des programmes robotiques jusqu'à la validation finale et le transfert de toutes les données du système. On dit que sa polyvalence a fait de lui l'outil intelligent et idéal de production [120].

4.2.2 Simulateurs pour la robotique :

Gazebo : l'un des simulateurs open-source les plus connus. Il est combiné dans sa bibliothèque une grande variété de robots sous le format SDF, et un large éventail d'objets et de capteurs, par lequel il peut générer les données issues de simulation. Des plugins peuvent être utilisés pour contrôler les robots, les capteurs ou l'environnement [121].

RoboDK : est un logiciel dédié aux robots industriels. Il permet la programmation et simulation de ces derniers. Il contient une large bibliothèque de modèles CAO, intuitifs et faciles d'utilisation. Il permet de visualiser le comportement des robots. Il est doté aussi d'un module qui permet d'améliorer la précision en calibrant le robot. Les programmes sont, par la suite, exportable au robot grâce au module "RoboDK Post Processors" [122].

Webots : offre un environnement de modélisation, programmation et simulation de robots. Il possède une interface simple qui permet de "modifier' l'environnement de travail et l'architecture des robots (objets, moteurs, capteurs, etc.) ainsi qu'une large bibliothèque ; il donne la possibilité d'être une interface avec un logiciel tierce via une communication TCP/IP [123].

CoppeliaSim : Le simulateur de robot CoppeliaSim et son environnement de développement intégré sont basés sur une architecture de contrôle distribué. Chaque objet/modèle peut être contrôlé individuellement via des scripts intégrés, des plugins, des nœuds ROS, des clients API distants ou des solutions personnalisées. Cela rend CoppeliaSim polyvalent et idéal pour les applications multi-robots. CoppeliaSim est utilisé pour le développement rapide d'algorithmes, la simulation d'automatisation d'usine, le prototypage et la validation rapides, l'enseignement de la robotique et la surveillance à distance, etc [124].

4.2.3 CAO des systèmes multi-corps :

Msc ADAMS : est un logiciel de dynamique multi-corps (MBD). Il améliore l'efficacité de l'ingénierie et réduit les coûts de développement des produits en permettant une validation précoce de la conception au niveau du système. Les ingénieurs peuvent évaluer et gérer les interactions complexes des mouvements, structures, l'actionnement et les commandes, afin d'optimiser la conception des

produits en termes de performance, de sécurité et de confort. Adams exécute des dynamiques non linéaires bien plus rapidement que les solutions FEA. Les charges et forces calculées par les simulations Adams améliorent la précision de la FEA en fournissant une meilleure évaluation de leur variation dans une gamme complète de mouvements et d'environnements d'exploitation [125].

CATIA : CATIA permet de modéliser n'importe quel produit en fonction de son comportement réel. Porté par la plate-forme 3DEXPERIENCE de Dassault Systèmes, il offre un environnement de conception social reposant sur une source fiable et unique, accessible via de puissants tableaux de bord 3D qui aident à la décision, une expérience 3D intuitive, avec des fonctionnalités de modélisation et de simulation 3D, et une plate-forme de développement de produit global, facilement intégrable aux processus et aux outils existants. Plusieurs disciplines [126].

Simscape multi-corps : Simscape Multibody (anciennement SimMechanics[™]) fournit un environnement de simulation multi-corps pour les systèmes mécaniques 3D, tels que les robots, les suspensions de véhicules, les équipements de construction et les trains d'atterrissage des avions. Des systèmes multi-corps peuvent être modélisés à l'aide de blocs représentant des corps, des articulations, des contraintes, des éléments de force et des capteurs. Il permet d'importer des assemblages CAO complets. Une animation 3D générée automatiquement permet de visualiser la dynamique du système. Simscape Multibody aide à développer des systèmes de contrôle et à tester les performances au niveau du système. Vous pouvez paramétrer vos modèles à l'aide de variables et d'expressions MATLAB[®], et concevoir des systèmes de commande pour les systèmes multicorps dans Simulink[®]. Les systèmes hydrauliques, électriques, pneumatiques et autres systèmes physiques peuvent être intégrés dans le modèle à l'aide de composants de la famille de produits Simscape[™] [127].

Openmodelica : est un environnement de modélisation et de simulation open-source basé et destiné à un usage industriel et académique. Un article de synthèse est disponible ainsi que des diapositives sur Modelica et OpenModelica. L'objectif de l'effort OpenModelica est de créer un environnement Open Source complet de modélisation, de compilation et de simulation Modelica basé sur un logiciel libre distribué sous forme de code binaire et source pour la recherche, l'enseignement et l'utilisation industrielle [128].

4.3 Description de simulateur :

Afin de combiner des éléments d'étude de mouvements avec des contraintes de calcul, en tenant compte des propriétés des matériaux, de la masse, des contraintes, de l'inertie et du contact des composants, l'outil proposé "Analyse de mouvement", un sous-outil "étude de mouvement" du logiciel SolidWorks, est le choix optimal. La figure 4.1 illustre une représentation schématique de la solution proposée pour une étude de mouvements très précise [129].



Figure 4.1 : Schéma fonctionnel de l'outil de simulation choisi.

Afin de suivre la trajectoire et d'évaluer le comportement du robot pendant l'usinage, l'outil "Analyse de mouvement" permet de :

 tracer avec précision plusieurs résultats de simulation sous forme de graphique ou d'exportation sous forme de fichier "csv" : positions, vitesses, accélérations, et autres résultats fournis par les outils mentionnés.

 simuler et analyser le mouvement d'un assemblage avec précision, ainsi que d'incorporer les effets des éléments d'étude du mouvement (forces, ressorts, amortisseurs et frictions).

4.3.1 Fonctionnement du simulateur :

L'objectif est de faciliter la compréhension et de rendre plus rentable la programmation hors ligne des robots industriels. La solution proposée est simple et est basée sur la compréhension de l'outil de mouvement SolidWorks dont les avantages remarquables sont :

 Programmer des trajectoires et modifier certains paramètres du robot pour obtenir des solutions optimales, fiables et réalistes, • Et, d'autre part, minimiser le coût de maintenance par rapport aux tests directs sur les robots industriels.



Figure 4.2 : Corps du robot

Dans cette section, nous résumons les étapes nécessaires pour utiliser facilement notre proposition :

• Assemblage des pièces : Cette étape concerne l'assemblage des pièces du robot (Figure 4.2) en tenant compte des contraintes nécessaires pour assurer le bon fonctionnement du simulateur.

• *Mouvement SolidWorks :* Dans cette étape, l'activation de l'outil SolidWorks motion est nécessaire pour que la simulation fonctionne sur le type "analyse de mouvement".

<u> </u>	loteur	¢
~ 3	×	
Туре о	le moteur	^
U	Moteur circulaire	
Þ	Moteur linéaire (actionneur)	
s	Moteur avec contrainte de trajectoire	
Contra	ainte/Direction	^
\$		
$\sum_{i=1}^{n}$		
4		
Mouv	ement	^
	Vitesse constante	\sim
\odot	60mm/s	\$

Figure 4.3 : Choix du moteur

• Ajout de moteurs : Il permet de déplacer un composant comme s'il était activé par un moteur. SolidWorks fournit trois types de moteurs (Figure 4.3) : circulaire, linéaire (actionneur) et le troisième type que nous avons choisi pour la démonstration est un moteur avec contrainte (Figure 4.4). Nous considérons la trajectoire de traçage comme une contrainte et la vitesse d'avance comme une donnée d'entrée.



Figure 4.4 : Emplacement choisi pour le moteur

• *Calculateur :* Cette étape permet, à la fois, de lancer les calculs nécessaires et de simuler dynamiquement le robot en fonction des contraintes de montage ou de mouvement (Figure 4.5).



Figure 4.5 : Calcul du robot et simulation dynamique

• *Résultats et graphiques :* L'outil proposé fournit une dizaine de résultats associés à l'étude du mouvement calculé.

4.3.2 Vérification de fiabilité de simulateur :

L'utilisation d'un robot est nécessaire dans l'opération de traçage pour guider l'outil fixé sur son organe terminal, le long d'une trajectoire rectiligne à une vitesse qui augmente pour atteindre la vitesse d'avance souhaitée et la maintenir constante jusqu'à la fin de la trajectoire. L'organe terminal garde une orientation fixe par rapport au plan horizontal (x0, y0) [130]. Les paramètres du traçage robotisé sont indiqués sur le tableau 4.1.

Paramètres	Values	Unité
Type de trajectoire	Rectiligne	/
Position de départ (P ₀)	[0.5;-0.25]	m
Vitesse d'avance (V _a)	0.06	m/s
Temps final (T _f)	8	S

Tableau 4.1 : Paramètres souhaités de l'application de traçage

La section des résultats se concentre sur la présentation graphique des résultats de la modélisation précédente dans Matlab, telles que : les positions (Figure 4.6), les vitesses (Figure 4.7) et les accélérations articulaires du robot (Figure 4.8) nécessaires pour effectuer l'opération souhaitée.



Figure 4.6 : Position de l'articulation calculée par Matlab



Figure 4.7 : Vitesse des articulations calculées par Matlab



Figure 4.8 : Accélération articulaire calculée par Matlab

Les mêmes conditions du tableau 4.1 sont appliquées au simulateur afin de comparer les résultats simulés avec les résultats obtenus par Matlab en vue d'illustrer l'intérêt industriel du simulateur.

Les figures (Figure 4.9, Figure 4.10 et Figure 4.11) représentent respectivement les positions, vitesses et accélérations articulaires simulées.



Figure.4.9 : Positions articulaires simulées par SolidWorks



Figure 4.10 : Vitesses articulaires simulées par SolidWorks



Figure 4.11 : Accélérations articulaires simulées par SolidWorks

Nous remarquons que les résultats sont identiques à ceux de Matlab. Nous pouvons dire que l'outil de simulation proposé est précis et montre la réalité avec une bonne fiabilité.

4.4 Application au fraisage de l'épaulement :

Une fois les programmes disponibles, le robot initialisé et les paramètres de coupe établis, l'environnement d'analyse de mouvement du logiciel SolidWorks® est utilisé pour simuler la trajectoire du robot lors d'une opération de fraisage d'épaulement sur un matériau Ti6Al4V [129].

Le robot commence à se déplacer le long de l'axe X0 avec une avance progressive jusqu'à ce qu'il atteigne la vitesse d'avance souhaitée. Il convient de noter que l'outil conserve une orientation fixe par rapport au plan de travail X0Y0 (figure 4.12).



Figure 4.12 : Fraisage robotisé : (a) configuration initiale et finale du robot, (b) aperçu de l'outil de coupe

N° Articulation	1	2	3	4	5	6
Position (°)	80.41 [°]	-88.40°	-125.00 [°]	168.55 [°]	57.13 [°]	-173.73°

Tableau 4.2 : Positions initiales des articulations dans la référence géométrique

La configuration du robot présentée dans le tableau 4.2 a été choisie pendant l'opération d'usinage pour éviter les positions singulières, les limites des actionneurs et pour assurer un mouvement continu et régulier des articulations (sensibilités).

L'analyse de ces résultats révèle des erreurs articulaires (figure 4.13) ainsi que d'autres erreurs opérationnelles (figure 4.14 et figure 4.15).



Figure 4.13 : Erreurs articulaires pendant l'usinage.
Selon la figure 4.13, des écarts par rapport aux positions souhaitées des articulations 1, 4 et 5 sont observés, en particulier lorsque l'outil de coupe entre dans la pièce à t=0,3 min et en sort à t=1,6 min, tandis que les écarts des articulations 2, 3 et 6 sont ignorés.

Contrairement aux articulations 1, 4 et 5, qui nécessitaient des configurations variables et donc des écarts de position critiques, la configuration du robot choisie pour les articulations 2, 3 et 6 est restée constante, ce qui a entraîné une erreur minimale (presque aucun écart). Cela prouve que les forces de coupe générées et la configuration du robot utilisée pendant le processus de fraisage entraînent un décalage entre les positions programmées et réelles de l'effecteur final.



Figure 4.14 : Erreurs de position cartésienne pendant l'usinage.



Figure 4.15 : Erreurs d'orientation cartésienne pendant l'usinage.

Le décalage de la position cartésienne est clairement visible sur la figure 4.14, notamment dans le plan de travail XY. Tant que le contact outil/matière existe, l'écart de la position dans la direction de coupe Px reste constant (environ 0,75 mm au maximum), alors que l'écart de la position dans la direction latérale Py augmente (environ 0,1 - 0,75 mm, et plus), à mesure que la position de la trajectoire s'éloigne du repère de référence R0.

Le fait que la force d'appui Fz soit appliquée verticalement sur la pièce, l'effecteur est chargé en compression, et donc la déviation de position de l'axe Z est négligeable (presque nulle).

D'après la figure 4.15, l'écart d'orientation cartésienne est négligeable (<1°). Cela est dû à l'opération de fraisage qui maintient une orientation fixe sur le plan de travail XY pendant l'usinage.



Figure 4.16 : Trajectoire souhaitée (vert) et obtenue (rouge) dans le processus d'usinage

Nous constatons un décalage notable entre la trajectoire programmée et la trajectoire réelle, notamment sur le plan de travail XY (figure 16), ainsi qu'une moyenne de 0,5 mm dans la direction Y0 (perpendiculaire à la trajectoire d'usinage), et une forte perturbation lorsque l'outil de coupe pénètre dans la matière à x=0,05 m et en sort à x=0,25 m, en raison de l'effort transversal Fy et de la force dans la direction d'avance Fx, qui crée une flexion déviée pendant le processus d'usinage. Cela prouve que les forces outil/matériau affectent le robot et le font dévier de sa trajectoire.



Figure 4.17 : Trajectoire TCP obtenue par le simulateur proposé.

La trajectoire du point central de l'outil obtenue par le simulateur proposé est représentée sur la figure 4.17. Par rapport à la figure 4.16, les perturbations et les déviations de la trajectoire sont plus visibles dans ce type d'illustration.

4.5 Validation

La méthode proposée pour prédire les erreurs de trajectoire en présence d'une interaction avec l'environnement a été testée ; ses résultats ont été comparés à ceux des références [131] qui utilisent une méthode de commande basée sur un observateur non linéaire, et [132] qui implique le développement d'un simulateur du processus du robot sous Matlab/Simulink. Les résultats de ce dernier ont été validés par des expériences. Le but de cette comparaison est de valider la méthode actuelle dans un premier temps, et de montrer qu'elle est applicable à différentes architectures de robots.

Les résultats des trajectoires obtenues par chaque méthode sont présentés dans les figures (4.18 a), (4.18 b), (4.19 a), et (4.19 b), respectivement.

L'analyse des résultats, dans cette section, révèle que pour les robots dont les axes d'articulation sont parallèles (en particulier l'axe Z), comme c'est le cas pour les robots de type SCARA présentés dans la figure 4.18, la déviation de l'outil par rapport à sa trajectoire passe par deux transitions. L'erreur de positionnement devient nulle à un moment donné du processus d'usinage. L'apparition de la déviation est justifiée par le fait que les configurations du robot représentées dans l'espace d'articulation par une courbe linéaire pour les positions de q1 et une courbe de forme parabolique pour les positions de q2 entraînent une erreur linéaire courbe dans l'espace de tâche en raison de la relation entre les deux espaces. Ceci est confirmé par les résultats de validation représentés sur les figures (4.18a, 4.18b).

Pour les robots dont les axes de ces articulations (en particulier l'axe Z), comme dans le cas des robots de type anthropomorphe traités dans la figure 4.16, la déviation de l'outil par rapport à sa trajectoire augmente progressivement tout au long de l'usinage, comme le confirment les résultats de cet article (figure 4.16) et les résultats de validation de la figure 4.19.

En plus des causes de déviation de la trajectoire de l'effecteur final mentionnées dans la section 4.4, nous pouvons retenir que : l'architecture du robot (SCARA, anthropomorphique, etc.) et l'orientation de l'outil affectent la trajectoire du robot.



Figure 4.18 : Résultats pour le robot planaire à deux DOF : (a) méthode proposée ; (b) référence [131].



Figure 4.19 : Résultats pour le robot à six DOF : (a) méthode proposée ; (b) référence [132].

Comparés aux références, ces résultats sont considérés comme avantageux et fiables. En particulier, si les forces de contact avec l'environnement et le type de commande du robot choisi sont considérées comme les principales sources de déviation du robot par rapport à sa trajectoire, et si toutes les autres sources d'erreur sont ignorées. Il est conclu que les forces de contact représentent environ 80 % de la déviation totale du robot pendant le travail, tandis que le type de commande sélectionné représente environ 20 % de la déviation totale.

4.6 Conclusion :

On tenir compte de l'effet des forces de contact sur la précision du suivi de trajectoire programmé, le robot simulé a été rendu flexible en incorporant un modèle élasto-statique au niveau des articulations. L'analyse des résultats a révélé que les forces de contact outil/matériau sont la cause principale de la déviation du robot par rapport à sa trajectoire. Cette erreur varie en fonction de l'architecture du robot et de l'emplacement de la pièce, et elle augmente à mesure que l'on s'éloigne du repère de référence.

Lorsque nous comparons les erreurs des deux architectures, il apparaît clairement que les robots à axes parallèles sont plus précis que les robots à axes concourants.

Le simulateur proposé n'est pas seulement un outil polyvalent, mais il permet également de réaliser des études de faisabilité, de programmer hors ligne, de générer en temps réel des animations 3D de systèmes multi-corps, d'éviter les singularités et les obstacles, de prédire avec précision la position du robot et la trajectoire optimale de l'effecteur final.

Une méthode proposée dans le chapitre suivant nous a permis de minimiser le décalage qui se produit entre la trajectoire réelle et la trajectoire souhaitée. Cela permettra d'améliorer la programmation hors ligne et de rendre ses tâches plus réalistes.

CHAPITRE 5

MINIMISATION DE L'ERREUR DE POSITIONNEMENT DU ROBOT PAR LES TECHNIQUES D'OPTIMISATION

5.1 Introduction :

Afin d'améliorer la précision du robot et de minimiser l'erreur de positionnement de l'effecteur final pendant l'opération de fraisage, des techniques d'optimisation avec des fonctions objectives originales basées sur l'algorithme génétique mono et multi-objectif, seront présentées et comparées.

La technique d'optimisation mono-objective nous permet de minimiser l'erreur de positionnement global ΔP pendant l'usinage, tandis que la technique multi-objective a pour but de corriger l'erreur de positionnement dans les différents directions d'usinage Δx , Δy et Δz

La fiabilité de chaque technique doit être testée. Pour atteindre cet objectif, l'erreur de positionnement de deux architectures différentes du robot sera minimisée par les deux techniques. Nous notons que chaque architecture possède des variables de décisions différentes. Les résultats de cette partie nous permettent de prédire avec précision la quantité d'erreurs de positionnement de l'effecteur final dans les tâches nécessitant une interaction avec l'environnement.

5.2 Méthode d'optimisation des erreurs de positionnement :

Afin de bénéficier d'une mise en œuvre facile et de résultats efficaces pour des problèmes multidimensionnels, l'algorithme génétique est l'une des techniques d'optimisation les plus connues et utilisées dans divers domaines [133]. L'objectif de cette étude est de trouver la configuration optimale du robot qui servira à minimiser l'erreur de positionnement de l'effecteur final. Dans cette section, deux solutions sont proposées ; la première permet de minimiser l'erreur de positionnement global de l'effecteur final en utilisant l'algorithme génétique mono-objectif, et la seconde solution permet de minimiser cette erreur dans les deux directions du plan XY en utilisant l'algorithme génétique multi-objectif.



Figure 5.1 : Organigramme de l'algorithme génétique utilisé

5.2.1 Optimisation mono-objectif à l'aide d'algorithme génétique :

Le solveur GA de la boîte à outils d'optimisation de MATLAB fonctionne par étapes séquentielles. L'identification du problème nécessite la définition de deux propriétés critiques : le problème de minimisation via la " fonction de fitness " et le nombre de variables appelées " variables de décision ". La combinaison de ces deux propriétés dans un programme (fichier file.m), ainsi que les équations énumérées dans la présente section, nous permettent de déterminer les meilleures configurations " ϕ " du porte-outil de la broche afin d'obtenir un minimum d'erreurs pendant l'usinage.

En ce qui concerne les contraintes de cette boîte à outils, il faut inclure toutes les limites inférieures et supérieures des articulations du robot pour obtenir les résultats les plus précis possibles. L'exécution du solveur lance le processus d'optimisation. Après le calcul, le solveur affiche l'état, les résultats et la raison de la fin du calcul. Il est également possible de reproduire les résultats précédents en cochant la case Pseudo Random Numbers are seeded. La boîte à outils d'optimisation de MATLAB offre la possibilité de spécifier des paramètres spécifiques de l'AG tels que la taille de la population, la sélection, la mutation et le croisement, sinon le solveur utilise les valeurs par défaut.

La fonction objective proposée pour cette technique :

$$\Delta P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}$$
(5.1)

L'organigramme pour la sélection de ϕ_0 et ϕ_f pour trouver la trajectoire de ϕ pour les ΔP_{min} ou ΔP_{max} est décrit dans la figure 5.1.

5.2.2 Optimisation multi-objectifs à l'aide d'un algorithme génétique :

Un autre objectif de cette recherche est de déterminer les ensembles les plus prometteurs de variables de décision (φ_0 , φ_f) en vue d'obtenir les solutions optimales possibles. Contrairement au solveur précédent, la recherche d'une erreur minimale dans les deux directions du plan de travail Δx et Δy est l'objectif de cette section. Dans ce cas, nous parlons d'optimisation multi-objective. Pour réaliser ces optimisations, les fonctions objectives proposées F1 et F2 sont :

$$F1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} |\Delta x_i|$$
(5.2)

$$F2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} |\Delta y_i|$$
(5.3)

Les étapes du fonctionnement du solveur multi-objectif sont identiques à celles du solveur GA. Contrairement aux résultats du solveur GA, lorsque le solveur multiobjectif termine sa simulation, l'interface MATLAB Toolbox affiche deux résultats spécifiques :

- Un tableau regroupant les différentes variables optimales possibles (ϕ_0 , ϕ_f) et leurs solutions (F1, F2).

- Une illustration du front de Pareto optimal (figure 5.2) qui aide l'utilisateur à trouver un compromis entre les différentes fonctions objectives (F1, F2).

Le choix de la meilleure solution dépend des contraintes ou des exigences spécifiques incluses.



Figure 5.2 : Solutions du front de Pareto pour les deux fonctions objectives (F1, F2)

5.3 Optimisation d'erreur du robot plan redondant à 3 ddl :

Après avoir obtenu les programmes et suivi les méthodes nécessaires de cette étude, ainsi qu'après avoir fourni les conditions de coupe pour l'usinage d'une pièce en Ti6AI4V, l'interface graphique du logiciel MATLAB doit illustrer la trajectoire optimale suivie par l'effecteur du robot qui minimise l'erreur de positionnement [134].

La redondance élargit l'espace de travail du robot et facilite le mouvement des effecteurs en présence d'obstacles. Le modèle géométrique direct présente une variété de solutions (configurations) dans l'espace articulaire correspondant à la même trajectoire dans l'espace cartésien, pour les robots à architecture redondante, ce qui est le cas pour le robot planaire à trois DOF. Sur la base de cette propriété, le robot peut également satisfaire divers critères d'optimisation.



Figure 5.3 : Robot plan redondant a 3 ddl

5.3.1 Configuration du robot :

Le robot commence à se déplacer le long de l'axe Y_0 à une vitesse progressive jusqu'à atteindre la vitesse d'avance souhaitée. Il convient de noter que l'outil conserve une orientation fixe et reste horizontal par rapport à l'axe X_0Y_0 .



Figure 5.4 : Définition des intervalles de ϕ_0 et ϕ_f géométriquement

Pour définir les limites physiques au début et à la fin de la ligne droite du porteoutil de l'effecteur final, on utilise l'approche géométrique qui détermine l'intervalle de ϕ_0 (figure 5.4a) et ϕ_f (figure 5.4b) de manière graphique. Ces limites seront considérées comme des variables de décision pour les fonctions objectives proposées. Finalement, les limites " ϕ " obtenues sont les suivantes :

$$\phi_0 \in [-64.258^{\circ}, 101.168^{\circ}]; \phi_f \in [-38.8^{\circ}, 98.92^{\circ}].$$

j	σ	α _j [°]	d _j [m]	r _j [m]	q _j [°]
1	0	0	0	0	q ₁
2	0	0	L ₁ =0.40	0	q ₂
3	0	0	L ₂ =0.25	0	q_3
t	0	0	L ₃ =0.25	0	0

Les paramètres de DHM du robot planaire à trois axes sont écrits dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5.1 : Paramètres de Denavit-Hartenberg modifié du robot à 3 ddl

Le tableau 5.1 nous permet d'écrire la matrice de transformation T_j^{j-1} définissant la référence O_j dans la référence O_{j-1} .

La multiplication de T_j^{j-1} relative à chaque articulation, nous permet de calculer le modèle géométrique :

$$P_{x}=L_{1}\cos(q_{1})+L_{2}\cos(q_{1}+q_{2})+L_{3}\cos(q_{1}+q_{2}+q_{3})$$

$$P_{y}=L_{1}\sin(q_{1})+L_{2}\sin(q_{1}+q_{2})+L_{3}\sin(q_{1}+q_{2}+q_{3})$$

$$\phi=q_{1}+q_{2}+q_{3}$$
(5.4)

Sur la base de la $\varphi(0)=\varphi_0$ initiale et de l'orientation finale $\varphi(t_f)=\varphi_f$ du porte-outil du robot, l'angle φ peut être écrit comme une interpolation polynomiale du troisième degré :

$$\varphi(t) = \varphi_0 + (\varphi_f - \varphi_0) \frac{3t^2}{t_f^2} - (\varphi_f - \varphi_0) \frac{2t^3}{t_f^3}$$
(5.5)

La connaissance de la configuration du robot est nécessaire pour la prédiction de l'erreur de positionnement pendant le fraisage. À cette fin, la méthode de Paul [103] est le choix idéal pour déterminer les positions des articulations q_1 , q_2 et q_3 qui décrivent cette configuration.

$$\cos(q_{2}) = (P_{x}^{2} + P_{y}^{2} + L_{3}^{2} - L_{1}^{2} - L_{2}^{2} - 2P_{x}L_{3}\cos(\varphi) - 2P_{y}L_{3}\sin(\varphi)/2L_{1}L_{2}$$

$$\sin(q_{2}) = \pm \sqrt{1 - \cos(q_{2})^{2}}$$
(5.6)

$$q_{2}=atan2(sin(q_{2}), cos(q_{2}))$$

$$sin(q_{1}) = P_{y}(L_{1} + L_{2}cos(q_{2})) - sin(q_{2})(P_{x}L_{2} + L_{1}L_{3})$$

$$cos(q_{1}) = P_{x}(L_{1} + L_{2}cos(q_{2})) + sin(q_{2})(P_{y}L_{2} + L_{1}L_{3})$$

$$q_{1}=atan2(sin(q_{1}), cos(q_{1}))$$

$$q_{3}=\varphi(q_{1}+q_{2})$$
(5.8)

La matrice jacobéenne J(q) du robot est donnée par :

$$J(q) = \begin{bmatrix} -L_1 \sin(q_1) - L_2 \sin(q_1 + q_2) - L_3 \sin(\varphi) & -L_2 \sin(q_1 + q_2) - L_3 \sin(\varphi) & -L_3 \sin(\varphi) \\ L_1 \cos(q_1) + L_2 \cos(q_1 + q_2) + L_3 \cos(\varphi) & L_2 \cos(q_1 + q_2) + L_3 \cos(\varphi) & L_3 \cos(\varphi) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$
(5.9)



Figure 5.5 : Flexibilités articulaires du robot 3R plan

Dans cette section, nous supposons que les liaisons du robot sont rigides et que seuls les axes du moteur présentent une rigidité en torsion. Nous parlons alors de flexibilités localisées dans les articulations (figure 5.5).

Le développement des présentes équations ainsi que les équations de modèle de déformation de la section 2. 6 nous a permis d'obtenir les fonctions objectives nécessaires pour la minimisation de l'erreur de positionnement ΔP :

$$\Delta \mathsf{P} = \mathsf{J}(\mathsf{q}) \ (\mathsf{K}_{\theta} - \mathsf{K}_{\mathsf{c}})^{-1} \ \mathsf{J}^{\mathsf{T}}(\mathsf{q}) \ \mathsf{F}_{\mathsf{e}}$$
(5.10)

Nous notons que les termes Δx et Δy de l'équation (5.1-5.3) sont calculés comme suit :

$$\Delta x = \Delta P(1, :) \tag{5.11}$$

$$\Delta \mathbf{y} = \Delta \mathbf{P}(2,:) \tag{5.12}$$

j	1	2	3	
K_{θj} [N.m/rad]	3.67 10 ⁶	8.9 10 ⁵	8.9 10 ⁵	

Tableau 5.2 : Éléments de la matrice de rigidité des articulations du robot planaireà trois axes

5.3.2 Application et résultats :

Pour une opération de fraisage d'un épaulement, le robot guide la broche attachée à son effecteur final le long d'une ligne droite de 150 mm, permettant à l'outil de coupe de pénétrer dans le matériau à une profondeur a_p avec une vitesse d'avance v_a. La géométrie de l'outil et les conditions de coupe utilisées dans cette étude sont présentées dans le tableau 5.3.

Tool Geometry	,	Cutting Conditions		
Cutter diameter [mm] D=20		Cutting speed [m/min]	vc=100.5	
number of teeth Nt=4		feed per tooth [mm/tooth]	fz=0.05	
Helix angle [deg] β=30		spindle speed [rpm]	Ω=1600	
		Feed rate [mm/min]	va=320	
		axial depth [mm]	a _p =2	
		radial depth [mm]	a _e =10	

Tableau 5.3 : Paramètres d'usinage utilisés lors de la simulation

Les forces de coupe résultantes (figure 5.6) le long des axes x et y sont les suivantes : une force latérale moyenne d'environ Fx= -44,2361 N, et une force dans le sens de l'avance de Fy= - 123,2715 N.



Figure 5.6 : Effort de coupe correspondant à un tour d'outil

Les résultats de la simulation du problème étudié sont présentés et discutés, et les performances des deux techniques sont comparées, en utilisant la modélisation des erreurs de positionnement et les techniques d'optimisation proposées.

La boîte à outils d'optimisation MATLAB a également été utilisée pour atteindre l'objectif souhaité, tout en évitant la complexité et en réduisant le temps de programmation et de simulation. Il convient de noter que la simulation des deux techniques sera répétée afin de sélectionner les meilleures valeurs des variables ϕ_0 et ϕ_f .



Figure 5.7 : Solution minimale et variables optimales mono-objectif

La figure (5.7a) montre le tracé minimal de l'erreur de positionnement obtenu par la technique d'optimisation à objectif unique, qui correspond à la " fonction de fitness " de l'équation 16, tandis que la figure (5.7b) montre les ensembles optimaux de la configuration initiale et finale du porte-outil qui ont donné lieu à une déviation cartésienne minimale.

La figure (5.7b) montre que pour les valeurs optimales de ϕ_0 =-50.86° et ϕ_f =-31.68°, une erreur de positionnement minimale d'environ "0,84 mm" est obtenue (figure 7a). Contrairement aux résultats présentés sur la figure (5.7b), l'erreur de positionnement devient maximale (figure 8a) pour les valeurs ϕ_0 =56.63° et ϕ_f =62.37°, soit environ "1,3 mm", comme le montre la figure (5.8b).



Figure 5.8 : Solution maximale et variables optimales mono-objectif

Pour éviter l'encombrement de la démonstration, les figures (5.9a, 5.9b) montrent les configurations des axes neutres des liaisons du robot au début et à la fin de l'usinage, qui correspondent aux variables représentées sur les figures 5.7b et 5.8b et provoquent une erreur de positionnement minimale et maximale, respectivement.





Les configurations initiale et finale du robot représentées sur les figures (5.9, 5.12) montrent que l'erreur de positionnement est minimale (figures 5.9a et 5.12a) lorsque le porte-outil (troisième maillon) tire l'effecteur final pendant l'usinage, ce qui permet d'obtenir un meilleur état de surface. Lorsque le porte-outil pousse l'effecteur final, l'erreur de positionnement est dite maximale (figures 5.9b et 5.12b). Par conséquent, l'état de surface est médiocre.

Sur la figure 5.10, la disparité entre la trajectoire souhaitée (ligne verte) et la trajectoire obtenue (lignes rouge et bleue) est devenue claire. Ceci est dû à la force transversale Fx et à la force dans la direction d'avance Fy pendant le processus d'usinage, qui provoque une flexion déviée. Cela prouve que la force outil/matériau a un effet sur le robot et le fait dévié de sa trajectoire pendant l'usinage.



Figure 5.10 : Trajectoire souhaitée obtenue par la technique mono objectif

Ainsi, la comparaison des deux trajectoires obtenues (les lignes rouges et bleues) révèle une différence entre les déviations cartésiennes min et max, où les valeurs des ensembles optimaux présentés sur la figure 5.7b lorsque φ_0 =-50.86° and φ_f =-31.68° donnent une erreur minimale proche de la trajectoire programmée. Il est possible de dire que la configuration du robot pendant l'usinage a un impact significatif sur la qualité de la trajectoire de suivi.



Figure 5.11 : Front de Pareto des solutions multi-objectives minimales et maximales

Les figures 5.11a et 5.11b représentent le front de Pareto optimal, qui aide l'utilisateur à trouver un compromis entre les différentes fonctions objectives (deux dans ce cas). Comme indiqué précédemment, la technique d'optimisation multi-objective est destinée à optimiser les erreurs de positionnement dans les deux directions du plan d'usinage, et non pas seulement le module d'erreur. Le tableau 5.4 énumère les variables de décision qui satisfont les fonctions objectives de la technique d'optimisation multi-objective F_1^{min} et F_2^{min} .

r				
	F ₁ ^{min} (mm)	F ₂ ^{min} (mm)	φ ₀ (°)	φ _f (°)
1	0.345	0.831	-51,245	23,522
2	0.487	0.815	-52,510	49,578
3	0.281	0.833	-54,304	12,199
4	0.927	0.692	100,790	19,281
5	0.927	0.692	100,791	19,283
6	0.637	0.744	-47,653	93,995
7	0.633	0.749	-48,642	91,785
8	0.859	0.718	100,360	3,471
9	0.558	0.811	-40,630	58,817
10	0.599	0.777	-51,916	77,773
11	0.409	0.825	-53,396	35,068
12	0.830	0.724	100,724	-2,492
13	0.748	0.744	100,175	-19,234
14	0.107	0.833	-54,585	-25,107
15	0.927	0.465	101,081	93,298
16	0.0227	0.845	-38,667	-35,921
17	0.748	0.744	100,177	-19,232
18	0.0662	0.844	-38,587	-28,359

Tableau 5.4 : Résultats de la minimisation multi-objectif



Figure 5.12 : Erreur minimal pour $\phi_0\text{=-}38.67^\circ\text{, }\phi_f\text{=-}35.92^\circ$

Puisque la déviation de la trajectoire d'usinage est causée par l'effet des forces de coupe Fx et Fy, qui introduisent une flexion déviée, l'erreur radiale Δx est plus cruciale que l'erreur axiale Δy . A cet effet la solution N°16 correspond à $F_1^{min} = 0.0227$ mm a été choisie parmi les 18 solutions fournies dans le tableau 5.4. Il est clair que les variables optimales ϕ_0 = -38.667° et ϕ_f = -35.921° donnent la plus faible valeur de F1 (figure 5.12).

	F ₁ ^{max} (mm)	F ₂ ^{max} (mm)	φ ₀ (°)	φ _f (°)
1	1.078	0.677	69,600	72,434
2	0.492	0.867	31,475	-26,041
3	1.020	0.779	56,043	48,704
4	0.433	0.869	24,392	-28,649
5	0.995	0.793	55,053	42,559
6	0.952	0.807	56,165	31,955
7	0.392	0.870	22,435	-33,435
8	1.071	0.712	68,657	62,169
9	0.677	0.858	37,916	-1,7161
10	1.05	0.742	47,947	71,268
11	0.554	0.865	28,984	-13,305
12	0.770	0.846	26,580	23,660
13	0.897	0.827	44,846	29,545
14	0.392	0.870	22,435	-33,435
15	0.862	0.834	43,074	24,615
16	0.721	0.848	51,438	-5,634
17	0.809	0.842	31,461	25,544
18	1.0776	0.677	69,600	72,434

Tableau 5.5 : Résultats de la maximisation multi-objectif



Figure 5.13 : Erreur maximale pour $\phi_0\text{=}69.6^\circ,\,\phi_f\text{=}72.43^\circ$

De même, l'exécution de la simulation pour obtenir les variables qui donnent une erreur maximale donne 18 solutions, comme le montre le tableau 5.55. Parmi ces solutions du tableau 5.5, la solution N°01 correspond à F_1^{max} =1.078 mm a été retenue. Il est clair que les variables optimales φ_0 = 69.6° et φ_f = 72.434° produisent la valeur la plus élevée de F1 (figure 5.13).

Lorsque les configurations des figures (5.14a, 5.14b) correspondant à l'erreur minimale et maximale obtenue par la technique multi-objective sont comparées à celles obtenues par la technique mono-objective représentée dans les figures (5.9a, 5.9b), nous observons la convergence des deux techniques. Cela démontre que les deux techniques offrent un certain niveau de précision pendant la simulation. Pour les robots du même type que ceux examinés dans cet article, les configurations illustrées dans les figures 5.9a ou 5.14a donnent la plus petite erreur, tandis que les configurations illustrées dans les figures 5.9b ou 5.14b donnent la plus grande erreur. Par conséquent, les configurations qui introduisent une erreur significative pendant l'usinage peuvent être facilement évitées.





La figure 5.15 montre clairement la différence entre la trajectoire souhaitée (ligne verte) et la trajectoire d'erreur maximale (ligne bleue). En revanche, l'erreur minimale de la trajectoire (ligne rouge) est identique à la trajectoire souhaitée. Comme nous pouvons le constater, l'erreur minimale est quasiment nulle lorsque $\varphi 0$ = -38.667 ° et φf = -35.921°. Cela prouve l'efficacité de la technique multi-objective pour réduire l'erreur de positionnement. On peut dire que la précision de la trajectoire pendant l'usinage est influencée par la configuration du robot.



Figure 5.15 : Trajectoire souhaitée obtenue par la technique multi-objectif

Les figures 5.16, 5.17a et 5.17b montrent les résultats de la comparaison des performances de chaque technique proposée, afin de choisir la technique optimale pour résoudre le problème de la minimisation de l'erreur de positionnement de l'effecteur final.



Figure 5.16 : Comparaison de ΔP mono- et multi-objectifs.

La figure 5.16 compare les résultats de deux techniques d'optimisation pour l'erreur de positionnement global ΔP . on note deux résultats similaires pour les deux méthodes, avec $\Delta P_{moy} \approx 0.85$ mm. Ceci est également le même cas pour les résultats de l'erreur de positionnement de l'avance Δy (figure 5.17b), qui est en moyenne de 0,85 mm.

Contrairement aux résultats des figures 5.16 et 5.17b, pour l'erreur de positionnement transversale Δx (figure 5.17a), il existe un certain écart entre l'erreur

minimale obtenue par la technique mono-objectif sur $\Delta x_{moy} \approx |0.125|$ mm et celle obtenue par la technique multi-objectif sur $\Delta x_{moy} \approx |0.025|$ mm, ainsi la comparaison des trajectoires d'erreur minimale (en rouge) présentées sur les figures 5.10 et 5.15 donne la préférence à la technique multi-objectif.

Nous constatons que les deux techniques sont fiables pour résoudre le problème de minimisation de l'erreur de positionnement ΔP et Δy , tandis que la technique multi-objectif est plus avantageuse d'environ 5 fois pour minimiser l'erreur de positionnement transversale Δx , qui est le cas critique.



Figure 5.17 : Comparaison des Δx et Δy mono et multi-objectif

5.4 Optimisation d'erreur du robot Stäubli TX-90 :

Comme indiquer au chapitre 1, le volume de travail permet à l'effecteur final d'atteindre certains espaces. La taille de l'espace de travail est fonction de plusieurs facteurs : citons le nombre de degrés de liberté, les paramètres géométriques du robot... La Figure 5.18 présente l'espace de travail ou zone atteignable par le centre du poignet du robot Stäubli TX-90.

5.4.1 Configuration du robot :

Le calcul de l'espace de travail est évidemment très important dans la phase de conception. La représentation de l'espace de travail est généralement basée sur l'illustration en 3 dimensions de l'espace accessible par l'extrémité de l'organe terminal, en présence des contraintes qui limitent le mouvement du robot, telles que les limitations sur les coordonnées articulaires : les articulations ont un angle minimum et un angle maximum définis par les butées mécaniques.



Figure 5.18 : Approximation de l'espace de travail en 3D.

Sur la base de cette propriété, nous pouvons dire que la réalisation d'une tâche par un robot varie en fonction du choix des coordonnées de travail. Donc le robot peut également satisfaire divers critères d'optimisation.



Figure 5.19 : Variables de l'outil utilisé pour l'optimisation

Afin de minimiser l'erreur de positionnement la plus possible, plusieurs critères de performance sont nécessaires. Pour notre proposition, nous bénéficions de la propriété de l'espace de travail du robot (figure 5.18) ainsi que de la géométrie et de l'orientation de l'effecteur finale (figure 5.19). Nous parlons, dans ce cas, de

l'influence de la variation de matrice tâche et la matrice outil sur la qualité de la trajectoire obtenue.

Afin de simplifier les calculs, nous devons limiter le domaine d'étude dans l'espace de travail. Pour cela, un cube simple, dont les coins sont désignés (voir figure 5.20), est placé dans l'espace de travail en respectant les exigences suivantes (ISO 9283) :

- Le cube doit être situé dans la partie de l'espace de travail où nous prévoyons la plus grande utilisation ;
- Le cube doit avoir le volume maximum autorisé avec les bords parallèles au système de coordonnées de base ;



Figure 5.20 : Représentation du cube limitant le domaine d'étude dans l'espace de travail

Dans la suite de cette section, les données du tableau 5.6 seront considérées comme des variables de décision pour les fonctions objectives proposées.

Variable de décision	X _t (m)	Z _t (m)	γ (°)	β (°)	X (m)	Y (m)	Z (m)
Limite inferieur	-0.2	0.1	0	0	0.56	-0.01	-0.06
Limite supérieur	0.2	0.2	90	360	1.08	0.51	0.46

Tableau 5.6 : Intervalles des variables de décision

5.4.2 Application et résultats :

Le but de cette partie est de minimiser l'erreur de positionnement dans les trois (3) directions de contact outil/ matière ; autrement dit : la direction d'avance, la direction transversale et la direction axiale (profondeur). Donc nous parlons d'une optimisation multi- objectives. Pour cela nous utilisons la technique d'optimisation MOGA. Les efforts de coupes calculées (tableau 5.3) pour les six (6) directions d'usinage sont présentés sur les figures (5.21-5.23).



Figure 5.21 : Efforts de coupe calculés sur le plan XY : a) direction 'X', b) direction



Figure 5.22 : Efforts de coupe calculés sur le plan YZ : a) direction 'Y', b) direction





La boîte à outils d'optimisation MATLAB a également été utilisée pour atteindre l'objectif souhaité, tout en évitant la complexité et en réduisant le temps de programmation et de simulation. Il convient de noter que la simulation par la technique MOGA sera répétée *quarante-huit* (48) fois afin de sélectionner les meilleures valeurs des variables X_t, Z_t, γ, β, x, y et z parmi les trois (3) plans (XY, YZ, XZ) et les six (6) directions possibles (XY-x, XY-y, YZ-y, YZ-z, XZ-x, XZ-z) des huit solutions de MGI qui nous permettent d'atteindre le minimum d'erreurs de positionnement possible.

N.B : Le tableau des résultats de frontière de Pareto est assez grand pour être affiche sur le présent chapitre (un tableau de 70 x 10) ; pour cela, des résultats simplifiés sont donnés afin de rapprocher la compréhension des résultats des études.





Pour la première solution de MGI, les figures (5.22-5.24) regroupent les six résultats d'études minimales ($F_1^{min}, F_2^{min}, F_3^{min}$) dans les trois directions d'usinage (avance, transversale et profondeur), tandis que la figure 5.25 illustre les résultats minimaux de l'erreur de positionnement globale.

D'après la figure 5.24, le plan XY, selon la direction de l'axe "X", est le plan optimal qui donne une erreur d'avance minimale de 5.96E-05 mm correspondant à : X_t =-0.158 m, Z_t =0.156 m, γ =32.38°, β =9.28°, x=0.573 m, y=0.031 m et z=0.369 m. Cela est dû à l'orientation fixe des articulations 1, 4 et 6 sur le plan de travail XY pendant l'usinage qui contribuent à la stabilité de la trajectoire de l'effecteur du robot.



Figure 5.25 : Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage



Figure 5.26 : Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage

Sur la figure 5.25, le plan YZ, selon la direction de l'axe "Z", est le plan optimal qui donne une erreur transversale minimale de 3.05E-04 mm correspondant à : $X_t=0.197$ m, $Z_t=0.2$ m, $\gamma=47.574^\circ$, $\beta=167.89^\circ$, x=0.572 m, y=0.085 m et z=0.453 m. Cela s'explique par le fait que l'erreur transversale est minimale lorsque le vecteur de l'effort axial est perpendiculaire à l'axe de rotation du repère de base Z0, et dont résulte la plus petite erreur dans le plan YZ.

Le plan XY, selon la direction de l'axe "X", est le plan optimal qui donne une erreur de profondeur minimale de 8.92E-07 mm, comme illustrée sur la figure 5.26, avec les paramètres : X_t =-0.115 m, Z_t =0.146 m, γ =58.67°, β =204.7°, x=0.944 m, y=0.444 m et z=0.359 m. Du fait que la force d'appui Fz est appliquée verticalement sur la pièce, l'effecteur est chargé en compression, et donc la déviation de position de l'axe Z est négligeable (presque nulle) ; ainsi l'erreur est minimale.



Figure 5.27 : Erreur globale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage

Le plan YZ, selon la direction de l'axe "Z", est le plan optimal qui donne une erreur globale minimale de 2.27E-03 mm, comme illustrée sur la figure 5.27, avec les paramètres : X_t =0.180 m, Z_t =0.195 m, γ =47.760°, β =168.29°, x=0.567 m, y=0.066 m et z=0.391 m. Puisque la déviation de la trajectoire d'usinage est causée par l'effet des forces de coupe tangentielle et radiale, qui introduisent une flexion déviée, et puisque l'erreur radiale est plus cruciale que l'erreur tangentielle, le plan et la direction optimale de l'erreur globale est le même que l'erreur d'usinage transversale dans le cas où la configuration du robot est celui de la 1^{ere} solution du MGI.

Pour la même solution de MGI, les figures (5.28-5.30) regroupent les six résultats des études maximales ($F_1^{max}, F_2^{max}, F_3^{max}$) dans les trois directions d'usinage (avance, transversale et profondeur), tandis que la figure 5.31 illustre les résultats maximaux de l'erreur de positionnement globale.

De même, d'après la figure 5.28, le plan XZ, selon la direction de l'axe "Z", est le plan optimal qui donne une erreur d'avance maximale de 0.521 mm correspondant à : X_t =-0.046 m, Z_t =0.188 m, γ =324.319°, β =112.516°, x=0.853 m, y=0.2 m et z=0.034 m. Cela est dû à l'orientation variable des articulations 1, 4 et 6 sur le plan de travail XZ pendant l'usinage qui contribuent à l'instabilité de la trajectoire de l'effecteur du robot.









Sur la figure 5.29, le plan XY, selon la direction de l'axe "Y", est le plan optimal qui donne une erreur transversale maximale de 0.584 mm correspondant à : X_t =-0.191 m, Z_t =0.166 m, γ =37.033°, β =311.687°, x=0.569 m, y=0.509 m et z=0.02 m. De même, lorsque l'orientation des articulations ayant un axe de rotation parallèle à l'axe de repère de base Z0, qui est le cas pour les axes Z1, Z4, et Z6, et dans le cas où la configuration de ces axes est variable, l'erreur de positionnement est important dans la direction "Y" de plan XY.





Le plan XY, selon la direction de l'axe ''X'', est le plan optimal qui donne une erreur de profondeur maximale de 0.645 mm, comme illustrée sur la figure 5.30, avec les paramètres : X_t =-0.186 m, Z_t =0.035 m, γ =72.2°, β =291.79°, x=0.685 m, y=0.34 m et z=0.036 m. nous remarquons que le plan et la direction optimale sont les mêmes pour des erreurs de profondeur minimale et maximale pour des variables de décision différentes (X_t , Z_t , γ , β , x, y et z). Cela prouve que la configuration du robot influe directement sur le suivi de la trajectoire de l'effecteur, et, donc, influe sur l'état de surface de la pièce usinée.

Le plan XY, selon la direction de l'axe "X", est le plan optimal qui donne une erreur globale maximale de 0.7 mm, comme illustrée sur la figure 5.31, avec les paramètres : X_t =-0.170 m, Z_t =0.197 m, γ =66.054°, β =298.396°, x=0.574 m, y=0.495 m et z=0.013 m. Sachant que l'erreur globale est influencée par l'erreur la plus grande (avance, transversale, profondeur). Il est clairement visible que l'erreur de profondeur est l'erreur la plus grande parmi les trois erreurs maximales indiquées

sur les figures (5.28-5.30). Nous pouvons dire que l'erreur de profondeur et l'erreur globale ont le même plan et direction optimale.



Figure 5.31 : Erreur globale maximale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage

Processus	Tolérances			
FIOCESSUS	commerciales (±mm)			
Tournage	0.025-0.13			
Alésage, Forage	0.025			
Perçage	0.075			
Fraisage	0.13-0.25			
Façonnage	0.05-0.13			
Brochage	0.025-0.15			
Tronçonnage	0.8			

Tableau 5.7 : Tolérances commerciales des procédés d'usinage

Sur la base de ces résultats, nous pouvons dire que le robot peut suivre la trajectoire d'usinage avec précision avec une erreur d'ordre de 0.3 μ m (erreur transversale minimale), beaucoup plus petite, comparée à l'exigence de l'erreur autorisée (d'ordre de 130 μ m) du tableau 5.7 dans le cas de fraisage.

N.B : Dans la suite des résultats d'étude, nous nous intéresserons à la présentation des résultats des variables optimales de minimisation seulement.

5.5 Optimisation des erreurs du robot Stäubli TX-90 pour différentes solutions du MGI :

Pour la deuxième solution de MGI, les figures (5.30-5.32) regroupent les six résultats d'étude minimales ($F_1^{min}, F_2^{min}, F_3^{min}$) dans les trois directions d'usinage (avance, transversale et profondeur), tandis que la figure 5.33 illustre les résultats minimaux de l'erreur de positionnement globale.









D'après la figure 5.32, le plan XY, selon la direction de l'axe "X", est le plan optimal qui donne une erreur d'avance minimale de 8.65E-05 mm, correspondant à : X_t =-0.095 m, Z_t =0.194 m, γ =36.258°, β =19.03°, x=0.574 m, y=0.059 m et z=0.313 m.

Sur la figure 5.33, le plan YZ, selon la direction de l'axe ''Z'', est le plan optimal qui donne une erreur transversale minimale de 3.05E-04 mm, correspondant à : X_t =0.199 m, Z_t =0.194 m, γ =61.075°, β =146.694°, x=0.566 m, y=0.123 m et z=0.425 m.







Figure 5.35 : Erreur globale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 2^{eme} solution du MGI

Le plan XY, selon la direction de l'axe ''X'', est le plan optimal qui donne une erreur de profondeur minimale de 1.25E-06 mm, comme illustrée sur la figure 5.34, avec les paramètres : X_t =-0.106 m, Z_t =0.177 m, γ =57.534°, β =241.881°, x=1.019 m, y=0.338 m et z=0.326 m.

Le plan YZ, selon la direction de l'axe "Z", est le plan optimal qui donne une erreur globale minimale de 2.44E-03 mm, comme illustrée sur la figure 5.35, avec les paramètres : X_t =0.195 m, Z_t =0.198 m, γ =62.359°, β =135.068°, x=0.563 m, y=0.122 m et z=0.312 m.

Puisque la 2^{eme} solution du MGI est la même que la 1^{ere} solution, sauf q4=q4+ π , nous obtenons les mêmes plans et les directions optimales qui donnent une erreur minimales d'avance, transversale, de profondeur et globale, et, donc, les mêmes interprétations.

Pour la troisième solution de MGI, les figures (5.36-5.38) regroupent les six résultats d'étude minimales ($F_1^{min}, F_2^{min}, F_3^{min}$) dans les trois directions d'usinage (avance, transversale et profondeur), tandis que la figure 5.39 illustre les résultats minimaux de l'erreur de positionnement globale.





D'après la figure 5.36, le plan YZ, selon la direction de l'axe "Z", est le plan optimal qui donne une erreur d'avance minimale de 1.11E-05 mm correspondant à : X_t =0.17 m, Z_t =0.169 m, γ =42.671°, β =195.76°, x=0.601 m, y=0.062 m et z=0.115 m.





Sur la figure 5.37, le plan YZ, selon la direction de l'axe "Z", est le plan optimal qui donne une erreur transversale minimale 7.12E-06 mm correspondant à : X_t =0.197 m, Z_t =0.181 m, γ =44.07°, β =194.127°, x=0.563 m, y=0.063 m et z=0.457 m.





Le plan YZ, selon la direction de l'axe ''Z'', est le plan optimal qui donne une erreur de profondeur minimale de 5.90E-06 mm, comme illustré sur la figure 5.38, avec les paramètres : X_t =-0.093 m, Z_t =0.128 m, γ =33.441°, β =161.101°, x=0.912 m, y=0.121 m et z=0.437 m.





Le plan YZ, selon la direction de l'axe "Z", est le plan optimal qui donne une erreur globale minimale de 3.56E-04 mm, comme illustrée sur la figure 5.39, avec les paramètres : X_t =0.195 m, Z_t =0.174 m, γ =43.965°, β =192.718°, x=0.569 m, y=0.063 m et z=0.347 m.

Nous remarquons que, pour la configuration du robot obtenue par la solution 3 de MGI, le plan YZ selon la direction de l'axe "Z", est la solution optimale commune pour les quatre erreurs (avance, transversale, profondeur et globale).




Pour la quatrième solution de MGI, les figures (5.40-5.42) regroupent les six résultats d'étude minimales ($F_1^{min}, F_2^{min}, F_3^{min}$) dans les trois directions d'usinage (avance, transversale et profondeur), tandis que la figure 5.43 illustre les résultats minimaux de l'erreur de positionnement globale.

D'après la figure 5.40, le plan YZ, selon la direction de l'axe "Z", est le plan optimal qui donne une erreur d'avance minimale de 1.69E-05 mm correspondant à : X_t =0.168 m, Z_t=0.189 m, γ=46.523°, β=166.726°, x=0.616 m, y=0.064 m et z=0.105 m.









Sur la figure 5.41, le plan YZ, selon la direction de l'axe ''Z'', est le plan optimal qui donne une erreur transversale minimale 9.05E-06 mm correspondant à : $X_t=0.187$ m, $Z_t=0.191$ m, $\gamma=48.494^\circ$, $\beta=169.983^\circ$, x=0.590 m, y=0.065 m et z=0.428 m.

Le plan XY, selon la direction de l'axe ''Y'', est le plan optimal qui donne une erreur de profondeur minimale de 1.06E-05 mm, comme illustrée sur la figure 5.42, avec les paramètres : X_t =-0.015 m, Z_t =0.177 m, γ =53.529°, β =219.278°, x=1.023 m, y=0.414 m et z=0.239 m.



Figure 5.43 : Erreur globale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 4^{eme} solution du MGI

Le plan YZ, selon la direction de l'axe "Z", est le plan optimal qui donne une erreur globale minimale de 4.33E-04 mm, comme illustrée sur la figure 5.43, avec les paramètres : X_t =0.171 m, Z_t =0.191 m, γ =49.193°, β =169.066°, x=0.596 m, y=0.065 m et z=0.349 m.

Nous remarquons que, pour la configuration du robot obtenue par la solution 4 de MGI, le plan YZ, selon la direction de l'axe "Z", est la solution optimale commune pour les trois erreurs (avance, transversale, et globale), sauf l'erreur de profondeur minimale qui convient au plan optimal XY selon la direction "Y". Cela s'explique par le fait que l'erreur de profondeur est minimale lorsque le vecteur de l'effort axial est parallèle à l'axe de rotation de repère de base Z0, et, donc, résulte la plus petite erreur sur le plan XY. Pour la cinquième solution de MGI, les figures (5.44-5.46) regroupent les six résultats d'étude minimales ($F_1^{min}, F_2^{min}, F_3^{min}$) dans les trois directions d'usinage (avance, transversale et profondeur), tandis que la figure 5.47 illustre les résultats minimaux de l'erreur de positionnement globale.





D'après la figure 5.44, le plan YZ est le plan optimal qui donne une erreur d'avance minimale de 4.35E-05 mm correspondant à : X_t =-0.038 m, Z_t =0.173 m, y=75.289°, β=134.109°, x=0.679 m, y=0.106 m et z=0.341 m.



Figure 5.45 : Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 5^{eme} solution du MGI

Sur la figure 5.45, le plan YZ, est le plan optimal qui donne une erreur transversale minimale 4.35E-05 mm correspondant à : X_t =-0.038 m, Z_t =0.173 m, y=75.289°, β=134.109°, x=0.679 m, y=0.106 m et z=0.341 m.





Le plan XY, selon la direction de l'axe "Y", est le plan optimal qui donne une erreur de profondeur minimale de 7.22E-06 mm, comme illustrée sur la figure 5.46, avec les paramètres : X_t =-0.043 m, Z_t =0.172 m, γ =48.248°, β =233.119°, x=0.892 m, y=0.405 m et z=0.25 m.



Figure 5.47 : Erreur globale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 5^{eme} solution du MGI

Le plan YZ est le plan optimal qui donne une erreur globale minimale de 5.78E-03 mm, comme illustrée sur la figure 5.47, avec les paramètres : X_t =-0.02 m, Z_t =0.183 m, γ =65.85°, β =134.735°, x=0.629 m, y=0.089 m et z=0.428 m.

Nous remarquons que, pour la configuration du robot obtenue par la solution 5 de MGI, le plan YZ, selon la direction de l'axe ''Z'', est la solution optimale commune pour les trois erreurs (avance, transversale, et globale). Par le même raisonnement de la 4^{eme} solution de MGI, le plan XY selon la direction ''Y'', est le plan optimal qui donne une erreur de profondeur minimale.

Pour la sixième solution de MGI, les figures (5.48-5.50) regroupent les six résultats d'étude minimales ($F_1^{min}, F_2^{min}, F_3^{min}$) dans les trois directions d'usinage (avance, transversale et profondeur), tandis que la figure 5.51 illustre les résultats minimaux de l'erreur de positionnement globale.





D'après la figure 5.48, le plan YZ, selon la direction de l'axe "Z", est le plan optimal qui donne une erreur d'avance minimale de 5.54E-05 mm correspondant à : X_t =-0.062 m, Z_t =0.181 m, γ =18.23°, β =121.41°, x=0.838 m, y=0.079 m et z=0.392 m.

Sur la figure 5.49, le plan YZ selon la direction de l'axe "Z" est le plan optimal qui donne une erreur transversale minimale 5.57E-05 mm correspondant à : X_t =-0.123 m, Z_t =0.15 m, γ =22.564°, β =168.203°, x=0.637 m, y=0.055 m et z=0.44 m.



Figure 5.49 : Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 6^{eme} solution du MGI





Le plan XY, selon la direction de l'axe ''Y'', est le plan optimal qui donne une erreur de profondeur minimale de 9.19E-06 mm, comme illustrée sur la figure 5.50, avec les paramètres : X_t =0.02 m, Z_t =0.168 m, γ =51.105°, β =209.129°, x=0.896 m, y=0.459 m et z=0.4215 m.

Le plan YZ, selon la direction de l'axe ''Z',' est le plan optimal qui donne une erreur globale minimale de 4.04E-03 mm, comme illustrée sur la figure 5.51, avec les paramètres : X_t =-0.115 m, Z_t =0.188 m, γ =18.128°, β =140.518°, x=0.591 m, y=0.067 m et z=0.433 m.





Nous remarquons que, pour la configuration du robot obtenue par la solution 6 du MGI, nous obtenons les mêmes plans et directions optimum que les solutions 4 et 5 du MGI. Pour les erreurs minimales (avance, transversale et globale) le plan YZ, selon la direction de l'axe "Z", est la solution optimale. Pour l'erreur de profondeur minimale, le plan XY, selon la direction de l'axe "Y", est toujours la solution optimale.





Pour la septième solution de MGI, les figures (5.52-5.54) regroupent les six résultats d'étude minimales ($F_1^{min}, F_2^{min}, F_3^{min}$) dans les trois directions d'usinage

(avance, transversale et profondeur), tandis que la figure 5.55 illustre les résultats minimaux de l'erreur de positionnement globale.

D'après la figure 5.52, le plan YZ, selon la direction de l'axe "Z", est le plan optimal qui donne une erreur d'avance minimale de 2.60E-05 mm correspondant à : X_t =0.073 m, Z_t =0.169 m, γ =72.503°, β =65.735°, x=0.692 m, y=0.102 m et z=0.034 m.



Figure 5.53 : Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 7^{eme} solution du MGI



Figure 5.54 : Erreur de profondeur minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 7^{eme} solution du MGI

Sur la figure 5.53, le plan YZ, selon la direction de l'axe "Z", est le plan optimal qui donne une erreur transversale minimale 2.22E-05 mm correspondant à : X_t =0.168 m, Z_t =0.175 m, γ =64.63°, β =58.903°, x=0.611 m, y=0.065 m et z=0.442 m.

Le plan XY, selon la direction de l'axe "X", est le plan optimal qui donne une erreur de profondeur minimale de 1.42E-05 mm, comme illustrée sur la figure 5.54, avec les paramètres : X_t=0.03 m, Z_t=0.172 m, γ =66.369°, β =224.202°, x=0.985 m, y=0.347 m et z=0.242 m.



Figure 5.55 : Erreur globale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 7^{eme} solution du MGI

Le plan YZ, selon la direction de l'axe "Z", est le plan optimal qui donne une erreur globale minimale de 3.95E-03 mm, comme illustré sur la figure 5.55, avec les paramètres : X_t =0.162 m, Z_t =0.195 m, γ =69.814°, β =63.164°, x=0.581 m, y=0.075 m et z=0.002 m.

Par le même raisonnement, la 7^{eme} solution du MGI donne les mêmes plans optimums que les 4^{eme}, 5^{eme} et 6^{eme} solutions du MGI.

Pour la huitième solution de MGI, les figures (5.56-5.58) regroupent les six résultats d'étude minimales ($F_1^{min}, F_2^{min}, F_3^{min}$) dans les trois directions d'usinage (avance, transversale et profondeur), tandis que la figure 5.59 illustre les résultats minimaux de l'erreur de positionnement globale.







Figure 5.57 : Erreur Transversale minimale obtenue dans tous les plans et les directions d'usinage pour la 8^{eme} solution du MGI









D'après la figure 5.56, le plan YZ, selon la direction de l'axe ''Z'', est le plan optimal qui donne une erreur d'avance minimale de 1.31E-05 mm correspondant à : X_t =-0.1 m, Z_t =0.193 m, γ =34.364°, β =50.885°, x=0.722 m, y=0.128 m et z=0.047 m.

Sur la figure 5.57, le plan YZ, selon la direction de l'axe ''Z'', est le plan optimal qui donne une erreur transversale minimale 3.81E-05 mm correspondant à : $X_t=0.121$ m, $Z_t=0.129$ m, $\gamma=60.655^\circ$, $\beta=114.961^\circ$, x=0.662 m, y=0.069 m et z=0.369 m.

Le plan XY, selon la direction de l'axe ''Y'', est le plan optimal qui donne une erreur de profondeur minimale de 1.44E-05 mm, comme illustrée sur la figure 5.58, avec les paramètres : X_t =-0.081 m, Z_t =0.133 m, γ =40.433°, β =185.356°, x=0.927 m, y=0.426 m et z=0.279 m.

Le plan YZ, selon la direction de l'axe "Z", est le plan optimal qui donne une erreur globale minimale de 5.03E-05 mm, comme illustrée sur la figure 5.59, avec les paramètres : X_t =-0.086 m, Z_t =0.195 m, γ =17.817°, β =43.222°, x=0.572 m, y=0.063 m et z=0.015 m.

Par le même raisonnement, la 8^{eme} solution du MGI donne les mêmes plans optimums que les 4^{eme}, 5^{eme}, 6^{eme} et 7^{eme} solutions du MGI.

5.6 Comparaison des résultats optimaux pour les différentes solutions de MGI :

Afin de choisir la solution optimale de MGI qui offre les meilleures conditions de travail avec les plus petites erreurs d'avance, transversale, de profondeur et globale, une comparaison des plans et directions optimales obtenue dans la section précédente.

Les figures (5.60-5.62) regroupent les huit résultats d'étude des plans d'usinages optimaux qui donnent les erreurs minimales d'avance, transversale et de profondeur, tandis que la figure 5.63 illustre les huit résultats d'étude des plans d'usinages optimaux qui donnent l'erreur minimale de positionnement globale.

Dans le but de minimiser l'erreur d'avance, transversale ou globale pour une application de fraisage par un robot ayant une structure similaire à celle du Stäubli TX-90, la 3^{eme} solution du MGI, sur le plan d'usinage 'YZ', selon la direction de l'axe ''Z'', est le choix optimal pour une minimisation de l'erreur qui peut aller jusqu'à **0,0111 µm** pour l'erreur d'avance, ainsi qu'une erreur transversale minimale jusqu'à **0,00712 µm**, et une erreur globale de **0.356 µm**.

Concernant l'erreur de profondeur minimale, la 1^{ere} solution du MGI, sur le plan d'usinage 'XY', selon la direction de l'axe ''X'', est le choix optimal pour une minimisation de l'erreur qui peut aller jusqu'à **0,000892 µm**.







Figure 5.61 : Erreur Transversale minimale obtenue par les huit solutions du MGI



Figure 5.62 : Erreur de profondeur minimale obtenue par les huit solutions du MGI



Figure 5.63 : Erreur globale minimale obtenue par les huit solutions du MGI

5.7 Conclusion :

Dans le présent chapitre, l'erreur de positionnement du robot à 3 ddl a été optimisée par deux techniques d'optimisation : mono et multi-objectif, à base de l'algorithme génétique. La comparaison des deux techniques relève que pour les problèmes d'optimisation similaires au cas de la présente étude, la technique MOGA est plus avantageuse.

Par la suite, une minimisation de l'erreur de positionnement du robot Stäubli TX-90, dans le cas de fraisage robotisé, a été établie par la technique MOGA. Les résultats de cette section relèvent que la 3^{eme} solution du MGI sur le plan YZ, selon la direction de l'axe 'Z', offre une minimisation importante de l'erreur de positionnement du robot dans les directions d'usinage : avance et transversale, tandis que la 1ere solution de MGI sur le plan XY, selon la direction de l'axe 'X', est le choix optimal pour minimiser l'erreur de profondeur.

CONCLUSION

Le présent travail a pour but de contribuer à l'amélioration de la programmation hors ligne des robots dans les applications industrielles tout en respectant les conditions réelles de fonctionnement. Après avoir mis en évidence l'utilité des robots manipulateurs et leur contribution à l'amélioration de la qualité de production industrielle, les critères de performance indiqués par la norme ISO 9283 ont été traités afin d'identifier les capacités des robots et leur adaptation à certaines applications.

Une étude bibliographique a été réalisée pour catégoriser les différentes sources de perturbation qui influent directement sur la précision du robot, y compris les erreurs qui dépendant du robot, les erreurs liées à l'environnement, les erreurs dépendant du processus et les erreurs de modélisation. À la fin, après avoir cité les différents travaux réalisés sur l'évaluation des performances des robots et les méthodes de correction de certaines erreurs, une méthode a été proposée en premier lieu pour prédire le positionnement du robot pendant le fonctionnement en prenant en compte le comportement élasto-statique du robot ; en deuxième lieu, d'autres méthodes basées sur la technique d'optimisation par les algorithmes génétiques mono et multi-objectif ont été proposées pour minimiser l'erreur de positionnement du robot afin d'améliorer ses performances lors des tâches imposées.

Pour atteindre cet objectif, différents modèles mathématiques, qui représentent le mieux possible le comportement du robot industriel ont été développés. Nous distinguons les modèles géométriques pour le calcul des positions, les modèles cinématiques pour le calcul des vitesses et accélérations, le modèle dynamique pour le calcul des couples articulaires et, à la fin, le modèle de déformation qui est la base de ce travail. On tient compte de l'effet des forces de contact sur la précision du suivi de trajectoire programmée. Le robot simulé a été rendu flexible en incorporant un modèle élasto-statique au niveau des articulations.

L'analyse des résultats de la 1^{ere} partie de cette thèse a révélé que la précision de réalisation des tâches robotiques est influencée par :

• Le choix du robot, sa configuration et l'espace opérationnel de la tâche à réaliser.

• Les forces de contact outil/matériau sont la cause principale de la déviation du robot par rapport à sa trajectoire ; elle augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne du cadre de référence.

 Lorsque nous comparons les erreurs des deux robots à structures différentes, il apparaît clairement que les robots à axes parallèles (2R plan) sont plus précis que les robots à axes concourants (6R anthropomorphe).

Pour optimiser l'erreur de positionnement d'un robot redondant à trois ddl, une fonction objective a été proposée pour optimiser l'erreur globale ΔP en utilisant la technique mono-objective ; en plus, deux fonctions objectives F1 et F2 pour la technique multi-objectif ont été proposées pour optimiser les erreurs de positionnement directionnelles Δx et Δy . Les deux techniques sont efficaces pour résoudre les problèmes de minimisation. Pour un $\varphi 0=69,6^{\circ}$, $\varphi f=72,43^{\circ}$, la déviation maximale de l'outil dans sa trajectoire est $\Delta x_{max} \approx |0,125|$ mm avec une hauteur maximale du profil de rugosité Ra= 1600 µm. Alors que l'erreur de positionnement est dite minimale $\Delta x_{min} \approx |0,025|$ mm lorsque $\varphi 0=-38,67^{\circ}$, $\varphi f=-35,92^{\circ}$, et la rugosité Ra= 25 µm. L'erreur maximale se produit lorsque le porte-outil pousse l'effecteur final et l'erreur minimale se produisant lorsque le porte-outil tire l'effecteur final.

Lorsque les résultats des deux techniques sont comparés, la technique multiobjectif est environ cinq fois plus performante que la technique mono-objectif en terme de minimisation de l'erreur de positionnement dans la direction radiale, tandis que les deux techniques ont des performances similaires en termes de minimisation sur la direction tangentielle et de l'erreur de positionnement global ΔP . Sur la base des résultats obtenus et de cette comparaison, il est possible de conclure que la technique d'optimisation multi-objectif est la plus avantageuse pour minimiser l'erreur de positionnement causée par la force de contact outil/matériau.

Pour optimiser l'erreur de positionnement du robot Stäubli TX-90 a six ddl, trois fonctions objectives F1, F2 et F3 pour la technique multi-objectif ont été proposées pour optimiser les erreurs de positionnement des trois directions d'usinage, telles que les directions d'avance, transversale et de profondeur, avec sept variables de décision y compris X_t , Z_t , γ , β , x, y et z afin de minimiser ces erreurs aussi

précisément que possible. Les résultats obtenus relève que le choix de la solution du MGI du robot, l'orientation de l'effecteur (X_t , Z_t et γ) et l'espace opérationnel de la tâche (β , x, y et z) ont des impacts pertinents sur la trajectoire d'usinage et l'état de la pièce à usiner.

Pour X_t=0.17 m, Z_t=0.169 m, γ =42.671°, β =195.76°, x=0.601 m, y=0.062 m et z=0.115 m de la 3^{eme} solution du MGI du robot, le plan YZ, selon la direction de l'axe 'Z', est le plan optimal qui donne une erreur d'avance minimale de 1.11E-05 mm.

Pour X_t=0.197 m, Z_t=0.181 m, γ =44.07°, β =194.127°, x=0.563 m, y=0.063 m et z=0.457 m de la 3^{eme} solution du MGI du robot, le plan YZ, selon la direction de l'axe ''Z'', est le plan optimal qui donne une erreur transversale minimale 7.12E-06 mm.

Pour X_t=-0.115 m, Z_t=0.146 m, γ =58.67°, β =204.7°, x=0.944 m, y=0.444 m et z=0.359 m de la 1^{ere} solution du MGI du robot, le plan XY, selon la direction de l'axe "X", est le plan optimal qui donne une erreur de profondeur minimale de 8.92E-07 mm.

Pour X_t=0.195 m, Z_t=0.174 m, γ =43.965°, β =192.718°, x=0.569 m, y=0.063 m et z=0.347 m de la 3^{eme} solution du MGI du robot, le plan YZ, selon la direction de l'axe ''Z'', est le plan optimal qui donne une erreur globale minimale de 3.56E-04 mm.

Le simulateur proposé dans le chapitre 4 n'est pas seulement un outil polyvalent, il permet également des études de faisabilité, la programmation hors ligne, la génération en temps réel d'animations 3D de systèmes multi-corps, l'évitement des singularités et des obstacles, la prédiction précise de la position du robot et de la trajectoire optimale de l'effecteur final.

Cependant, les algorithmes génétiques ont des limites :

 Temps de calcul important. Les algorithmes génétiques nécessitent un grand nombre d'itérations ainsi qu'une utilisation intensive de la fonction d'évaluation. Cela limite la programmation en ligne de ces techniques ;

 - Il est également essentiel de savoir comment modéliser l'architecture génétique du problème qui dépend de plusieurs essais : cela limite encore l'efficacité de l'algorithme ; - La fonction d'aptitude est critique ; elle doit être soigneusement définie pour tenir compte de tous les paramètres du problème.

Perspectives :

Sur la base des résultats obtenus, les travaux futurs comprendront les éléments suivants :

- Intégrer la technique d'optimisation proposée dans un bloc de système de contrôle afin de minimiser l'erreur de positionnement causée par l'interaction du robot avec l'environnement, tels que les gains de contrôle ;
- Étendre cette technique pour réduire l'erreur de positionnement de diverses architectures de robots.
- Développer un bloc de système de contrôle qui combine le modèle dynamique du robot et les propriétés du processus de fraisage pour évaluer la performance du fraisage robotisé en temps réel.
- Minimiser l'erreur de positionnement en utilisant d'autres techniques d'optimisation, telle que NSGA-II, pour comparer les résultats de diverses techniques.
- Développer un modèle qui inclut des sources supplémentaires d'erreurs mécatroniques, tels que les défauts géométriques, les déformations structurelles du robot, le jeu de la chaîne d'entraînement et les vibrations pendant l'exécution d'une tâche qui nécessite un contact important avec l'environnement;
- Développer un simulateur capable d'évaluer la déviation et de représenter graphiquement les résultats de l'étude, tout en fournissant une animation 3D en temps réel du comportement du robot ;
- Incorporer ces résultats dans le processus de programmation hors ligne afin de produire la meilleure configuration pour corriger la trajectoire de l'effecteur.

REFERENCES

- Sciavicco, Lorenzo, and Bruno Siciliano. Modelling and control of robot manipulators. 2nd edition, Springer Science & Business Media, 2001.
- [2] M. W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar, Robot Modeling and Control, 1st ed, John Wiley and Sons, Inc: Berlin Heidelberg, 2005.
- [3] K. Low, Industrial Robotics: Programming, Simulation and Applications, ser. ARS, Advanced robotic systems international. Pro-Literatur-Verlag, 2007.
- [4] P. K. Bondyopadhyay, "In the beginning [junction transistor]," Proceedings of the IEEE, vol. 86, no. 1, pp. 63–77, Jan 1998.
- [5] A. E. Bryson, "Optimal control-1950 to 1985," IEEE Control Systems, vol. 16, no. 3, pp. 26–33, Jun 1996.
- [6] A. E. Middleditch, Survey of numerical controller technology. Production Automation Project, University of Rochester, 1973.
- [7] A. Saxena, Invention of Integrated Circuits. Untold Important Facts, ser. International series on advances in solid state electronics and technology. World Scientific, 2009.
- [8] W. KHALIL, E. DOMBRE, Modeling identification and control of robots, Ed. Hermes, Paris, 1999.
- [9] Siciliano, Bruno, Oussama Khatib, and Torsten Kröger, eds. Springer handbook of robotics. Vol. 200. Berlin: springer, 2008.
- [10] R. Bloss: Review of manufacturing cells as they achieve high levels of autonomy and flexibility, Assem. Autom. 33 (2), 112–116 (2013).
- [11] A. Kahn: The Encyclopedia of Work-related Illnesses, Injuries, and Health Issues (Facts On File, New York 2004).
- [12] M. Wilson: Developments in robot applications for food manufacturing, Ind. Robot Int. J. 37 (6), 498–502 (2010).
- [13] R. Moreno Masey, J. Gray, T. Dodd, D. Caldwell: Guidelines for the design of low-cost robots for the food industry, Ind. Robot Int. J. 37(6), 509–517 (2010).

- [14] K. Mathia: Principles and Applications in Cleanroom Automation (Cambridge Univ. Press, Cambridge 2010).
- [15] D. Rossi, E. Bertolini, M. Fenaroli, F. Marciano, M. Alberti: A multi-criteria ergonomic and performance methodology for evaluating alternatives in "manuable" material handling, Int. J. Ind. Ergon. 43(4), 314–327 (2013).
- [16] ISO/TR 25901-1. Welding and allied processes Vocabulary Part 1: General terms, International Standardization Organization. Geneva, Switzerland, 2016.
- [17] Pires, JN, Loureiro, A, & Bölmsjo, G. (2006b). Welding robots technology system issues and applications. London: Springer.
- [18] Deutsches Institut f
 ür Normung: DIN8593-0:2003-09: Manufacturing processes joining – Part 0: General; classification, subdivision, terms and definitions, http://www.beuth.de/de/norm/din-8593-0/65031206 (2003).
- [19] N. Lohse, H. Hirani, S. Ratchev, M. Turitto: An ontology for the definition and validation of assembly processes for evolvable assembly systems, Proc. 6th IEEE Int. Symp. Assem. Task Plan. (2005) pp. 242–247.
- [20] G. Boothroyd, P. Dewhurst, W. Knight. Product Design for Manufacture and Assembly, 3rd edn. (CRC, Boca Raton 2011).
- [21] J. Domnick, Z. Yang, Q. Ye. Simulation of the film formation at a high-speed rotary bell atomizer used in automotive spray painting processes, Proc. 22nd Eur. Conf. Liq. At. Spray Syst. ILASS Eur., Como (2008).
- [22] M. Jonsson, A. Stolt, A. Robertsson, S. von Gegerfelt, K. Nilsson. On force control for assembly and deburring of castings, Prod. Eng. 7 (4), 351–360 (2013).
- [23] Z. Pan, H. Zhanh, Z. Zhu, J. Wang: Chatter analysis of robotic machining process, J. Mater. Process. Technol. 173 (3), 301–309 (2006).
- [24] M. Weck, C. Brecher. Machines-outils 2 conception et calcul (Springer, Berlin, Heidelberg 2006).
- [25] U. Schneider, M. Ansaloni, M. Drust, F. Leali, A. Verl: Experimental investigation of sources of error in robotmachining, Int. Workshop Robot. Smart Manuf., Porto (2013).
- [26] E. Guizzo. The rise of the machines. In IEEE Spectrum, volume 45, pages 88– 88, 2008.

- [27] ISO 9283. Manipulating industrial robots-performance criteria and related test methods, International Standardization Organization. Geneva, Switzerland 1998.
- [28] K. Conrad, P. S. Shiakolas, and T. C. Yih. Robotic calibration issues: Accuracy, repeatability and calibration. In Proceedings of the 8th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED 2000), Rio, Patras, GREECE, July 2000.
- [29] OLABI A., Amélioration de la précision des robots industriels pour des applications d'usinage à grande vitesse. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Paris-Tech, novembre, 2011.
- [30] Siciliano B, Khatib O (2008) Handbook of robotics. Springer, New York
- [31] Shiakolas PS, Conrad KL, Yih TC (2002) On the accuracy, repeatability, and degree of influence of kinematics parameters for industrial robots. Int J Model Simul 22:245–254
- [32] Mustafa SK, Pey YT, Yang G, Chen I (2010) A geometrical approach for online error compensation of industrial manipulator. In: IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 738-743, July 6-9, Montreal, Canada
- [33] Breth JF, Vasselin E, Lefebvre D, Dakyo B (2005) Determination of the repeatability of a Kuka robot using the stochastic ellipsoid approach. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 4339-4344, Barcelona, Spain
- [34] Vacarescu, V., E. Ch Lovasz, and C. F. Buciuman. "Research on multidirectional pose accuracy variation to a welding robot." Advances in Mechanisms Design. Springer, Dordrecht, 2012. 323-328.
- [35] MIHELJ, Matjaž, BAJD, Tadej, UDE, Aleš, et al. Accuracy and repeatability of industrial manipulators. In : Robotics. Springer, Cham, 2019. p. 231-241.
- [36] Mustafa SK, Pey YT, Yang G, Chen I (2010) A geometrical approach for online error compensation of industrial manipulator. In: IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 738-743, July 6-9, Montreal, Canada
- [37] Legnani G, Tosi D, Fassi I, Giberti I, Cinquemani S (2010) The "point of isotropy" and other properties of serial and parallel manipulators. Mech Mach Theory 45:1407–1423

- [38] Dietz T, Schneider U, BarhoM, Oberer-Treitz S, Drust M, Hollmann R, Hägele M (2012) Programming system for efficient use of robots for deburring in SME environments. In: 7th German Conference on Robotics (Robotik), Munich, Germany
- [39] Hiba Hage. Identification et simulation physique d'un robot Stäubli TX90 pour le fraisage à grande vitesse. Automatique / Robotique. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2012. Français.
- [40] GUO Y., SHIBIN Y., YONGJIE R., JIGUI Z., SHOURUI Y., SHENGHUA Y., A multilevel calibration technique for an industrial robot with parallelogram mechanism, Precision Engineering, Volume 40, pp 261-272, 2015
- [41] MOORING B., ROTH Z., DRIELS M., Fundamentals of Manipulator Calibration, Editorial John Wiley & sons, Inc. USA, 1991.
- [42] Bryan Greenway, (2000), "Robot accuracy", Industrial Robot: An International Journal, Vol. 27 Iss 4 pp. 257 - 265
- [43] M. Vakilinejad, A. Olabi, O. Gibaru, Identification and Compensation of periodic gear transmission errors in Robot Manipulators. In International Conference on Industrial Technology, IEEE, 2019, (pp. 126-132).
- [44] Z. Li, Y. Wang, K. Wang, A data-driven method based on deep belief networks for backlash error prediction in machining centers. Journal of Intelligent Manufacturing 31 (2020) 1693-1705.
- [45] Oh YT (2011) Influence of the joint angular characteristics on the accuracy of industrial robots. Ind Robot 38:406–418
- [46] Erkaya S (2012) Investigation of joint clearance effects on welding robot manipulators. Robot Comput Integr Manuf 28:449–457
- [47] Gong C, Yuan J, Ni J (2000) Nongeometric error identification and compensation for robotic system by inverse calibration. Int J Mach Tools Manuf 40:2119–2137
- [48] Ruderman M, Hoffmann F, Bertram T (2009) Modeling and identification of elastic robot joints with hysteresis and backlash. IEEE Trans Ind Electron 56:3840–3847

- [49] JAWALE H. P., THORAT H. T., Positional error estimation in serial link manipulator under joint clearances and backlash, Journal of Mechanisms and Robotics, Vol 5, 2013.
- [50] Kumagai S, Ohishi K, Miyazaki T (2009) high performance robot motion control based on zero phase error notch filter and D-PD control. In: IEEE International Conference on Mechatronics, pp. 1-6, Malaga, Spain
- [51] Marton L, Lantos B (2009) Friction and backlash measurement and identification method for robotic arms. In: IEEE International Conference on Advanced Robotics, pp. 1-6, Munich, Germany
- [52] Thomsen S, Fuchs FW (2009) Speed control of torsional drive systems with backlash. In: 13th European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1-10, Barcelona, Spain
- [53] Carvalho Bittencourt A, Wernholt E, Sander-Tavallaey S, Brogardh T (2010) An extended friction model to capture load and temperature effects in robot joints. In: IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 6161-6167, Taipei, Taiwan
- [54] NUBIOLA A., SLAMANI M., BONEV I., A new method for measuring a large set of poses with a single telescoping ballbar, Precision Engineering, Volume 37, pp. 451-460, 2013.
- [55] Jin M, Jin Y, Chang PH, Choi C (2009) High-accuracy trajectory tracking of industrial robot manipulators using time delay estimation and terminal sliding mode. In: 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, pp. 3095-3099, Porto, Portugal
- [56] Merlet JP (2009) Interval analysis for certified numerical solution of problems in robotics. Int J Appl Math Comput Sci 19:399–412
- [57] Seifeddine Mejri. Identification et modélisation du comportement dynamique des robots d'usinage. Médecine humaine et pathologie. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2016. Français.
- [58] Schneider, U., Drust, M., Ansaloni, M., Lehmann, C., Pellicciari, M., Leali, F., & Verl, A. (2016). Improving robotic machining accuracy through experimental error investigation and modular compensation. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 85, 3-15.

- [59] HeiselU, Richter F, Wurst K-H (1997) Thermal behavior of industrial robots and possibilities for errors compensation. CIRP Ann Manuf Technol 46:283–286
- [60] Zhan Q, Wang X (2012) Hand-eye calibration and positioning for a robot drilling system. Int J Adv Manuf Technol 61(5–8):691–701
- [61] Lehmann C, Pellicciari M, Drust M, Gunnink JW (2013) Machining with industrial robots: the COMET project approach. In: International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM), pp. 27-36, Porto, Portugal
- [62] PRITSCHOW G., EPPLER C., GARBER T., Influence of the dynamic stiffness on the accuracy of PKM, 3rd Chemnitz Parallel Kinematic Seminar, pp. 313-333, 2002.
- [63] M. Cherif, J.-Y. K'nevez, and A. Ballu. Quantification des effets thermiques sur la precision d'un robot d'usinage. Arts et Metiers ParisTech Cluny, 2010.
- [64] C. Gong, J. Yuan, and J. Ni. Nongeometric error identification and compensation for robotic system by inverse calibration. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 40(14) :2119–2137, 2000.
- [65] FACENDA N., Calibration of high-precision flexure paralle robots, thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2006.
- [66] Zhang H, Wang J, Zhang G, Gan Z, Pan Z, Cui H, Zhu Z (2005) Machining with flexible manipulator: toward improving robotic machining performance. In: IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 1127-1132, Monterey, California, USA
- [67] Zhang H, Pan Z (2008) Robotic machining: material removal rate control with a flexible manipulator. In: IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, pp. 30-35, Chengdu, China
- [68] Pan Z, Zhang H, Zhu Z, Wang J (2006) Chatter analysis of robotic machining process. J Mater Process Technol 173:301–309
- [69] Quintana G, Ciurana J (2011) Chatter in machining processes: a review. Int J Mach Tools Manuf 51:363–376
- [70] K. Cheng. Machining Dynamics Fundamentals, Applications and Practices.Springer Series in Advanced Manufacturing, 2009.
- [71] U. Schneider, M. Ansaloni, M. Drust, F. Leali, and A. Verl. Experimental investigation of sources of error in robot machining. In Neto, Pedro, Moreira, and A. Paulo, editors, Robotics in Smart Manufacturing, volume 371 of

Communications in Computer and Information Science, pages 14–26. Springer Berlin Heidelberg, 2013.

- [72] G. Pritschow, C. Eppler, and T. Garber. Influence of the dynamic stiffness on the accuracy of pkm. pages 313–333, Chemnitz, 2002.
- [73] V. Robin. Contribution à la mise en oeuvre et l'optimisation d'une cellule robotisée : application au parachèvement de pièces de fonderie. PhD thesis, Universite Blaise Pascal, Clermont-Ferrand II, 2007.
- [74] Mans Ostring, Svante Gunnarsson, and Mikael Norrlof. Closed-loop identification of an industrial robot containing flexibilities. Control Engineering Practice, 11(3):291 – 300, 2003. Advances in Automotive Control.
- [75] L. MA, P. BAZZOLI, P. M. SAMMONS, R. G. Landers, D. A. Bristow, Modeling and calibration of high-order joint-dependent kinematic errors for industrial robots. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 50 (2018), 153-167.
- [76] D. Kumičáková, V. Tlach, M. Císar, Testing the performance characteristics of manipulating industrial robots. Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Mechanical Series 62 (2016) 39-50.
- [77] S. Esmaeili, J. R. R. Mayer, An integrated geometric and hysteretic error model of a three-axis machine tool and its identification with a 3D telescoping ballbar. Journal of Manufacturing and Materials Processing 4 (2020), 24.
- [78] P. Yang, Z. Guo, Y. Kong, Plane kinematic calibration method for industrial robot based on dynamic measurement of double ball bar. Precision Engineering 62 (2020), 265-272.
- [79] M. Slamani, A. Nubiola, I. A. Bonev, Assessment of the positioning performance of an industrial robot", Industrial Robot: An International Journal 39 (2012a), 57-68.
- [80] M. Gaudreault, A. Joubair, I. Bonev, Self-calibration of an industrial robot using a novel affordable 3D measuring device. Sensors 18 (2018) 3380-3398.
- [81] C. Icli, O. Stepanenko, I. Bonev, New method and portable measurement device for the calibration of industrial robots. Sensors 20 (2020).
- [82] S. Gharaaty, T. Shu, A. Joubair, W. F. Xie, I. A. Bonev, Online pose correction of an industrial robot using an optical coordinate measure machine system. International Journal of Advanced Robotic Systems 15 (2018).

- [83] A. Filion, A. Joubair, A. S. Tahan, I. A. Bonev, Robot calibration using a portable photogrammetry system. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 49 (2018), 77-87.
- [84] Y. Guo, S. Yin, Y. Ren, J. Zhu, S. Yang, S. Ye, A multilevel calibration technique for an industrial robot with parallelogram mechanism. Precision Engineering 40 (2015) 261-272.
- [85] K. Kamali, A. Joubair, I. A. Bonev, P. Bigras, Elasto-geometrical calibration of an industrial robot under multidirectional external loads using a laser tracker. In International Conference on Robotics and Automation, IEEE, 2016, (pp. 4320-4327).
- [86] G. Xiong, Y. Ding, L. Zhu, C. Y. Su, A product-of-exponential-based robot calibration method with optimal measurement configurations. International Journal of Advanced Robotic Systems 14 (2017).
- [87] S. Liao, Q. Zeng, K. F. Ehmann, J. Cao, Parameter Identification and Nonparametric Calibration of the Tri-Pyramid Robot. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 25 (2020) 2309- 2317.
- [88] R. Cousturier, Improvement by redundancy management of the behavior of robots with hybrid structure under machining loads. Doctoral dissertation, Clermont-Auvergne, France, November, 2017. (In French)
- [89] J. Qin, F. Léonard, G. Abba, Real-time trajectory compensation in robotic friction stir welding using state estimators. IEEE Transactions on Control Systems Technology 24 (2016) 2207-2214.
- [90] K. Kolegain, F. Leonard, S. Zimmer-Chevret, A. B. Attar, G. Abba, A feedforward deflection compensation scheme coupled with an offline path planning for robotic friction stir welding. IFACPap 51 (2018) 728-733.
- [91] S. Mamedov, D. Popov, S. Mikhel, A. Klimchik, Compliance Error Compensation based on Reduced Model for Industrial Robots. In Proceedings of the 15th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Portugal, 2018, (pp. 190-201).
- [92] C. Dumas, Development of methods for metal and composite parts trimming with a robot. Doctoral dissertation, Nantes, France, December, 2011. (In French)

- [93] Y. Guo, S. Yin, Y. Ren, J. Zhu, S. Yang, S. Ye, A multilevel calibration technique for an industrial robot with parallelogram mechanism. Precision Engineering 40 (2015) 261-272.
- [94] K. Kamali, A. Joubair, I. A. Bonev, P. Bigras, Elasto-geometrical calibration of an industrial robot under multidirectional external loads using a laser tracker.
 In International Conference on Robotics and Automation, IEEE, 2016, (pp. 4320-4327).
- [95] G. Xiong, Y. Ding, L. Zhu, C. Y. Su, A product-of-exponential-based robot calibration method with optimal measurement configurations. International Journal of Advanced Robotic Systems 14 (2017).
- [96] Y. Alaiwi, A. Mutlu, Simulation and motion control of industrial robot. International Scientific Journals of Scientific Technical Union of Mechanical Engineering "Industry 4.0" 2 (2017) 169-174.
- [97] H. Hage, P. Bidaud, N. Jardin, Practical consideration on the identification of the kinematic parameters of the Stäubli TX90 robot. In Proceedings of the 13th World Congress in Mechanism and Machine Science, Guanajuato, Mexique, 19-25 June 2011, (p. 43).
- [98] S. Liao, Q. Zeng, K. F. Ehmann, J. Cao, Parameter identification and nonparametric calibration of the Tri-Pyramid Robot. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 25 (2020) 2309-2317.
- [99] C. Landgraf, K. Ernst, G. Schleth, M. Fabritius & M. F. Huber, A hybrid neural network approach for increasing the absolute accuracy of industrial robots. In 2021 IEEE 17th International Conference on Automation Science and Engineering, Lyon, France, August 23-27, 2021, (pp. 468- 474).
- [100] Z. Wang, S. Zimmer-Chevret, F. Léonard & G. Abba, Improvement strategy for the geometric accuracy of bead's beginning and end parts in wire-arc additive manufacturing (WAAM). The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2021) 1-13.
- [101] J. Denavite, R. S. Hartenberg, A kinematic notation for lower pair mechanism based on matrices. Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME 22 (1955) 215-221.
- [102] J. Jin, N. Gans, Parameter identification for industrial robots with a fast and robust trajectory design approach. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 31 (2015) 21-29.

- [103] Paul R.C.P, Robot manipulators: mathematics, programming and control, MIT press, Cambridge (1981).
- [104] H. Hage, P. Bidaud, N. Jardin, Simulation of a Stäubli TX90 Robot during Milling using SimMechanics. Applied Mechanics and Materials 162 (2012) 403-412.
- [105] J. Wang, H. Zhang, T. Fuhlbrigge, Improving machining accuracy with robot deformation compensation. In International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE/RSJ, 2009, (pp. 3826-3831).
- [106] [106] [G. Alici, B. Shirinzadeh. Enhanced stiffness modeling, identification and characterization for robot manipulators. IEEE Transactions on Robotics 21 (2005) 554–564.
- [107] C. K. Toh, Comparison of chip surface temperature between up and down milling orientations in high speed rough milling of hardened steel. Journal of Materials Processing Technology 167 (2005) 110–118.
- [108] M. A. Hadi, J. A. Ghani, C. C. Haron, M. S. Kasim, Comparison between upmilling and down-milling operations on tool wear in milling Inconel 718. Procedia Engineering, 68 (2013), 647-653.
- [109] Raynald Laheurte, « Application de la théorie de seconde gradient à la coupe des matériaux », thèse de doctorat, Université Bordeaux I, France, 2004.
- [110] D. Gelin, M. Vincent, « Eléments de fabrication », Les Editions Foucher, 1995.
- [111] S. Engin, Y. Altintas, Mechanics and dynamics of general milling cutters.: Part
 I: helical end mills. International journal of machine tools and manufacture 41 (2001) 2195-2212.
- [112] H. Z. Li, W. B. Zhang, X. P. Li, Modelling of cutting forces in helical end milling using a predictive machining theory. International journal of mechanical sciences 43 (2001) 1711-1730.
- [113] J. Tlusty, P. MacNeil, Dynamics of cutting force in end milling. CIRP Annals 24 (1975) 21-25.

- [114] M. C. Yoon, Y. G. Kim, Cutting dynamic force modelling of end milling operation. Journal of materials processing technology 155 (2004) 1383-1389.
- [115] E. R. Lorphevre, E. Filippi, P. Dehombreux, Inverse method for cutting forces parameters evaluation. Engineering Mechanics 14 (2007) 345-357.
- [116] Y. Altintaş, P. Lee, A general mechanics and dynamics model for helical end mills. CIRP Annals 45 (1996) 59-64.
- [117] https://www.kuka.com/ar-ae/products/robotics-systems/software/simulationplanning-optimization/kuka_sim (07/04/2023 a 04:09 Am)
- [118] https://new.abb.com/products/robotics/robotstudio (07/04/2023 à 04:14 Am)
- [119] https://www.fanucamerica.com/products/robots/robot-simulation-software-FANUC-ROBOGUIDE (07/04/2023 à 04:42 Am)
- [120] https://www.staubli.com/cn/en/robotics/products/robot-software/staeublirobotics-suite.html (07/04/2023 à 04:45 Am)
- [121] https://staging.gazebosim.org/home (07/04/2023 à 05:00 Am)
- [122] https://robodk.com/ (07/04/2023 à 04:57 Am)
- [123] https://cyberbotics.com/ (07/04/2023 à 04:57 Am)
- [124] https://www.coppeliarobotics.com/ (07/04/2023 à 05:00 Am)
- [125] https://www.cae-sim-sol.com/en/software/msc-software/msc-adams (07/04/2023 a 05:09 Am)
- [126] https://www.3ds.com/fr/produits-et-services/catia/produits/ (07/04/2023 à 05:04 Am)
- [127] https://www.mathworks.com/products/simscape-multibody.html (07/04/2023 à 05:04 Am)
- [128] https://openmodelica.org/ (07/04/2023 à 05:05 Am)
- [129] B. Lounici, M. Ouali, et E. H. Osmani. Cutting Forces Impact on the Spindle Path during Robotic Milling. Applied Mechanics and Materials 906 (2022) 41-

58.

- [130] B., Lounici, M. Ouali, et E. H. Osmani. Modeling and Dynamic Simulation of A Robot Using The Solidworks Motion Tool. Séminaire international sur l'Industrie et la Technologie, Oran, Algérie, 12 et 13 Mars 2021, Vol. 5 Nr. 3, pp 638-647.
- [131] J. Qin, F. Léonard, G. Abba, Non-linear observer-based control of flexible-joint manipulators used in machine processing. In: Proceedings of The ASME 2012
 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, Nantes, France, July 2–4, 2012, 44854 (pp. 251-260).
- [132] J. Qin, Robust hybrid position/force control of a manipulator robot used in machining and/or welding. Doctoral dissertation, Metz, France, December, 2013. (In French)
- [133] https://fr.mathworks.com/discovery/genetic-algorithm.html (07/04/2023 a 04:36)
- [134] B. Lounici, M. Ouali, et E. H. Osmani. Tool Positioning Error Minimization during Robotic Milling Based on the Genetic Algorithm Technique. In Applied Mechanics and Materials 999 (2022) 99-119.