



**HAL**  
open science

# Contribution à la commande robuste d'un manipulateur utilisé en meulage

Mohamed Didi Chaoui

► **To cite this version:**

Mohamed Didi Chaoui. Contribution à la commande robuste d'un manipulateur utilisé en meulage. Automatique / Robotique. Université de Lorraine, 2020. Français. NNT : 2020LORR0226 . tel-03254748

**HAL Id: tel-03254748**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03254748>**

Submitted on 9 Jun 2021

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

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



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

# Contribution à la commande robuste d'un manipulateur utilisé en meulage

THÈSE

Doctorat de l'université de Lorraine

En vue de l'obtention de grade de Docteur de l'université de Lorraine, en Automatique,  
traitement du signal et des images.

Présentée et soutenue publiquement le 11 décembre 2020 par

**Mohamed DIDI CHAOUI**

**Composition du jury :**

- Laurent Dubar , Université Polytechnique Hauts-de-France (Président)
- Philippe Lutz , ENSMM- Université Bourgogne Franche-Comté (Rapporteur)
- Belhassen-Chedli Bouzgarrou , Sigma Clermont (Rapporteur)
- Richard Béarée , Arts et Métiers Lille (Examinateur)
- Sandra Chevret , LCFC, Arts et Métiers Metz (Examinateur)
- Gabriel Abba , LCFC, Université de Lorraine (Directeur de thèse)
- François Léonard , LCFC, Université de Lorraine (co-directeur de thèse)



# Remerciements

*Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une thèse au sein du laboratoire "Conception - Fabrication - Commande" (LCFC) à l'Université de Lorraine (UL). Ce travail a été financé par l'Union européenne dans le cadre du projet N°002-4-09-001 Interreg V «Grande Région ».*

*Je tiens à remercier les membres de Robotix-Academy pour leur accueil chaleureux et leurs aides pendant toute la durée de cette formation.*

*Un merci spécial au directeur de thèse, Monsieur Gabriel Abba, professeur à l'université de Lorraine (UL) et au co-directeur de thèse Monsieur François Léonard, maître de conférences à l'ENIM. Mes remerciements vont aussi à Monsieur Vianney Papot, Ingénieur recherche au laboratoire LCFC, à l'ensemble des techniciens du laboratoire LCFC et à tout le personnel de l'UL et de l'ENSAM. Je remercie Prof. Patrick Martin, qui a accepté de relire l'intégralité de ce rapport.*

*Je remercie Prof. Laurent Dubar qui a accepté de présider le jury de soutenance. Un sincère merci aux rapporteurs Prof. Belhassen-Chedli Bouzgarrou et Prof. Philippe Lutz ainsi qu'aux examinateurs Prof. Richard Béarée et Mme Sandra Chevret.*

*Merci à mes parents, mes sœurs Imane, Soukaïna, Salma et Sara, à mon épouse Meryem et à tous ceux qui de près ou de loin m'ont soutenu jusqu'à l'aboutissement de cette thèse.*



## Résumé

L'utilisation des robots industriels pour la réalisation des opérations d'usinage, de meulage ou de rectification devient une nécessité. Or, la robotisation des procédés du meulage se heurte à plusieurs obstacles qui apparaissent surtout lors du meulage des pièces de grandes dimensions. La robotisation du procédé nécessite aussi la définition d'une méthodologie efficace de planification de la trajectoire du robot. Dans le cadre de cette thèse, nous proposerons une solution pratique pour la robotisation du procédé de meulage. Cette solution consiste à l'utilisation d'un effecteur pneumatique placé entre le robot et la meuleuse qui permet le contrôle en force exercé par le robot sur la pièce et la réduction des vibrations générées par le meulage. Un simulateur du procédé de meulage a été établi sur Matlab/Simulink. Les résultats ont montré qu'un effecteur externe actionné pneumatiquement permet le contrôle de force de meulage. Les résultats ont montré aussi que ce système de meulage robotisé permet d'améliorer la qualité de la surface meulée. Une approche de planification de trajectoire a été développée en réalisant un meulage en deux étapes, ébauche et finition. Une compensation de la masse de la partie mobile de l'effecteur a également été prise en compte, en calculant l'orientation de l'effecteur pneumatique de meulage développé grâce aux repères de Frenet liés aux courbes paramétrées B-spline de la trajectoire du robot. Nous proposons ensuite d'appliquer ces solutions de robotisation du meulage pour effectuer des tâches d'applications industrielles : le surfacage d'une pièce plane et le meulage d'arrondis pour éliminer les arêtes blessantes des pièces. Enfin, une évaluation de l'état de surface produite a été réalisée pour juger sur l'efficacité de la méthode proposée et sur ses limites.

## Abstract

The use of industrial robots for machining or grinding operations becomes a necessity. However, the robotization of grinding processes clashes with several obstacles that especially arise when grinding large workpieces. Process robotization also requires the definition of an efficient methodology for planning the robot trajectory. In the framework of this thesis, we will propose a practical solution for the robotization of the grinding process. This solution consists in the use of a pneumatic actuator placed between the robot and the grinding tool (angle grinder) which allows the control of the force exerted by the robot on the workpiece and the reduction of the vibrations generated by the grinding process. After establishing the models, a simulator of the process is set up on Matlab/Simulink. The results show that a pneumatically actuated external effector allows the control of the grinding force. The results also indicated that this robotic grinding system improves the quality of the ground surface. In order to carry out robotic grinding tests, a path planning approach was developed by performing a two-stage grinding process (roughing and finishing). A mass compensation of the moving part of the end effector was taken into account, by calculating the orientation of the developed pneumatic grinding end effector using Frenet frames linked to the parameterized B-spline curves of the robot trajectory. We propose to apply these grinding robotization solutions to perform industrial application tasks : the surfacing of a flat workpiece and the edge grinding to eliminate the injuring edges of the parts. Finally, an evaluation of the surface finish produced is carried out to assess the effectiveness of the proposed method and its limitations.





# Table des matières

<b>Table des figures</b>	<b>10</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>15</b>
<b>Nomenclature</b>	<b>16</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>18</b>
1 Motivation . . . . .	19
2 Problématique de la thèse et objectifs . . . . .	20
3 Organisation de la thèse . . . . .	21
<b>1 La robotisation du procédé de meulage</b>	<b>23</b>
1.1 Introduction . . . . .	23
1.2 Les différents types des robots . . . . .	24
1.2.1 Robots mobiles . . . . .	24
1.2.2 Robots domestiques . . . . .	24
1.2.3 Robots humanoïdes . . . . .	24
1.2.4 Robots collaboratifs ou cobots . . . . .	26
1.2.5 Robots industriels . . . . .	26
1.3 L'utilisation des Robots dans l'industrie . . . . .	26
1.3.1 Les robots industriels en France et dans le monde . . . . .	28
1.3.2 Les différentes architectures des robots . . . . .	29
1.3.3 Applications des robots sériels . . . . .	30
1.3.4 Les robots ABB IRB . . . . .	31
1.4 Programmation des robots industriels . . . . .	32
1.4.1 Différentes méthodes de programmation des robots . . . . .	33
1.5 Capteurs des robots industriels . . . . .	35
1.5.1 Capteurs internes . . . . .	35
1.5.2 Capteurs externes . . . . .	39
1.6 Description du procédé de meulage . . . . .	41

1.6.1	Définition du procédé de meulage . . . . .	41
1.6.2	Désignation des meules . . . . .	41
1.6.3	Le principe de fonctionnement . . . . .	44
1.7	Machines/outils permettant le meulage . . . . .	45
1.7.1	Types des machines de meulage . . . . .	45
1.7.2	Les avantages et inconvénients des meuleuses angulaires . . . . .	50
1.8	Cinétique du meulage robotisé . . . . .	50
1.9	Phénomène des vibrations . . . . .	55
1.9.1	Types des vibrations . . . . .	55
1.9.2	Suppression des vibrations . . . . .	56
1.10	Contrôle de force de meulage . . . . .	62
1.11	Meulage des surfaces de formes libres . . . . .	64
1.12	Conclusion . . . . .	65
<b>2</b>	<b>Modélisation et simulation du système de meulage robotisé</b>	<b>67</b>
2.1	Introduction . . . . .	67
2.2	Collection de données . . . . .	67
2.2.1	Configuration générale du système de meulage . . . . .	67
2.2.2	Configuration de l'actionneur électropneumatique . . . . .	68
2.3	Définition des paramètres de meulage robotisé . . . . .	72
2.4	Modélisation des forces de meulage . . . . .	73
2.4.1	Modèles empiriques de force de meulage . . . . .	74
2.4.2	Modèles physiques de force de meulage . . . . .	76
2.4.3	Modèle de force de meulage angulaire . . . . .	78
2.5	Modélisation des frottements . . . . .	82
2.6	Modèle de remplissage des chambres du vérin . . . . .	85
2.7	Simulation numérique du système de meulage robotisé . . . . .	86
2.7.1	Application pour la simulation . . . . .	86
2.7.2	Création des modèles Simulink . . . . .	87
2.7.3	Résultats de simulation . . . . .	88
2.8	Conclusion . . . . .	89
<b>3</b>	<b>Planification de la trajectoire du meulage robotisé</b>	<b>93</b>
3.1	Introduction . . . . .	93
3.2	Considérations générales . . . . .	94
3.2.1	Hypothèses . . . . .	97
3.2.2	Définition de l'outil . . . . .	97
3.2.3	Repère de l'outil . . . . .	98
3.3	Planification de la trajectoire . . . . .	99
3.3.1	Méthodologie de la planification hors-ligne . . . . .	99

3.3.2	Programme de meulage sur Matlab . . . . .	103
3.3.3	Interpolation des points de passage par des courbes de Bézier . . . . .	107
3.3.4	Interpolation des points de passage par des B-Spline . . . . .	108
3.3.5	Repère de Frenet-Serret . . . . .	108
3.3.6	Calcul des angles d'Euler . . . . .	109
3.3.7	Modèle de temps de meulage . . . . .	111
3.4	Compensation du poids de la meule . . . . .	112
3.5	Résultats . . . . .	113
3.6	Conclusion . . . . .	116
<b>4</b>	<b>Expérimentations et analyses</b>	<b>119</b>
4.1	Introduction . . . . .	119
4.2	Essais de meulage robotique . . . . .	119
4.3	Consignes et exigences de qualité . . . . .	120
4.4	Méthode de mesure de rugosité et d'ondulation . . . . .	124
4.4.1	Calcul des paramètres de rugosité . . . . .	124
4.4.2	Utilisation d'un scanner 3D . . . . .	125
4.5	Démarche expérimentale . . . . .	125
4.6	Résultats d'évaluation du meulage robotique . . . . .	126
4.6.1	Filtrage . . . . .	127
4.6.2	Calcul du centre et du rayon de l'arrondi . . . . .	127
4.6.3	Analyse . . . . .	129
4.7	Conclusions . . . . .	132
	<b>Conclusion générale</b>	<b>135</b>
	<b>Perspectives</b>	<b>137</b>
	<b>Annexes</b>	<b>139</b>
<b>A</b>	<b>La modélisation</b>	<b>140</b>
A.1	Montage expérimental de l'essai d'identification du modèle de frottement . . . . .	140
A.2	Simulateur du système de meulage sur Simulink/Matlab . . . . .	141
<b>B</b>	<b>Planification de la trajectoire</b>	<b>143</b>
B.1	Plan de coupe parallèle à une orientation fixe . . . . .	143
B.2	Exemple de trajectoire outil pour le surfaçage . . . . .	144
B.3	Calcul de la surface d'un triangle . . . . .	145
B.4	Comparaison entre une interpolation de Bézier et B-spline . . . . .	146
B.5	Calcul de la courbure $\kappa$ et la torsion $\tau$ d'une courbe paramétrée . . . . .	147
B.6	Repère Frenet-Serret lié à la trajectoire d'une passe de meulage . . . . .	148

<b>C</b>	<b>État de surface</b>	<b>149</b>
C.1	Longueur de base pour le calcul de rugosité $R_a$ . . . . .	149
C.2	Filtrage des mesures de surfaces . . . . .	150
C.3	Algorithme d'optimisation avec la méthode du gradient conjugué (Conjugate gradient) . . . . .	152

# Table des figures

1	Statistiques 2016 d'accidentabilité au travail en France [1]	19
1.1	Robot mobile autonome du constructeur KUKA	24
1.2	Robot mobile guidé du constructeur AVT Europe NV	25
1.3	Robot domestique pour tondre la pelouse	25
1.4	Robot domestique de divertissement	25
1.5	Robot humanoïde ASIMO	27
1.6	Estimation du nombre des robots industriels en 2020 dans le monde [78]	28
1.7	Nombre des robots par 10 000 employés dans l'industrie en 2016	29
1.8	Chargement des machines	31
1.9	Forgeage robotisé	31
1.10	Soudage robotisé	31
1.11	Peinture robotisée	31
1.12	Usinage robotisé	31
1.13	Manutention robotisée	31
1.14	Espace de travail ABB IRB 8700	32
1.15	Teach pendant ABB	33
1.16	schéma simplifié d'un potentiomètre rectiligne	36
1.17	schéma simplifié d'un potentiomètre rectiligne	37
1.18	Codeur optique absolu	38
1.19	Jauge de déformation	39
1.20	Illustration des composants de la meule et la formation des copeaux [15]	42
1.21	Désignation selon NF EN 12413 des meules	43
1.22	Angle d'attaque (de coupe) et angle de cisaillement pour un grain abrasif [15]	44
1.23	Meuleuse à bande	46
1.24	Meuleuse à cadre pivotant	47
1.25	Rectifieuse plane	48
1.26	Machine CNC de rectification	49
1.27	Rectifieuse cylindrique	51
1.28	Meuleuse angulaire	51

1.29	Ponçage robotique . . . . .	51
1.30	Tronçonnage robotique . . . . .	51
1.31	Robot de meulage angulaire [84] . . . . .	51
1.32	Applications de la meuleuse angulaire : Tronçonnage ; Surfaçage ; Polissage. . . . .	52
1.33	Surfaçage en meulage angulaire . . . . .	53
1.34	Meule projetée sur le plan $ZX$ . . . . .	54
1.35	Méthodes d'élimination des vibrations [68] . . . . .	58
1.36	: Limite de stabilité pour les machines-outils comparée à la limite de stabilité pour les robots [69] . . . . .	60
1.37	Amortisseur avec 1 ddl [67] . . . . .	61
1.38	Amortisseur Sky-hook équivalent [67] . . . . .	62
1.39	Amortisseur Sky-hook basé sur un capteur de force [67] . . . . .	63
2.1	Aperçu de l'approche de simulation . . . . .	68
2.2	Système de meulage robotisé . . . . .	69
2.3	Effecteur de meulage . . . . .	70
2.4	Relation entre les éléments du système de meulage . . . . .	70
2.5	Schéma structurel du système électropneumatique . . . . .	71
2.6	Composants de l'actionneur . . . . .	72
2.7	Schéma d'entrée/sortie d'un RNA d'optimisation de meulage . . . . .	76
2.8	Chemin de coupe lors du labourage d'une seule arête en meulage . . . . .	78
2.9	Montage expérimental . . . . .	80
2.10	Variation de la profondeur de passe en fonction de la force . . . . .	81
2.11	Force normale de meulage appliquée durant l'identification du modèle de force . . . . .	82
2.12	Modèle identifié de force normale du meulage angulaire robotique . . . . .	83
2.13	La variation de la profondeur de passe en meulage robotique en fonction de la variation de la force normale de meulage . . . . .	84
2.14	Types des frottements . . . . .	85
2.15	Forces appliquées sur le piston P . . . . .	85
2.16	Cycle hystérésis de force de frottement : Force de frottement calculée (bleu) et modèle de force de frottement (vert) . . . . .	86
2.17	Remplissage de la chambre supérieure du vérin . . . . .	87
2.18	Bloc diagramme du simulateur du système de meulage . . . . .	88
2.19	Bloc de calcul de la cinétique du piston du vérin pneumatique . . . . .	88
2.20	Force de meulage appliquée par le vérin en simulation numérique . . . . .	89
2.21	Coupe de la surface meulée en simulation . . . . .	90
2.22	Position du piston du vérin en simulation . . . . .	90
3.1	Cas d'application . . . . .	94
3.2	Trajectoire de l'outil paramétrée . . . . .	96

3.3	Trajectoire de l'outil non paramétrée . . . . .	96
3.4	Différents modes de coupe en meulage représentés par la position du centre de la meule : a) coupe en "zig-zag" b) coupe circulaire c) coupe à sens unique . . . . .	97
3.5	Paramètres d'une meule . . . . .	98
3.6	Position et orientation de l'outil . . . . .	98
3.7	Empreinte elliptique de la meule sur la pièce . . . . .	100
3.8	Passes et couches de meulage pour le surfaçage . . . . .	100
3.9	Passes et couches de meulage pour le meulage d'arrondi . . . . .	101
3.10	Configuration de meulage dans le plan $yz$ pour le surfaçage . . . . .	101
3.11	Configuration de meulage dans le plan $xz$ pour le meulage d'arrondi . . . . .	102
3.12	Surface d'intersection entre trois ellipses (projection de la meule inclinée) . . . . .	102
3.13	Organigramme de la planification de la trajectoire . . . . .	104
3.14	Point de passage de la meule . . . . .	105
3.15	Programme de planification de la trajectoire . . . . .	106
3.16	Illustration de l'algorithme de De Boor . . . . .	109
3.17	Rotation $zyx$ . . . . .	110
3.18	Modèle de vitesse de meulage . . . . .	112
3.19	Effet de la gravité sur la profondeur de passe . . . . .	113
3.20	Effet de la variation de la force normale de meulage sur le nombre de passe $N_p$ . . . . .	114
3.21	Meulage en sens unique d'un arrondi de rayon 4 mm . . . . .	114
3.22	Surfaçage en sens unique d'une pièce plane . . . . .	115
3.23	Comparaison entre l'état de surface de l'arrondi à l'étape d'ébauche (en bleu) et l'étape de finition (en rouge) . . . . .	115
4.1	Essai I : profil de force de meulage . . . . .	120
4.2	Essai I : Profondeurs de passe mesurées . . . . .	120
4.3	Trajectoire de l'outil en Matlab pour a) les essais MS b) les essais MA et en Robotstudio pour c) les essais MS d) les essais MA . . . . .	122
4.4	Essais MS : Pièce meulée a) Photo réelle de deux essais b) Surfaçage 3D de la même pièce	123
4.5	Essais MS : Mesure de la surface suivant la direction 1 . . . . .	124
4.6	Comparaison entre la surface réelle et la surface nominale . . . . .	125
4.7	Scanner 3D ATOS triple scan de GOM . . . . .	126
4.8	Tôle utilisée pour essai MS . . . . .	127
4.9	Prisme utilisé pour essai MA . . . . .	127
4.10	Essai MA : Coupe de l'arrondi meulé suivant l'axe X du repère globale . . . . .	128
4.11	Rayon de l'arrondi . . . . .	129
4.12	Essai MS : Force de meulage mesurée . . . . .	129
4.13	Essai MS : Ondulations mesurées sur la surface de la pièce . . . . .	130
4.14	Essai MS : Surface meulée . . . . .	131
4.15	Essai MA : Arrondi meulé . . . . .	131

A.1	schéma simplifié de l'essai du modèle de frottement . . . . .	140
A.2	Simulateur du meulage robotisé . . . . .	142
B.1	Ligne d'intersection d'une surface CAO avec un plan orienté . . . . .	143
B.2	Trajectoire outil . . . . .	144
B.3	Interpolation des points de passage de la meule . . . . .	146
B.4	Repères Frenet liés à une passe de meulage . . . . .	148
C.1	Filtrage des mesures . . . . .	150
C.2	programme Matlab de filtrage . . . . .	151



# Liste des tableaux

2.1	Caractéristiques générales du vérin . . . . .	71
2.2	Références des éléments . . . . .	72
2.3	Paramètres de meulage angulaire robotisés . . . . .	73
2.4	Modèles de force de meulage (1/2) . . . . .	75
2.5	Modèles de force de meulage (2/2) . . . . .	75
2.6	Paramètres du meulage en simulation . . . . .	86
4.1	Essai MS et MA : Paramètres de meulage . . . . .	121
4.2	Caractéristiques du scan 3D . . . . .	126
4.3	Essai MS : Paramètres de qualité . . . . .	131
4.4	Essai MA : Paramètres de qualité . . . . .	132

# Nomenclature

- $a$  : angle de la meule,  $^{\circ}$
- $b$  : offset du centre de la meule, mm
- $C_{gw}$  : constante de la meule, -
- $C_v$  : course du vérin, mm
- $C_{wp}$  : constante de la pièce, -
- $d$  : profondeur de passe, mm
- $d_s$  : diamètre de la meule, mm
- $d_g$  : diamètre des grains de la meule, mm
- $d_{eq}$  : diamètre équivalent de la meule, mm
- $e$  : épaisseur de la meule, mm
- $F_{enc}$  : force de formation de copeaux en meulage, N
- $F_{lab}$  : force de labourage de meulage, N
- $F_{coupe}$  : force de coupe de meulage, N
- $F_{frott}$  : force de frottement de meulage, N
- $F_N$  : composante normale de la force de meulage, N
- $F_T$  : composante tangentielle de la force de meulage, N
- $F_{Nl}$  : composante normale de la force de labourage, N
- $F_{Tl}$  : composante tangentielle de la force de labourage, N
- $F_{Nc}$  : composante normale de la force de coupe, N
- $F_{Tc}$  : composante tangentielle de la force de coupe, N
- $F_{Nf}$  : composante normale de la force de frottement, N
- $F_{Tf}$  : composante tangentielle de la force de frottement, N
- $F'_N$  : force normale spécifique, N/mm
- $F'_T$  : force tangentielle spécifique, N/mm
- $F'_s$  : force spécifique minimale d'enlèvement de matière, N/mm

- $K_e$  : coefficient d'épaisseur du copeaux,  $N/mm^2$
- $m$  : masse mobile, Kg
- $q$  : ratio de vitesse , -
- $Q_i$  : aire de la section du copeaux,  $mm^2$
- $Q_w$  : taux d'enlèvement de matière,  $mm^3/s$
- $Q'_w$  : taux d'enlèvement de matière spécifique,  $mm^2/s$
- $Q_{w,max}$  : taux d'enlèvement de matière maximal,  $mm^3/s$
- $R_s$  : rayon de la meule, mm
- $S$  : surface de contact,  $mm^2$
- $S_p$  : section du piston, mm
- $s_v$  : section du tige du piston, mm
- $S_n$  : surface nominale de contact,  $mm^2$
- $S_{n,max}$  : surface nominale maximale,  $mm^2$
- $V_s$  : vitesse d'avance, m/s
- $V_{n,s}$  : vitesse nominale d'avance, m/s
- $V_c$  : vitesse de coupe, m/s
- $\alpha$  : angle du tilt, °
- $\theta$  : angle d'inclinaison du vérin par rapport à la verticale, °

# Introduction générale

En trois décennies, le robot industriel a subi des changements significatifs depuis ses débuts comme un outil répétitif à un manipulateur multifonctionnel, reprogrammable conçu pour déplacer des matériaux, des pièces, des outils ou des dispositifs spécialisés à l'aide de divers mouvements programmés pour la performance d'une variété des tâches. Néanmoins, la majorité des applications des robots industriels est limitée dans les domaines qui nécessitent aucune ou une faible interaction entre le robot et l'environnement tels que le soudage, pulvérisation, etc [62]. Très peu de robots ont été utilisés pour des applications à haute valeur ajoutée telles que les procédés d'enlèvement de matière. Cependant, la production qui a été déjà faite, manuellement ou à l'aide des machines *CN*, peut être réalisée plus efficacement avec des robots qui deviennent de plus en plus flexibles, faciles à intégrer et faciles à utiliser. Avec un cycle de vie des produits qui devient de plus en plus court et une demande accrue de personnalisation et de maintien des normes de qualité les plus élevées, ce n'est plus rentable d'utiliser des applications manuelles ou des solutions non flexibles d'automatisation. Les robots commencent à devenir une alternative aux machines-outils pour réaliser des opérations d'usinage sur des pièces larges, complexes ou difficiles à atteindre. C'est la raison pour laquelle plusieurs travaux sur la robotisation des procédés de fabrication, tel que le fraisage, le tournage, etc ont été réalisés. L'usinage automatique des pièces à surfaces libres est généralement réalisé sur des machines à commande numérique *CNC* et d'autres nouvelles technologies de fabrication, mais les processus de finition dépendent toujours sur le travail manuel d'une main d'œuvre qualifiée. Avec le développement rapide de l'industrie, les pièces meulées tels que les clamps des pipelines pétroliers, les turbines aéronautiques, les appareils sanitaires, etc deviennent de plus en plus complexes et exigent une précision de plus en plus élevée, ce qui rend le meulage manuel traditionnel ennuyeux et inefficace. En industrie, le procédé de meulage est une étape primordiale de la finition de plusieurs pièces fabriquées en forgeage, usinage ou moulage. Le meulage manuel nécessite plus de temps et de coût. Il est difficile d'obtenir des résultats d'une qualité uniforme, ce qui empêche le progrès technologique de ce procédé. La robotisation du meulage permettra d'atteindre un degré élevé de précision des pièces produites. Elle garantit aussi une grande efficacité du procédé en maximisant le taux d'enlèvement de matière.

### Répartition des AT 2016 en 1<sup>er</sup> règlement avec au moins 4 jours d'arrêt dans l'année par risque

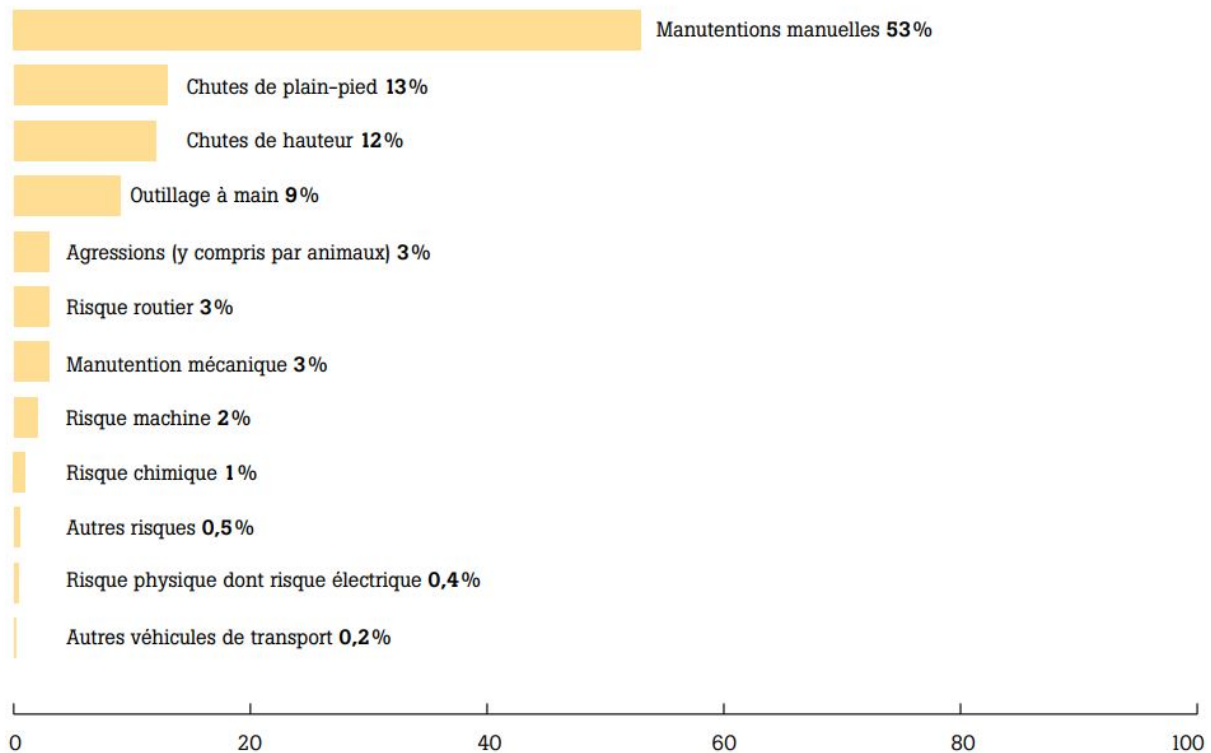


FIGURE 1: Statistiques 2016 d'accidentabilité au travail en France [1]

## 1 Motivation

Comme déjà mentionné en introduction, la robotisation diminue considérablement le temps nécessaire pour la fabrication et la finition des pièces industrielles. Elle permet aussi de réduire le nombre des tâches répétitifs affectée aux opérateurs. Ce qui permet de consacrer cette main d'œuvre expérimentée à des opérations plus complexe.

De plus, le meulage robotisé permet d'avoir une bonne répétabilité. Il permettra donc de générer des pièces finies avec une meilleure qualité dimensionnelle et un meilleur état de surface, d'une manière uniforme, ce qui diminue considérablement le taux des rebuts de production.

Les meuleuses angulaires représentent aussi un grand danger pour leurs utilisateurs. En France, selon les statistiques de l'INRS [1], les blessures liées à l'usage des outils portables représentent 9% des accidents de travail graves (figure 1).

Selon les statistiques de "Royal Society for the Prevention of Accidents Surveillance Systems", le nombre moyen d'incidents liés à l'utilisation des meuleuses, en Grande Bretagne, s'élèvent à 5400 par an.

Ces blessures sont très graves et touchent la tête, le visage et les extrémités supérieures [76].

Le développement d'un système de meulage robotisé présente non seulement un grand intérêt pour les industriels, mais présente aussi une avancée significative de l'état de la technique de meulage.

## 2 Problématique de la thèse et objectifs

L'utilisation des robots industriels pour la réalisation des opérations d'usinage, de meulage ou de rectification devient une nécessité. Or, la robotisation des procédés d'usinage ou de meulage se heurte à plusieurs obstacles qui apparaissent lors de l'usinage des pièces.

Une cellule industrielle robotisée est constituée d'au moins trois éléments : le robot, l'élément terminal (outil) et la pièce. Tous ces éléments sont des sources d'erreur. A cause de la flexibilité du robot et de l'outillage, des vibrations peuvent être induites lors du meulage, ce qui affecte négativement la qualité des pièces produites, réduit la durée de vie du robot et des outils et diminue la productivité. Parmi les solutions les plus utilisées par les industriels pour réduire ou éliminer les vibrations des paramètres d'usinage conservatifs, par exemple, augmenter la vitesse de rotation de l'outil ou diminuer la vitesse d'avance sont utilisés. Dans certains cas, les opérateurs ajoutent d'autres opérations manuelles pour enlever les stries laissées sur les surfaces des pièces. Cela affecte gravement la productivité et la compétitivité des industriels.

Il est bien connu que les tâches nécessitant une interaction forte entre le manipulateur et son environnement nécessitent un type de contrôle de la force. Ceci est largement reconnu [49, 75, 60, 9], et les principaux fabricants de robotique produisent maintenant des robots industriels à commande en force. Malgré leurs avantages, la mise en œuvre de capacités de contrôle de la force active dans des robots industriels déjà existants pourrait constituer une alternative intéressante. Le contrôle de force appliquée par ces robots nécessite une connaissance précise du comportement dynamique du système de meulage (robot, outil, etc) et les forces appliquées par l'environnement (forces de meulage) sur ce dernier, ce qui s'avère très compliquée.

Finalement, la robotisation du procédé nécessite aussi la définition d'une méthodologie efficace de planification de la trajectoire du robot. Cette méthodologie devra permettre, à la fois, de diminuer le temps de meulage et de garantir l'obtention de l'état de surface souhaité.

Nous proposerons donc dans ce travail, une solution pratique pour la robotisation du procédé de meulage. L'amortissement actif en utilisant un système de meulage équipé d'un amortisseur pneumatique est une solution innovante capable de surmonter les difficultés que présentent la robotisation de ce procédé. Ce système est aussi capable de contrôler la force exercée par le robot sur la pièce. Le contrôle de la force de meulage est primordiale et permet le contrôle de la profondeur de passe et évite le surchauffe de la pièce ou de la meule. Cette solution a le potentiel d'être utilisée sur différents types de robot dans un contexte industriel.

Nous procédons par la suite à modéliser, simuler puis réaliser le système de meulage robotisé (SMR) à actionneur pneumatique. Le SMR doit être capable de meuler des pièces industrielles forgées de grandes

dimensions.

Une méthodologie de la planification de la trajectoire du robot est proposée pour garantir un meulage efficace et un état de surface optimal de la pièce finie. Nous choisissons premièrement, comme tâches d'applications, le surfaçage d'une pièce plane et deuxièmement, le meulage d'arrondi pour éliminer les arêtes blessantes des pièces.

### 3 Organisation de la thèse

Le chapitre 1 contient une présentation des différents robots et événements marquants la robotique, ainsi que des chiffres clés de l'accélération de l'automatisation de l'industrie. La particularité des robots IRB du groupe ABB et du robot ABB IRB 8700 a été présentée.

Le chapitre 2 est consacré pour décrire le procédé de meulage et de ces machines/outils. Les types des vibrations lors de l'enlèvement de matière, leurs effets sur le procédé de meulage ainsi que les stratégies de suppression de ces vibrations sont établis.

Ce chapitre est consacré aussi pour présenter une synthèse bibliographique des différentes contributions des chercheurs pour le contrôle en force pour la robotisation des procédés en général et pour le meulage en particulier. Les travaux liés à la planification de la trajectoire pour le meulage sont présentés.

Une approche de simulation a été proposée au chapitre 3. Après avoir établi les modèles, un simulateur du procédé de meulage a été établi sur Simulink/Matlab. Le simulateur ainsi que les simulations sont décrits. Les résultats ont montré qu'un effecteur externe actionné pneumatiquement permet le contrôle de force de meulage. Les résultats ont montré aussi que ce système de meulage robotisé permet d'améliorer la qualité de la surface meulée. La finition des pièces industrielles par un meulage angulaire robotisé permet donc de garantir un état de surface qui respecte les spécifications géométriques exigées par les industrielles.

Afin de réaliser des essais de meulage robotisé, une approche de planification de trajectoire a été développée dans le chapitre 4. Une compensation du poids de la partie mobile de l'effecteur a été prise en compte, en calculant l'orientation de l'effecteur pneumatique de meulage développé.

Le chapitre 5 est consacré à la présentation des essais de meulage robotisé. Une analyse des résultats de ces essais est ensuite présentée.

La conclusion générale et les perspectives sont présentées à la fin du manuscrit.





# Chapitre 1

## La robotisation du procédé de meulage

### 1.1 Introduction

Un robot est un dispositif mécatronique (alliant mécanique, électronique et informatique) conçu pour accomplir automatiquement des tâches imitant ou reproduisant, dans un domaine précis, des actions humaines. Le terme robot apparaît pour la première fois dans la pièce de théâtre R. U. R. (Rossum's Universal Robots), écrite en 1920 par l'auteur Karel Čapek. Le mot a été créé par son frère Josef à partir du mot tchèque « robota » qui signifie « travail, besogne, corvée ». Plusieurs chercheurs se sont intéressés à la robotisation des procédés. Le but de ces recherches est de surmonter les verrous scientifiques qui limitent l'utilisation des robots pour accomplir ces tâches.

Ce travail portant sur l'utilisation des robots lors d'opérations de meulages, il s'agit dans un premier temps de présenter les différents types des robots utilisés, de présenter le procédé meulage et les éléments caractéristiques pertinents à prendre en compte pour assurer l'optimisation de sa mise en oeuvre robotisée. Les tâches de meulage affectées aux robots deviennent de plus en plus complexes. Ce qui nécessite l'adoption de nouvelles stratégies capables de surmonter cette complexité. Des stratégies de meulage ont été proposées [44, 20] en utilisant des robots de différents types et géométries [58], dans le but de contrôler les variables du procédé, limiter les vibrations et améliorer la qualité des pièces meulées.

Ce chapitre contient une présentation des différents types des robots et des événements marquants la robotique industrielle, ainsi que des chiffres clés de l'accélération de l'automatisation de l'industrie. La partie 1.3 décrit la particularité des robots industriels en général et les robots IRB du groupe ABB en particulier. En suite, la partie 1.4 contient les méthodes de programmation des robot les plus utilisées. Les principaux capteurs utilisés pour le contrôle des robots industriels ou de son interaction avec l'environnement sont présentés dans la partie 1.5. Ce chapitre présentera aussi une description détaillée du procédé de meulage et de ces machines/outils. Ensuite, la partie 1.9 établie les types de vibrations lors de l'enlèvement de matière et leurs effets sur le procédé de meulage. Une classification des stratégies de suppression des vibrations est par la suite réalisée. La partie 1.10 traite les différentes contributions des chercheurs pour le contrôle en force pour l'automatisation des procédés en général et pour la robotisation



FIGURE 1.1: Robot mobile autonome du constructeur KUKA

du procédé de meulage en particulier. Finalement, la partie 1.11 traite la planification de la trajectoire pour le meulage.

## 1.2 Les différents types des robots

### 1.2.1 Robots mobiles

Les robots mobiles ont la capacité de se déplacer dans leurs environnements. Ils ne sont pas donc fixes dans une seule localisation physique. Les robots mobiles peuvent être autonomes (AMR – autonomous mobile robot). Cela leur permet de naviguer un environnement incontrôlable sans le besoin du guidage d'un appareil physique ou électromécanique (voir figure 1.1). Les robots mobiles peuvent aussi compter sur des appareils de guidage (AGV – autonomous guided vehicle) qui leur permettent de suivre un chemin prédéfini dans un environnement semi-contrôlable (voir figure 1.2).

### 1.2.2 Robots domestiques

Les robots domestiques sont des robots autonomes de services. Ils sont utilisés principalement pour réaliser des tâches domestiques (figure 1.3). Ils peuvent être utilisés aussi pour l'éducation, divertissement (figure 1.4) ou thérapie. Malgré que la majorité des robots domestiques soit simplistes, il existe plusieurs modèles de robots domestiques capables d'interagir avec leurs environnements avec une grande autonomie.

### 1.2.3 Robots humanoïdes

Un robot humanoïde est un robot dont la structure est basée sur celle d'un humain. Le terme humanoïde signifie « ressemblant à l'humain ». Il évoque la bipédie, la présence de deux bras et d'une tête. Il s'agit donc uniquement d'un critère morphologique. Un robot humanoïde ne ressemble pas nécessairement



FIGURE 1.2: Robot mobile guidé du constructeur AVT Europe NV



FIGURE 1.3: Robot domestique pour tondre la pelouse



FIGURE 1.4: Robot domestique de divertissement

à un humain réel, par exemple le robot humanoïde ASIMO, présenté dans la figure 1.5, a un casque au lieu d'un visage.

#### 1.2.4 Robots collaboratifs ou cobots

Le mot cobot apparaît pour la première fois en 1999, il s'agit d'un néologisme formé à partir des mots « coopération » et « robotique ». Les cobots, ou robots collaboratifs, sont des robots destinés à interagir avec les humains dans un espace partagé ou à travailler en toute sécurité à proximité. Les cobots diffèrent des robots industriels traditionnels qui sont conçus pour fonctionner de manière autonome avec une sécurité assurée par la séparation des espaces de travail des robots et des humains. Les Cobots peuvent être construit avec des matériaux légers, des bords arrondis et des vitesses de déplacement limitées afin de garantir la sécurité des opérateurs à proximité. La sécurité peut également nécessiter des capteurs et des logiciels pour assurer un bon comportement collaboratif.

#### 1.2.5 Robots industriels

Un robot industriel est un système robotique utilisé pour la fabrication. Les robots industriels sont automatisés, programmables et capables de se déplacer sur trois axes ou plus. Une description détaillée de ce type des robots est présentée dans la section suivantes.

### 1.3 L'utilisation des Robots dans l'industrie

Les premières études menées sur les robots industriels ont été réalisées dans les années 90. Les industriels ont vite compris que l'intégration des robots dans la production offrit un gain du temps très important lorsque ces machines sont utilisées dans des tâches avec un cycle de travail constant. Utilisation des robots permet donc de les rendre plus compétitifs en faisant des économies lors de la production. Cette envie des industriels a stimulé plusieurs recherches qui se sont concentrées à comprendre les enjeux de l'intégration des robots dans le domaine industriel.

Un robot industriel est décrit comme un manipulateur à fonctions multiples, à commande automatique, programmable sur trois axes ou plus, pouvant être soit fixe ou mobile pour utilisation dans des applications d'automatisation industrielle.

Selon l'Association Française de Normalisation (A.F.N.O.R.), un robot est *un système mécanique de type manipulateur commandé en position, reprogrammable, polyvalent (i.e., à usages multiples), à plusieurs degrés de liberté, capable de manipuler des matériaux, des pièces, des outils et des dispositifs spécialisés, au cours de mouvements variables et programmés pour l'exécution d'une variété de tâches. Il a souvent l'apparence d'un, ou plusieurs, bras se terminant par un poignet. Son unité de commande utilise, notamment, un dispositif de mémoire et éventuellement de perception et d'adaptation à l'environnement et aux circonstances. Ces machines polyvalentes sont généralement étudiées pour effectuer la même fonction de façon cyclique et peuvent être adaptées à d'autres fonctions sans modification permanente du matériel.*

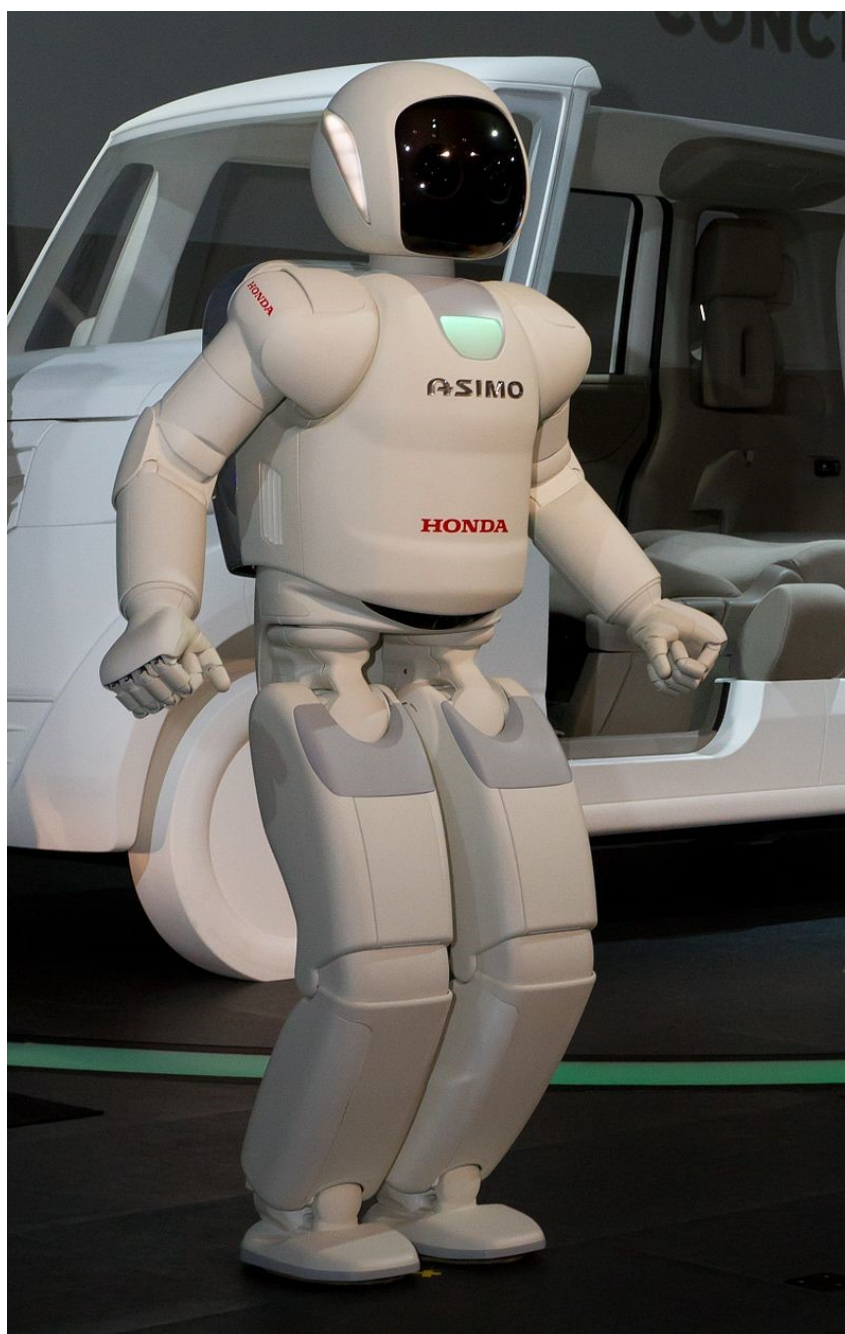


FIGURE 1.5: Robot humanoïde ASIMO

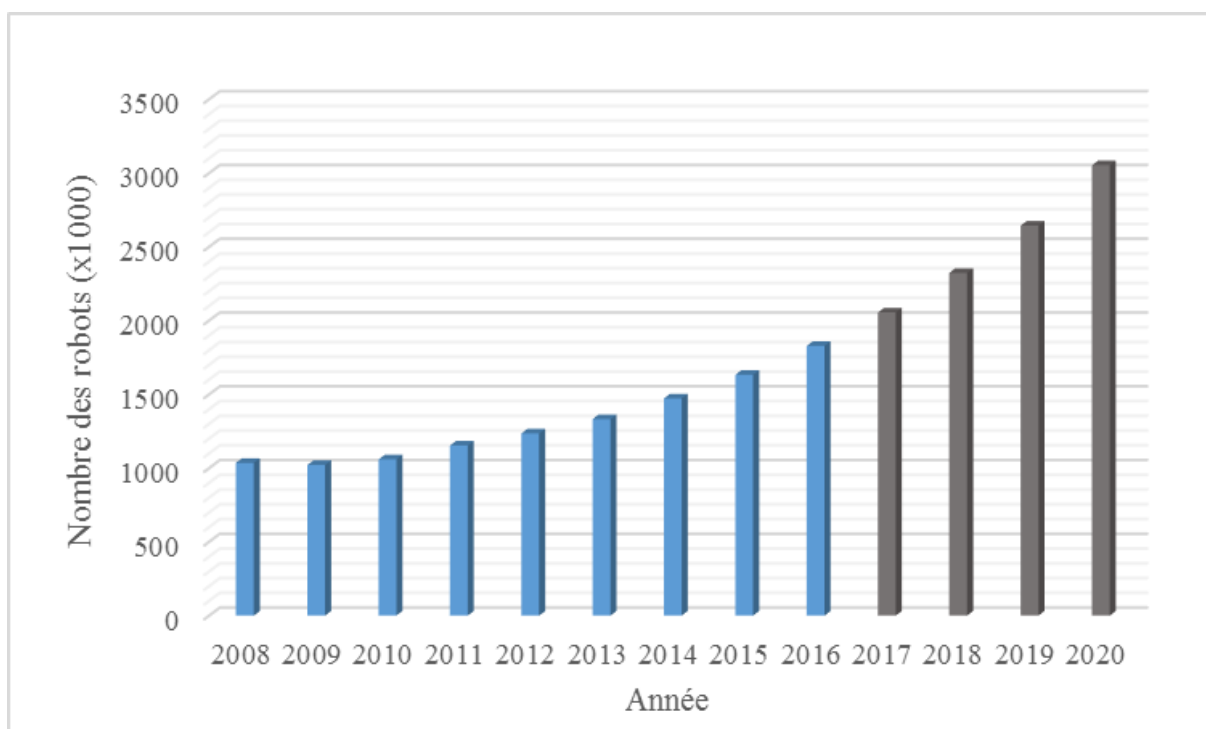


FIGURE 1.6: Estimation du nombre des robots industriels en 2020 dans le monde [78]

De même ISO 8373 :2012(fr) considère un robot comme *un mécanisme programmable actionné sur au moins deux axes avec un degré d'autonomie, se déplaçant dans son environnement, pour exécuter des tâches prévues.*

### 1.3.1 Les robots industriels en France et dans le monde

Selon les statistiques de la fédération internationale de la robotique (IFR), l'automatisation des industries s'accélère. En 2016, le monde compte plus de 1.8 millions de robots industriels. Selon les estimations de l'IFR, plus de 3 millions de robot seront utilisés dans les usines autour du monde en 2020 (figure 1.6).

En 2016, avec une densité de 132 robots par 10 000 employés, la France se retrouve à la 18<sup>e</sup> place mondiale. Ce niveau est bien supérieur aux moyennes mondiales de 74 robots et européennes de 99 robots.

Cependant, la France perd des places à ce classement (passant du 14<sup>e</sup> rang en 2015 au 18<sup>e</sup> rang en 2016). Par ailleurs, cette densité est relativement faible par rapport à celui d'autres pays de l'Union européenne telle que l'Allemagne (309 robots).

Les dix pays les plus automatisés au monde sont : la Corée du Sud (avec une densité robotique dépassant de huit fois la moyenne mondiale à 631 unités), Singapour, l'Allemagne, le Japon, la Suède, le Danemark, les États-Unis, l'Italie, la Belgique et Taïwan (figure 1.7).

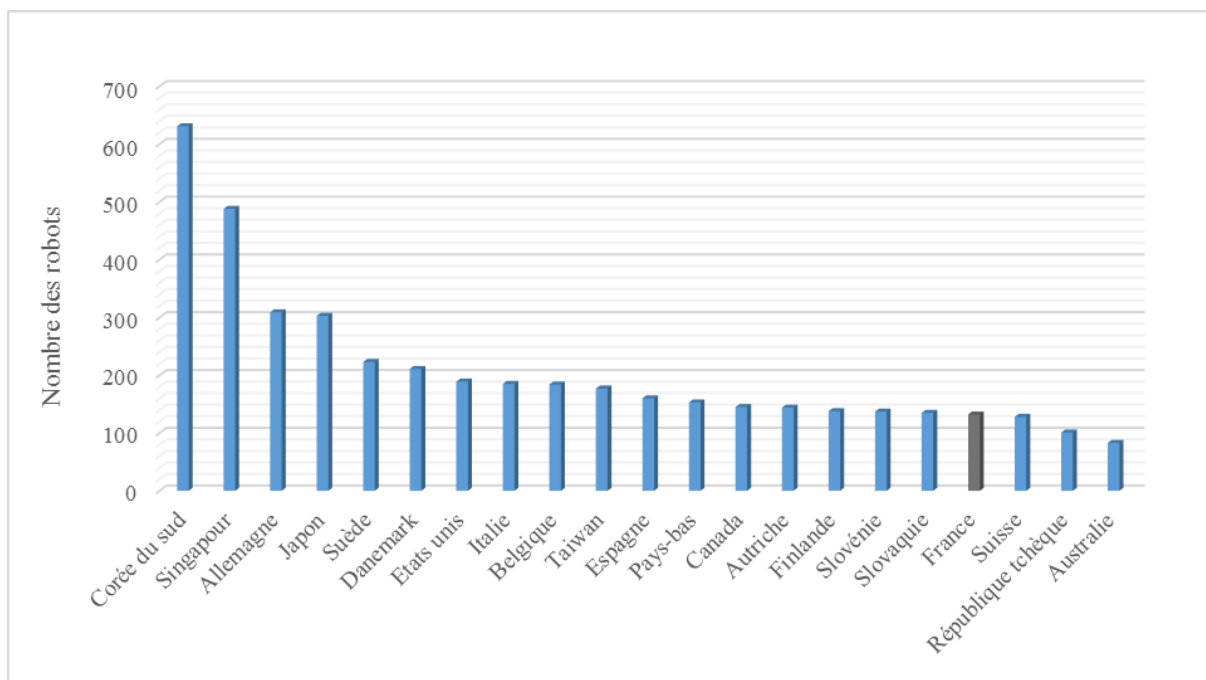


FIGURE 1.7: Nombre des robots par 10 000 employés dans l'industrie en 2016

### 1.3.2 Les différentes architectures des robots

Les robots industriels sont classés en deux classes principales [45, 7]. Les robots à chaîne cinématique sérielle : les corps des robots sont reliés entre eux par des liaisons séries séquencées.

Les robots à structure parallèle sont des robots utilisés surtout pour leur précision. Les corps structuraux du robot sont reliés en série et/ou parallèle ce qui permet de créer plusieurs boucles fermées [45]. L'utilisation des robots en parallèle présente les avantages suivants [33] :

- Il n'est pas nécessaire que chaque joint soit actionné directement par des moteurs individuels, d'où une contribution moindre à la masse du robot. Les axes peuvent à leur tour être allégés.
- En permettant à au moins certains moteurs d'avoir une base fixe, ces derniers peuvent être plus gros et plus puissants. Ainsi, la capacité du robot par rapport à sa masse peut être augmentée
- En général, les robots parallèles nécessitent moins de transmission entre les actionneurs et les joints, ce qui diminue le coût de production et améliore la précision du robot.

Cependant, il est largement reconnu que ce type de robot présentent généralement les inconvénients suivants [33] :

- L'espace de travail est très petit par rapport aux robot en série.
- L'espace de travail peut présenter plusieurs positions singulières, ce qui réduit considérablement les applications de ce type de robot.
- Un contrôle simultané est requis pour tout ou la majorité des actionneurs du robot.

- Pour augmenter le volume de l'espace de travail, les liaisons du robot sont rallongées, ce qui produit des effets indésirables de flexibilité.

Dans l'industrie, les robots les plus utilisés sont des robots anthropomorphes avec 6 degrés de liberté [45]. En général, les robots en série sont utilisés par les industriels car ils présentent les avantages suivants [33] :

- Leur modèle cinématique est relativement simple,
- Ils ont généralement un grand espace de travail, ce qui permet d'utiliser ce type des robots pour des tâches de "pick and place" par exemple,
- Les opérateurs humains peuvent facilement s'identifier avec une chaîne cinématique en boucle ouverte qui peut être comparé au bras humain. C'est un avantage important dans la programmation du robot, l'apprentissage des tâches au robot, etc,
- Chaque actionneur bénéficie d'une indépendance totale,
- Les modèles cinématiques directes et inverses sont bien connues et la dynamique a été analysé à fond pour plusieurs cas.

Cependant, l'utilisation des robots en série présente certains inconvénients [33] :

- Les manipulateurs en série nécessitent un actionneur pour chaque articulation créant ainsi des inerties indésirables.
- Dans le cas où les actionneurs sont montés au niveau des joints, chaque actionneur du robot doit être capable de compenser le poids des composants en porte-à-faux, ce qui cause un surdimensionnement du robot.
- A cause de l'inconvénient précédent, les robots en série ont un mauvais rapport entre la masse utile et la masse du manipulateur.

### 1.3.3 Applications des robots sériels

Les robots en série sont utilisés pour les applications qui nécessitent des tâches répétitives sur une longue période, pour les opérations dans des environnements dangereux (présence de rayonnement nucléaire, application sous-marine ou à l'espace, etc.) et pour les travaux de précision avec un haut degré de fiabilité. Ils peuvent également être utilisés par les personnes handicapées pour surmonter une partie de leurs handicaps physiques.

Toutefois, les robots industriels sont utilisés pour d'autres applications comme le chargement et déchargement des machines (Figure 1.8), la palettisation, le moulage sous pression, le forgeage (Figure 1.9), travail sur les presses, soudage à l'arc et soudage par points (Figure 1.10), le traitement thermique des pièces, la pulvérisation (peinture, résine époxy et autres revêtements)(Figure 1.11), l'usinage (Figure 1.12), le meulage (Figure 1.31), le polissage, le moulage par injection, la découpe (laser, plasma), l'inspection, le montage , l'emballage et la manutention (Figure 1.13).





FIGURE 1.8: Chargement des machines



FIGURE 1.9: Forgeage robotisé



FIGURE 1.10: Soudage robotisé



FIGURE 1.11: Peinture robotisée

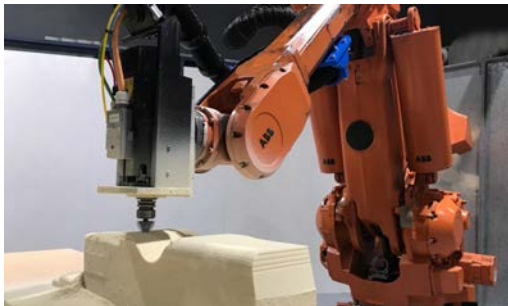


FIGURE 1.12: Usinage robotisé



FIGURE 1.13: Manutention robotisée

Selon la Fédération Internationale de la Robotique (IFR), tous les robots industriels installés, environ 33% sont en montage, 25% sont utilisés dans différentes applications de soudage et 2,8% en emballage / palettisation, etc.

#### 1.3.4 Les robots ABB IRB

Des industriels dans différents secteurs ont choisi pour la robotisation de leurs productions des robots du fabricant ABB. Après avoir largement testé différents concepts, ABB a décidé d'adopter un robot électrique. Le programme de commande du premier prototype du robot, nommé IRB 6, a été installé dans le nouveau micro-ordinateur *Intel8008*. En raison de la capacité de stockage limitée, le programme était extrêmement comprimé et compliqué [83]. Les robots ABB IRB incorporent de nouvelles caractéristiques

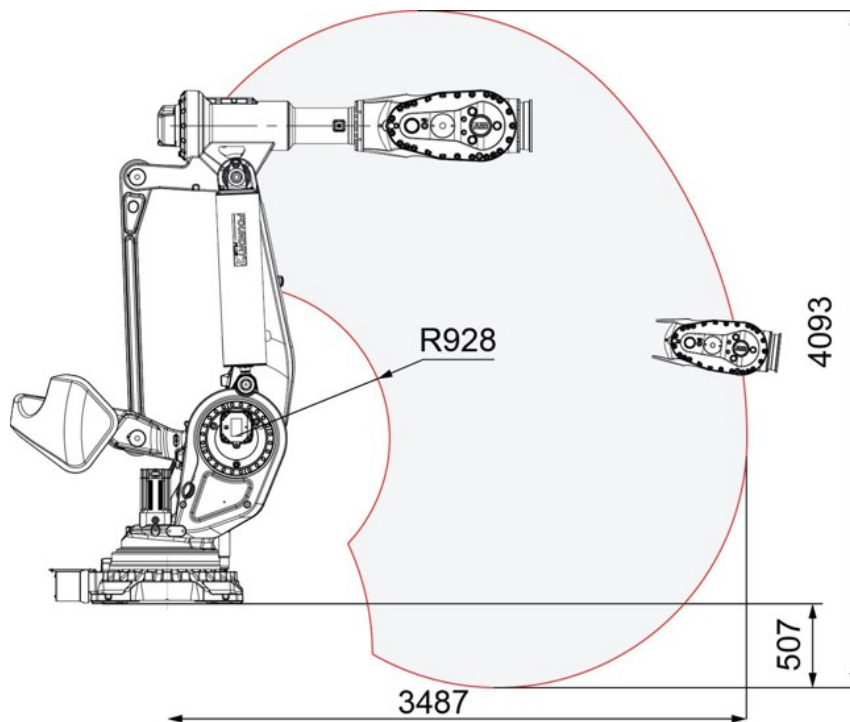


FIGURE 1.14: Espace de travail ABB IRB 8700

techniques :

- Le robot est entièrement électrique (à la fois la transmission et les systèmes de contrôle)
- Il a une structure anthropomorphique
- Le contrôle est réalisé par un micro-ordinateur

Le modèle suivant, IRB 60, a été introduit en 1975, et les deux IRB 6 et IRB 60 ont été inclus dans la gamme de produits ABB pendant 17 ans, ce qui est un record dans le milieu des robots industriels. [83].

Le robot utilisé dans ce travail est ABB IRB 8700-550/4.20. Ce robot peut manipuler des charges allant jusqu'à 550 kg. IRB 8700 présente plusieurs avantages [38]

:25 % plus rapide que les robots de la même catégorie, Une grande fiabilité, Un espace de travail large (Figure 1.14), Étanchéité et protection des câbles améliorées, etc.

## 1.4 Programmation des robots industriels

Les fabricants des robots industriels fournissent un langage de programmation et une bibliothèque de fonctions pour permettre aux utilisateurs d'exploiter les fonctionnalités du robot et du contrôleur du robot. La plupart des fabricants proposent des environnements de programmation qui offrent des outils de débogage pour faciliter le processus de développement de programmes. Les fabricants les plus avancés



FIGURE 1.15: Teach pendant ABB

proposent également des outils de programmation basés sur PC en ligne et hors ligne, qui permettent aux utilisateurs de développer du code directement dans le contrôleur (en ligne) à l'aide d'un PC distant. Alternativement, le code peut être développé hors ligne et téléchargé sur le contrôleur lorsqu'il est prêt. L'unité Teach Pendant (TPU) (figure 1.15) peut également être utilisée pour programmer et paramétrer le système. Ces appareils sont essentiellement des unités informatiques exécutant un système d'exploitation local (Windows CE, par exemple) qui offrent à plusieurs types d'utilisateurs la possibilité de programmer, paramétrer et utiliser le robot. Les contrôleurs de robots réels sont également des systèmes multitâches, qui permettent à l'utilisateur de développer et d'exécuter plusieurs tâches simultanément. Cela permet de nouveaux niveaux de fonctionnalités, offrant de nouvelles possibilités au développeur du système. En utilisant, les mécanismes de communication inter-tâches disponibles et communs, ainsi que la possibilité de réguler les priorités des tâches (pourcentage du temps CPU), il est possible de configurer des applications pour gérer tous les défis posés par les cellules de fabrication industrielle.

#### 1.4.1 Différentes méthodes de programmation des robots

**Apprentissage par le pupitre de programmation** Parmi les méthodes les plus populaires pour la programmation des robots est la programmation sur les pupitres de programmations. Pour programmer le robot, l'opérateur le déplace d'un point à un autre, en utilisant les boutons du pupitre. Puis l'opérateur développe un programme en utilisant ces points enregistrés (type de la trajectoire, vitesse de déplacement, ...) En utilisant le pupitre, l'opérateur peut donc créer, modifier et exécuter des programmes développés.

##### **Avantages des pupitres de programmation**

- La plupart des robots industriels sont fournis avec des pupitres de commande, ce qui rend leurs utilisation familière pour les opérateurs.

- Ils permettent un positionnement précis, car le robot peut être programmé en utilisant des coordonnées dans le repère robot pour pièce.
- La programmation est rapide, en utilisant le pupitre, pour des tâches simples (pulvérisation de la peinture sur une surface plane par exemple).

#### **Inconvénients des pupitres de programmation**

- Cette méthode interrompt le système robotique à cause du temps d'arrêt du robot programmé, car le robot doit être mis en mode « apprentissage ». Toutes les tâches affectées au robot sont mis en pause jusqu'à la fin de la programmation.
- Nécessite des formations pour apprendre et programmer.
- Peut être difficile pour des techniciens peu familiers avec la programmation.

**Simulation/programmation hors ligne** La programmation hors ligne, ou simulation, est la plus souvent utilisée dans la recherche en robotique pour s'assurer que les algorithmes de contrôle avancés fonctionnent correctement avant de les implémenter sur le robot. Cependant, il est également utilisé dans l'industrie pour réduire les temps d'arrêt. La programmation hors ligne peut être particulièrement utile pour les PME, car les robots sont plus susceptibles d'être reconfigurés plusieurs fois que dans les environnements de production de masse. La programmation hors ligne signifie que cela n'interfère pas trop avec la production. La programmation hors ligne permet au robot d'être programmée à l'aide d'une maquette virtuelle du robot et de la tâche. Si le logiciel de simulation est intuitif à utiliser, cette méthode peut être un moyen rapide de tester une idée avant de la déplacer vers le robot. Le logiciel de simulation et de programmation hors ligne d'ABB, RobotStudio, permet la programmation du robot sur un ordinateur sans arrêter la production. RobotStudio est basé sur ABB VirtualController, qui est une copie exacte du logiciel utilisé sur le robot.

#### **Avantages de la programmation hors ligne**

- Réduit les temps d'arrêt requis pour la programmation du robot. Les programmes sont développés hors ligne, de sorte que le robot ne doit être arrêté que pendant le téléchargement et le test du nouveau programme.
- Peut être assez intuitif, surtout si le robot peut être déplacé dans un environnement de CAO 3D avec des techniques de glisser-déposer.
- Facile à tester de nombreuses solutions différentes du même problème, ce qui serait inefficace pour les méthodes de programmation en ligne.

#### **Inconvénients de la programmation hors ligne**

- Des erreurs de représentation du robot ou de l'environnement peuvent apparaître lors de l'implémentation du programme développé en hors ligne, ce qui nécessite de réaliser des modifications de ce programme.
- Bien que cette méthode réduit le temps d'arrêt du robot, elle augmente le temps nécessaire pour développer, tester puis implémenter le programme du robot.

**Apprentissage par démonstration** L'apprentissage par démonstration et les méthodes plus spécifiques comme « Kinetiq teaching » représentent des solutions intuitives pour la programmation des robots. Comme pour le pupitre de programmation, l'opérateur enregistre chaque position souhaitée du robot en manipulant l'effecteur du robot manuellement ou à l'aide d'une manette. L'enregistrement est effectué par l'intermédiaire de l'interface du pupitre de commande. De nombreux constructeurs ont intégré cette méthode de programmation dans leurs robots collaboratifs.

#### **Avantages de l'apprentissage par démonstration**

- Méthode plus rapide que l'apprentissage à l'aide du pupitre de programmation.
- Plus intuitive que les deux autres méthodes. Le robot réalise les tâches de la même manière qu'un opérateur.
- Permet de réduire le temps de développement et de test du programme robot pour certaines applications (peinture et soudage par exemple).

#### **Inconvénients de l'apprentissage par démonstration**

- Comme pour l'apprentissage par le pupitre de commande, cette méthode ne permet pas de réduire le temps d'arrêt.
- L'enregistrement des points et vitesses du robot devient pénible et imprécis pour les tâches complexes nécessitant un grand nombre de point de passage du robot.

## 1.5 Capteurs des robots industriels

Un robot peut être équipé de deux types de capteurs, des capteurs internes, qui permettent de mesurer sa propre configuration, vitesse, . . . et des capteurs externes, qui permettent à la machine de se positionner et interagir avec son environnement. Cette partie porte sur les types de capteurs internes utilisés, qui mesurent le mouvement, la vitesse, l'accélération et le jerk.

### 1.5.1 Capteurs internes

#### **Capteur de mouvement ou de position**

##### **Capteur de mouvement rectiligne**

**Capteur potentiomètre** Le capteur le plus couramment utilisé est le potentiomètre rectiligne, qui peut fonctionner sur deux principes différents : potentiomètre avec piste enroulée et potentiomètre en conducteur plastique ou potentiomètre hybride. La variation de résistance entre le début de la piste et le curseur permet de mesurer le mouvement (voir figure 1.16). La piste en conducteur plastique ne présente pas le même problème de discontinuité que la piste enroulée lorsqu'il y a passage d'une boucle à l'autre ; une impédance infiniment variable est donc obtenue. Ces potentiomètres hybrides sont également réalisés

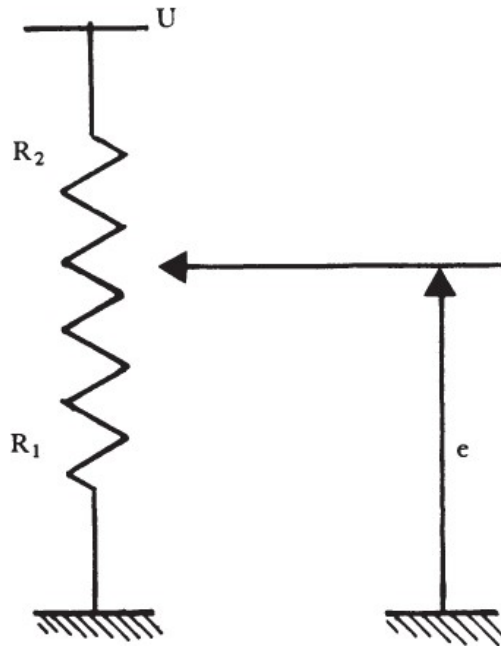


FIGURE 1.16: schéma simplifié d'un potentiomètre rectiligne

avec jusqu'à quatre pistes, et permettent linéarité de 0,2% de la pleine échelle à atteindre. Ils permettent d'attendre une linéarité entre 0.5% à 5% en fonction des matériaux utilisés, le modèle, ...

$$e = U \times \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (1.1)$$

Ces potentiomètres sont produits avec des courses entre 25mm jusqu'à 1m. Le mouvement de rotation peut être mesuré aussi à l'aide de ce capteur rectiligne en utilisant un système pignon-crémaillère.

**Linear Variable Differential Transformer (LVDT)** Le LVDT a trois bobines solénoïdales placées bout à bout autour d'un tube. La bobine centrale est la principale et les deux bobines externes sont les secondaires supérieure et inférieure. Un noyau ferromagnétique cylindrique, attaché à l'objet dont la position doit être mesurée, glisse le long de l'axe du tube. Un courant alternatif entraîne le primaire et provoque l'induction d'une tension dans chaque secondaire proportionnelle à la longueur du noyau reliant le secondaire (voir figure 1.17). La fréquence est généralement comprise entre 1 et 10 kHz.

### Capteur de mouvement angulaire

**Capteur potentiomètre et capteur LVDT** Ces capteurs potentiomètres fonctionnent selon les mêmes principes que les potentiomètres rectilignes et peuvent atteindre un degré de linéarité élevé.

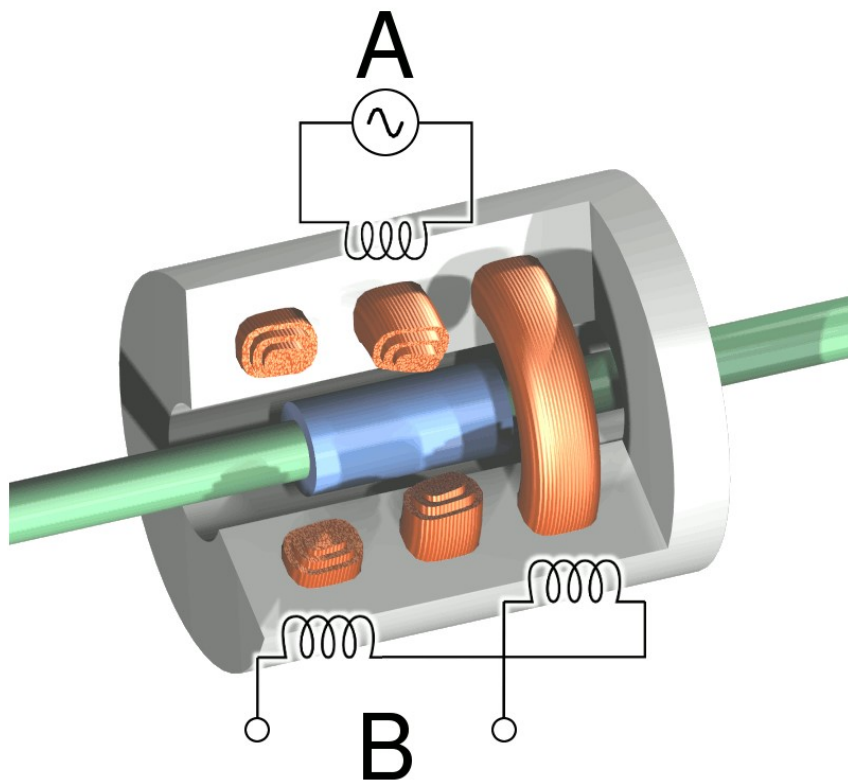


FIGURE 1.17: schéma simplifié d'un potentiomètre rectiligne

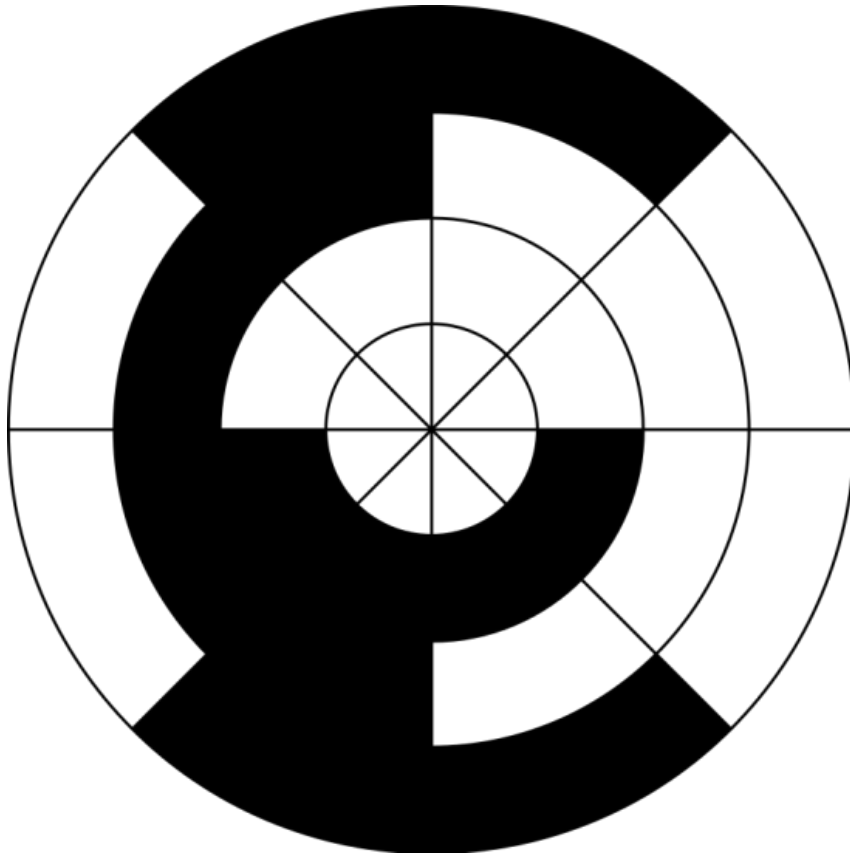


FIGURE 1.18: Codeur optique absolu

**Codeur optique** L'information numérique provient d'un système généralement optique comportant une source de lumière, un disque strié et un photo-détecteur. Nous pouvons différencier entre les codeurs incrémentaux et absolus, suivant le code qui a été utilisé pour mesurer et transmettre l'information de déplacement. **Codeur optique incrémental** : Une cellule photoélectrique ou un photoconducteur détecte la variation du motif provoquée par le mouvement d'un disque, sur lequel sont régulièrement espacées des lignes noires, devant une source lumineuse. Ce signal optique alternatif est transformé en une série d'impulsions électriques. Habituellement, les codeurs incrémentaux ont deux sorties principales, générant chacune un nombre défini d'impulsions par tour. Ce nombre détermine la précision du capteur. **Codeur absolu** : Il prend la forme d'un disque sur lequel sont disposés des cercles en noir et blanc, de sorte que sur n'importe quel rayon la succession de zones en noir et blanc constitue une représentation binaire de l'angle entre l'arbre d'entraînement et une origine connue (voir figure 1.18).

**Capteur de force/contrainte**



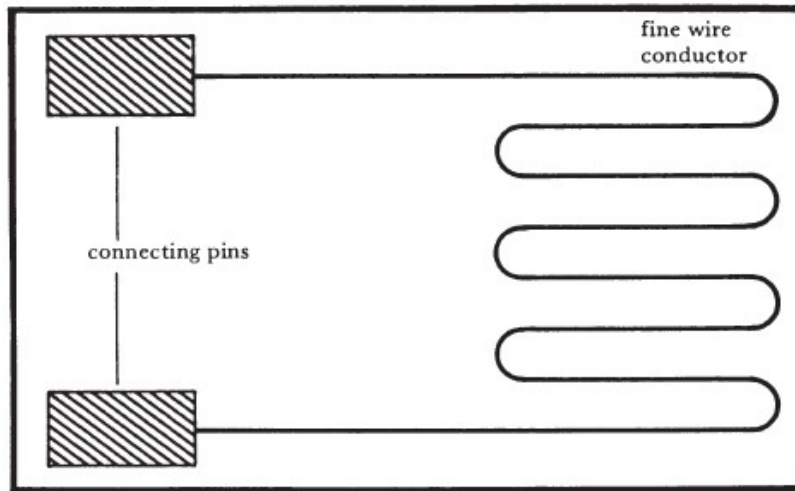


FIGURE 1.19: Jauge de déformation

**Jauge de déformation** Un exemple des jauges de déformation est présenté dans la figure 1.19. Les jauges extensométriques sont des capteurs de contraintes, généralement utilisés pour mesurer la déformation d'une structure mécanique afin de calculer la pression qui y est exercée. La jauge se présente sous la forme d'un conducteur électrique très fin sur un support, comme illustré à la figure 10.11. La forme en zig-zag permet à la plupart du conducteur d'être orienté dans une direction préférée. Lorsque la jauge est utilisée, les déformations provoquent une variation de sa résistance, qui peut être mesurée.

**Capteur piézoélectrique** La piézoélectricité utilise la propriété de certains cristaux qui, lorsqu'ils sont mis sous pression, génèrent des charges électriques sur deux faces opposées proportionnelles à l'effort appliqué. En superposant des couches parallèles de ces cristaux, généralement le quartz, des capteurs multidirectionnels sont obtenus. Les capteurs piézoélectriques sont sensibles à la fois aux forces et couples appliqués suivant un axe.

**Capteur d'accélération** Les capteurs d'accélération sont utilisés dans le contrôle dynamique des robots industriels. La mesure peut être effectuée de plusieurs façons :

- Elle peut être déduite par des mesures de vitesse. Cette méthode peut être insatisfaisante si le rapport signal/bruit est important.
- Elle peut être déduite par des mesures de force créées par l'accélération d'une masse connue.

### 1.5.2 Capteurs externes

Un robot industriel est conçu pour effectuer des tâches dans un espace de travail. La fonction des capteurs externes est de fournir des informations sur l'environnement et de mettre ces paramètres à la

disposition du robot. La nature de ces paramètres dépend des tâches à effectuer et des informations données au robot lors de la description de la tâche. Les capteurs de vision, de force et de proximité sont les capteurs les plus utilisés par les industriels. La suite de ce paragraphe présente une description générale de ces types de capteurs.

### **Capteur de force**

Il existe trois méthodes principales pour mesurer les forces externes appliquées sur l'effecteur du robot :

- L'environnement peut être équipé de capteurs : l'objet peut être, par exemple, en contact avec une plateforme instrumentée. La plateforme est équipée de plusieurs capteurs de force qui permettent d'identifier la position du point de contact de l'effecteur/outil et la plateforme et les six composants de force et couple suivant le repère relié à la plateforme.
- Le poignet du robot est équipé d'instruments : Dans cette configuration, le capteur de force est monté au poignet du robot. En combinant les informations issues d'un minimum de 6 éléments de mesure (jauges de déformation par exemple), ce capteur permet de mesurer les six composants de force et moment appliquées sur l'effecteur.
- Modification du couple lorsque les actionneurs sont utilisés : la force de réaction peut être calculée connaissant la variation des couples moteurs du robot.

### **Capteur de proximité/distance**

Ces capteurs permettent de détecter la présence d'un objet dans l'espace de travail du robot, mais également d'estimer la distance entre le capteur et l'objet. Les principales méthodes utilisées impliquent les ultrasons et les techniques infrarouges et techniques utilisant des jets d'air.

### **Capteur à ultrasons**

Des capteurs à ultrasons peuvent être utilisés comme détecteurs de présence et pour mesurer des distances. Ces capteurs mesurent le temps entre l'émission et la réception des ondes ultrasonores de l'objet. Ce type de capteurs peut être adapté pour mesurer des distances courtes (3mm à 150mm) ou des distances longues (50mm à 2000mm). Ils sont le plus souvent utilisés dans les robots mobiles pour éviter les obstacles ou dans les pinces de gros robots.

### **Capteur infrarouge**

Un émetteur (souvent une diode infrarouge) envoie un faisceau infrarouge vers l'objet, qui le réfléchit et le renvoie vers un récepteur (souvent un phototransistor). Pour contrer les effets de perturbation de la lumière ambiante, l'émission de lumière est modulée ou pulsée (quelques kilohertz) et filtrée lorsqu'elle est reçue.

## Capteur de vision

Les solutions basées sur l'image sont de plus en plus au centre des préoccupations des chercheurs. L'utilisation des capteurs de vision sur les robots industriels élargissent d'une manière considérable les champs d'applications de ces machines. Grâce ces capteurs, le robot devient capable de localiser et identifier à l'avance les objets dans l'environnement. Cela simplifie la planification de la trajectoire (pour les robots mobiles par exemple) et supprime le besoin d'utiliser des accessoires mécaniques tels que les guidages d'objets (planification de la trajectoire et manipulations des pièces pour les robots industriels par exemple). Les capteurs de visions sont aussi utilisés de plus en plus pour la mesure et contrôle de la qualité des pièces.

## 1.6 Description du procédé de meulage

### 1.6.1 Définition du procédé de meulage

Une opération de meulage est un processus dans lequel l'excès de matériau est retiré d'une pièce par particules abrasives dures. L'homme préhistorique a découvert qu'il pourrait affûter ses outils de coupe en les frottant contre des pierres à poncer.

Aujourd'hui, en utilisant un matériau de liaison approprié, les petites particules abrasives se présentent sous la forme d'un disque ou d'une roue. Les grains abrasifs sur la meule font office d'outils de coupe. Lors du meulage, la meule en rotation est amenée en contact avec la surface de la pièce. Les grains abrasifs en contact avec le métal éliminent de minuscules éclats de la pièce à meuler, comme indiqué dans la figure 1.20.

Ce procédé est utilisé en finition afin d'améliorer l'état de surface des pièces (réduire la rugosité  $R_a$  ou l'ondulation de la surface par exemple). Le meulage est caractérisé par un taux d'enlèvement de matière faible en comparaison avec les autres procédés et par l'usinage à grandes vitesses de coupe. Ce procédé peut être appliqué sur des matériaux très durs ou difficilement usinables tels que les aciers trempés, les céramiques, verre, etc. Les meules (outils de meulage) sont typiquement composées des éléments suivant [15] :

- **Les grains** : Le grain abrasif est l'élément qui effectue effectivement l'activité de coupe dans le processus de meulage. Le choix du grain abrasif dépend du matériau meulé.
- **Le liant** : Le rôle du liant est de tenir les grains ensemble. Le type du liant dépend de la vitesse de fonctionnement de la roue, le type d'opération et la finition de la surface requise.
- **Les porosités** : Elles existent entre les grains et le liant, dans le but de permettre l'évacuation des copeaux.

### 1.6.2 Désignation des meules

La désignation standard des meules fournit à l'utilisateur des informations clés concernant la construction de la meule, y compris les informations suivantes :

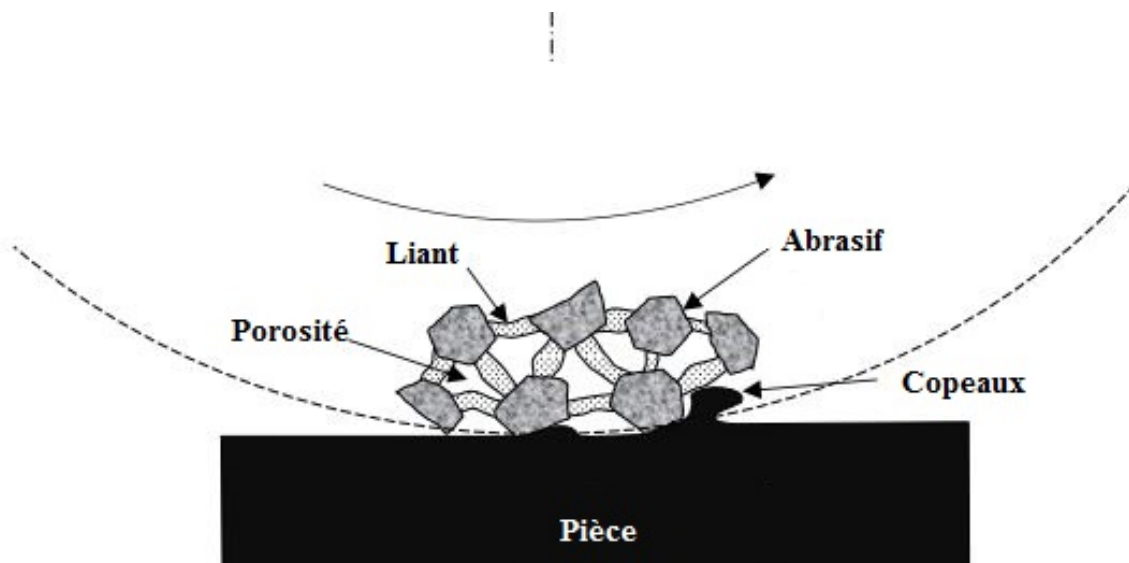


FIGURE 1.20: Illustration des composants de la meule et la formation des copeaux [15]

- Le type de grains abrasifs
- Le grade : défini la taille des grains abrasifs
- La dureté de la meule
- Le numéro de structure de la roue
- Le type du liant

La figure 1.21 illustre la désignation de la meule utilisée dans ce travail pour réaliser des essais de meulage.

La désignation est selon la norme française NF EN 12413. Elle décrit la forme de la meule, suivi du type d'abrasif utilisé, puis le granulométrie  $M$ , la dureté de la meule, le liant et la vitesse maximale recommandée en  $m/s$ . La meule utilisée contient comme abrasif le corindon (un minéral formé d'oxyde d'aluminium).

L'oxyde d'aluminium a la propriété de mieux se fragmenter que l'alumine naturel. Ainsi, des arêtes nouvelles se forment seules ce qui réduit la proportion de labourage dans le travail de la meule (phase de meulage expliquée plus en détail dans la partie 1.6.3). La coupe est dite « froide » parce qu'à iso-enlèvement de matière, la puissance dissipée dans l'interface meule/pièce est réduite. Selon le fabricant, ces meules nécessitent de moins fréquents diamantages (reprise de la meule usée afin d'assurer la bonne géométrie et de régénérer la qualité abrasive).

Connaissant la granulométrie  $M$ , la taille de grain d'abrasif peut être estimée à partir de la relation suivante (1.2) :

$$d_g = 15.2 M^{-1} [mm] \quad (1.2)$$

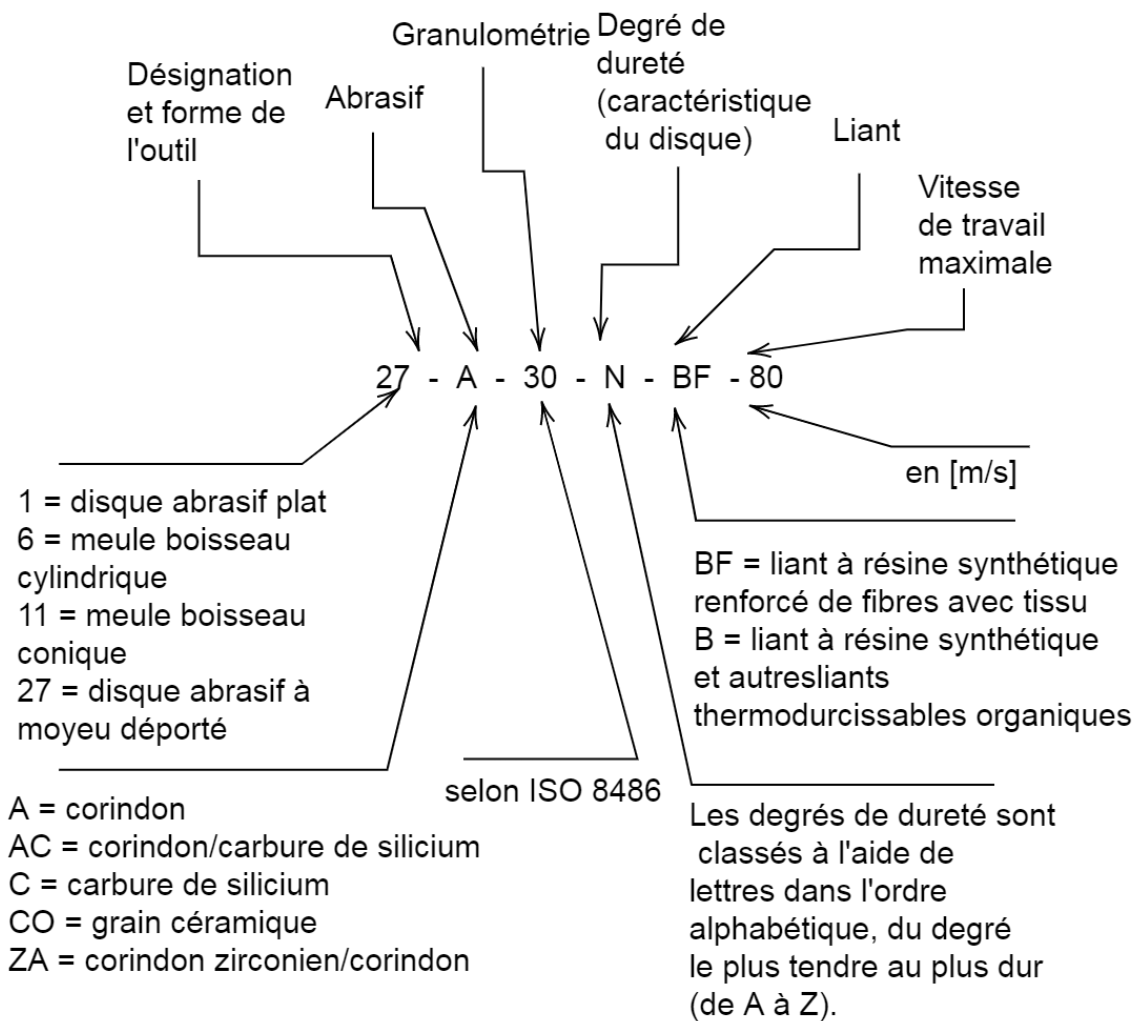


FIGURE 1.21: Désignation selon NF EN 12413 des meules

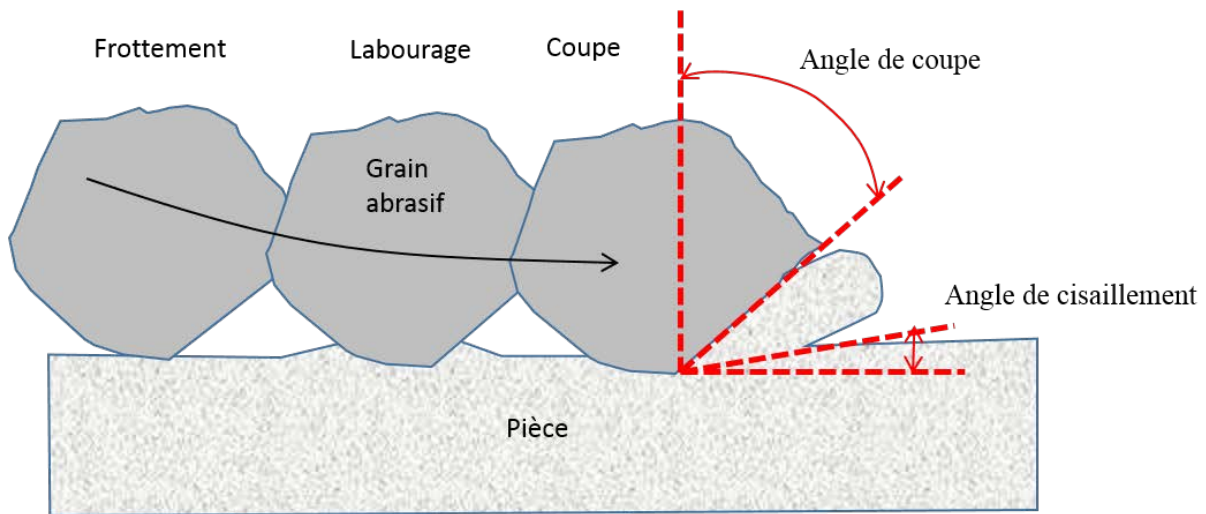


FIGURE 1.22: Angle d'attaque (de coupe) et angle de cisaillement pour un grain abrasif [15]

### 1.6.3 Le principe de fonctionnement

Comme tous les autres procédés d'usinage, l'enlèvement de matière par meulage est réalisé par processus de formation de copeaux, cependant, à une échelle beaucoup plus fine. La géométrie de l'outil de coupe et l'interaction outil/pièce au meulage ne sont pas aussi bien définis que dans d'autres procédés d'usinage tels que le tournage et le fraisage. Il y a des facteurs majeurs qui différencient entre l'action des grains abrasifs et les autres outils :

- Il existe une variation significative de la géométrie de l'abrasif le long de la circonférence de la meule.
- Les grains abrasifs sont distribués et orientés stochastiquement.
- La position radiale des grains abrasifs sur la surface externe de la meule varie, ce qui signifie que les arêtes tranchantes des grains sont positionnées, au moment du contact avec la pièce, dans des positions différentes. Chaque arête a sa profondeur de passe propre.
- La majorité des grains abrasifs ont un angle d'attaque fortement négatif; la moyenne est de  $-60$  degrés, ce qui entraîne un très faible angle de cisaillement (voir figure 2.4).
- La vitesse de coupe en meulage est très élevée, la vitesse de coupe typique pour meulage est de 20-30 m/s et peut atteindre 120 m/s dans les cas les plus extrêmes.

Il existe trois phases d'interaction grain / pièce. Ceux-ci incluent le frottement, le labourage et la coupe [37, 56] comme indiqué à la figure 1.22.

Au début de l'interaction grain / pièce, la profondeur de coupe est très faible, ce qui entraîne le frottement du grain avec la surface de la pièce, entraînant une déformation élastique de la pièce. Cette phase est nommée frottement.

La deuxième phase, appelée labourage, a lieu lorsque la profondeur de coupe augmente jusqu'au point où la déformation élastique devient plastique et le matériau coule autour des arêtes de coupe.

La dernière phase de coupe est lorsque la profondeur de passe augmente jusqu'au point où le copeau est formé.

Ces mécanismes rendent l'action des grains individuels inefficace par rapport à un outil de coupe conventionnel. Ceci est une des raisons pour lesquelles l'énergie consommée par volume de matériau retiré lors du meulage est plus grande que dans d'autres processus d'usinage.

## 1.7 Machines/outils permettant le meulage

Une machine de meulage est un outil électrique industriel qui utilise un disque/bande abrasive pour couper ou enlever le matériau.

### 1.7.1 Types des machines de meulage

#### **Touret de meulage**

C'est une machine fixe qui met en rotation une ou deux roues abrasives. Cet outil est utilisé pour meuler, polir, affûter des pièces de petites dimensions, selon le type de roue qui est montée.

#### **Meuleuse à bande**

Le meulage à bande est utilisé pour la finition des pièces produites. Cet outil fixe utilise une bande enrobée de particules abrasifs (figure 1.23). La bande est mis en mouvement sur la surface à meuler pour enlever la matière.

#### **Meuleuse à cadre pivotant**

Les meuleuses à cadre pivotant, illustrées dans la figure 1.24, sont des meuleuses utilisées pour des opérations de meulage nécessitant un grand taux d'enlèvement de matière et pour les pièces industrielles de grandes dimensions. Les meuleuses à cadre pivotant sont fixées aux plafonds des ateliers à l'aide des chaînes à cause de leurs grandes masses. La pièce meulée étant fixe, l'opérateur oriente la meule en pivotant l'outil par rapport au point d'ancrage.

#### **Rectifieuse plane**

Les rectifieuses sont des machines qui permettent de réaliser une opération de rectification. La rectification permet de produire des pièces de très bonne qualité de surface et de bonne qualité dimensionnelle.

Il existe trois types de rectifieuses :

- Rectifieuse plane : utilisée pour le surfacage des pièces présentant des surfaces planes (figure 1.25).



FIGURE 1.23: Meuleuse à bande





FIGURE 1.24: Meuleuse à cadre pivotant

- Rectifieuse cylindrique : utilisée pour la rectification des pièces de révolution. La pièce ainsi que la meule sont simultanément en rotation.
- Rectifieuse de profil : Ces machines sont utilisées pour la fabrication des roues dentées et des outils de coupe. L’empreinte laissée sur la surface des pièces dépend du profil de la meule.

Les rectifieuses peuvent être commandées numériquement pour rectifier tout type de pièces profilées, de moules ou d’outils complexes (figure 1.26). Ces machines *CNC* de haute précision sont parfaitement adaptées à la rectification de dentures, de crémaillères ou encore d’aubes de turbines.

### Meuleuse angulaire

Les meuleuses d’angle font partie des équipements standard dans les ateliers de fabrication de produits métalliques et sur les chantiers de construction. Ils sont également fréquents dans les ateliers d’usinage. La figure 1.32 présente quelques utilisations de cet outil.

Cet outil peut être utilisé manuellement (Figure 1.28) ou monté sur des machines CN ou sur des robots (Figure 1.31). Une meuleuse d’angle est également appelée meuleuse latérale ou meuleuse à disque. Des disques de meulage rigides peuvent être utilisés pour éliminer un grand volume de matériau d’une pièce ; la rigidité de la meule permet d’exercer des forces de meulage importante ce qui permet d’aug-



FIGURE 1.25: Rectifieuse plane



FIGURE 1.26: Machine CNC de rectification

menter le taux d'enlèvement de matière considérablement.

Les opérations utilisant les meuleuses à angle agissent généralement d'opération de finition et donc peu de métal est enlevé (une profondeur de passe d'environ 0,25 à 0,75 mm). Cependant, il existe certaines applications d'ébauche dans lesquelles le meulage élimine assez rapidement de gros volumes de métal. Les meuleuses angulaires peuvent être alimentées par un moteur électrique, un moteur à essence ou à l'air comprimé. Le moteur entraîne à angle droit une tête à engrenage sur laquelle est monté un disque abrasif ou un disque tranchant plus fin, qui peuvent être remplacés en cas d'usure.

La meuleuse d'angle est équipée de grands roulements pour contrer les forces latérales générées lors de la coupe. Il existe de nombreux types de meules utilisés pour différents matériaux et tâches (lame de tronçonnage, disque en diamant, etc) et de nombreuses géométries (meule conique, disque, etc).

Les meuleuses d'angle ont généralement une protection réglable et une poignée latérale pour une utilisation à deux mains. Bien que développés à l'origine comme outils pour disques abrasifs rigides, la disponibilité d'une source d'alimentation interchangeable a encouragé leur utilisation avec une grande variété de disques et d'accessoires. Certaines meuleuses d'angle, en fonction de leur plage de vitesse, peuvent être utilisées comme ponceuses, en utilisant un disque de ponçage avec un support. Le système

de support est généralement constitué de plastique dur, de résine phénolique ou de caoutchouc mi-dur en fonction de la flexibilité souhaitée. Ainsi, le meulage est un domaine diversifié. Cependant, nous nous intéressons principalement, dans ce travail, qu'au meulage avec une meuleuse à angle à disques abrasifs rigides alimentée par un moteur électrique.

### 1.7.2 Les avantages et inconvénients des meuleuses angulaires

Les meuleuses angulaires présentent plusieurs avantages qui lui ont permis de devenir un outil présent dans tous les ateliers. On peut citer par exemple :

- La meuleuse angulaire est un outil polyvalent.
- Les disques des meuleuses angulaires sont adaptés à réaliser un enlèvement efficace d'excès de matière.
- L'outil a un bon rapport puissance/poids.
- Le coût des meules est très faible, ce qui permet de diminuer le coût total de production.
- Une large gamme de matériaux peut être usinée. Le traitement des matériaux ordinaires ou des matériaux durs est possible.
- L'outil a un poids et un volume faibles, ce qui rend possible le montage à l'effecteur d'un robot industriel.

Cependant, l'outil a quelques inconvénients :

- L'outil est très dangereux et peut causer des blessures très graves aux opérateurs.
- Un taux d'enlèvement de matière est réduit par rapport aux autres procédés d'usinage.
- Pour des tâches manuelles, la force de meulage appliquée par les opérateurs à l'aide de cet outil n'est pas maîtrisée, ce qui produit des résultats inconsistants.

## 1.8 Cinétique du meulage robotisé

Selon les caractéristiques de pièces, il existe deux options de montage : soit la pièce est serrée par le robot, l'outil est fixé ; soit la pièce est fixée et l'outil est monté sur le robot. Généralement, lorsque la dimension des pièces est plus grande que celle d'outil, la pièce est fixée et l'outil est monté sur le robot.

La figure 1.33 illustre la cinématique de l'opération de meulage de surface d'une pièce volumineuse métallique. Dans ce cas, les mouvements de coupe et d'avance sont donnés à la meule.

Une meule de diamètre  $d_s$  enlève la matière de la pièce avec une profondeur de passe de meulage  $d$ . La meule est inclinée d'un angle de tilt  $\alpha$  par rapport à la pièce. Un grain abrasif individuel sur le périphérique de la roue se déplace à une vitesse tangentielle  $V_r(r)$  qui dépend de la distance du grain par rapport au centre de la meule, de plus puisque la meule se déplace horizontalement, la vitesse du grain



FIGURE 1.27: Rectifieuse cylindrique



FIGURE 1.28: Meuleuse angulaire



FIGURE 1.29: Ponçage robotique



FIGURE 1.30: Tronçonnage robotique

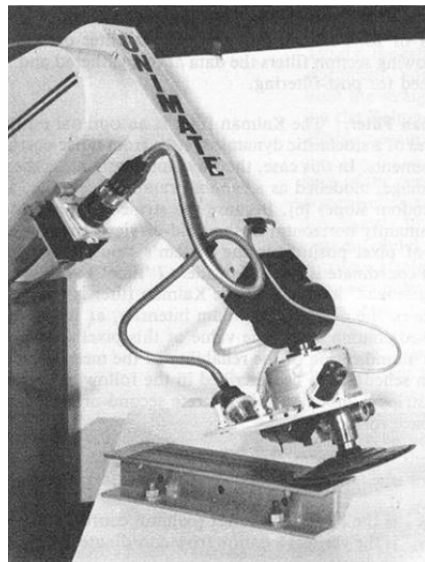


FIGURE 1.31: Robot de meulage angulaire [84]



FIGURE 1.32: Applications de la meuleuse angulaire : Tronçonnage ; Surfaçage ; Polissage.

a aussi une vitesse  $V_s$  suivant l'axe  $y$  du repère lié à la pièce . La pénétration de la meule dans la pièce meulée crée une zone de contact apparente où se produit l'enlèvement de la matière. Les grains actifs, qui participent au processus d'enlèvement de matière, sont supposés être en contact avec la pièce le long de cette zone. L'angle du tilt et la position de la surface de contact par rapport au disque de meulage sont les deux paramètres géométriques les plus importants en meulage angulaire.

En négligeant les erreurs de positionnement de la meule et les déformations de la pièce et de la meule, la surface de contact  $s$  peut être approximée par un segment circulaire. La position de la surface est exprimée comme :

$$h = \frac{d}{\sin(\alpha)} \quad (1.3)$$

L'angle de contact délimitant  $\theta$  s'exprime comme :

$$\theta = 2 \arcsin \frac{h}{R_s} \quad (1.4)$$

La surface  $s$  est calculée selon l'équation :

$$s = \frac{R_s^2}{2} (\theta - \sin \theta) \quad (1.5)$$

La figure 1.34 représente la projection de la meule sur le plan  $ZX$ . La projection forme une ellipse de grand rayon  $a = \frac{d_s}{2}$  et de petit rayon  $b = a \sin \alpha$ .

La surface  $s_e$  représente la projection de la section de contact  $s$  sur le plan  $ZX$  (plan perpendiculaire

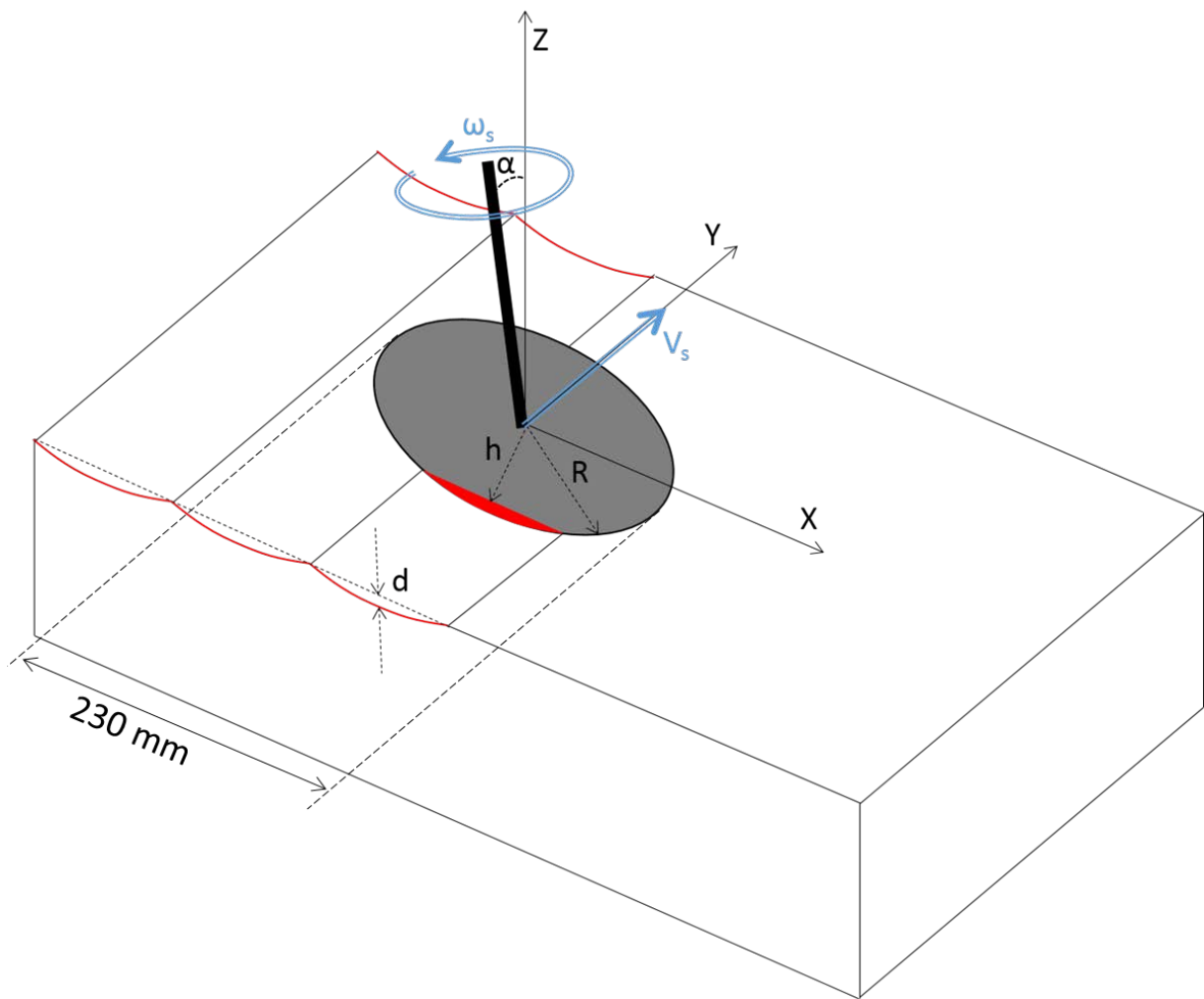


FIGURE 1.33: Surfaçage en meulage angulaire

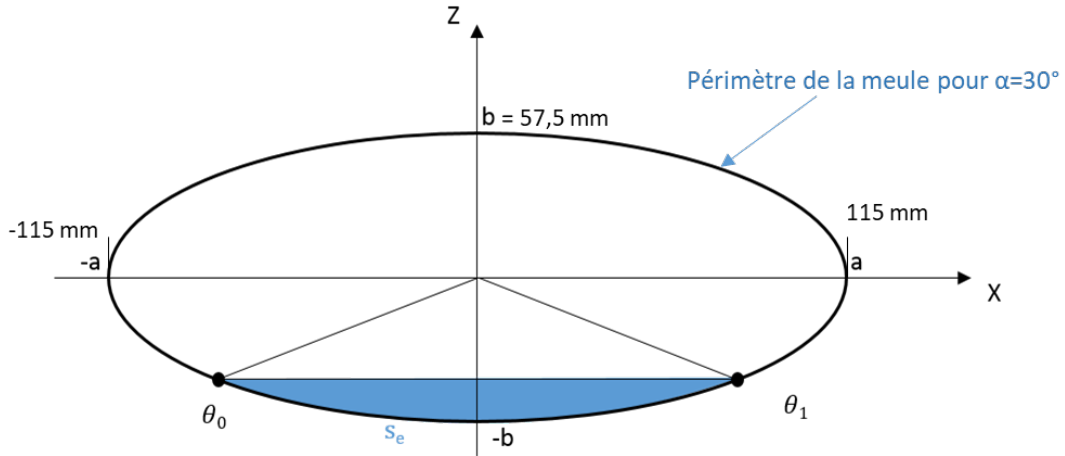


FIGURE 1.34: Meule projetée sur le plan  $ZX$

au sens de mouvement de la meule).  $s_e$  permet de calculer le taux d'enlèvement de matière.

La surface  $s_e$  est une région limitée par un arc d'ellipse et un segment reliant les deux extrémités de l'arc. L'aire de cette région est égale à l'aire du secteur elliptique  $A(\theta_0, \theta_1)$  moins l'aire du triangle dont les sommets sont l'origine  $(0, 0)$  et les points d'extrémité de l'arc  $(x_0, z_0) = (r_0 \cos \theta_0, r_0 \sin \theta_0)$  et  $(x_1, z_1) = (r_1 \cos \theta_1, r_1 \sin \theta_1)$ , où  $\theta_i$  sont les angles polaires des points et où  $r_i$  est déterminé à l'aide de l'équation 1.6 [23].

$$r_i = \frac{a^2 b^2}{b^2 \cos^2 \theta_i + a^2 \sin^2 \theta_i} \quad (1.6)$$

L'aire du triangle est :

$$\frac{1}{2} |x_1 z_0 - x_0 z_1| = \frac{r_0 r_1}{2} |\cos \theta_1 \sin \theta_0 - \cos \theta_0 \sin \theta_1| = \frac{r_0 r_1}{2} |\sin(\theta_1 - \theta_0)| \quad (1.7)$$

L'aire du secteur  $A(\theta_0, \theta_1)$  est [23] :

$$\begin{aligned} A(\theta_0, \theta_1) &= \int_{\theta_0}^{\theta_1} 1/2 r^2 d\theta \\ &= \int_{\theta_0}^{\theta_1} \frac{(a^2 b^2 / 2) d\theta}{b^2 \cos^2 \theta + a^2 \sin^2 \theta} \\ &= F(\theta_1) - F(\theta_0) \end{aligned} \quad (1.8)$$

avec :

$$F(\theta) = \frac{ab}{2} \left[ \theta - \tan^{-1} \left( \frac{(b-a) \sin 2\theta}{(b+a) + (b-a) \cos 2\theta} \right) \right] \quad (1.9)$$



La surface  $s_e$  a une aire égale à :

$$s_e(\theta_0, \theta_1) = A(\theta_0, \theta_1) - \frac{1}{2}|x_1z_0 - x_0z_1| \quad (1.10)$$

Connaissant la surface  $s_e$  et la vitesse d'avance. Le taux d'enlèvement de matière peut être calculé avec l'équation suivante :

$$\tau = s_e V_s \quad (1.11)$$

L'équation 1.11 est déduite en supposant que les gains de la meule sont uniformément placés sur la surface de contact et que cette surface est constante tout au long de la trajectoire de la meule. Nous supposons aussi au long de ce travail que les grains sur la surface de contact ont la même vitesse tangentielle vu que  $h \approx R_s$ .

## 1.9 Phénomène des vibrations

Les vibrations ont plusieurs effets négatifs. Elles affectent gravement la productivité des industriels. Par exemple, dans l'industrie automobile, Renault SAS a estimé le coût des vibrations sur la production des cylindre-blocs de Renault 2.01 DCi à 0.35 euros par pièce. Ses inconvénients ont stimulé un grand nombre de recherche. Parmi les effets négatifs des vibrations, on a :

- Mauvaise qualité de surface.
- Précision inacceptable.
- Bruit excessif .
- Dégradation disproportionnelle des outils.
- Dégradation du robot.
- Perte de matière.
- Usure de machines.

### 1.9.1 Types des vibrations

Les procédés d'enlèvement de matière peuvent subir trois différents types de vibrations mécaniques qui apparaissent à cause du manque de rigidité dynamique d'un ou plusieurs éléments du système qui est composé principalement par le robot, le porte-outil et l'outil. Ces trois types de vibrations sont les vibrations libres, les vibrations forcées et les vibrations régénérées [68].

#### Vibration libre

Les vibrations libres peuvent survenir quand le système mécanique est déplacé de son état d'équilibre et permet de vibrer librement. Dans une opération de meulage, les vibrations libres peuvent apparaître

par exemple comme un résultat d'une mauvaise définition de la trajectoire de l'outil qui cause une collision de l'outil avec la pièce à meuler.

### **Vibration forcée**

Les vibrations forcées apparaissent à cause des excitations harmoniques externes. La source principale des vibrations forcées dans le procédé de tournage par exemple est lorsque les dents de l'outil entrent et sortent de la matière à usiner. Par contre, les vibrations forcées sont aussi associées par exemple à un roulement ou un outil mal équilibré. Il peut être aussi transmis par les autres robots ou machines à côté de l'espace de travail du robot concerné.

### **Vibration régénérée**

L'énergie des vibrations régénérées vient de l'interaction entre le procédé de coupe et la structure mécanique. Les oscillations de la passe  $n$  sont générées à cause de la forme de la pièce résultante de la passe précédente  $n - 1$  de l'outil. De cette façon, les oscillations se régénèrent, ce qui produit un état de surface de mauvaise qualité. Durant le procédé d'usinage, ce type de vibration fait rentrer le système dans un état d'instabilité. Il est le type plus indésirable et le moins contrôlable des vibrations.

## **1.9.2 Suppression des vibrations**

Les robots industriels sont parfois supposés rigides. Cependant, lorsque les forces appliquées par l'environnement sur le robot sont grandes (les forces d'usinage par exemple), la flexibilité de ce dernier peut induire des erreurs de positionnement ou des vibrations. Le choix du robot est donc très important. Des robots très flexibles peuvent engendrer des comportements instables du système de meulage. Les chercheurs parlent en général de détecter, identifier, éviter, empêcher, réduire et supprimer les vibrations. En général, on peut regrouper tous les travaux qui concernent le problème des vibrations dans deux groupes [68] : Le premier groupe est composé de toutes les méthodes qui garantissent une bonne sélection des paramètres de coupes dans le but de mettre le procédé d'usinage dans la zone stable du diagramme des lobes. Le deuxième groupe concerne les méthodes qui évitent les vibrations en changeant le comportement du système et en modifiant la limite de la stabilité de ce dernier (figure 1.35).

Le premier groupe se compose de deux sous-groupes, les méthodes in-process et out-of-process. Le sous-groupe out-of-process inclut les méthodes qui prédisent la localisation de la zone de stabilité (figure 1.36) afin de sélectionner des paramètres de coupe optimaux qui évitent les vibrations. L'identification de la zone stable du procédé est réalisée en off-line. Le sous-groupe in-process par contre inclut les méthodes qui détectent les vibrations pendant l'enlèvement de matière, afin de corriger les paramètres de coupe dans le but de remettre le système dans l'état stable. Et donc pour le premier sous-groupe, la limite de stabilité doit être calculée avant le meulage, pour le deuxième il est important de détecter les vibrations

lors du meulage pour modifier les paramètres afin d'avoir une coupe stable.

Dans le deuxième groupe, on peut distinguer entre les méthodes passives et actives. La première consiste à changer certains éléments du système (outils, porte-outils, robots, . . .), ou de rajouter d'autres éléments, afin de changer de manière passive son comportement mécanique. La méthode active est basée sur l'usage de certains éléments externes capables de modifier les efforts appliqués ou de fournir/absorber de l'énergie du système afin d'améliorer la stabilité ou remettre le système dans son état stable.

Une solution pour réduire les vibrations est proposée dans les travaux d'Olabi. Olabi exploite le fait que la matrice de rigidité du robot est variable et dépend de la position et orientation de ce dernier. Cela permet de planifier une trajectoire optimale qui permettra de maximiser la rigidité du robot et donc d'avoir moins de vibration [61]. Toth propose un modèle qui permet la détermination des paramètres optimaux de meulage pour réduire les vibrations. Les résultats de ces travaux ont montré que des profondeurs de passe plus grandes causent une amplification plus grande des vibrations [80].

Rafeian et al [69] se sont intéressés à l'étude de la nature oscillatoire du meulage robotisé causé par le déséquilibre de la meule. Pour remédier à la grande flexibilité du robot portable SCOMPI utilisé pour le meulage, Rafeian et al ont présenté une solution de loi de commande pour contrôler le taux d'enlèvement de matière au lieu de la position de l'effecteur du robot.

Albizuri a implémenté des actionneurs piézoélectriques pour améliorer le comportement dynamique du robot et réduire les vibrations utilisées pour le meulage des pièces cylindriques [2]. Les résultats trouvés montrent une réduction des vibrations et donc une amélioration de la qualité de surface des pièces produites. Cependant, l'utilisation de cette solution reste limitée pour les procédés nécessitant des faibles forces de contact et produisant des vibrations de hautes fréquences.

Pour le procédé de meulage angulaire particulièrement, la meule présente une source beaucoup plus importante de flexibilité en comparaison avec le robot. Cette flexibilité peut causer une augmentation ou une réduction exponentielle des vibrations. Baylis a proposé un modèle mathématique capable de prédire ce comportement du système de meulage. L'analyse des résultats présentés prouve que la flexibilité de la meule peut être avantageuse en ce qui concerne la réduction des vibrations [5].

### **Diagramme de stabilité**

Le diagramme de stabilité (ou diagramme des lobes) a été utilisé par convention pour représenter la zone de stabilité dans les procédés d'enlèvement de matière. Il représente le moyen principal qui détermine les paramètres de coupe pour les méthodes in-process et out-of-process. Plusieurs travaux ont été réalisés afin de minimiser voire éliminer les vibrations des robots durant l'enlèvement de matière. Par exemple, le robot manipulateur à 6 ddl SCOMPI utilisé dans l'usinage sous-marin [69], la fréquence ainsi que le coefficient d'amortissement du robot dans le premier mode vibratoire ont été déterminés à l'aide d'un

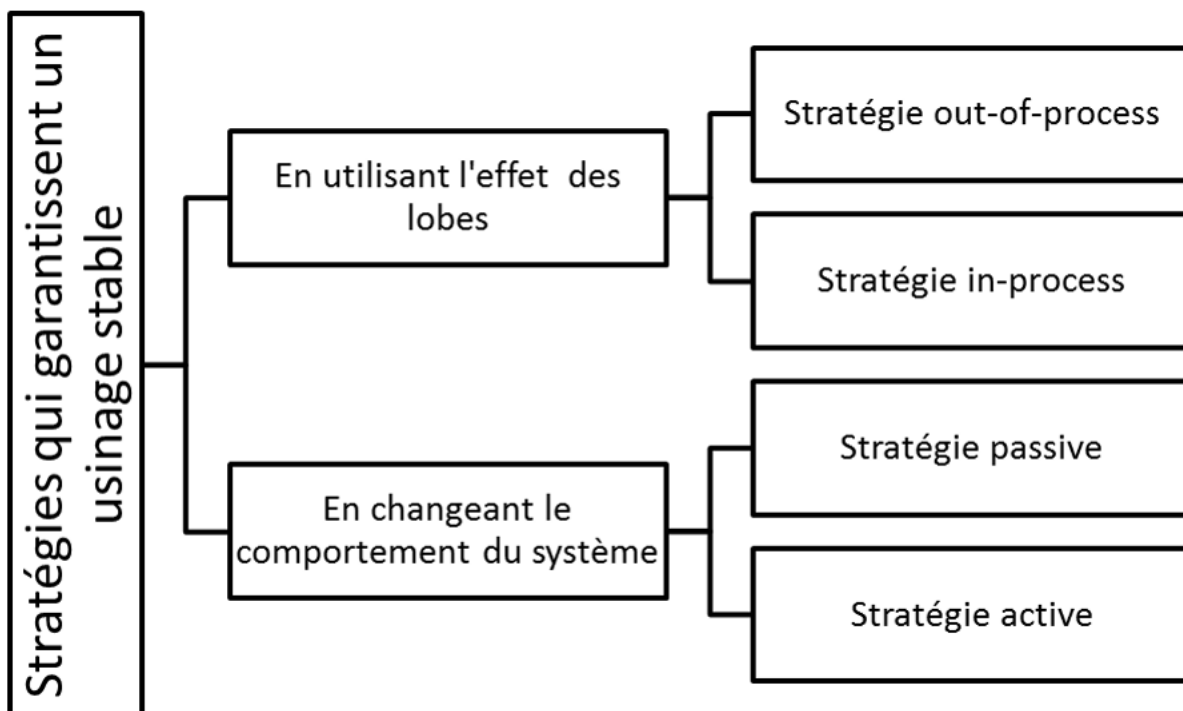


FIGURE 1.35: Méthodes d'élimination des vibrations [68]

test par impact. L'équation différentielle décrivant le comportement du système est la suivante :

$$m_t \ddot{\delta}(t) + c_t \dot{\delta}(t) + k_t \delta(t) = F_N(t) \quad (1.12)$$

L'effort normal appliqué par l'outil sur le robot  $F_N$  est approximé par un modèle continu dans la partie de contact entre l'outil et la pièce, la force tangentielle est proportionnelle à  $F_N$  :

$$F_N(t) = K_p h(t) \quad (1.13)$$

Avec  $K_p$  la rigidité de la coupe. La profondeur de passe dynamique  $h$  inclut une profondeur de passe demandée  $h_0$  plus un terme qui tient compte de la régénération des ondulations de la surface.  $\delta(t)$  et  $\delta(t - T)$  sont les déplacements du robot le long de la surface normale dans la présente et la précédente coupe séparés par une seule révolution de l'outil,  $T$  est la période de révolution et  $\lambda$  est facteur de superposition.

$$h = h_0 + \lambda[\delta(t - T) - \delta(t)] \quad (1.14)$$

L'interdépendance entre la dynamique du procédé et la dynamique du robot est gouvernée par les équations 1.12, 1.13 et 1.14. Une fonction de transfert est établie reliant la profondeur de passe dynamique avec la profondeur de passe demandée  $h_0$ . La limite de stabilité est formulée comme décrite dans [30] , qui donne une valeur limite de la rigidité de coupe en fonction de la fréquence de vibration  $\omega_c$ .

$$\lambda k_{p,lim} = \frac{-1}{2Re(G(\omega_c))}, \omega_c T = 2\pi l - 2 \tan^{-1} \left( \frac{Re(G(\omega_c))}{Im(G(\omega_c))} \right) \quad (1.15)$$

Avec  $l = 1, 2, \dots$  est le nombre de lobes.  $G(s)$  est la fonction de transfert entre  $\delta(s)$  et  $F_n(s)$ . Le diagramme de stabilité dans la figure 1.36 est généré par l'équation 1.15. Il décrit le gain non dimensionnel  $K_p/K_t$  (le rapport entre la rigidité de coupe et la rigidité du robot) en fonction du rapport entre la fréquence de rotation de l'outil et la première fréquence naturelle du robot. Ce diagramme permet de séparer la zone d'enlèvement de matière stable (au dessous des lobes) et la zone d'enlèvement de matière instable (au dessus des lobes). Il permet donc de choisir les conditions de coupe pour éviter la présence des vibrations.

Dans la littérature existante sur les vibrations associées à la coupe, le problème de l'instabilité régénérative est discutée à l'intérieur de la «zone des lobes» du graphe de stabilité (voir figure 1.36). Bien que les deux extrêmes de ces lobes sont discutés par Ganguli et al [30], la région à l'extérieur des lobes sur le graphe n'est pas étudiée. Le meulage robotisé est situé à l'extrémité droite de ce diagramme. En effet, le gain limite pour le meulage robotique est d'un ordre de grandeur plus grand que le meulage effectuée par une machine CNC. Cette caractéristique distingue le problème d'instabilité vibratoire robotique, de l'instabilité vibratoire des machine-outils conventionnelles. Pour un meulage robotique, le gain du procédé  $K_p/K_t$  prend des valeurs entre 30 - 60 pour un rapport de vitesse  $\omega_r/\omega_n$  de (17) - (23), ce qui ne correspond pas aux valeurs conventionnelles trouvées en usinage par les machines CNC.

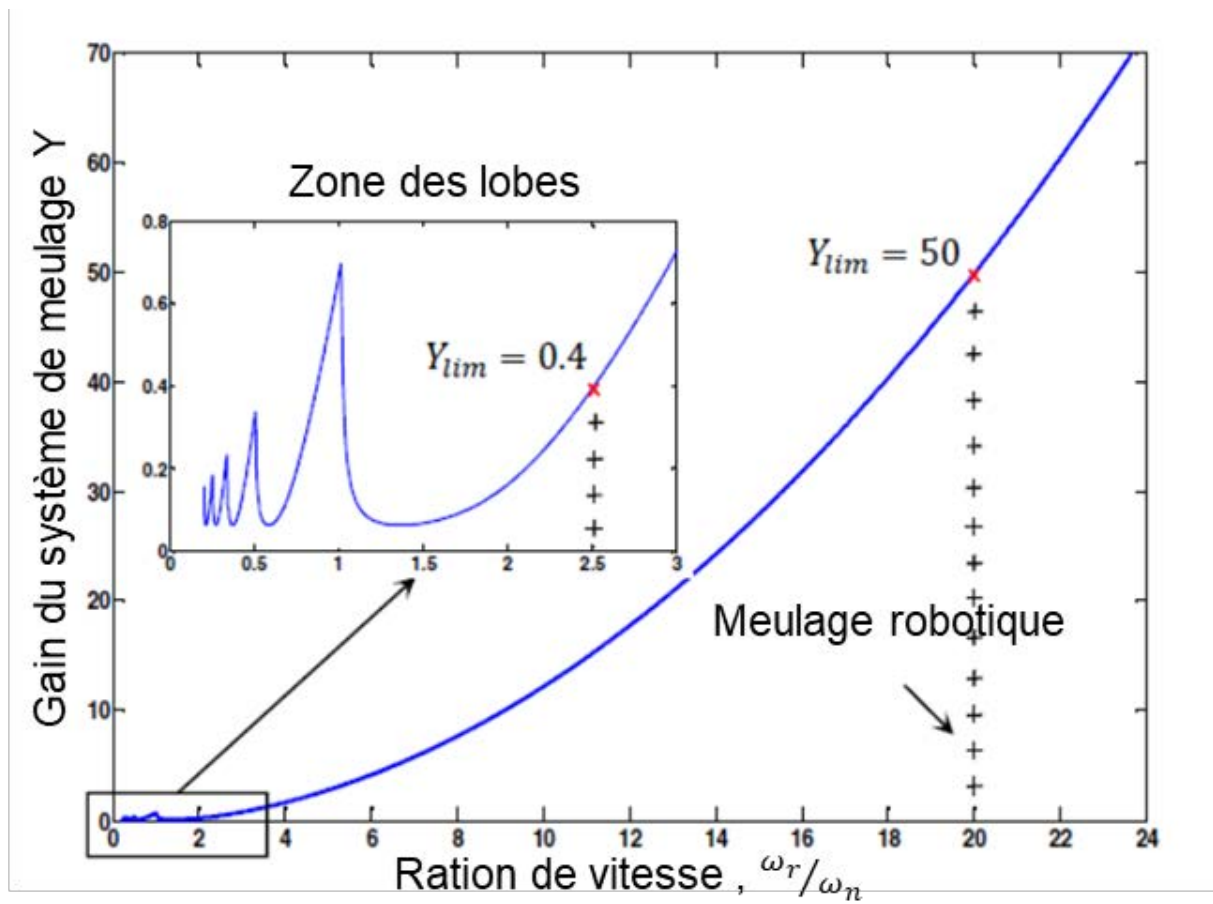


FIGURE 1.36: : Limite de stabilité pour les machines-outils comparée à la limite de stabilité pour les robots [69]

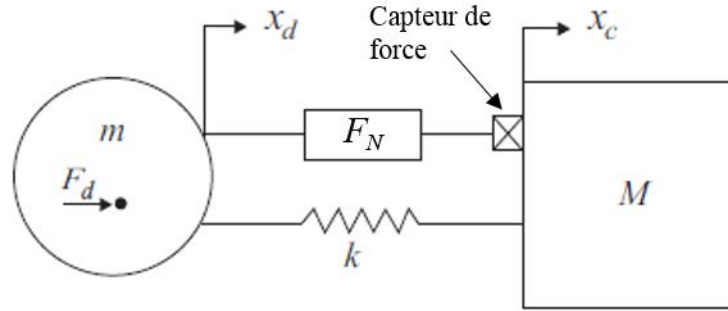


FIGURE 1.37: Amortisseur avec 1 ddl [67]

### Méthode active – Isolation active

Plusieurs méthodes actives sont présentées dans la littérature. Elles ont pour objectif de garantir une élimination des vibrations en introduisant des éléments externes (composant piézoélectrique, actionneur pneumatique ou hydraulique, ...) pour absorber ou rajouter de l'énergie au système. Le but est de remettre le système à son état stable.

Considérons le système à un seul degré de liberté présenté dans la figure 1.37. Le robot est représenté par la masse  $M$  et l'outil/porte-outils sont représentés par la masse  $m$ . [67] présente une méthode d'isolation en utilisant un composant piézoélectrique afin d'absorber les perturbations causées par une masse  $m$ .

Le système d'amortissement est composé d'un ressort de rigidité  $k$  en parallèle avec un actionneur qui fournit une force  $F_N$ . Le procédé de meulage applique une charge  $F_d$  sur le robot. L'objectif est d'isoler le mouvement  $x_c$  de la masse  $M$  de la masse  $m$  qui crée une perturbation  $F_d$ .

Les équations qui gouvernent le mouvement du système sont les suivantes :

$$\begin{aligned} M\ddot{x}_c + k(x_c - x_d) &= F_N \\ m\ddot{x}_d + k(x_d - x_c) &= F_d - F_N \end{aligned} \quad (1.16)$$

À l'aide de la transformation de Laplace, on retrouve :

$$X_c(s) = \frac{kF_d}{s^2[Mms^2 + (M+m)k]} + \frac{mF_N}{Mms^2 + (M+m)k} \quad (1.17)$$

Le premier terme correspond à la réponse du robot à l'effort appliqué par le procédé, le deuxième terme correspond à l'effort appliqué par l'amortisseur. Si on suppose que le système est équipé d'un capteur d'accélération absolue ou de vitesse absolue, on retrouve la fonction de transfert en boucle ouverte suivante :

$$G(s) = \frac{s^2 X_c(s)}{F_N(s)} = \frac{ms^2}{Mms^2 + (M+m)k} \quad (1.18)$$

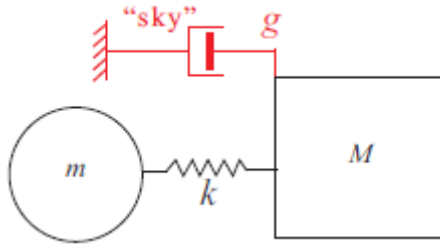


FIGURE 1.38: Amortisseur Sky-hook équivalent [67]

En utilisant un capteur qui mesure la vitesse absolue  $\dot{x}_c$  et en utilisant la loi générale de retour :

$$F_N = -H(s)sX_c(s) \quad (1.19)$$

On retrouve la fonction de transfert en boucle fermée suivante :

$$\frac{X_c(s)}{X_d(s)} = \frac{k}{Ms^2 + H(s)s + k} \quad (1.20)$$

#### Amortisseur Sky-Hook :

En prenant une valeur  $H(s) = g$ , on trouve l'amortisseur Sky-hook. Il a pris ce nom car il rend le système équivalent à un système dont la masse  $M$  est reliée à un point fixe donné par un amortisseur  $g$  (figure 1.38).

Ce système est stable si on considère que la masse  $m$  est rigide (outil/ porte-outils). Avoir un corps rigide implique que l'effort appliqué sur ce dernier est proportionnel à son accélération. Ce qui n'est pas le cas pour notre application.

#### Amortisseur par capteur de force :

Pour adapter l'amortisseur sky-hook à notre cas d'étude, on peut utiliser un capteur de force à la place du capteur d'accélération ou de vitesse absolue (figure 1.39). Le capteur de force représente l'avantage d'être plus sensible aux fréquences basses [67].

La fonction de transfert en boucle ouverte devient alors :

$$G(s) = \frac{F}{F_N} = \frac{Mms^2}{Mms^2 + (M + m)k} \quad (1.21)$$

## 1.10 Contrôle de force de meulage

Il est bien connu que les tâches nécessitant une interaction forte entre le manipulateur et son environnement nécessitent un type de contrôle de la force (c'est-à-dire un contrôle de l'interaction au sens large). Le polissage, l'ébavurage, ainsi que le meulage, en sont quelques exemples pratiques (voir [17, 14]). Le contrôle de la force peut être passif ou actif. En contrôle passif, l'effecteur terminal du robot



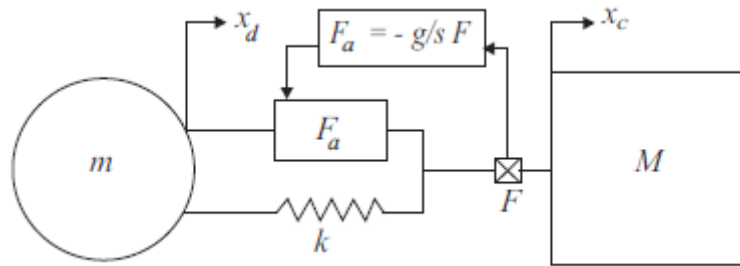


FIGURE 1.39: Amortisseur Sky-hook basé sur un capteur de force [67]

est équipé d'un dispositif mécanique auxiliaire, généralement composé de ressorts et d'amortisseurs, ou la compliance naturelle du bras du robot est utilisée pour tenir compte des forces d'interaction. Dans le contrôle de la force active, une stratégie de contrôle appropriée et un retour de force sont nécessaires. Quelle que soit son application pratique, le contrôle actif de la force est beaucoup plus flexible, car les paramètres du contrôleur peuvent être facilement modifiés en fonction des besoins des tâches. Ceci est largement reconnu [49, 75, 60, 9], et les principaux fabricants de robotique produisent maintenant des robots industriels à commande de force. Malgré leurs avantages, la mise en œuvre de capacités de contrôle de la force active dans des robots industriels déjà existants pourrait constituer une alternative intéressante. Pour le procédé de meulage angulaire, non seulement la force de meulage mais aussi la position de la meule doit être contrôlées. Le contrôle position/force du procédé de meulage attire de plus en plus l'attention des chercheurs. Une grande variété des types des méthodes de contrôle a été développée. La commande hybride position/force basée sur l'apprentissage a été utilisée pour obtenir une position souhaitée de la meule tout en gardant une force constante du robot manipulateur pour des tâches de d'ébavurage répétitives [41].

Ren et Feng-Yun [71, 28] ont proposé des solutions réussites pour la robotisation du meulage, polissage et l'ébavurage. Or ces systèmes de meulage restent limités aux applications nécessitant un taux d'enlèvement de matière faible. Lee [51] a présenté les différents paramètres essentiels pour le contrôle du taux d'enlèvement de matière pour un système robotique de meulage. Un capteur de vision tridimensionnelle est utilisé pour déterminer la vitesse de déplacement du robot, la force de meulage et la granulométrie de la meule. Whitney [84] a développé une loi non linéaire de contrôle de force de meulage pour le robot PUMA 560. Un système de vision permet de mesurer le taux d'enlèvement de matière en temps réel. Ce type de système a été utilisé principalement pour le meulage des cordons de soudure présente sur une surface plane.

Pour pallier le manque d'accouplement entre la position et la force, un outil d'extrémité de bras du robot est utilisé pour fournir la force de meulage, tandis que le robot ou la machine-outil est uniquement utilisé pour le positionnement. Xi [87] a développé un effecteur avec une plateforme tri-articulé programmable. Cet effecteur peut être placé sur les machines CNC ou des robots et permet d'améliorer leur

flexibilité et la dextérité. Fan [26] a utilisé un actionneur pneumatique externe pour appliquer la force voulue de polissage. Le robot est utilisé seulement pour le positionnement, afin de remédier au couplage entre la position et la force.

## 1.11 Meulage des surfaces de formes libres

La littérature en ce qui concerne la planification de la trajectoire pour les procédés d'usinage tel que le fraisage est très abondante. Ce n'est pas le cas pour le procédé de meulage angulaire en particulier.

Des trajectoires en utilisant l'intersection de la pièce avec des plans parallèles [35], les courbes iso-paramétriques [54], les courbes de projection et les courbes d'offset [72, 77] sont quelques techniques utilisées pour produire les trajectoires d'outil.

Le choix de ces courbes, la géométrie de l'outil ainsi que les paramètres de meulage, affectent directement la qualité de la surface produite. Ainsi, une trajectoire d'outil avec un petit pas entre les passes successives, produit une pièce avec des ondulations moins hautes par rapport à une trajectoire avec un pas supérieur.

Un grand effort a été fourni afin de réduire la hauteur des ondulations laissées sur la surface des pièces usinées. Lin et Koren [53] ont proposé une méthodologie de planification de la trajectoire de l'outil en utilisant des courbes en "offset" (position décalée par rapport à la surface voulue) qui permet d'atteindre une longueur d'ondulation spécifiée par l'utilisateur, afin d'obtenir une profondeur de passe de meulage constante. Une autre technique pour réduire la hauteur des ondulations est l'utilisation des outils de géométries différentes. Le but du programme de planification de la trajectoire pour cette stratégie est de déterminer la position et l'orientation de l'outil afin de maximiser le pas entre les passes pour une hauteur d'ondulation donnée [40, 57]. You et Ehmann [25] ont proposé une méthodologie pour éliminer les ondulations d'une surface usinée en utilisant un outil de fraisage incliné et excentré par rapport au centre de rotation de l'outil. Cette technique a permis donc de réduire le temps manuel de finition. D'autres techniques ont été proposées pour éliminer les ondulations des surfaces usinées et améliorer leurs qualités. Whitney et Tung [85] ont teint la surface supérieure de la pièce afin de permettre à un système de vision de détecter lorsqu'un enlèvement suffisant d'excès de matière est atteint. Duffie et Fung [21] propose de contrôler et approximer périodiquement la surface par mesure après chaque passe de meulage.

Malgré le grand progrès atteint pour réduire au maximum la hauteur de ces ondulations, il est toujours nécessaire de recourir à des opérations de finition manuelle pour éliminer davantage les marques d'usinage, en utilisant des meules angulaires dans plusieurs cas.

## 1.12 Conclusion

L'intervalle de variation des fréquences est grand en meulage. Pour l'application choisie, l'utilisation d'une méthode passive d'élimination des vibrations a un inconvénient majeur car si on change de pièce ou d'outil, il faudra recalculer les nouveaux paramètres (dimensions, poids, matériau, . . .) des éléments à optimiser. La méthode choisie pour l'élimination des vibrations est donc la méthode active.

De plus, la notion d'"entrée et sortie de la matière" pour le procédé de meulage n'existe pas. En effet, les meules sont couvertes par une multitude de dents réparties d'une façon aléatoire sur la surface de la meule. Les méthodes utilisant l'effet des lobes ne présentent pas un intérêt pour notre étude. Pour le choix de l'actionneur, les composants piézoélectriques sont capables d'opérer pour des fréquences et forces très élevées ( $> 1kN$ ) or leur course de quelque  $mm$  n'est pas suffisante pour amortir les vibrations en meulage qui a une amplitude supérieure. Le choix de l'actionneur s'est donc fixé sur des amortisseurs pneumatiques.

La suite de ce travail portera donc sur la réalisation du meulage d'une pièce, en utilisant un robot industriel équipé d'une meule. La commande ainsi que l'amortissement des vibrations seront réalisés par l'intermédiaire d'un amortisseur pneumatique. Cet amortisseur est capable de maintenir une force de contact entre la pièce et la meule, ainsi que d'amortir toutes vibrations résultantes de meulage à l'aide des capteurs de force placés entre l'amortisseur et l'outil ainsi que des capteurs de pression placés aux deux chambres du vérin (figure 1.39). Afin de réaliser ce système, une modélisation de ces différents composants est nécessaire. Au chapitre suivant, les modèles de flexibilité ainsi que le modèle du procédé et du système active d'amortissement seront regroupés pour constituer un système de commande capable d'éliminer les vibrations.

Le meulage angulaire robotisé des surfaces de forme libre nécessite un contrôle des ondulations produites par les passes de l'outil. Une méthodologie de planification de trajectoire est présentée. Cette méthodologie représente une nouvelle technique qui permet de donner à l'utilisateur un contrôle direct sur la hauteur des ondulations en meulage.



## Chapitre 2

# Modélisation et simulation du système de meulage robotisé

### 2.1 Introduction

Ce chapitre introduit une approche de modélisation du meulage robotisé en cinq phases (voir figure 2.1). L'objectif de ce simulateur est de tester la qualité du contrôle des paramètres du procédé robotisé, d'évaluer la stabilité du procédé et de prédire la qualité des surfaces obtenues après le meulage.

Le système de meulage à simuler, présenté sur la figure 2.2, comporte un actionneur pneumatique et ces composants (piston, valve). Tout d'abord, les données de base des composants du système sont collectées. Deuxièmement, les paramètres du système liés à l'enlèvement de la matière en meulage sont définis. Troisièmement, le comportement de ces composants a été modélisé en réalisant des essais sur le système de meulage robotisé. Quatrièmement, des modèles Simulink sont créés et, cinquièmement, un programme Matlab est utilisé pour la gestion des données de simulation et l'affichage des résultats de simulation sur Simulink.

### 2.2 Collection de données

#### 2.2.1 Configuration générale du système de meulage

La configuration du système de meulage est représentée dans la figure 2.1. Un robot industriel IRB 8700 d'ABB ayant 6 axes et une capacité de charge maximale de 550 kg a été utilisé. Un effecteur actif, illustré sur la figure 2.3, est fixé à la bride du robot grâce à un support. Le support de l'effecteur a intégré plusieurs éléments, dont un vérin pneumatique. Une meuleuse angulaire "BOSCH GWS 22-230 H" est fixée à l'extrémité du vérin. L'actionneur permet à la meuleuse angulaire de se déplacer le long de l'axe

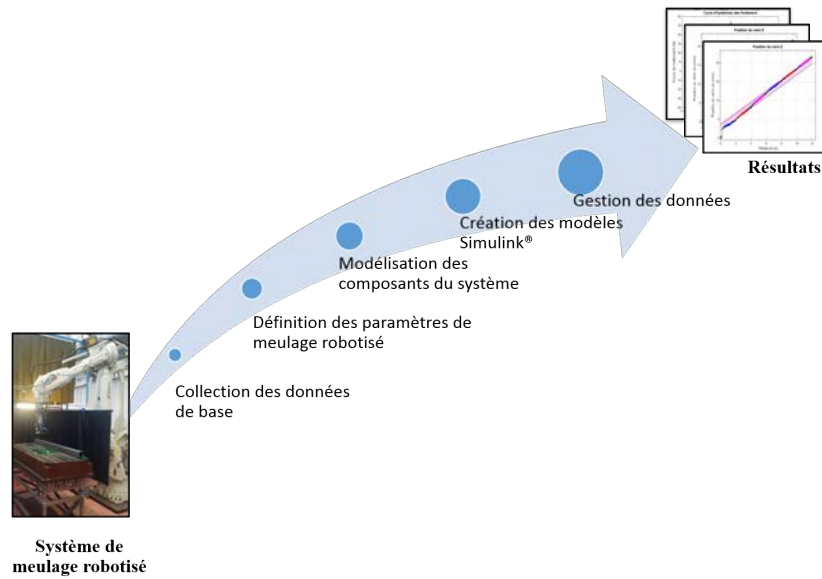


FIGURE 2.1: Aperçu de l'approche de simulation

$Z_p$  (repère outil). L'outil est changeable en ouvrant le mandrin du porte-outil.

La Figure 2.4 montre l'interaction impliquée dans ce système. L'air comprimé et le courant électrique sont respectivement l'entrée du vérin pneumatiques et de la meuleuse angulaire. La pression de l'air provoque le déplacement du piston-tige le long de l'axe  $Z_p$ , pour obtenir une force de contact constante. Le courant permet à la meuleuse de fonctionner en une vitesse de rotation stable. Pendant l'interaction entre l'outil et la pièce, le taux d'enlèvement de matière ( $Q_w$ ) peut être obtenu à partir d'un modèle de force représentant la relation entre la force de meulage normale et les paramètres de meulage.

## 2.2.2 Configuration de l'actionneur électropneumatique

Un système électropneumatique est installé pour la commande de l'effecteur et l'acquisition des mesures par capteurs, comme illustré sur la figure 2.5.

Le système électropneumatique est constitué des éléments suivants :

- Conduite d'air et régulateur fournissent l'énergie pneumatique au système, le régulateur ajuste la pression d'alimentation du système pneumatique à l'aide d'un manomètre placé avant la vanne électrique.
- Un vérin pneumatique double effet à tige avec capteur de position du piston
- Deux électrovannes proportionnelles pour régulation de débit
- Deux capteurs de pressions pour mesurer les pressions dans deux les chambres du vérin
- Deux capteurs d'effort dans le plan  $X_p$ - $Y_p$  latéral
- Une carte d'acquisition



FIGURE 2.2: Système de meulage robotisé

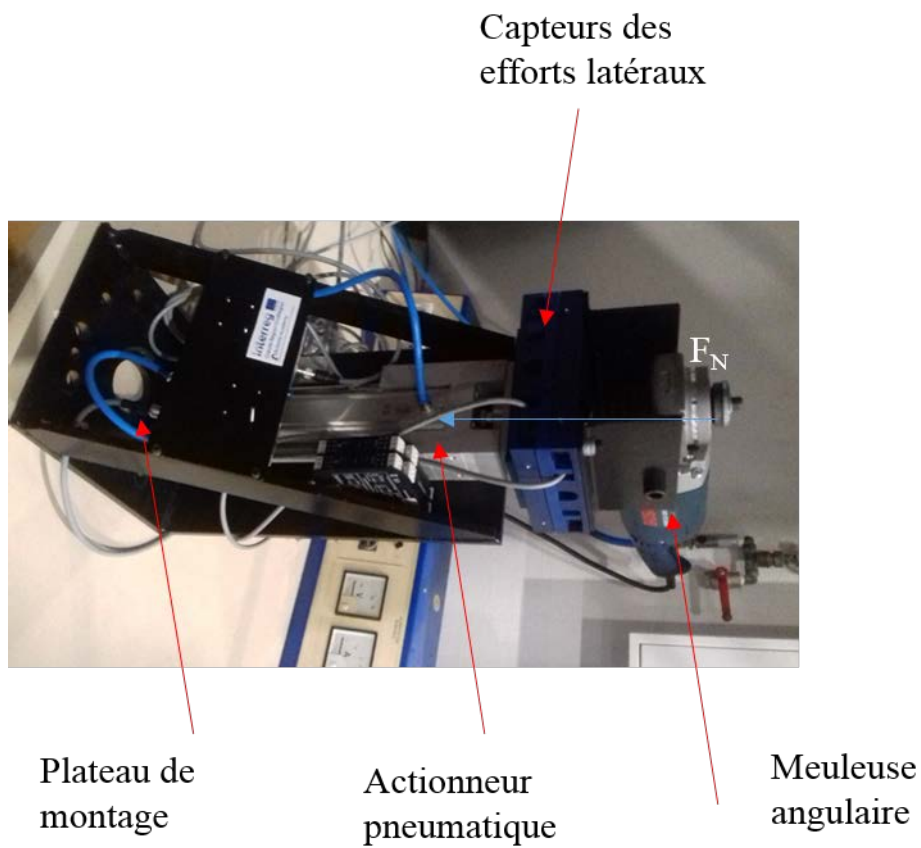


FIGURE 2.3: Effecteur de meulage

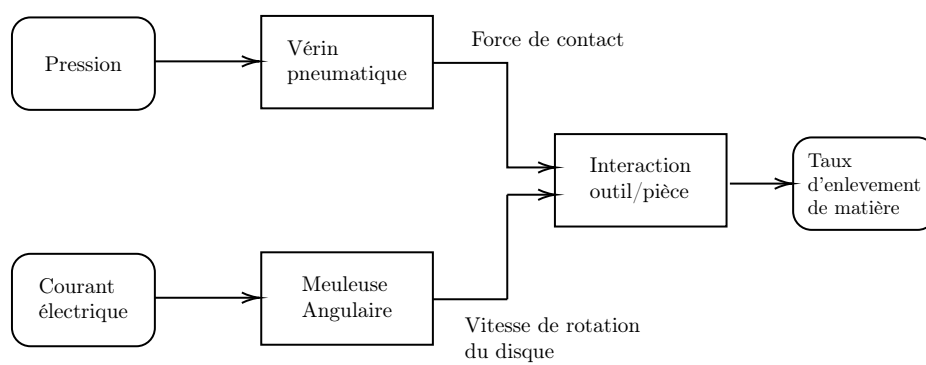


FIGURE 2.4: Relation entre les éléments du système de meulage



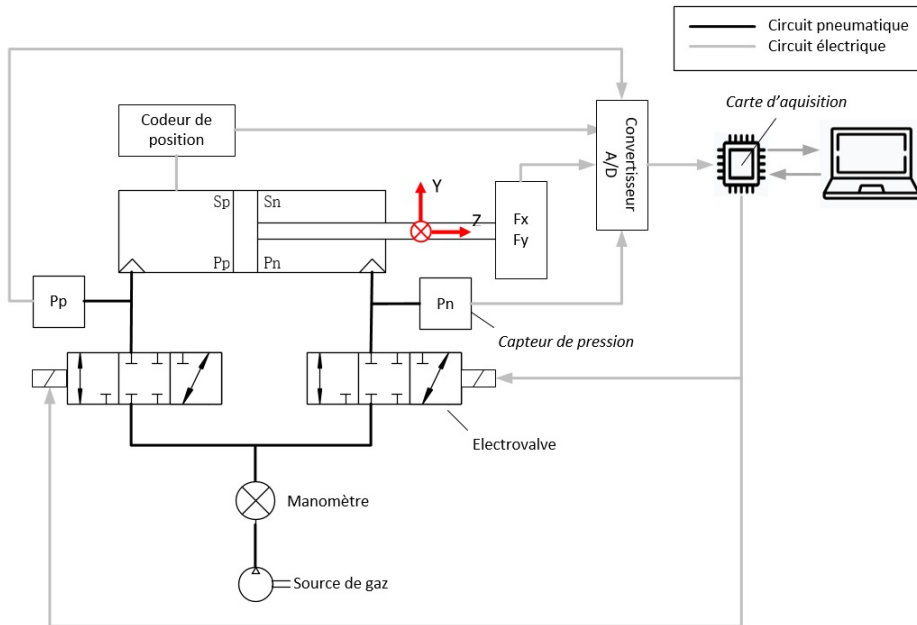


FIGURE 2.5: Schéma structurel du système électropneumatique

- Deux convertisseurs pour conversion A/D des signaux
- Un ordinateur portable pour programmer, commander et enregistrer les données

### Actionneur

L'actionneur utilisé est un vérin FESTO DNCI, double effet simple tige avec un codeur de position. La tige de piston ne doit absorber aucun couple, donc l'unité de guidage externe FENG-KF est utilisée avec le cylindre DNCI (figure 2.6). Le capteur d'effort intégrant dans une boîte est monté sur l'extrémité du guidage. Les caractéristiques principales du vérin sont montrées dans le Tableau 2.1.

TABLE 2.1: Caractéristiques générales du vérin

Paramètre	Définition	Valeur	Unité
$C_v$	Course du vérin	200	<i>mm</i>
$\Phi_{cyl}$	Diamètre du vérin	40	<i>mm</i>
$\Phi_{tige}$	Diamètre de tige	16	<i>mm</i>

### Capteur et acquisition

En général, le système contient 3 types de capteurs : Capteur de pression, Capteur de position et Capteur d'effort. Toutes les références des capteurs ainsi que les éléments d'acquisition utilisés sont indiquées dans le Tableau 2.2.

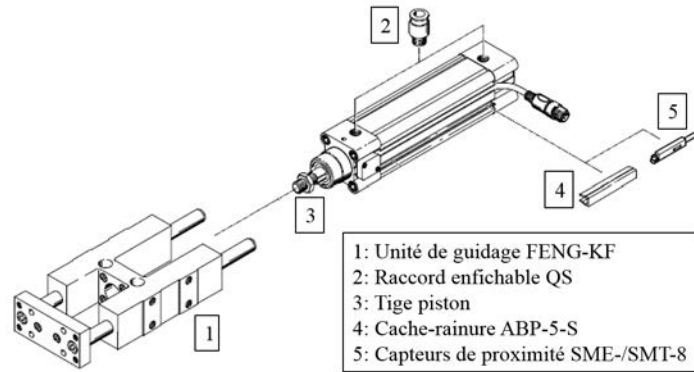


FIGURE 2.6: Composants de l'actionneur

Les signaux mesurés des capteurs de forces et de pressions sont analogiques. Ces signaux sont transmis

TABLE 2.2: Références des éléments

Elément	Référence
Electrovanne (capteur intégré)	FESTO VPPM-8L-L-1-G14-0L10H-V1P-S1
Capteur d'effort	Tedea-Huntleigh Load Cells 615
Convertisseur	FESTO DADE-MVC
Convertisseur de jauge contrainte	SENECA Z-PC-LINE Z-SG
Codeur de position (intégré à vérin)	DNCI-40-200-P-A-FENG-MU

à la carte d'acquisition, les valeurs analogiques sont dans une plage de 0-10 Volts. Ces valeurs sont proportionnelles aux valeurs réelles des grandeurs physiques mesurées. La communication bidirectionnelle entre la carte d'acquisition et l'ordinateur est réalisée par compilateur de programme C++. Les consignes des électrovannes sont envoyées via la carte d'acquisition. Les données de mesure enregistrées sont discrètes par échantillonnage.

## 2.3 Définition des paramètres de meulage robotisé

Les paramètres de base des procédés de meulage sont la vitesse de coupe  $V_c$ , la vitesse d'avance  $V_s$  et la profondeur de la coupe  $d$  (voir [79]). La profondeur de passe  $d$  est l'engagement de la meule dans la direction  $Z$  du repère de la pièce. La vitesse de coupe est égale à la vitesse circumférentielle de la meule. La vitesse d'avance est orientée en opposition à la rotation de la meule. Le sens de l'avance dans le meulage angulaire peut être orientés suivant un angle de tilt  $\alpha$  par rapport à la meule. Selon le processus de meulage, la pièce peut également avoir une vitesse d'actionnement qui n'est pas toujours égale à la direction d'avance. Cette vitesse est alors appelée vitesse de la pièce  $V_w$ . Pour les cas d'étude choisis pour ce travail, cette vitesse sera nulle. La productivité du procédé de meulage est décrite par le taux d'enlèvement de matière  $Q_w$  [47]. En général,  $Q_w$  peut être calculé à partir de la vitesse d'avance et la

TABLE 2.3: Paramètres de meulage angulaire robotisés

Types des paramètres	Paramètres	Informations
Paramètres de contrôle	Vitesse d'avance	Contrôlé par la commande du robot
	Pression (Chambre 1 et 2)	
	Vitesse de coupe	Maintenu à la vitesse maximale de coupe de la meuleuse angulaire
	Angle du tilt	Contrôlé par la commande du robot
Paramètres mesurés	Pression (Chambre 1 et 2)	
	Position du piston du vérin	
	Forces latérales de meulage ( $F_x, F_y$ )	Mesurées à l'aide des capteurs de force mises en place
Paramètres calculés	Profondeur de passe	A partir de la position mesurée du piston
	Force normale de meulage	A partir des pressions mesurés dans les chambres du vérin
	Taux d'enlèvement de matière $Q_w$	A partir de la profondeur de passe, angle du tilt et force normale de meulage

section de contacts entre la pièce et la meule.

$$Q_w = SV_s \quad (2.1)$$

La présence d'autres éléments dans le système de meulage robotisé ajoute d'autres paramètres qui influencent directement le processus. Nous pouvons, pour le système de meulage développé, regrouper ces paramètres dans trois groupes. Ces types des paramètres sont présentés dans le tableau 2.3. Le premier groupe concerne les paramètres d'action, ceux-ci sont les paramètres contrôlables influençant directement le procédé ou la qualité de la pièce meulée. Le deuxième groupe concerne les paramètres mesurés à l'aide des capteurs mises en place dans le système de meulage. Finalement, le dernier groupe concerne les paramètres calculés.

D'autres paramètres indépendants du système de commande et pertinents pour les processus de meulage sont les caractéristiques de la meule (largeur, diamètre, ...) ainsi que les dimensions de la pièce meulée.

## 2.4 Modélisation des forces de meulage

Un modèle est la représentation abstraite d'un processus servant à relier des causes et des effets.

Un modèle de force de meulage établit une relation entre les paramètres de meulage en tant qu'entrée et

la force de meulage en tant que sortie afin de décrire la performance dynamique du processus de meulage, plus particulièrement à estimer la force de meulage en simulation. Sans capteur de force, l'estimation de la force de meulage est un moyen important de contrôler le processus. Un modèle d'estimation précis des forces facilite les opérations précises de meulage robotisé. Les modèles de meulage peuvent être classés en deux branches principales : les modèles physiques et les modèles empiriques [79]. Les modèles empiriques sont basés sur des résultats expérimentaux. Les modèles physiques sont basés sur des lois physiques et des relations mathématiques entre les paramètres d'entrée et de sortie. Les modèles physiques sont plus généraux, tandis que les modèles empiriques sont plus précis dans certaines conditions expérimentales [8].

### 2.4.1 Modèles empiriques de force de meulage

Les modèles de force empiriques sont basés sur la collecte des données expérimentales et la recherche des relations et des modes entre les entrées et les forces de réaction. Les relations et les modèles ne sont pas nécessairement relatifs à la mécanique.

Les tableaux 2.4 et 2.5 présentent quelques modèles développés pour le calcul de la force de meulage. Pas de distinction entre les modèles de calcul de force normale et tangentielle de meulage, car ces deux forces sont reliées par un ratio constant de force de meulage.

Les modèles présentés peuvent être réduits sous la forme de deux modèles généraux décrit par les équations 2.2 et 2.3 .

$$F'_N = C_{wp}C_{gw} \left( \frac{V_s}{V_c} \right)^{e1} d^{e2} d_{eq}^{e3} \quad (2.2)$$

$$F'_N = F'_s + C_{wp}C_{gw} d^{e1} \left( \frac{V_s}{V_c} \right)^{e2} (V_c)^{e3} (Q'_w)^{e4} \quad (2.3)$$

$F'_N$  étant la force spécifique normale de meulage,  $F'_s$  étant la force spécifique minimale d'enlèvement de matière,  $C_{wp}$  et  $C_{gw}$  sont des constantes relatives à la pièce et à la meule respectivement,  $d$  la profondeur de passe et  $d_{eq}$  le diamètre équivalent de la meule.

Un modèle de force empirique a été généré par Guo et al. [31] en utilisant le taux d'avance, la vitesse de rotation de la meule et la profondeur de coupe dynamique. Le modèle décrit les propriétés de la force de meulage en vue de l'amplitude et la fréquence.

Il existe aussi dans la littérature plusieurs méthodes d'identification des paramètres des modèles cités. Les travaux récents d'identification des modèles de force s'appuient sur les réseaux de neurones artificiels *RNA*, la logique floue *FL* ou les techniques de régression. Toutes ces approches permettent de traiter et d'analyser les données de meulage de différentes manières afin de déterminer les relations entre les entrées et sorties du procédé.

Amadou et al. [3] ont proposé une méthode d'optimisation en utilisant un *RNA* afin de prévoir la force de meulage tangentielle et normale spécifique en déterminant une série d'entrée *RNA* optimal.

Deng et al. ont utilisé un modèle hybride basé sur un algorithme génétique *AG* et des réseaux de neurones artificiels pour l'optimisation des paramètres de processus dans le meulage d'arbre à cames à

TABLE 2.4: Modèles de force de meulage (1/2)

<b>Modèle de base</b>	$F'_N = C_{wp}C_{gw}$	$\cdot \left(\frac{1}{q}\right)^{e1}$	$\cdot d^{e2}$	$\cdot d_{eq}^{e3}$
<b>Saljé 1953</b>	$F_T = \tau_0 Q$	$\cdot \left(\frac{1}{q}\right)^{1+\frac{m}{2}}$	$\cdot d^{1+\frac{m}{2}}$	$\cdot d_{eq}^{1+\frac{m}{2}}$
<b>Shaw, Reichenbarch et Mayer 1959</b>	$F_T = A \cdot \left(\frac{1}{N}\right)^{1-\frac{m}{2}}$	$\cdot \left(\frac{1}{q}\right)^{1-\frac{m}{2}}$	$\cdot d^{\frac{1-m}{2}}$	$\cdot d_{eq}^{\frac{m-1}{2}}$
<b>Ono 1961</b>	$F'_N = C_{wp}C_{gw}$	$\cdot \left(\frac{1}{q}\right)^{1-m}$	$\cdot d^{1-\frac{m}{2}}$	$\cdot d_{eq}^{\frac{m-1}{2}}$
<b>König et Brückner 1962</b>	$F_T = K_s \frac{B_s}{L_s}$	$\cdot \left(\frac{1}{q}\right)$	$\cdot d$	$\cdot a_p$
<b>König et Ernst</b>	$F_T = A$	$\cdot \left(\frac{1}{q}\right)^m \cdot Q_w^{1-m}$	$\cdot d$	

TABLE 2.5: Modèles de force de meulage (2/2)

<b>Modèle de base</b>	$F'_N = C_{wp}C_{gw}$	$\cdot \left(\frac{1}{q}\right)^{e1}$	$\cdot d^{e2}$	$\cdot d_{eq}^{e3}$
<b>Lindsay 1971</b>	$F'_N = A_1$ Facile à meuler	$\cdot \left(\frac{1}{q}\right)^{0.59}$	$\cdot d^{1.23}$	$\cdot d_{eq}^{0.266}$
<b>1971</b>	$F'_N = A_2$ Difficile à meuler	$\cdot \left(\frac{1}{q}\right)^{0.42}$	$\cdot d^{0.5}$	$\cdot d_{eq}^{0.334}$
<b>Shaw 1971</b>	$F'_T = A \cdot (N \cdot r)^{\frac{m}{2}}$	$\cdot \left(\frac{1}{q}\right)^{1-\frac{m}{2}}$	$\cdot d^{1-\frac{m}{4}}$	$\cdot d_{eq}^{\frac{m}{4}}$
<b>König et Werner 1961</b>	$F'_N$ $= A \cdot \left(\frac{C_1^2}{K_s}\right)^{\frac{1-m}{3}}$	$\cdot \left(\frac{1}{q}\right)^{\frac{2m+1}{3}}$	$\cdot d^{\frac{m-2}{3}}$	$\cdot d_{eq}^{\frac{1-m}{3}}$
<b>Peters et Decneut 1962</b>	$F'_T = A$	$\cdot \left(\frac{1}{q}\right)^{2m-1}$	$\cdot d^m$	$\cdot d_{eq}^{1-m}$
<b>Spur et Özhan 1984</b>	$F'_T = \frac{A}{m}$	$\cdot \left(\frac{1}{q}\right)^{2m-1}$	$\cdot d^m$	$\cdot d_{eq}^{1-m}$
<b>Saljé et Bock 1987</b>	$F'_N = A$	$\cdot \left(\frac{1}{q}\right)^m$	$\cdot d^{\frac{1+m}{2}}$	$\cdot d_{eq}^{\frac{1-m}{2}}$

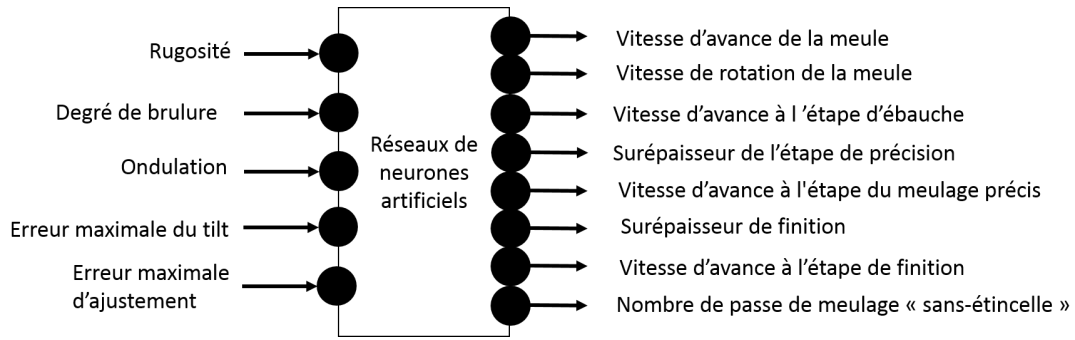


FIGURE 2.7: Schéma d'entrée/sortie d'un RNA d'optimisation de meulage

CN [18]. La figure 2.7 présente un schéma simplifié des entrées/sorties du *RNA* utilisé.

## 2.4.2 Modèles physiques de force de meulage

Les modèles de meulage physiques sont dérivés des attributs d'opération, des variables de processus, des lois physiques et des hypothèses physiques. Ces types de modèles peuvent être dérivés d'approches analytiques ou numériques.

En générale, la force de meulage peut être séparée en deux parties, la force de déformation de coupe et la force de frottement. La force de déformation de coupe peut être aussi séparée en deux parties, la force de labourage et la force de coupe. Ces composantes de forces correspondent aux trois étapes de meulage (le labourage, la coupe et le frottement).

$$F = F_{lab} + F_{coupe} + F_{frott} \quad (2.4)$$

$$F_N = F_{Nl} + F_{Nc} + F_{Nf} \quad (2.5)$$

$$F_T = F_{Tl} + F_{Tc} + F_{Tf} \quad (2.6)$$

### Force de coupe

Lors du développement des composants de la force de formation de copeaux, l'action de coupe d'un seul grain de la meule est supposée être similaire à l'action d'un outil de coupe à un seul point lors du meulage. Par conséquent, la composante normale de la force de formation de copeaux créée par un seul grain  $F_{enc}$  peut être déterminée en fonction de la section transversale du copeau non déformée, qui peut être écrite comme [64, 88] :

$$F_{enc} = K_e Q_i \quad (2.7)$$

La force de formation de copeaux normale totale par unité de largeur  $F'_{Nc}$  est le total des forces

normales de tous les grains actifs dans la zone de contact de la meule et de la pièce [64, 88] :

$$F'_{Nc} = \sum K_e Q_i = K_e \sum Q_i \quad (2.8)$$

$\sum Q_i$  est la somme totale des sections des copeaux créés simultanément par unité de largeur et est donnée par [64, 88] :

$$\sum Q_i = \frac{V_s}{V_c} d \quad (2.9)$$

### Force de frottement

Le phénomène de frottement dans le meulage est dû à la zone plate de la meule, qui est causée par l'usure des grains. Les expériences prouvent que la force normale de chaque grain variera directement avec la zone d'usure [52]. Par conséquent, les composantes de la force de frottement normale et tangentielle d'un seul grain sont

$$F_{Nf} = (N\delta)P_m \quad (2.10)$$

$$F_{Tf} = \mu(N\delta)P_m \quad (2.11)$$

avec  $N$  le nombre de grains actifs,  $\delta$  la surface de la partie usée du seul grain,  $\mu$  le coefficient de frottement et  $P_m$  la pression moyenne de contact entre la meule et la pièce.

### Force de labourage

Un autre mécanisme associé au processus abrasif est le labourage. L'énergie de labourage est dépensée par la déformation du matériau de la pièce sans enlèvement [64]. Durgumahanti associe le labourage à l'écoulement latéral du matériau du chemin de coupe vers les bords, mais il peut également inclure une déformation plastique du matériau passant sous le chemin de coupe (voir figure 2.8). Initialement, le grain établit un contact élastique, qui est supposé apporter une contribution négligeable à l'énergie totale, suivi de la déformation plastique (labour) de la pièce.

Plusieurs travaux ont été réalisés pour calculer cette force. Le modèle de force de labourage présenté dans les travaux de Younis et al [88] est présenté par l'équation 2.12.

$$F_{Nl} = \alpha_F e l_c \left( \frac{V_s}{V_c} \right) \quad (2.12)$$

D'autres modèles sont disponibles dans la littérature. Nous citons le modèle représenté par l'équation 2.13 proposée par [64].

$$F_{Nl} = K_l \left( \frac{V_s}{V_c} \right)^{a_0} d_g^{b_0} d^{c_0} C_s (e l_c) \quad (2.13)$$

avec  $C_s$  nombre de grain par unité de surface en  $mm^{-2}$ ,  $l_c$  la longueur géométrique de contact,  $e$  l'épaisseur de la meule et  $d_g$  le diamètre des grains.

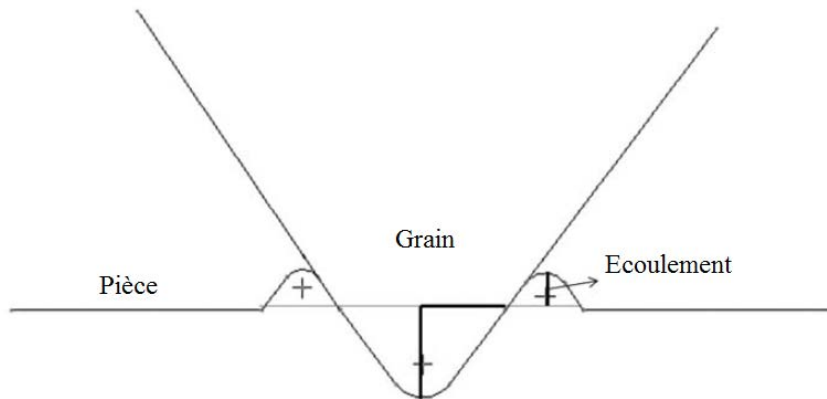


FIGURE 2.8: Chemin de coupe lors du labourage d'une seule arête en meulage

### 2.4.3 Modèle de force de meulage angulaire

La majorité des modèles développés pour les procédés d'usinage à abrasifs sont adaptées pour le procédé de rectification. Bien que le meulage angulaire et la rectification ont plusieurs points de similitude, ces procédés restent différents (taille des grains, orientation de l'outil, pression de contact,...)

Un nouveau modèle de force de meulage est nécessaire pour la modélisation du procédé de meulage angulaire. Ce modèle doit prendre en compte les spécificités de la cinétique et de la géométrie des meules de ce procédé. Le modèle proposé dans ce travail permet de relier la profondeur de passe du meulage angulaire à la force de meulage.

Le modèle de processus utilisé pour l'application de meulage choisie est celui de Persoons [65] défini par l'équation (2.14). Ce modèle est suffisamment pertinent par rapport aux objectifs fixés du meulage robotique [19], il contient un nombre limité de paramètres dans les valeurs sont données par l'expérimentation ( $K_1$  et  $K_2$ ). Ce modèle est similaire aux modèles proposés par Hahn [32] et utilisé dans les travaux de Nasri [59].

$$F_N = K_1 + K_2 Q_w \quad (2.14)$$

Une simplification du calcul du taux d'enlèvement de matière est adaptée pour réduire le temps de calcul en simulation et pour faciliter le contrôle du procédé. Pour cette simplification, nous accepterons les hypothèses suivantes :

- Le diamètre de la meule est très grand par rapport à la profondeur de passe.
- La surface de contact entre la meule et la pièce à usiner est petite.

A partir des hypothèses précédentes, nous pouvons admettre que la surface de contact entre la meule et la pièce est un segment circulaire d'un angle  $\gamma$  et que  $\gamma$  est donc très petit. Nous pouvons écrire l'équation 2.15.



$$\sin\gamma = \frac{\sqrt{R^2 - h^2}}{R} \approx \gamma \quad (2.15)$$

$$R^2\gamma \approx R\sqrt{R^2 - h^2} \quad (2.16)$$

Et en raison de l'angle d'inclinaison  $\alpha$  du disque de meulage :

$$h = R - \frac{d}{\cos\alpha} \quad (2.17)$$

La surface de contact entre la roue et la pièce est calculée par l'équation 2.18.

$$S = 2R\sqrt{R^2 - h^2}\frac{\pi}{2\pi} - h\sqrt{R^2 - h^2} \quad (2.18)$$

Supposons que  $R + h \approx 2R$  l'équation peut être transformée en :

$$\begin{aligned} S &= (R - h)^{\frac{3}{2}}\sqrt{R + h} \\ &= (R - h)^{\frac{3}{2}}\sqrt{2R} \\ &= \left( R - \left( R - \frac{d}{\cos\alpha} \right) \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{2R} \end{aligned} \quad (2.19)$$

D'après l'équation 2.14 , nous pouvons écrire :

$$F_N = K_1 + K_2SV_f \quad (2.20)$$

Puisque  $\alpha, R, V_f$  sont des constantes, le modèle de force simplifié peut alors être écrit comme suit :

$$\begin{aligned} F_N &= K_1 + K_2SV_f \\ &= K_1 + K_2V_f \left( R - \left( R - \frac{d}{\cos\alpha} \right) \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{2R} \\ &= K_1 + Kd^\beta \end{aligned} \quad (2.21)$$

Avec  $K = \frac{K_2V_f\sqrt{2R}}{(\cos\alpha)^{3/2}}$  et  $\beta = 3/2$ .

La force tangentielle  $F_T$  est calculée en multipliant  $F_N$  par le ratio de force de meulage.

### Identification du modèle de force

Afin de déterminer les coefficients  $K$  et  $K_1$  du modèle de force, plusieurs essais de meulage sont réalisés. Les capteurs de pressions présents dans les deux chambres du vérin pneumatique ainsi que le capteur de position du piston du vérin sont utilisés pour le calcul de la force de meulage et de la profondeur

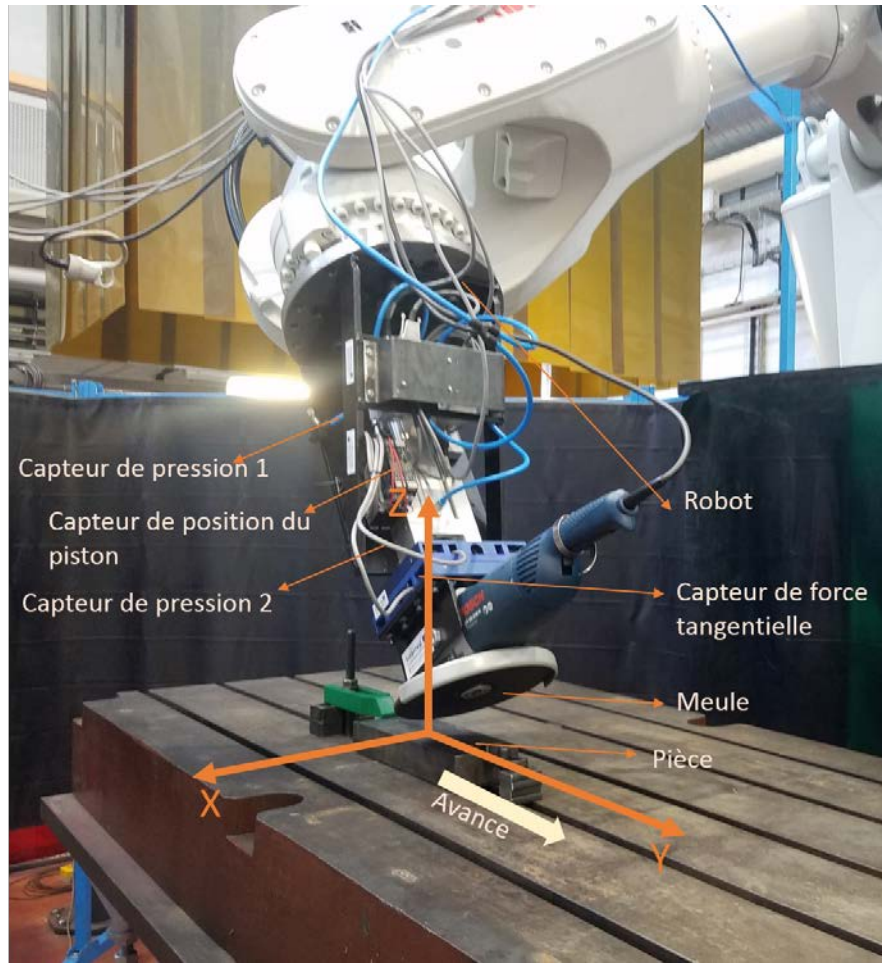


FIGURE 2.9: Montage expérimental

de passe. La figure 2.9 présente le montage expérimental de cet essai.

Nous présentons dans la figure 2.11 le profil de la force de meulage normale d'un essai effectué à l'aide du système de meulage. Le profil est en escalier partant d'une valeur négative pour maintenir le piston en position haute lors des déplacements. La force est variée par incrément de temps entre 90 N et 160 N.

La force est calculée en utilisant l'équation

$$F_N = Kd^\beta + K_1 = P_1 S_p - P_2(S_p - s_t) + mg\cos(\theta) - F_{frot} \quad (2.22)$$

Avec  $m$  la masse mobile,  $g$  l'accélération de la pesanteur. La variation de la force de meulage induit une variation de la profondeur de passe (voir figure 2.10 et 2.13). En utilisant la méthode du moindre carré, les coefficients  $K$ ,  $K_1$  et  $\beta$  sont identifiés. La figure 2.12 présente le modèle d'approximation de force normale de meulage.

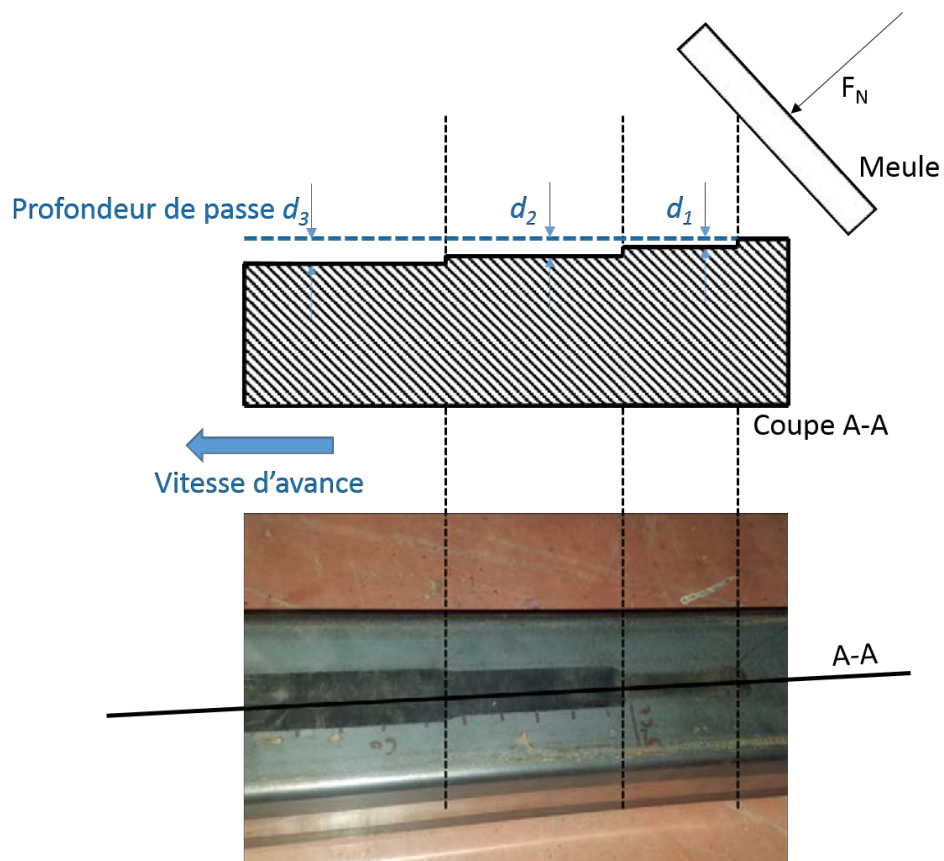


FIGURE 2.10: Variation de la profondeur de passe en fonction de la force

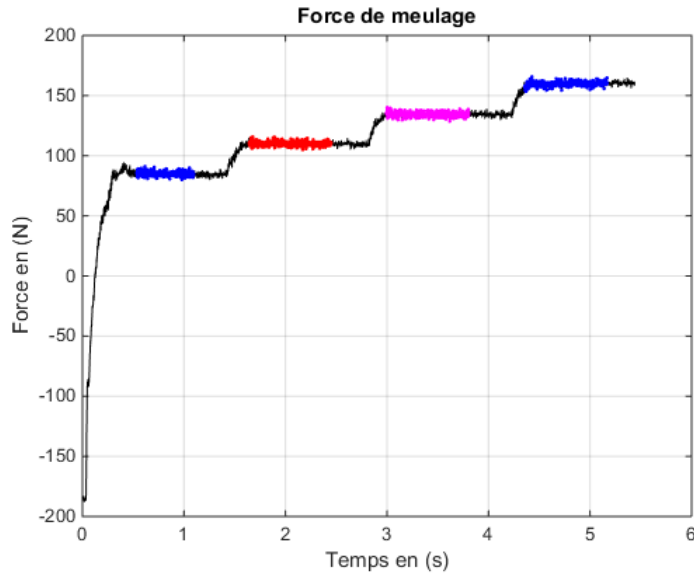


FIGURE 2.11: Force normale de meulage appliquée durant l'identification du modèle de force

## 2.5 Modélisation des frottements

Les frottements sont une force qui résiste au mouvement de deux corps en contact. Dans la littérature, on peut distinguer entre plusieurs types de force de frottement : Les frottements secs (statique ou cinétique) qui sont dues au mouvement relatif de deux corps solides en contact, les frottements visqueux (frottements avec lubrification ou sans lubrifiant). Le frottement entre deux corps macroscopiques est causé en réalité par les efforts électromagnétiques créés entre les électrons et noyaux de ces deux corps. Calculer cette force analytiquement est d'une grande complexité [6]. La position et la vitesse de déplacement du vérin pneumatique utilisé dans le système de meulage sont affectées considérablement par les efforts de frottements entre le piston et les parois internes du vérin. Le frottement réduit l'efficacité du procédé car affecte la force de meulage appliquée. La modélisation des efforts de frottement représente une partie importante du modèle général du système de meulage. Les frottement lors du meulage associés à la coupe sont pris en compte dans le modèle de force.

La modélisation de ce phénomène était l'objet de plusieurs sujets de recherche scientifique. Différents auteurs [81, 13, 43, 34, 10, 22] ont proposé des modèles physiques et mathématiques dans le but de représenter et d'analyser ce phénomène complexe. Classiquement, le frottement est représenté en fonction de la vitesse [86]. Parmi les différents types de frottements, nous distinguerons : le frottement visqueux, le frottement statique, le frottement de Stribeck et le frottement de Coulomb (figure 2.14).

Pour cette raison, la force de frottement appliquée sur le piston P glissant par rapport à la chambre du vérin  $C$  est supposée fonction seulement de la vitesse  $\dot{z}(t)$  de  $P$ . La figure 2.15 présente les forces appliquées projetées suivant l'axe  $Z$  de déplacement du vérin :  $F_m$  force liée au procédé,  $F_v$  force créée

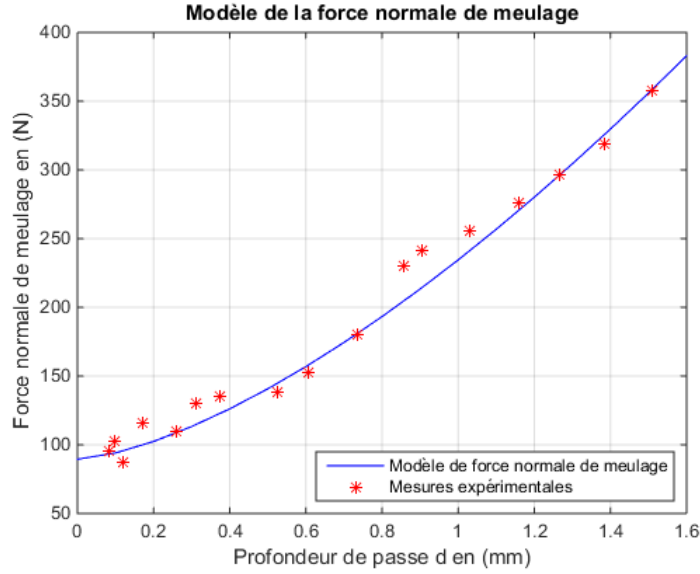


FIGURE 2.12: Modèle identifié de force normale du meulage angulaire robotique

par les pressions dans les chambres du vérin et  $F_{frot}$  la force de frottement .

La figure 2.16 montre le cycle hystérésis des frottements à l'intérieur du vérin (frottement entre le piston et les parois du vérin). Cette figure est créée en animant de piston d'un mouvement d'aller-retour. Pour le premier cycle, nous remarquons la présence des frottements secs d'une valeur de  $55N$ . Ce type de frottements disparaît pour les cycles suivants.

En utilisant la méthode du moindre carré, une approximation de ce cycle est réalisée en utilisant la fonction hyperbolique (courbe en vert dans la figure 2.16).

$$F_{frot}(t) = b_1 F_c \tanh\left(\frac{\dot{z}(t)}{b_2}\right) + b_v \dot{z}(t) + b_0 \quad (2.23)$$

avec :

- $b_1, b_2, b_v$  et  $b_0$  sont des constantes de dimensions différentes à identifier
- $F_c$  frottement de Coulomb
- $v = \dot{z}$  vitesse de déplacement du vérin

Les deux capteurs de pression permettent de mesurer la pression à l'intérieur des deux chambres du vérin . Le capteur de position permet de mesurer la position en  $z$  du vérin. Connaissant la position du vérin en fonction du temps  $t$ , la vitesse  $\dot{z}$  et l'accélération  $\ddot{z}$  du piston peuvent être calculées par dérivation. Les pressions  $p_1, p_2$  sont contrôlées pour créer le mouvement oscillatoire du piston. Un schéma du montage expérimental est disponible en annexe A.1.

Les efforts agissant axialement sur le vérin sont représentés dans la figure 2.15. La force  $F_v$  créée à l'aide de la différence de pression dans les deux chambres du vérin, peut être calculée en mesurant les

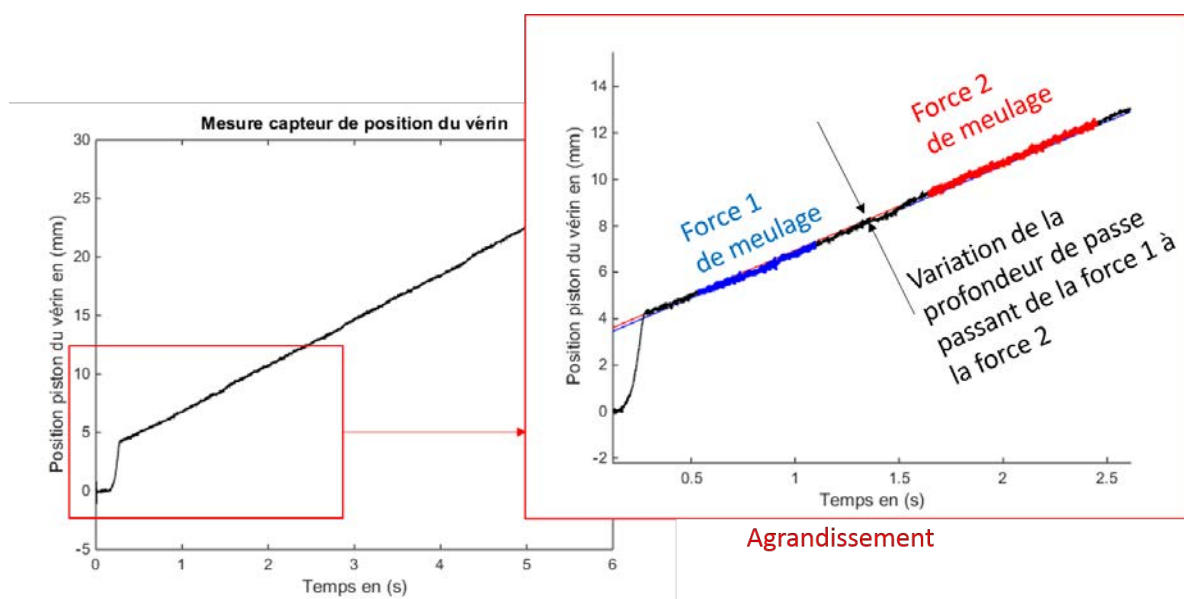


FIGURE 2.13: La variation de la profondeur de passe en meulage robotique en fonction de la variation de la force normale de meulage

pressions  $P_1$  et  $P_2$  selon l'équation 2.24. Puisque le système est en équilibre, nous pouvons écrire l'équation 2.25

$$F_v = p_1 s - p_2 (s - s_t) \quad (2.24)$$

$$m\ddot{z} = F_v - F_{frot} \quad (2.25)$$

Substituant l'équation (2.24) dans 2.25, on retrouve :

$$F_{frot} = m.\ddot{z} - p_1 \times s + p_2 \times (s - s_t) \quad (2.26)$$

avec :

- $m$  masse mobile (piston + tige)
- $p_1, p_2$  pression à l'intérieur de la chambre 1 et 2 respectivement
- $s, s_t$  section du piston et de la tige respectivement
- $F_{frot}$  force de frottement

Pour des régimes de vitesse proches de zéro, il est très difficile de connaître la valeur des frottements secs  $F_s$ . A partir du cycle d'hystérésis du vérin, nous pouvons remarquer que pour une vitesse presque nulle du piston,  $F_s$  passe de  $+50N$  à  $-50N$  ce qui rend le contrôle de  $F_N$  très compliqué [86]. Pour résoudre ce problème, le piston du vérin est maintenu en mouvement à une vitesse constante et faible. Dans cette condition,  $F_s$  pourra être négligée.

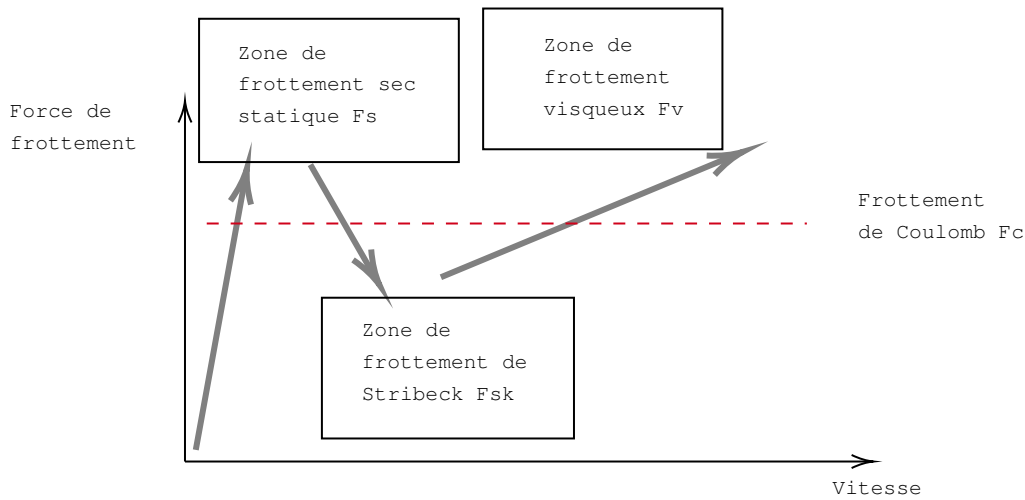


FIGURE 2.14: Types des frottements

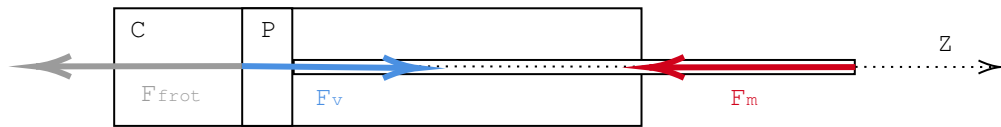


FIGURE 2.15: Forces appliquées sur le piston P

## 2.6 Modèle de remplissage des chambres du vérin

Le contrôle de la force normale de meulage est effectué en contrôlant les pressions des deux chambres du vérin pneumatique. Pour cette raison, un modèle du vérin électro-pneumatique est nécessaire. La figure 2.17 présente la pressurisation des chambres du vérin pour deux consignes de pression différentes (2 et 4 bar). Les nombres des pôles et des zéros a été choisi en comparant les erreurs d'ajustement des différents modèles. Le modèle choisi est présenté par la fonction de transfert  $G$  suivante :

$$G(p) = \frac{P_e(p)}{P_s(p)} = \frac{b_0 + b_1 p}{a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + p^3} \quad (2.27)$$

La figure 2.17 montre les sorties simulées (prédites) du modèle choisi pour deux entrées différentes. La figure montre aussi l'évolution de la pression réelle à l'intérieur des chambres du vérin. La qualité de l'ajustement du modèle choisi est évaluée en calculant le coefficient de détermination  $R^2$

$$R^2 = 1 - \frac{\|P - \hat{P}\|}{\|P - \bar{P}\|} \quad (2.28)$$

Avec  $P$  est la pression mesurée,  $\hat{P}$  est la sortie du modèle de remplissage et  $\bar{P}$  la valeur moyenne de  $P$ . Le coefficient de détermination varie entre 0 et 1. Lorsqu'il est proche de 0, le pouvoir prédictif du modèle est faible et lorsqu'il est proche de 1, le pouvoir prédictif du modèle est fort.

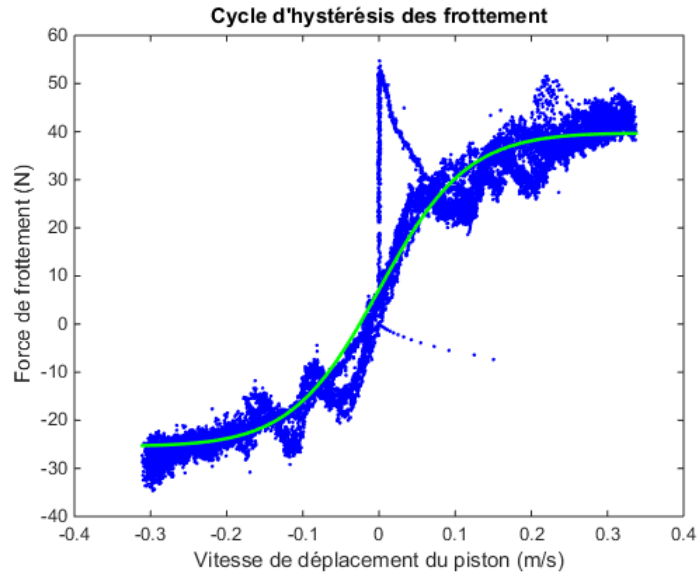


FIGURE 2.16: Cycle hystérésis de force de frottement : Force de frottement calculée (bleu) et modèle de force de frottement (vert)

TABLE 2.6: Paramètres du meulage en simulation

Paramètres de meulage	Valeur numérique
Vitesse d'avance	$4 \times 10^{-2} m/s$
Vitesse de coupe	$78 m/s$
Force de meulage	$150 N$
Angle du tilt	$25^\circ$
Diamètre meule	$230 mm$

Les paramètres du modèle ont été identifiés à l'aide du Toolbox de Matlab "System identification Toolbox". Le modèle identifié a un coefficient d'ajustement pour la première entrée (4 bar) et la deuxième entrée (2 bar) de 0.95 et 0.83 respectivement.

## 2.7 Simulation numérique du système de meulage robotisé

### 2.7.1 Application pour la simulation

Le cas d'étude en simulation est une opération de meulage de surface d'une pièce plane, dans le but de réduire ces défauts géométriques. La meule utilisée est un disque rigide. Les paramètres de meulage choisis sont présentés dans le tableau 2.6.

Une surface réelle n'est jamais parfaite, elle présente des défauts admissibles dans la fabrication en



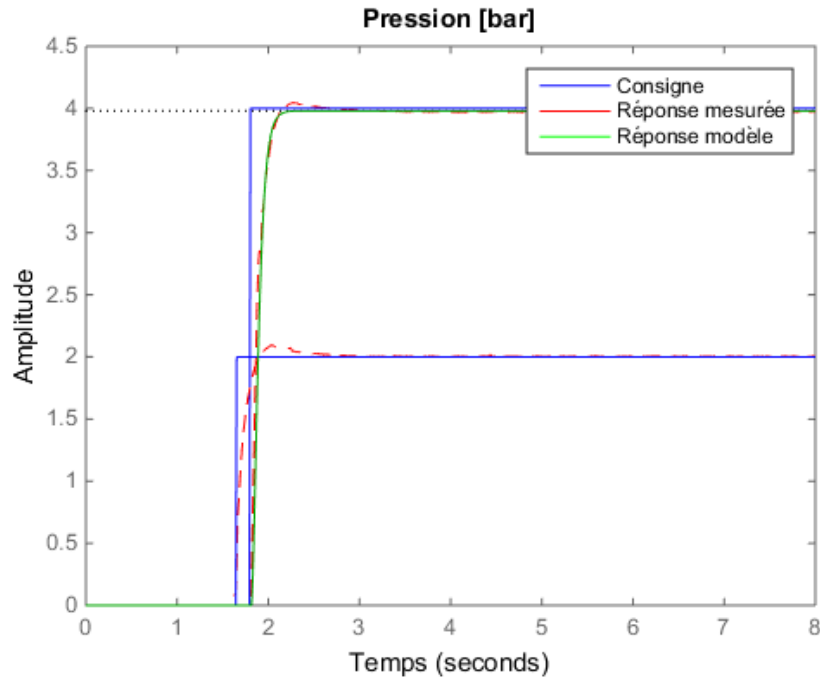


FIGURE 2.17: Remplissage de la chambre supérieure du vérin

usinage. Ces défauts peuvent être de forme (défauts macro-géométriques) ou de petits défauts (défauts micro-géométriques) évalués à l'aide d'un rugosimètre ; de ce fait, la modélisation de la surface en simulation présente des défauts du 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> ordres (ondulations, stries).

## 2.7.2 Création des modèles Simulink

Cette section décrit le modèle Matlab / Simulink implémenté afin d'analyser les caractéristiques dynamiques du système de meulage et d'étudier ses performances. Ce modèle a été développé sur la plate-forme Matlab / Simulink. Simulink est un progiciel pour la modélisation, la simulation et l'analyse de systèmes dynamiques en général. Un schéma bloc simplifié du simulateur du système de meulage est illustré dans la figure 2.18. Le modèle graphique globale est présenté en annexe A.2. Ce modèle a pour consigne la position souhaitée du vérin  $Z_{ac}$  et pour sortie la position réelle du vérin, la force de meulage calculée et la position réelle de la surface meulée. Le bloc "modèle de la surface" permet de rajouter un bruit blanc ainsi qu'un défaut d'ondulation à une séquence périodique. Concernant l'actionneur pneumatique, des blocs de calculs des pressions au sein des deux chambres du vérin permettent de calculer la force réelle appliquée par l'outil de meulage. Finalement, la profondeur de passe est estimée à partir de la force réelle calculée grâce au bloc "Force meulage" du schéma en annexe A.2.

Comme décrit au début de ce chapitre, de nombreuses équations sont nécessaires pour développer un modèle du système de meulage et étudier les principales caractéristiques de sa dynamique. Il existe deux

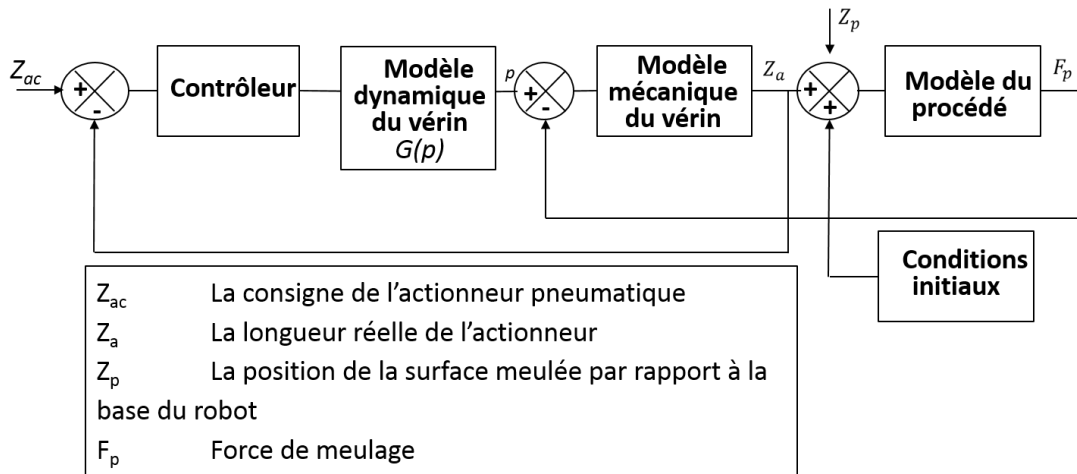


FIGURE 2.18: Bloc diagramme du simulateur du système de meulage



FIGURE 2.19: Bloc de calcul de la cinétique du piston du vérin pneumatique

types de modèles Simulink qui permettent d'implémenter les équations développés. De façon classique, nous utilisons des modèles de type schéma-bloc. Simulink permet aussi d'utiliser des modèles de type UDF (User-Defined Functions). Ce type de modèle a l'avantage d'introduire des lignes de code Matlab dans l'environnement Simulink. Pour des raisons d'amélioration de la lisibilité du modèle, plusieurs blocs sont regroupés dans des sous-systèmes (exemple dans la figure 2.19).

### 2.7.3 Résultats de simulation

Le simulateur de meulage robotisé nous a permis de prédire la qualité de la surface produite. Le meulage dans les simulations se fait sur une pièce en acier (longueur de 200 mm). Le contrôle de force commence lorsque la profondeur de passe  $d$  est positive ( $d > 0$ ).

La variation de la profondeur de passe provoque une variation de la force appliquée par le processus sur le robot et donc une variation de la force appliquée par l'effecteur. La figure 2.20 montre l'évolution de la force de meulage appliquée par le vérin.

La figure 2.22 montre la longueur du vérin  $Z_a(t)$  en fonction du temps. Cette information permet de déterminer la qualité de surface finale, puisque

$$Z(t) = Z_r - R - Z_a(t) \quad (2.29)$$

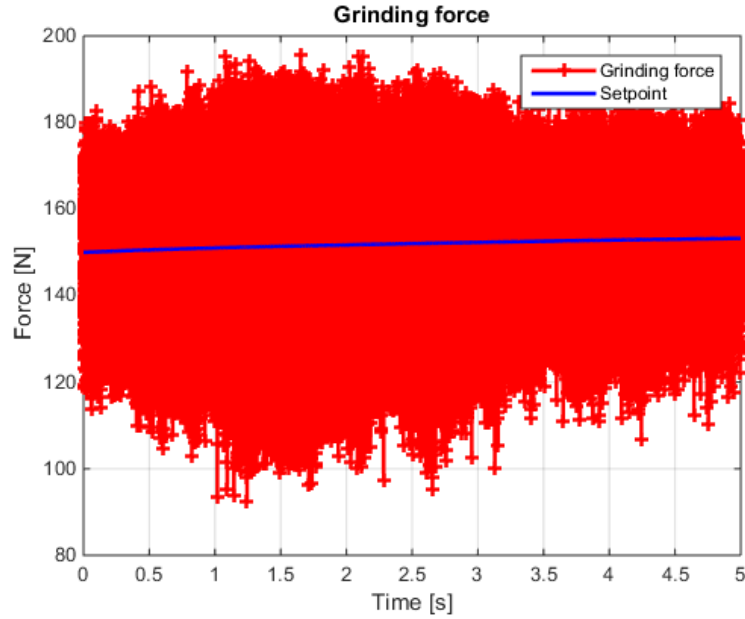


FIGURE 2.20: Force de meulage appliquée par le vérin en simulation numérique

La figure 2.21 montre une coupe longitudinale (suivant le sens d'avance) des surfaces meulée et initiale. On constate une profondeur de passe moyenne de  $0.5mm$

Une évaluation de l'écart type de la surface initiale de la pièce  $7,77 \times 10^{-2} (mm)$  et de l'écart type de la surface finale  $6,08 \times 10^{-2} (mm)$  montre que la qualité de la surface de la pièce s'est améliorée après le meulage. La valeur de rugosité moyenne arithmétique  $R_a$  pour ces surfaces est calculée à l'aide de la formule :

$$R_a = \frac{\sum_{i=1}^n |Z_i|}{n} \quad (2.30)$$

La pièce avait une rugosité de surface  $R_a = 67,1\mu m$ , la pièce finale a une rugosité de  $R_a = 49,8\mu m$ . Ainsi, la solution proposée nous a permis d'améliorer la rugosité de surface de 25,75 %.

## 2.8 Conclusion

Une approche de modélisation du meulage robotisé a été présentée dans ce chapitre. Le modèle est implémenté dans Simulink/Matlab pour effectuer des essais de meulage en simulation. Les forces de meulage ont été calculées à l'aide d'un modèle simplifié et la modélisation de l'actionneur pneumatique a permis de déterminer son comportement dynamique.

Les résultats ont montré qu'un effecteur externe actionné pneumatiquement permet le contrôle de force de meulage. Les résultats ont montré aussi que ce système de meulage robotisé permet d'améliorer

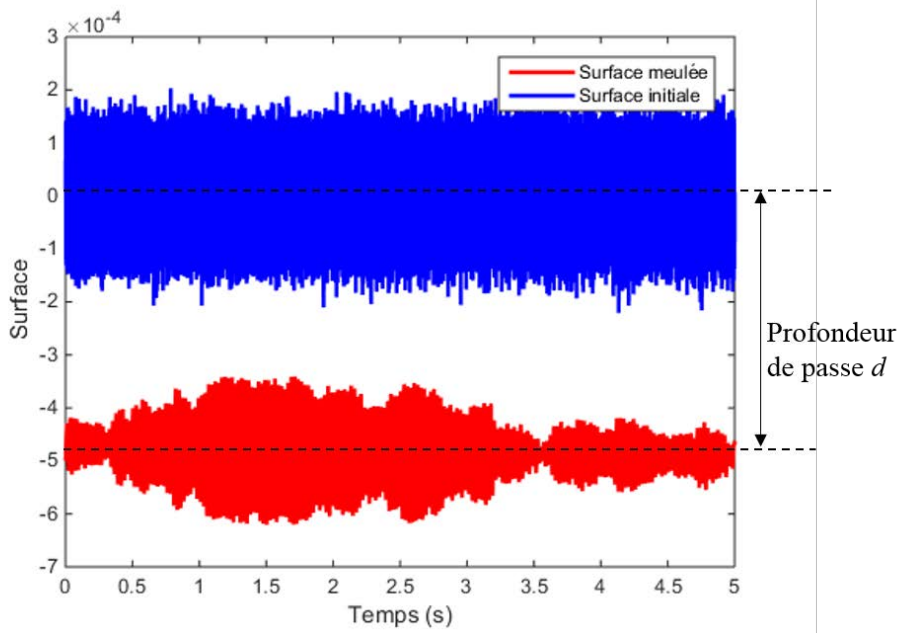


FIGURE 2.21: Coupe de la surface meulée en simulation

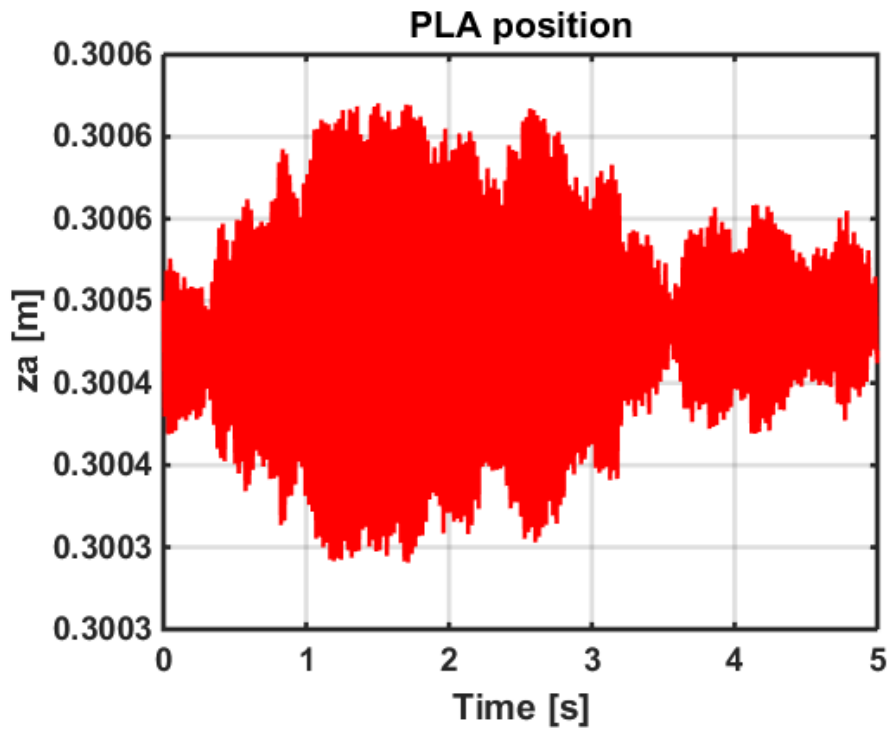


FIGURE 2.22: Position du piston du vérin en simulation

la qualité de la surface meulée.

La finition des pièces industrielles par un meulage angulaire robotisé permettra donc de garantir un état de surface qui respecte les spécifications géométriques exigées par les industrielles.



## Chapitre 3

# Planification de la trajectoire du meulage robotisé

### 3.1 Introduction

La planification de la trajectoire d'un lieu A à un lieu B et l'évitement des obstacles sont des tâches simples pour l'homme, mais pas aussi simples pour des robots industriels. Dans le chapitre précédent, nous avons établi les modèles de force de meulage, de force de frottement et le remplissage du vérin. A partir de ces modèles, un simulateur a été réalisé pour prédire le taux d'enlèvement de matière, la profondeur de passe, la qualité de la surface produite... Grâce à ces données ainsi que les efforts et couples admissibles, une planification de la trajectoire du robot peut être envisagée pour réduire le temps de meulage et respecter les spécifications géométriques des pièces produites. La trajectoire de l'outil permettra donc l'évitement des obstacles, de respecter les efforts maximaux définis, d'atteindre la qualité de surface voulue et d'éviter la brûlure de la surface. Notons ici que le terme "trajectoire" désigne l'ensemble des points de passage de la meule (l'outil) pour réaliser une opération de meulage. Ces points sont décomposés en :

- Points de contact  $P$  : points où la meule est en contact avec la pièce et enlève la matière.
- Points de rétraction  $P_r$  : points où la meule s'éloigne de la surface pour passer à la passe suivante.

La distance entre des points de contact (outil/pièce) consécutifs est appelée "pas d'avance" désigné par  $p_a$ , la distance entre deux passes adjacentes est appelée "pas" indiqué par  $p$ . Le meulage des surfaces larges nécessite de réaliser plusieurs passes de la meule. Pour meuler des épaisseurs importantes de matière, il est nécessaire de réaliser le meulage en plusieurs couches, dont l'épaisseur dépend des paramètres du procédé tel que la force normale appliquée.

Nous nous intéressons à la planification de la trajectoire pour les opérations de meulage de surfaçage puis d'arrondi. Ces opérations sont simples mais différentes, ce qui nécessite l'adoption d'une méthodologie

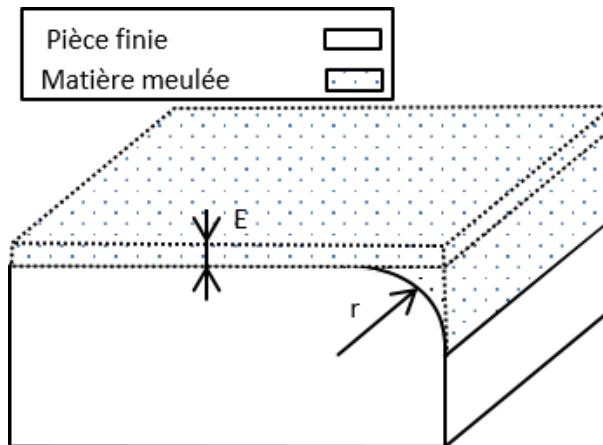


FIGURE 3.1: Cas d'application

bien défini pour planifier efficacement la trajectoire du robot. Le meulage de l'arrondi nécessite une réorientation de l'effecteur et donc une compensation du poids de la meule est envisagée.

Dans l'ingénierie mécanique, un arrondi est une surface lisse qui relie deux autres surfaces et ayant une section en arc de cercle convexe. Les arrondis permettent, en général, de supprimer les arêtes tranchantes (voir la figure 3.1). Pour les cas choisis d'étude, il est nécessaire d'exploiter le fichier CAO de la pièce initiale pour générer la trajectoire.

Dans ce chapitre, nous explorons la planification de trajectoire par les courbes de Bézier et les courbes B-splines. Les techniques d'approximation des points de passage de la meule sont présentées. Dans la première partie de ce chapitre, différents éléments nécessaires pour la planification sont présentés, tel que la forme de l'outil, la technique de coupe ou les repères utilisés. Ensuite, une méthodologie de meulage est proposée dans la deuxième partie. Cette méthodologie est implémentée dans un programme Matlab qui permet la génération des points de passage de la meule. Nous effectuons ensuite une compensation du poids de la partie mobile de l'effecteur, en calculant l'orientation de l'effecteur pneumatique de meulage développé grâce aux repères de Frenet liés aux courbes paramétrées B-spline de la trajectoire du robot. Les résultats de la planification de la trajectoire du robot pour les deux cas d'applications choisis seront présentés et analysés dans la 5<sup>ème</sup> partie.

## 3.2 Considérations générales

La génération de la trajectoire a pour but de transformer la surface CAO en une surface réelle. La planification de la trajectoire de l'outil comporte deux aspects principaux : la topologie de la trajectoire et les paramètres de la trajectoire. Le premier est défini par le mode dans lequel l'outil de coupe se déplace pour produire la surface, et le dernier est défini par les paramètres de coupe tels que la profondeur de passe, le pas et le pas d'avance[66].



Par conséquent, le défi de la génération de la trajectoire de la meule est divisé en trois problèmes secondaires [82] :

- Spécifier le mode de coupe de la meule
- Spécifier les points de passage à partir des paramètres de la trajectoire
- Vérifier la collision de la meule avec la pièce.

Divers algorithmes de planification de trajectoire d'outils sont décrits dans la littérature. Les algorithmes de planification de trajectoire pour les pièces qui présentent des surfaces de formes libres peuvent être largement groupés en des techniques à paramètres constants ou non constants. Une grande partie de la recherche s'est concentrée sur l'approche à paramètres constants pour positionner les courbes de contact outil/pièce par rapport à la surface pièce [11]. Cette approche est généralement efficace car les courbes de contact de l'outil sont faciles à retrouver directement à partir de la définition des surfaces [36]. L'inconvénient de cette approche, cependant, est que la relation entre la coordonnée paramétrique et la coordonnée physique (cartésienne) correspondante n'est pas uniforme [46]. Par conséquent, la précision et l'efficacité de l'approche à paramètres constants pour la génération des trajectoires peuvent varier en fonction de la géométrie des surfaces de la pièce. Un exemple typique de cet inconvénient est une surface en "éventail" illustrée à la figure 3.2 et 3.3.

Sur une telle surface, les courbes à paramètres constants sont proches les unes des autres à une extrémité mais plus éloignées à l'autre. Il est toujours possible d'atteindre les précisions souhaitées à l'extrémité large de l'éventail, mais cela entraînerait un nombre très élevé de mouvements d'outils à l'extrémité étroite.

L'approche par paramètres non constants pour la génération de trajectoires d'outils ne souffre pas de ce problème. Généralement, les courbes de coupe sont définies par les intersections d'un groupe de plans parallèles (plans de coupe) et les surfaces de la pièce, comme le montre la figure 3.3. Cette approche offre la possibilité de choisir n'importe quelle direction d'avance de l'outil pour chaque pièce sans être limité par la coordonnée paramétrique (voir annexe B.1). Kim et al. [46] ont présenté une comparaison entre différentes techniques de planification par paramètres non constants. Ces travaux ont montré que la direction et la liaison entre les plans de coupe affectent directement le temps de la tâche et donc influencent l'efficacité de la trajectoire.

Les trajectoires par paramètres non constants peuvent être issues d'intersection de plusieurs plans parallèles à une direction fixe, comme pour le cas présenté dans la figure (3.4a, 3.4c)[66, 50]. Le choix de cette direction doit tenir en compte la forme de la surface à meuler. L'objectif est de maximiser la longueur des courbes d'intersection et de réduire le nombre de rétraction de l'outil [73, 63].

Les trajectoires par paramètres non constants peuvent aussi être issues d'intersection de plusieurs plans parallèles au contour de la surface (figure 3.4b).

La liaison entre ces passes peut être réalisée en "zig-zag" ou dans un sens unique. Durant le meulage en "zig-zag", l'outil commence au bord de la surface dans le plan de rétraction, puis se déplace vers la surface de la pièce. L'outil reste en contact avec la pièce tout au long de la trajectoire. L'outil réalise des mouvements de "zig-zag" en changeant son orientation à chaque fois et en incrémentant sa position

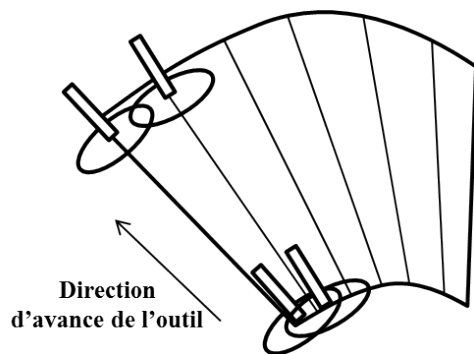


FIGURE 3.2: Trajectoire de l'outil paramétrée

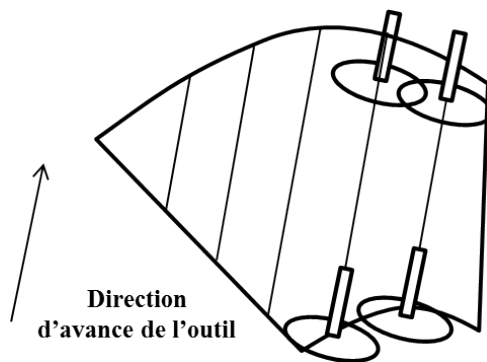


FIGURE 3.3: Trajectoire de l'outil non paramétrée

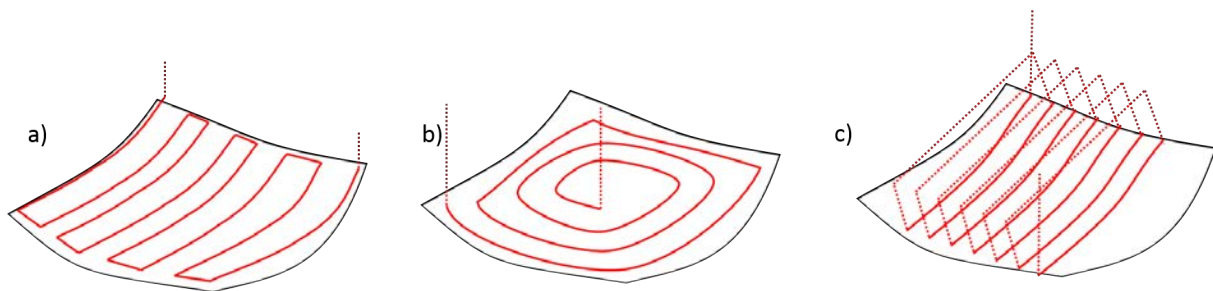


FIGURE 3.4: Différents modes de coupe en meulage représentés par la position du centre de la meule : a) coupe en "zig-zag" b) coupe circulaire c) coupe à sens unique

par le pas  $p$  pour passer à la passe suivante. Durant le meulage en sens unique, l'outil passe au plan de rétraction après chaque passe de la meule, incrémente sa position par le pas puis réalise la passe suivante sans changer son orientation d'avance.

Le mode en "zig-zag" et circulaire sont réservés en général pour des tâches d'enlèvement de matière dont l'orientation de l'outil par rapport au vecteur normal de la surface n'est pas importante. Ce qui n'est pas le cas pour le meulage angulaire. Pour cela, le mode à sens unique a été choisi pour la suite de ce travail car il permet d'éviter la réorientation de l'effecteur du robot après chaque passe. En plus, ce mode est le plus adapté pour le meulage des pièces de grandes dimensions car il permet d'éviter les points de singularité du robot et permet de réduire l'espace de travail nécessaire pour réaliser ce genre d'opération de meulage.

### 3.2.1 Hypothèses

Afin de réduire le temps de calcul de la trajectoire et en prenant en compte la géométrie des pièces choisie pour le meulage robotisé, des hypothèses sont fixées pour la suite de ce chapitre :

- Hypothèse 1 : La meule est rigide. La déformation ainsi que l'usure de la meule n'est pas prise en compte.
- Hypothèse 2 : La surface meulée est une surface simple. La meule ne touche dans aucun cas la surface sur deux zones différentes.
- Hypothèse 3 : La force de meulage est constante dans chaque passe de la meule.

### 3.2.2 Définition de l'outil

Une définition appropriée de l'outil est requise pour la planification de trajectoire afin que les emplacements appropriés de l'outil, peuvent être calculés. Pour calculer les emplacements des points de contacts et par la suite les positions et orientations de l'outil, une description géométrique complète est nécessaire. Cette description est accomplie en spécifiant les quatre paramètres géométriques figurant dans la figure 3.5. En fonction des valeurs de ces paramètres, l'enveloppe d'outil peut représenter par exemple des meules de surfaçage (type 27) ou de tronçonnage (type 41).

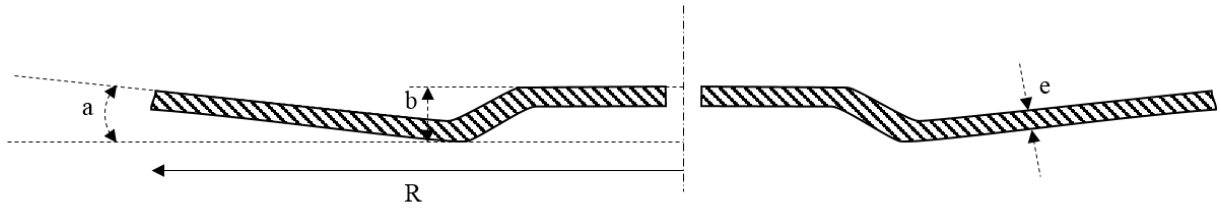


FIGURE 3.5: Paramètres d'une meule

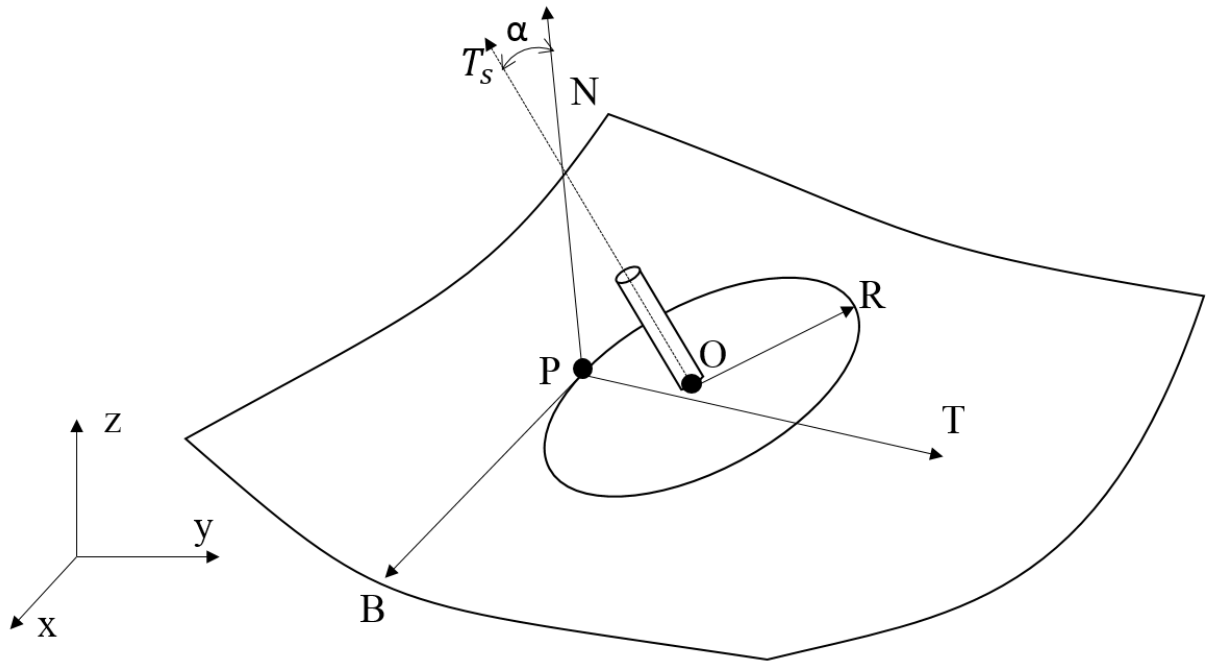


FIGURE 3.6: Position et orientation de l'outil

Pour la détection de collision de l'outil avec la pièce, une surface d'enveloppe de l'effecteur pneumatique a été choisie.

### 3.2.3 Repère de l'outil

Afin de bien orienter l'outil tout au long de la trajectoire, un repère outil doit être défini. La figure 3.6 montre le point de contact  $P$  de la meule et la surface, le repère outil et le vecteur de direction de l'outil  $T_s$ . Le repère de l'outil est représenté par  $(B, T, N)$  avec  $B$  et  $T$  sont des vecteurs unitaires au point  $P$ , et  $N$  le vecteur normal de la surface à meuler. Ce repère est exprimé par rapport au repère global lié à la base du robot  $(x, y, z)$ .

Si  $N$  est le vecteur normal de la surface alors,  $T = N \times B$ . Les vecteurs  $B$  et  $T$  sont tangents à la surface au point  $P$ . L'angle du tilt  $\alpha$  est définie par  $\alpha = \arccos(T_s \cdot N)$ .

Nous définissons  $T_s$  le vecteur d'orientation de l'outil dans le repère outil par l'équation 3.1.

$$T_s = \begin{bmatrix} 0 \\ -\sin \alpha \\ \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Connaissant le rayon  $R$  de la meule. La position du centre de la meule  $O$  peut être défini dans le repère global  $(x, y, z)$  comme

$$O = P + R.(T_s \times N) \times T_s \quad (3.2)$$

Plusieurs méthodes sont disponibles dans la littérature pour détecter le phénomène de brûlure. Une classification détaillée de ces méthodes a été présentée dans les travaux de He et al [4]. Un angle inférieur à  $10^\circ$  augmente la chance d'avoir une brûlure de la surface meulée. Pour éviter ce défaut de meulage, l'angle  $\alpha$  est choisi supérieur à  $10^\circ$  pour la suite de ce travail.

### 3.3 Planification de la trajectoire

Afin de réduire le temps nécessaire de meulage, nous proposons dans ce travail de réaliser l'enlèvement de matière en deux étapes. La première étape est l'étape d'ébauche, au cours de laquelle le taux d'enlèvement de matière est maximisé. La surface de contact entre la meule et la pièce est donc maximisée en tenant compte des différents critères de meulage fixés : force de meulage, vitesse d'avance, tilt, .... La deuxième étape est l'opération de finition. Dans cette étape, la qualité de la surface finale est plus importante. La trajectoire de la meule à cette étape dépend donc des caractéristiques géométriques de la pièce et de l'outil.

#### 3.3.1 Méthodologie de la planification hors-ligne

La trajectoire de la meule peut être décrite en définissant la succession de points où le centre de la meule doit passer. Selon l'application, la surface de la pièce peut être meulée en plusieurs couches. Chaque couche est meulée par de multiples passages de la meule (voir annexe B.2).

Pour contrôler la qualité de la pièce produite, il est possible d'évaluer plusieurs grandeurs [70]. Nous choisirons pour le contrôle de la qualité des pièces meulées une hauteur maximale admissible des ondulations. Une autre grandeur évaluée pour l'arrondi est le coefficient de circularité  $C$ , plus  $C$  est proche de 1, plus la surface des ronds est proche d'un quart de cercle parfait (pour un quart de cercle,  $l_a = \frac{\pi R}{2}$  et  $A = \frac{\pi R^2}{4}$ ). La formule 3.3 est utilisée pour calculer ce coefficient, où  $l_a$  et  $A$  sont le périmètre et l'aire de l'arrondi respectivement. Nous évaluons aussi le rayon de l'arrondi le long de la trajectoire.

$$C = \frac{l_a^2}{\pi A} \quad (3.3)$$

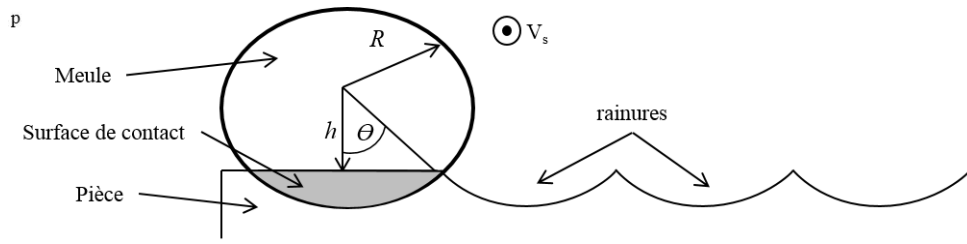


FIGURE 3.7: Empreinte elliptique de la meule sur la pièce

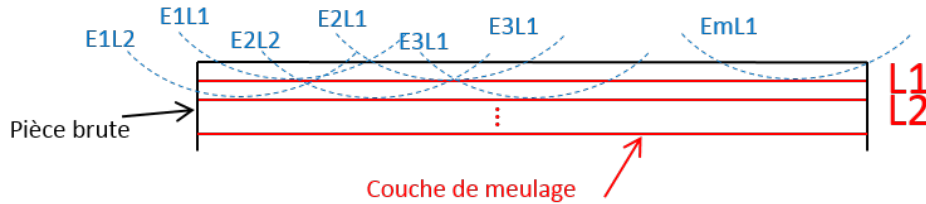


FIGURE 3.8: Passes et couches de meulage pour le surfacage

Le nombre de couches et de passes dépend des paramètres du processus de meulage ainsi que de la meule et de la géométrie de la pièce. La meule, en effectuant une seule passe, laissera une rainure elliptique sur la surface de la pièce (figure 3.7) en raison de l'angle d'inclinaison. Dans la première étape de meulage, le taux d'enlèvement de matière doit être maximisé en fonction de l'effort de meulage pour réduire le temps nécessaire à cette opération. En utilisant le modèle de force développé au chapitre précédent et pour une force normale de meulage fixée, il est possible de calculer la profondeur de coupe maximale  $d_{max}$  qui correspond au taux d'enlèvement de matière maximal. Connaissant l'aire de la surface  $s$  de l'ellipse en contact avec la pièce (surface souligné en gris dans la figure 3.7), il est possible de déterminer la position de l'ellipse dans le repère global du robot qui satisfait  $s = S_{max}$ . La passe suivante est placée directement à côté de la première passe en incrémentant la position du robot suivant l'axe  $x$ . Pour la deuxième couche et pour les autres couches qui suivent, la meule sera placée entre deux passes de la couche précédente, comme indiqué sur les figures 3.8 et 3.9 dans le but d'éviter le surchauffe de la pièce et la meule. L'objectif du programme de meulage, pour la première étape, est d'obtenir dans chaque passe de meulage la même surface de contact  $S_{max}$  pour maximiser le taux d'enlèvement de matière. Pour l'étape de finition, l'objectif du programme est d'améliorer l'état de surface. Le pas  $p$  de finition est recalculé pour avoir une hauteur de pic des rainures qui correspond à la qualité admissible. Le problème de positionnement de l'outil dans cette étape est purement géométrique.

Puisque les plans de coupe sont parallèles au plan  $yz$ , nous supposons que la surface de contact est uniquement fonction de la position  $(x, z)$  du centre de la meule (voir figure 3.10 et 3.11). La position des passes suivantes de la meule dépend de la position des passes précédentes. Par conséquent, le calcul de l'intersection entre les ellipses de différentes couches est nécessaire. Le calcul analytique des intersections entre les surfaces elliptiques est réalisé en utilisant les formules proposées par Schneider et al. [74].

La surface d'intersection d'une ellipse et un plan est fonction des points d'intersection entre le plan

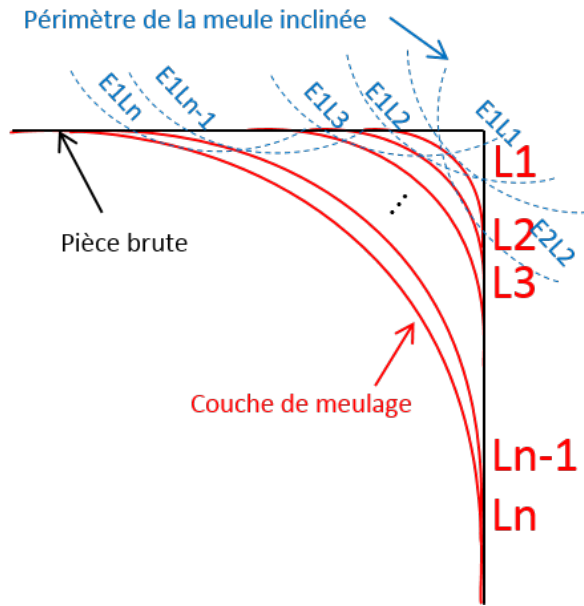


FIGURE 3.9: Passes et couches de meulage pour le meulage d'arrondi

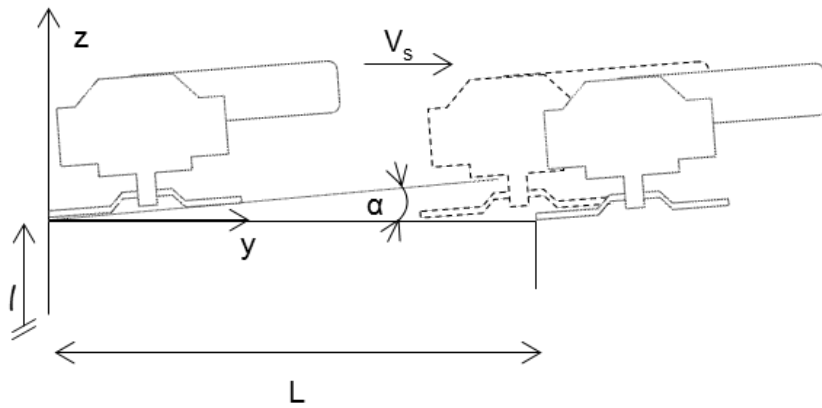


FIGURE 3.10: Configuration de meulage dans le plan  $yz$  pour le surfacage

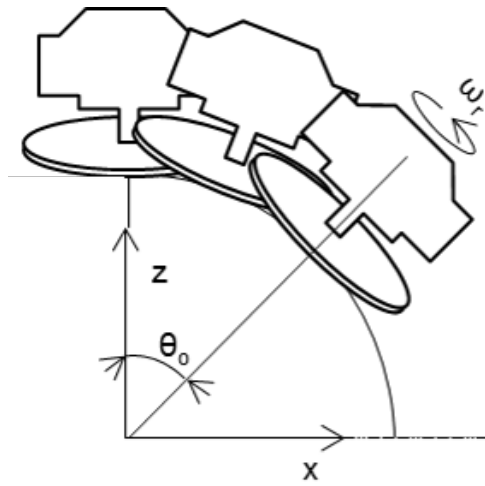


FIGURE 3.11: Configuration de meulage dans le plan  $xz$  pour le meulage d'arrondi

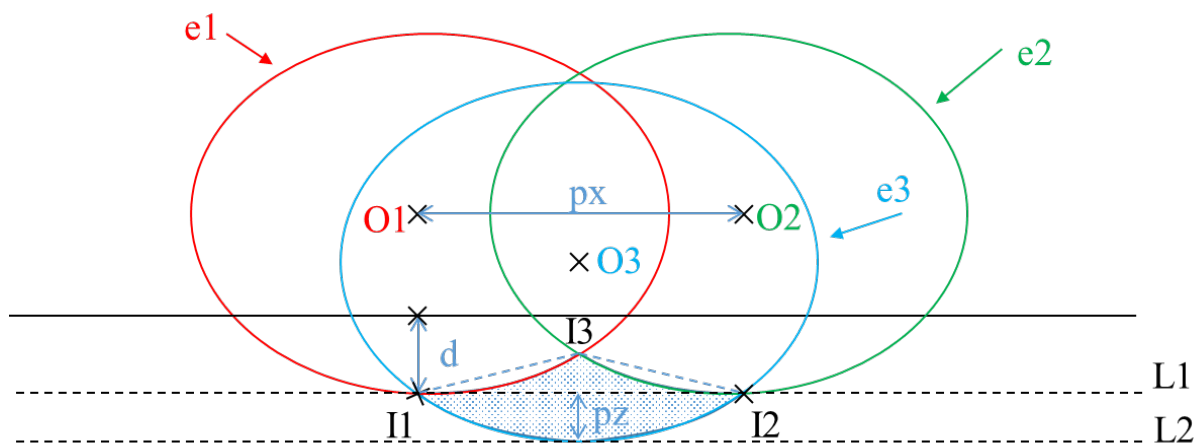


FIGURE 3.12: Surface d'intersection entre trois ellipses (projection de la meule inclinée)



et le périmètre de l'ellipse et est fonction de la position du centre de l'ellipse :  $s = surfaceE(x1, x2, O)$ , avec  $x1$  et  $x2$  deux points du périmètre de l'ellipse  $e$  et  $O$  le centre de l'ellipse. La surface d'un triangle est fonction de ces côtés :  $s = surfaceT(x1, x2, x3)$ , avec  $x1$ ,  $x2$  et  $x3$  les trois côtés du triangle. Alors la surface  $S_i$  hachurée dans la figure 3.12 peut être calculée comme suite :

$$S_i = surfaceT(I1, I2, I3) + surfaceE(I1, I2, O3) - surfaceE(I1, I3, O1) - surfaceE(I3, I2, O2) \quad (3.4)$$

Le calcul de l'aire de la surface d'intersection entre une ellipse et un plan est présenté plus en détail dans la section 2.3 et le calcul de l'aire des triangles est détaillé en annexe B.3.

Le nombre de couches  $N_c$  dépend de la quantité de matière à meuler, de  $S_{max}$  la surface maximale de contact et de la géométrie de la pièce. Pour les cas d'étude choisis, le surfaçage est réalisé avec un mouvement de translation suivant  $y$  avec une inclinaison constante de meule et l'arrondi est réalisé dans un plan contenant  $y$  orienté par rapport au plan  $x - z$  par le paramètre  $\theta$ .

### 3.3.2 Programme de meulage sur Matlab

Basé sur le modèle numérique de la surface brute et le pas entre les passes de meulage successives (en fonction de la précision demandée), les points de passages sont générés sur le logiciel Matlab (voir figure 3.13). Les points de passage sont composés de points de contact  $P_{ik}$  et les points de retraits  $Pr_{ik}$ . Grâce à l'utilisation de ces points, les informations sur la pose de l'effecteur du robot sont déduites, comme le montre la figure 3.14. Les points de contact de la meule de la  $i^{\text{ème}}$  passe se retrouvent dans la ligne d'intersection entre le plan  $j_i$  et la surface brute. La courbe paramétrée représentant la trajectoire de l'outil est générée en utilisant les étapes suivantes (figure 3.15) :

- Tout d'abord, en suivant le modèle numérique de la surface, les plans de coupe parallèles  $j_i$  avec  $i = 1 \dots N_p$  sont construits ( figure 3.14 ), où l'espacement entre les plans de coupe  $j_i$  est égale au pas  $p$ . Sur cette base, les lignes d'intersection  $l_j$  sont à partir des intersections de ces plans avec la surface brute.
- Ensuite, le nombre  $N$  de points de contact est calculé,  $N = l_j/p_a$  en fonction du pas d'avance  $p_a$  et la longueur de la ligne d'intersection  $l_j$ . Nous pouvons utiliser cette formule car les passes de meulage des cas d'étude sont rectilignes.
- Ensuite, les points de contact sont déduit en décalant, suivant l'axe  $Z$ ,  $N$  points placés sur la ligne d'intersection  $l_j$ . Les points de rétractions sont déduits à partir des deux points de contact au début et à la fin de la passe.
- Enfin, l'interpolation des points de passage est effectuée.

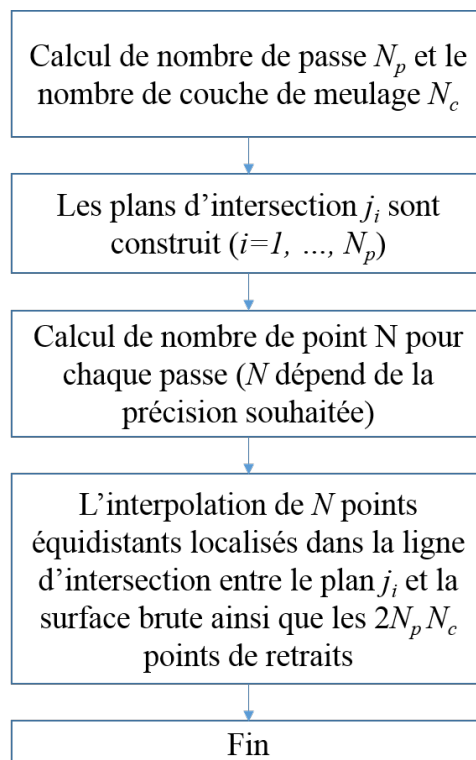


FIGURE 3.13: Organigramme de la planification de la trajectoire

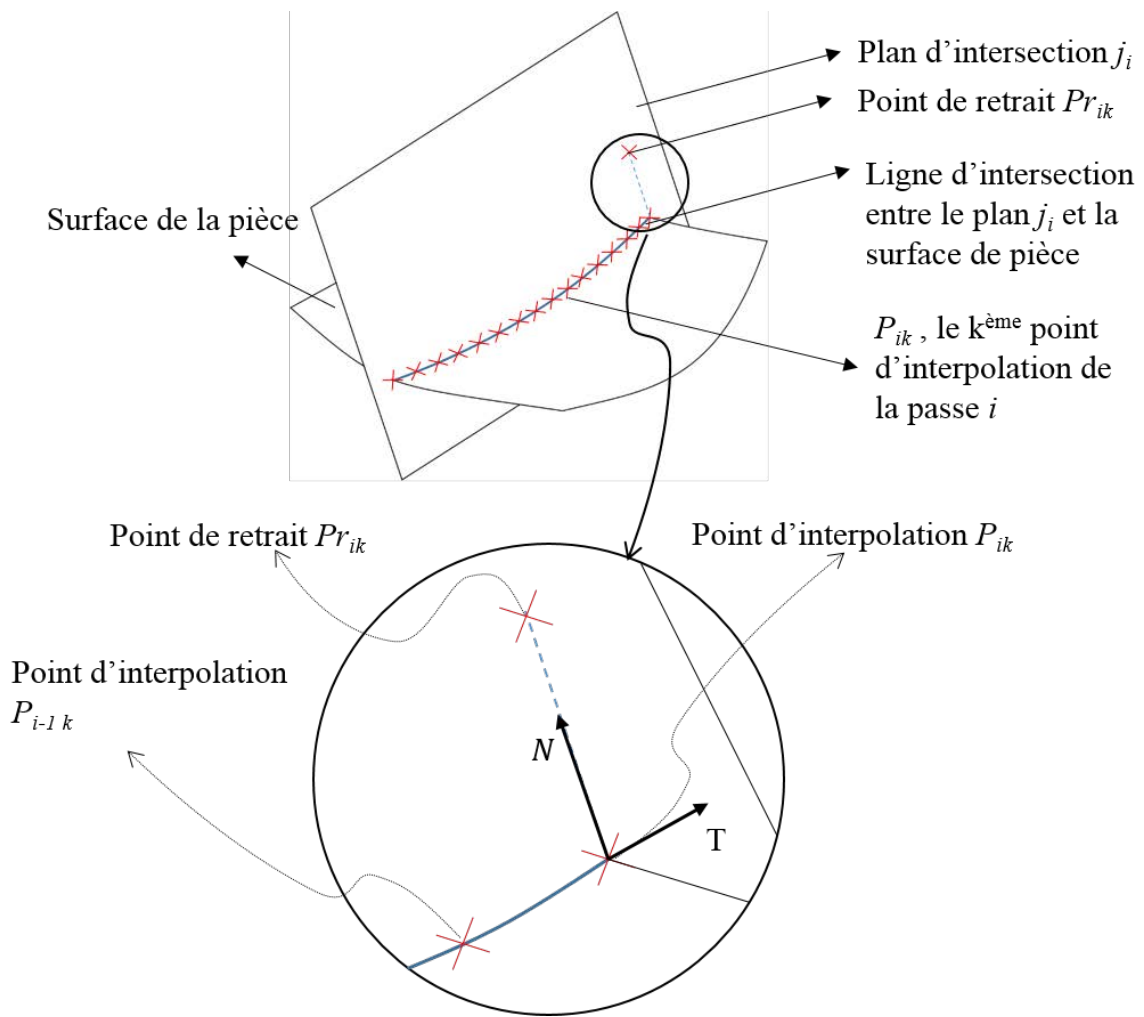


FIGURE 3.14: Point de passage de la meule

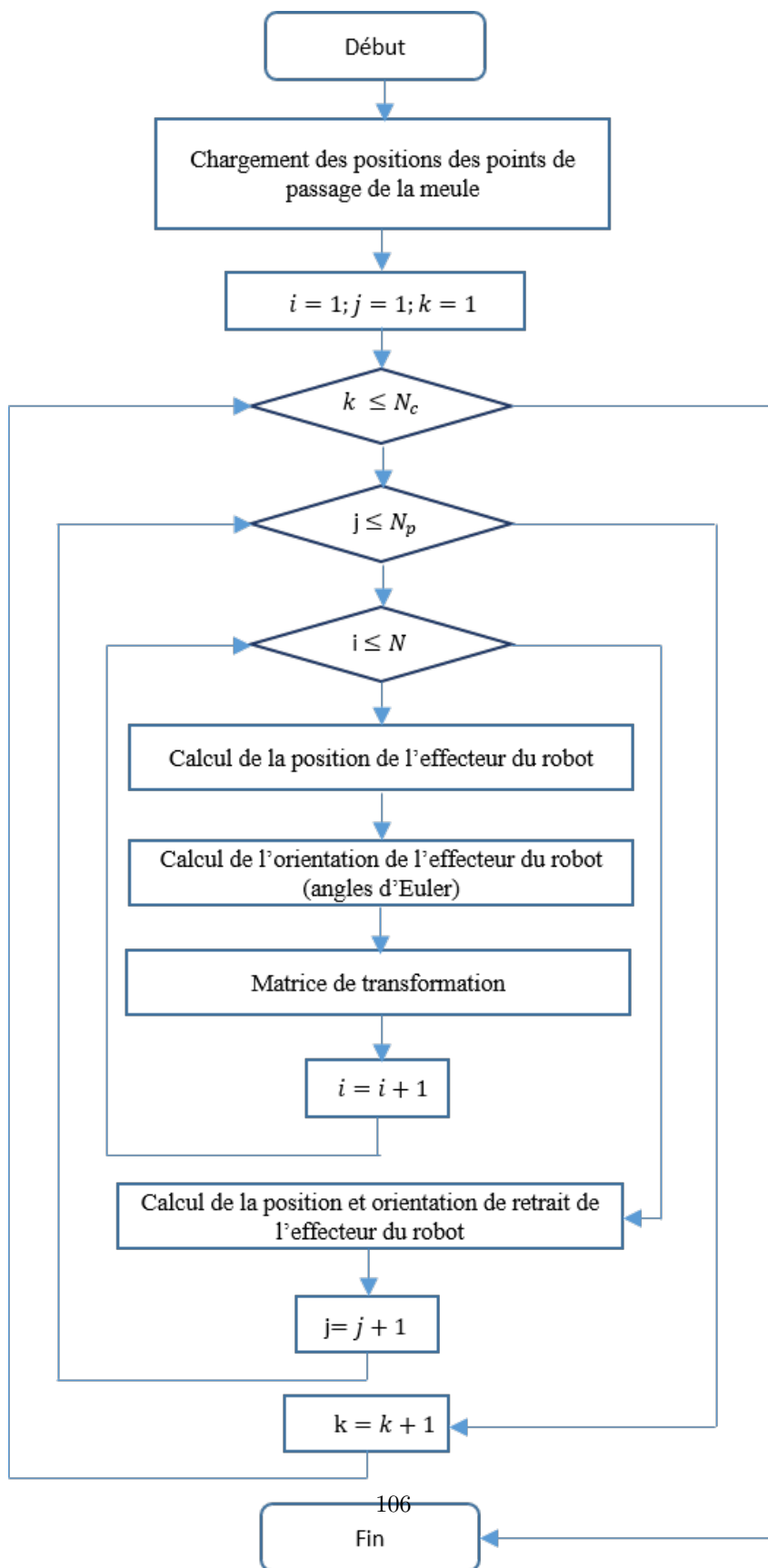


FIGURE 3.15: Programme de planification de la trajectoire

### 3.3.3 Interpolation des points de passage par des courbes de Bézier

Les courbes de Bézier sont des courbes polynomiales paramétriques définies par des points de contrôle (voir annexe B.4). Elles ont des grandes applications en synthèse d'images, en animation par exemple. Les courbes de Bézier sont très utilisées pour la planification des trajectoires car ils permettent aussi de lisser la trajectoire des robots [48].

Une courbes de Bézier  $C(t)$  de degré  $n$  est définie par [27] :

$$C(t) = \sum_{j=0}^n Q_j B_j^n(t) \quad (3.5)$$

Avec  $Q_j$  les points de contrôle,  $B_j^n(t)$  est le polynôme de Bernstein d'indice  $j$  et de degré  $n$  défini par :

$$B_j^n(t) = \frac{n!}{j!(n-j)!} t^j (1-t)^{n-j} \quad (3.6)$$

et  $t$  est le paramètre de la courbe normalisé défini dans l'intervalle  $[0, 1]$ . Par convention,  $0! = 1$ .

Considérons les points de passage de la meule pour la  $k^{\text{ème}}$  passe  $P_{ik}, i = 1, \dots, N$ . L'objectif est de définir la courbe de Bézier qui s'approche le plus de ces points données. Pour ce faire, les points de contrôle  $\mathbf{Q}_{jk}, j = 0, \dots, n$  de la courbe d'approximation  $C_k(t)$  doivent être calculés en minimisant l'erreur des moindres carrés  $E_k$ , définie par la somme des carrés des résidus :

$$E_k = \sum_{i=1}^N \left( P_{ik} - \sum_{j=0}^n Q_j B_j^n(t_{ik}) \right)^2 \quad (3.7)$$

où  $t_{ik}$  est un paramètre associé à chaque point de passage  $P_{ik}, i = 1, \dots, N$ . Prenons le vecteur colonne  $\mathbf{B}_j = (B_j^n(t_1) B_j^n(t_2) \dots B_j^n(t_N))^T, j = 0, \dots, n$  et  $\mathbf{P}_k = (P_{1k} P_{2k} \dots P_{Nk})$ , l'équation 3.7 devient le système d'équation suivant :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B}_0^T \mathbf{B}_0 & \dots & \mathbf{B}_n^T \mathbf{B}_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{B}_0^T \mathbf{B}_n & \dots & \mathbf{B}_n^T \mathbf{B}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_0 \\ \vdots \\ \mathbf{Q}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_k \mathbf{B}_0 \\ \vdots \\ \mathbf{P}_k \mathbf{B}_n \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Ce qui peut être écrit sous la forme compacte [29] :

$$\mathbf{M} \cdot \mathbf{Q} = \mathbf{R} \quad (3.9)$$

Avec  $\mathbf{M} = \left[ \sum_{j=1}^N B_l(t_{jk}) B_i(t_{jk}) \right]$  et  $\mathbf{R} = \left[ \sum_{j=1}^N \mathbf{P}_{jk} B_l(t_{jk}) \right]$  pour  $i, l = 0, \dots, n$ . Le problème devient donc un problème de minimisation classique par la méthode des moindres carrés, avec les points de contrôle  $Q_j$  comme inconnus.

Pendant, pour des trajectoires avec un grande nombre de point de passage (forme complexe de la trajectoire), la trajectoire nécessite l'utilisation des courbes de Bézier d'ordre très grand, ce qui augmente le temps de calcul. D'autres méthodes d'interpolation sont présentées dans la littérature tel que

l'interpolation en utilisant les B-splines.

### 3.3.4 Interpolation des points de passage par des B-Spline

Les courbes de B-spline sont une généralisation des courbes de Bézier (voir annexe B.4). Les NURBS (B-splines rationnelles non uniformes) sont à leur tour, une généralisation des courbes B-spline. Elles sont utilisées pour interpoler des points de manière lisse. Les B-splines présentent l'avantage de découpler le nombre de point à interpoler et le degré des courbes.

Considérons  $n + 1$  points de contrôle  $d_0, d_1, \dots, d_n$  et  $m = n + k + 1$  scalaire  $t_0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_m$  appelés noeuds, avec  $k$  le degré des B-splines. La courbe B-spline  $S(t)$  est définie par :

$$S(t) = \sum_{i=0}^n d_i N_i^k(t) \text{ avec } t \in [t_k, t_{n+1}] \quad (3.10)$$

Les fonctions  $N_i^k(t)$  sont les fonctions B-splines définies d'une manière récursive par :

$$N_i^0(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } t \in [t_i, t_{i+1}] \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.11)$$

$$N_i^k(t) = w_{i,k}(t) N_i^{k-1}(t) + [1 - w_{i+1,k}(t)] N_{i+1}^{k-1} \quad (3.12)$$

Avec

$$w_{i,k}(t) = \begin{cases} \frac{t-t_i}{t_{i+k}-t_i} & \text{si } t_i < t_{i+k} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.13)$$

L'algorithme de De Boor permet d'évaluer la courbe B-spline à un  $t$  donné. On a  $S(t) = d_j^k$ , pour  $t \in [t_j, t_{j+1}[$  et pour  $k \leq j \leq n$ , est calculé à l'aide de la relation suivante[16] :

$$d_i^r = \left( \frac{t - t_i}{t_{i+k-r} - t_i} \right) d_i^r + \left( \frac{t_{i+k-r} - t}{t_{i+k-r} - t_i} \right) d_{i-1}^r \quad (3.14)$$

Une illustration de cette récursivité est présentée dans la figure 3.16.

Le degré des B-splines utilisés ainsi que le nombre des pièces polynomiales pour approximer la  $k^{\text{ème}}$  passe de la meule sont fixés afin de ne pas dépasser une erreur maximale admissible  $E_{max}$ . Cela a été réalisé à l'aide de la fonction *spap2* de Matlab.

### 3.3.5 Repère de Frenet-Serret

Le repère de Frenet-Serret est un repère local défini dans un point  $P$  d'une courbe  $C$  régulière paramétrée par l'abscisse curviligne  $f(s) = (x(s), y(s), z(s))$ . Le repère de Frenet définit au point de paramètre  $s$  est composé de trois vecteurs unitaires orthogonaux  $T, N, B$  formant une base orthonormale directe dont l'origine est le point de paramètre  $s$ .

Les repères tangent  $T$ , normal  $N$  et binormal  $B$  du repère de Frenet sont définis comme suit :

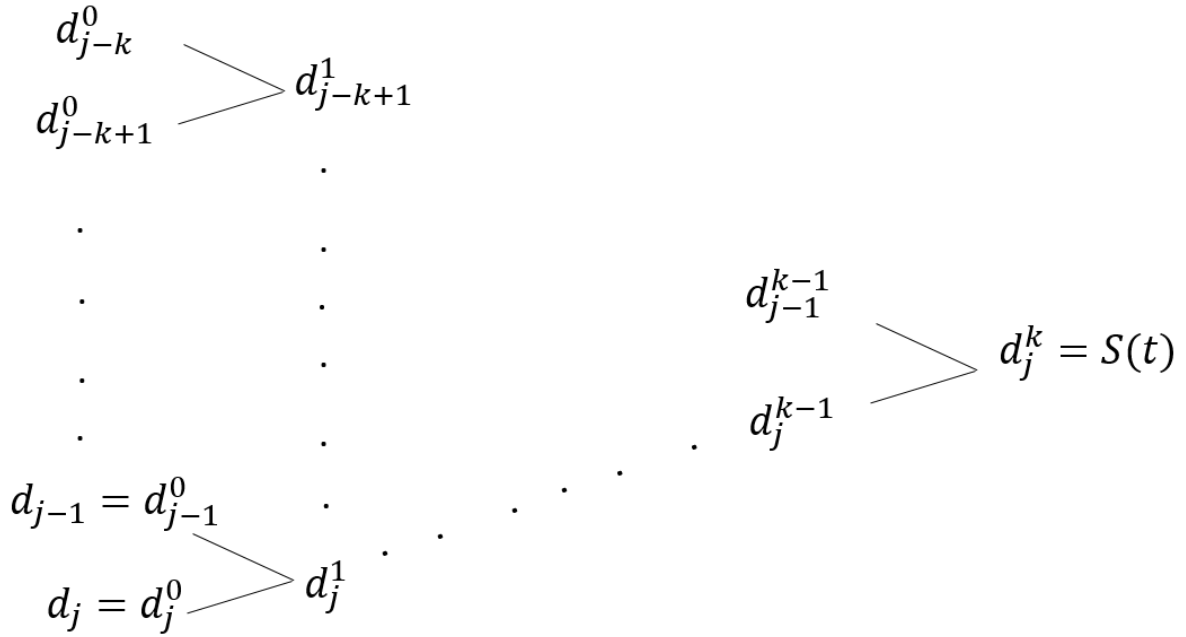


FIGURE 3.16: Illustration de l'algorithme de De Boor

- $T$  : Vecteur tangent à la courbe, dirigé vers le sens du mouvement.
- $N$  : Vecteur normal est la dérivée du vecteur  $T$  par rapport au paramètre  $s$  de l'abscisse curviligne.
- $B$  : Vecteur binormal est le produit vectoriel de  $T$  et  $N$ .

Les vecteurs du repère peuvent être calculés à partir des formules suivantes :

$$\frac{dT}{ds} = \kappa N \quad (3.15)$$

$$\frac{dN}{ds} = -\kappa T + \tau B \quad (3.16)$$

$$\frac{dB}{ds} = -\tau N \quad (3.17)$$

Avec  $d/ds$  la dérivée par rapport au paramètre  $s$  de l'abscisse curviligne de la courbe  $C$ ,  $\kappa$  la courbure et  $\tau$  la torsion. Le calcul de  $\kappa$  et  $\tau$  est présenté en annexe B.5. Les repères de Frenet liés à une passe de meulage de surfacage sont présentés à l'annexe B.6.

### 3.3.6 Calcul des angles d'Euler

L'orientation de l'organe terminal par rapport au système de coordonnées de base  $\Sigma(x, y, z)$  varie d'un point de passage à un autre. Cette orientation est généralement désignée par les angles d'Euler, comme le

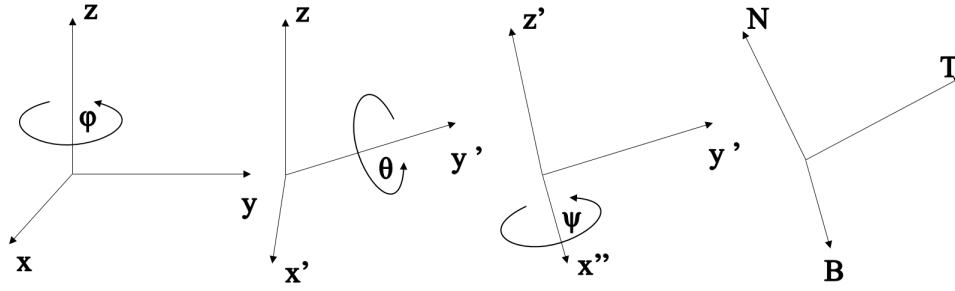


FIGURE 3.17: Rotation  $zyx$

montre la figure 3.17. Les trois angles d'Euler représentent une succession d'angles avec lesquels le repère outil est orienté par rapport au repère de base. L'ordre de rotation ne peut pas être modifié. Sinon, le résultat sera différent. Le robot ABB utilise l'ordre de rotation  $zyx$  tel que présenté ci-dessous :

- Faites tourner le système de coordonnées  $\Sigma(x, y, z)$  autour de l'axe  $z$  pour déplacer le système de coordonnées  $\Sigma(x, y, z)$  vers le système de coordonnées  $\Sigma'(x', y', z)$ .
- Faire tourner le système de coordonnées  $\Sigma'(x', y', z)$  autour de l'axe  $y'$  pour déplacer le système de coordonnées  $\Sigma'(x', y', z)$  vers le système de coordonnées  $\Sigma''(x'', y', z')$
- Faire tourner le système de coordonnées  $\Sigma''(x'', y', z')$  autour de l'axe  $x''$  pour déplacer le système de coordonnées  $\Sigma''(x'', y', z')$  vers  $\Sigma_e(B, T, N)$ .

Les matrices de rotation pour des rotations  $z, y$  et  $x$  sont représentées par  $rot(z, \varphi)$ ,  $rot(y, \theta)$  et  $rot(x, \Psi)$  respectivement :

$$rot(z, \varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

$$rot(y, \theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

$$rot(x, \Psi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Psi & -\sin \Psi \\ 0 & \sin \Psi & \cos \Psi \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

$$rot_{robot} = rot(z, \varphi)rot(y, \theta)rot(x, \Psi) \quad (3.21)$$

La matrice de rotation est formée par les cosinus directeur du repère outil  $\Sigma_e$  par rapport au repère



global est exprimée sous la forme :

$$TR = \begin{pmatrix} w_x & f_x & n_x \\ w_y & f_y & n_y \\ w_z & f_z & n_z \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

Le calcul des angles d'Euler peut être réalisé en résolvant le système d'équations à 3 inconnues  $rot_{robot} = TR$ . Particulièrement pour l'ordre de rotation 'zyz' ou 'zyx', la fonction du logiciel Matlab "eul = rotm2eul(Rotrobot, ordre)" peut être utilisée pour faire ce calcul.

### 3.3.7 Modèle de temps de meulage

Afin d'estimer la durée des tâches de meulage robotisées, un modèle de temps de meulage est adopté.

Considérons une meule en mouvement suivant la trajectoire présentée dans la figure 3.18 pour la  $i^{\text{ème}}$  passe de meulage . Cette passe contient deux points de retrait (départ  $Pr_{i,1}$  et fin  $Pr_{i,2}$ ) et  $N$  point de contact de meulage . Le robot accélère à partir du point de départ vers le premier point de retrait  $Pr_{i,1}$  avec une vitesse maximale fixée, puis vers le point de meulage  $P_{i,1}$ , puis décélère et garde une vitesse constante, égale à la vitesse d'avance choisie, jusqu'au dernier point de contact  $P_{i,N}$ . Le robot accélère de nouveau et passe par le point de retrait  $Pr_{i,2}$  puis par le point de retrait  $Pr_{i+1,1}$  de la passe suivante.

Les robots peuvent avoir des modèles de vitesse différents à cause de la différence de leurs composants physiques. Nous supposons que le modèle de vitesse du robot utilisé dans ce travail est linéaire (en accélération, décélération ou à vitesse constante). Nous utiliserons pour l'estimation du temps de meulage un modèle simple proposé dans les travaux de Kim et al [46]. La vitesse en un point  $x$  de la trajectoire est calculée à l'aide de la relation suivante.

$$v(x) = \sum_{i=1}^k [A_i(x) + U_i(x) + D_i(x)] \quad (3.23)$$

Avec,

- $v(x)$  vitesse d'avance
- $A_i(x)$  modèle de vitesse pour la  $i^{\text{ème}}$  accélération
- $U_i(x)$  vitesse de meulage pour la  $i^{\text{ème}}$  passe
- $D_i(x)$  modèle de vitesse pour la  $i^{\text{ème}}$  décélération

Le temps de meulage TM est calculé à partir de la fonction inverse du modèle de vitesse en utilisant l'équation 3.24.

$$TM = \sum_{i=1}^k \left[ \int \frac{1}{A_i(x)} dx + \int \frac{1}{U_i(x)} dx + \int \frac{1}{D_i(x)} dx \right] \quad (3.24)$$

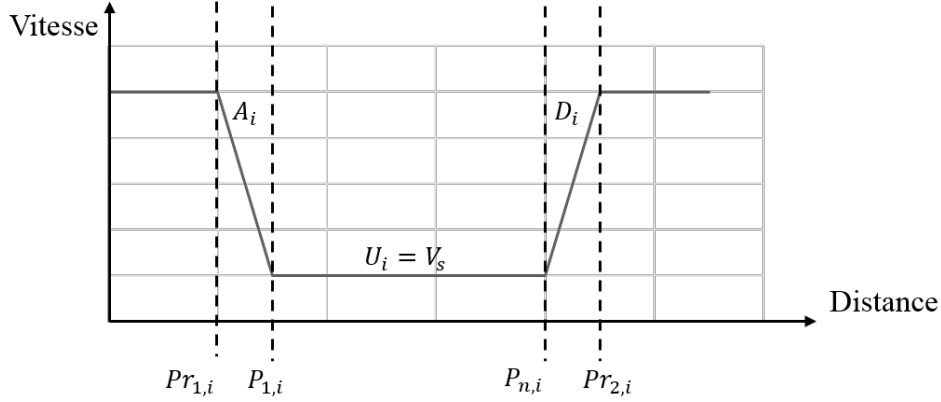


FIGURE 3.18: Modèle de vitesse de meulage

### 3.4 Compensation du poids de la meule

Le poids de la partie mobile de l'effecteur (piston, tige, meuleuse, disque, ...) affecte considérablement la force de meulage appliquée par le robot. La figure 3.19 montre la variation de la profondeur de passe en meulage à différents angles de positionnement de la meule par rapport au plan  $xy$  d'une pièce cylindrique. Le poids de la partie mobile cause un enlèvement de matière plus important quand la position du vérin est à  $90^\circ$  par rapport à l'axe horizontal. Cet effet diminue en diminuant l'angle de position. Le meulage des surfaces complexes nécessite donc une compensation de cet effort qui dépend de l'orientation de l'effecteur.

A l'aide des repères de Frenet définis dans les points de la trajectoire de l'outil. La pression de meulage appliquée par le vérin est ajustée, ce qui permet de garder une force de meulage constante tout au long du meulage.

A partir de la matrice de rotation du repère de Frenet-Serret pour la  $k^{\text{ème}}$  passe et en prenant en compte l'angle du tilt de la meule, l'orientation  $\varphi$  de la direction de mouvement de la masse mobile peut être calculée par

$$\varphi = \text{atan2} \left( \frac{\|T_s \times z\|}{-T_s \cdot z}, x \right) \quad (3.25)$$

avec  $T_s$  vecteur directeur lié au mouvement de translation du piston.

Connaissant cette orientation, la pression de compensation est calculée par

$$\delta P = \frac{F_{\text{frot}} + mg \cos \varphi}{S - s_t} \quad (3.26)$$

avec  $m$  le masse mobile,  $g$  l'accélération de la pesanteur,  $S$  la section du piston et  $s_t$  la section du tige du piston.

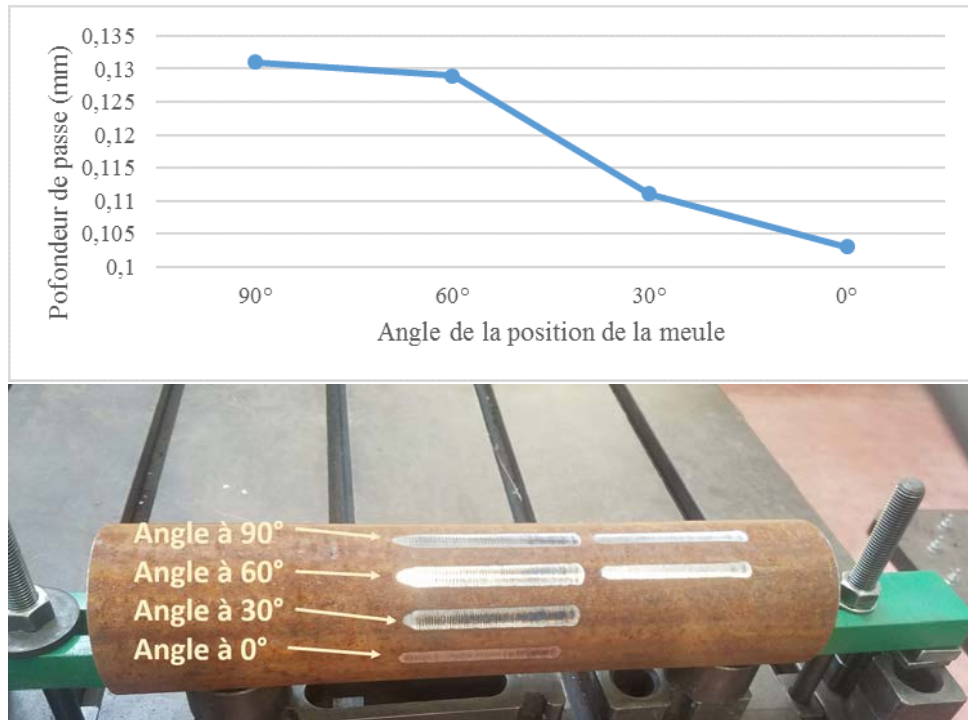


FIGURE 3.19: Effet de la gravité sur la profondeur de passe

### 3.5 Résultats

Le nombre de passages et donc le temps nécessaire à l'opération de meulage est directement lié à la force de meulage normale appliquée sur la meule. La figure 3.20 montre l'effet de la variation de ce paramètre sur le nombre de passes de meulage et donc sur l'efficacité du processus. Une force de meulage plus grande permet un enlèvement de matière plus important et donc réduit de temps global de meulage. Le choix de la force affecte directement l'efficacité du procédé.

L'augmentation de la force de meulage augmente la surface de contact, ce qui réduit le nombre de passes et donc le temps nécessaire à l'opération de meulage. Les figures 3.21 et 3.22 présentent le parcours de l'outil projeté sur le plan  $xz$ . Pour une meilleure présentation de la pièce initiale et finale, les périmètres de la meule sont dessinés (en bleu les passes d'ébauche et en rouge les passes de finition).

Pour le meulage d'arrondi, en fixant la force normale de meulage à  $200N$  et la vitesse d'avance de l'outil à  $0,5m/s$ , nous avons pu obtenir une circularité d'arrondi égale à  $1,0021$  et un rayon moyen de  $4,005mm$  pendant l'étape d'ébauche.

Des passes de finition sont programmés pour atteindre la qualité de surface désirée fixée à  $5\mu m$  (hauteur des pics). Cette étape représente 40 % du temps nécessaire à l'opération de meulage robotisée. La figure 3.23 montre une comparaison entre les arrondis finis et non finis. Nous remarquons à partir de cette figure que la hauteur des pics (des ondulations) a considérablement diminué. La circularité est réduite de  $1,0021$  à  $1,0001$  et un rayon moyen de  $4mm$ .

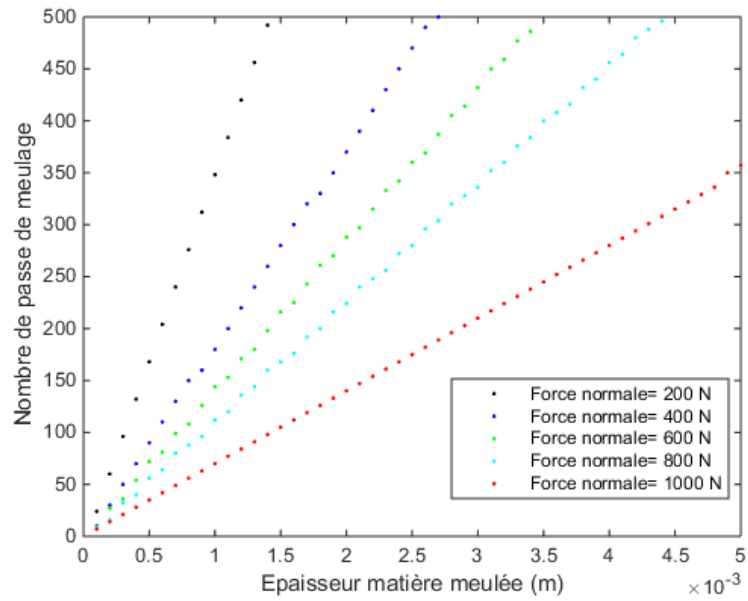
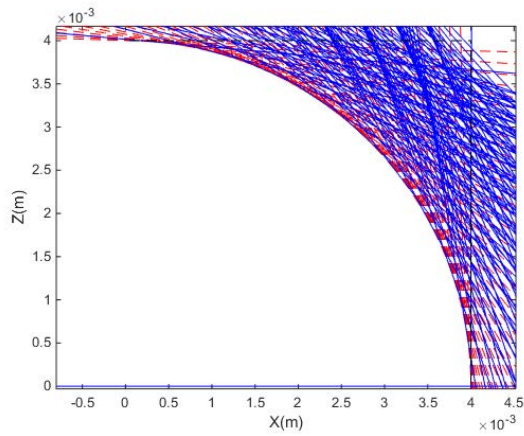
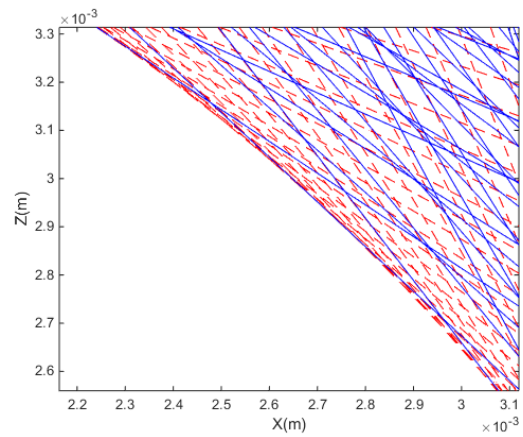


FIGURE 3.20: Effet de la variation de la force normale de meulage sur le nombre de passe  $N_p$

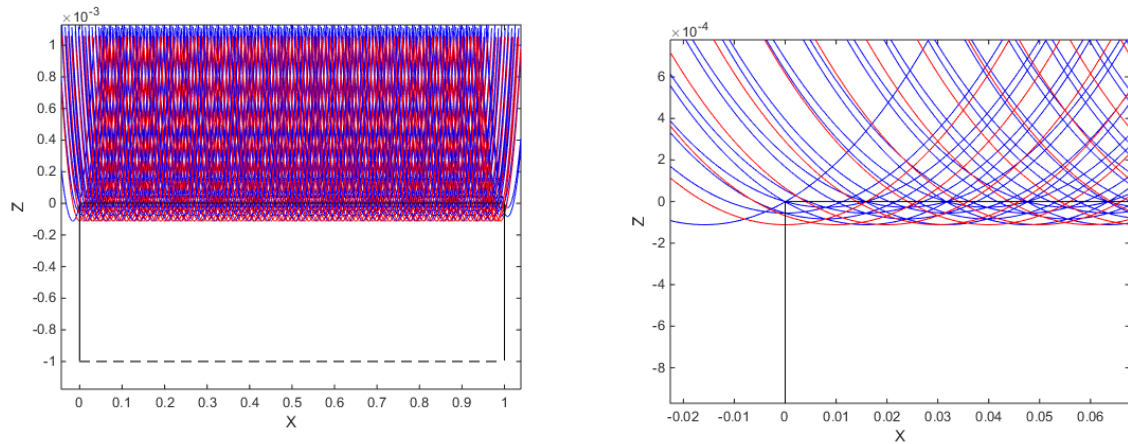


(a) Projection du périmètre de la meule pour chaque passe



(b) Vue rapprochée des passes de meulage

FIGURE 3.21: Meulage en sens unique d'un arrondi de rayon 4 mm



(a) Projection du périmètre de la meule pour chaque passe

(b) Vue rapprochée des passes de meulage

FIGURE 3.22: Surfaçage en sens unique d'une pièce plane

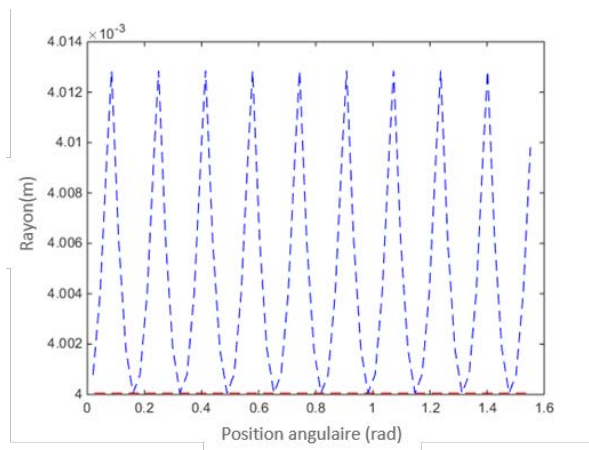


FIGURE 3.23: Comparaison entre l'état de surface de l'arrondi à l'étape d'ébauche (en bleu) et l'étape de finition (en rouge)

En utilisant le programme de planification de trajectoire, nous avons pu estimer l'opération de meulage d'arrondi à 10 min. La rectification manuelle de la même pièce prendra environ 20 min. La solution que nous proposons a permis de réduire le temps nécessaire de 45 %.

En ce qui concerne le surfaçage, le meulage a été programmé pour meuler une surépaisseur de  $0.1\text{mm}$  de la surface supérieure d'une pièce métallique parallélépipédique. Pour le calcul de la trajectoire, la hauteur maximale des pics des rainures admissibles est fixée à  $5\mu\text{m}$ , ce qui nécessite une étape de finition. Cette étape a représentée 35% du temps global de meulage qui est estimé à 5 min.

### 3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthode de planification de trajectoire hors-ligne du meulage robotique qui a été mise en œuvre dans un programme Matlab. Ce programme a été utilisé pour le meulage de surface et d'arrondi d'une pièce métallique de grandes dimensions.

Le programme a permis de produire de manière fiable une trajectoire de robot efficace pour ces opérations en utilisant des courbes paramétrées B-splines. L'orientation appropriée de l'effecteur est calculée à l'aide des repères de Frenet-Serret associés aux courbes de la trajectoire. Le meulage a été réalisé en deux étapes, pour atteindre les qualités de surface fixées : ébauche et finition.

Les résultats trouvés dans ce chapitre montrent que la méthodologie proposée permet de respecter les contraintes géométriques et de qualité exigées. Elle permet aussi réduire le temps global de meulage.







# Chapitre 4

## Expérimentations et analyses

### 4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, une méthodologie de planification de la trajectoire a été présentée à partir du modèle développé. Deux cas d'étude ont été choisis pour la validation de la robotisation du procédé : essai de meulage de surfaçage (essai MS) et essai de meulage d'arrondi (essai MA).

Dans ce chapitre, nous présentons les essais de validation choisis et la méthode d'évaluation de la qualité des pièces meulées ainsi que les paramètres adoptés. Nous présentons aussi des détails sur l'implémentation expérimentale et une analyse des résultats obtenus des essais. Ce chapitre a pour objectif de déterminer l'efficacité réelle de la méthode de contrôle de l'opération robotisée puis de conclure sur ses limites.

Un essai de meulage est composé de quatre étapes principales. La première étape du meulage robotisé consiste à scanner la surface brute en utilisant un scanner 3D adapté aux exigences de qualité fixées, la seconde étape à planifier la trajectoire du robot et programmer la commande du vérin pour effectuer la tâche voulue, la troisième étape à meuler la pièce. Finalement, la dernière étape consiste à re-scanner la surface meulée pour contrôler sa qualité.

Dans l'industrie, le surfaçage de la pièce par meulage angulaire a pour objectif d'enlever l'excès de matière, la calamine, les bavures, etc. Cependant, cet enlèvement de matière est aussi contraint à respecter des exigences de qualité définies pour garantir une qualité de production homogène et admissible. La même chose peut être dite à propos du meulage d'arêtes. La qualité de la pièce et son état de surface sont donc des critères majeurs pour la validation de la méthode proposée [12].

### 4.2 Essais de meulage robotique

Avant de passer aux essais de validation, une identification des paramètres du modèle de meulage pour la pièce a été réalisée. Les essais d'identification (essai I) consistent à réaliser des passes de meulages à efforts constants et d'autres passes à efforts variables en pilotant la vitesse d'avance dans le but de

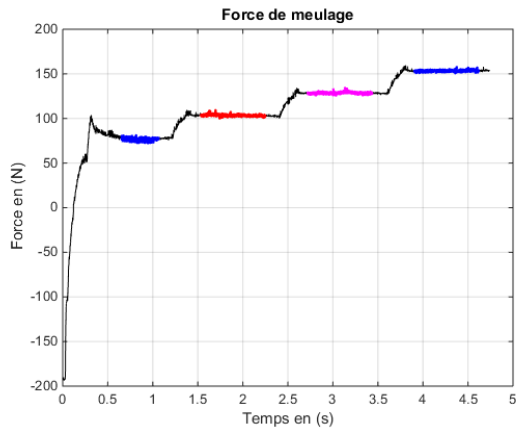


FIGURE 4.1: Essai I : profil de force de meulage

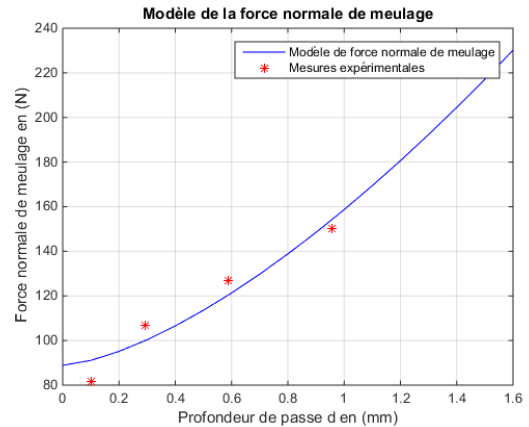


FIGURE 4.2: Essai I : Profondeurs de passe mesurées

mesurer la profondeur de passe et déduire par la suite le taux d'enlèvement de matière.

Grâce aux mesures de la pièce ( en acier S235) avant et après les essais d'identification, il est possible de déterminer la géométrie globale de la pièce, les profondeurs de passe correspondantes aux forces de meulage appliquées ainsi que l'état de surface initiale et finale. Trois essais d'identification ont permis d'identifier le modèle décrivant la relation entre la force de meulage et la profondeur de passe sur la pièce en prenant en compte les géométries de la pièce et l'outil ainsi que les paramètres de meulage choisis.

Les essais sont réalisés sur deux échantillons différents : une tôle pour l'essai MS et un prisme pour l'essai MA. La figure 4.1 présente le profil de la force de meulage choisi pour un essai d'identification. Une consigne négative de force est utilisée au début du profil pour éviter la collision de la meule avec l'environnement. Dans cet exemple présenté, la force varie suivant une forme en escalier d'une valeur de 75 N à 150 N. Les résultats de mesure de la profondeur de passe pour cet essai ont permis d'identifier les paramètres du modèle de force sur la figure 4.2. La précision des valeurs des paramètres identifiés est améliorée en réalisant d'autres essais avec des profils de force de valeurs différentes .

### 4.3 Consignes et exigences de qualité

L'objectif du surfaçage fixé pour le meulage robotique est d'enlever d'une manière efficace l'excès de matériau d'une manière contrôlée en utilisant la commande en force. La profondeur de passe fixée pour le surfaçage de la pièce en acier est de 0.2 mm. Cependant, l'état de surface de la pièce après le meulage est un facteur important qui affecte des fois la fonction du produit. Dans ce travail, nous évaluons donc différents paramètres de qualité pour les essais MS et MA.

Concernant les essais MS, la hauteur des ondulations admissible sur la pièce après meulage est fixée à  $50\mu\text{m}$ . La rugosité de la surface admissible est fixée à  $R_a = 5\mu\text{m}$ .

Concernant les essais MA, il a été choisi de réaliser des arrondis de 12 mm de rayon. La hauteur des ondulations ainsi que la rugosité admissible sont les mêmes pour les essais MA.

TABLE 4.1: Essai MS et MA : Paramètres de meulage

<b>Paramètres du meulage</b>	<b>Valeurs consigne</b>	<b>Informations complémentaires</b>
<b>Etape d'ébauche du meulage</b>		
Vitesse d'avance, $V_s$	75 mm/s	Suivant l'axe Y du repère globale pour l'essai MS et suivant l'axe X pour l'essai MA
Angle du tilt, $\alpha$	30°	
Force de meulage, F	150 N	La force de meulage est gardée constante dans tous les points de contacts de la trajectoire
<b>Etape de finition du meulage</b>		
Vitesse d'avance, $V_s$	225 mm/s	La vitesse est augmentée pour réduire le taux d'enlèvement de matière
Angle du tilt, $\alpha$	30°	
Force du meulage, F	150 N	La force de meulage est recalculée pour prendre en compte la variation de la surface de contact entre la pièce et la meule

Ces exigences sont prises en compte lors de la génération des trajectoires en utilisant les méthodes présentées dans le chapitre précédent. Nous présentons dans la figure 4.3 les résultats de cette planification : la trajectoire de l'outil en Matlab (figures 4.3.a et b) et une présentation des points de passage programmés sur Robotstudio (figures 4.3.c et d). Pour l'essai MS, la trajectoire est composée de cinq passes d'ébauche réparties de façon uniforme sur la surface de la pièce et de quatre passes de finition (décalage suivant X de 12 (mm) ). Pour l'essai MA, la trajectoire est composée de quatre passes d'ébauche et sept passes de finition.

Le tableau 4.1 présente les paramètres opératoires du meulage pour les deux étapes.

La dynamique du système de meulage doit être prise en compte lors de la génération des points de passage. La figure 4.4 présente deux essais de surfaçage sans et avec la prise en compte du comportement dynamique du système de meulage (voir chapitre précédent) après la variation de la force de meulage pour les passes de finition (Essais N°1 et N°2 respectivement). Plusieurs solutions sont possibles pour compenser le retard entre la commande en pression (en force) et la commande en position/vitesse du robot (commande du robot ABB). Une solution simple consiste à recalculer les positions des points de contact (points de passage) pour l'étape de finition.

Cette dynamique du système de meulage est prise en compte aussi lors du meulage d'arrondi car la force de meulage appliquée est fonction de l'orientation de l'outil.

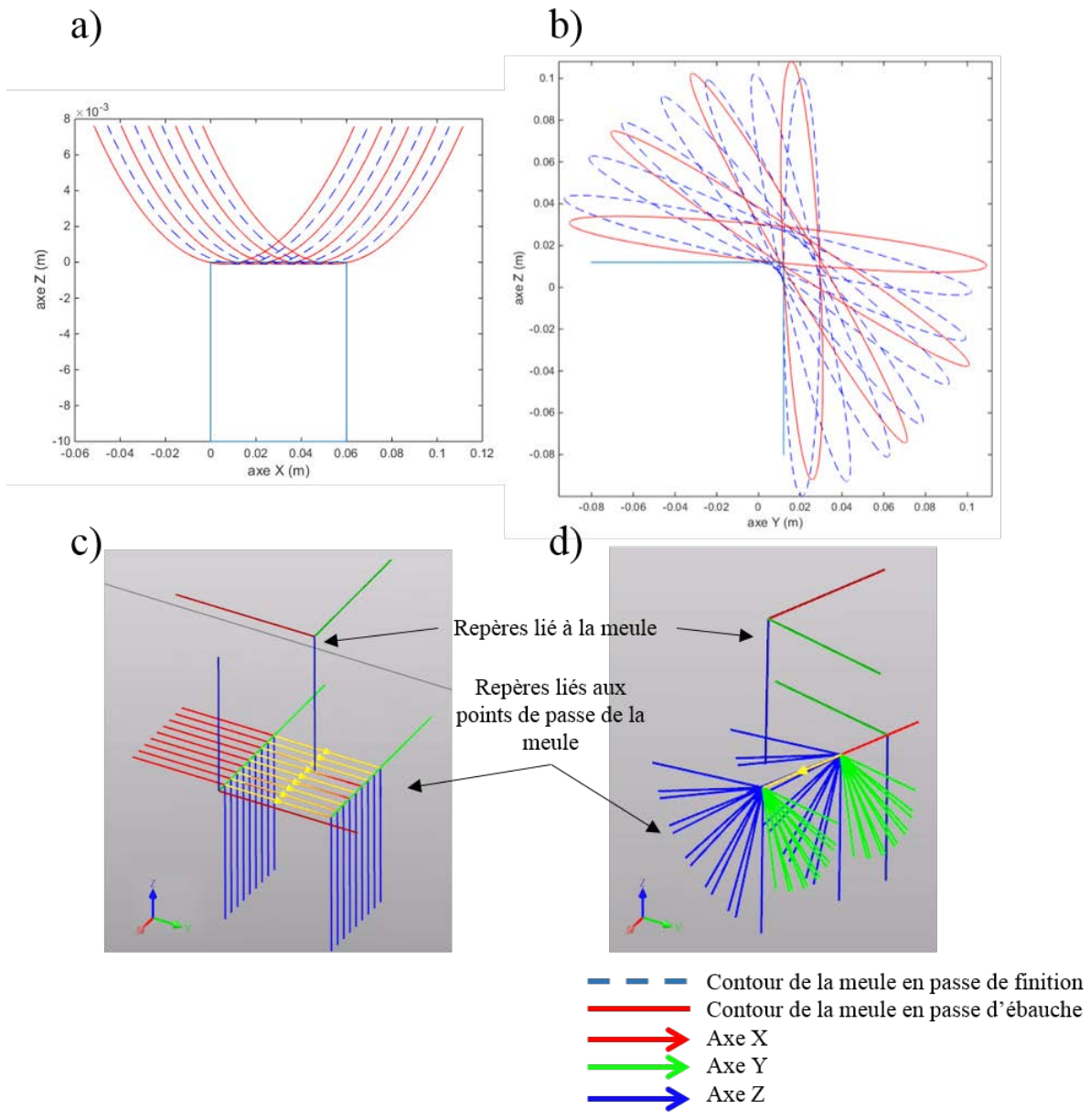


FIGURE 4.3: Trajectoire de l'outil en Matlab pour a) les essais MS b) les essais MA et en Robotstudio pour c) les essais MS d) les essais MA

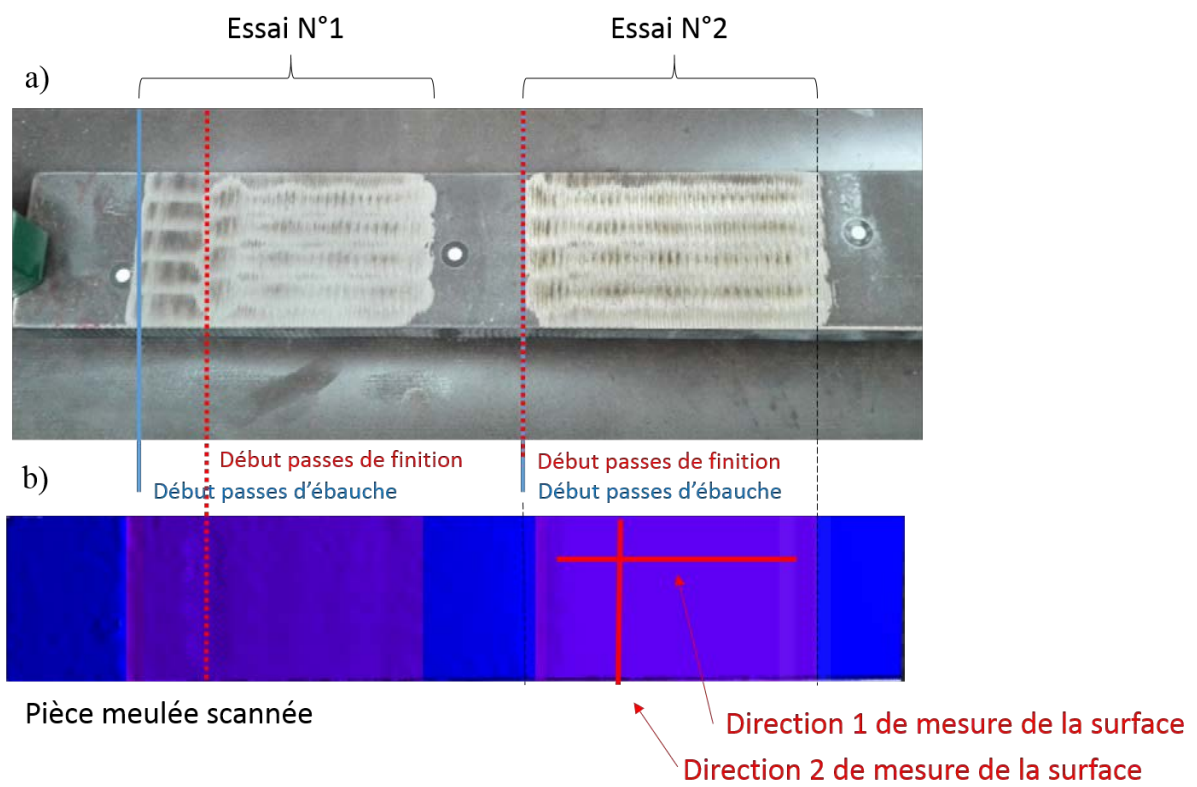


FIGURE 4.4: Essais MS : Pièce meulée a) Photo réelle de deux essais b) Surfaçage 3D de la même pièce

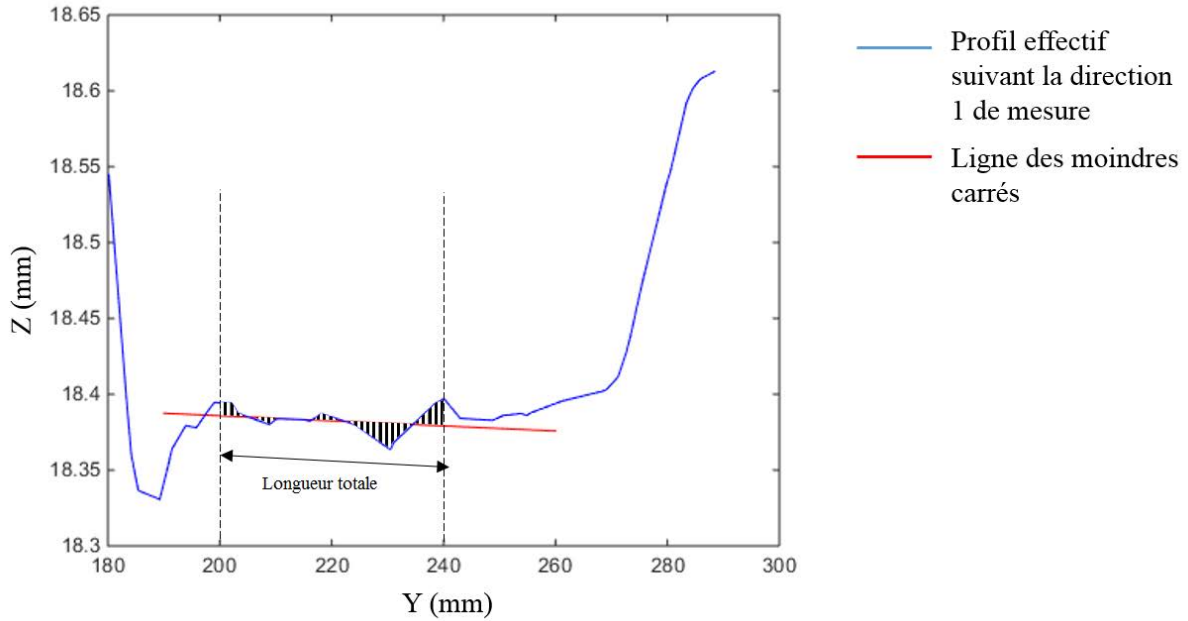


FIGURE 4.5: Essais MS : Mesure de la surface suivant la direction 1

## 4.4 Méthode de mesure de rugosité et d'ondulation

### 4.4.1 Calcul des paramètres de rugosité

La rugosité moyenne arithmétique  $R_a$  est le paramètre de rugosité unidimensionnel le plus utilisé pour évaluer l'état de surface des pièces. Ce paramètre est calculé en divisant la somme des aires hachurées dans la figure 4.5 par la longueur de base  $l$  (Voir annexe C.1). Pour avoir une rugosité maximale, la mesure de  $R_a$  est réalisée suivant la direction 1 de mesure présentée dans la figure 4.4. La longueur de base  $l = 8(mm)$  pour nos cas d'étude. Nous remarquons à partir de la figure une inclinaison du plan moyen à partir duquel le calcul de  $R_a$  est calculée. Cela est du

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z| dY = \frac{\sum(Aire+) + \sum(Aire-)}{l} \quad (4.1)$$

Pour évaluer la rugosité de la surface, le coefficient de rugosité de surface  $R_s$  a été généralement adopté par plusieurs chercheurs en raison de sa simplicité. El Sodani [24] propose la définition suivante du coefficient de rugosité de surface  $R_s$  :

$$R_s = \frac{A_t}{A_n} \quad (4.2)$$

Avec  $A_t$  est l'aire de la surface réelle et  $A_n$  est l'aire de la surface nominale (Voir figure 4.6). Cette définition est aussi utilisée pour évaluer la qualité des surfaces dans ce travail pour les deux essais.

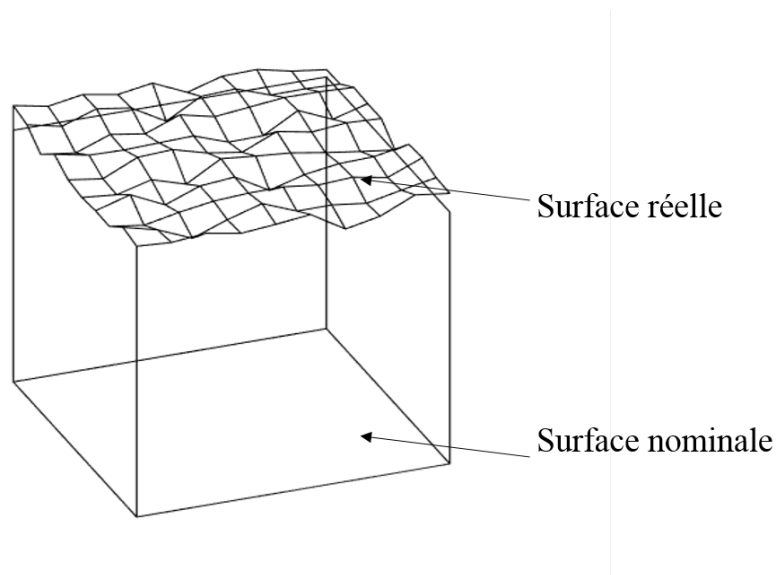


FIGURE 4.6: Comparaison entre la surface réelle et la surface nominale

#### 4.4.2 Utilisation d'un scanner 3D

Pour mesurer la rugosité et l'ondulation des surfaces meulées des pièces, un scanner 3D numérique de type caméra a été utilisé, qui est un système équipé de deux caméras pour capturer les surfaces de la même position et peut donc produire des images tridimensionnelles montrant la hauteur des points de la surface avec une grande précision (Figure 4.7). Le scanner 3D de type caméra présente plusieurs avantages :

- Le processus est rapide et l'image est précise
- Des pièces de grandes dimensions peuvent être scannées
- Le processus de mesure peut être robotisé pour un contrôle rapide de la qualité des pièces.
- La surface des pièces n'est pas endommagée lors du scan (procédé sans contact).

Les scanners ont cependant des limitations : la surface à scanner doit être visuellement accessible, ombres, ... Le système sélectionné pour cette étude est le scanner ATOS triple scan de GOM car il permet de produire un nuage de points tridimensionnelles denses. Les détails sur les scans réalisés sont regroupés dans le tableau 4.2.

### 4.5 Démarche expérimentale

Le programme de la trajectoire du robot est réalisé sur Robotstudio en introduisant les points d'approche, de meulage, de rétraction de la trajectoire voulue et les trois angles d'orientation de l'outil calculés grâce aux repères de Frenet. Cet outil nous a permis de détecter la collision entre l'effecteur de meulage et son environnement et de l'éviter. La commande de la pression du vérin a été réalisée sur un ordinateur



FIGURE 4.7: Scanner 3D ATOS triple scan de GOM

TABLE 4.2: Caractéristiques du scan 3D

Elément	Valeur	
	Surfaçage	Arrondi
Nombre de points	367 398	1 658 291
Aire de la surface mesurée (mm <sup>2</sup> )	48000	85000
Distance entre les points (mm)	entre 0,06 et 1	
Volume mesuré	60 × 10 × 800	100 × 50 × 300

externe en langage C. La régulation de la pression dans les chambres du vérin a été effectuée grâce à la commande interne du système pneumatique fourni par le constructeur. Trois modes de régulation sont proposés et permettent de choisir le temps de réponse et le dépassement les mieux adaptés pour l'application du vérin (mode avec dépassement, mode sans dépassement, mode intermédiaire). L'alimentation du système pneumatique (capteurs, électrovannes, signal 0 V de la carte d'acquisition et l'isolation des câbles) a été réalisée grâce à une alimentation externe de 24 V. Une interconnexion TCP/IP a permis la communication entre le robot et l'effecteur pneumatique, ce qui a permis la synchronisation de la commande en déplacement du robot et la commande en force du système pneumatique.

## 4.6 Résultats d'évaluation du meulage robotique

Pour l'étude, des images numérisées ont été obtenues par le scanner 3D. La rugosité de la surface varie d'une rugosité de surface brute à une rugosité de surface meulée. Un système de coordonnées global a été établi après que l'échantillon ait été placé sur une table plate. Plusieurs marqueurs ont été fixés sur la pièce (Voir figure 4.8 et 4.9).

Le logiciel d'analyse des mesures 3D GOM génère un fichier de type '.stl' exploitable par Matlab. La procédure d'évaluation des paramètres de qualité est la suivante.

Premièrement, les données du nuage de points sont extraites à partir du fichier '.stl' puis filtrées pour mesurer la rugosité et l'ondulation séparément. Après cela, les équations de la ligne médiane et de la surface nominale sont calculées à l'aide de la fonction 'fminsearch' de Matlab. Puis, les paramètres  $R_a$  et  $R_s$  sont calculés à partir des équations 4.1 et 4.2. Finalement, nous procédons au calcul de la circularité  $C$  et le rayon de l'arrondi en utilisant la méthode présentée à la partie 5.6.2 de ce chapitre. L'utilisation





FIGURE 4.8: Tôle utilisée pour essai MS



FIGURE 4.9: Prisme utilisé pour essai MA

des fonctions d'optimisation proposées par Matlab sont très sensibles à la valeurs initiale d'optimisation. Une solution plus robuste est donc utilisée.

#### 4.6.1 Filtrage

Un programme de filtrage est développé sur Matlab qui met en œuvre le filtre à convolution gaussienne à profil ouvert selon la norme ISO 16610-21 :2011 (Voir annexe C.2). Ce filtre est utilisé pour la séparation des profils des composantes à ondes courtes et longues du profil de surface réelle. Les paramètres de rugosité sont évalués à partir du profil des composantes à ondes courtes. Les paramètres d'ondulation sont évalués à partir du profil de la composante à ondes longues. La longueur de base  $l$  (longueur de coupure) est le critère de séparation du profil réel. Les arguments d'entrée de la fonction de filtrage sont le vecteur position du profil mesuré  $p$  (positions des points scannés suivant une direction de coupe) et la longueur de coupure  $l$ . La sortie du filtre est le vecteur position des points du profil filtré  $p_f$ .

#### 4.6.2 Calcul du centre et du rayon de l'arrondi

Pour déterminer le rayon de l'arrondi nous effectuons des coupes radiales suivant l'axe  $X$  du repère pièce. On retrouve donc un nuage de point dans le plan  $Y - Z$ . L'objectif est de calculer le cercle de centre  $C$  et le rayon  $\hat{r}$  qui passe le plus proche du nuage de point. Pour cela, le calcul est réalisé en deux étapes : L'initialisation et l'optimisation.

- **Initiation** : Pour chaque triplet  $p_i, p_j, p_k$  (trois points appartenant à l'arrondi) il existe un cercle unique qui passe par tous les trois points. Soit  $C_{i,j,k}$  le centre de ce cercle. Les coordonnées de ce point sont calculées à partir du système d'équation 4.3.

Le rayon  $r_{ini}$  et le centre  $C_{ini}(y, z)$  du cercle d'initiation est donc la valeur moyenne des centres et des rayons calculés pour toutes les combinaisons possibles de triplet.

$$\begin{cases} y_{C_{i,j,k}} = \frac{(z_k - z_j)(y_i^2 + z_i^2) + (z_i - z_k)(y_j^2 + z_j^2) + (z_j - z_i)(y_k^2 + z_k^2)}{2\Delta} \\ z_{C_{i,j,k}} = \frac{(y_k - y_j)(y_i^2 + z_i^2) + (y_i - y_k)(y_j^2 + z_j^2) + (y_j - y_i)(y_k^2 + z_k^2)}{2\Delta} \end{cases} \quad (4.3)$$

Avec  $\Delta = (y_k - y_j)(z_j - z_i) - (y_j - y_i)(z_k - z_j)$

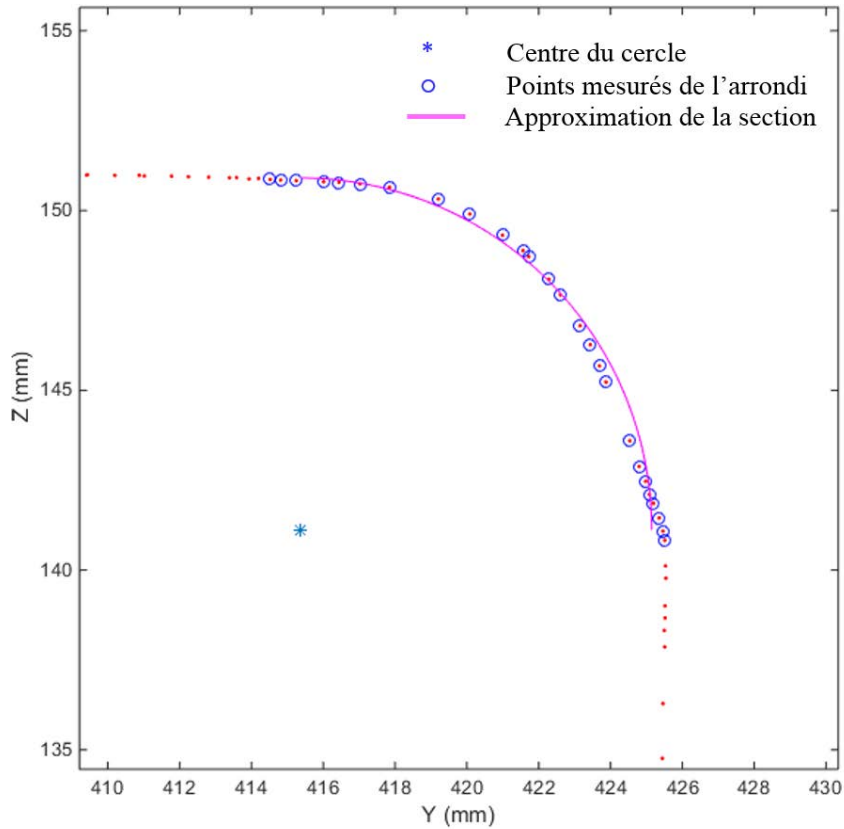


FIGURE 4.10: Essai MA : Coupe de l'arrondi meulé suivant l'axe X du repère globale

- **Optimisation** : Le calcul des coordonnées du centre de l'arrondi et son rayon est optimisé en utilisant une méthode d'optimisation itérative. Pour réaliser cette optimisation, une fonction coût est définie. Nous choisissons la fonction des moindres carrés suivante :  $J(r) = \sum_{i=1}^n (d_i - r)^2$  avec  $d_i = \sqrt{(y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}$  la distance euclidienne entre le centre  $C$  et les  $n$  points de l'arrondi  $p_{i,i=1,\dots,n}$  présentés par un cercle bleu dans la figure 4.10 .

Il est possible de calculer le rayon optimale  $\hat{r}$  pour un centre  $C(x, y)$  en utilisant l'équation (4.4).

$$\left. \frac{\partial J}{\partial r} \right|_{r=\hat{r}} = 0 \Rightarrow \hat{r} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (4.4)$$

Nous pouvons remarquer que  $d_i$  et par la suite le rayon  $\hat{r}$  sont fonction de la position du centre  $C$ . Pour cette raison, nous prenons les paramètres  $y$  et  $z$  comme paramètres d'optimisation. La méthode du gradient conjugué (conjugate gradient method) est utilisée pour effectuer cette recherche. L'algorithme utilisé est présenté en Annexe C.3. La méthode est présentée plus en détail dans les travaux de Maisonobe [55].

Le rayon moyen est calculé dans la partie centrale de l'arrondi sur une longueur de 40 mm tel que

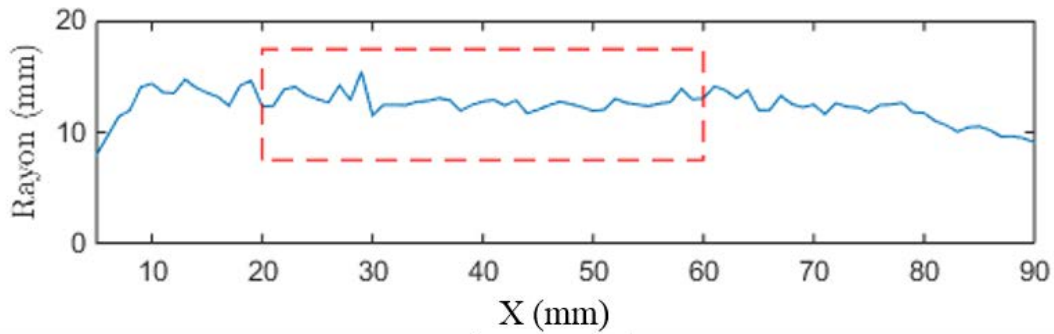


FIGURE 4.11: Rayon de l'arrondi

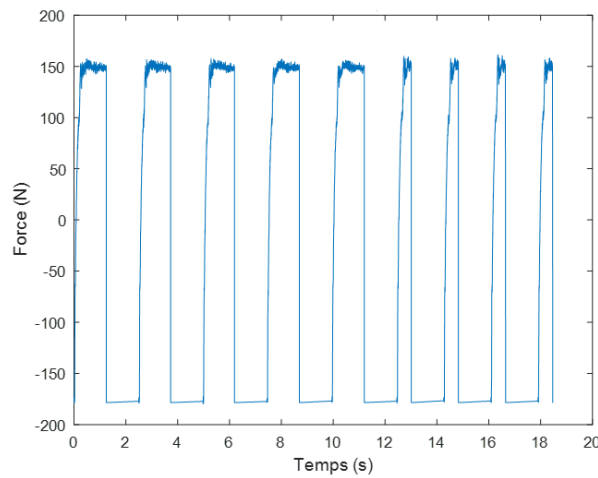


FIGURE 4.12: Essai MS : Force de meulage mesurée

présenté sur la figure 4.11

### 4.6.3 Analyse

La figure 4.12 présente le profil de la force de meulage mesurée le long de la trajectoire du robot pour réaliser le surfaçage de la pièce. Pour l'essai MS, au début de la trajectoire, le robot est correctement positionné sur le premier point d'approche de la première passe de meulage d'ébauche. La consigne de force de meulage est à  $-175$  N pour garder le vérin dans la position haute et la vitesse de rotation de la meule est constante et maximale. A l'instant  $T=0$  s, la meule est positionnée au premier point d'ébauche. A ce moment, la consigne de force de meulage passe à une valeur de  $150$  N. On observe un temps de réponse à 5% de  $0.2$  s et un dépassement de  $4$  N ( Voir figure 4.12). Une passe de meulage d'ébauche de  $100$  mm suivant l'axe Y du repère de base du robot est programmée. La vitesse de meulage est de  $75$  mm/s, la vitesse de rotation de la meule est de  $6500$  tr/min (donc  $V_c = 78,2$  m/s). A  $T = 1.22$  s, le

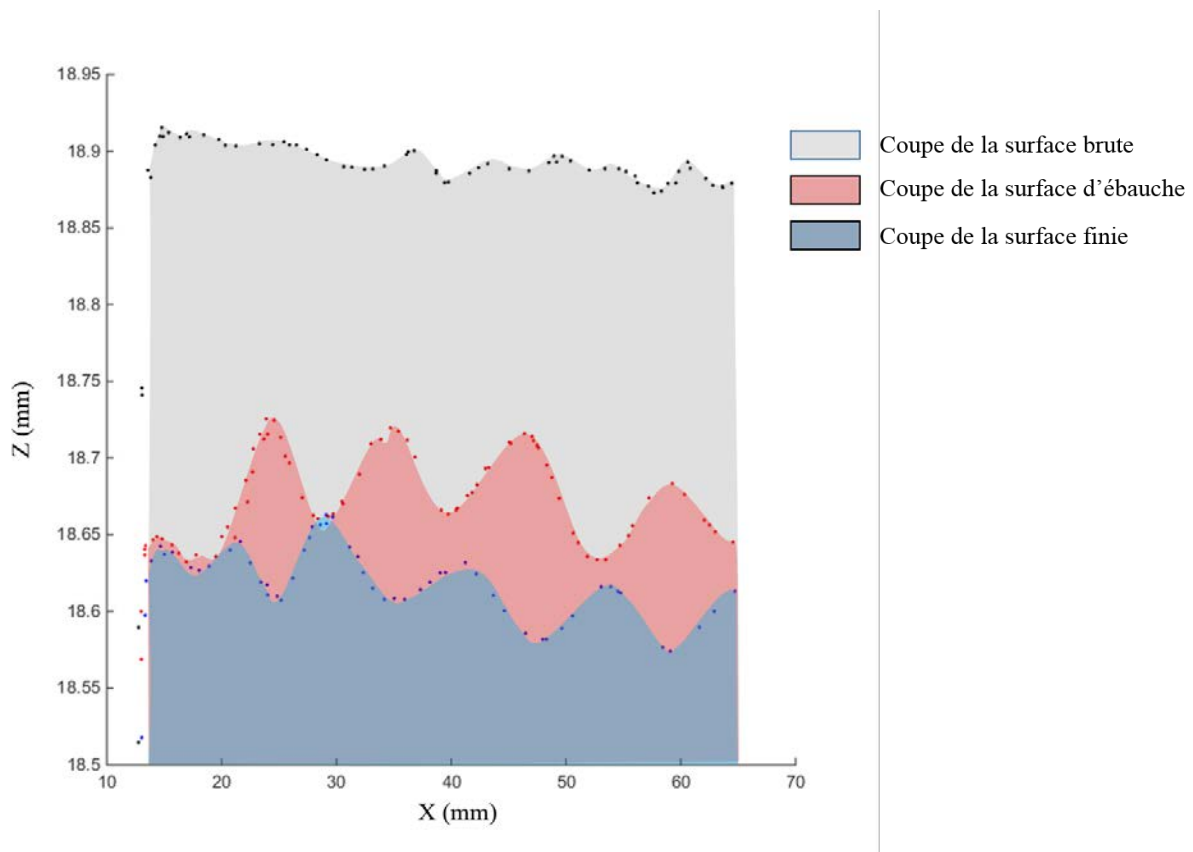


FIGURE 4.13: Essai MS : Ondulations mesurées sur la surface de la pièce

robot se positionne au dernier point de la passe, la consigne de force passe vers une valeur de -175 N. Le robot remonte ensuite vers le point de rétraction. A l'instant  $T = 12$  s toutes les 5 passes d'ébauche sont réalisées.

A l'étape de finition, quatre nouvelles passes de meulage sont réalisées avec une vitesse d'avance du robot de 225 mm/s. La force de meulage maximale pour la finition a la même valeur que la force de meulage d'ébauche car pour réduire le volume de la matière meulée (réduire le taux d'enlèvement de la matière) nous avons augmenté la vitesse d'avance. L'essai MS a une durée totale de 18.5 s. La même démarche est suivie pour l'essai MA, la durée totale de l'essai est d'environ 21 s.

Avant de passer à l'étape de finition, un scan de la pièce a été réalisé pour comparer la hauteur des ondulations de la pièce avant et après la finition. La figure 4.13 montre une amélioration de l'état de surface. Pendant la phase de finition, la hauteur moyenne et maximale des ondulations a diminué de 0.06 mm et 0.095 mm à 0.0319 mm et 0.052 mm respectivement. La profondeur de passe mesurée est d'environ 0.25 mm. Concernant l'essai MA, la même démarche est suivie pour réaliser le meulage. Nous mesurons un rayon moyen de l'arrondi de 12.77 mm.

Les résultats de calcul des paramètres de qualité pour les deux cas d'étude choisis sont présentés dans

TABLE 4.3: Essai MS : Paramètres de qualité

Paramètres de qualité		Valeurs
Rugosité ( $\mu\text{m}$ )	$R_a$	3,78
	$R_q$	4,57
	$R_z$	8,72
Rugosité surfacique (sans unité)	$A_t$ ( $\text{mm}^2$ )	2032,31
	$A_n$ ( $\text{mm}^2$ )	2000,00
	$R_s$	1,02
Ondulation (mm)	$h_{\text{max}}$	0,05
	$h_{\text{mov}}$	0,03
	Le pas	12,00



FIGURE 4.14: Essai MS : Surface meulée



FIGURE 4.15: Essai MA : Arrondi meulé

les tableaux 4.3 et 4.4. En général, nous pouvons constater une conformité du meulage aux exigences fixées. Ainsi, le contrôle de force grâce à l'effecteur pneumatique a permis le contrôle du procédé.

Les figures 4.14 et 4.15 présentent l'aspect surfacique des surfaces meulées. Aucun défaut de meulage (brûlure, défauts géométriques) n'ont été observés, ce qui confirme l'exactitude de la démarche suivie et le choix des bonnes conditions de meulage.

Le montage nécessite une vérification des signaux mesurés, le maintien de la pièce et l'installation des barrières de protections. Le temps de montage de l'effecteur pneumatique est estimé à 2 heures. Le

TABLE 4.4: Essai MA : Paramètres de qualité

Paramètres de qualité		Valeurs
Périmètre moyen (mm)	$l_a$	16,48
Surface moyenne (mm <sup>2</sup> )	A	79,12
Circularité (sans unité)	$C_{moyenne}$	1,09
	$C_{max}$	1,16
Rayon (mm)	$r_{mov}$	12,78
	$r_{max}$	15,40
	$r_{min}$	11,54
Rugosité surfacique (sans unité)	$R_s$	1,02

démontage est estimé à 30 min.

Pour les essais choisis, avec une force de meulage de 150 N, nous avons pu réaliser un meulage avec un taux d'enlèvement de matière réel de  $0.702 \text{ mm}^3/s$ . Connaissant le temps du meulage et du taux d'enlèvement de matière maximal théorique, l'efficacité de l'enlèvement de matière globale est calculée à 45%. Cette efficacité peut être considérablement améliorée en adaptant une trajectoire en Zig-Zag sur des surfaces plus grande. Il est possible d'améliorer l'efficacité aussi en augmentant la vitesse de déplacement du robot dans les sections de la trajectoire non productives.

## 4.7 Conclusions

Dans ce chapitre, une méthodologie de planification de trajectoire a été développée pour le procédé de meulage angulaire à partir d'un modèle CAO généré par un scanner 3D GOM . Afin de respecter les exigences de production et d'optimiser le meulage, le meulage est réalisé en deux étapes. Afin de valider la méthode de robotisation du procédé, deux cas d'étude à savoir le surfacage et le meulage d'arêtes ont été choisis.

Les mesures de force ont permis de valider le contrôle de force effectué. Les profondeurs de passe mesurées sur les pièces après meulage correspondent à celles calculées en simulation grâce aux modèles développés. Pour les deux cas d'étude la force de meulage est restée stable. Nous remarquons cependant la présence d'un dépassement de 0.05 mm pour l'essai MS et un problème de discontinuité de l'arrondi avec les bords plans de la pièce, cela peut être dû à plusieurs facteurs, la variation du profil de la meule à cause de l'usure pendant les passes de meulage est le facteur le plus important.

Les essais ont permis de montrer la suppression du problème des vibrations présentée dans les chapitres précédents grâce à la commande utilisée.

Au cours des essais de meulage, des zones dans la surface meulée ont connu un taux d'enlèvement de matière différent du taux prévu de la trajectoire, précisément les points du début et fin des passes

de meulage. Ceci est dues à la non intégration du contrôle de la vitesse de coupe dans la commande du système de meulage le long de la trajectoire. La vitesse de rotation de la meule étant maximale au premier point de contact de la passe, ce qui augmente le taux d'enlèvement de matière au point du début de la passe. Cette différence est dû aussi au temps de réponse du vérin pneumatique à la variation de la consigne de force au début et fin de la passe.

Toutefois, la vitesse de rotation de la meule converge vers une valeur constante, ce qui permet un meulage stable et uniforme sur le reste de la trajectoire. Ainsi, dans la perspective des travaux, il s'avère nécessaire d'intégrer la modélisation du comportement dynamique de la vitesse de la meule et de développer des lois de commandes de la vitesse de coupe. Aussi, la validation expérimentale réalisée dans ce chapitre a été effectuée sur des trajectoires ne présentant pas une variation de la consigne de force de meulage le long de la passe de meulage. Pour la suite des travaux, des validations expérimentales sur des trajectoires nécessitant une variation de la consigne de force de meulage peuvent être réalisées ; par exemple une validation du surfacage d'une pièce qui présente une surface de forme libre et non-plane ou avec des marches d'escalier.

L'angle du tilt de la meule affecte directement l'empreinte laissée sur la surface de la pièce ; un angle de meulage plus grand engendre une profondeur de passe plus grande et une largeur de l'empreinte plus petite. Dans ce travail, l'angle du tilt a été gardé constant dans toute la trajectoire. L'intégration de la variation du tilt de la meule dans la génération de la trajectoire de meulage permet d'optimiser encore plus le meulage des pièces en contrôlant précisément la forme de la surface de contact du meulage, ce qui donne la possibilité de produire des pièces de géométrie plus complexes.





# Conclusion générale

Le meulage des surfaces de forme libre exige une précision dimensionnelle et une qualité de surface élevées. Le meulage des surfaces de grandes tailles se caractérise par un taux élevé d'enlèvement de matière, d'une production multivariée et en petits lots. Après le forgeage, l'usinage, le soudage ou le moulage, ces pièces sont universellement requises à être meulées pour améliorer la finition des contours ou de la surface, de retirer des bavures ou améliorer l'aspect. Par conséquent, la maîtrise de la technologie du meulage pour de tels composants pose un sérieux défi à l'industrie manufacturière. En effet ces défauts ne sont pas reproductibles et il est nécessaire d'adapter le processus de fabrication à chaque pièces, ces opérations sont essentiellement manuelles et pénibles ( efforts, poussière, proximité homme/ outil, ..). Aujourd'hui, le meulage des composants de grandes dimensions, tels que les corps des vannes, les corps des pompes, les hélices de turbine ou d'éolienne ... est toujours réalisé manuellement. L'automatisation de ce procédé devient une nécessité afin de répondre aux exigences de l'industrie en matières de coût et de qualité et de réduction de la pénibilité. L'objectif de ce travail est donc de proposer une solution pratique de robotisation du procédé de meulage angulaire. Tout d'abord, une présentation des différents robots et événement marquants la robotique ainsi que des chiffres clés de l'accélération de l'automatisation de l'industrie est présentée dans le chapitre 1.

Une description du procédé de meulage et de ces machines/outils utilisés pour réaliser ce procédé sont détaillées dans le chapitre 2. Le meulage angulaire se heurte aux phénomènes de vibration. Les différents types de vibrations lors de l'enlèvement de matière et leurs effets sur le procédé de meulage sont établis. Pour la robotisation du procédé de meulage, des techniques de contrôle du procédé sont nécessaires. Ces techniques peuvent être groupées en méthodes passives et actives. Les premières méthodes consistent à changer certains éléments du système (outils, porte-outils, robots, . . .), ou de rajouter d'autres éléments, afin de changer de manière passive le comportement dynamique du système de meulage. Les méthodes actives sont basées par contre sur l'usage des éléments externes capables de fournir/ absorber de l'énergie du système afin d'améliorer la stabilité ou remettre le système dans son état stable. A partir de cette classification, nous avons mis en œuvre un système de meulage robotique permettant le contrôle actif de la force de meulage grâce à un effecteur pneumatique.

La validation numérique de cette solution est réalisée sur le logiciel Matlab/Simulink. Afin de mettre en œuvre cette validation, une approche de modélisation du meulage robotisé est présentée dans le chapitre 3. Le comportement dynamique du système est évalué grâce à des essais de meulage en simulation. La simulation du meulage en multi-passes montre la disparition du phénomène de régénération des vibrations

qui est très néfaste pour la qualité de la pièce meulée, pour la durée de vie de l'outillage et pour la stabilité du procédé en général. Les simulations numériques ont permis aussi de conclure que la solution adoptée permet de réaliser un meulage stable et permet d'atteindre les exigences de qualité fixées.

Ensuite, nous avons présenté au chapitre 4 une méthode de planification de trajectoire hors-ligne pour le procédé de meulage angulaire à partir d'un modèle CAO généré par un scanner 3D. Les algorithmes de planification de trajectoire pour les pièces qui présentent des surfaces de formes libres peuvent être largement groupés en des techniques à paramètres constants ou non constants. Pour ce travail, la planification de trajectoire non paramétrée à sens unique a été choisie. Le programme développé a permis de produire de manière fiable une trajectoire de robot efficace pour des opérations de meulage en utilisant des courbes paramétrées B-splines et des repères de Frenet associés aux courbes de la trajectoire pour l'orientation de l'outil. Afin de respecter les exigences de production et d'optimiser le meulage, le meulage est réalisé en deux étapes : ébauche et finition. La méthodologie proposée permet de respecter les contraintes géométriques et de qualité exigées. Elle permet aussi de réduire le temps global du meulage.

La validation expérimentale est présentée au chapitre 5. Deux cas d'étude à savoir le surfaçage (essai MS) et le meulage d'arêtes (essai MA) ont été choisis. Les essais MA et MS ont permis de valider le contrôle de force effectué. Les profondeurs de passe mesurées sur les pièces meulées correspondent aux résultats des simulations. Pour les deux cas d'étude, la force de meulage est restée stable. Les résultats de calcul des paramètres de qualité nous ont permis de constater une conformité du meulage aux exigences géométriques et d'état de surface. Ainsi, le contrôle de force grâce à l'effecteur pneumatique a permis le contrôle du procédé. L'examen de l'aspect surfacique des pièces après meulage révèle la présence d'aucun défaut de meulage telles que les brûlures, ce qui montre l'exactitude de la démarche suivie et la pertinence des paramètres de coupe choisis. Les essais de validation ont montré la sensibilité de la méthode proposée aux niveaux des bords de la trajectoire (points départ et fin de la passe) causés principalement par le non contrôle de la vitesse de coupe de la meule.

Ces travaux réalisés contribuent à la connaissance de la maîtrise de la modélisation et la planification de la trajectoire du meulage robotique. Ils représentent un pas supplémentaire vers l'automatisation du meulage angulaire industriel. Des perspectives scientifiques sont considérées pour la suite de ces travaux.

# Perspectives

Le modèle de force de meulage utilisé nous a permis de calculer le taux d'enlèvement de matière à partir de la force normale de meulage. Cependant, ce modèle ne prend pas en compte les forces latérales de meulage. Une problématique de modélisation des forces de meulage angulaire robotique peut être envisagée. Pour des grandes forces de meulage, la déformation articulaire du robot industriel ainsi que les déformations de la meule et les effets gyroscopiques dus à sa rotation peuvent affecter considérablement la trajectoire de l'outil et son empreinte sur la pièce. En plus, l'usure de la meule peut aussi affecter l'enlèvement de matière. Cela est mise en évidence dans les essais MA. La modélisation de la variation du profil permet de mieux prévoir la géométrie finale de la pièce, de calculer d'une manière plus exacte l'état de surface en simulation. Il s'avère donc nécessaire d'aborder cette problématique de modélisation des déformations et d'usure des composants du système de meulage. Pour des applications industrielles, des commandes avancées robustes peuvent être envisagées pour garantir des performances optimales aux niveaux des points de départ et de fin des passes. Ces commandes permettent aussi de garantir un meulage stable face aux perturbations externes telles que l'irrégularité de la profondeur de passe et la non homogénéité du matériau causée par la présence des oxydes, huiles, ... sur la surface meulée.

Le mode choisi pour la planification de la trajectoire dans ce travail est un mode à sens unique. Comme perspective pour ce travail, il est important d'explorer les différentes méthodes de planification de la trajectoire à savoir les trajectoires en « zig-zag ». Concernant les mesures de contrôle de qualité, le contrôle de l'état de surface est réalisé grâce à un scanner 3D monté dans un système de visualisation robotique séparé du système de meulage développé. L'intégration de la visualisation 3D dans le système de meulage permet d'éliminer le temps de montage et démontage de la pièce pour le scan initial et final. Cela permet aussi une identification rapide des paramètres des modèles développés en combinant les résultats de la visualisation 3D avec les mesures des capteurs placés dans le système (capteurs de position et force). L'intégration de la visualisation 3D permettra aussi un suivi en temps réel de la rugosité et les ondulations de la surface après chaque passe, ce qui permet de recalculer la trajectoire robot ou de prévoir des passes additionnelles de correction.

Il est prévu aussi comme perspective à ce travail de réaliser le meulage robotique sur des pièces plus compliquées. En utilisant des meules différentes (de rayon plus petit) ou en utilisant d'autres outils de meulage tels que les roues abrasifs.

Finalement, la validation de la solution proposée de robotisation du procédé de meulage est effectuée sur des cas d'étude simples ne nécessitant pas une variation de la force de meulage au cours de chaque

pas de meulage. Il est nécessaire de procéder à une validation sur des cas d'étude complexes comme le surfacage des formes libres.



# Annexe A

## La modélisation

### A.1 Montage expérimental de l'essai d'identification du modèle de frottement

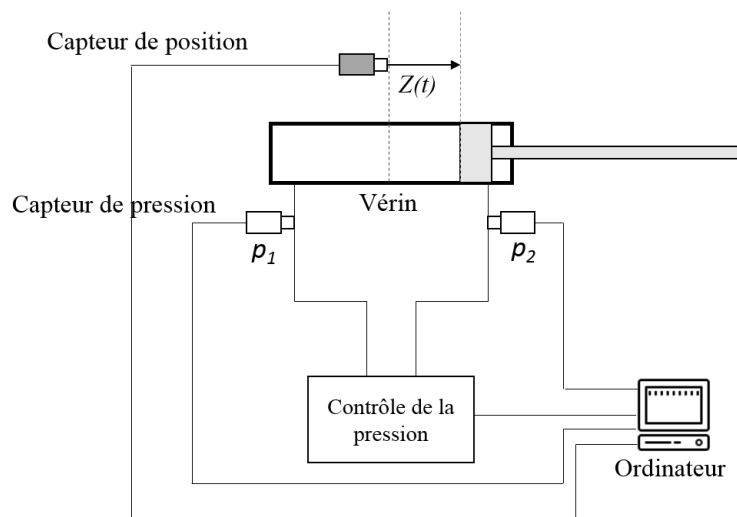
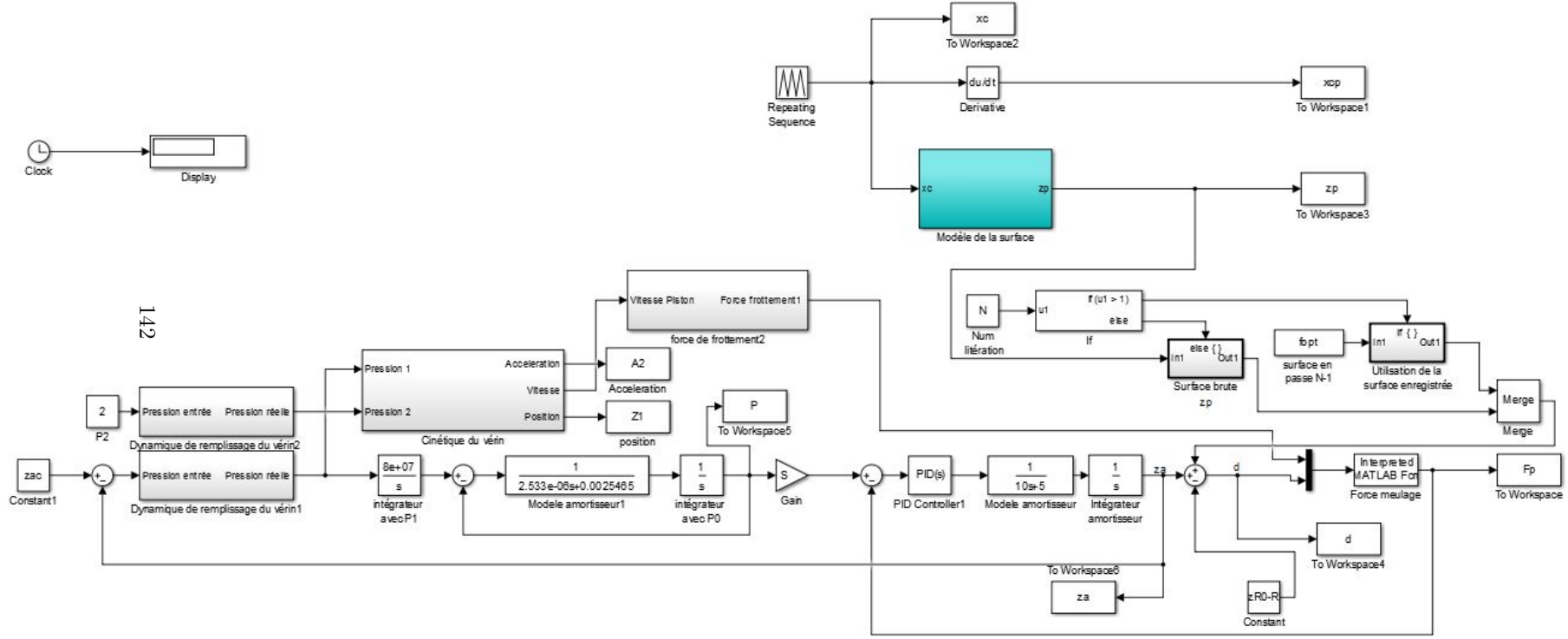


FIGURE A.1: schéma simplifié de l'essai du modèle de frottement

## A.2 Simulateur du système de meulage sur Simulink/Matlab

FIGURE A.2: Simulateur du meulage robotisé



142



## Annexe B

# Planification de la trajectoire

### B.1 Plan de coupe parallèle à une orientation fixe

La figure B.1 illustre la ligne de coupe créée par intersection entre la surface CAO et le plan de coupe. Cette méthode permet de générer des courbes de trajectoire non-paramétrées. Le choix de l'orientation optimale des plans des coupes est le centre de plusieurs recherches. Les objectifs de cette optimisation sont de maximiser la longueur des lignes de coupe et minimiser le nombre des rétractions de l'outil. Dans ce travail, la surface CAO est obtenue par scan 3D de la pièce à meuler.

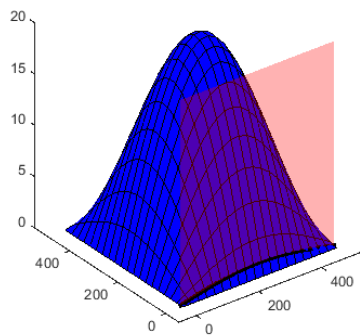


FIGURE B.1: Ligne d'intersection d'une surface CAO avec un plan orienté

## B.2 Exemple de trajectoire outil pour le surfacage

La figure B.2 représente une trajectoire outil composée de quatre couches de meulage. Chaque couche est composée de quatre passes (deux points de contact et deux points de retraits).

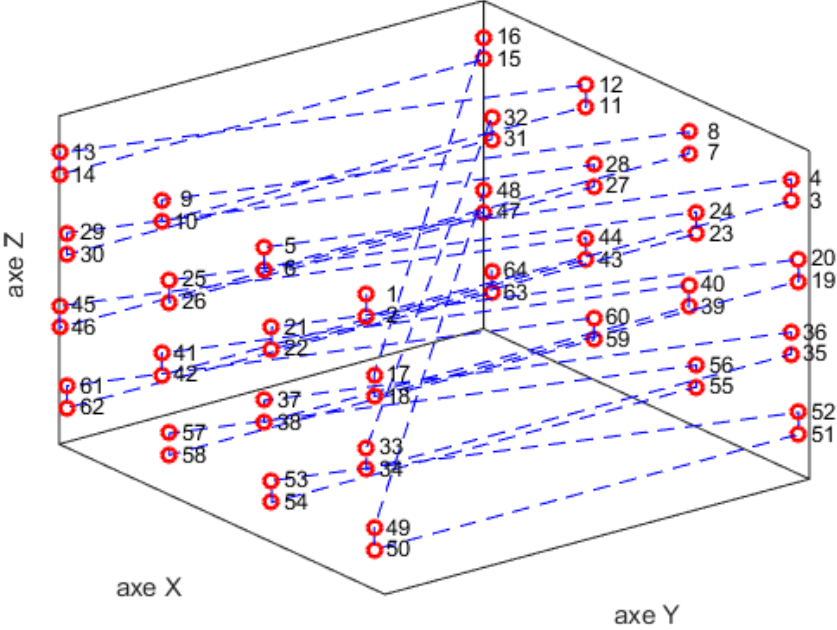


FIGURE B.2: Trajectoire outil

### B.3 Calcul de la surface d'un triangle

Le calcul de la distance entre deux points  $A(x_A, y_A)$  et  $B(x_B, y_B)$  est effectué en utilisant la formule suivante :

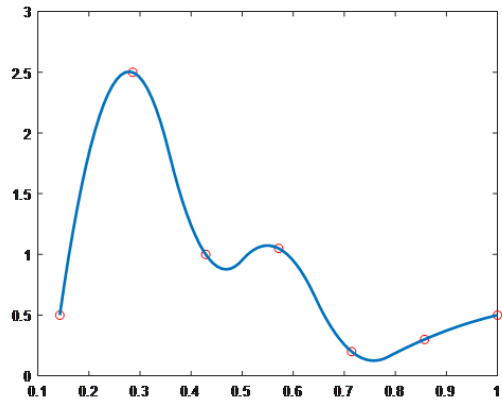
$$c = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2} \quad (\text{B.1})$$

En utilisant l'équation B.1, les longueurs  $l_1, l_2, l_3$  des côtés d'un triangle peuvent être calculés connaissant la position de ces sommets. En utilisant la formule de Héron, l'aire du triangle de côtés  $l_1, l_2, l_3$  peut être calculée comme suit :

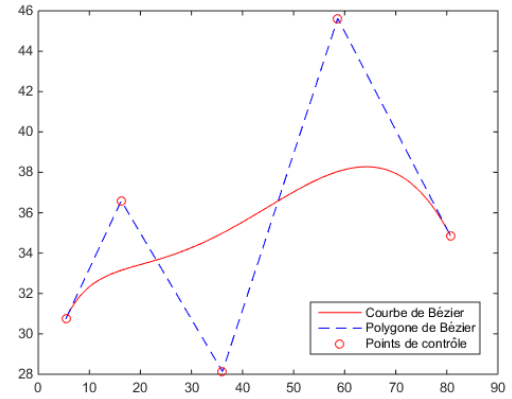
$$\begin{aligned} s &= \text{surfaceT}(l_1, l_2, l_3) \\ &= \sqrt{p(p - l_1)(p - l_2)(p - l_3)} \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

Avec  $p = \frac{l_1 + l_2 + l_3}{2}$ . D'autres formules sont disponibles dans la littérature pour le calcul de l'aire des triangles, tel que la formule proposée par Kahan [42] pour les triangles obtusangles.

## B.4 Comparaison entre une interpolation de Bézier et B-spline



(a) Courbes paramétrées B-splines à partir de 7 points de contrôle



(b) Courbe de Bézier à partir de 5 points de contrôle

FIGURE B.3: Interpolation des points de passage de la meule

## B.5 Calcul de la courbure $\kappa$ et la torsion $\tau$ d'une courbe paramétrée

Soit  $f(s)$  une courbe paramétrée. Alors pour tout  $s$  on a :

$$\kappa = \frac{\det(f'(s), f''(s))}{\|f'(s)\|^3} \quad (\text{B.3})$$

$$\tau = \frac{\det(f'(s), f''(s), f'''(s))}{\|f''(s)\|^2} \quad (\text{B.4})$$

## B.6 Repère Frenet-Serret lié à la trajectoire d'une passe de meulage

Les repères de Frenet-Serret permettent de calculer l'orientation de l'effecteur du robot le long de la trajectoire planifiée. La figure B.4 présente les repères de Frenet liés à la trajectoire du robot pour la première passe de surfaçage.

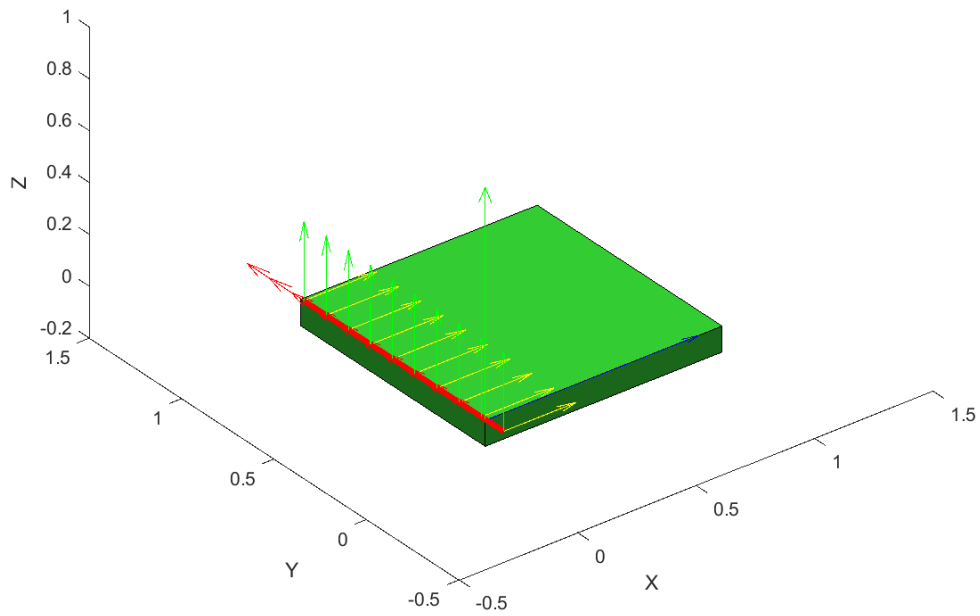


FIGURE B.4: Repères Frenet liés à une passe de meulage

## Annexe C

# État de surface

### C.1 Longueur de base pour le calcul de rugosité $R_a$

L'ISO [39] a introduit la notion de longueur de base. Un profil mesuré peut être découpé en longueurs de base. Les longueurs de base normalisées exprimées en mm :

0,08 - 0,25 - 0,8 - 2,5 - 8 - 25

Sur une longueur de base, il est possible de rechercher une ligne moyenne unique, « la droite des moindres carrés ». Celle-ci devient la référence de calcul des paramètres sur une longueur de base. En faisant la moyenne des valeurs des paramètres calculés sur cinq longueurs de base minimum, on a une corrélation satisfaisante avec la valeur du paramètre calculé à partir de la ligne moyenne. La longueur de base choisie pour ce travail est de 8 mm sur une longueur totale de 40 mm. Les paramètres n'étant calculés que sur cette longueur de base, à partir de la ligne moyenne, la longueur de base va agir comme un filtre qui ne laisse passer que les informations relatives à la rugosité, en éliminant celles relatives à l'ondulation.

## C.2 Filtrage des mesures de surfaces

Pour la mesure de la rugosité suivant la direction de coupe 2, un filtre de Gauss est utilisé. Soit  $data.z$  un profil de surface mesurée. Le profil de surface filtré est calculé à partir de l'équation suivante :

$$data.zf = data.z \otimes g \quad (C.1)$$

avec  $g$  la fonction gaussienne et  $\otimes$  le produit de convolution. La figure C.1 présente une surface mesurée et filtrée.

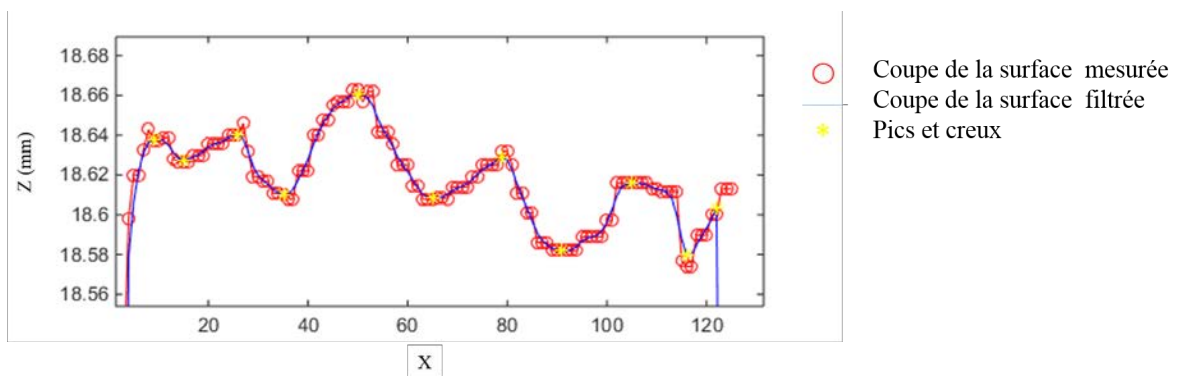


FIGURE C.1: Filtrage des mesures

Le programme Matlab utilisé est présenté dans la figure C.2.



```

clear all;
clc;
close all;
% Charger le profil de la surface
P=load('profildata.txt');
data.x=P(:,1);
data.z=P(:,2);
% Nous pouvons accéder aux valeurs de x à data.x et aux valeurs de z à data.z
%% appliquer le filtre de Gauss et afficher les resultats
% creer le filtre
sigma = sigma_voulue; % Choisir une valeur de sigma pour la fonction de Gauss
gaussFilter = gausswin(2*sigma + 1)';
gaussFilter = gaussFilter / sum(gaussFilter); % centrer
filteredZ = conv(data.z, gaussFilter, 'same');
% afficher z filtré et z initial pour comparaison
%figure;
plot(data.x,data.z, 'o-r') % afficher z initial sous forme de cercle
hold on;
plot(data.x,filteredZ, 'b') % afficher z filtré
hold off;

```

FIGURE C.2: programme Matlab de filtrage

### C.3 Algorithme d'optimisation avec la méthode du gradient conjugué (Conjugate gradient)

Le calcul est réalisé grâce aux deux boucles : une boucle externe et une boucle interne. Le calcul est arrêté quand le nombre d'itération est dépassé ou lorsque le calcul converge. Les entrées de l'algorithme sont le rayon  $r_{ini}$ , le centre du cercle d'initiation  $C_{ini}$ , le nombre d'itération maximale  $i_{max}$ , le paramètre de convergence interne  $\epsilon_{inter}$ , le paramètre de convergence de la boucle externe  $\epsilon_{ext}$ .

---

**Algorithme 1** : Calcul de centre de l'arrondi  $C(x, y)$ 

---

**Result** : C

calculer  $\hat{r}$  ;

calculer  $J$  ;

calculer  $\nabla J$  ;

$J_{prev} \leftarrow J$  ;

$\nabla J_{prev} \leftarrow \nabla J$  ;

$\vec{u}_{prev} \leftarrow \vec{u}$  ;

**while**  $i < i_{max}$  **do**

$\vec{u} \leftarrow -\nabla J$  ;

**if**  $i > 1$  **then**

        // Le coefficient de Polak-Ribiere ;

$\beta \leftarrow \nabla J^T (\nabla J - \nabla J_{prev}) / \nabla J_{prev}^2$  ;

$\vec{u} \leftarrow \vec{u} + \beta \vec{u}_{prev}$  ;

**end**

$\nabla J_{prev} \leftarrow \nabla J$  ;

$\vec{u}_{prev} \leftarrow \vec{u}$  ;

    // minimalisation rapide suivant le sens de recherche;

**do**

$J_{inter} \leftarrow J$  ;

        calculer  $dJ/d\lambda$  ;

        calculer  $d^2J/d\lambda^2$  ;

$\lambda \leftarrow -(dJ/d\lambda) / (d^2J/d\lambda^2)$  ;

$C \leftarrow C + \lambda \vec{u}$  ;

        calculer  $\hat{r}$  ;

        calculer  $J$  ;

        calculer  $\nabla J$  ;

**while**  $i \leq i_{max}$  and  $|J - J_{inter}|/J \geq \epsilon_{inter}$  ;

**if**  $|J - J_{prev}|/J < \epsilon_{ext}$  **then**

        | **retour**

**end**

**end**

**Erreur** incapable de converger en  $i_{max}$  itérations.

---



# Bibliographie

- [1] *Accidents du travail et maladies professionnelles (AT-MP). Statistiques nationales - Démarches de prévention - INRS*. 2016. URL : <http://www.inrs.fr/demarche/atmp/statistiques-nationales.html> (visité le 17/11/2019).
- [2] J. ALBIZURI, M.H. FERNANDES, I. GARITAONANDIA, X. SABALZA, R. URIBE-ETXEBERRIA et J.M. HERNÁNDEZ. “An active system of reduction of vibrations in a centerless grinding machine using piezoelectric actuators”. en. In : *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47.10 (août 2007), p. 1607-1614. ISSN : 08906955. DOI : 10.1016/j.ijmachtools.2006.11.004. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695506002884> (visité le 07/11/2019).
- [3] R. AMAMOU, N. BEN FREDJ et F. FNAIECH. “Improved method for grinding force prediction based on neural network”. In : *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 39.7 (nov. 2008), p. 656-668. ISSN : 1433-3015. DOI : 10.1007/s00170-007-1264-9. URL : <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1264-9>.
- [4] H. BAOFENG, W. CUI'E, D. SIYUAN et S. ZHAOYAO. “A survey of methods for detecting metallic grinding burn”. In : *Measurement* 134 (2019), p. 426-439. ISSN : 0263-2241. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.10.093>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224118310364>.
- [5] R.J. BAYLIS et B.J. STONE. “The Effect of Grinding Wheel Flexibility on Chatter”. In : *CIRP Annals* 38.1 (1989), p. 307-310. ISSN : 00078506. DOI : 10.1016/S0007-8506(07)62710-3. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607627103> (visité le 07/11/2019).
- [6] P. BO. *Sliding Friction: Physical Principles and Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000.
- [7] B. C. BOUZGARROU. “Conception et modélisation d’une machine-outil à architecteur hybride pour l’UTGV”. Thèse de doct. Université Blaise Pascal -Clermont-Ferrand II, 2001.
- [8] E. BRINKSMEIER, J.C. AURICH, E. GOVEKAR, C. HEINZEL, H.-W. HOFFMEISTER, F. KLOCKE, J. PETERS, R. RENTSCH, D.J. STEPHENSON, E. UHLMANN, K. WEINERT et M. WITTMANN. “Advances in Modeling and Simulation of Grinding Processes”. en. In : *CIRP Annals* 55.2 (2006), p. 667-696. ISSN : 00078506. DOI : 10.1016/j.cirp.2006.10.003. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1660277306000041> (visité le 09/10/2019).

- [9] F. CACCAVALE, C. NATALE, B. SICILIANO et L. VILLANI. “Integration for the next generation”. en. In : *IEEE Robotics & Automation Magazine* 12.3 (sept. 2005), p. 53-64. ISSN : 1070-9932. DOI : 10.1109/MRA.2005.1511869. URL : <http://ieeexplore.ieee.org/document/1511869/> (visité le 07/11/2019).
- [10] C. CANUDAS DE WIT. “Experimental results on adaptive friction compensation in robot manipulators: Low velocities”. In : *Experimental Robotics I*. Springer. 1990, p. 196-214.
- [11] B.K. CHOI, C.S. LEE, J.S. HWANG et C.S. JUN. “Compound surface modelling and machining”. In : *Computer-Aided Design* 20.3 (1988), p. 127-136. ISSN : 0010-4485. DOI : [https://doi.org/10.1016/0010-4485\(88\)90020-6](https://doi.org/10.1016/0010-4485(88)90020-6). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0010448588900206>.
- [12] J.P. CORDEBOIS et M. COLOMBIÉ. *Fabrication par usinage - 2ème édition*. Mécanique et matériaux. Dunod, 2008. ISBN : 978-2-10-053687-0. URL : <https://books.google.fr/books?id=jhzjNhetyXYC>.
- [13] P.R. DAHL. “A Solid friction model”. In : *The Aerospace Corporation* (1968), p. 3107-3118.
- [14] H. DAI, K. M. YUEN et M. A. ELBESTAWI. “Parametric modelling and control of the robotic grinding process”. en. In : *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 8.3 (mai 1993), p. 182-192. ISSN : 0268-3768, 1433-3015. DOI : 10.1007/BF01749909. URL : <http://link.springer.com/10.1007/BF01749909> (visité le 07/11/2019).
- [15] A. DARAFON. “Measuring and Modeling of Grinding Wheel Topography”. Thèse de doct. Halifax, Nova Scotia : Université Dalhousie, 2013.
- [16] C. DE BOOR. “On calculating with B-Splines”. In : *Journal Of Approximation Theory* 6 (1972), p. 50-62.
- [17] J. DE SCHUTTER, H. BRUYNINCKX, W.H. ZHU et M.W. SPONG. “Force control: A bird’s eye view”. en. In : *Control Problems in Robotics and Automation*. Sous la dir. de M. THOMA, Bruno SICILIANO et Kimon P. VALAVANIS. T. 230. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1998, p. 1-17. ISBN : 978-3-540-76220-1 978-3-540-40913-7. DOI : 10.1007/BFb0015073. URL : <http://link.springer.com/10.1007/BFb0015073> (visité le 07/11/2019).
- [18] Z. H. DENG, X. H. ZHANG, W. LIU et H. CAO. “A hybrid model using genetic algorithm and neural network for process parameters optimization in NC camshaft grinding”. In : *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 45.9 (avr. 2009), p. 859. ISSN : 1433-3015. DOI : 10.1007/s00170-009-2029-4. URL : <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2029-4>.
- [19] M. DIDI CHAOUI, F. LÉONARD et G. ABBA. “Path Planning for Robotic Grinding on a Large Forged Workpiece”. In : *IFAC-PapersOnLine* 52.13 (2019). 9th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2019, p. 1162-1167. ISSN : 2405-8963. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.357>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896319313369>.

- [20] J.A. DIESTE, A. FERNÁNDEZ, D. ROBA, B. GONZALVO et P. LUCAS. “Automatic Grinding and Polishing Using Spherical Robot”. en. In : *Procedia Engineering* 63 (2013), p. 938-946. ISSN : 18777058. DOI : 10.1016/j.proeng.2013.08.221. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705813014343> (visité le 07/11/2019).
- [21] N. DUFFIE et S.C. FENG. “Surface Finishing with Automated Inspection and Grinding”. In : *Computer-Aided Design and Manufacture of Dies and Molds* (1988), p. 19-28.
- [22] P.E. DUPONT et E.P. DUNLAP. “Friction Modeling and Control in Boundary Lubrication”. In : *1993 American Control Conference*. Juin 1993, p. 1910-1915. DOI : 10.23919/ACC.1993.4793210.
- [23] D. EBERLY. “The Area of Intersecting Ellipses”. en. In : *Geometric Tools* (2008), p. 13.
- [24] S.M. EL SODANI. “Profilometric analysis of fractures”. In : *Metallography* 11 (1978), p. 246-336.
- [25] K.F. EMAN et S.J. YOU. “Scallop Removal in Die Milling by Tertiary Cutter lotion”. In : *Journal of Engineering for Industry* 111 (1989), p. 213-219.
- [26] C. FAN, G.S. HONG, J. ZHAO, L. ZHANG, J. ZHAO et L. SUN. “The integral sliding mode control of a pneumatic force servo for the polishing process”. en. In : *Precision Engineering* 55 (jan. 2019), p. 154-170. ISSN : 01416359. DOI : 10.1016/j.precisioneng.2018.09.001. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141635918300060> (visité le 07/11/2019).
- [27] G. FARIN. “Curves and Surfaces for CAGD”. In : Morgan Kaufmann, p. 520.
- [28] L. FENG-YUN et L. TIAN-SHENG. “Development of a robot system for complex surfaces polishing based on CL data”. en. In : *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 26.9-10 (oct. 2005), p. 1132-1137. ISSN : 0268-3768, 1433-3015. DOI : 10.1007/s00170-004-2088-5. URL : <http://link.springer.com/10.1007/s00170-004-2088-5> (visité le 07/11/2019).
- [29] A. GÁLVEZ, A. IGLESIAS et L. CABELLOS. “Tabu search-based method for bézier curve parameterization”. In : *International Journal of Software Engineering and Its Applications* 7.5 (2013), p. 283-296.
- [30] A. GANGULI, A. DERAEMAERKER et A. PREUMONT. “Regenerative chatter reduction by active damping control”. en. In : *Journal of Sound and Vibration* 300.3-5 (mar. 2007), p. 847-862. ISSN : 0022460X. DOI : 10.1016/j.jsv.2006.09.005. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022460X06007358> (visité le 11/12/2019).
- [31] M. GUO, B. LI, Z. DING et S.Y. LIANG. “Empirical modeling of dynamic grinding force based on process analysis”. In : *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 86.9 (oct. 2016), p. 3395-3405. ISSN : 1433-3015. DOI : 10.1007/s00170-016-8465-z. URL : <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8465-z>.
- [32] R.S. HAHN. “Precision Grinding Cycles”. In : *Handbook of Modern Grinding Technology*. Boston, MA : Springer US, 1986, p. 170-190. ISBN : 978-1-4613-1965-8. DOI : 10.1007/978-1-4613-1965-8\_7. URL : [https://doi.org/10.1007/978-1-4613-1965-8\\_7](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-1965-8_7).
- [33] M. HAYES et D. JOHN. “Kinematics of General Planar Stewart-Gough Platforms”. en. Thèse de doct.

- [34] D.P. HESS et A. SOOM. “Friction at a lubricated line contact operating at oscillating sliding velocities”. In : *Journal of Tribology* 112.1 (jan. 1990), p. 147-152.
- [35] Y. HUANG et J.H. OLIVER. “Non-constant parameter NC tool path generation on sculptured surfaces”. en. In : *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 9.5 (sept. 1994), p. 281-290. ISSN : 0268-3768, 1433-3015. DOI : 10.1007/BF01781282. URL : <http://link.springer.com/10.1007/BF01781282> (visité le 28/11/2019).
- [36] Y. HUANG et J.H. OLIVER. “Non-constant parameter NC tool path generation on sculptured surfaces”. In : *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 9.5 (1994), p. 281-290.
- [37] D.M. IOAN, W.B. ROWE, B. DIMITROV et H. OHMORI. *Tribology of Abrasive Machining Processes*. en. 2ème édition. Elsevier, 2013. ISBN : 978-1-4377-3467-6. DOI : 10.1016/C2010-0-67070-2. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/C20100670702> (visité le 24/10/2019).
- [38] *IRB 8700 - Robots industriels (Robotique) - Robots Industriels | ABB*. fr. URL : <https://new.abb.com/products/robotics/fr/robots-industriels/irb-8700> (visité le 04/12/2019).
- [39] *Spécification géométrique des produits (GPS) — État de surface: Surfacing — Partie 2: Termes, définitions et paramètres d'états de surface*. Standard. International Organization for Standardization, 2012.
- [40] C.G. JENSEN et D.C. ANDERSON. “Accurate tool placement and orientation for finish surface machining”. In : *ASME-PUBLICATIONS-PED* 59 (1993), p. 127-127.
- [41] D. JEON et M. TOMIZUKA. “Learning hybrid force and position control of robot manipulators”. In : *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 9.4 (1993), p. 423-431.
- [42] W. KAHAN. “Miscalculating Area and Angles of a Needle-like Triangle”. In : (1999). URL : <https://people.eecs.berkeley.edu/~wkahan/Triangle.pdf>.
- [43] D. KARNOPP. “Computer simulation of stick-slip friction in mechanical dynamic systems”. In : *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 107.1 (mar. 1985), p. 100-103.
- [44] K. KASHIWAGI et T. IBARAKI. “FORCE CONTROLLED ROBOT FOR GRINDING”. en. In : *IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems* (1990), p. 6.
- [45] W. KHALIL et E. DOMBRE. *Modélisation identification et commande des robots*. fr. 2eme édition. Hermès - Lavoisier, 1999. ISBN : 978-2-7462-0003-6.
- [46] B.H. KIM et B.K. CHOI. “Machining efficiency comparison direction-parallel tool path with contour-parallel tool path”. In : *Computer-Aided Design* 34.2 (2002), p. 89-95.
- [47] J. KÖHLER. “Grinding Parameters”. In : *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Sous la dir. de Sami CHATTI, Luc LAPERRIÈRE, Gunther REINHART et Tullio TOLIO. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2019, p. 825-829. ISBN : 978-3-662-53120-4. DOI : 10.1007/978-3-662-53120-4\_6424. URL : [https://doi.org/10.1007/978-3-662-53120-4\\_6424](https://doi.org/10.1007/978-3-662-53120-4_6424).
- [48] K. KOLEGAIN. “Correction de trajectoires d’un robot manipulateur utilisé pour le soudage par friction malaxage”. Thèse de doct. Ecole nationale supérieure d’arts et métiers, 2019.



- [49] J.P. LAUMOND. *Robot Motion Planning and Control*. Springer, 1998.
- [50] B. LAUWERS. “Five-Axis Tool Path Generation”. In : *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Sous la dir. de Luc LAPERRIÈRE et Gunther REINHART. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2014, p. 514-524. ISBN : 978-3-642-20617-7. DOI : 10.1007/978-3-642-20617-7\_16684. URL : [https://doi.org/10.1007/978-3-642-20617-7\\_16684](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20617-7_16684).
- [51] J. LEE. “Developing an end-of-arm tooling for robotic grinding machining application”. en. In : *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 1.1 (sept. 1985), p. 27-36. ISSN : 0268-3768, 1433-3015. DOI : 10.1007/BF02601580. URL : <http://link.springer.com/10.1007/BF02601580> (visité le 09/10/2019).
- [52] L. LICHUN, F. JIZAI et J. PEKLENIK. “A Study of Grinding Force Mathematical Model”. en. In : *CIRP Annals* 29.1 (1980), p. 245-249. ISSN : 00078506. DOI : 10.1016/S0007-8506(07)61330-4. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607613304> (visité le 09/10/2019).
- [53] R.S. LIN et Y. KOREN. “Efficient Tool-Path Planning for Machining Free-Form Surfaces”. en. In : *Journal of Engineering for Industry* 118.1 (1996), p. 20. ISSN : 00220817. DOI : 10.1115/1.2803642. URL : <http://ManufacturingScience.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1448086> (visité le 28/11/2019).
- [54] G.C. LONEY et T.M. OZSOY. “NC machining of free form surfaces”. en. In : *Computer-Aided Design* 19.2 (1987), p. 85-90. ISSN : 00104485. DOI : 10.1016/S0010-4485(87)80050-7. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010448587800507> (visité le 28/11/2019).
- [55] L. MAISONOBE. *Finding the circle that best fits a set of points*. 2007. URL : <http://www.spaceroots.org/documents/circle/circle-fitting.pdf> (visité le 25/02/2020).
- [56] S. MALKIN et C. GUO. *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives*. 2ème édition. New York : Industrial Press, 2008.
- [57] S.H. MULLINS, C.G. JENSEN et D.C. ANDERSON. “Scallop elimination based on precise 5-axis tool placement, orientation, and step-over calculations.” In : *ASME DES ENG DIV PUBL DE., ASME, NEW YORK, NY(USA), 1993*, 65 (1993), p. 535-544.
- [58] S. NAHAVANDI, M.J. UDDIN, Y. NASU, H. TRINH et M. SAADAT. “Automated robotic grinding by low-powered manipulator”. en. In : *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 23.5 (oct. 2007), p. 589-598. ISSN : 07365845. DOI : 10.1016/j.rcim.2005.12.013. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0736584506000998> (visité le 07/11/2019).
- [59] H. NASRI et G. BOLMSJO. “A process model for robotic disc grinding”. In : *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 35.4 (1995), p. 503-510. ISSN : 0890-6955. DOI : [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(94\)P4346-V](https://doi.org/10.1016/0890-6955(94)P4346-V). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0890695594P4346V>.

- [60] J. NORBERTO PIRES, J. RAMMING, S. RAUCH et R. ARAÚJO. “Force/torque sensing applied to industrial robotic deburring”. en. In : *Sensor Review* 22.3 (sept. 2002), p. 232-241. ISSN : 0260-2288. DOI : 10.1108/02602280210433070. URL : <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/02602280210433070/full/html> (visité le 07/11/2019).
- [61] A. OLABI, M. DAMAK, R. BÉARÉE et O. GIBARU. “Mouvement a rigidité maximal pour un robot 6 axes destiné à des opérations d’usinage”. Thèse de doct. Cluny : MUGV, 2010.
- [62] Z. PAN, H. ZHANG, Z. ZHU et J. WANG. “Chatter analysis of robotic machining process”. en. In : *Journal of Materials Processing Technology* 173.3 (avr. 2006), p. 301-309. ISSN : 0924-0136. DOI : 10.1016/j.jmatprotec.2005.11.033. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013605009805> (visité le 17/10/2019).
- [63] S.C. PARK et B.K. CHOI. “Tool-path planning for direction-parallel area milling”. In : *Computer-Aided Design* 32.1 (2000), p. 17-25.
- [64] U.S. PATNAIK DURGUMAHANTI, V. SINGH et P. VENKATESWARA RAO. “A New Model for Grinding Force Prediction and Analysis”. en. In : *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 50.3 (mar. 2010), p. 231-240. ISSN : 08906955. DOI : 10.1016/j.ijmachtools.2009.12.004. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695509002429> (visité le 09/10/2019).
- [65] W. PERSOONS et P. VANHERCK. “A Process Model for Robotic Cup Grinding”. In : *CIRP Annals* 45.1 (1996), p. 319-325. ISSN : 0007-8506. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63072-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63072-8). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607630728>.
- [66] J. PI, E. RED et G. JENSEN. “Grind-free tool path generation for five-axis surface machining”. en. In : *Computer Integrated Manufacturing Systems* 11.4 (oct. 1998), p. 337-350. ISSN : 09515240. DOI : 10.1016/S0951-5240(98)00033-0. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0951524098000330> (visité le 28/11/2019).
- [67] A. PREUMONT. *Vibration Control of Active Structures, An Introduction*. 3ème édition. Springer, 2011.
- [68] G. QUINTANA et J. CIURANA. “Chatter in machining processes: A review”. In : *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 51.5 (mai 2011), p. 363-376. ISSN : 08906955. DOI : 10.1016/j.ijmachtools.2011.01.001. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695511000022> (visité le 25/10/2019).
- [69] F. RAFIEIAN, B. HAZEL et Z. LIU. “Regenerative Instability of Impact-cutting Material Removal in the Grinding Process Performed by a Flexible Robot Arm”. en. In : *Procedia CIRP*. 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting, HPC2014 14 (jan. 2014), p. 406-411. ISSN : 2212-8271. DOI : 10.1016/j.procir.2014.03.099. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221282711400242X> (visité le 28/10/2019).

- [70] A.M. RAMOS, C. RELVAS et J.A. SIMÕES. “The influence of finishing milling strategies on texture, roughness and dimensional deviations on the machining of complex surfaces”. In : *Journal of Materials Processing Technology* 136.1 (2003), p. 209-216. ISSN : 0924-0136. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00160-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00160-2). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013603001602>.
- [71] X. REN, B. KUHLENKÖTTER et H. MÜLLER. “Simulation and verification of belt grinding with industrial robots”. en. In : *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46.7-8 (juin 2006), p. 708-716. ISSN : 08906955. DOI : 10.1016/j.ijmachtools.2005.07.033. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695505001951> (visité le 07/11/2019).
- [72] R. SARMA et D. DUTTA. “The Geometry and Generation of NC Tool Paths”. en. In : *Journal of Mechanical Design* 119.2 (juin 1997), p. 253-258. ISSN : 1050-0472, 1528-9001. DOI : 10.1115/1.2826244. URL : <https://asmedigitalcollection.asme.org/mechanicaldesign/article/119/2/253/417822/The-Geometry-and-Generation-of-NC-Tool-Paths> (visité le 28/11/2019).
- [73] S.E. SARMA. “The crossing function and its application to zig-zag tool paths”. In : *Computer-Aided Design* 31.14 (1999), p. 881-890.
- [74] P.J. SCHNEIDER et D.H. EBERLY. *Geometric tools for computer graphics*. Morgan Kaufmann Publishers, 2010.
- [75] B. SICILIANO et I. VILLANI. *Robot force control*. Springer Science, 1999.
- [76] M. C. SOZBİLEN, A. E. DASTAN, H. GUNAY et L. KUCUK. “A prospective study of angle grinder injuries in the hands and forearms during a one-year period”. eng. In : *Hand Surgery & Rehabilitation* 37.5 (2018), p. 300-304. ISSN : 2468-1210. DOI : 10.1016/j.hansur.2018.07.002.
- [77] K. SURESH et D. C. H. YANG. “Constant Scallop-height Machining of Free-form Surfaces”. en. In : *Journal of Engineering for Industry* 116.2 (1994), p. 253. ISSN : 00220817. DOI : 10.1115/1.2901938. URL : <http://ManufacturingScience.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1447849> (visité le 28/11/2019).
- [78] *Timeline*. en. URL : <https://ifr.org> (visité le 01/01/2020).
- [79] H.K. TÖNSHOFF, J. PETERS, I. INASAKI et T. PAUL. “Modelling and Simulation of Grinding Processes”. en. In : *CIRP Annals* 41.2 (1992), p. 677-688. ISSN : 00078506. DOI : 10.1016/S0007-8506(07)63254-5. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850607632545> (visité le 09/10/2019).
- [80] M. TÓTH, N.D. SIMS et D. CURTIS. “An analytical study of wheel regeneration in surface grinding”. en. In : *Procedia CIRP* 82 (2019), p. 214-219. ISSN : 22128271. DOI : 10.1016/j.procir.2019.04.046. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827119306602> (visité le 07/11/2019).
- [81] A. TUSTIN. “The effects of backlash and of speed-dependent friction on the stability of closed-cycle control systems”. In : 1947. DOI : 10.1049/ji-2a.1947.0021.

- [82] C. VILA, C. AYABACA, R. TORRES, S.C. GUTIÉRREZ, A. MESEGUER et X. YANG. “Analysis of Different Tool Path Strategies for Free Form Machining with Computer Aided Surface Milling Operations”. In : *Procedia Manufacturing* 41 (2019). 8th Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2019, 19-21 June 2019, Madrid, Spain, p. 843-850. ISSN : 2351-9789. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.10.006>. URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919311680>.
- [83] J. WALLÉN. *The history of the industrial robot*. Rapp. tech. LiTH-ISY-R-2853. Linköping, Sweden : Université de Linköping, 2008, p. 18. URL : <http://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:316930/FULLTEXT01.pdf>.
- [84] D. E. WHITNEY, A. C. EDSALL, A. B. TODTENKOPF, T. R. KURFESS et A. R. TATE. “Development and Control of an Automated Robotic Weld Bead Grinding System”. en. In : *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 112.2 (juin 1990), p. 166-176. ISSN : 0022-0434, 1528-9028. DOI : 10.1115/1.2896123. URL : <https://asmedigitalcollection.asme.org/dynamicsystems/article/112/2/166/417228/Development-and-Control-of-an-Automated-Robotic> (visité le 17/11/2019).
- [85] D.E. WHITNEY et E.D. TUNG. “Robot grinding and finishing of cast iron stamping dies”. In : *Journal of dynamic systems, measurement, and control* 114.1 (1992), p. 132-140.
- [86] B. XAVIER. *Commandes linéaires et non linéaires en électropneumatique. Méthodologies et Applications*. 1999.
- [87] F. XI, W. HAN, M. VERNER et A. ROSS. “Development of a sliding-leg tripod as an add-on device for manufacturing”. en. In : *Robotica* 19.3 (mai 2001), p. 285-294. ISSN : 0263-5747, 1469-8668. DOI : 10.1017/S0263574700002964. URL : [https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0263574700002964/type/journal\\_article](https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0263574700002964/type/journal_article) (visité le 23/10/2019).
- [88] M. YOUNIS, M. M. SADEK et T. EL-WARDANI. “A New Approach to Development of a Grinding Force Model”. en. In : *Journal of Engineering for Industry* 109.4 (1987), p. 306. ISSN : 00220817. DOI : 10.1115/1.3187133. URL : <http://ManufacturingScience.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1446953> (visité le 09/10/2019).