



HAL
open science

Amélioration de la précision de robots industriels : Application à l'usinage de pièces composites

Guillaume Carrière

► **To cite this version:**

Guillaume Carrière. Amélioration de la précision de robots industriels : Application à l'usinage de pièces composites. Robotique [cs.RO]. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2021. Français. NNT : 2021INPT0068 . tel-04171163

HAL Id: tel-04171163

<https://theses.hal.science/tel-04171163>

Submitted on 26 Jul 2023

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.



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (Toulouse INP)

Discipline ou spécialité :

Génie Mécanique, Mécanique des Matériaux

Présentée et soutenue par :

M. GUILLAUME CARRIERE

le lundi 5 juillet 2021

Titre :

Amélioration de la précision de robots industriels: Application à l'usinage
de pièces composites

Ecole doctorale :

Mécanique, Energétique, Génie civil, Procédés (MEGeP)

Unité de recherche :

Laboratoire de Génie de Productions de l'ENIT (E.N.I.T-L.G.P.)

Directeur(s) de Thèse :

M. GILLES DESSEIN

Rapporteurs :

M. MEHDI CHERIF, ENSAM BORDEAUX

M. VINCENT GAGNOL, SIGMA CLERMONT FD

Membre(s) du jury :

MME NADINE COUTURE, ESTIA BIDART, Président

M. BENJAMIN BONIFACE, SOCIETE LAUAK INNOVATIVE SOLUTIONS, Invité(e)

M. GILLES DESSEIN, ECOLE NATIONALE D'INGENIEUR DE TARBES, Membre

M. MOURAD BENOUSSAAD, ECOLE NATIONALE D'INGENIEUR DE TARBES, Membre

M. ROMAIN BRAULT, Ct technique. des industries mécaniques, Invité(e)

M. VINCENT WAGNER, ECOLE NATIONALE D'INGENIEUR DE TARBES, Membre

La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi. Ici, nous avons réuni théorie et pratique : Rien ne fonctionne... et personne ne sait pourquoi ! Albert Einstein

REMERCIEMENTS

L'expérience de la thèse de doctorat se retrouve généralement entre le crépuscule de la vie étudiante et l'aube de la vie professionnelle. Pour ma part, cette période de quatre années de thèse fait également écho avec l'arrivée de mes deux filles dans ma vie. Ce fut donc un temps de transition riche et intense pour lequel de nombreuses personnes se sont retrouvées, de manière fortuite ou non, pour le pire et le meilleur, entre mon doctorat et moi. Ces personnes, je souhaite les mettre en avant dans ces remerciements.

En premier lieux, je remercie Madame Nadine Couture, présidente de mon jury de thèse et directrice d'Estia Recherche, pour sa présence et son évaluation concernant mon travail. Je suis reconnaissant du travail effectué par mes rapporteurs et membres du jury : Monsieur Mehdi Cherif et Monsieur Vincent Gagnol, je les remercie pour leurs corrections et lectures approfondies de mon manuscrit. Leur travail m'a permis de prendre du recul sur ma rédaction et de reformuler, clarifier et fluidifier un bon nombre de passages. Je remercie tous les membres de mon jury de thèse qui ont tous participé à un débat intéressant et constructif. Grâce à eux, j'ai réellement apprécié ce temps de soutenance et j'ai également entrevu de nouvelles perspectives à mes travaux.

Je remercie l'équipe d'encadrement de l'ENI de Tarbes, mon directeur de thèse Monsieur Gilles Dessen pour ces conseils, son soutien, sa patience à mon égard et sa disponibilité. Messieurs Vincent Wagner et Mourad Benoussaad pour les multiples discussions techniques, leur présence m'a permis de proposer un travail de recherche rigoureux et soigné. Je les remercie également pour le temps précieux qu'ils ont consacré à la correction des différentes versions de ce manuscrit. Je remercie aussi Madame Eliane Casta pour son aide et son support ainsi que toutes les personnes des services administratifs de l'ENIT/INP de Toulouse et de l'école doctorale MEGEP.

Je remercie l'équipe de Compositadour qui m'a reçu et orienté au cours de la première année de mes recherches, particulièrement Monsieur Vincent Magimel, Monsieur Henri Bernard, Madame Maylis Huart, Madame Geneviève Dirassar, Monsieur Olivier Patrouix, Monsieur Joseph Canou et Monsieur Francis Sedeilhan pour leur accompagnement et leur disponibilité.

Je remercie chaleureusement l'équipe de Nimitech Composite (LAUAK à ce jour), cette équipe douée d'une synergie positive qui m'avait accueilli quelques mois avant de début de ma thèse. Merci à Michel Niquet pour sa confiance, à Benjamin Boniface et Romain Brault, pour leur disponibilité et leur accompagnement sans faille, à Valentin Hue, Florent Santolaria, Vincent Tertrou, Fabrice Carasus, Laurence Wagner, Kilian Pirot, Frédéric Tequi, Jean-Pierre Soulier, Etienne Soulier, Toufik Djilali, Samantha Huart et Mikel Banquet pour leur bonne humeur, leur soutien et cette complicité entre collègue

qui ne s'arrête pas à cette échéance de fin de thèse. Je les remercie encore et leur dis à très vite.

Je remercie les collègues, doctorants de l'ENIT qui forment une équipe soudée autour de ce projet qui est quelque part commun, je pense à Marie, Camille, Léopold, Ferhat, Maël, Margot, Danilo et Fabio, merci pour votre soutien et vos encouragements.

Au terme de ce parcours, je remercie celles et ceux que j'ai quelque peu délaissés pendant ces années et qui étaient toujours là pour me remonter le moral ou me changer les idées : Sébastien, Anthony, Meggane, Benjamin, Mathieu, Mattieu, Alexandre, David,... Il ne sera maintenant plus d'actualité d'entendre de leur part « Alors tu la fini quand cette thèse ? » ou encore « Mais tu soutiens en juillet de quelle année ? », ces petits rappels quelque peu piquants ne me manqueront pas !

Je remercie ma belle-famille, Gérard, Yvette, Eric, Thierry et nono pour les moments de détente passés en leur compagnie. Ils me sont chers et leurs encouragements étaient toujours appréciés.

Je suis redevable à mes parents, Véronique et Gilbert Carriere, pour leur soutien moral et matériel, leur confiance indéfectible dans mes choix et pour tout ce qu'ils m'ont transmis jusqu'ici. Ce que j'ai pu faire, je l'ai fait pour moi et j'ai pu le faire grâce à eux. Je remercie ma sœur Anne-Gaëlle et mon frère Bastien pour ce qu'ils sont pour moi, pour leur présence et leur encouragement. J'ai une pensée toute particulière pour ma grand-mère Nicole Mischis qui n'aura pas pu me voir soutenir ce travail, mais qui m'aurait sûrement félicité après s'être assoupie pendant quarante minutes. Elle était une source de motivation quand la fatigue prenait le dessus sur le reste et elle me manquera toujours.

Si mes filles lisent un jour ce manuscrit, je voudrais qu'elles sachent que papa s'excuse de ne pas avoir été présent autant qu'il aurait fallu l'être. Qu'il est vrai que parfois, il était là, mais sans être vraiment là. Qu'il est également vrai que papa s'énervait un peu surtout au cours des six derniers mois de sa thèse. Mais que ce n'était pas leur faute et surtout qu'il ne le fera plus, ou plus trop... Je les remercie d'avoir été là pour leur papa sans s'en rendre compte quand il fallait un petit câlin pour repartir de plus belle.

Enfin, je remercie Ericka Castagnet, la femme de ma vie, pour son soutien et sa présence sans faille, son sens du sacrifice face à cette thèse, ou seul, je m'étais engagé, pour que finalement ce ne soit plus qu'une étape dans notre vie. Je lui dois énormément et je ne l'oublierai jamais.

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	1
TABLE DES MATIERES	4
LISTE DES ILLUSTRATIONS.....	11
LISTE DES TABLES.....	16
LISTE DES ACRONYMES.....	17
LISTE DES SYMBOLES.....	19
INTRODUCTION	23
1. SUJET DE RECHERCHE	24
2. POSITIONNEMENT DES TRAVAUX	25
3. ORGANISATION DU MANUSCRIT	26
I. USINAGE DES MATERIAUX COMPOSITES	27
1. PRESENTATION DU MATERIAU DE L'APPLICATION DE L'ETUDE.....	30
1.1. Les éléments constitutifs du matériau composite.....	30
1.1.1. Les catégories de composites.....	30
1.1.1.1. Le renfort.....	31
1.1.1.2. La matrice.....	31
1.1.1.3. L'interface renfort / matrice.....	31
1.1.2. Matériau de l'application	32
1.1.2.1. Matériau du moule de réflecteur.....	32
1.1.2.2. Caractéristiques mécaniques	32
1.2. Mise en œuvre de la peau du moule en composite.....	32
2. MAITRISE DU PROCESSUS DE COUPE	35
2.1. Usure de l'outil	35
2.1.1. Matériau de l'outil	36
2.1.2. Géométrie de l'outil	36

2.1.3.	<i>Modes de dégradation de l'outil.....</i>	38
2.1.4.	<i>Paramètres influents sur l'usinage.....</i>	39
2.1.4.1.	Orientation des fibres.....	39
2.2.	Influence de l'effort de coupe.....	40
2.3.	Etat de surface.....	42
2.4.	Endommagement.....	43
3.	SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	43
4.	APPLICATION D'UNE METHODE COM.....	44
4.1.	Définition du contexte.....	45
4.1.1.	<i>Gamme d'usinage.....</i>	45
4.1.2.	<i>Calcul de l'engagement de l'outil théorique.....</i>	45
4.1.3.	<i>Choix des outils.....</i>	47
4.1.4.	<i>COM Fraisage – Méthode expérimentale.....</i>	48
4.2.	Conditions de coupe optimales.....	49
4.1.1.	<i>Ebauche.....</i>	50
4.1.2.	<i>Finition.....</i>	51
4.3.	Durée de vie des outils.....	52
4.3.1.	<i>Outils d'ébauche.....</i>	53
4.3.2.	<i>Outils de finition.....</i>	55
4.4.	Analyses des efforts de coupe.....	57
4.4.1.	<i>Etude des relevés d'effort en Ebauche.....</i>	57
4.4.2.	<i>Etude des relevés d'effort en Finition.....</i>	59
4.5.	Confrontation bibliographie.....	60
5.	CONCLUSION.....	62
II.	AMELIORATION DE LA PRECISION D'UN ROBOT	
INDUSTRIEL.....		63
1.	LES ROBOTS INDUSTRIELS USINEURS.....	66
1.1.	Le robot dans l'industrie.....	66
1.2.	Un centre d'usinage flexible, conséquence d'une géométrie sérielle.....	67
1.3.	Précision et répétabilité.....	69
1.4.	Analyses des sources d'erreur de positionnement.....	70
1.4.1.	<i>Erreurs liées au robot.....</i>	70
1.4.2.	<i>Erreurs dépendantes du process d'usinage.....</i>	72

2.	AMELIORATION DE LA PRECISION STATIQUE DES ROBOTS.....	73
2.1.	Modélisation et correction paramétrique	73
2.2.	Modélisation en raideurs	75
2.3.	Modélisation en effort.....	77
2.4.	Correction en temps réel.....	78
3.	SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE – ORIENTATION DE L’ETUDE	79
4.	CALIBRATION DU ROBOT KUKA KR360	80
4.1.	Méthode de correction paramétrique des robots.....	80
4.2.	Modélisation du robot	82
4.2.1.	<i>La modélisation robotique</i>	<i>82</i>
4.2.1.1.	La méthode de D-H modifiée	82
4.2.1.2.	Modèle de Hayati	84
4.2.1.3.	Autres modèles complémentaires	85
4.2.1.4.	Synthèse.....	85
4.2.2.	<i>Modélisation du robot KUKA KR360</i>	<i>85</i>
4.2.2.1.	Repères et paramètres.....	87
4.2.2.2.	Modèle géométrique direct (MGD)	88
4.3.	Optimisation des paramètres géométriques.....	89
4.3.1.	<i>Calcul de la matrice jacobienne des paramètres</i>	<i>91</i>
4.4.	Etude des paramètres géométriques identifiables	92
4.5.	Mise en pratique et développement numérique pour la correction paramétrique	95
4.6.	Expérimentation et résultats.....	97
4.6.1.	<i>Paramètres de la correction</i>	<i>97</i>
4.6.2.	<i>Mesures des positions</i>	<i>98</i>
4.6.3.	<i>Résultats.....</i>	<i>100</i>
4.7.	Limites de la compensation	103
5.	CONCLUSION	103
III.	METHODE DE CORRECTION HORS LIGNE	105
1.	PREMIER USINAGE DU ROBOT KUKA KR360.....	107
2.	LA CORRECTION HORS-LIGNE	109
2.1.	Prémises de la correction hors ligne.....	109

2.2.	Correction en usinage robotisé.....	110
2.3.	Principe de la correction miroir.....	112
3.	PREMIERS ESSAIS DE CORRECTION HORS LIGNE	113
3.1.	Mesures et identification des déflexions.....	114
3.2.	Première méthode de correction.....	116
3.3.	Résultats.....	118
3.4.	Conclusions	120
4.	HYPOTHESES DE TRAVAIL	120
4.1.	Liées au domaine d'application : Robot.....	120
4.2.	Liées à l'application : Usinage composite	121
4.3.	Liées aux moyens et à la mise en œuvre	121
5.	METHODOLOGIE CORRECTION HORS-LIGNE	122
5.1.	Protocole.....	122
5.2.	Processus de correction intelligent et autonome.....	123
5.2.1.	<i>Synchronisation des données.....</i>	<i>123</i>
5.2.2.	<i>Identification de la déviation.....</i>	<i>124</i>
5.2.3.	<i>Lissage de la déviation.....</i>	<i>124</i>
5.2.4.	<i>Modification du programme</i>	<i>129</i>
5.3.	Validation de la méthode de correction hors ligne.....	131
5.3.1.	<i>Protocole de mesure.....</i>	<i>131</i>
5.3.2.	<i>Analyse du programme de correction.....</i>	<i>133</i>
5.3.3.	<i>Analyse de la correction</i>	<i>133</i>
5.3.4.	<i>Validation et contrôle de la correction</i>	<i>136</i>
5.3.5.	<i>Discussion.....</i>	<i>139</i>
6.	CONCLUSION	140
IV.	APPLICATION A L'USINAGE D'UN MOULE DE REFLECTEUR	141
1.	STRATEGIE D'USINAGE ET DE CORRECTION	144
1.1.	Stratégie d'usinage adaptée au robot.....	144
1.1.1.	<i>Gamme d'usinage</i>	<i>145</i>
1.1.2.	<i>Paramètres de dépinçage</i>	<i>145</i>
1.1.3.	<i>Phénomène d'inversion</i>	<i>148</i>
2.	Stratégie de correction du moule de réflecteur	148

2.1.1.	<i>Solution 1 : Correction hors ligne sur la base d'une mesure externe tous les n tours.....</i>	149
2.1.2.	<i>Solution 2 : Application de la méthode de correction hors-ligne – Mesure de la trajectoire totale.</i>	149
2.2.	Caractérisation du moyen de mesure	153
2.2.1.	<i>Procédure de mesure du critère RMS géométrique... </i>	153
2.2.2.	<i>Etude comparative – systèmes de mesure.....</i>	155
3.	METHODE DE CORRECTION HORS-LIGNE APPLIQUEE A L'USINAGE D'UN MOULE DE REFLECTEUR	156
3.1.	Usinage ébauche	156
3.2.	Usinage de demi-finition	160
3.2.1.	<i>Paramètres de lissage du signal de mesure</i>	160
3.2.2.	<i>Correction du programme de demi-finition</i>	161
3.2.3.	<i>Usinage de demi-finition corrigé.....</i>	162
3.2.4.	<i>Conclusion.....</i>	163
3.3.	Usinage de finition	164
3.3.1.	<i>Passe hors matière.....</i>	164
3.3.2.	<i>Paramètres de lissage du signal de mesure</i>	165
3.3.3.	<i>Usinage de finition – Erreur de pose corrigée.....</i>	165
3.3.4.	<i>Paramètres de lissage du signal de mesure</i>	167
3.3.5.	<i>Usinage de la finition corrigée.....</i>	167
3.3.6.	<i>Conclusion – Usinage de finition.....</i>	168
3.4.	Conclusion – Correction de la gamme d'usinage du moule de réflecteur.....	169
4.	SUIVI QUALITE PIECE	170
4.1.	Qualité dimensionnelle.....	170
4.1.1.	<i>Usinage ébauche sans correction paramétrique.....</i>	170
4.1.2.	<i>Usinage demi-finition.....</i>	171
4.1.3.	<i>Usinage demi-finition corrigée.....</i>	172
4.1.4.	<i>Usinage finition.....</i>	172
4.1.5.	<i>Usinage finition corrigée.....</i>	173
4.1.6.	<i>Conclusion.....</i>	174
4.2.	Usure des outils.....	174
4.2.1.	<i>Outil de demi-finition.....</i>	174
4.2.2.	<i>Outil de finition.....</i>	175
5.	DISCUSSION DES RESULTATS.....	177
5.1.	Comparaison bibliographie	178

5.2.	Conclusion.....	179
V.	CONCLUSION GENERALE.....	180
1.	SYNTHESE DES TRAVAUX DE RECHERCHE	180
2.	SYNTHESE GLOBALE.....	181
3.	POSITIONNEMENT DES TRAVAUX	182
4.	LIMITES DES TRAVAUX	183
5.	PERSPECTIVES	183
VI.	BIBLIOGRAPHIE	185
VII.	ANNEXES	193
	ANNEXE 1 : Fiche technique – tissu 48600	193
	ANNEXE 2 : Spécification du moule de réflecteur (items en rapport avec le travail de thèse)	194
	ANNEXE 3 : Caractéristiques de la matrice Epoxy	195
	ANNEXE 4 : Table dynamométrique.....	196
	ANNEXE 5 : Suite des expérimentations de la méthode COM (CHAPITRE 1)	197
	ANNEXE 6 : Calcul du MGD du robot.....	202
	ANNEXE 7 : Configurations robot – Correction paramétrique ...	203
	ANNEXE 8 : Programme de correction hors ligne	205
	RESUME.....	208
	ABSTRACT	210

Liste des illustrations

Figure 1-1 : Assemblage moule de réflecteur.....	33
Figure 1-2 : Moule de réflecteur - Composite Carbone / Epoxy	34
Figure 1-3 : Procédé infusion LRI - Reproduit à partir de [WAN1_09].....	34
Figure 1-4 : Processus du délaminage – [HAC_17].....	37
Figure 1-5 : Angles de coupe	37
Figure 1-6 : Usure d'un outil carbure avec un revêtement diamant – Usinage CFRP [CHE_19]	38
Figure 1-7 : Critères d'usure de l'outil [NFE_93]	39
Figure 1-8 : Evolution de l'effort de coupe dans le matériau composite Carbone/Epoxy de l'application.....	41
Figure 1-9 : Relation entre l'engagement A_E et la profondeur de passe A_P	45
Figure 1-10 : Calcul de l'engagement théorique de l'outil de finition en fonction du critère de rugosité de surface	46
Figure 1-11 : Choix outils.....	47
Figure 1-12 : Positionnement platine de mesure d'effort et éprouvette	48
Figure 1-13 : Trajectoires d'essais dans l'éprouvette- méthode COM	49
Figure 1-14 : V_{cmin} - E.A	50
Figure 1-15 : F_{zmin} - E.A.....	51
Figure 1-16 : Mesure acuité d'arête.....	52
Figure 1-17 : Comparaison des outils d'ébauche - Usure.....	53
Figure 1-18 : Etat de surface de l'ébauche.....	54
Figure 1-19 : Comparaison des outils de finition - Usure.....	55
Figure 1-20 : Etat de surface	56
Figure 1-21 : Repère platine de mesure d'effort (Kistler) - mesure d'efforts.....	56
Figure 1-22 : Mesure des efforts de coupe - Outils d'ébauche E.B.....	57
Figure 1-23 : Evolution de l'effort de coupe - Outils d'ébauche.....	58

Liste des illustrations

Figure 1-24 : Evolution de l'effort de coupe - Outils de finition	59
Figure 2-1 : Premiers robots industriels - UNIMATE (à gauche) - IRB-6 (à droite).....	66
Figure 2-2 : Nombre d'installation de robots dans le monde [IFR_20]	67
Figure 2-3 : KUKA KR360 et système de mesure.....	68
Figure 2-4 : Définition - Précision et répétabilité [OLA_11].....	69
Figure 2-5 : Phénomène de broutement sur une pièce usinée par un robot anthropomorphe - [PAN_06].....	71
Figure 2-6 : Notation de Khalil et Kleinfinger [KHA_04]	83
Figure 2-7 : Convention de Hayati – illustration plane des repères du modèle [HAY_85]	84
Figure 2-8 : Description cinématique du robot KUKA KR360 [KUK_14]	86
Figure 2-9 : Configurations : zéro géométrique (à gauche) – zéro codeur (à droite).....	86
Figure 2-10 : Méthode d'optimisation des paramètres géométriques	91
Figure 2-11 : Etude des combinaisons linéaires entre jacobiennes (Matlab).....	94
Figure 2-12 : Script Matlab – Modèle géométrique direct KUKA KR360	95
Figure 2-13 : Fonctions Scripts Matlab	96
Figure 2-14 : Principe du suivi optique.....	98
Figure 2-15 : Positionnement repère R0 – mesures C-track.....	98
Figure 2-16 : Suivi dynamique C-Track – VX Element.....	99
Figure 2-17 : Espace de travail et choix des configurations de l'étude.....	100
Figure 2-18 : Répartition des vecteurs erreur en nombre.....	101
Figure 2-19 : Erreur de pose moyenne avant et après correction paramétrique – KUKA KR360	102
Figure 3-1 : Premier test d'usinage	107
Figure 3-2 : Cinématique du robot Kuka KR360	108
Figure 3-3: Organigramme de la compensation des erreurs par reconstruction du programme FAO [CUI_12].....	110
Figure 3-4 : Chaîne de compensation des déviations du robot [BEL_14]	111
Figure 3-5 : Principe de la correction miroir [CAR_19].....	112
Figure 3-6 : Première correction hors ligne – Mesure d'effort	113
Figure 3-7 : Première correction hors ligne – Déviation de l'outil suivant l'axe Y du repère pièce	114
Figure 3-8: Première correction hors ligne - Etude force/déviation.....	115
Figure 3-9 : Etude force/déviation en Z sur un robot FANUC S420 – [BEL_14]	116

Liste des illustrations

Figure 3-10: Première correction hors ligne – schéma méthode.....	117
Figure 3-11: Première correction hors ligne - Identification des points de correction sur la trajectoire d'essai.....	117
Figure 3-12: Première correction hors-ligne - Résultat correction miroir sur Y – Ap = 8mm.....	118
Figure 3-13: Schématisation du procédé de correction hors ligne [CAR_19].....	124
Figure 3-14 : Filtrages standards du signal de mesure	125
Figure 3-15 : Filtrages adaptées sur le signal de déviation	126
Figure 3-16 : Algorithme filtrage adapté.....	128
Figure 3-17 : Etude statistique du critère RMS en fonction du nombre zones – axe Y	128
Figure 3-18 : Processus de correction hors ligne	130
Figure 3-19 : Mise en œuvre de la correction hors ligne	131
Figure 3-20 : Cordonnées X,Y et Z de la trajectoire souhaitée.....	132
Figure 3-21 : mesure des efforts de coupe sur robot – Application méthode de correction hors ligne	132
Figure 3-22 : Traitement de la mesure de l'axe Y.....	133
Figure 3-23 : Déviations avant et après correction – Axe X	134
Figure 3-24 : Déviations avant et après correction – Axe Y	135
Figure 3-25 : Déviations avant et après correction – Axe Z.....	135
Figure 3-26 : Comparaison des moyens de mesure - Après correction	137
Figure 3-27 : Mesure position de l'outil en Y avant et après correction (ATOS).....	137
Figure 4-1 : Stratégie d'usinage en spirale	144
Figure 4-2 : Configuration robot pour usinage moule de réflecteur.....	145
Figure 4-3 : Paramètres d'orientation de la fraise hémisphérique [PRA_11].....	146
Figure 4-4 : Identifier la variation de l'angle β_n – Esquisse 2D.....	146
Figure 4-5 : Inversions des axes 2 et 3 – Oscillations suivant Z.....	148
Figure 4-6 : Solution 1 – Mesure externe tous les n tour.....	149
Figure 4-7 : Solution 2 – Mesure et correction de la trajectoire totale.....	151
Figure 4-8 : Procédure d'identification du critère RMS - ATOS.....	153
Figure 4-9 : Comparaison de la CAO au réel	154
Figure 4-10 : RMS plan usiné robot - ATOS.....	155
Figure 4-11 : RMS plan usiné robot - INFINITEFOCUS.....	155
Figure 4-12 : Déviation TCP – 2 ^{ème} passe d'ébauche	157
Figure 4-13 : Déviation suivant les axes X et Y – 2 ^{ème} passe d'ébauche.....	158

Liste des illustrations

Figure 4-15 : Influence de l'orientation du vecteur outil sur sa position	159
Figure 4-14 : Défaut paramètre d7	159
Figure 4-16 : Correction appliquée par axe – Demi-finition	160
Figure 4-17 : Lissage adapté déviation axe Y – Demi-finition	161
Figure 4-18 : Correction du programme de demi-finition	161
Figure 4-19 : Déviation de l'outil – Demi-finition corrigée.....	162
Figure 4-20 : Déviation par axe – Finition hors matière.....	164
Figure 4-21 : Lissage adapté déviation axe Y – Finition hors matière	165
Figure 4-22 : Correction par axe – Finition, erreur de pose corrigée.....	166
Figure 4-23 : Lissage adapté - déviation axe Y – Finition, erreur de pose corrigée.....	167
Figure 4-24 : Déviation de l'outil – finition corrigée	168
Figure 4-25 : Mesure RMS géométrique – 2 ^{ème} passe d'ébauche.....	170
Figure 4-26 : Défauts de pose liés à l'orientation de la broche – 2 ^{ème} passe d'ébauche ($R_{A_{E2}}$)	171
Figure 4-27 : Mesure RMS géométrique – Demi-finition.....	171
Figure 4-28 : Mesure RMS géométrique – Demi-finition corrigée.....	172
Figure 4-29 : Mesure RMS géométrique - Finition	173
Figure 4-30 : Mesure RMS géométrique – Finition corrigée	173
Figure 4-32 : Mesure de l'arête de coupe après usinage – Outil demi-finition.....	175
Figure 4-31 : Mesure rayon d'arête de coupe initial – Outil demi-finition.....	175
Figure 4-33 : Mesure du rayon d'arête de coupe initial – Outil finition	176
Figure 4-34 : Mesure du rayon d'arête de coupe – Outil finition corrigée	176
Figure 4-35 : Valeur arête de coupe Mesure N°3 – Outil finition corrigée	177
Figure A4-1 : Vcmin – E.B	197
Figure A4-2 : Fzmin - E.B	198
Figure A4-3 : Vcmin - E.C	198
Figure A4-4 : Fzmin - E.C.....	199
Figure A4-5 : Vcmin - F.A	199
Figure A4-6 : Fzmin - F.A.....	200
Figure A4-7 : Vcmin - F.B	200
Figure A4-8 : Fzmin - F.B.....	201
Figure A6-1 : Script Matlab – Calcul MGD KUKA KR360.....	202
Figure A6-3 : Résultats du calcul du MGD - Matlab.....	203

Liste des illustrations

Figure A6-2 : Fonctions Matlab – Calcul matrices de passage.....	203
--	-----

Liste des Tables

Tableau 1-2 : caractéristiques outils.....	47
Tableau 1-2 : caractéristiques outils.....	47
Tableau 1-3 : Valeurs V_{cmin} et fZ_{min} identifiées pour les outils d'ébauche.....	51
Tableau 1-4 : Valeurs V_{cmin} et fZ_{min} identifiées pour les outils de finition.....	52
Tableau 1-5 : Mesure des acuités d'arêtes – outils d'ébauche.....	54
Tableau 1-6 : Mesures acuité d'arêtes - outils finition	55
Tableau 1-7 : Efforts de coupe moyen - Outils d'ébauche.....	58
Tableau 1-8 : Effort de coupe moyen - outil de finition.....	59
Tableau 1-9 : Récapitulatif informations outils.....	61
Tableau 2-1 : Raideurs identifiées d'un robot Kuka KR240 [DUM_10]	75
Tableau 2-2 : Valeurs initiales des paramètres géométriques.....	87
Tableau 2-3 : Paramètres géométriques identifiables.....	94
Tableau 2-4 : Simulation de la convergence de la méthode en fonction du nombre de positions	97
Tableau 2-5 : Valeurs corrigées des paramètres géométriques	101
Tableau 3.1: vecteurs de correction – valeurs en mm	118
Tableau 3.2: Gain Correction miroir (%).....	119
Tableau 3.3 : Déviations mesurées – C-track.....	134
Tableau 3.4 : Mesure position initiale de l'outil en Y et Z – Comparaison des moyens de mesures	138
Tableau 4.1 : Paramètres de coupe(cf :chapitre1) – Usinage moule	152
Tableau 4.2 : Amélioration de la précision d'usinage – Demi-finition	163
Tableau 4.3 : Amélioration de la précision d'usinage - Finition	169
Tableau 4.4 : Amélioration des critères de qualité de l'usinage du moule.....	174

Liste des acronymes

COM	Méthode Couple Outil Matière
RFI	Procédé d'infusion de film de résine (Resin Film Infusion)
LRI	Procédé d'infusion de résine liquide (Liquid Resin Infusion)
FRP	Polymère renforcé de fibres (Fibre-Reinforced Plastic)
CFRP	Polymère renforcé de fibres de carbone (Carbon Fibre-Reinforced Plastic)
PCD	Outil en Diamant polycristallin (Polycristallin Diamant)
TD	Matrices ou matériaux Thermo-Durcisables
TP	Matrices ou matériaux Thermo-Plastiques
T _G	Température de Transition vitreuse de la résine
RMS	Dispersion quadratique (Root Mean Square)
RMS géométrique	Dispersion quadratique de précision de forme
E.A / E.B / E.C	Outils d'ébauche de l'étude COM
F.A / F.B	Outils de finition de l'étude COM
FSW	Friction Stir Welding – Soudage par friction malaxage
PHL	Programmation Hors Ligne
TCP	Point du centre de l'outil programmé (Tool Center Point)
MMT	Machine à Mesure Tridimensionnelle
RSI	Interface des capteurs du robot (Robot Sensor Interface)
FAO	Fabrication Assistée par Ordinateur
CFAO	Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur
MGD	Modèle Géométrique Direct
D-H	Denavit et Hartenberg
TCS	Traveling Coordinate System
DDL	Degrés De Liberté
CN	Commande Numérique

Liste des acronymes

CNC Machine-outil à Commande Numérique

ISF Incremental Sheet Forming

G1 Interpolation linéaire entre deux points de commande

Filtre RI Filtre à réponse impulsionnelle

Liste des symboles

E	Module d'Young
G	Module de cisaillement
ν	Coefficient de Poisson
α	Angle de coupe
β	Angle de taillant
δ	Angle de dépouille
S_a	Rugosité moyenne surfacique
R_a	Rugosité moyenne arithmétique
R_z	Rugosité maximale
R_t	Rugosité théorique
K_B	Largeur du cratère
K_M	Distance du centre du cratère
K_T	Profondeur du cratère
θ	Orientation des fibres par rapport à la direction d'avance de l'outil
V_f	Vitesse d'avance
V_c	Vitesse de coupe
f_z	Avance par dent
A_E	Engagement de l'outil
A_P	Profondeur de passe de l'outil
$V_{C_{min}}$	Vitesse de coupe optimale
$f_{z_{min}}$	Avance par dent optimale
F_R	Effort résultant
W_C	Energie spécifique de coupe
$r_{\text{ébauche}}$	Critère état de surface en ébauche
$r_{\text{ finition}}$	Critère état de surface en finition

Liste des symboles

K_x	Matrice de rigidité
ω	Vecteur des efforts et moments exercés au TCP
δd	Vecteur des déplacements linéaires et angulaires du TCP
\mathbf{T}_x	Matrices homogènes de translation suivant x
\mathbf{R}_x	Matrices homogènes de rotation autour de x
R_j	Repère de l'articulation j du robot
\mathbf{O}_j	Origine du repère R_j
\mathbf{X}_j	Axes X du repère R_j
\mathbf{Y}_j	Axes Y du repère R_j
\mathbf{Z}_j	Axes Z du repère R_j
${}^{j-1}\mathbf{T}_j$	Matrice de transformation du repère j-1 au repère j
$\alpha_j, \theta_j, d_j, r_i$	Paramètres de D-H
$\text{Trans}(\mathbf{X}_{j-1}, d_j)$	Matrices homogènes de translation d'une distance d_j le long de l'axe \mathbf{X}_{j-1}
$\text{Rot}(\mathbf{X}_{j-1}, \alpha_j)$	Matrices homogènes de rotation d'un angle α_j autour de l'axe \mathbf{X}_{j-1}
$C\theta$	$\text{Cos}(\theta)$
$S\theta$	$\text{Sin}(\theta)$.
β_i	Paramètre de Hayati
\mathbf{q}_j	Vecteur des paramètres articulaires de l'articulation j
Δr	Vecteur d'erreur de pose
$r_{\text{réel}}$	Valeur de pose mesurée
r_{nom}	Valeur de pose théorique de départ
$\Delta\alpha_j, \Delta\theta_j, \Delta d_j, \Delta r_i, \Delta\beta_i$	Variations du premier ordre
$\frac{\delta f}{\delta\alpha}, \frac{\delta f}{\delta r}, \dots$	Jacobienne partielle évaluée dans les conditions nominales
$\Delta\boldsymbol{\varphi}$	Vecteur erreur des paramètres géométriques
Φ	Jacobienne des paramètres
$\Delta\bar{r}$	Vecteur erreur des poses du robot
$\bar{\Phi}$	Matrice d'observation (ou de régression)
$\boldsymbol{\varphi}'$	Vecteur des paramètres corrigés
$\bar{\Phi}'$	Matrice d'observation évaluée avec les paramètres corrigés $\boldsymbol{\varphi}'$

Liste des symboles

J	Matrice jacobienne
X	Coordonnées opérationnelles
V_n	Vecteur de vitesse de translation
ω_n	Vecteur de vitesse de rotation
\dot{q}	Vitesses articulaires
x	Produit vectoriel
J_n	Colonne du paramètre n de la matrice jacobienne
J_n	Colonne du paramètre n de la matrice jacobienne (symbolique)
$\ \overrightarrow{Pt_{th}} \cdot \overrightarrow{Pt_{mes}}\ $	Norme du vecteur de l'erreur moyenne
ET_{av}	Ecart type de l'erreur moyenne (avant correction paramétrique)
ET_{ap}	Ecart type de l'erreur moyenne (après correction paramétrique)
$Pt_{mesuré}$	Position mesurée de l'outil
$Pt_{théo}$	Position commandée de l'outil
\vec{D}	Vecteur des déviations
$\vec{\varepsilon}$	Vecteur d'erreur
$\vec{\varepsilon}^*$	Vecteur de correction
k	Coefficient de proportionnalité
$Y_{déviation}$	Valeur de la déviation portée par l'axe Y
X_{effort}	Valeur de l'effort porté par l'axe X
T	Valeur du temps lors de la mesure
t_{cn}	Période d'échantillonnage de la CN
t_m	Période d'échantillonnage du C-Track
σ	Ecart type de la précision de mesure du C-Track
IC^{99}	Intervalle de confiance d'une loi normale à 99%
MES_p	Tableau des positions mesurées de l'outil
CAM_p	Tableau des position souhaitées de l'outil
Δ_{moy}	Déviations moyennes
Δ_{res}	Déviations moyennes après correction
ε_{ini}	Ecart initial déterminés par C-Track

Liste des symboles

ε_{atos}	Ecart finaux déterminés par ATOS
G_{YZ}	Gain de la correction dans le plan Y-Z
$\beta_{résultant}$	Dépinçage de l'outil de finition
β_f	Dépinçage dans le plan d'avance
β_n	Dépinçage dans le plan perpendiculaire à l'avance
L_{Utile}	Longueur usinée et non recouvert en finition
RMS_{E2}	RMS déterminé après le deuxième usinage d'ébauche
$R_{A,E2}$	R_a mesurée après le deuxième usinage d'ébauche
RMS_{DF}	RMS déterminé après l'usinage de demi-finition
$R_{A,DF}$	R_a mesurée après l'usinage de demi-finition
RMS_{DFC}	RMS déterminé après l'usinage de demi-finition corrigé
$R_{A,DFC}$	R_a mesurée après l'usinage de demi-finition corrigé
RMS_F	RMS déterminé après l'usinage de finition
$R_{A,F}$	R_a mesurée après l'usinage de finition
RMS_{FC}	RMS déterminé après l'usinage de finition corrigé
$R_{A,FC}$	R_a mesurée après l'usinage de finition corrigé

Introduction

L'utilisation des composites à matrice polymère et renforts fibreux est longtemps restée cantonnée, dans l'industrie, à des produits semi-structurels ou d'habillage. Or, les progrès technologiques de ces matériaux mènent à une augmentation considérable de leur utilisation dans des applications de structures toutes industries confondues. La capacité des matériaux composites à supporter des sollicitations en service de plus en plus fortes et dans des environnements de plus en plus exigeants les rendent aptes à de nombreuses certifications et notamment dans l'industrie aérospatiale où les phénomènes thermiques sont extrêmement sollicitants pour les structures.

La réalisation de ses structures composites fait souvent appel à des opérations d'usinage qui sont dans la plupart des cas sources d'endommagements du matériau (arrachement de fibres en surface, dégradation thermique de la résine, délaminage...). La nature anisotrope du matériau composite induit l'usinage de deux matériaux en simultané, la matrice et le renfort qui possèdent des caractéristiques et des degrés d'usinabilité différents. Cette hétérogénéité du matériau engendre une variation des efforts de coupe et une usure prématurée de l'outil par abrasion. De plus, la chaleur générée localement par la coupe se dissipant très mal dans le matériau peut entraîner des déformations et des dégradations thermiques en surface. C'est pourquoi, l'usinage des composites doit passer par une étude approfondie des paramètres de l'outil et des conditions de coupe. Depuis toujours, les méthodes d'optimisation de l'usinage se basent sur les connaissances acquises dans le temps et sur des essais expérimentaux. Avant de définir la nature des essais à mettre en place pour déterminer ces paramètres, il est nécessaire de prendre connaissance des différents modes d'endommagement et de comprendre tous les facteurs qui conduisent à l'usure de l'outil.

L'entreprise Lauak Innovative Solution, spécialisée dans le développement des procédés de mise en forme des matériaux composites désire, dans le cadre de cette étude, explorer la possibilité d'usiner des pièces en composites Carbone/Epoxy à l'aide d'une cellule robotisée. L'application visée est le surfacage de moules de réflecteurs satellites de haute précision. La spécification relative à cette production impose une précision d'usinage élevée.

Les robots industriels sont des moyens flexibles et capables de s'adapter à beaucoup de procédés de fabrication, cela concerne des pièces de petites ou de grandes dimensions et des géométries différentes. Très utilisés dans l'industrie automobile depuis les années 70, leur intégration est relativement simplifiée en l'absence de génie industriel important, comme les chappes techniques ou renforcées nécessaires pour des machines-outils de grandes dimensions, et un coût d'investissement faible en comparaison avec une machine-outil. Devant l'accessibilité et la facilité de configuration ainsi que leur faible coût, les robots deviennent rapidement un matériel essentiel pour répondre à une demande d'agilité exprimée par l'industrie.

Introduction

Les robots présentent peu de précision de positionnement absolue. C'est pourquoi ils sont conçus pour des tâches peu précises, répétitives et dangereuses comme l'assemblage, la manutention, l'emballage, etc. Devant ces objectifs d'application, les constructeurs de robots se sont investis à développer des machines rapides, robustes et simplement programmables avec des commandes adaptées à cette flexibilité. Les efforts de recherche se sont focalisés sur la réalisation de gammes de robots nécessitant une bonne répétabilité de pose. Cette répétabilité est de l'ordre de quelques centièmes de millimètre, pour des petits robots, à quelques dixièmes de millimètre, pour les plus gros. Les robots présentent également des grands rayons d'action allant de deux à trois mètres.

La variation accrue des changements de production en réponse aux développements de procédés personnalisés par produits, amène les industriels à explorer des nouvelles solutions robotisées pour des applications plus complexes et plus exigeantes en termes de trajectoire et de précision absolue comme la mesure ou l'usinage. L'adaptation de cellules robotisées destinées à l'usinage 5 axes continu représente un besoin croissant de l'industrie manufacturière.

A ce jour, de nombreuses installations d'usinage robotisé ont été développées sur la base de robots standards 6 axes avec des électrobroches d'usinage comme effecteurs. Mais leur faible rigidité et exactitude en comparaison avec celles des machines-outils limitent ses applications d'usinage à des matériaux tendres ou à des applications peu exigeantes en termes de tolérances d'usinage. La problématique de faible rigidité d'un robot industriel tient en grande partie de sa structure sérielle. En comparaison avec une machine-outil qui possède des liaisons prismatiques, relativement rigides pour effectuer ses déplacements (entre quatre et cinq liaisons prismatiques), un robot sériel possède souvent six liaisons rotoïdes qui présentent de grandes souplesses.

Le verrou scientifique principal, pour atteindre le niveau de précision requis par le processus d'usinage étudié ici, est l'amélioration des performances du robot en statique et en mouvement. Pour cela, il est nécessaire d'identifier les contraintes externes au robot et de caractériser sa réponse avant de proposer des techniques d'optimisation et de correction de la trajectoire.

1. Sujet de recherche

Ces travaux sont dédiés à l'amélioration de la précision d'usinage des robots industriels dans le cadre de la réalisation de pièces en matériau composite. Ce sujet lève deux problématiques majeures à savoir : l'optimisation de l'usinage des matériaux composites et l'amélioration de la précision d'usinage des robots industriels. Ces travaux sont donc orientés suivants ces deux axes de recherche. L'objectif principal est de répondre aux critères spécifiques à l'application d'usinage des moules de réflecteur. Deux critères sont à respecter pour remplir les exigences de la spécification du produit :

- Un critère de respect de forme caractérisé par un RMS géométrique inférieur à 0.05mm.
- Un critère de rugosité surface inférieur à 0.4 μ m.

Introduction

Ce dernier critère de rugosité est attendu après des opérations manuelles de ponçage et de lustrage qui ne sont pas abordées dans cette étude. Il sera cependant évalué au fur et à mesure de la présente étude pour identifier d'éventuels phénomènes vibratoires néfastes.

2. Positionnement des travaux

L'objectif de cette recherche est de développer une méthodologie de prise en compte et de correction des déviations du robot lors d'une opération d'usinage. Pour se faire, une dissociation est faite entre la précision de positionnement du robot en statique et sa déviation en présence de sollicitations externes en mouvement.

Une des hypothèses de départ de cette étude est de penser que la précision de positionnement d'un robot industriel (gros porteur) dépend en partie des contraintes externes appliquées à l'outil pendant le processus de coupe. L'objectif de l'étude de l'usinabilité des composites, en dehors de l'optimisation consacrée à l'outil et à la surface usinée, est donc de minimiser les efforts de coupe afin d'exercer des sollicitations minimales sur l'effecteur du robot et de limiter ainsi ses déviations.

Différents objectifs intermédiaires jalonnent les travaux de recherche envisagés. La résolution de ces objectifs permettra d'améliorer la précision de positionnement et celle du suivi de trajectoire d'un robot afin de maîtriser la qualité dimensionnelle, géométrique et l'état de surface des pièces usinées :

1. Etudier l'usinabilité du matériau composite dédié et mesurer les efforts de coupe pour déterminer les paramètres optimaux de l'outil et du processus de coupe.
2. Améliorer le comportement en statique du moyen usinant en adaptant la partie commande sans remettre en cause la structure mécanique ou du choix des composants constitutifs du robot.
3. Définir une stratégie d'usinage performante pour la réalisation des pièces composites visées par l'application.
4. Proposer une technique de compensation des déviations de l'outil observées au contact de la matière par la mesure des déviations de l'effecteur au cours d'un usinage martyr, le traitement et la correction du programme de commande hors-ligne.
5. Valider les techniques de correction mises en place par l'expérimentation de la méthode de correction et les critères de qualité atteints aux exigences de l'application.

Ces objectifs seront traités par le biais de plusieurs études successives : une étude de l'interaction outil/matière, une correction paramétrique appliquée au robot de l'étude et une correction hors ligne du programme de commande.

3. Organisation du manuscrit

Les travaux de cette recherche répondent aux objectifs principaux et intermédiaires selon l'organisation suivante.

Le chapitre 1 est consacré à l'étude de l'usinage du matériau composite. Il expose les particularités des matériaux composites avant de présenter les caractéristiques du matériau de l'application visée. Il présente ensuite les éléments nécessaires à la compréhension des mécanismes d'endommagement et de dégradation de surface, comme le procédé de mise en forme et les connaissances acquises sur l'usinage des composites. La recherche des outils et de leurs conditions de coupe est également détaillée. Pour cela, la méthode COM est utilisée. Elle a notamment fait l'objet de travaux aboutis dans le domaine de l'usinage. Les conclusions seront données à partir de configurations d'usinage simples qui ont l'avantage de mettre en évidence un nombre réduit de paramètres intervenant dans l'usinage du matériau.

Une étude dédiée à l'amélioration de la précision absolue du robot est faite dans le chapitre 2. Ce chapitre présente dans un premier temps, une bibliographie qui aborde les rappels de base sur la modélisation géométrique des robots. Une optimisation des paramètres géométriques du robot est ensuite développée. Elle s'appuie sur une méthode d'identification paramétrique adaptée et contribue à réduire l'erreur de pose absolue du robot utilisé.

A partir des conclusions des deux chapitres précédents, le chapitre 3 présente un état de l'art sur la correction de suivi de trajectoire des robots industriels. Il s'attache ensuite à développer une méthode de correction hors-ligne adaptée au contexte de l'étude. Elle est basée sur la mesure de la trajectoire d'un premier usinage et le prétraitement hors ligne d'un programme de correction adapté aux déviations mesurées. Des premières expérimentations, sont présentées dans le but de déterminer les bénéfices de cette méthode de correction.

Le chapitre 4 présente l'expérimentation de la méthode de correction pour l'appliquer à l'usinage d'un moule de réflecteur. La stratégie d'usinage dédiée à l'application spécifiée par Lauak Innovative Solutions sera exposée ainsi que la gamme d'usinage adaptée au processus de correction. Ensuite, toutes les opérations d'usinage mesurées sont présentées et analysées. Les étapes de contrôles sont finalement exposées pour observer l'évolution des qualités dimensionnelles et d'état de surfaces de la pièce tout au long de la gamme d'usinage du produit.

Le dernier chapitre fait la synthèse des conclusions et résultats. Il propose une réponse aux objectifs énoncés ici avant de revenir sur les limites de cette recherche. Enfin, il aborde différents axes de recherche à développer pour donner suite à ces travaux.

I. Usinage des matériaux composites

1.	PRESENTATION DU MATERIAU DE L'APPLICATION DE L'ETUDE	30
1.1.	Les éléments constitutifs du matériau composite	30
1.1.1.	<i>Les catégories de composites.....</i>	<i>30</i>
1.1.1.1.	Le renfort	31
1.1.1.2.	La matrice	31
1.1.1.3.	L'interface renfort / matrice	31
1.1.2.	<i>Matériau de l'application.....</i>	<i>32</i>
1.1.2.1.	Matériau du moule de réflecteur	32
1.1.2.2.	Caractéristiques mécaniques	32
1.2.	Mise en œuvre de la peau du moule en composite.....	32
2.	MAITRISE DU PROCESSUS DE COUPE	35
2.1.	Usure de l'outil.....	35
2.1.1.	<i>Matériau de l'outil.....</i>	<i>36</i>
2.1.2.	<i>Géométrie de l'outil.....</i>	<i>36</i>
2.1.3.	<i>Modes de dégradation de l'outil.....</i>	<i>38</i>
2.1.4.	<i>Paramètres influents sur l'usinage.....</i>	<i>39</i>
2.1.4.1.	Orientation des fibres.....	39
2.2.	Influence de l'effort de coupe.....	40
2.3.	Etat de surface	42
2.4.	Endommagement.....	43
3.	SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	43
4.	APPLICATION D'UNE METHODE COM.....	44
4.1.	Définition du contexte.....	45
4.1.1.	<i>Gamme d'usinage.....</i>	<i>45</i>
4.1.2.	<i>Calcul de l'engagement de l'outil théorique.....</i>	<i>45</i>
4.1.3.	<i>Choix des outils.....</i>	<i>47</i>
4.1.4.	<i>COM Fraisage – Méthode expérimentale.....</i>	<i>48</i>
4.2.	Conditions de coupe optimales	49

Usinage des matériaux composites

4.1.1. <i>Ebauche</i>	50
4.1.2. <i>Finition</i>	51
4.3. Durée de vie des outils.....	52
4.3.1. <i>Outils d'ébauche</i>	53
4.3.2. <i>Outils de finition</i>	55
4.4. Analyses des efforts de coupe.....	57
4.4.1. <i>Etude des relevés d'effort en Ebauche</i>	57
4.4.2. <i>Etude des relevés d'effort en Finition</i>	59
4.5. Confrontation bibliographie.....	60
5. CONCLUSION	62

Usinage des matériaux composites

Les matériaux composites sont de nos jours des produits montants dans les domaines du luxe et de l'industrie. Le terme « Composite » désigne un matériau réalisé d'un assemblage d'au moins deux composants non-miscibles. Il évoque généralement l'assemblage d'un renfort et d'une résine. Ces matériaux se présentent comme la réponse idéale à la réalisation de produits caractérisés par de fortes propriétés mécaniques en rapport avec leur masse.

Dans le contexte d'usinage robotisé d'un matériau composite Carbone/Epoxy, il est important de présenter les particularités de ce matériau liées à sa nature et à son procédé de fabrication.

Ce matériau fait l'objet d'un grand nombre d'études scientifiques liées à son usinabilité. La méconnaissance des contraintes liées à la coupe est un verrou à l'identification de méthodes d'optimisation de la cellule robotisée. De plus, la complexité de ce multi-matériau rend l'optimisation du processus de coupe longue et unique pour chaque cas d'application. Pour cette raison, le premier chapitre de ces travaux s'attache à étudier l'usinabilité du matériau de l'application pour maîtriser le processus de coupe dans ce contexte.

Ce chapitre aborde premièrement un état de l'art sur l'usinabilité des matériaux composites avant de présenter le matériau de l'étude. Une étude couple outil/matière est réalisée et développée en suivant. Elle permet de sélectionner les outils et les paramètres de coupe optimums pour chaque phase d'usinage de la pièce d'application afin de garantir la meilleure qualité de surface possible. L'application de cette méthode donne également des informations sur les efforts de coupe et l'usure de l'outil. Ces dernières données permettront d'interpréter, par la suite, les déviations mesurées du robot lors de l'usinage.

1. Présentation du matériau de l'application de l'étude

Contrairement aux matériaux macroscopiquement homogènes, le composite est anisotrope. C'est-à-dire que les caractéristiques mécaniques varient selon la direction considérée. Il est généralement constitué d'un arrangement de fibres, courtes ou longues, d'un matériau résistant associé à une matrice. Les caractéristiques mécaniques d'un composite sont issues des renforts et la matrice en est le liant. Elle permet le maintien de la géométrie du renfort et le transfert des sollicitations mécaniques entre ces renforts[GAY_89].

La fonction principale du composite est de réaliser une pièce avec un design optimum pour répondre aux sollicitations subies par la pièce tout en minimisant sa masse. Le caractère non-homogène de ce matériau permet de positionner le renfort dans le sens de la sollicitation et d'optimiser la fonctionnalité de la pièce afin de réduire considérablement le rapport poids/résistance mécanique. De nombreux domaines industriels s'investissent dans son utilisation, comme l'automobile ou l'aéronautique. De plus, l'absence de corrosion et la bonne tenue en fatigue permettent un allègement de la maintenance des pièces.

Il existe une multitude de procédés de mise en forme des matériaux composites. La plupart du temps ces procédés visent à assurer en totalité les dimensions de la pièce finie. Toutefois, il arrive qu'une étape de finition par usinage complète la gamme de fabrication. Il s'agit d'usinage ou de procédés particuliers comme le jet d'eau haute pression ou la découpe laser.

LAUAK innovative solutions produit des moules de réflecteurs pour le domaine du spatial. Le procédé de fabrication est donc verrouillé et ne peut être modifié. Le matériau est imposé et la présente étude n'aura pas d'incidence sur les caractéristiques de ce matériau ou la mise en forme du moule de réflecteur. Toutefois, il est important de décrire le matériau, de détailler sa mise en forme et d'expliquer l'assemblage du moule pour comprendre les différents phénomènes mécaniques liées à l'usinage de cette pièce.

1.1. Les éléments constitutifs du matériau composite

Les caractéristiques mécaniques du matériau composite résident de l'ensemble de ses composants : la fibre (ou renfort), la résine (ou matrice) et la zone de contact entre ces deux derniers appelée « interface » (ou « le troisième corps »).

1.1.1. Les catégories de composites

Les composites se déclinent en trois catégories : Les composites monocouches, les stratifiées et enfin les structures sandwich.

Le type de monocouche est défini par son renfort à fibre longues, courtes ou tissées. Le matériau monocouche à fibres longues (ou pli unidirectionnel), possède l'ensemble de ces fibres orientées dans le même sens, cela lui confère une grande raideur dans cette direction. Les monocouches tissées sont des fibres disposées perpendiculairement, appelés chaîne et trame. Les fibres sont liées entre elles par le tissage, les plus communs sont : le taffetas, le satin et le sergé.

1.1.1.1. Le renfort

Le renfort confère au composite sa résistance mécanique. Généralement présenté sous forme de fibres longues, elles sont généralement disposées dans le sens des sollicitations. Les renforts répondent à plusieurs critères : une compatibilité physico-chimique élevée avec la matrice, une raideur et une résistance à la rupture élevée.

Les Fibres de carbone présentent des caractéristiques mécaniques élevées et une bonne tenue en température (autour de 1500°) pour une faible masse volumique. Très utilisées sur des structures fortement sollicitées, elles sont coûteuses en raison d'un process d'élaboration long et onéreux (énergie de chauffe) [GAY-89].

Plusieurs types de fibres existent est dépendent du procédé d'élaboration. La fibre obtenue après une élaboration standards est appelée « fibre haute résistance » ou « fibre haute ténacité ». Elle possède une bonne résistance à la rupture et un module d'Young moyen de 200GPa. Une graphitisation à 2600°C sous gaz inerte augmente la teneur en carbone de la fibre, elle améliore sa rigidité mais crée des défauts qui diminuent sa résistance à la rupture. Appelée à ce stade « fibre à haut module » ou « fibre à très haut module », elle est alors caractérisée par un module d'Young de l'ordre de 600GPa.

1.1.1.2. La matrice

La résine (ou matrice) permet de maintenir l'arrangement géométrique des fibres. Elle transmet les efforts entre les fibres, elle améliore les propriétés de cisaillement et confère au matériau une résistance à la propagation des fissures. Elle est caractérisée par une résistance élastique élevée, une forte compatibilité avec les fibres et une masse volumique faible. Il existe deux types de résines, les thermodurcissables comme dans l'application étudiée ici et les thermoplastiques.

Une résine thermodurcissable (TD) est obtenue à partir d'un polymère et d'un réactif, un catalyseur ou un durcisseur, qui réagissent sous l'action de la chaleur. Ce processus porte le nom de polymérisation. La polymérisation d'une résine thermodurcissable étant irréversible, elle ne peut être mise en forme qu'une seule fois. Elle possède des caractéristiques mécaniques élevées, une faible résilience et une faible tenue en température.

1.1.1.3. L'interface renfort / matrice

L'interface entre le renfort et la matrice confère des propriétés différentes de celles observées pour chacun des deux matériaux, c'est elle qui constitue leur adhésion mutuelle. Cette adhérence doit être optimale car elle a pour rôle de limiter l'endommagement du matériau et de transmettre les charges d'une fibre à l'autre pour garantir un comportement équilibré et stable tout en conservant la géométrie de l'ensemble. Un composite TD est peu résilient, l'adhésion de l'interface trouve son importance pour limiter la propagation des fissures dans le matériau.

1.1.2. Matériau de l'application

1.1.2.1. Matériau du moule de réflecteur

Le composite étudié ici est un assemblage par superposition de plusieurs monocouches. Ainsi appelé « stratifié », il est défini par un repère commun à tous les plis de tissus et chacun des plis est caractérisé par le sens long de ses fibres. Les orientations sont spécifiques à l'empilement et fonction des caractéristiques mécaniques souhaitées du produit final. Les plus généralement utilisées sont : 0° , $+45^\circ$, $+90^\circ$ et -45° .

Ici, le matériau est dit « équilibré » car il possède un même nombre de couche pour chaque orientation. Il est composé d'un renfort carbone haute performance nommé "48600 U 1250" dont la fiche technique est présentée en *ANNEXE 1*. Ce tissu sergé en fibre de carbone (50% chaîne, 50% trame) a un poids nominal de 600 g/m² et une épaisseur de 0,62mm.

La résine et le durcisseur du matériau de l'application sont respectivement la "HTG 240" et le "HTG 245". Ce système époxy est dédié à la réalisation de pièces composites structurales avec des TG exigeantes jusqu'à 240 °C. La résine Epoxy possède un groupement époxy dans sa formulation [AUA_07], ce groupement très réactif participe à l'ensemble des propriétés de la résine comme le temps de gel ou la réticulation. Les principaux avantages sont :

- Des températures d'utilisation hautes allant de 180°C à 250°C.
- Une bonne stabilité dimensionnelle et thermique avec un allongement à la rupture inférieur à 6%.
- Un faible retrait pendant la cuisson de 1 à 5%.

Le coût élevé de ce système époxy reste un inconvénient auquel s'ajoute un coût de mise en forme avec un temps de polymérisation long.

1.1.2.2. Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques du matériau mis en forme sont déterminées à travers la caractérisation d'une éprouvette de suivi pour chaque moule. Les caractéristiques moyennes déterminées sur un lot de 3 moules sont :

- Un module d'Young de $E = 67\,900$ MPa
- Un module de cisaillement de $G = 6\,240$ MPa
- Un coefficient de Poisson de $\nu = 0,3$

Ce matériau à hautes propriétés se caractérise par une résistance à la traction de 750 MPa. Il est peu sensible au phénomène de fatigue mécanique et possède une faible expansion thermique. Son principal inconvénient en dehors de son coût est sa faible résistance au choc.

1.2. Mise en œuvre de la peau du moule en composite

Le moule est un assemblage de plusieurs pièces collées entre elles. La *figure 1-1* présente les différents éléments de cet assemblage. Il se compose d'une peau supérieure, d'un assemblage de raidisseurs et d'une peau inférieure. Il a été développé pour garantir un maximum de raideur au moule tout en limitant son poids (*figure 1-2*). Entièrement en composite, le moule présente un

Usinage des matériaux composites

faible coefficient de dilatation thermique. La valeur de ce coefficient pour la peau supérieure est : $6.10^{-6}K^{-1}$ dans les sens long et large et $3,4.10^{-5} K^{-1}$ dans le sens de l'épaisseur.

Ce n'est qu'après la dernière étape de fabrication, le durcissement de la matière, que le couple renfort/matrice devient un matériau composite. Les caractéristiques mécaniques du composite sont fortement liées aux conditions du processus de polymérisation (ou de réticulation) de la résine. Pendant le processus de polymérisation, les chaînes monomères de la résine thermodurcissable se lient entre elles pour former un réseau tridimensionnel solide autour des fibres. La polymérisation étant une réaction exothermique, il est possible de suivre le degré de cuisson par calorimétrie.

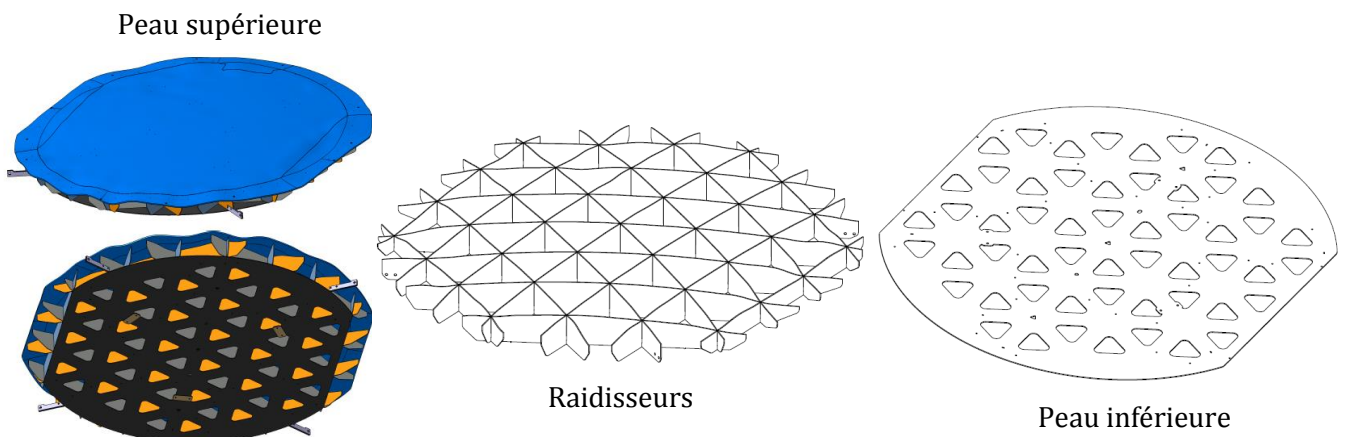


Figure 1-1 : Assemblage moule de réflecteur

Il existe deux catégories de procédés de mise en œuvre des matériaux composites :

- Les procédés par voie humide

Par exemple, le tissu pré imprégné où la résine est mélangée aux fibres dans un état de polymérisation partiel que l'on appelle B-stage.

- Les procédés par voie sèche

La résine vient migrer dans le drapage des fibres au cours du procédé. Il en existe deux types :

- L'infusion, où l'écoulement de la résine se fait par infiltration dans les fibres.
- L'injection, où l'écoulement de la résine se fait sous pression.



Figure 1-2 : Moule de réflecteur - Composite Carbone / Epoxy

Le procédé d'infusion consiste à faire infuser la résine dans une préforme de fibres sèches. Deux variantes existent : infusion RFI (Resin film infusion) et infusion LRI (Liquid resin infusion).

Pour l'infusion RFI, un film de résine à B-Stage solide est déposé sur un moule avant d'y superposer une préforme. Lors de la montée en température, la résine initialement solide s'écoule dans la préforme, une pression entre le moule et la préforme chasse l'excès de résine et la polymérisation consolide la pièce.

L'infusion LRI, procédé de l'application des moules de réflecteurs, permet de réaliser des pièces à géométries complexes avec des taux volumiques de fibres élevées et une mise en œuvre relativement aisée et peu coûteuse [WAN1_09]. Contrairement à l'infusion RFI, la préforme est déposée directement sur le moule et un tissu drainant (*figure 1-3*) conduit la résine à l'état liquide pour infuser la préforme dans le sens de son épaisseur à l'aide de la pression exercée par le vide entre la bâche et le moule. L'inconvénient majeur de ce procédé est le mauvais contrôle de l'épaisseur de la pièce finale car la bâche n'exerce pas une pression uniforme sur la préforme au cours de l'infusion et cette pression fluctue localement en fonction de la viscosité de la résine. Dans certains cas, un contre moule perforé est disposé sur le tissu drainant pour limiter ses variations d'épaisseurs.

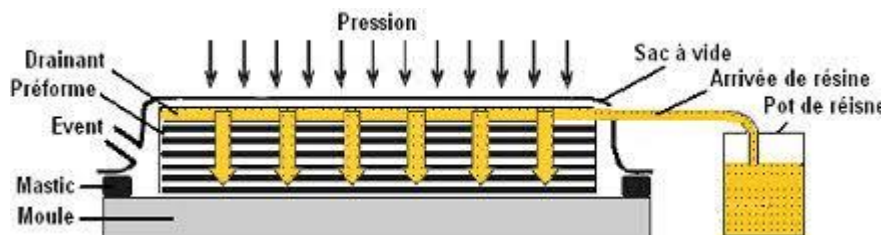


Figure 1-3 : Procédé infusion LRI - Reproduit à partir de [WAN1_09]

Une spécification fournit le plan de drapage des plis de tissus secs sur un moule appelé « Master ». Cette opération manuelle s'accompagne du positionnement du matériel spécifique pour drainer l'air et la résine au court de l'infusion (tissu drainant, tissu d'arrachage, gaine, tissu frein...). Une bâche à vide est disposée en guise de contre-moule sur l'ensemble afin de réaliser l'aspiration de la résine. La mise sous vide du drapage et la montée en température abaissent la viscosité de la résine, elle migre entre les plis du stratifié avant une solidification au cours de la

polymérisation. Un mauvais contrôle de ces paramètres peut entraîner des variations locales d'épaisseur de quelques dixièmes de millimètres et peut engendrer dans certains cas de la porosité (bulles d'air dans le matériau). Après l'infusion de la matrice dans le renfort, la pièce subit un cycle de cuisson dans une étuve. Il s'agit d'une polymérisation à 40°C pendant 12h et d'un cycle de chauffe étagé pour atteindre un taux de réticulation proche de 100%. Ce cycle permet de s'approcher au maximum des caractéristiques mécaniques annoncés par la fiche technique.

2. Maitrise du processus de coupe

Lors de l'usinage d'une pièce composite, les efforts de coupe appliqués à l'outil sont variables car les caractéristiques mécaniques et thermiques des éléments constitutifs du matériau sont différentes. La structure non homogène des composites implique que l'outil alterne constamment entre un matériau dur et abrasif (la fibre) et un matériau tendre (la résine). Ce phénomène est une des principales causes de l'usure rapide des outils coupants [ILI_08].

Maitriser le processus de coupe tout au long de l'usinage du moule revient à assurer une qualité qui s'exprime par deux critères inscrits dans la spécification du produit (*ANNEXE 2*) :

- La rugosité de surface de la pièce finie est fixée à un maximum de $R_A = 0,4\mu\text{m}$. Cela correspond à une rugosité de $R_A = 1.6\mu\text{m}$ en sortie d'usinage. Cette valeur est déterminée par la mesure de la surface du moule de réflecteur avant les opérations manuelles de ponçage qui confèrent la qualité de surface désirée de l'application.
- Le respect dimensionnel de la forme du moule caractérisé par un RMS (Root Mean Square) géométrique fixé à un maximum de $50\mu\text{m}$.

Cette section permet d'apporter les éléments nécessaires au respect du critère de rugosité de surface. Pour cela, les problématiques liées au choix des conditions de coupe et de l'outil sont abordées. Les causes des phénomènes d'usure et d'endommagement qui influent sur la durée de vie de l'outil et la qualité de surface de la pièce sont également analysées. Un parallèle sera constamment réalisé avec le contexte de notre étude afin de justifier les choix et les méthodes à mettre en place pour atteindre ces critères.

Une synthèse apportera les conclusions de cette bibliographie appliquées à notre étude. Les différents choix d'outils et de paramètres du processus de coupe seront également exposés.

2.1. Usure de l'outil

L'usure de l'outil dépend de nombreux facteurs comme, la nuance et la géométrie de l'outil ainsi que les conditions de coupe et d'engagement.

Des premières études en coupe orthogonale [KLO_99] mettent en évidence le caractère abrasif des FRP (composite polymère renforcé de fibres) et plus particulièrement des CFRP (Composite polymère renforcé de fibres de carbone). Elles concluent que le type de fibre, son positionnement dans le stratifié et la fraction volumique de la résine sont les facteurs qui influencent le choix de l'outil. L'étude [SHE_09] démontre que le matériau de l'outil doit répondre

au caractère abrasif des fibres. Elle conclue que sa géométrie et son acuité d'arête de coupe sont principalement étudiées pour favoriser le cisaillement de la fibre.

Ces différents points sont donc abordés dans cette section avec en premier lieu le matériau puis la géométrie de l'outil avant d'étudier les phénomènes de dégradations de l'outil et enfin l'influence des conditions de coupe sur la qualité de l'usinage.

2.1.1. Matériau de l'outil

La dureté de la fibre entraîne une usure rapide de l'outil par un arrondissement de l'arête de coupe. L'outil doit donc posséder un haut degré de résistance à l'abrasion et à l'écaillage comme les outils frittés en micro-grains de carbure ou les outils diamants polycristallins (PCD). Les outils en nitrure de bore cubique polycristallins (CBN) génèrent des surfaces de qualité en usinage de CFRP : absence d'arrachement de fibre par une coupe nette. Leur usure est cependant supérieure à celle observée sur des outils PCD [TET_02]. Les outils céramiques sont proscrits car ils sont trop sensibles aux chocs et pas assez rigides [GAY_89]. Certains outils en carbure de tungstène (WC) possèdent des revêtements par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) qui vont améliorer leur résistance à l'usure, parfois meilleure que certains PCD [CAB_06][CAB_08]. Une analyse similaire faite sur les dépôts diamants par CVD [ALM_08] a également démontrée que les différentes améliorations apportées aux revêtements des outils contribuent à une meilleure résistance à l'usure. Les granulométries submicroniques utilisées pour la fabrication des outils en carbure à grains fins et ultrafins et les diamants polycristallins offrent la résistance à l'abrasion requise dans cet environnement mais rendent l'outil cassant et susceptible de se fracturer.

Les outils diamants PCD et ceux pourvus d'un revêtement diamant donnent les meilleurs résultats en termes de durée de vie [TET_02]. La dureté du diamant participe fortement à la résistance de l'outil pour de tels résultats.

2.1.2. Géométrie de l'outil

En termes de géométrie, l'outil destiné à l'usinage de composite bénéficie du savoir-faire de l'industrie du bois. Les similitudes de macrostructures entre les CFRP et le bois permettent, bien souvent sans modification, d'adapter les pratiques et les outils de l'usinage du bois à celui des CFRP [LAS_10]. La fraise droite permet une coupe nette de la fibre mais une mauvaise élimination du copeau qui a tendance à coller sur la face de coupe de l'outil. Il en résulte une compression de la matière devant l'arête de coupe et un mauvais état de surface.

Dans le cas d'essais d'usinage avec un outil à denture hélicoïdale ayant un angle d'hélice compris entre 5° et 15° [TET_02], l'outil génère une composante axiale, *figure 1-4*. Cette dernière agit dans le sens de l'empilement du laminé et provoque un délaminage de la couche de surface qui n'est pas soutenue dans le sens opposé à l'effort et qui entraîne une décohésion des plis du stratifié. Pour éviter ce phénomène, l'utilisation d'une fraise à double hélice est recommandée [KAR_13]. Pour des opérations débouchantes sur des matériaux sandwich ou stratifiés, les deux hélices opposées génèrent des forces qui agissent en compression des deux côtés du stratifié, *figure 1-4*. Cette géométrie permet de compenser les efforts axiaux et de minimiser le délaminage. Lors d'un surfacage, l'effort axial n'est pas entièrement compensé mais significativement réduit.

Usinage des matériaux composites

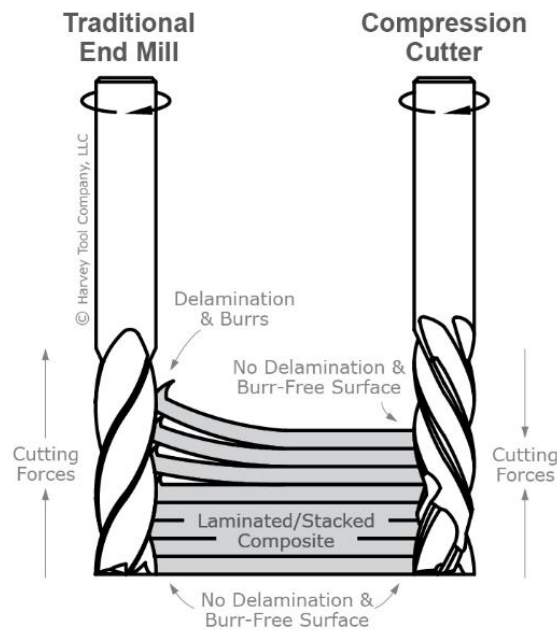


Figure 1-4 : Processus du délaminage - [HAC_17]

Pour favoriser la coupe franche et nette de la fibre par cisaillement, l'outil doit posséder une acuité d'arête inférieure au diamètre de la fibre soit $10\mu\text{m}$ [MOR_11]. Dans la plupart des cas, ce rayon d'arête est supérieur [GAY_89]. Cette acuité d'arête augmente avec l'usure de l'outil et la rupture de la fibre initialement faite par cisaillement se fait ensuite par flexion après compression de la fibre par l'arête de coupe émoussée. Cette rupture par flexion engendre un retour de la fibre sur la face de dépouille qui crée une usure sur cette face (bouncing back) [SHE_09].

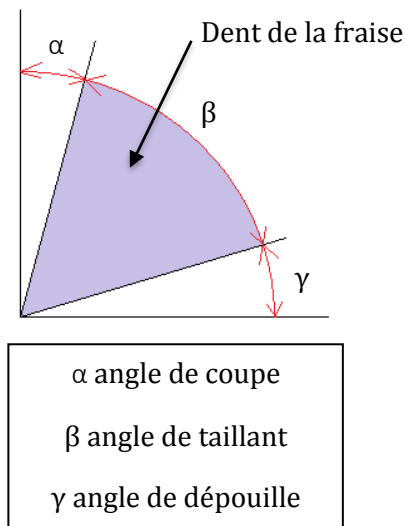


Figure 1-5 : Angles de coupe

Le comportement en usinage de la résine dépend également de l'angle de coupe (figure 1-5). Un angle négatif provoque une déformation élastique de la matrice devant l'arête de coupe et un retour important se retrouve derrière l'arête de coupe entraînant un mauvais état de surface

et une usure prématurée de la face de dépouille de l'outil [KOP_83]. [ZHA_01] [HEN_15] préconisent un angle de dépouille compris entre 3 et 15° pour limiter le délaminage et les frottements de la matière dus au retour élastique du matériau.

C'est parce que l'effort de coupe dépend en partie de la géométrie de l'outil qu'elle est également déterminante sur son usure. En général, plus les angles de coupe et de dépouille sont importants plus les efforts de coupe sont faibles. Dans ce cas, l'usure de l'outil est faible. Cela implique un angle de taillant faible comme préconisé dans [HEN_15].

2.1.3. Modes de dégradation de l'outil

L'abrasion est causée par le frottement de l'outil sur la fibre de carbone mais également par l'abrasion du troisième corps causée par les débris du matériau [SHE_09]. La sollicitation fluctuante, du fait de l'usinage d'un matériau non-homogène, génère des micro-écaillages sur l'arête de coupe [HEN_15]. La surface des outils carbure ou PCD est constituée de particules dures frittées. D'un point de vue phénoménologique, le processus d'usure élimine les phases liantes entre les particules dures qui se détachent de la surface de l'outil. Pour pallier ce phénomène, les propriétés de dureté et de ténacité doivent être élevées. En général, ces deux caractères ne vont pas de pair. Les PCD sont durs et la rupture par manque de ténacité est initiée suivant des ébréchantures. Ils possèdent cependant une excellente conductivité thermique qui permet d'abaisser la température dans la zone de coupe.

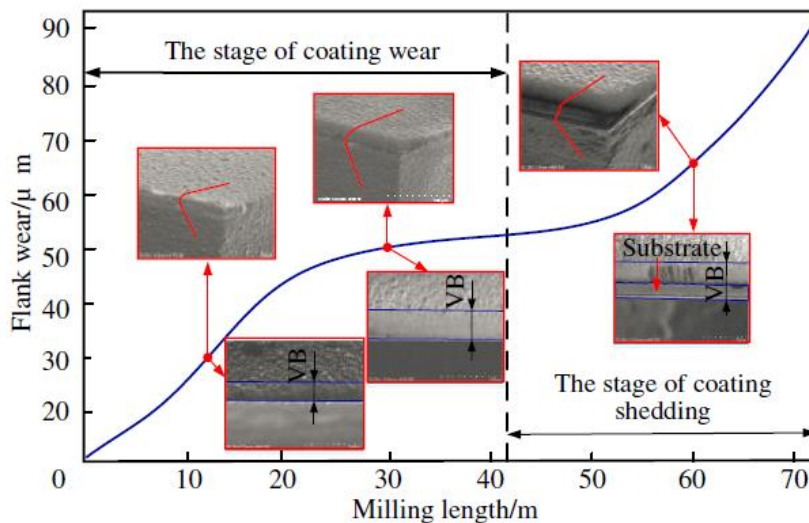


Figure 1-6 : Usure d'un outil carbure avec un revêtement diamant – Usinage CFRP [CHE_19]

Pour les outils carbures, l'utilisation de poudres très fines limite le phénomène d'érosion évoqué dans le cas des PCD. De plus, les revêtements diamants appliqués aux outils carbure leur apportent cette haute dureté requise pour usiner les CFRP et augmentent leur durée de vie. [CHE_19] présente les différentes étapes dans l'usure d'un outil carbure revêtu diamant pour l'usinage d'un composite Carbone/Epoxy (figure 1-6). Il observe deux phases : l'usure d'une partie du revêtement par abrasion puis la perte totale du revêtement par fatigue. La première étape comprend l'arrondissement de l'arête de coupe, pendant laquelle l'effort de coupe augmente en fonction du rayon de celle-ci, avant une usure du revêtement où l'effort de coupe se stabilise.

Usinage des matériaux composites

Pendant cette phase, le renfort du matériau est coupé net, les copeaux sont sous forme de poudre dont la taille est inférieure à $0.5\mu\text{m}$ [VOB_14] et la qualité de surface usinée est mesurée telle que : $1.4\mu\text{m} < \text{Sa} < 2.3\mu\text{m}$. La deuxième phase est la perte du revêtement qui provoque une augmentation de l'effort de coupe et l'arrachement de la fibre plutôt que son cisaillement. Les copeaux sont donc plus longs. Des creux et des fibres sont visibles sur la surface du matériau détériorant l'état de surface ($2.3\mu\text{m} < \text{Sa} < 5.1\mu\text{m}$).

La durée de vie d'un outil est déterminée par l'usure en cratère à partir des critères K_B , K_M et K_T présentés sur la *figure 1-7* [NFE_93]. L'usure en dépouille V_B se manifeste par l'apparition d'une bande striée et brillante, parallèle à l'arête de coupe, révélatrice de l'abrasion de la face en dépouille, due au frottement de la pièce. Sa largeur moyenne est notée V_B , elle détermine l'état de surface et la précision dimensionnelle de la pièce. La norme fixe comme critère de durée de vie $V_B = 0,3 \text{ mm}$ (si usure uniforme) et $V_B = 0,6 \text{ mm}$ (usure localisée). La durée de vie d'un outil dépend de tous les paramètres susceptibles de faire évoluer ce critère comme : les paramètres géométriques de l'outil et les paramètres de coupe de l'usinage [SHE_09].

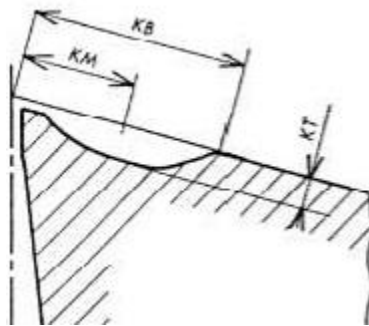


Figure 1-7 : Critères d'usure de l'outil [NFE_93]

2.1.4. Paramètres influents sur l'usinage

En dehors des caractéristiques de l'outil, les conditions de coupe ainsi que l'orientation des fibres dans le stratifié sont des éléments importants qui influent sur la qualité de la surface usinée et l'usure de l'outil.

La durée de vie de l'outil diminue également avec l'augmentation de plusieurs paramètres de coupe : la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de coupe. La vitesse de coupe est le paramètre le plus influent sur la durée de vie de l'outil car c'est elle qui détermine principalement la température de la zone de coupe [ILI_08].

2.1.4.1. Orientation des fibres

La qualité de surface varie en fonction de l'orientation (angle θ) des fibres par rapport à la direction d'avance de l'outil. [KOP_80] réalise un comparatif entre deux orientations : Une orientation de la fibre parallèle et une orientation perpendiculaire à l'avance de l'outil, respectivement à $\theta = 0^\circ$ et $\theta = 90^\circ$. Quatre phénomènes de ruptures de la fibre sont observés [PUW_98] : la flexion, le flambement, le cisaillement et le délaminage.

Usinage des matériaux composites

- Pour une orientation à 0° , l'enlèvement de matière se produit selon un mécanisme de micro-flambement et de délaminage. La rupture de la fibre se fait par compression de l'arête de coupe. Pour cette orientation, la qualité visuelle de la surface usinée présente peu de fibres non coupées et une faible rugosité.
- Pour une orientation à 90° , la fibre se rompt par cisaillement lorsque le rayon d'arête de coupe est inférieur au diamètre de la fibre. Comparée à une orientation du sens de la fibre à 0° , la rugosité de surface est plus élevée car des ruptures induites par compression vont pénétrer en profondeur dans le matériau pendant la faible flexion de la fibre. Au fur et à mesure de l'usure de l'arête de coupe, le cisaillement de la fibre laisse place à une rupture par flexion. Dans ce cas, une partie de la matière présente au plan de coupe se fléchit vers l'intérieur de la pièce créant ainsi des fissures hors plan dans la matière. Du « bouncing back » engendre un frottement sur la face de dépouille. L'importance de ce retour dépend de la profondeur de coupe, de l'acuité d'arête et du type de matrice du matériau [PUW_98].

Les travaux de [WAN_95] et de [ARO_96] confirment cette influence de l'orientation des fibres sur la formation du copeau et l'existence de ces quatre mécanismes qui mènent à la rupture de la fibre à savoir ; le délaminage et flambement pour des angles compris entre $0^\circ < \theta < 75^\circ$ et le cisaillement et la flexion pour des angles $75^\circ < \theta$ accompagné d'un délaminage de la surface hors plan.

Il est donc évident que l'orientation des fibres influence l'usure de l'outil et l'état de surface usiné. Le contexte de cette étude ne permet pourtant pas l'analyse de ce phénomène pour deux raisons :

- L'utilisation d'un plateau rotatif associé à notre centre d'usinage implique une orientation de la fibre variable par rapport à l'avance de l'outil.
- Le plan de drapage de la peau du moule indique que les plis ont tous une orientation différente. Cette conception équilibrée du stratifié permet de prédire une faible évolution de l'influence de l'orientation des fibres sur l'usure.

2.2. Influence de l'effort de coupe

Dans ses travaux, [SHE_09] fait une comparaison entre des relevés d'efforts d'usinage de plusieurs orientations de fibres pour un même couple outil/matière. Les orientations $\theta > 90^\circ$ génèrent les efforts les plus importants pour les modes de flexions avant cisaillement par compression des fibres. Les orientations $\theta < 45^\circ$ génèrent les efforts et les amplitudes les plus faibles pour les modes de flambement et de délaminage. [WAN_95] mesure de grandes fluctuations d'efforts pour l'usinage des orientation $\theta > 90^\circ$, il fait une corrélation entre ces amplitudes et la taille des copeaux. Dans ses travaux, il observe des efforts d'avance largement supérieurs aux efforts de coupe pour cette orientation. Cela s'explique par le retour élastique des fibres sur la face de dépouille après le passage de l'arête de coupe. Ce frottement génère un effort important sur la face de dépouille.

Usinage des matériaux composites

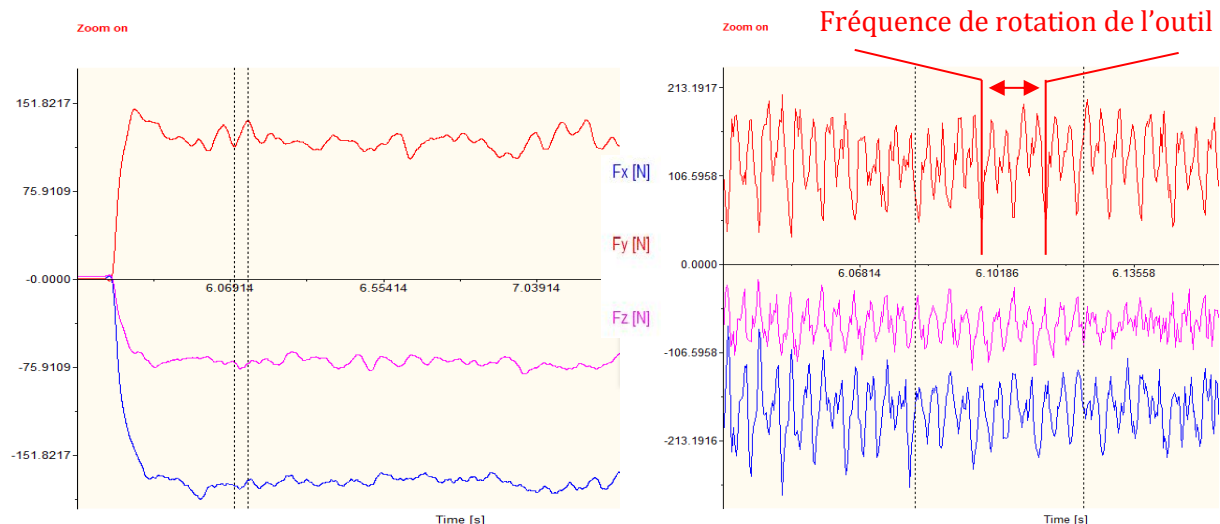
Les vitesses d'avance et de coupe font varier les efforts d'usinage. Des essais d'usinage en fixant une de ces vitesses et en faisant évoluer l'autre, concluent que la vitesse de coupe affecte l'effort dans la direction de l'avance et que la vitesse d'avance affecte l'effort normal. Cette constatation se vérifie également dans le cas d'outil à denture hélicoïdale [SHE_09]. En augmentant la vitesse de coupe, l'épaisseur du copeau diminue tout comme l'effort de coupe. En augmentant la vitesse d'avance, la matière enlevée par tour de l'outil augmente ainsi que les efforts de coupe.

Une étude fait la comparaison entre un environnement sec et humide lors d'un usinage. Comme dans l'usinage de matériaux métalliques, l'usinage à sec présente des efforts légèrement supérieurs[DUB_16].

Dans le cas de l'étude, le stratifié possédant plusieurs plis de fibres ne permet pas d'identifier si un phénomène d'usure sera favorisé par ce drapage. Une table de mesure dynamique d'effort a réalisé le relevé présenté *figure 1-8*, qui résulte de la coupe du stratifié de l'application avec un outil carbure à denture hélicoïdale deux tailles. Cet outil possède quatre dents.

On constate deux phénomènes :

- (*figure 1-8(a)*), On constate que l'effort évolue dans le temps. Un stratifié composite, même équilibré, n'est pas pour autant homogène, l'outil rencontre des zones plus denses en fibres, des zones de porosités, des zones d'amas de résine ou encore des zones plus représentatives d'une orientation favorable ou défavorable à de grands efforts de coupe. Ce phénomène est responsable de l'évolution des efforts de coupe lors de l'usinage. Ses fluctuations sont de faibles amplitudes, aléatoires et non-cycliques.



(a) Variation de l'effort de coupe – matériau non-homogène

(b) Zoom sur variation de l'effort de coupe – impact des dents de l'outil

Figure 1-8 : Evolution de l'effort de coupe dans le matériau composite Carbone/Epoxy de l'application

- Avec une échelle de temps réduite (*figure 1-8(b)*), un phénomène cyclique de variation très rapide des efforts qui correspond à l'impact de la dent sur le matériau, l'usinage en avalant génère ce phénomène de pics d'efforts.

2.3. Etat de surface

La qualité du surfaçage est caractérisée par la rugosité et la santé matière de la surface usinée, cela comprend les dommages mécaniques et thermiques de la matière en surface mais aussi la présence de fibres non-coupées et le délaminage de la couche supérieure du stratifié. Les fibres non-coupés résultent d'un retour élastique après rupture par flexion ou flambage [DUB_16].

L'usure de l'outil impacte sévèrement l'état de surface. Dans ses travaux, [CHE_19] décrit le processus d'usure de son outil. On sait que le rayon de bec de l'outil augmente et que la face de dépouille se creuse pendant le processus de coupe, alors la fibre se rompt par compression et flexion plutôt que par cisaillement. Dans le cas d'un outil dont l'usure est très prononcée, lorsque la dent s'éloigne de la matière par la rotation de l'outil autour de son axe, c'est par traction que la rupture apparaît. Alors on aperçoit des fibres non coupées et des fissures en surface générées par la compression de la dent. Enfin lorsque l'outil est en fin de vie et que son usure est forte, les copeaux sont des morceaux de fibres plus ou moins longs et un grand nombre de fibres non coupés tiennent encore au substrat.

La rugosité d'une surface constitue un indicateur de l'état d'endommagement induit par l'outil. La mesure de l'état micro-géométrique est souvent considérée comme un critère de qualité de la pièce usinée. L'état de surface est souvent défini par la rugosité moyenne arithmétique (R_a) ou rugosité maximale (R_z). L'usure de l'outil est également liée aux paramètres de coupe du procédé : la rugosité augmente avec la vitesse d'avance (V_f) [KIM_92], en accord avec [DAV_05], l'augmentation de la vitesse de coupe (V_c) influence beaucoup moins ce critère. [PUW_98] identifie cependant que la rugosité augmente si V_c est élevée pour V_f faible. Cela s'explique par une augmentation de chaleur, dans la zone de coupe, mal dissipée à cause de la faible conductivité thermique du matériau composite.

[WAN_03] étudie l'effet de la profondeur de coupe sur les composites carbone/époxy. Ce paramètre, ainsi que l'orientation des fibres, contrôle le phénomène de flambement des fibres devant l'arête de coupe et la création de microfissures qui se propagent dans le matériau. Pour des orientations $\theta < 60^\circ$, le phénomène est moins présent et la rugosité est faible. Pour des orientations supérieures, ce phénomène s'accompagne d'un encrassage de la surface. Du dépôt en surface masque les défauts de fissuration et pollue la mesure de rugosité. L'encrassage est également rapporté dans les analyses de [KOP_80]. Pour des orientations comprises entre 120° et 150° , la fissuration de grande profondeur endommage sévèrement la rugosité.

L'état de surface est principalement lié au pas de l'outil dans la matière et à son avance par dent. Le premier génère des ondulations périodiques à l'échelle macroscopique et le deuxième génère des stries et sillons à l'échelle microscopique. Il est également lié à l'usure de l'outil et au sens de la fibre, les conséquences sont des défauts macroscopiques et localisés comme des arrachements de fibres, fissures ou marques d'outils.

2.4. Endommagement

L'usinage d'un matériau composite peut entraîner un endommagement en surface et en profondeur de la pièce. Les phénomènes les plus recensés pour le surfaçage de CFRP sont :

- Une haute température dans la zone de coupe est une donnée physique importante car en fonction du matériau composite, elle peut entraîner une carbonisation de la matrice [GAY_89]. Pour les TD, cet endommagement est particulièrement redouté pendant l'usinage car il altère la surface usinée ainsi que la matrice plastifiée qui adhère à l'outil qui ne peut plus évacuer correctement la matière et casse. [SHE_09] rappelle qu'il existe, pour les matériaux composites, une vitesse critique directement liée à la température de transition vitreuse (T_G). Ses résultats sur un composite carbone/peek concluent une vitesse critique de 75 m/min pour des températures avoisinant les 160°C dans la zone de coupe. Pour les composites à matrices Epoxy, la vitesse de coupe critique est de 200m/min pour des températures autour de 250°C [RAH_99]. La température de transition vitreuse du composite Carbone/Epoxy du cas d'application étudié est de 240°C (ANNEXE 3).
- Le délaminage est un phénomène d'endommagement important et redouté dans l'usinage de matériaux composites, particulièrement pour des applications de perçage [ELS_04]. Ce phénomène concerne surtout les plis inférieurs et/ou supérieurs du stratifié qui ne sont pas soutenus d'un côté. [COL_91] fait un étroit lien entre ce phénomène et l'orientation des fibres et il classifie trois types de délaminage : le type 1 désigne une zone où les fibres ont été brisées et arrachées proche du bord usiné. Le type 2 caractérise des fibres non coupées dépassant du bord usiné. Le type 3 décrit une fissuration parallèle à la surface usinée en bordure de l'usinage ou des fibres partiellement attachées. La tendance au délaminage étant fonction de l'effort de coupe axial, elle dépend des vitesses de coupe et d'avance.

De nombreuses études analysent ce phénomène comme celle de [KAR_13] qui propose un modèle mécanistique d'effort pour le cas du fraisage basé sur l'orientation des fibres. Les résultats sont validés expérimentalement avec l'utilisation d'une fraise à double hélice et permettent de déceler les effets de l'orientation des fibres et d'anticiper le délaminage. Des modèles de réseaux de neurones basés uniquement sur des expérimentations sont aussi suggérés par [SHE_09] ou encore [KAL_10]. Les outils qui viennent minimiser ce phénomène sont ceux qui n'engendrent pas ou peu d'efforts axiaux, comme les outils à double hélice ou à profil ravageur (rhombic milling cutter) qui modifient le sens de la coupe de la fibre par une alternance entre angle de coupe positif et négatif [CHE_19]. Un autre moyen pour diminuer le délaminage du substrat expliqué par [COL_91] serait de paramétrer une vitesse de broche élevée avec une avance très faible.

3. Synthèse bibliographique

Cette première partie consacrée à l'étude de l'usinabilité des matériaux composites a permis de mettre en évidence les facteurs importants et influents sur le procédé. Cette bibliographie a montré que les paramètres de l'outil, les paramètres du matériau usiné et les

conditions d'usinage, conditionnent la performance du surfaçage et la qualité de surface de la pièce usinée.

On rappelle la difficulté à usiner les composites à fibres longues tel que le matériau de l'application visée en raison de leur non-homogénéité. La fibre, par sa nature abrasive, engendre une usure rapide de l'outil. Les outils PCD sont ainsi préférés devant les outils en carbure de tungstène pour leur résistance à l'abrasion et des degrés de finitions plus fins. Cependant, leur prix est souvent un frein devant les outils qui arborent des revêtements efficaces et moins onéreux.

Le processus de rupture de la fibre à favoriser est la rupture par cisaillement. C'est ainsi que l'état de surface et l'usure de l'outil sont tous deux préservés. Pour ce faire, il faut privilégier une acuité d'arête de coupe inférieure à $10\mu\text{m}$ et un angle de dépouille compris entre 3 et 15° pour limiter les frottements de la matière sur la face de dépouille. L'angle d'hélice quant à lui influent sur les efforts axiaux. Il est nécessaire de limiter ses efforts pour éviter de délaminage du substrat. Certaines géométries permettent d'annuler ces efforts axiaux comme la double hélice ou les profils ravageurs (limite les efforts axiaux).

L'orientation des fibres est un critère qui régit le mode de rupture de la fibre. Il influence de fait la qualité de surface et l'usure de l'outil. Il apparait que l'orientation de la fibre à 0° serait une des orientations à privilégier en fraisage pour minimiser les efforts de coupe, l'usure et la rugosité de surface. Dans le cas de l'application composite concernée, l'orientation des fibres n'est pas unique car il s'agit d'un enlèvement de matière qui concerne environ 8 plis du stratifié dont chacun possède une orientation différente. Il est donc difficile de considérer ce critère pour la suite.

Les paramètres qui permettent de minimiser l'usure de l'outil et les efforts de coupe sont les vitesses de coupe et d'avance. Combinées au nombre de dents de l'outil, elles définissent les efforts de coupe, la rugosité de surface et l'endommagement en délaminage. Généralement, un meilleur usinage est réalisé avec un copeau de petite taille qui peut être défini en augmentant la vitesse de coupe, en diminuant l'avance, en augmentant le nombre de dents de l'outil ou une combinaison des trois. Ces paramètres méritent une attention particulière pour proposer un usinage performant et optimal.

Il existe plusieurs méthodes pour optimiser les valeurs de ces paramètres de coupe. Dans la suite de ce chapitre, il sera présenté le concept de couple outil-matière. Une méthode permettant de déterminer les paramètres de coupe optimums pour un couple outil-matière donnée. Cette méthode est mise en place pour notre cas d'étude dans la suite de ce chapitre.

4. Application d'une Méthode COM

Le couple outil-matière (COM) fait l'objet d'une norme Afnor [NFE_97]. Dans sa présentation générale, la norme précise que le concept couple outil-matière définit un domaine de fonctionnement d'un outil coupant pour une application définie. Il suppose une définition précise de l'outil (matériau, géométrie, conditions de coupes), de la matière et parfois de l'opération.

4.1. Définition du contexte

Dans cette section sont présentées les données d'entrée des travaux de recherche dédiés à l'usinage du matériau composite de l'étude.

4.1.1. Gamme d'usinage

La pièce à usiner est une parabole de forme convexe (*figure 1-2*). La gamme d'usinage choisie consiste à balayer la surface à l'aide d'une fraise hémisphérique. Selon les spécifications client proposées en *ANNEXE 2*, le critère majeur qui évalue la qualité du processus d'usinage est celui du RMS, « Root mean square » ou encore « Dispersion quadratique de précision de forme ». Il s'agit de vérifier que l'écart de forme entre la surface usinée et une surface parfaite. Cette valeur de RMS est fixée à un maximum de 0.05mm pour la surface usinée appelée « zone utile » délimitée sur le moule par un tracé fin de pièce et définit dans le document *ANNEXE 2*. Le second critère à respecter est celui de la rugosité de surface (R_A) maximum fixée à $1.6\mu\text{m}$ après usinage.

Pour garantir les critères cités ci-dessus, ce balayage sera réalisé en deux opérations successives : Une passe d'ébauche et une phase de finition. Concernant la stratégie d'usinage, le plateau diviseur au sein de la cellule d'usinage est utilisé pour mettre en place une stratégie de type tournage. Ainsi le robot a pour rôle de déplacer l'outil de l'extérieur vers le centre de la pièce pendant que l'axe rotatif génère la vitesse d'avance de l'outil. Dans ce cas de figure, les déplacements du robot sont minimisés ainsi que les défauts d'usinage de forme liés à la précision de pose du robot. Les deux phases annoncées ci-dessus sont donc réalisées en balayage spirale 5 axes et en avalant, pour assurer un meilleur cisaillement de la fibre comme vue dans la section précédente [DUB_16].

Deux outils doivent donc être sélectionnés pour cette gamme. L'objectif est d'identifier un outil capable de réaliser la totalité de l'usinage de chaque phase. Le but est d'éviter les reprises d'usinages qui génèrent localement des ressauts en surface et dégradent la rugosité de la pièce.

4.1.2. Calcul de l'engagement de l'outil théorique

Les conditions d'engagement sont définies par rapport à l'application et au critère de rugosité. L'épaisseur du brut à usiner nécessite une profondeur de passe en ébauche de 3mm pour garantir une épaisseur de la pièce finie de 10mm. La profondeur de passe de finition est fixée à

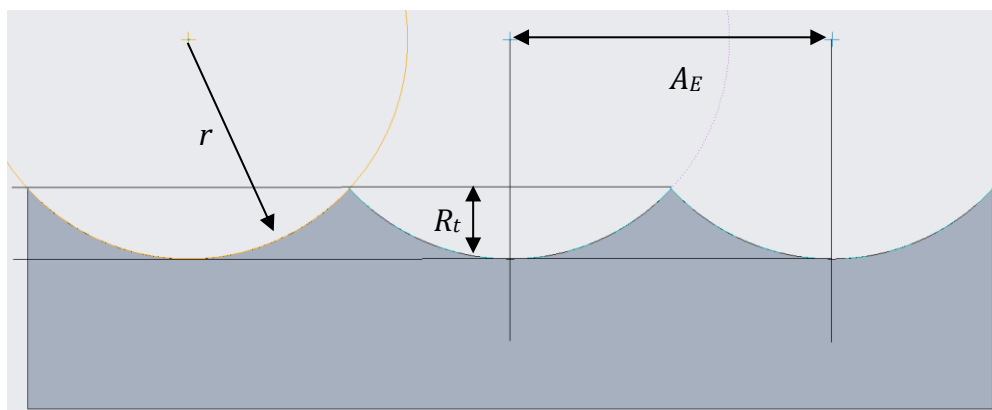


Figure 1-9 : Relation entre l'engagement A_E et la profondeur de passe A_P

Usinage des matériaux composites

0.1mm pour assurer une épaisseur du copeau suffisamment importante pour ne pas mater la matière mais assez faible pour limiter les efforts de coupe dans cette phase. Concernant l'engagement en ébauche, on choisit d'appliquer un usinage avalant/opposition correspondant à 97.5%/2.5%, soit 5.25mm pour des outils de diamètre 10mm. Ce choix est avant tout économique devant des fraises à plus gros diamètres, des fraises tourteaux ou encore des outils spéciaux.

En s'appuyant sur le calcul de la rugosité de surface théorique, déterminée par l'avance et la géométrie de l'outil, on peut calculer la valeur de l'engagement de l'outil (entre deux passes successives de l'outil) et répondre au critère de rugosité de surface imposée par l'application ($R_A \leq 1.6 \mu\text{m}$). En effet, l'équation 1-1 qui est l'expression de la rugosité théorique (R_t) en accord avec [STA_12] permet par analogie de déterminer l'engagement de l'outil entre deux passes successives plutôt que le paramètre d'avance f . Cette relation est présentée à travers la figure 1-9.

Équation 1-1

$$R_t = 125 * \frac{f^2}{r}$$

Pour déterminer A_E , elle devient :

$$A_E = \sqrt{r * \frac{R_t}{125}}$$

Avec l'égalité suivante : $R_t \approx 5R_A$ [STA_12], la résolution de cette équation permet de projeter le graphique de la figure 1-10 :

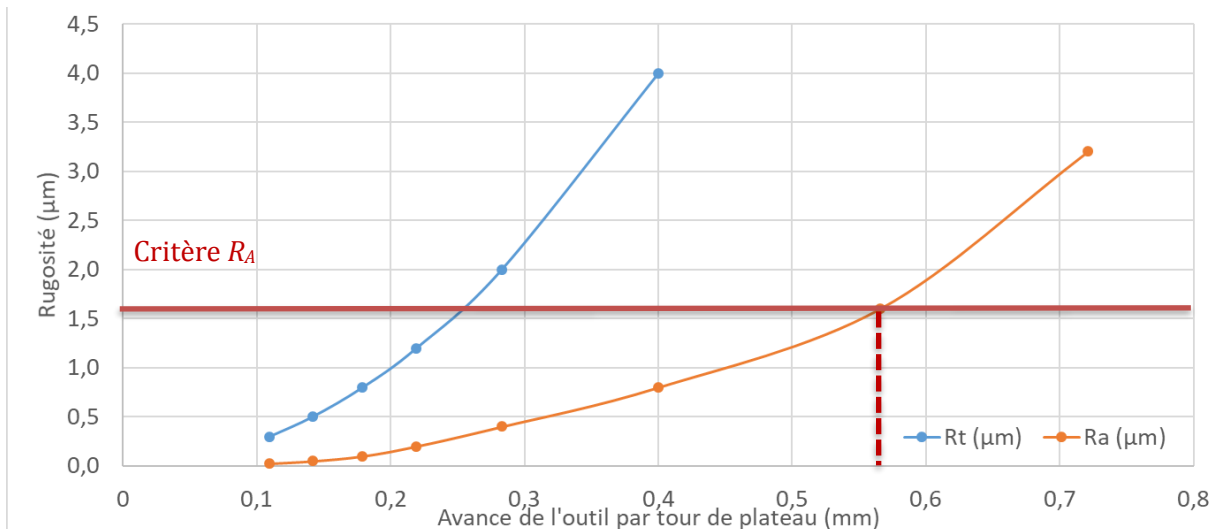


Figure 1-10 : Calcul de l'engagement théorique de l'outil de finition en fonction du critère de rugosité de surface

Ce graphique permet de fixer un engagement maximum $A_E = 0.5\text{mm}$ afin de respecter le critère R_A de l'application. Les paramètres de coupe pour les deux opérations de balayage sont résumés dans le tableau 1-1.

Usinage des matériaux composites

Tableau 1-1 : Paramètres de coupe

(mm)	Diamètre	A_E	A_P
<i>Ebauche</i>	10	5.25	3
<i>Finition</i>	10	0.5	0.10

4.1.3. Choix des outils

Cinq outils ont été sélectionnés. A la vue de l'importance du matériau de l'outil et de son revêtement. Le choix est fait de comparer la technologie PCD et les outils carbure avec un revêtement diamant. Trois outils d'ébauche et deux outils de finition sont présélectionnés dans le but de respecter les critères, abordés dans la bibliographie, qui limitent l'usure de l'outil. Le critère du coût est également pris en compte. Chaque outil fait l'objet d'une étude couple outil/matière pour les comparer et déterminer l'outil optimal pour chaque phase de la gamme.

Les carburiers CERATIZIT et OSG utilisent une technologie de revêtement diamant. Un troisième fournisseur, MASNADA propose des fraises deux tailles en PCD. La durée de vie des outils présélectionnés n'étant pas annoncée pour des applications composites, les seules caractéristiques utiles sont reprises dans le [tableau 1-2](#).

Tableau 1-2 : caractéristiques outils

	<i>Ebauche</i>			<i>Finition</i>	
<i>Outil</i>	E.A fig.1-11(a)	E.B fig.1-11(b)	E.C fig.1-11(c)	F.A fig.1-11(d)	F.B fig.1-11(e)
<i>Type</i>	Cylindrique 2 tailles	Cylindrique profil ravageur	Cylindrique 2 tailles	Sphérique denture droite	Sphérique denture hélicoïdale
<i>Matière</i>	Carbure de tungstène	Carbure de tungstène	PCD	Carbure de tungstène	Carbure de tungstène
<i>Revêtement</i>	diamant	diamant	non	diamant	diamant
<i>Diamètre (mm)</i>	10	10	8	10	10
<i>Nombre de dents</i>	4	7	2	6	2
<i>Angle de coupe (°)</i>	8	nc	nc	15	nc
<i>Angle d'hélice (°)</i>	45	nc	nc	nc	nc
<i>Rayon de bec (μm)</i>	5	24	8	10	15

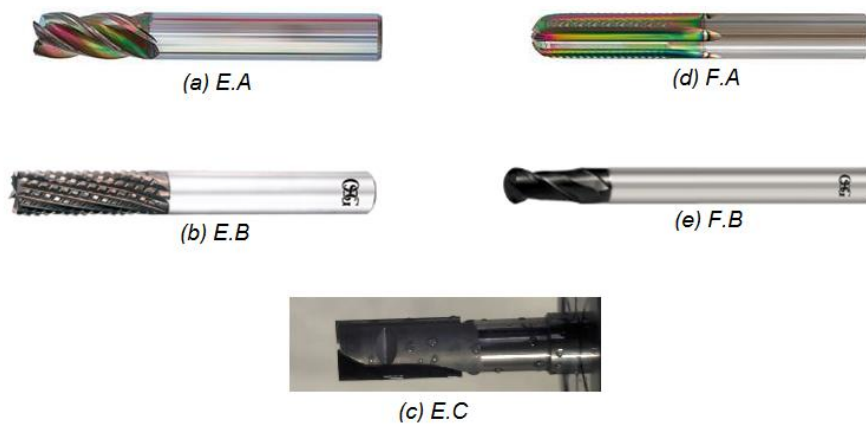


Figure 1-11 : Choix outils

4.1.4. COM Fraisage – Méthode expérimentale

Pour chacun des outils sélectionnés, des conditions de coupe sont préconisées par les fabricants pour optimiser la qualité de la coupe et celle de l'usure de l'outil. Ces conditions sont préconisées pour l'outil quel que soit le matériau composite usiné. Pour affiner ces paramètres, il faut l'application d'une méthode COM pour garantir une qualité de surface optimale et une durée de vie maximisée. Pour cela, l'application d'une étude COM est nécessaire.

Les essais ont été réalisés sur un centre d'usinage MORI SEIKI NMV 5000 DCG. Il est commandé par une CN FANUC 31iA5. La *figure.1-12* représente une table dynamométrique (*ANNEXE 4*) de mesure d'efforts pour suivre les efforts dans les trois directions au cours de l'usinage. Un moyen de mesure 3D optique qui présente une précision de mesure de $0.3\mu\text{m}$, INIFITEFOCUS de marque Alicona, permet de mesurer l'usure des outils et la rugosité des surfaces des pièces usinées. Lors des essais, une lubrification à l'eau permet d'emprisonner les poussières de copeau composites et d'évacuer la chaleur de la zone de coupe. Ces conditions sont similaires à celles envisagées pour l'usinage des moules.

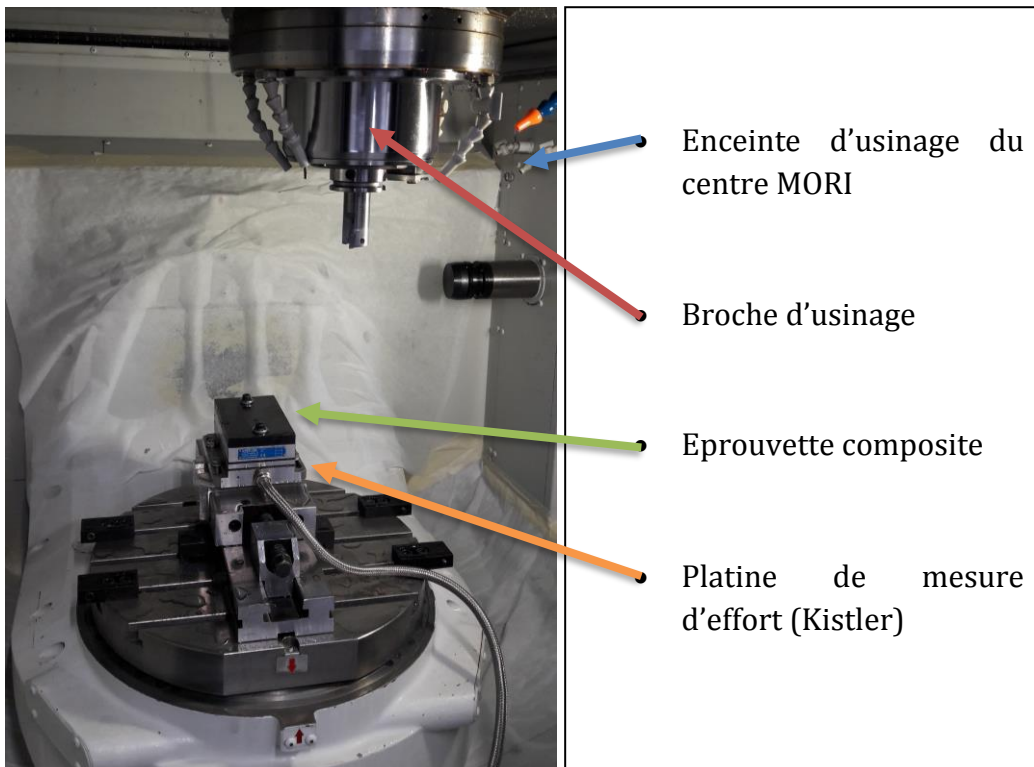


Figure 1-12 : Positionnement platine de mesure d'effort et éprouvette

La méthode COM comporte plusieurs étapes pour définir les conditions de coupe suivantes : Vitesse de coupe V_c , l'avance f_z . Des essais d'usure sont également réalisés pour déterminer la durée de vie de l'outil dans les conditions optimales définies par la méthode COM. Le procédé d'essais en croix comporte donc trois étapes : - Détermination de V_c ; - Détermination de f_z ; - Durée de vie (essais d'usure).

Usinage des matériaux composites

Des éprouvettes du matériau de l'application ont été réalisées (170*100mm) et fixées sur la platine de mesure d'effort, elle-même solidaire de la table du centre d'usinage (*figure.1-12*). Une série d'essais est réalisée en faisant varier les conditions de coupe. un point de fonctionnement est défini par une vitesse de coupe, une avance par dent, une profondeur de passe et une largeur de coupe. Une passe d'usinage d'une longueur de 15mm en ligne droite avec une entrée et une sortie en matière en interpolations circulaires (*figure.1-13*) caractérise chaque point de fonctionnement. Cette longueur est considérée suffisante pour mesurer un effort de coupe stable et identifiable par la table de mesure.

4.2. Conditions de coupe optimales

La vitesse de coupe optimale, $V_{C_{min}}$, est la limite basse de la vitesse de coupe. Elle est définie par une énergie spécifique de coupe minimale pour se rapprocher d'une usure limitée.

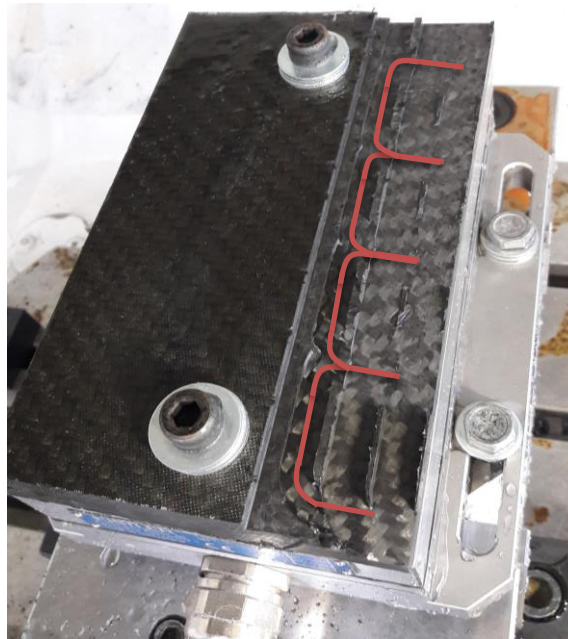


Figure 1-13 : Trajectoires d'essais dans l'éprouvette- méthode COM

Les paramètres A_E , A_P et f_Z sont fixés pour une série d'essais. Pour chaque essai, V_C varie et les efforts d'usinage sont mesurés pour calculer l'énergie spécifique de coupe suivant l'équation 1-2. L'état de surface et l'usure de l'outil sont également mesurés afin de vérifier l'absence de mode de dégradation sévère.

L'énergie spécifique de coupe est fonction de l'effort résultant F_R , et des paramètres de coupe ; V_C , V_F , A_E et A_P tel que :

Équation 1-2

$$W_C = \frac{\frac{V_C * F_R}{60}}{\frac{A_E * A_P * V_F}{1000}}, (W/cm^3 / min)$$

4.1.1. Ebauche

Les conditions de coupe fixées pour les essais d'ébauche sont :

- | | |
|---|---|
| <p>1. Identification de V_{Cmin} :</p> <ul style="list-style-type: none"> - $A_E = 10mm$ outils E.A et E.B - $A_E = 8mm$ outil E.C - , soit un usinage en pleine matière - $A_P = 3mm$ - $f_Z = 0.15mm$ - Usinage en avalant | <p>2. Identification de f_{Zmin} :</p> <ul style="list-style-type: none"> - $A_E = 10mm$ outils E.A et E.B - $A_E = 8mm$ outil E.C - , soit un usinage en pleine matière - $A_P = 3mm$ - $V_C = V_{Cmin}$ - Usinage en avalant |
|---|---|

Pour l'outil **E.A**, la vitesse de coupe $V_C = 120m/min$ est préconisée. Afin de couvrir une plage de vitesses de coupe incluant celle préconisée, une série de 7 essais pour une vitesse de coupe allant de 60m/min jusqu'à 200m/min a été réalisée.

En relevant les efforts de coupe pour chaque essai et en déterminant l'énergie spécifique de coupe (W_C), le graphique de la *figure 1-14* permet de déterminer géométriquement V_{Cmin} .

Dans la majorité des essais, une inflexion de W_C en fonction de V_C est visible pour identifier V_{Cmin} . Afin de faciliter la visualisation du point d'inflexion de la courbe, deux approximations linéaires des données sont prévues par la norme. Elles sont visibles en rouge et en orange (*figure 1-14*) et représentent respectivement la phase descendante et ascendante de la courbe.

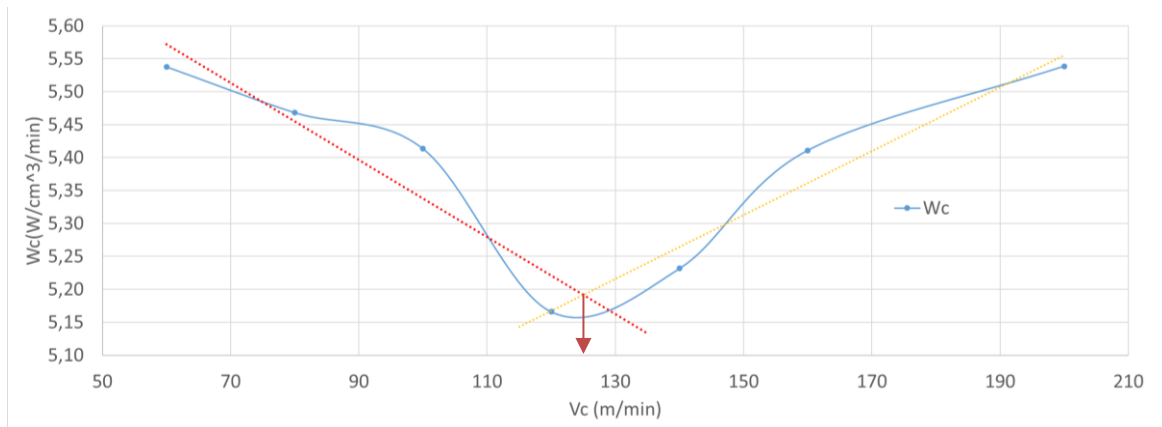


Figure 1-14 : V_{Cmin} - E.A

Les mesures d'efforts révèlent un effort de coupe résultant moyen sur les essais $F_R = 185.5 N$ pour des vitesses de coupe de 60 et 200 m/min. Les valeurs extrêmes encadrant cet effort moyen sont 190.5 N et 177.6 N. Cette faible évolution de l'effort explique une énergie spécifique de coupe relativement constante. Néanmoins, on constate une inflexion indiquée par la flèche rouge positionnée au croisement des deux droites d'approximations des données (*figure 1-14*). La vitesse de coupe optimale $V_{Cmin} = 125 m/min$.

Usinage des matériaux composites

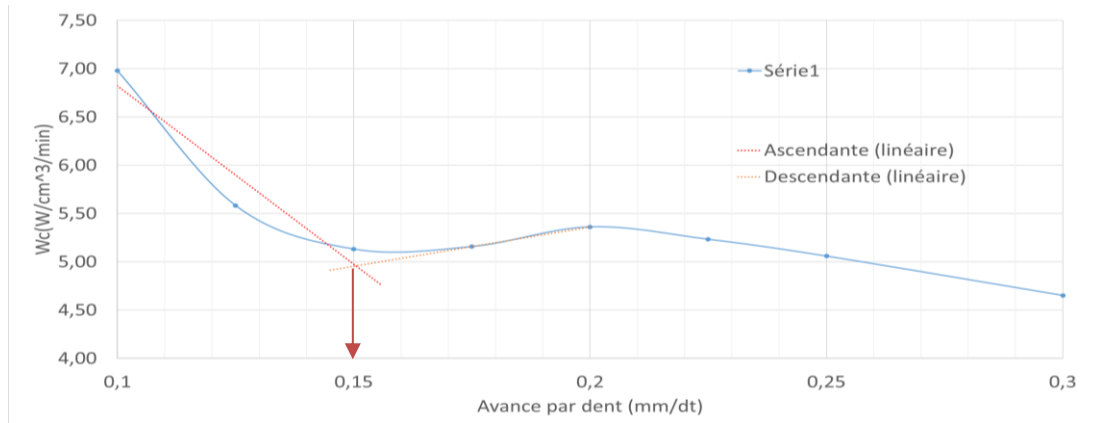


Figure 1-15 : Fzmin - E.A

Une fois V_{cmin} fixée, une nouvelle série d'essais est nécessaire pour déterminer l'avance par dent optimale f_{zmin} . Le fournisseur préconise une avance de 0.15mm/dent pour cet outil d'ébauche. Le choix est de faire varier cette valeur de 0.1 à 0.3mm/dent. W_C est représentée en fonction de l'avance par dent sur la *figure 1-15*. La première inflexion de cette évolution définit la valeur d'avance optimale, celle qui correspond au copeau mini et qui garantira une usure minimum de l'outil dans le temps. L'analyse de cette courbe donne comme valeur d'avance $f_{zmin} = 0.15mm/dent$.

Le *tableau 1-3* présente les résultats de la méthode pour les trois outils d'ébauche. Les relevés permettant d'identifier ces résultats pour les outils *E.B* et *E.C* sont repris en *ANNEXE 5*.

Tableau 1-3 : Valeurs V_{cmin} et f_{zmin} identifiées pour les outils d'ébauche

Outil	E.A	E.B	E.C
V_{cmin} (m/min)	125	125	180
f_{zmin} (mm/dent)	0.15	0.12	0.16
W_C (W/cm³/min)	5.15	1.70	5.5
F_R MOYEN (N)	185.5	104.3	75.7
\varnothing OUTIL (mm)	10	10	8

L'écart constaté sur l'effort moyen et de l'énergie spécifique de coupe identifiés pour chacun des outils est révélateur de la capacité à couper la fibre (*Tableau 1-3*). L'outil *E.B* est celui qui génère l'énergie spécifique de coupe la plus faible, c'est-à-dire que le processus de coupe de la fibre de cet outil est celui qui entraîne le moins d'effort. Pour rappel, l'outil *E.C* est de diamètre inférieur aux deux autres.

4.1.2. Finition

Les conditions de coupe fixées pour les essais de finition sont :

1. Identification de V_{cmin} :
 - $A_E = 0.24mm$
 - $A_P = 0.1mm$
 - $f_z = 0.15mm$
 - Orientation de l'axe outil, split 25°.
 - Usinage en avalant

Usinage des matériaux composites

2. Identification de f_{zmin} :

- $A_E = 0.24mm$
 - $A_P = 0.1mm$
 - $V_C = V_{Cmin}$
- Orientation de l'axe outil, split 25°.
 - Usinage en avalant

Le *tableau 1-4* présente les résultats de la méthode pour les deux outils de finition. Les relevés permettant d'identifier ces résultats sont repris en *ANNEXE 5*.

Tableau 1-4 : Valeurs V_{cmin} et f_{zmin} identifiées pour les outils de finition

Outil	F.A	F.B
V_{Cmin} (m/min)	220	180
f_{zmin} (mm/dent)	0.08	0.09
W_C ($W/cm^3/min$)	0.65	28
F_R MOYEN(N)	10.1	11.3
\varnothing OUTIL (mm)	10	10

Au regard des valeurs des énergies spécifiques de coupe des deux cas de finition étudiées, c'est l'outil **F.A** qui entraîne l'effort de coupe le plus faible bien que très proche de celui de l'outil **F.B**.

4.3. Durée de vie des outils

Au voisinage de l'arête de coupe, des usures systématiques en dépouille (V_B) ou en cratère (K_T) mais aussi des usures aléatoires sont observées comme l'écaillage, la fissuration en peigne, arête rapportée, usure en entaille ou encore la rupture.

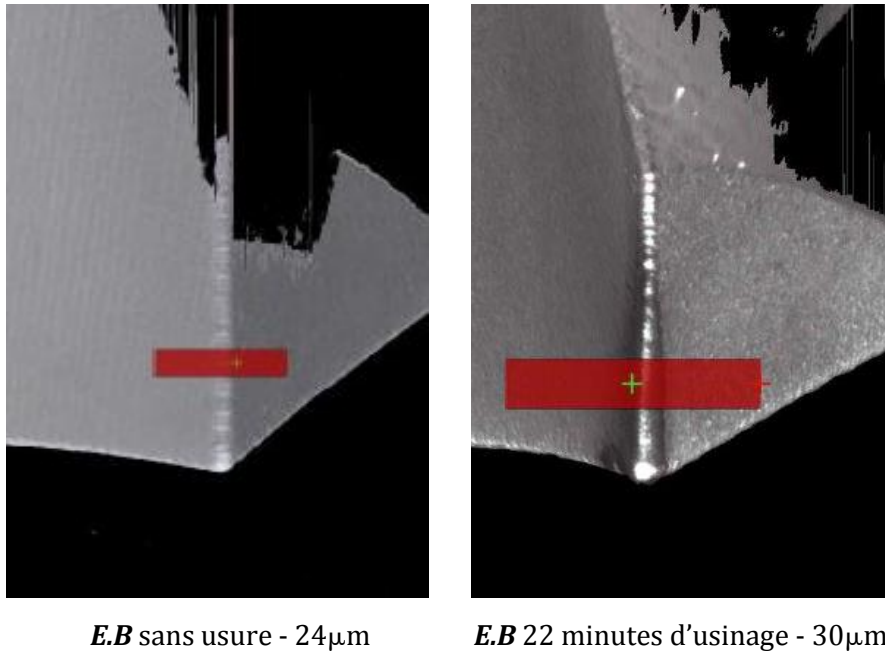


Figure 1-16 : Mesure acuité d'arête

Usinage des matériaux composites

Comme vue dans la section 2.1.3, dans la plupart des applications d'usinage de matériaux métalliques, l'usure d'un outil est caractérisée par l'usure en dépouille et les valeurs VB et KT. Cependant la qualité de la coupe du matériau composite dépend fortement de l'acuité d'arête de l'outil avant de dépendre de la qualité de sa face en dépouille. Dans cette étude, l'usure des outils sera donc étudiée en fonction de la valeur du rayon de l'arête de coupe. Concernant l'usinage d'ébauche, il est conseillé de conserver une acuité d'arête inférieure à 10 fois le diamètre de la fibre ($10\mu\text{m}$) et 4 fois dans le cas de la finition [TET_02]. Ces critères permettent de favoriser au maximum le processus de cisaillement et de limiter les phénomènes de dégradations liés à l'augmentation de l'effort de compression de l'arête de coupe sur la matière. Les critères de rayon d'arête retenus sont donc: $r_{\text{ébauche}} < 100\mu\text{m}$ et $r_{\text{finition}} < 40\mu\text{m}$.

Pour chaque outil, une série d'usinage est réalisé en relevant les efforts de coupe, le temps d'usinage, l'acuité d'arête de l'outil et la rugosité de la surface usinée avec le moyen de mesure 3D optique (Alicona). Les conditions d'usinage utilisées sont celles déterminées dans la section précédente.

La *figure 1-16* représente des prises de vue avec l'Alicona de l'arête de coupe de l'outil **E.B**. Après plus de 20 minutes d'usinage, le rayon du bec de l'arête de coupe a augmenté de $6\mu\text{m}$.

4.3.1. Outils d'ébauche

Une acquisition permet de réaliser une vue en coupe de la géométrie de coupe et de mesurer l'acuité d'arête initiale de chaque outil. Le *tableau.1-5* répertorie ces données. Le constat immédiat est que les outils **E.A** et **E.C**, du fait de leur faible acuité d'arête, sont ceux qui semblent favoriser le cisaillement de la fibre de carbone dont la taille est comprise entre 5 et $10\mu\text{m}$ de diamètre [GAY_89].

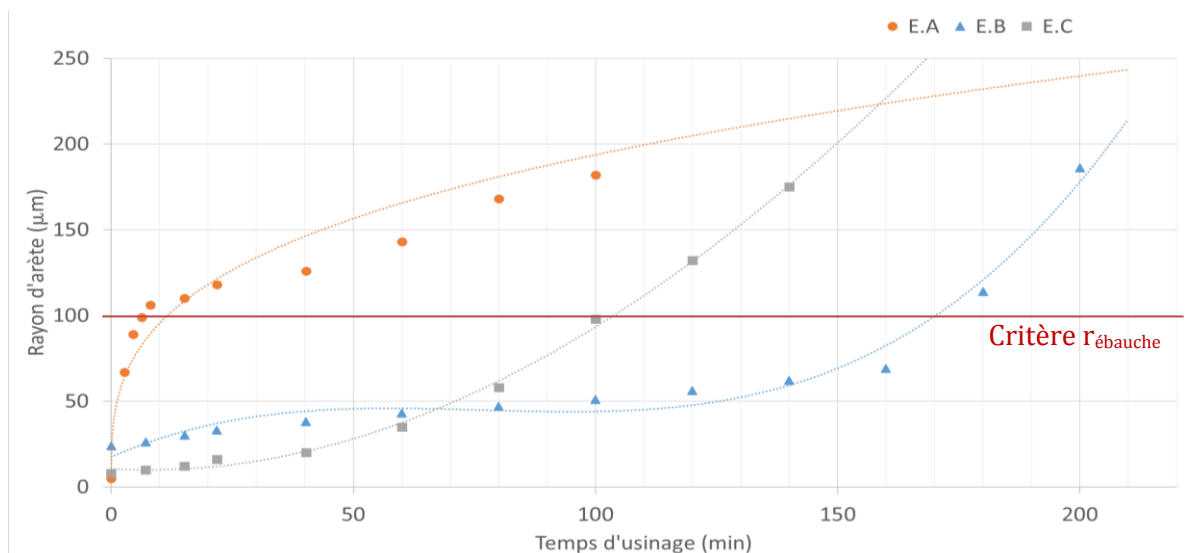


Figure 1-17 : Comparaison des outils d'ébauche - Usure

Usinage des matériaux composites

Tableau 1-5 : Mesure des acuités d'arêtes – outils d'ébauche

Fourisseur	Ceratizit	OSG	Masnada
Nom	E.A	E.B	E.C
Acuité(μm)	5	24	8

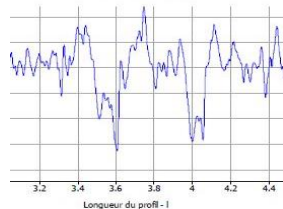
La *figure.1-17* présente les évolutions de l'usure de l'arête de coupe des trois outils d'ébauche en fonction du temps d'usinage. Une courbe de tendance accompagne chaque relevé pour aider à visualiser le comportement de l'outil dans le temps.

- L'outil **E.A** subit une forte usure pendant les 10 premières minutes d'usinage avant de poursuivre son usure de manière nettement linéaire. A partir de 100 minutes d'usinage, une usure importante en bout d'outil génère des stries de matière non coupées sur la surface usinée. Cette dernière présente également des fibres non coupées. Cet outil atteint le critère $r_{\text{ébauche}}$ après une dizaine de minutes d'usinage.
- L'outil **E.B**, bien qu'il possède l'acuité initiale la plus grande, conserve une usure quasiment constante jusqu'à 160 minutes d'usinage après quoi son usure augmente rapidement. C'est à ce moment-là que l'outil perd son revêtement. Ce comportement d'usure en trois phases ; émoussage du revêtement, rodage et/ou perte du revêtement et abrasion de la dent carbure est caractéristique d'un outil au profil ravageur [CHE_19]. Cet outil a atteint le critère $r_{\text{ébauche}}$ après 2h45 minutes d'usinage.
- L'outil **E.C**, résiste bien à l'abrasion et son usure est lente dans un premier temps. Après 50 minutes d'usinage environ, l'acuité d'arête augmente quasi proportionnellement. Le critère $r_{\text{ébauche}}$ est atteint après 1h30 d'usinage.

Cet essai d'usure permet de conclure que c'est l'outil **E.B** qui atteint le critère d'usure en dernier. L'outil **E.A** ne semble pas répondre aux exigences de ce matériau à la vue d'une usure très rapide. La fraise **E.C** en PCD conserve bien, dans un premier temps, ses propriétés physiques mais sa fragilité accélère l'abrasion des arêtes par la propagation de fissures dans la dent.

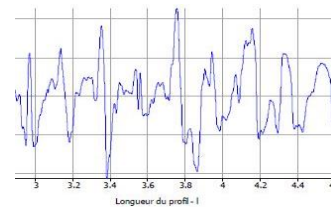
Etat de surface du substrat :

Il n'y a pas de critère de rugosité à respecter concernant la surface d'ébauche usinée puisque c'est la phase de finition qui génère la surface finale. Cependant, le critère de rugosité de surface est également un indicateur pour aider à la décision. Lorsque les outils sont neufs, les



Ra: 1.3699 μm
Rq: 1.8666 μm
Rz: 10.1668 μm

(a) Surface éprouvette après usinage (3h) – outil E.A



Ra: 2.9458 μm
Rq: 3.6457 μm
Rz: 17.0883 μm

(b) Surface éprouvette après usinage (3h) – outil E.B

Figure 1-18 : Etat de surface de l'ébauche

Usinage des matériaux composites

mesures de rugosité (R_A) des surfaces usinées sont respectivement de 0.48 et de 0.8 μm pour les outils **E.A** et **E.B**. En fin d'essais et après environ 3h d'usinage et d'usure, ces mesures sont respectivement de 1.37 et 2.94 μm (figure 1-18). L'outil **E.A** génère un meilleur état de surface que l'outil **E.B**.

4.3.2. Outils de finition

Tout comme pour les outils d'ébauche, l'étude d'usure des outils de finition commence par la mesure des arêtes de coupe avant leur utilisation (Tableau.1-6).

Tableau 1-6 : Mesures acuité d'arêtes - outils finition

Fournisseur	Ceratizit	OSG
Nom	F.A	F.B
Acuité(μm)	10	15

La figure 1-19 présente les évolutions de l'arête de coupe des deux outils de finition en fonction du temps d'usinage. Au regard des informations connues de la bibliographie, cela permet d'observer que :

- L'outil **F.A** suit une usure quasiment linéaire. Les dents droites de cet outil lui permettent de ne pas exercer de traction sur la fibre mais de cisailer nettement pour une faible usure et de rompre la fibre par compression lorsque son usure est prononcée.
- L'outil **F.B**, tout comme l'outil d'ébauche de sa marque, se dégrade en trois étapes et conserve une bonne acuité d'arête jusqu'à environ 140 minutes où le revêtement ne protège plus l'outil.

Selon la figure.1-19, l'outil **F.B** conserve une acuité d'arête inférieure à 4 fois le diamètre de la fibre de carbone (critère r_{finition}) pendant un peu plus de deux heures d'usinage alors que l'outil **F.A** atteint ce critère après environ 25 minutes d'usinage.

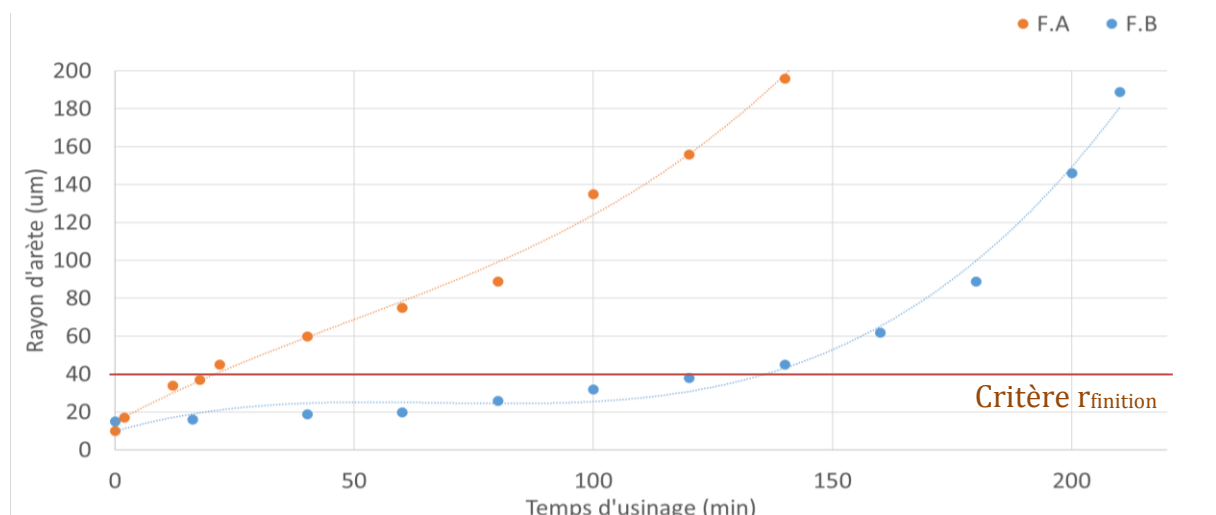
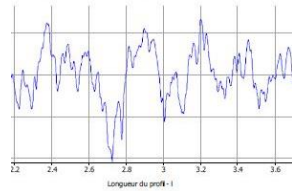


Figure 1-19 : Comparaison des outils de finition - Usure

Usinage des matériaux composites

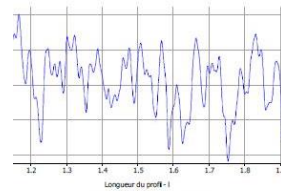
Etat de surface du substrat :

L'analyse de la rugosité de la surface, réalisé dans le sens de l'avance de l'outil, après 2 heures et demie d'usinage présentée *figure 1-20* permet de dire que l'outil **F.B** génère un $R_A = 0.6\mu m$ contre un $R_A = 0.95\mu m$ pour l'outil **F.A**. Tout comme pour la résistance à l'usure du rayon de bec, c'est l'outil **F.B** qui présente le meilleur résultat en termes d'état de surface.



Ra: 962.5350nm
Rq: 1.2297 μm
Rz: 5.7666 μm

(a) Surface éprouvette après usinage (2h30) – outil F.A



Ra: 592.0420nm
Rq: 765.4830nm
Rz: 3.7854 μm

(b) Surface éprouvette après usinage (2h30) – outil F.B

Figure 1-20 : Etat de surface

Ces résultats rejoignent les conclusions faites sur l'usure des outils d'ébauche. La technologie de revêtement diamant est nettement plus efficace pour les outils OSG que celle des outils CERATIZIT. Avec des conditions de coupe optimales, les outils OSG sont les plus performants des outils testés dans ces travaux. Pour donner suite à cette section, une analyse des

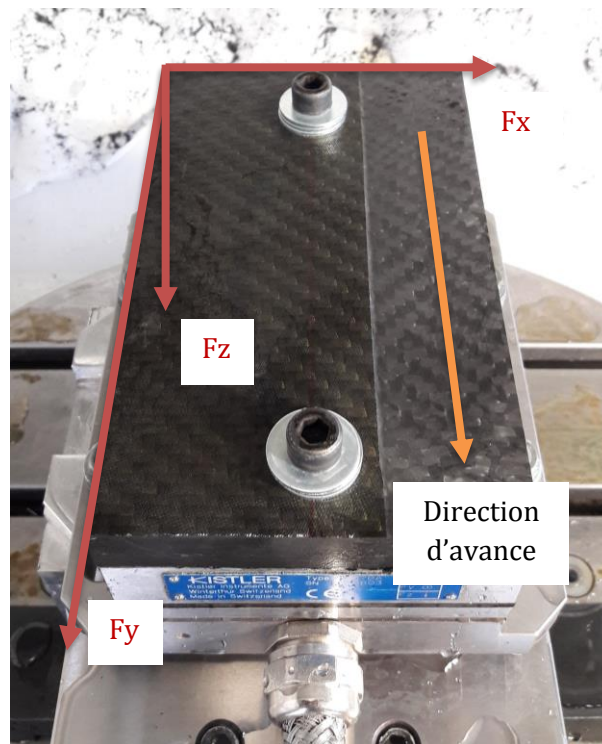


Figure 1-21 : Repère platine de mesure d'effort (Kistler) - mesure d'efforts

efforts de coupe est proposée. Liés à l'usure de l'outil, ces efforts vont confirmer les conclusions établies jusqu'ici et conforter les choix d'outils.

4.4. Analyses des efforts de coupe

La *figure 1-21* présente l'orientation du repère de la platine de mesure d'effort. L'axe « Y » de ce repère est confondu avec le sens d'avance de l'outil. En ayant connaissance des conditions de coupe optimaux pour chaque outil, nous relevons les efforts lors des essais d'usure.

4.4.1. Etude des relevés d'effort en Ebauche

La *figure 1-22* expose les efforts mesurés lors de l'usinage à travers une prise de vue du logiciel de suivi dynamique DynoWare. Ce relevé est celui d'une des premières passes de l'essai d'usure de l'outil **E.B**, quand l'intégrité de l'outil n'est pas encore endommagée par l'usinage du matériau. Les valeurs des efforts relevés par axe nous permettent de comprendre le processus de coupe et de comparer les effets des différentes géométries d'outils.

Le *tableau 1-7* récapitule les données d'efforts par axe pour chaque outil. Au regard des valeurs des efforts mesurés le long de l'axe X, l'outil **E.B** est celui qui engendre le moins d'effort radial au cours de l'usinage.

Les efforts portés par « Y » sont les efforts d'avance. L'effort d'avance est directement lié à la vitesse d'avance. On constate à travers le *tableau 1-7* que les deux outils de diamètre 10mm, génèrent des efforts d'avance similaires. L'outil **E.C** présente des efforts plus faibles en raison de son diamètre inférieur aux deux autres outils testés. Considérant une évolution de l'effort proportionnelle au diamètre, cet outil générerait l'effort le plus faible. Cependant, sa faible résistance à la rupture et son coût élevé ne permettent pas de le considérer pour la suite.

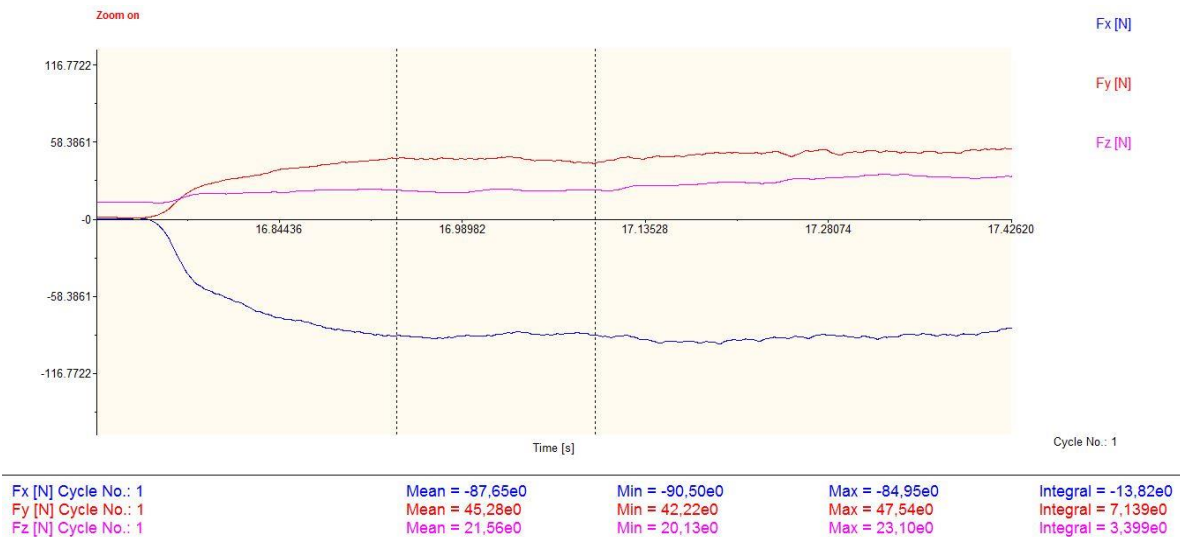


Figure 1-22 : Mesure des efforts de coupe - Outils d'ébauche E.B

Usinage des matériaux composites

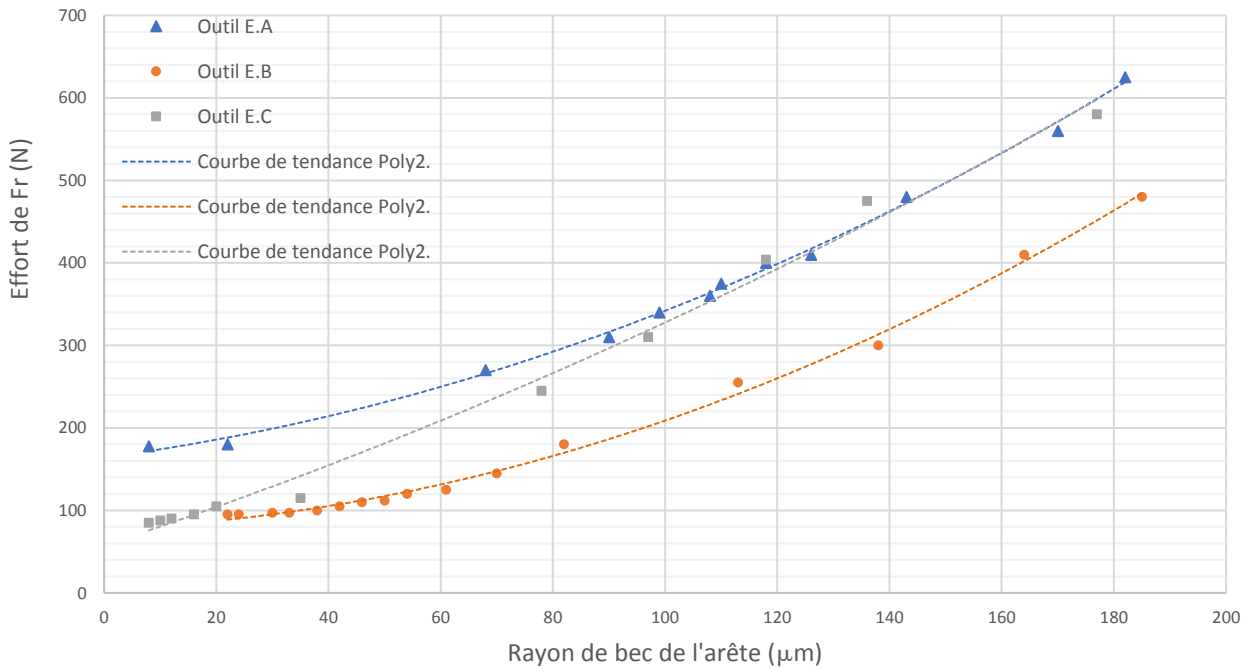


Figure 1-23 : Evolution de l'effort de coupe - Outils d'ébauche

L'effort axial porté par Z est fortement dépendant, comme annoncé dans la partie bibliographique, de l'angle d'hélice de l'outil. On constate que l'effort axial de l'outil PCD à denture droite génère pas ou peu d'effort axial. Contrairement aux outils carbures comme l'outil **E.A** qui, possédant un angle d'hélice élevé (45°), génère des efforts en Z de l'ordre de 100 N. Cet effort positif « tire » sur la pièce et favorise le délaminage. Le profil ravageur de l'outil **E.B** parvient à limiter cet effort axial à environ 14 Newton grâce à sa géométrie particulière.

Tableau 1-7 : Efforts de coupe moyen - Outils d'ébauche

OUTIL	\varnothing (mm)	Efforts d'usinage			Résultante F_r (N)	Wc Platine W/cm3.min
		F_x	F_y	F_z		
E.A	10	-168,05	45,46	-98,89	200,22	5,36
E.B	10	-89,86	45,84	13,70	101,80	1,69
E.C	8	-72,86	26,27	4,90	77,61	5,64

Afin de suivre l'évolution de l'effort de coupe résultant $F_R(N)$ en fonction de la durée de vie, la **figure 1-23** le présente en fonction de l'acuité d'arête. Il apparaît dans ce graphique que le rayon de l'arête de coupe a une influence quasi proportionnelle sur la valeur de l'effort. Pour les mêmes valeurs d'acuité d'arête, c'est l'outil **E.B** qui génère le moins d'effort et ce pendant toute sa durée de vie. L'outil **E.C** génère des efforts relativement faibles en début de son utilisation mais la pente d'évolution de l'effort est plus importante que celle de l'outil **E.A**. Pour des rayons de bec supérieurs à $100\mu m$, ils ont tous deux les mêmes valeurs d'efforts de coupe. Ces informations confirment les conclusions de la section 4.3.1 (**figure 1-17**) qui analyse l'usure de l'outil sur la base du critère du rayon de bec de l'arête.

4.4.2. Etude des relevés d'effort en Finition

De la même façon, les efforts présentés dans le *tableau 1-8* sont mesurés lors des premiers essais d'usure. Lorsque l'usure n'a pas endommagé l'arête de coupe.

Tableau 1-8 : Effort de coupe moyen - outil de finition

OUTIL	EFFORTS D'USINAGE (N)						RESULTANTE FR (N)	E _{TYPE} (N)	WC PLATINE W/CM3.MIN
	F _X	E _{type}	F _y	E _{type}	F _z	E _{type}			
F.A	-3,12	0.21	-6,96	0.36	16,46	2.1	18,14	1.96	30,3
F.B	-1,16	0.03	-3,33	0.25	8.93	1.71	9,60	1.67	27.9

La méthode COM a permis d'identifier des conditions de coupe optimales qui sont respectés pour les relevés du *tableau 1-8*. Les vitesses d'avances des deux outils de finition **F.A** et **F.B** sont respectivement de 0.08mm/dent et 0.09mm/dent.

L'effort suivant Z est positif c'est-à-dire que les outils poussent la matière. L'arête de coupe entre en contact avec la matière et, dans un premier temps, repousse la matière par compression avant d'entamer le processus de coupe. Pendant cette compression, la matière exerce un effort sur la face de dépouille et favorise l'effort en Z positif. Pour l'outil F.B, sa denture hélicoïdale permet de limiter cet effort car une fois le processus de coupe entamé, la dent exerce une traction de la matière et donc un effort en Z négatif. Alors que l'outil F.A à denture droite, génère uniquement un effort en Z positif du au retour de la matière. Il possède un effort en Z deux fois plus élevé que l'outil **F.B**.

Comme pour l'ébauche, c'est l'outil OSG (**F.B**) qui engendre les efforts de coupe les plus faibles. Cependant, en analysant l'évolution de cet effort de coupe en fonction de l'usure de l'outil (*figure 1-24*), cet écart constaté en début d'usinage s'inverse avant l'usure totale de l'outil. La pente de la courbe de tendance quasi-linéaire de l'outil **F.A** est plus faible que celle de l'outil **F.B**. Or, en section 4.3.2 (*figure 1-19*), l'augmentation de l'acuité d'arête de l'outil **F.B** évolue plus lentement que celle de l'outil **F.A**.

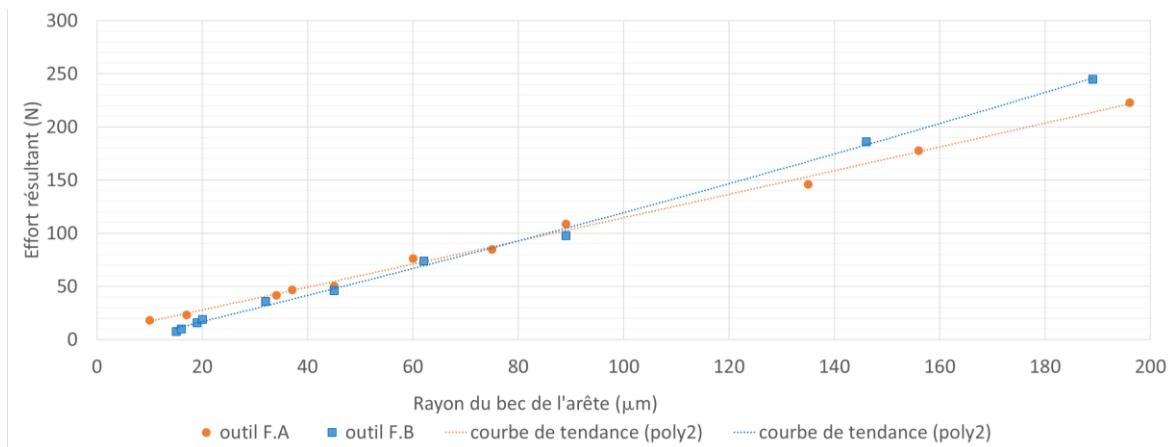


Figure 1-24 : Evolution de l'effort de coupe - Outils de finition

Comme pour l'ébauche, l'outil **F.B** obtient de meilleurs résultats. Les efforts sont moindres ainsi que l'énergie spécifique de coupe pour des acuités d'arête similaires.

4.5. Confrontation bibliographie

Dans cette section, les informations relatives aux paramètres d'outils, aux conditions de coupe et aux critères d'état de surface seront rappelés et analysés en fonction des connaissances bibliographiques pour faire ressortir de nos travaux des éventuels cas particuliers ou encore pour confirmer des préconisations de la bibliographie.

Dans un premier temps, nous avons choisi plusieurs outils à comparer pour les deux phases d'usinage de la gamme (Ebauche et Finition). Ensuite, par l'application d'une méthode couple outil/matière, les conditions de coupe ont été identifiées (*tableau 1-9*). Les vitesses de coupe en ébauche sont de l'ordre de 125m/min pour des avances de 0.15mm/dent, amenant à une usure contrôlée dans le temps. Pour les outils sphériques et la phase de finition, les vitesses de coupe sont plus élevées allant jusqu'à 220m/min et les avances sont plus faibles ce qui diminue la rugosité de surface en accord avec [PUW_98].

Concernant les efforts relevés pendant l'usinage, ils dépendent fortement de la géométrie des outils en plus des paramètres de coupe. La géométrie à denture hélicoïdale de l'outil **E.A** génère des efforts axiaux qui représentent 50% des efforts résultants, alors que les autres outils d'ébauche génèrent un effort suivant « Z » qui représente seulement 15% des efforts résultants deux fois moins élevés. Il faut 2H45 à l'outil **E.B**, au profil ravageur, pour atteindre le critère d'usure contre une dizaine de minutes pour l'outil **E.A** à denture hélicoïdale. L'outil PCD parvient à conserver une bonne acuité d'arête pendant environ 1h30 mais son caractère fragile engendre des fissures le long de l'arête de coupe. Au-delà du coût élevé de cette technologie d'outil, ce comportement lui enlève toute compatibilité avec le cas d'application. Ici, et contrairement aux conclusions de la bibliographie, l'outil PCD se voit moins résistant à l'usure par abrasion que l'outil carbure OSG avec un revêtement diamant. Comme le soulignent également certaines références bibliographiques ; [CAB_06] et [CAB_08].

Pour les outils de la phase de finition, c'est l'inverse, le fait d'incliner l'axe outil de 25° par rapport à l'axe Z et dans le plan ZX (*figure 1-21*), modifie l'orientation de l'hélice par rapport à la fibre et c'est l'outil **F.A**, à une denture droite, qui génère le plus d'effort axial. La bibliographie ne prenait pas en compte le paramètre d'inclinaison de l'outil.

L'acuité d'arête qui fait l'objet de beaucoup de commentaires dans la littérature n'est pas le seul paramètre influençant les efforts de coupe. La corrélation entre l'acuité de l'arête et les efforts de coupe est visible dans notre étude. Cependant, les outils les plus performants en termes d'usure et de minimisation des efforts sont les outils OSG, qui ont initialement les rayons d'arête de coupe les plus grands. Dans le temps, ce sont ces outils qui conservent le mieux leur acuité d'arête. Selon nos travaux, l'effort de coupe serait plus sensible au nombre de dents ou encore à la géométrie de l'outil en accord avec [SHE_09].

Usinage des matériaux composites

Tableau 1-9 : Récapitulatif informations outils

Paramètres \ outils	E.A(Ceratizit)	E.B(OSG)	E.C(Masnada)	F.A(Ceratizit)	F.B(OSG)
<i>Matériau outil</i>	Carbure / Rev. diamant	Carbure / Rev. diamant	PCD	Carbure / Rev. diamant	Carbure / Rev. diamant
<i>Acuité d'arête (μm)</i>	5	24	8	10	15
<i>Angle d'hélice ($^\circ$)</i>	45	-	0	0	-
<i>Angle de coupe ($^\circ$)</i>	8	-	-	15	-
<i>Nb dents</i>	4	7	2	6	2
<i>V_c min (m/min)</i>	125	125	180	220	180
<i>f_z min (mm/dt)</i>	0.15	0.12	0.16	0.08	0.09
<i>Phase d'usinage</i>	Ebauche	Ebauche	Ebauche	Finition	Finition
<i>Orientation axe outil ($^\circ$)</i>	-	-	-	25	25
<i>Diamètre (mm)</i>	10	10	8	10	10
<i>A_e (mm)</i>	5.25	5.25	4.2	0.5	0.5
<i>A_p (mm)</i>	3	3	3	0.1	0.1
<i>Convention (avalant/opposition)</i>	95%/2.5%	95%/2.5%	95%/2.5%	100%/0%	100%/0%
<i>Temps Usure (min)</i>	10	170	100	25	120
<i>Ra (μm)</i>	(2h30) 1.37	(2h30) 2.94	-	(2h) 0.95	(2h) 0.6
<i>RMS (μm)</i>	30	30	-	24	24
<i>Effort de coupe FC (N)</i>	200	100	80	20	10
<i>Effort axial FZ (N)</i>	100	15	5	18	9

Le tableau ci-dessus regroupe toutes les informations connues pour chaque outil testé. Les données fabricants, les données mesurées et les conditions de coupe déterminées par la mise en place d'une méthode COM.

Les paramètres qui permettent de fixer le choix des outils sont ceux encadrés en rouge dans le *tableau 1-9* : Le temps d'usinage avant d'atteindre le critère d'usure, les critères *Ra* et RMS, les efforts de coupe dont les efforts axiaux. Ce sont donc les outils de la marque OSG qui sont sélectionnés pour la suite des travaux. Ils possèdent un revêtement diamant qui résiste au caractère abrasif du matériau de l'application, il résiste même mieux que certains PCD qui sont connus pour leur résistance à l'abrasion.

5. Conclusion

L'usinage d'un matériau composite est complexe du fait de son caractère hétérogène et multi-matériau. Le composite Carbone/Epoxy est particulièrement abrasif par sa fibre à très haut module. Il est donc nécessaire de réaliser une étude expérimentale pour étudier les phénomènes d'usure et les interactions que présente ce couple outil/matière.

Cette première partie a permis de mettre en évidence les facteurs et paramètres importants dans l'usinage des composites. Elle a aussi posé les bases de la recherche d'outils et la méthodologie de sélection de l'outil optimum par phase d'usinage. La méthode COM a été utilisée dans ces travaux pour déterminer les conditions de coupe idéales pour plusieurs outils. Des essais d'usure ont complétés l'étude pour analyser le comportement des outils dans le temps.

Ainsi, les géométries d'outil, les conditions de coupe, les efforts de coupe, les dégradations de l'outil et du matériau en passant par une analyse de l'état de surface, l'ensemble de ces informations ont été des données importantes pour comparer le lot d'outils sélectionnés sur la base des informations bibliographique présentées en première partie de ce chapitre.

Ce premier chapitre constitue une base à la compréhension des phénomènes mécaniques qui régissent l'enlèvement de matière d'un matériau composite ainsi que les phénomènes d'usure et de dégradations de l'outil et de la matière. Ces données permettront de comprendre certains phénomènes observés lors de l'intégration du processus d'usinage dans une solution robotisée.

Pour la mise en place d'une stratégie d'usinage optimale, déterminer les bons outils et les bonnes conditions de coupe ne suffit pas. Il faut également définir des trajectoires cohérentes avec le contexte et gérer le bon positionnement et l'orientation de l'outil par le moyen d'usinage. Car c'est à cela que le deuxième chapitre va s'attacher. Définir une stratégie d'usinage optimale et complète mais également s'assurer de la capacité du moyen robotisé à réaliser les trajectoires commandées et dans le cas contraire proposer des solutions d'amélioration pour garantir un usinage qui respecte les critères géométriques de la pièce.

II. Amélioration de la précision d'un robot industriel

1.	LES ROBOTS INDUSTRIELS USINEURS.....	66
1.1.	Le robot dans l'industrie.....	66
1.2.	Un centre d'usinage flexible, conséquence d'une géométrie sérielle.....	67
1.3.	Précision et répétabilité.....	69
1.4.	Analyses des sources d'erreur de positionnement.....	70
1.4.1.	<i>Erreurs liées au robot</i>	70
1.4.2.	<i>Erreurs dépendantes du process d'usinage</i>	72
2.	AMELIORATION DE LA PRECISION STATIQUE DES ROBOTS.....	73
2.1.	Modélisation et correction paramétrique.....	73
2.2.	Modélisation en raideurs.....	75
2.3.	Modélisation en effort.....	77
2.4.	Correction en temps réel.....	78
3.	SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE – ORIENTATION DE L'ETUDE.....	79
4.	CALIBRATION DU ROBOT KUKA KR360	80
4.1.	Méthode de correction paramétrique des robots.....	80
4.2.	Modélisation du robot.....	82
4.2.1.	<i>La modélisation robotique</i>	82
4.2.1.1.	La méthode de D-H modifiée.....	82
4.2.1.2.	Modèle de Hayati.....	84
4.2.1.3.	Autres modèles complémentaires.....	85
4.2.1.4.	Synthèse.....	85
4.2.2.	<i>Modélisation du robot KUKA KR360</i>	85
4.2.2.1.	Repères et paramètres.....	87
4.2.2.2.	Modèle géométrique direct (MGD).....	88
4.3.	Optimisation des paramètres géométriques.....	89
4.3.1.	<i>Calcul de la matrice jacobienne des paramètres</i>	91

Amélioration de la précision d'un robot industriel

4.4.	Identifiabilité des paramètres géométriques	92
4.5.	Mise en pratique et développement numérique pour la correction paramétrique.....	95
4.6.	Expérimentation et résultats	97
4.6.1.	<i>Paramètres de la correction</i>	97
4.6.2.	<i>Mesures des positions</i>	98
4.6.3.	<i>Résultats</i>	100
4.7.	Limites de la compensation	103
5.	CONCLUSION	103

Amélioration de la précision d'un robot industriel

Devenu incontournable pour une industrie qui recherche l'agilité et l'adaptabilité de ses moyens de productions, le robot industriel fait l'objet de travaux scientifiques qui abordent différents axes de recherche pour en améliorer les caractéristiques de précision. Ce chapitre présente une méthode d'amélioration de la précision de pose appliquée à la cellule robotisée de l'étude.

Dans un premier temps, une synthèse de l'histoire des robots industriels est faite avant de présenter la cellule robotisée utilisée dans ces travaux. Puis, une analyse des sources d'erreur de positionnement est proposée afin de comprendre les différents phénomènes qui induisent une déviation de l'effecteur final.

Dans un second temps, un état de l'art présente les différentes méthodes d'amélioration de la précision de pose d'un robot. Sur la base de cette bibliographie, une méthode d'optimisation de la précision absolue est identifiée comme répondant à nos besoins.

Le dernier temps présente l'application d'une méthode de correction paramétrique sur le robot étudié. Un comparatif est fait entre la précision de pose initiale et celle obtenue après l'expérimentation avant de conclure sur les bénéfices de cette méthode et de proposer un axe de recherche complémentaire d'amélioration du suivi de trajectoire.

1. Les robots industriels usineurs

Un robot est défini comme étant un appareil automatique capable de manipuler des objets, ou d'exécuter des opérations selon un programme fixe ou modifiable. Cette définition du Larousse est bien moins détaillée que celle faite par l'Association Française de Normalisation (AFNOR) qui définit un robot comme étant 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. Plus complète, cette définition rappelle les caractéristiques essentielles d'un système pour répondre au nom de robot. Elles sont principalement résumées comme étant la flexibilité et l'adaptabilité.

1.1. Le robot dans l'industrie

C'est en 1954 que remonte l'exposition du premier robot industriel par George Devol. Du nom de UNIMATE, ce premier robot est installé dans les usines de General Motors en 1961 pour extraire des pièces d'une machine de moulage sous pression [SIC_08]. Ce n'est qu'en 1973 que la société ASEA (aujourd'hui ABB) présente le premier robot commandé par un microprocesseur qui permet notamment le mouvement en trajectoire continue, indispensable pour des applications de soudage ou d'usinage, le IRB-6 (*figure 2-1*).

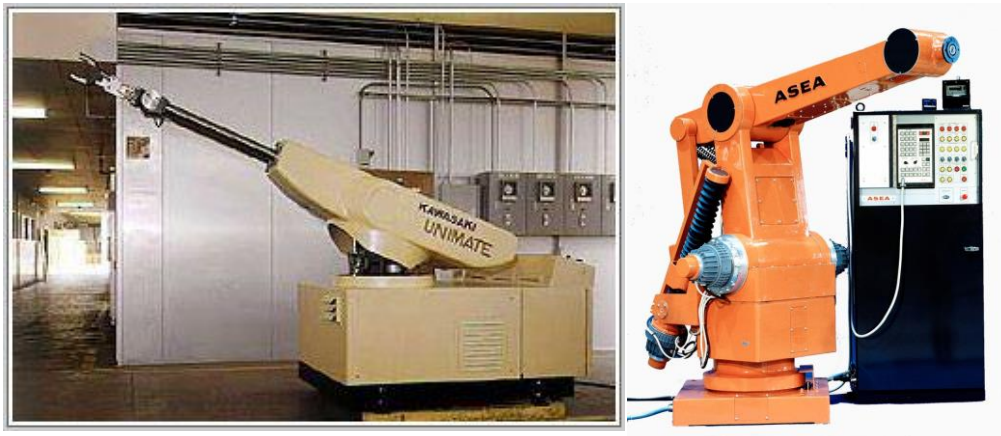


Figure 2-1 : Premiers robots industriels - UNIMATE (à gauche) - IRB-6 (à droite)

Après cela, les industriels ont développé l'automatisation pour répondre à des problèmes de qualité, de productivité et de coût. La robotisation est vite devenue une méthode d'automatisation de référence pour tout type d'industrie. Leur nombre d'intégration reste en constante augmentation comme le montre la *figure 2-2*. L'évolution du nombre d'installation a doublé en cinq ans et les estimations de la Fédération Internationale de Robotique (IFR) prévoient que cette donnée continue d'augmenter dans les années à venir.

Les robots sont initialement conçus pour des opérations industrielles simples, répétitives et fastidieuses. Ce sont des applications peu exigeantes en précision de pose et en suivis de trajectoire. Cependant, les nombreux avantages du robot séduisent rapidement les industriels du domaine de l'usinage qui voient à travers une telle machine, une adaptabilité et une opérabilité

Amélioration de la précision d'un robot industriel

bien supérieure à la plupart des machines-outils sans parler de l'avantage économique d'un tel choix. Depuis la fin des années 1990, les robots industriels prennent le rôle de centres d'usinage pour des opérations de pré-usinage, perçage, polissage, découpage, etc. Ils sont peu rigides et caractérisés par une faible précision de pose malgré une répétabilité de l'ordre du dixième de millimètre [BRE_06].

Il y a une dizaine d'années, le parc robotique consacré à l'usinage représentait environ 3% des installations robotiques dans le monde [MIL_10]. De nos jours, ce chiffre a peu évolué et se rapproche de 4% [IFR_20]. Ce qui correspond à une faible demande pour les constructeurs et fabricants de robots qui n'ont pas encore réalisé une gamme de robots dédiée à l'usinage de haute précision révélant des caractéristiques de rigidité et de contrôle d'une position précise. Les progrès dont jouissent les derniers modèles de robots sont uniquement dues aux avancées technologiques des différents composants. Il n'y a pas encore eu de remise en cause des systèmes articulaires ou des systèmes d'asservissement et de commande pour présenter une machine spécifique à ce métier de fabrication par enlèvement de matière.

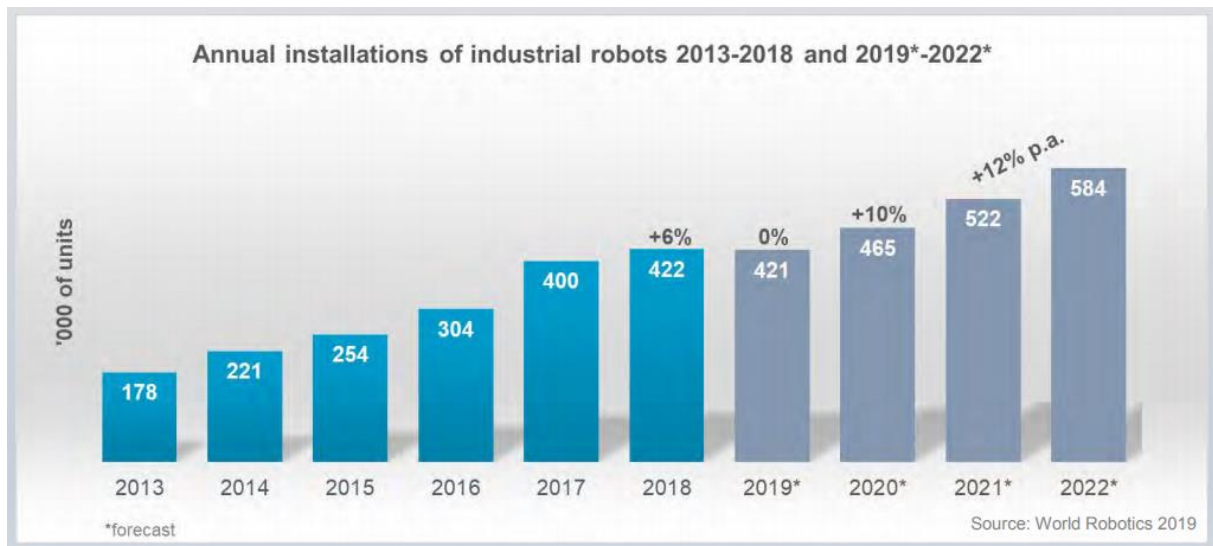


Figure 2-2 : Nombre d'installation de robots dans le monde [IFR_20]

1.2. Un centre d'usinage flexible, conséquence d'une géométrie sérielle

Une cellule robotisée, telle que celle utilisée dans nos travaux et présentée par la *figure 2-3* est normalement constituée de trois éléments : Un robot, une pièce à usiner et un effecteur (outil). L'effecteur est fixé en bout du dernier axe (6^{ème} axe dans notre cas) pour exécuter une tâche spécifique, comme : La préhension, le perçage, le ponçage ou ici, l'usinage avec un outil coupant. Une particularité de la cellule étudiée est qu'elle possède un plateau diviseur en guise de septième axe (*figure 2-3*). Cet élément est nécessaire à la réalisation des moules de réflecteurs, pièce de révolution pouvant mesurer jusqu'à quatre mètres de diamètres. Ce robot est piloté à l'aide d'une commande SIEMENS 840D.

Amélioration de la précision d'un robot industriel

Le robot KUKA KR360 R2830 F utilisé est un robot manipulateur sériel à chaîne ouverte (*figure.2-3*). Il possède six corps notés C0, C1, ..., C6 supposés rigides dans cette étude et six articulations rotoïdes. Il est dimensionné avec pour charge maximale, en bout du corps C6, de 360Kg et il possède un rayon d'action de 2826mm.

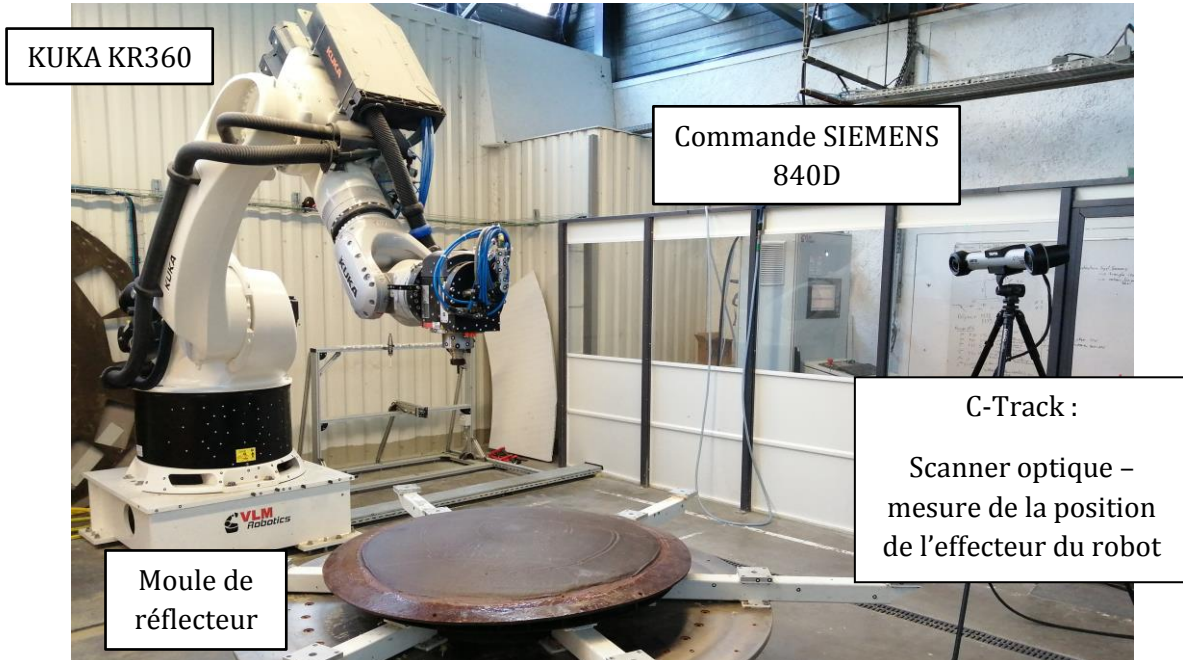


Figure 2-3 : KUKA KR360 et système de mesure

Il possède 6 degrés de liberté (ddl), les trois premiers sont le « porteur » du robot et les trois derniers sont le « poignet ». L'effecteur du robot est une électrobroche à refroidissement par fluide de marque HSD, elle pèse 42 Kg et délivre une puissance maximale de 14kW pour une rotation maximale de 12000tr/min.

En statique, le critère de performance visé est la précision de pose cependant, cette information n'est pas communiquée par le constructeur. Bien que le robot soit répétable au dixième de millimètre, son erreur de pose sera mesurée par la suite pour quantifier cette précision initiale.

La *figure 2-3* illustre également le scanner C-Track de marque Ametek utilisé dans ces travaux. Il permet de mesurer la position réelle de l'effecteur du robot par rapport au repère atelier. Il est caractérisé par une précision de +/-0.15mm, une enveloppe de travail de 8m³ et une période d'acquisition de 32ms.

L'usinage avec un robot permet de réaliser des pièces de grandes dimensions et de formes complexes [OLA_11]. Cependant, l'usinage de pièces en matériau composite apporte une difficulté supplémentaire. Comme décrit dans le premier chapitre, ces matériaux sont difficiles à usiner en raison de leur hétérogénéité et de la présence de renforts fibreux fortement abrasifs.

L'application étudiée dans ces travaux est exigeante en termes de précision d'usinage (RMS géométrique < 0.05mm), ce qui n'est pas initialement compatible avec un usinage robotisé.

Ainsi, il est important d'expliquer la notion de précision de pose avant d'étudier les causes du défaut de positionnement des robots industriels.

1.3. Précision et répétabilité

La répétabilité est un critère de performance des robots (*figure 2-4*), il s'agit d'une mesure de reproductibilité de la même pose du robot pour la même configuration (positions articulaires). Elle est de l'ordre de 0.03 à 0.1mm respectivement pour les petits et moyens porteurs. Dans certains cas, elle est supérieure à 0.2mm pour des gros porteurs, ces derniers sont réservés à des applications nécessitant le transport de lourdes charges ou la résistance à de grands efforts externes comme l'usinage par frottement-malaxage, ou FSW (Friction Stir Welding) [QIN_13]. Debaise [DEB_06], dans son étude d'un robot à structure parallèle, déclare que l'origine des défauts de répétabilité sont causés par de mauvais réglages des asservissements ou certains phénomènes non-géométriques comme les frottements ou les jeux fonctionnels dans les articulations. Le défaut de répétabilité n'est, par conséquent, pas modélisable et très difficile à corriger dans la pratique.

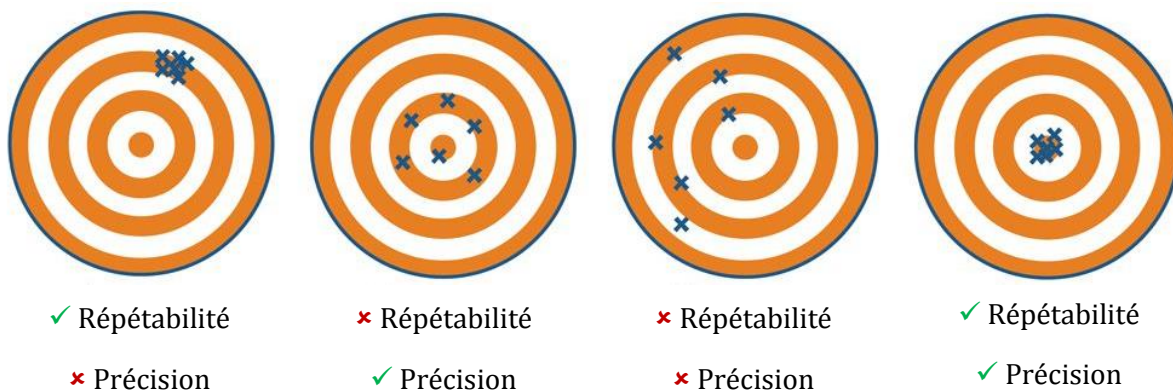


Figure 2-4 : Définition - Précision et répétabilité [OLA_11]

Les déviations de positionnement en revanche ne sont pas aléatoires, contrairement au défaut de répétabilité. Il est assignable à un grand nombre de sources d'erreur. Cette précision de pose, appelée aussi exactitude de pose, est définie par la norme [ISO_16], comme étant l'écart entre la position commandée et la moyenne des positions atteintes (*figure 2-4*). Cette erreur est souvent de quelques millimètres. L'erreur de positionnement statique d'un robot résulte en grande partie de la différence qui existe entre le modèle nominal du robot, implémenté dans le contrôleur du robot, et le robot réel [DOM_88].

La précision dynamique, elle, définit la capacité du robot à suivre une trajectoire sans déviation. Elle est fonction des mêmes sources d'erreurs que la précision statique bien que les paramètres dynamiques du système influencent également cette dernière caractéristique.

Contrairement aux premières techniques de programmations par apprentissage manuel, qui visaient à apprendre manuellement des points de passage d'une trajectoire désirée et où seul le critère de répétabilité était important pour réaliser au mieux la tâche apprise. La Programmation Hors Ligne (PHL), qui apparait dans les années 80, demande une précision de pose bien plus fine pour réaliser les trajectoires programmées. La modélisation de la cellule robotisée prend seulement en compte le modèle nominal du robot (Modèle géométrique direct), et les représentations CAO nominales des pièces (outils et composants de la cellule et de leur positionnement relatif). Les erreurs de fabrications des éléments constitutifs du robot et les erreurs d'assemblages ne sont pas prises en compte dans ces valeurs nominales, que l'on peut qualifier de « parfaites ». De plus, la géométrie sérielle d'un robot anthropomorphe peut conduire à des cumuls d'erreurs et à des amplifications du défaut. Pour améliorer la précision statique du robot, une analyse des différentes sources d'erreurs est nécessaire.

1.4. Analyses des sources d'erreur de positionnement

1.4.1. Erreurs liées au robot

L'exactitude d'un robot est directement liée à sa chaîne cinématique qui relie sa base au point du centre outil (TCP). Sa construction et son assemblage complexe et multi-éléments le rendent plus souple qu'une machine-outil 3 ou 5 axes. Deux types d'erreurs dans la structure mécanique du robot se distinguent [HAG_12] : Les erreurs géométriques et non géométriques. Les premières découlent d'erreurs d'assemblage ou de fabrication des éléments constitutifs du robot. Souvent corrigée par l'étalonnage (ou correction paramétrique), seule l'erreur liée aux non-linéarités des engrenages est difficile à corriger puisqu'elle est fonction de la posture du robot. Les erreurs non-géométriques, également dépendantes de l'environnement de la tâche, tel que le contact, ne sont pas corrigées par l'étalonnage. Elles résultent de déformations structurelles des composants, liaisons et des dispositifs de transmission d'énergie mais également de l'usure. Plus globalement elles sont fonction de la raideur non linéaire du robot. L'écart de précision en statique a de nombreux facteurs que l'on classe donc en deux catégories : les facteurs géométriques et les facteurs non-géométriques.

1. Sources des erreurs géométriques :
 - Paramètres du modèle géométrique imprécis : Les erreurs dues aux tolérances de fabrication et les erreurs de montage et d'assemblage.
 - Mauvaise définition de l'organe terminal et/ou des axes supplémentaires (plateau rotatif dans le cas cette étude).
 - Offset des axes imprécis : Les écarts entre la position zéro de l'axe par le contrôleur et la réelle position de l'axe.
2. Sources des erreurs non-géométriques :
 - Jeux fonctionnels dans les articulations
 - Souplesses dans les bras et les articulations

Amélioration de la précision d'un robot industriel

- Effets thermiques

Il est difficile de quantifier la part de contribution de chacun de ces facteurs d'erreur sur la précision de pose en statique du robot. Cette contribution varie selon la taille du robot, sa qualité de fabrication et d'assemblage mais également de son volume de travail car les défauts d'articulations et de souplesses augmentent en fonction du bras de levier. Dans sa thèse [DAM_96] présente un bilan de l'effet des différentes sources d'erreurs sur la précision du robot ACMA SR400 à vide. Les souplesses dans les bras et les articulations sont responsables de 1 à 5 mm de l'erreur de pose en fonction des efforts externes. Les défauts angulaires des articulations (parallélisme ou perpendicularité) sont la cause d'environ un dixième de millimètre. 1 à 3mm serait la valeur de l'erreur causée par les défauts d'offset et la justesse des codeurs angulaires engendrerait entre 0.5 et 1.5mm d'erreurs de positionnement de l'organe terminal en fonction du bras de levier [DAM_96].

Ces données, issues de l'étude d'un robot relativement ancien, permettent de mettre en évidence la part d'influence des sources d'erreurs pour un robot industriel. Le cas d'étude concerne un robot qui possède des raideurs de bras et articulaire supérieures au robot ACMA. Il faut retenir de cette analyse que la souplesse d'un robot industriel est une des causes les plus influente sur l'erreur de pose. Et que les autres facteurs les plus influent appartiennent à la catégorie des erreurs géométriques.

Selon [MUS_10], la souplesse des liaisons serait responsable de 8 à 10% de l'erreur de position et d'orientation du TCP. En plus de cette erreur en statique, la souplesse des articulations entraîne une vibration de la structure lorsqu'elle est en mouvement. Les variations de charge et d'accélération au TCP génèrent des phénomènes de résonances visibles sur ces structures qui possèdent un faible amortissement [MEJ_16]. Ces phénomènes vibratoires comme le broutement (Chatter en anglais) sont entraînés par des vibrations de la structure, induites par le processus de coupe et dont l'amplitude augmente à mesure que la fréquence de sollicitation se rapproche des fréquences propres du robot. Une conséquence possible du phénomène de broutement sur l'état de surface de la pièce est présentée dans le cercle rouge de la *figure 2-5* [PAN_06].

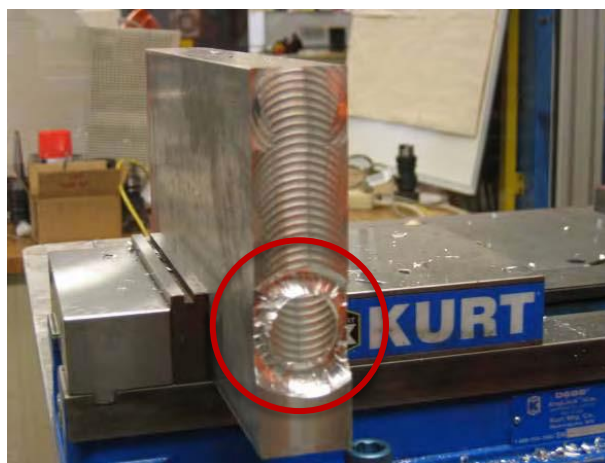


Figure 2-5 : Phénomène de broutement sur une pièce usinée par un robot anthropomorphe - [PAN_06]

Amélioration de la précision d'un robot industriel

La dérive thermique est en grande partie due à l'augmentation de la chaleur dans le système provoqué par l'utilisation prolongée des moteurs et réducteurs. Elle dépend des caractéristiques de dilatation des composants du système et conduit à une déformation de la chaîne cinématique du robot. Cette erreur atteint son maximum après plusieurs heures d'utilisation du robot. Le robot utilisé dans la présente étude est équipé d'articulation rotoïde à surpression d'air. Cette technologie est initialement conçue pour éviter aux impuretés de pénétrer dans les articulations et de les dégrader dans le temps. Elle a donc la particularité de faire circuler de l'air dans les articulations et de réguler la température des éléments électriques et mobiles et de réduire considérablement ce phénomène de dilatation thermique.

1.4.2. Erreurs dépendantes du process d'usinage

Dans le procédé d'usinage robotisé, la structure du robot est soumise à plusieurs types de sollicitations : Les efforts de coupe, les efforts d'inertie des masses en mouvement, le poids de la structure et de l'électrobroche. Les efforts d'usinage sont la principale source d'erreur de positionnement. Pour du fraisage d'aluminium, par exemple, ces efforts de coupe peuvent atteindre des centaines de Newtons et induire une déviation moyenne de 1mm au niveau de l'outil selon [ZHA_05]. Cette valeur d'effort d'usinage dépend principalement du matériau usiné et des conditions de coupe ; vitesse de rotation de la broche, profondeur de coupe, largeur de coupe qui déterminent un taux d'enlèvement de matière et une valeur spécifique de coupe. Le système de lubrification influence également l'effort d'usinage en même temps que la qualité de surface. En général, l'avance de l'outil est constante dans un tel processus contrairement aux autres paramètres qui peuvent varier. Ces variations font évoluer l'effort de coupe et mettent en place un phénomène dynamique de vibrations pouvant aller jusqu'au phénomène de broutement extrêmement néfaste pour la qualité de la surface usinée [PAN_06].

L'amélioration de la précision des robots industriels est un sujet répandu depuis l'arrivée des robots dans l'industrie. Cette préoccupation tente de répondre aux exigences des procédés qui sont grandissant. Cette optimisation des robots peut se faire selon plusieurs axes :

- Améliorer la qualité de fabrication des composants du robot pour diminuer les erreurs de tolérances et réduire les défauts d'ordre géométrique.
- Rigidifier la structure du robot sériel, c'est le cas des robots à structures en parallélogramme. Cette structure permet de diminuer les souplesses du robot, elle engendre néanmoins une augmentation du nombre de liaison et de frottement et diminue la rapidité d'exécution de la tâche [MAR_08].
- Améliorer la justesse des codeurs par exemple en ajoutant un deuxième jeu de codeur pour contrôler la position angulaire des axes [AMB_17]. Cette modification entraîne un surcoût et un traitement plus long des informations des codeurs.

Ces méthodes impliquent une modification de la conception même du robot. Il existe également des méthodes d'amélioration de la précision de pose du robot qui ne nécessitent pas de modification de la structure mécanique ou de la conception du robot en lui-même. Ces propositions d'amélioration sont présentées dans la prochaine section.

2. Amélioration de la précision statique des robots

Les différentes méthodes visant à améliorer la précision d'un robot industriel sont nombreuses dans la littérature. Souvent scindées en deux catégories, les corrections hors ligne et les corrections en ligne. Elles ont pour objectif de réduire les erreurs de pose et de suivis de trajectoire et pour cela, elles s'attachent à réduire des sources d'erreur bien distinctes. Une revue bibliographique présentée dans cette section se focalise sur les méthodes les plus utilisées dans ce contexte :

- **La correction paramétrique et la modélisation en raideurs** qui sont des corrections hors ligne.

- **La modélisation en effort** qui permet de réduire les déviations de trajectoire. Cette correction peut s'appliquer en ligne et/ou hors ligne.

- **La correction en ligne.**

Ces méthodes sont d'ores et déjà utilisées dans l'industrie ou la recherche en laboratoire. Elles sont plus ou moins efficaces et simples à mettre en place dans un contexte d'usage industriel.

2.1. Modélisation et correction paramétrique

Le robot industriel est accompagné d'une commande intégrant son modèle géométrique et ses paramètres géométriques. Les valeurs théoriques de ces paramètres données par le constructeur ne tiennent pas compte des erreurs de fabrication et d'assemblage. L'objectif d'une correction paramétrique (ou étalonnage) est d'identifier et de corriger les erreurs géométriques du robot et ainsi améliorer la précision absolue de la pose [DUB_06]. Le premier avantage est d'augmenter la précision absolue du robot. Pour cela, la position réelle de l'organe terminal du robot doit être proche de celle calculée par le modèle mathématique de ce dernier. L'étalonnage d'un robot usineur, ou de n'importe quelle machine-outil, conditionne la justesse de l'outil de programmation hors-ligne associé au moyen.

L'étalonnage d'un robot peut se faire pour différents objectifs, du simple réglage des zéros de chaque codeur articulaire jusqu'à la mesure de l'ensemble des paramètres géométriques et dynamiques à travers la modification des différents modèles du robot. En général, il désigne uniquement l'identification des paramètres géométriques.

Un étalonnage géométrique s'appuie sur quatre étapes [NUB_13] :

1. La modélisation, qui permet d'exprimer la configuration cartésienne du robot en fonction des paramètres géométriques.
2. La désignation des paramètres identifiables.
3. L'identification des paramètres à partir d'un algorithme de minimisation.

Amélioration de la précision d'un robot industriel

4. La compensation, modification des paramètres géométriques au sein de la commande du robot.

La troisième étape de ce processus nécessite des mesures externes de la position du repère final du robot pour déterminer les écarts de positionnement et alimenter l'algorithme de minimisation.

Plusieurs systèmes de mesure permettent de réaliser un étalonnage [SLA_12]. La plupart du temps, ce sont des machines de mesure 3D qui sont utilisées : Capteurs de photogrammétrie, Laser tracker, télescopique Ballbar, interféromètre laser, système de triangulation optique, etc. Dans ses travaux, Nubiola & Al, compare deux moyens de mesures pour une calibration utilisant le même modèle à 30 paramètres identifiés. Il conclue qu'il n'y a pas d'avantage à utiliser un Laser tracker devant une machine de mesure tridimensionnelle optique (MMT). Les résultats validés avec un ballbar télescopique révèlent un gain de précision de pose identique quel que soit le moyen utilisé [NUB_13]. Cependant le suivi de la position des trois cibles du laser tracker demande une première estimation de leur position dans l'espace puisque la recherche automatique des cibles, par le laser, prend beaucoup de temps. L'utilisation d'un laser tracker est donc souvent réalisé avec une seule cible, plus rapidement suivie, en ne relevant que les trois coordonnées de position X, Y et Z. Un des avantages de la MMT est de pouvoir mesurer la position des six coordonnées de l'effecteur à l'aide de trois cible suivis. Dans ce cas, et si un grand nombre de cibles peuvent être fixées sur la broche, alors la mesure par MMT est facilitée pour n'importe quelle orientation de la broche d'usinage. Autrement dit, la liberté de mouvement de la broche est beaucoup plus importante pour un suivi dynamique par MMT que par Laser. C'est pour cela que le nombre de pose du robot mesurées pour la calibration avec la MMT est de 36 configurations alors qu'il faut en mesurer 100 avec l'utilisation d'un laser tracker [NUB_13]. Dans les mêmes travaux, cette correction paramétrique est développée sur le plus petit robot industriel de la gamme ABB à vide, le ABB IRB 120. Avec une méthode similaire, les moyens de mesure MMT et Laser tracker permettent l'amélioration de la précision de pose avec des erreurs moyennes résiduelles respectivement de 0.022mm et -0.105mm. Ce qui démontre les bénéfices de l'utilisation d'une MMT pour réaliser une correction paramétrique.

L'élément suivi pour identifier le positionnement du robot est l'effecteur du robot. De nombreuses études dérivées de cette méthode sont développées pour améliorer les résultats d'une calibration standard ou pour rendre la méthode compatible avec une installation dédiée. C'est le cas de la mesure de pièces réalisée par le robot [CHA_06], cela nécessite de déterminer la trajectoire réelle réalisée par l'outil où la méthode est validée en simulation. [NGU_15] réalise une correction paramétrique à l'aide d'une identification par un filtre de Kalman étendu. Il ajoute une correction par compensation d'un réseau de neurone artificiel. Cette compensation intègre et corrige les erreurs non-géométriques qui ne sont pas prises en compte par la calibration du robot. Cette méthode corrige 90% des erreurs de pose dont 15% sont attribuées à la compensation par le réseau de neurone artificiel.

Toujours dans le but de réduire les imprécisions de l'assemblage d'un robot mais cette fois-ci d'un point de vue cinématique, [OLA_12] étudie les erreurs cinématiques qui apparaissent lors de la rotation d'une articulation. Les jeux fonctionnels, les imprécisions d'usinage des éléments constitutifs des engrenages et les erreurs d'assemblages de la chaîne de transmission sont les causes de Ces erreurs cinématiques. Il développe une méthode d'identification, sur un

robot moyen porteur Stäubli 170 BH à vide, basée sur des mesures expérimentales et détermine que cette erreur cinématique est en moyenne de 0.01° angulaire par articulation. Il ajoute que cette erreur géométrique se traduit par une erreur de positionnement d'un dixième de millimètre au niveau de l'effecteur final.

2.2. Modélisation en raideurs

Beaucoup de travaux se penchent sur l'analyse de la raideur des robots afin d'anticiper des déformations et de les corriger en utilisant la modélisation. Deux sources principales du manque de raideur d'un robot sont considérées : la flexibilité au niveau des articulations et celle distribuée le long des corps du robot [SIC_08]. Selon [DUM_11], 75% des erreurs de suivis de trajectoire d'un robot seraient dues à la flexibilité de ses articulations. Les articulations (moteurs et transmissions) sont donc les principales sources de flexibilité. L'hypothèse utilisée dans la modélisation en raideur d'un robot est de considérer que les bras du robot sont rigides et que les articulations sont flexibles. Ainsi les flexibilités des bras sont identifiées et corrigées à travers les raideurs des articulations. Cette hypothèse permet de simplifier le modèle de raideur utilisé. [ZHA_05], [DUM_11] et [OLA_13] considèrent la flexibilité de chaque articulation comme un ressort de torsion linéaire avec une matrice de rigidité K_x , dont le modèle de flexibilité peut être donné par l'équation 2.1 :

Équation 2.1

$$\omega = K_x * \delta d$$

Il permet de relier les efforts et les moments exercés sur l'effecteur du robot (ω , vecteur 6×1) avec les déplacements linéaires et angulaires de ce dernier (δd , vecteur 6×1). La matrice de raideur K_x est une matrice supposée diagonale, elle dépend de la configuration du robot et de la raideur de chaque articulation.

Tableau 2-1 : Raideurs identifiées d'un robot Kuka KR240 [DUM_10]

<i>Articulation</i>	<i>Raideur (Nm/rad)</i>	<i>Erreur (Nm/rad) et pourcentage de la déviation moyenne du TCP</i>
1	$3.8 \cdot 10^6$	Indéterminés
2	$6.6 \cdot 10^6$	$\pm 1 \cdot 10^5$ - (8%)
3	$3.9 \cdot 10^6$	$\pm 3.7 \cdot 10^5$ - (9%)
4	$5.6 \cdot 10^5$	$\pm 1 \cdot 10^4$ - (2%)
5	$6.6 \cdot 10^5$	$\pm 1.4 \cdot 10^4$ - (2%)
6	$4.7 \cdot 10^5$	$\pm 2.2 \cdot 10^4$ - (5%)

Une méthode d'identification développée dans [DUM_10] permet de limiter le nombre de mesures à l'aide d'une identification des configurations optimales. Cependant, elle limite les zones d'identification et demande un travail analytique supplémentaire. Ces travaux déterminent les

valeurs de la matrice diagonale de raideur d'un robot Kuka KR240, qui possède de grandes similitudes avec le robot Kuka KR360 de la présente étude. Ces raideurs sont résumées dans le *tableau 2-1*. Ce dernier présente la part de l'erreur de positionnement causé par la flexibilité des articulations du robot par rapport à l'erreur de pose moyenne. Les articulations sont responsables d'environ 30% de l'erreur de pose d'un robot appartenant à la même catégorie que celui de la présente étude [DUM_10].

Cette identification des raideurs ne permet pas à elle seule de compenser les erreurs de déplacements du bras robotisé pendant l'exécution de sa trajectoire. Il faut aussi utiliser un modèle d'effort et une connaissance certaines des interactions outil/matière du procédé pour anticiper les efforts et moments qui seront exercés sur l'outil lors de l'usinage. [ZHA_05] utilise une platine de mesure d'effort pour relever, en temps réel, les interactions entre l'outil et la matière. Les déviations du robot sont estimées à l'aide de cette mesure et du modèle de raideur avant d'être compensées. Le temps de traitement et de calcul non négligeable ne permet pas d'appliquer une telle méthode dans des contextes à grande vitesse d'avance. Les résultats sont pourtant encourageants avec une réduction de l'écart de suivis de la consigne de 0.5mm, soit 55% de gain. [DUM_11] utilise des données expérimentales pour associer les forces appliquées sur l'outil à son modèle de raideur. L'inconvénient réside dans le fait que plusieurs essais d'usinage doivent être pratiqués pour valider la robustesse de ces données. En outre, rien ne garantit qu'après compensation des déplacements du bras robotisé, ces efforts identifiés soient identiques et donc adaptés. Après la compensation, les déplacements mesurés dans un composite carbone/epoxy s'élèvent à 0.3 mm en moyenne. [WAN2_09] obtient un gain de 60% en suivant le même protocole.

Une méthode similaire présentée par Cordes [COR_16], permet la mesure et la compensation du phénomène d'inversion. Elle présente une amélioration de 45% du suivi de trajectoire pour la réalisation d'un cercle dans de l'aluminium. Dans un premier temps, cette méthode prédit une partie de la déviation à l'aide d'un modèle de raideur avant d'ajouter les erreurs d'inversions mesurées expérimentalement pour les compenser.

Dans ses travaux, [ABE_08] compare différentes méthodes d'identification des raideurs :

- Une méthode analytique.
- Une méthode améliorée qui vise à déterminer les raideurs des articulations dans un espace de travail réduit pour augmenter la caractérisation dans cette zone et améliorer les résultats.
- Une méthode expérimentale.

Il met en lumière l'avantage de la méthode analytique qui fonctionne relativement bien pour des applications dans des espaces de travaux réduits mais qui s'avère être une méthode longue et fastidieuse lorsque la mesure expérimentale doit caractériser un grand espace de travail avec une amplitude élevée des efforts mis en jeux.

Malgré une modélisation en raideur de leurs robots, les études [OLA_13] et [COR_16] appliquent également une correction « hors ligne » de la trajectoire. Dans le cas où la trajectoire n'est pas modélisée mais mesurée par un système de vision lors d'un premier usinage de « mise au point », alors il serait possible d'appliquer le principe de correction miroir sur la base d'une

trajectoire mesurée. Le principe d'une correction miroir est de mettre en miroir la trajectoire modélisée par rapport à la trajectoire nominale. Cela rend obligatoire un usinage « martyr » sur la pièce mais une surépaisseur doit être prévue à cet effet lors de la conception du brut.

2.3. Modélisation en effort

Les constructeurs de robot ont intégré des fonctionnalités, au niveau de la commande, adaptées particulièrement aux problématiques des opérations de « pick and place ». L'une d'entre elles est la prise en compte de la masse de l'effecteur pour corriger la flexion du robot due à cette charge. Associée au centre de gravité et au moment d'inertie, cette fonction corrige également les flexions du système en mouvement. Cependant, la valeur de la charge ne peut être modifiée pendant l'exécution d'un programme, ce qui la rend inadaptée aux opérations d'usinage ou de parachèvement où les charges appliquées à l'outil sont variables. En outre, cette correction ne s'applique que dans le cas d'une masse c'est-à-dire sur un effort orienté selon la gravité. Cette fonction permet donc de corriger les phénomènes causés par la masse de l'effecteur, ici une électrobroche de 42kg, mais ne corrige pas les déformations dues à la charge supplémentaire induite par les efforts de coupe qui sont variables en intensité et en orientation.

Déjà évoquée dans la section précédente, la modélisation en effort est très utilisée dans les méthodes de compensation des robots industriels. Développée en premier lieu pour des applications dédiées aux machines-outils, comme [GUI_12] ou [CHE_03], la modélisation des efforts de coupe fait également ses preuves dans l'usinage robotisé.

Par exemple, le procédé de soudage par frottement malaxage (FSW pour Friction Stir Welding) est une technologie de soudage innovante qui, associée à un robot industriel, paraît prometteuse. Beaucoup de travaux de recherche réalisent ce couplage en cherchant une amélioration de la qualité du soudage ou un meilleur suivi du positionnement du cordon [WAN_16]. Ce procédé génère énormément d'effort lors du malaxage du matériau et de l'avance de l'outil dans la matière. Ces travaux définissent une stratégie de correction des déformations du bras robotisé à travers la modélisation du procédé et la correction en effort de l'effecteur. Ils utilisent un modèle non-linéaire alimenté par la force axiale mesurée par un capteur de force monté sur l'équipement de soudage. La force axiale est considérée comme un paramètre d'entrée pour l'identification des autres modèles des forces et des couples du procédé. Une expérimentation permet de valider le modèle et même si le développement n'est pas encore abouti pour une trajectoire 3D, les corrections dans la direction perpendiculaire à la trajectoire du soudage sont encourageantes [QIN_13].

La correction en effort est également à l'étude chez les constructeurs de robot qui équipent leur dernière génération de robot avec des capteurs d'efforts au niveau de l'organe final ou qui développent, en partenariat avec des fabricants de commande numérique comme SIEMENS, des modules de compensation des efforts avec, soit une étude des couples des moteurs, soit l'utilisation de capteurs externes [SIE_18]. Le module MyCC/ROCO est une extension pour les robots anthropomorphes qui utilisent une commande numérique SIEMENS 840D. Cette fonction permet d'améliorer le positionnement et la dynamique du robot dans son espace de travail. Basé sur un modèle physique qui est fonction des paramètres géométriques et dynamiques tel que la

Amélioration de la précision d'un robot industriel

masse, le centre de gravité, les inerties et les raideurs de chaque élément constitutif du robot, il corrige les déplacements dus aux forces gravitationnelles et aux efforts externes du procédé.

Les modèles de raideur et d'efforts sont complémentaires dans la plupart des articles cités ci-dessus. Le modèle d'effort anticipe les efforts liés au processus de coupe avec la connaissance des paramètres de coupe, d'outil et du matériau. Le modèle de raideur quant à lui anticipe les déviations de l'effecteur sur la base des efforts externes calculés par le modèle d'effort, quand ceux-ci ne sont pas fournis par de la mesure. Ces méthodes nécessitent des identifications fastidieuses et de nombreux tests et expérimentations. C'est pourquoi certains travaux se tournent vers des méthodes de correction plus rapides.

2.4. Correction en temps réel

La notion de temps réel est de plus en plus présente dans les travaux de recherche scientifiques notamment avec le développement de moyen de déplacement autonome qu'il faut suivre et guider en permanence [CHA_12]. Dans le monde de l'usinage, et particulièrement l'usinage robotisé, cette notion de temps-réel est touchée du doigt par certaines études qui visent à améliorer un suivi de trajectoire en dynamique. Deux cas d'études se distinguent dans cette méthode de compensation : la correction en temps-réel à partir de données issues de capteurs d'efforts et avec l'utilisation d'un modèle d'effort et/ou de raideur. Et la correction en temps-réel par vision en utilisant un moyen de mesure optique, sans consacrer une caractérisation particulière au robot et à la tâche. Les études précédemment citées [QIN_13], [ZHA_05] ou encore [BIG_07] qui utilisent également une commande en effort, mettent en œuvre des compensations des déviations du robot en temp-réel. C'est-à-dire que les informations des capteurs d'efforts et les résultats des calculs des modèles sont traités par des ordinateurs en parallèle de l'exécution du programme. Ainsi, la correction de trajectoire est transmise régulièrement au contrôleur du robot.

La correction en temps-réel par vision est également utilisée et se pratique à l'aide de moyens de mesure optiques. Cependant, la technologie des matériels et algorithmes utilisées sont aujourd'hui encore trop lents, ce qui entraîne un retard entre l'événement mesuré et sa correction. Par ailleurs, l'investissement dans un appareil de mesure est important et représente un surcoût pour un industriel. L'intégration de tels matériels dans un environnement d'usinage, comprenant des poussières, des copeaux et un air humide, est également difficile.

Généralement, les méthodes de correction ou de compensation en temps-réel sont toutes marqués d'un léger retard qui s'explique simplement par le temps de traitement des informations et le temps de communication entre les différents systèmes en jeu. Dans les cas les plus efficaces, lorsque les robots sont pourvus de modules de dialogue rapide comme le module « RSI » chez KUKA, les délais de correction avoisinent les 25ms [QIN_13], [BIG_07].

3. Synthèse bibliographique – Orientation de l'étude

Les opérations d'usinages 5 axes de formes quelconques exercent des efforts importants sur l'élément final du robot. Les robots industriels sont des moyens choisis pour leur agilité et leur adaptabilité à différents procédés. Ils présentent des flexibilités importantes causées par leur structure sérielle qui sont le principal frein à leur utilisation pour l'usinage de précision. Il est donc nécessaire de développer des méthodes de prises en compte de ces déformations et de correction de ces déplacements qui sont fonctions d'une multitude de paramètres. Cette revue bibliographique a permis d'identifier les différentes sources d'erreur de positionnement des robot anthropomorphes. Elle a également détaillé certains développements dédiés à l'amélioration de leur précision de pose.

Les méthodes d'amélioration des performances des robots anthropomorphes industriels énoncées ci-dessus sont les plus utilisées dans l'industrie. Cependant, elles ne sont pas suffisantes indépendamment les unes des autres pour atteindre les objectifs de l'étude. Par ailleurs, elles sont pour la plupart difficilement adaptables à plusieurs contextes industriels.

La solution doit répondre à la problématique scientifique et industrielle suivante : Corriger l'imprécision d'un robot sériel 6 axes afin de réaliser des tâches nécessitant un positionnement précis de l'effecteur tout en conservant un coût raisonnable et une mise en œuvre simple. Ce dernier aspect est important pour aller dans le sens d'un industriel qui robotise son procédé de fabrication dans le but d'une plus grande compétitivité. La solution à privilégier doit être applicable à n'importe quel robot anthropomorphe quel que soit le contexte de son utilisation mais toujours dans le but d'une précision de positionnement accrue.

La correction paramétrique est une méthode rapide et relativement efficace pour gagner en précision rapidement et quel que soit la position de l'effecteur dans son espace de travail. De plus, cette méthode est complémentaire à l'utilisation d'un logiciel de CFAO pour générer les programmes de commande. Les modélisations en raideur ou en effort demandent des méthodes d'identifications longues et fastidieuses qui ne s'insèrent pas facilement dans la vie d'un atelier de fabrication. La correction en temps-réel paraît être la méthode qui répondrait le mieux aux exigences de qualités dimensionnelles tout en assurant une facilité de réalisation. Cependant, l'utilisation d'un appareil de mesure en complément du moyen robotisé et ce pour chaque opération d'usinage reste un problème insolvable. L'identification des déplacements par vision est cependant très intéressante par sa simplicité et sa précision.

L'objectif de ce travail de thèse n'est pas de modifier la conception du robot ou de développer un suivi multi capteurs pour répondre à la problématique de l'étude. En s'appuyant sur l'état de l'art ci-dessus et sur le chapitre 1, le premier développement choisi est celui d'une méthode de correction paramétrique. Il est néanmoins évident que la mise en place de cette méthode ne permettra pas d'atteindre les objectifs de cette étude. En effet, elle améliore la précision de pose du robot d'environ 70% dans son espace de travail [NGU_15]. C'est pourquoi une deuxième procédure de correction est envisagée. Cette dernière intitulée « correction hors-ligne » dans la suite, est basée sur la mesure de la position de l'outil par le système de vision C-Track lors de la réalisation d'une trajectoire d'usinage. Cette méthode de correction hors-ligne est présentée dans le chapitre 3.

Dans la prochaine section, un bref état de l'art sur la correction paramétrique est proposé avant de décrire cette méthode et les expérimentations sur le robot de l'application. Enfin, la conclusion abordera les bénéfices de cette modification du modèle géométrique et présentera la suite des travaux.

4. Calibration du robot Kuka KR360

La commande d'un robot s'appuie sur des modèles mathématiques [DOM_88] : Les modèles de transformation entre les espaces opérationnels (situation de l'organe terminal) et articulaires (configuration du robot). Parmi eux se distinguent le modèle géométrique et le modèle différentiel. Le premier exprime la situation de l'organe terminal en fonction de la configuration et le deuxième exprime la différentielle de l'organe terminal en fonction de la différentielle de la configuration articulaire. Ces deux modèles géométrique et différentiel peuvent être directs ou inverses dans le sens où ils renseignent l'organe terminal par rapport à la configuration ou inversement. Les modèles dynamiques, quant à eux, définissent les équations de mouvement du robot, ils relient les couples et efforts avec les positions, vitesses et accélérations des articulations.

Les travaux de modélisations des robots sont portés depuis longtemps par les roboticiens qui développent des méthodes pour la description de la morphologie des robots. La plus répandue est celle de Denavit-hartenberg [DEN_55]. Des variantes de cette méthode et de cette notation ont été proposées depuis, [KHA_76], [WEB_10].

Comme vu dans la partie précédente, le comportement géométrique nominal du robot, c'est-à-dire attendu par la commande, n'est pas celui observé réellement. L'identification paramétrique nécessaire pour améliorer la précision de pose du robot passe par la mise en place d'une méthode d'identification des paramètres géométriques du robot pour proposer un modèle géométrique augmenté. L'identification permet de mesurer avec précision ces paramètres et de compenser l'écart qui existe entre les paramètres initiaux et les paramètres réels du robot. La minimisation de cet écart augmente la précision du modèle géométrique utilisé par la commande du robot. De fait, elle améliore la précision de pose du robot.

4.1. Méthode de correction paramétrique des robots

La correction paramétrique ou étalonnage géométrique permet à un modèle de prédire, avec une meilleure précision, la position de l'effecteur final en fonction des positions angulaires de chaque articulation.

Parmi toutes les méthodes existantes, seront citées celles qui s'appliquent aux robots sériels tel que le KUKA KR360. Ces robots à chaîne ouverte sont uniquement composés de liaisons rotoïdes. Ces méthodes peuvent se scinder en deux groupes : L'étalonnage en boucle ouverte, basé sur la mesure de la position de l'organe final à l'aide d'un capteur externe. L'étalonnage autonome en boucle fermée, basé sur la contrainte par une liaison physique avec l'environnement du robot,

Amélioration de la précision d'un robot industriel

comme le palpé d'une pièce. Quelque soit la méthode, elle suit les quatre étapes définies par [MOO_91] :

1. La modélisation : Il s'agit de choisir, parmi l'ensemble des modèles géométriques que propose la littérature, celui qui permettra d'augmenter la précision d'un maximum de paramètres géométriques du robot utilisé. Un modèle géométrique est fonction d'un ensemble de paramètres ; géométriques, offset des axes, coordonnées articulaires, etc. Le choix est déterminé par les paramètres qui sont les plus influents sur la précision du positionnement du robot.
2. La mesure expérimentale : Il faut réaliser un grand nombre de mesures de la position de l'organe final du robot dans l'ensemble de son espace de travail. Le but est de relever la position de l'organe final et les valeurs des variables articulaires correspondant à ces configurations. Il faut relever un grand nombre de configurations pour assurer un nombre suffisant d'équations.
3. L'identification : Basée sur des algorithmes de minimisation, cette étape identifie les paramètres géométriques corrigés. Il s'agit de résoudre le système d'équations pour estimer ces paramètres de façon optimale.
4. La compensation : Les nouveaux paramètres définissent un modèle géométrique augmenté. Ce dernier remplacera le modèle géométrique initialement présent dans la commande du robot. Il faut donc modifier ces paramètres au sein de la commande.

Bien que ces étapes suffisent à mener à bien une correction paramétrique, des études démontrent les bénéfices d'ajouter une étape supplémentaire à cette méthode [KHA_02]. La modélisation permet de décrire un jeu de paramètres géométriques d'un robot mais il arrive que l'identification ne parvienne pas à estimer cet ensemble de paramètres. En effet, certains paramètres sont combinés, c'est-à-dire que leur influence sur la position de l'outil ne peut pas être dissociée de l'influence d'un ou de plusieurs autres paramètres. Dans ce cas, l'étape d'identification peut être longue et même ne pas aboutir à une solution stable. Dans ce cas, une étape supplémentaire permet d'identifier les combinaisons linéaires entre les paramètres géométriques. Il s'agit d'une étude des combinaisons linéaires des jacobiniennes. Lorsque les paramètres combinés sont identifiés, il faut les supprimer de l'identification [KHA_91].

Un grand nombre de méthodes d'étalonnage dédiées aux robots séries sont présentes dans la littérature. Besnard en fait une étude comparative dans [BES_00]. Le choix de la méthode se base sur un ensemble de critères :

- Le coût de la méthode, le temps de caractérisation et les moyens de mesures si besoin.
- Le choix et le nombre de paramètres identifiables par la méthode.
- La convergence de la méthode, précision de la convergence, temps ou nombre d'itérations pour converger.
- La fiabilité de la méthode, prise en compte des bruits de mesure, précision des appareils de mesure.

Avant de présenter le développement d'une méthode de correction paramétrique sur le robot de l'application, un état de l'art sur les différentes modélisations existantes permet de justifier le choix de la modélisation qui sera utilisée dans ces travaux.

4.2. Modélisation du robot

En modélisation, un robot est généralement composé de bras liés entre eux par des articulations et d'un effecteur. Les bras sont considérés rigides et les liaisons sont considérées parfaites, c'est-à-dire sans déformation ni jeu fonctionnel. Chaque robot est développé avec un modèle géométrique cohérent avec le comportement géométrique de sa structure. Le modèle géométrique détermine l'attitude (la position et l'orientation) dans l'espace par rapport aux positions angulaires de ses articulations.

4.2.1. La modélisation robotique

Dans la littérature, un modèle géométrique est défini selon une séquence de transformations homogènes de la base du robot jusqu'à l'effecteur. Elles sont décrites à l'aide de matrices homogènes de translation et de rotation (T_x , T_y , T_z , R_x , R_y , R_z). Voici les approches les plus utilisées dans le domaine de la recherche robotique :

4.2.1.1. La méthode de D-H modifiée

Denavit et Hartenberg (D-H) [DEN_55] sont les premiers à proposer une méthode pour décrire la transformation homogène entre deux solides avec une position et une orientation des repères. Cette convention de D-H est la plus utilisée en robotique. Cependant, elle ne donne pas une définition unique du système. Dans beaucoup de cas, les origines et axes X_j des repères sont déterminés arbitrairement. De plus, cette méthode rend l'axe Z_j confondu avec l'articulation $j-1$ et non pas avec l'axe de rotation j , cela engendre des confusions entre les valeurs des paramètres associés à chaque articulation pour des robots en série simple. C'est pourquoi, de nombreux modèles comme ceux de Paul [PAU_81] et Craig [CRA_86] proposent des changements de placement des repères. Globalement ces premiers modèles présentent des difficultés pour modéliser des robots à géométries spéciales.

Khalil et Kleinfinger proposent des améliorations du modèle de D-H afin d'appliquer plus simplement les notations et conventions à des structures fermées ou arborescentes [KHA_99]. Cette méthode s'applique également à des robots ouverts simples. Le repère R_j est fixé sur la liaison j tel que :

- L'axe Z_j est situé le long de l'axe de l'articulation j ;
- L'axe X_j est aligné sur la normale commune entre Z_j et Z_{j+1} . Si Z_j et Z_{j+1} sont parallèles ou colinéaires, le choix de X_j n'est pas unique. L'intersection de X_j et Z_j définit l'origine O_j . Dans le cas d'axes communs qui se croisent, l'origine se trouve au point d'intersection des axes communs ;

Amélioration de la précision d'un robot industriel

- L'axe Y_j est formé par la règle de la main droite pour compléter le système de coordonnées (X_j, Y_j, Z_j) .

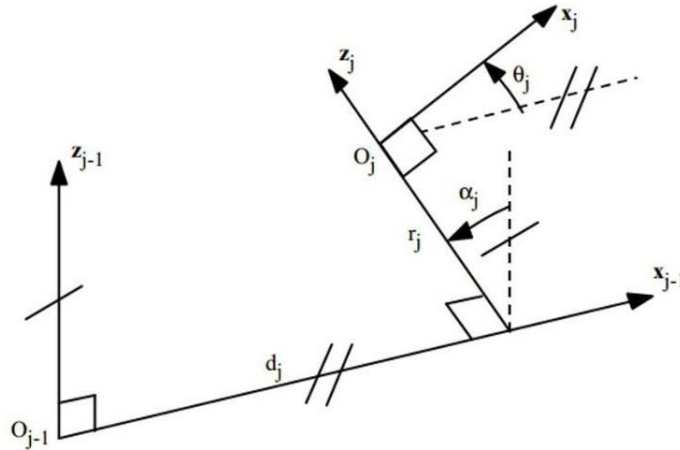


Figure 2-6 : Notation de Khalil et Kleinfinger [KHA_04]

Cette convention présentée par la *figure 2-6* donne l'*équation 2.2* suivante pour calculer la matrice de transformation du repère j-1 au repère j :

Équation 2.2

$${}^{j-1}T_j = \text{Rot}(X_{j-1}, \alpha_j) \text{Trans}(X_{j-1}, d_j) \text{Rot}(Z_j, \theta_j) \text{Trans}(Z_j, r_j)$$

Où :

α_j est l'angle entre Z_{j-1} et Z_j autour de l'axe X_{j-1} .

d_j est la distance entre Z_{j-1} et Z_j le long de X_{j-1} .

θ_j est l'angle entre X_{j-1} et X_j autour de l'axe Z_j .

r_j est la distance entre X_{j-1} et X_j le long de Z_j .

$\text{Rot}(X_{j-1}, \alpha_j)$ définit la rotation d'un angle α_j autour de l'axe X_{j-1} .

$\text{Trans}(X_{j-1}, d_j)$ définit la translation d'une distance d_j le long de l'axe X_{j-1} .

$\text{Rot}(Z_j, \theta_j)$ définit la rotation d'un angle θ_j autour de l'axe Z_j .

$\text{Trans}(Z_j, r_j)$ définit la translation d'une distance r_j le long de l'axe Z_j .

Dans ce cas, la matrice de transformation du repère j-1 au repère j s'écrit :

Équation 2.3

$${}^{j-1}T_j = \begin{bmatrix} C\theta_j & -S\theta_j & 0 & d_j \\ C\alpha_j S\theta_j & C\alpha_j C\theta_j & -S\alpha_j & -r_j S\alpha_j \\ S\alpha_j S\theta_j & S\alpha_j C\theta_j & C\alpha_j & r_j C\alpha_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

avec : $C\theta$ correspondant à $\text{Cos}(\theta)$ et $S\theta$ correspondant à $\text{Sin}(\theta)$.

Amélioration de la précision d'un robot industriel

Cette modification de Khalil et Kleinfinger est souvent confondue avec la notation de DH initiale. Elles sont les plus utilisées dans la modélisation de systèmes robotiques. Pour autant, ces méthodes ne font pas appel à tous les paramètres géométriques qui peuvent exister pour décrire la géométrie d'un robot. Des travaux se sont inspirés des premiers modèles géométriques pour s'intéresser à l'ajout de paramètres, c'est le cas du modèle de Hayati.

4.2.1.2. Modèle de Hayati

Hayati est le premier à se pencher sur le cas particulier où, une structure robotique possède deux axes de rotation consécutifs dont les axes de rotation sont parallèles [HAY_85]. Dans ce cas, si ces deux axes de rotation consécutifs, donc théoriquement parallèles entre eux, possèdent un petit écart angulaire β (figure 2-7), alors des erreurs d'identification apparaissent sur les paramètres de D-H.

Dans sa méthode, Hayati propose une matrice de rotation supplémentaire, $\text{Rot}(\mathbf{Y}_i, \beta_i)$, par rapport au modèle de D-H. Cette matrice vient remplacer la matrice de translation du paramètre d_i sur l'axe \mathbf{Z}_i dans le cas où les axes de rotation consécutifs sont nominalement parallèles. L'erreur d'alignement de ces deux axes est due aux erreurs de fabrication et d'assemblage du système.

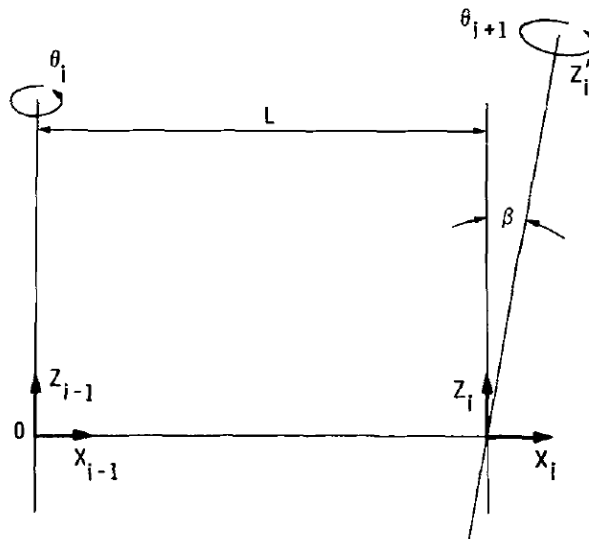


Figure 2-7 : Convention de Hayati - illustration plane des repères du modèle [HAY_85]

Cette matrice supplémentaire $\text{Rot}(\mathbf{Y}_i, \beta_i)$ s'écrit:

Équation 2.4

$$\text{Rot}(\mathbf{Y}_i, \beta_i) = \begin{bmatrix} C\beta_i & 0 & -S\beta_i & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ S\beta_i & 0 & C\beta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Pour le cas d'une transformation entre deux axes successivement parallèles, la matrice de passage devient alors :

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

Avec la même idée de vouloir corriger les défauts de parallélisme entre deux articulations, le modèle de Veitschegger et Wu [VEI_86] caractérise les axes de rotations à l'aide de cinq paramètres. De nombreux modèles ayant plus de quatre paramètres par repère sont notables comme celui de Whitney et Lozinski [WHI_86] qui caractérise les orientations par les angles de roulis, tangage et lacet (roll, pitch and yaw). Le S-model de Stone [STO_87], ajoute deux paramètres à ceux de D-H pour permettre de placer arbitrairement les repères autour de l'axe Z. Ces implantations à plus de quatre paramètres sont plus complexes dans leur utilisation et sont plus adaptées à des structures spéciales que des structures sérielles six axes.

4.2.1.3. Autres modèles complémentaires

De nombreuses modélisations ont depuis été développées dans le but de répondre à une configuration particulière. Mooring et Tan développent le modèle Zéro-référence [MOO_91]. Il ne s'appuie pas sur le formalisme de D-H, mais il est basé sur les équations de rotation de Rodrigues. Cela consiste à définir un système de référence fixe dans l'espace de travail du robot et un système de référence fixe sur l'effecteur. Un vecteur unitaire est placé suivant chaque axe de rotation et son origine est définie arbitrairement. La matrice de passage globale est obtenue en multipliant les matrices de passages d'un vecteur unitaire à l'autre. Cette modélisation alternative peut s'utiliser sur la majorité des robots.

Plus récemment, Gogu développe le modèle TCS pour Traveling Coordinate System [GOG_97]. Le principe est de faire glisser un système de référence sur les différents éléments qui composent le robot. En partant du repère fixe jusqu'à l'effecteur. Il effectue les rotations et translations en passant d'un élément au suivant. Ce déplacement en rotation et translation du repère de l'effecteur au repère de référence est défini par un produit matriciel. Dans cette méthode, la notation est simplifiée mais les calculs sont fastidieux pour des robots ayant plus de trois axes.

4.2.1.4. Synthèse

Nos travaux se portent sur un robot sériel à structure ouverte qui peut se voir modéliser par l'ensemble des méthodes citées ci-dessus. Le choix de cette étude est de coupler la méthode de Khalil et Kleinfinger avec celle de Hayati. Cela permet d'utiliser une modélisation simple et répandue en incluant l'identification de l'erreur de parallélisme qui peut exister entre les articulations 2 et 3 du robot de l'étude.

4.2.2. Modélisation du robot KUKA KR360

Le robot KUKA KR360 de la cellule robotisée de l'étude est un robot sériel, six axes, à structure ouverte simple (*figure 2-8*). Ce robot est constitué de six axes motorisés et il possède six corps notés C0, C1, ..., C6 supposés rigides dans cette étude.

Amélioration de la précision d'un robot industriel

En statique, le critère de performance visé est la précision de pose cependant, cette information n'est pas communiquée par le constructeur. Bien que le robot soit répétable au dixième de millimètre [KUK_14], ce critère est quantifié en section 4.2.6 de ce chapitre.

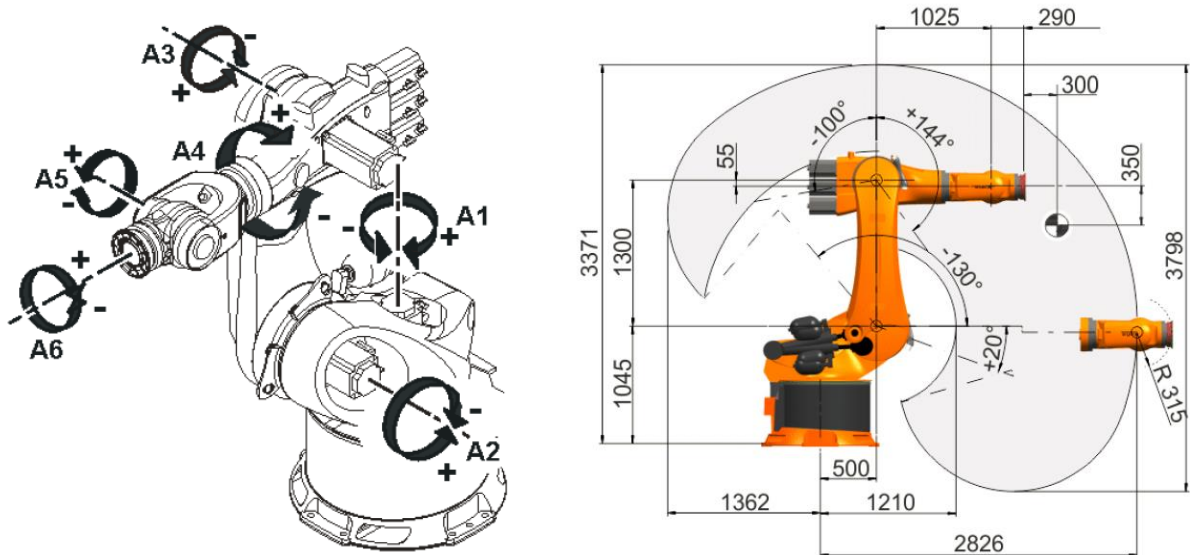


Figure 2-8 : Description cinématique du robot KUKA KR360 [KUK_14]

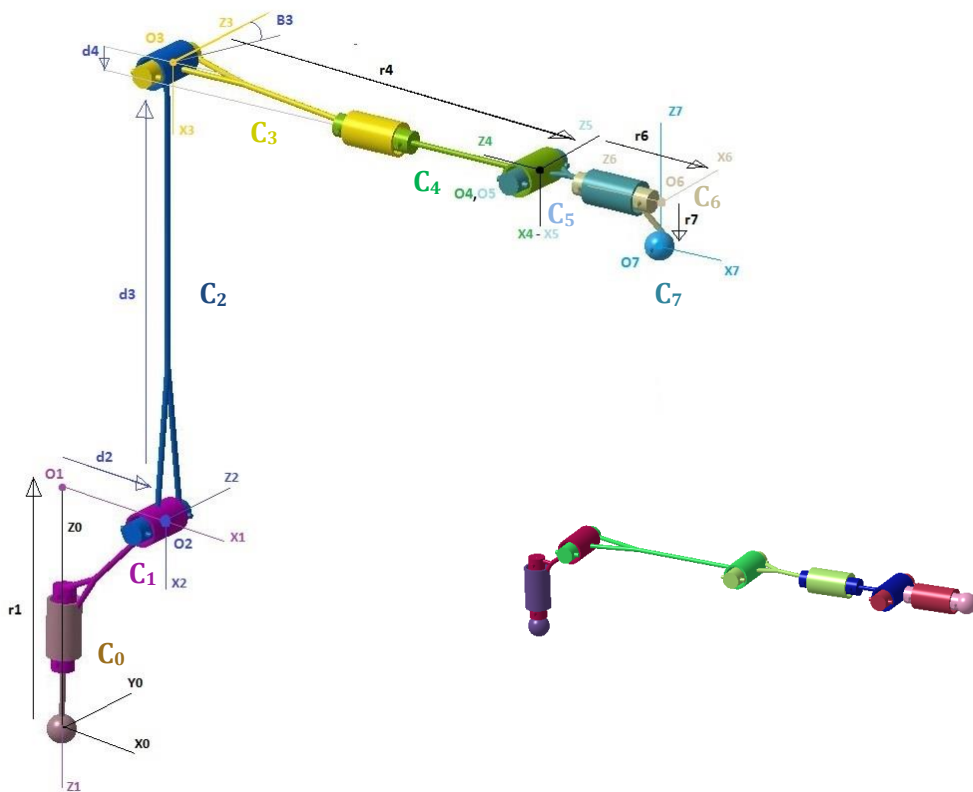


Figure 2-9 : Configurations : zéro géométrique (à gauche) - zéro codeur (à droite)

4.2.2.1. Repères et paramètres

En utilisant les règles de Khalil et Kleinfinger, 7 repères sont associés à la base et aux axes du robot, R_j ($j = 0, 1, 2, \dots, 6$). Deux repères indispensables à l'étude s'ajoutent :

- Le repère atelier R_a .
- Le repère $R7$ qui représente le repère de la broche (TCP). Positionné en nez de broche, il permet d'ajouter dans la correction paramétrique les paramètres de longueur de l'effecteur final.

Les repères sont positionnés suivant la méthode présentée par la *figure 2-6* de la section 4.2.1. La *figure 2-8* présente le positionnement de ces différents repères ainsi que les valeurs théoriques initiales des paramètres géométriques non nuls du robot. Il s'agit des paramètres de longueurs $r_1, d_2, d_3, d_4, r_4, r_6$ et r_7 et du paramètre de Hayati β_3 , qui représente un angle de défaut de parallélisme entre les axes de rotation 2 et 3. Ce paramètre est nul dans le modèle géométrique initial. Des paramètres articulaires sont associés à chaque articulation q_j , avec j le numéro de l'articulation allant de 1 à 7. Le paramètre articulaire q_7 est constant et égal à « 0 ». L'assemblage de la broche sur l'ensemble robotique est réalisé à l'aide d'une interface fixée sur l'axe 6 du robot.

La *figure 2-9* présente également la configuration zéro « géométrique » où toutes les variables articulaires q_j sont nulles. Elle diffère de la configuration zéro « codeur ». Un décalage par rapport à l'origine (offset) est donc nécessaire pour obtenir le vecteur des variables articulaires q :

Équation 2.6

$$q = q_{codeur} + q_{offset} ; \text{ avec } q_{offset} = [0, \pi/2, 0, 0, 0, -\pi/2, -\pi/2]$$

Ces offsets doivent également être corrigés pour améliorer la représentation du robot réel par le modèle géométrique.

L'ensemble des paramètres géométriques à identifier est résumé dans le *tableau 2-2*. Leurs valeurs initiales présentées sont issues des données du constructeur (*figure 2-8*) et sont intégrées à la commande du robot à travers le modèle géométrique initial.

Tableau 2-2 : Valeurs initiales des paramètres géométriques

Articulation					q	
	$\alpha_j (x-1)$	$d_j (x-1)$	$r_j (x)$	β_j	q_j	q_{offset}
J_0						
J_1	π	0	-1045	-	θ_1	0
J_2	$\pi/2$	500	0	-	θ_2	$\pi/2$
J_3	0	-1300	0	0	θ_3	0
J_4	$-\pi/2$	55	-1025	-	θ_4	0
J_5	$\pi/2$	0	0	-	θ_5	0
J_6	$-\pi/2$	0	-425	-	θ_6	$-\pi/2$
J_7	$\pi/2$	0	-210	-	0	$-\pi/2$

4.2.2.2. Modèle géométrique direct (MGD)

Pour ce robot à 6 ddl, le calcul du MGD est obtenu par des produits de matrices de transformation homogènes. Elles dépendent des paramètres géométriques et des variables articulaires du robot. La matrice de transformation du repère de base R_0 au repère de la broche R_7 est déterminée selon :

Équation 2.7

$${}^0T_7 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 {}^6T_7$$

En appliquant les *équations 2.2 & 2.3* de la modélisation de Khalil et Kleinfinger [KHA_04], les matrices homogènes suivantes sont obtenues :

Équation 2.8

$$\begin{aligned}
 {}^0T_1 &= \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) & , -\sin(\theta_1) & , 0 & , 0 \\ -\sin(\theta_1) & , -\cos(\theta_1) & , 0 & , 0 \\ 0 & , 0 & , -1 & , -r_1 \\ 0 & , 0 & , 0 & , 1 \end{pmatrix} \\
 {}^1T_2 &= \begin{pmatrix} -\sin(\theta_2) & , -\cos(\theta_2) & , 0 & , d_2 \\ 0 & , 0 & , -1 & , 0 \\ \cos(\theta_2) & , \sin(\theta_2) & , 0 & , 0 \\ 0 & , 0 & , 0 & , 1 \end{pmatrix} \\
 {}^2T_3 &= \begin{pmatrix} \cos(\beta_3)*\cos(\theta_3), -\sin(\theta_3) & , -\sin(\beta_3)*\cos(\theta_3) & , d_3 \\ \cos(\beta_3)*\sin(\theta_3), \cos(\theta_3) & , -\sin(\beta_3)*\sin(\theta_3) & , 0 \\ \sin(\beta_3) & , 0 & , \cos(\beta_3) & , \theta_3 \\ 0 & , 0 & , 0 & , 1 \end{pmatrix} \\
 {}^3T_4 &= \begin{pmatrix} \cos(\theta_4) & , -\sin(\theta_4) & , 0 & , d_4 \\ 0 & , 0 & , 1 & , r_4 \\ -\sin(\theta_4) & , -\cos(\theta_4) & , 0 & , 0 \\ 0 & , 0 & , 0 & , 1 \end{pmatrix} \\
 {}^4T_5 &= \begin{pmatrix} \cos(\theta_5) & , -\sin(\theta_5) & , 0 & , 0 \\ 0 & , 0 & , -1 & , 0 \\ \sin(\theta_5) & , \cos(\theta_5) & , 0 & , 0 \\ 0 & , 0 & , 0 & , 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

$${}^5T_6 = \begin{pmatrix} \sin(\theta_6) & , \cos(\theta_6) & , 0 & , 0 \\ 0 & , 0 & , 1 & , 0 \\ -\cos(\theta_6) & , -\sin(\theta_6) & , 0 & , 0 \\ 0 & , 0 & , 0 & , 1 \end{pmatrix}$$

$${}^6T_7 = \begin{pmatrix} 0 & , 1 & , 0 & , 0 \\ 0 & , 0 & , -1 & , -r_7 \\ 1 & , 0 & , 0 & , 0 \\ 0 & , 0 & , 0 & , 1 \end{pmatrix}$$

4.3. Optimisation des paramètres géométriques

Les erreurs contenues dans les valeurs initiales des paramètres géométriques du modèle de commande du robot génèrent une erreur sur la précision de pose du système. La position de l'outil (sortie broche robot) est donnée par un vecteur de position r_{nom} . Ce vecteur peut être extrait des matrices du MGD comme vu dans l'équation 2.8 ; Cependant, la position est également fonction des paramètres géométriques : $r_{nom} = f(\alpha, d, r, \theta, \beta)$.

La fonction des paramètres géométriques r_{nom} étant non linéaire, un modèle différentiel avec un développement limité du premier ordre peut être utilisé. La convergence d'une optimisation exploitant ce modèle dépend de l'erreur mesurée. Si cette erreur est supérieure à quelques dixièmes de millimètre [KHA_91], une méthode itérative basée sur un modèle différentiel de Newton-Gauss peut s'appliquer.

En prenant la transformation du repère R_{j-1} au repère R_j qui est représentée par le produit de 4 transformations élémentaires définies par les paramètres du modèle $\alpha_j, d_j, r_j, \theta_j$ et β_j . Les petites variations (ou erreurs) des paramètres géométriques entraînent une déviation sur la position de l'effecteur Δr . Basé sur la linéarisation du modèle des paramètres, le modèle différentiel est le suivant :

Équation 2.9

$$\Delta r = r_{réel} - r_{nom} = \frac{\delta f}{\delta \alpha} \cdot \Delta \alpha + \frac{\delta f}{\delta r} \cdot \Delta r + \frac{\delta f}{\delta d} \cdot \Delta d + \frac{\delta f}{\delta \theta} \cdot \Delta \theta + \frac{\delta f}{\delta \beta} \cdot \Delta \beta$$

Avec :

Δr : vecteur d'erreur de pose,

$r_{réel}$: valeur de pose mesurée,

r_{nom} : valeur de pose théorique de départ,

$\Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \theta, \dots$: Variations du premier ordre

$\frac{\delta f}{\delta \alpha}, \frac{\delta f}{\delta r}, \dots$: Jacobienne partielle évaluée dans les conditions nominales

Amélioration de la précision d'un robot industriel

Ainsi les erreurs sur les paramètres propres à la localisation du repère R_j par rapport au repère R_{j-1} entraînent des variations de position et de l'orientation du repère final R_7 lié à l'effecteur broche. Pour une position articulaire \mathbf{q} , les écarts de translation et de rotation se présentent sous forme matricielle, tel que présenté dans le chapitre 2 du livre [SIC_09]:

Équation 2.10

$$\Delta \mathbf{r} = \Phi \cdot \Delta \boldsymbol{\varphi}$$

Avec :

$\Delta \mathbf{r} = (\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta a, \Delta b, \Delta c)$, 6×1 : Vecteur erreur des translations de l'origine O_7 et des rotations du repère R_7 .

$$\Delta \boldsymbol{\varphi} = \begin{pmatrix} \Delta \alpha \\ \Delta r \\ \Delta d \\ \Delta \theta \\ \Delta \beta \end{pmatrix}, \quad 5n \times 1 : \text{Vecteur erreur des paramètres géométriques. } n \text{ étant le nombre de}$$

degrés de liberté du système.

$\Phi = \left(\frac{\delta f}{\delta \alpha} \quad \frac{\delta f}{\delta r} \quad \frac{\delta f}{\delta d} \quad \frac{\delta f}{\delta \theta} \quad \frac{\delta f}{\delta \beta} \right)$, $6 \times 5n$: Jacobienne des paramètres autrement écrit $(J\alpha, Jr, Jd, J\theta, J\beta)$.

Pour un ensemble de m positions mesurées, l'équation devient :

Équation 2.11

$$\Delta \bar{\mathbf{r}} = \bar{\Phi} \cdot \Delta \boldsymbol{\varphi}$$

Avec :

$$\Delta \bar{\mathbf{r}} = \begin{pmatrix} \Delta r1 \\ \Delta r2 \\ \vdots \\ \Delta rm \end{pmatrix}, \quad 6m \times 1 : \text{Vecteur erreur des poses du robot.}$$

$$\bar{\Phi} = \begin{pmatrix} \Phi 1 \\ \Phi 2 \\ \vdots \\ \Phi m \end{pmatrix}, \quad 6m \times 5n : \text{Matrice d'observation (ou de régression)}$$

Ce système d'équation peut être résolu en appliquant une méthode d'optimisation itérative. Cette méthode permet de déterminer les erreurs des paramètres par itération :

La méthode de la *figure 2-10* décrit les étapes successives de l'évolution du jeu des paramètres géométriques. La minimisation est le cœur de la correction paramétrique, cette étape recherche un nouveau jeu des paramètres géométriques $\Delta \boldsymbol{\varphi}$ dans le but de minimiser l'erreur de positionnement mesurée $\Delta \bar{\mathbf{r}}$ entre les positions désirées et mesurées. $\bar{\Phi}'$ constitue la matrice d'observation évaluée avec les paramètres corrigés $\boldsymbol{\varphi}'$ à chaque itération. Pour résoudre cette équation d'étalonnage, il faut déterminer la matrice jacobienne étendue ($\bar{\Phi}$) qui se calcule selon la méthode de concaténation de Khalil et Dombre [DOM_02].

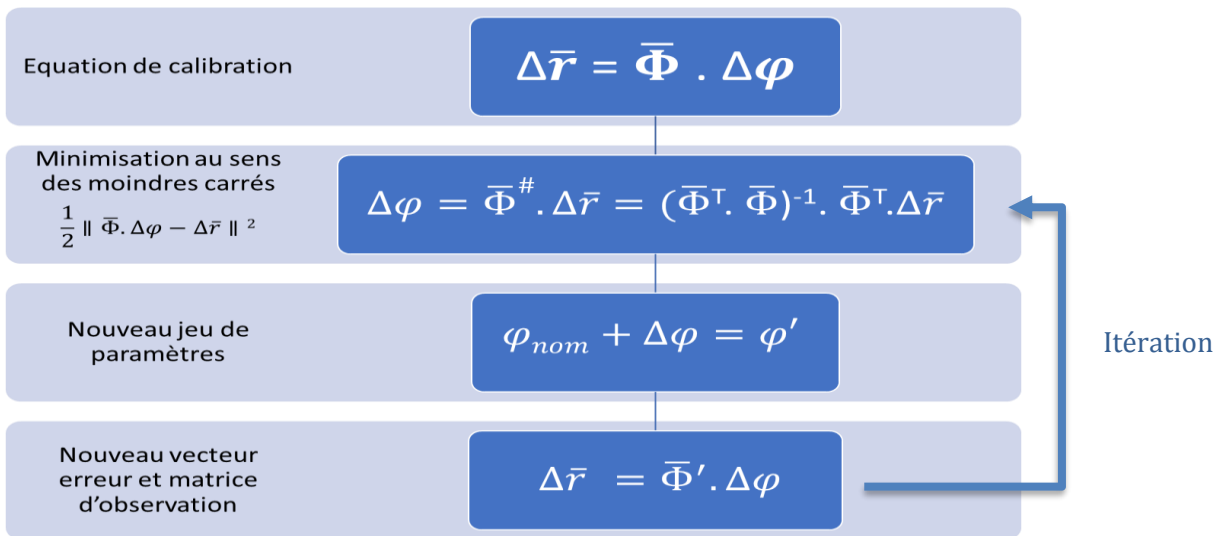


Figure 2-10 : Méthode d'optimisation des paramètres géométriques

Le critère d'arrêt théorique est un vecteur erreur nul ($\Delta \bar{r} = \mathbf{0}$). Il est atteignable seulement en simulation en raison d'une simulation parfaite de la mesure et d'une correspondance entre le modèle et le système théorique. Dans la pratique, le critère d'arrêt est un critère de stabilité, étudié dans la section 4.2.6 de ce chapitre.

4.3.1. Calcul de la matrice jacobienne des paramètres

La matrice jacobienne permet de résoudre le modèle différentiel direct d'un robot. Ce dernier décrit les variations des coordonnées opérationnelles en fonction des variations des coordonnées articulaires. Il est noté :

Équation 2.12

$$dX = J(q) dq$$

Où $J(q)$ désigne la matrice jacobienne. Elle est égale à $\frac{\delta x}{\delta q}$ et fonction de la configuration articulaire q .

La matrice jacobienne classique que l'on appelle « la jacobienne du robot », intervient dans de multiple cas d'étude [PAU_81] : Dans le modèle différentiel inverse, elle permet de calculer une configuration articulaire locale q à partir des coordonnées opérationnelles X . En statique, elle est utilisée pour relier les efforts externes qui s'appliquent sur l'organe terminal aux forces et couples des actionneurs. Elle intervient également pour identifier les singularités et pour calculer la dimension de l'espace opérationnel accessible du robot [GOS_90].

Il existe plusieurs méthodes pour calculer la matrice jacobienne : Elle s'obtient par dérivation du MGD mais également par une méthode de calcul direct, fondée sur la relation entre les vecteurs des vitesses de translation et de rotation V_n et ω_n du repère R_n , et les vitesses articulaires \dot{q} . Une troisième méthode est la décomposition de la matrice jacobienne [REN_80].

Amélioration de la précision d'un robot industriel

Il ne faut cependant pas la confondre avec la matrice jacobienne des paramètres géométriques utilisée pour déterminer les paramètres géométriques identifiables. Cette dernière est utilisée dans la section suivante.

La méthode analytique de calcul vectoriel décrite par [KHA_91] permet de calculer cette matrice jacobienne étendue. Elle est basée sur la définition de la matrice de passage du repère R_j au repère de la base robot (R_0) :

Équation 2.13

$${}^0T_j = \begin{bmatrix} {}^0s_j & {}^0n_j & {}^0a_j & {}^0P_j \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix}$$

A partir de cette relation, la matrice jacobienne étendue se détermine par colonne est directement comme suit :

❖ Pour une rotation de α_j autour de \mathbf{X}_{j-1} : $\mathbf{j}\alpha_j = \begin{bmatrix} s_j - 1 & x & L_{j-1, n} \\ & s_j - 1 & \end{bmatrix}$

Avec : x étant un produit vectoriel.

$L_{j,n}$ est le vecteur (3*1) entre l'origine du repère j et celle du repère n (dernier repère cinématique R_7). Il est calculé avec la relation : $L_{j,n} = {}^0P_n - {}^0P_j$

❖ Pour une translation de d_j autour de \mathbf{X}_{j-1} : $\mathbf{j}d_j = \begin{bmatrix} s_j - 1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$

❖ Pour une rotation de θ_j autour de \mathbf{Z}_j : $\mathbf{j}\theta_j = \begin{bmatrix} a_j & x & L_{j, n} \\ & a_j & \end{bmatrix}$

❖ Pour une translation de r_j autour de \mathbf{Z}_j : $\mathbf{j}r_j = \begin{bmatrix} a_j \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$

❖ Pour une rotation de β_j autour de \mathbf{Y}_j : $\mathbf{j}\beta_j = \begin{bmatrix} n_j - 1 & * & L_{j-1, n} \\ & n_j - 1 & \end{bmatrix}$

Cette méthode permet un calcul numérique de chaque colonne de la matrice jacobienne étendue suivante :

Équation 2.14

$$\mathcal{J} = [\mathbf{j}\theta_1 \quad \mathbf{j}r_1 \quad \mathbf{j}\beta_1 \quad \mathbf{j}\alpha_1 \quad \mathbf{j}d_1 \quad \mathbf{j}\theta_2 \quad \mathbf{j}r_2 \quad \mathbf{j}\beta_2 \quad \mathbf{j}\alpha_2 \quad \mathbf{j}d_2 \quad \mathbf{j}\theta_3 \quad \mathbf{j}r_3 \quad \mathbf{j}\beta_3 \quad \mathbf{j}\alpha_3 \quad \mathbf{j}d_3 \quad \mathbf{j}\theta_4 \quad \mathbf{j}r_4 \quad \mathbf{j}\beta_4 \quad \mathbf{j}\alpha_4 \quad \mathbf{j}d_4 \quad \mathbf{j}\theta_5 \quad \mathbf{j}r_5 \quad \mathbf{j}\beta_5 \quad \mathbf{j}\alpha_5 \quad \mathbf{j}d_5 \quad \mathbf{j}\theta_6 \quad \mathbf{j}r_6 \quad \mathbf{j}\beta_6 \quad \mathbf{j}\alpha_6 \quad \mathbf{j}d_6 \quad \mathbf{j}\theta_7 \quad \mathbf{j}r_7 \quad \mathbf{j}\beta_7 \quad \mathbf{j}\alpha_7 \quad \mathbf{j}d_7]$$

4.4. Etude des paramètres géométriques identifiables

Certains paramètres géométriques ne sont pas identifiables par la correction paramétrique [KHA_91], si leur influence sur la transformation ne peut pas être dissociée de l'influence d'un ou de plusieurs autres paramètres. Dans ce cas, ils ne sont pas identifiables par le modèle et le fait de les prendre en compte pourrait empêcher la convergence de la minimisation au sens des moindres carrés. Les erreurs associées à ces paramètres ne peuvent pas être identifiées séparément, dans ce cas elles seront portées à zéro et leurs colonnes seront supprimées de la matrice jacobienne. Il est évident que l'erreur réelle d'un paramètre supprimé est en réalité cumulée sur le paramètre avec lequel il constitue une combinaison linéaire, restant à identifier. Même si cette solution ne rétablit donc pas les valeurs réelles pour tous les

Amélioration de la précision d'un robot industriel

paramètres, la transformation finale tiendra compte des corrections faites sur de l'ensemble des paramètres y compris ceux supprimés.

Une solution pour détecter ces paramètres non identifiables est d'étudier le rang de la matrice jacobienne [KHA_91]. Si celui-ci est inférieur à son nombre de colonne de la matrice, cela veut dire qu'elle contient des jacobienes de paramètres non identifiables. Pour les identifier au sein de cette matrice, une étude réursive est appliquée afin de déterminer les dépendances entre jacobienes. Il se peut également qu'une jacobienne soit égale à la valeur « 0 » auquel cas, il est nécessaire de supprimer le paramètre associé de l'étude pour simplifier la correction. Il est évident que les jacobiens relatifs au repère de base du robot ne seront pas éliminés puisqu'ils ne peuvent pas être dans l'un des deux cas évoqués.

Ainsi, l'équation 2.3 de Khalil et Kleinfinger peut s'écrire dans le cas de notre robot :

Équation 2.15

$$\begin{aligned} s_j &= C\theta_j * s_{j-1} + C\alpha_j S\theta_j * n_{j-1} + S\alpha_j S\theta_j * a_{j-1} \\ n_j &= -S\theta_j * s_{j-1} + C\alpha_j C\theta_j * n_{j-1} + S\alpha_j C\theta_j * a_{j-1} \\ a_j &= -S\alpha_j * n_{j-1} + C\alpha_j * a_{j-1} \\ L_{j,n} &= L_{j-1,n} - d_j * s_{j-1} + r_j S\alpha_j * n_{j-1} + r_j C\alpha_j * a_{j-1} \end{aligned}$$

A ce stade, avec l'équation 2.13, il est possible de calculer les différentes colonnes de la matrice jacobienne et cela pour toute la chaine cinématique [KHA_91]:

Équation 2.16

$$\begin{aligned} J\beta_{j+1} &= -r_j \cdot C\theta_j \cdot Jd_j + (-d_j \cdot S\alpha_j C\theta_j - r_j \cdot C\alpha_j S\theta_j) \cdot N_{j-1} - S\theta_j \cdot J\alpha_j + C\alpha_j C\theta_j \cdot J\beta_j + S\alpha_j S\theta_j \cdot J\theta_{j-1} + (-r_j \cdot S\alpha_j S\theta_j + d_j \cdot C\alpha_j C\theta_j) \cdot Jr_{j-1} & (0 < j < 7) \\ J\alpha_{j+1} &= -r_j \cdot S\theta_j \cdot Jd_j + (d_j \cdot C\alpha_j S\theta_j + r_j \cdot S\alpha_j C\theta_j) \cdot Jr_{j-1} + C\theta_j \cdot J\alpha_j + C\alpha_j S\theta_j \cdot J\beta_j + S\alpha_j S\theta_j \cdot J\theta_{j-1} + (-d_j \cdot S\alpha_j S\theta_j + r_j \cdot C\alpha_j C\theta_j) \cdot N_{j-1} & (0 < j < 7) \\ Jd_{j+1} &= C\theta_j \cdot Jd_j + C\alpha_j S\theta_j \cdot N_{j-1} + S\alpha_j S\theta_j \cdot Jr_{j-1} & (0 < j \leq 7) \\ J\theta_j &= -d_j \cdot C\alpha_j \cdot N_{j-1} - d_j \cdot S\alpha_j \cdot Jr_{j-1} - S\alpha_j \cdot J\beta_j + C\alpha_j \cdot J\theta_{j-1} & (0 < j \leq 7) \\ Jr_j &= -S\alpha_j \cdot N_{j-1} + C\alpha_j \cdot Jr_{j-1} & (0 < j \leq 7) \end{aligned}$$

Avec N_{j-1} est le vecteur $(6 \times 1) = \begin{pmatrix} n_j - 1 \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}$

Etude de l'indépendance des paramètres :

Pour cette étude, l'outil de simulation Matlab est utilisée. Des calculs symboliques ont permis d'établir les jacobienes des paramètres pour le robot KUKA KR360. La figure 2-11 illustre une partie du calcul de cette étude [KHA_91].

Amélioration de la précision d'un robot industriel

$$\begin{aligned}
 Ja_2 &= SJa_1 \cos(Q_1) - SJB_0 \sin(Q_1) - M_0 r_1 \cos(Q_1) - SJr_0 d_1 \sin(Q_1) - SJd_1 r_1 \sin(Q_1) \\
 Jd_2 &= SJd_1 \cos(Q_1) - M_0 \sin(Q_1) \\
 JT_2 &= -SJB_1 - SJr_1 d_2 \\
 Jr_2 &= -M_1 \\
 Ja_3 &= SJa_2 \cos(Q_2) + SJT_1 \sin(Q_2) - M_1 d_2 \sin(Q_2) + SJr_1 r_2 \cos(Q_2) - SJd_2 r_2 \sin(Q_2) \\
 Jd_3 &= SJd_2 \cos(Q_2) + SJr_1 \sin(Q_2) \\
 JT_3 &= SJT_2 - M_2 d_3 \\
 \boxed{Jr_3} &= \boxed{SJr_2} \\
 Ja_4 &= SJa_3 \cos(Q_3) + SJB_2 \sin(Q_3) + M_2 r_3 \cos(Q_3) + SJr_2 d_3 \sin(Q_3) - SJd_3 r_3 \sin(Q_3) \\
 Jd_4 &= SJd_3 \cos(Q_3) + M_2 \sin(Q_3) \\
 \boxed{JT_4} &= \boxed{SJB_3 + SJr_3 d_4} \\
 Jr_4 &= M_3
 \end{aligned}$$

Figure 2-11 : Etude des combinaisons linéaires entre jacobiennes (Matlab)

Les deux cadres rouges de la *figure 2-11* cibles deux combinaisons linéaires entre jacobiennes. Il est ajouté un « S » pour les jacobiennes dépendantes de celles étudiées afin de réaliser les calculs en syntaxe « symbolique » sous Matlab. Sans cela, l'outil de simulation pourrait confondre les jacobiennes étudiées (à gauche de l'égalité) avec les jacobiennes dépendantes de celles étudiées (à droite de l'égalité).

Du fait de la succession de deux axes parallèles sur le robot (axes 2 et 3), les jacobiennes des paramètres géométriques Jr_2 et Jr_3 sont égales (avec Jr_j la jacobienne du paramètre r_j). Une combinaison linéaire entre les jacobiennes $J\beta_3$ et Jr_3 est constatée par la présence du paramètre β_3 dans le modèle géométrique. Le paramètre r_3 n'est donc pas identifiable. De la même façon, les paramètres θ_7 , r_7 et α_7 sont éliminés de l'identification.

Tableau 2-3 : Paramètres géométriques identifiables

Articulation	q					
	$\alpha_j (x-1)$	$d_j (x-1)$	$r_j (x)$	β_j	q_j	q_{offset}
J_0	π	0	r_1	-	θ_1	0
J_1	$\pi/2$	d_2	0	-	θ_2	$\pi/2$
J_2	0	d_3	X	β_3	θ_3	0
J_3	$-\pi/2$	d_4	r_4	-	θ_4	0
J_4	$\pi/2$	0	0	-	θ_5	0
J_5	$-\pi/2$	0	r_6	-	θ_6	$-\pi/2$
J_6	X	0	X	-	X	X

Le calcul du rang de la matrice $\bar{\Phi}$ permet de vérifier l'absence de combinaisons linéaires entre les colonnes de la matrice. Il est de 25, ce qui correspond au nombre de paramètres identifiables (*tableau 2-3*).

Amélioration de la précision d'un robot industriel

Cette première partie de la section 4 résume la méthode mise en place pour effectuer une correction paramétrique du robot. Elle rappelle les prérequis à l'exploitation de cette méthode qui sont : la connaissance du MGD, la jacobienne étendue du système et l'identification des paramètres géométriques identifiables.

Pour mettre en place cette correction, il est nécessaire d'avoir à disposition certains outils de mesure. Dans cette étude, le C-Track est le moyen de mesure optique externe. Il faut également un outil numérique (ici, le logiciel Matlab) pour calculer le MDG du robot dans le but de déterminer les déviations par rapport aux mesures. La suite de cette section présente ces développements sous Matlab, le processus de mesure externe ainsi que les résultats de la correction.

4.5. Mise en pratique et développement numérique pour la correction paramétrique

Un développement numérique permet de simuler le MGD afin de résoudre la minimisation de l'erreur mesurée contenue dans l'algorithme de correction.

Pour simuler le MGD, les équations des matrices de passages déterminées en section 4.2.2 sont intégrées sous forme de fonctions dans le script du calcul matriciel. Pour identifier les paramètres géométriques de D-H mais également le paramètre β de Hayati, deux fonctions distinctes sont identifiées et détaillées en *ANNEXE 6*. Ce calcul matriciel détermine la position de chacun des repères en fonction des valeurs articulaires demandées et propose un visuel sur la configuration du robot (*figure 2-12*).

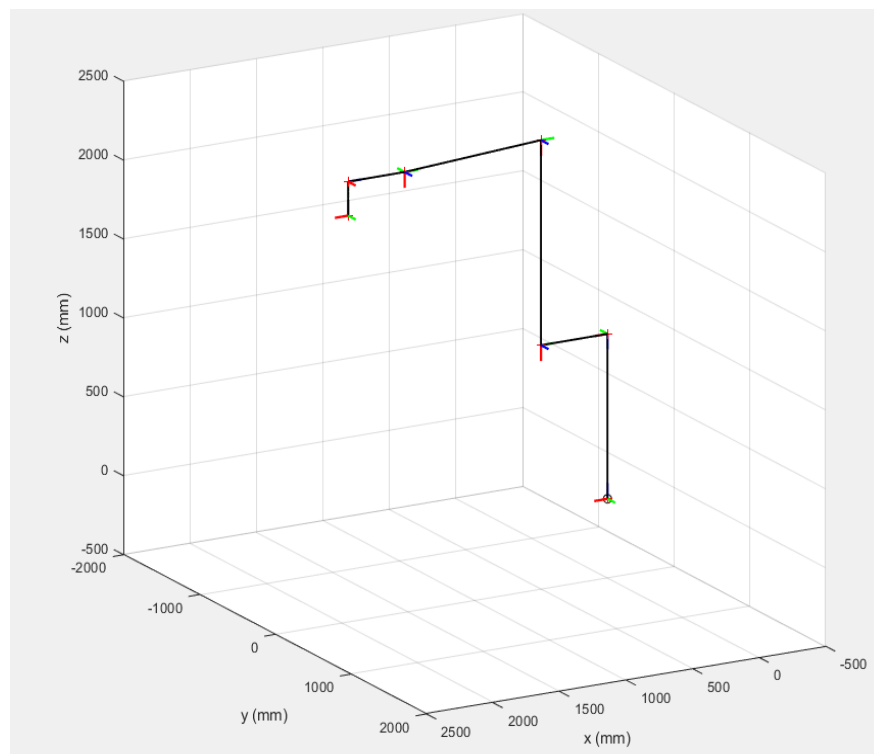


Figure 2-12 : Script Matlab – Modèle géométrique direct KUKA KR360

Méthode de correction paramétrique :

En s'appuyant sur l'algorithme d'optimisation des paramètres géométriques *figure 2-10*, deux scripts sont nécessaires : Le premier réalise l'optimisation des paramètres géométriques et le second rend le processus itératif. La *figure 2-13* détaille les fonctions principales réalisées par ces deux scripts.

A chaque itération, le script 2 fournit le nouveau jeu des paramètres géométriques actualisés au script 1 qui met à jour le MGD (*figure 2-13*) et la matrice jacobienne étendue. Le 2^{ème} script itère jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit atteint. Ici, un critère sur la stabilité du résultat est appliqué. Ainsi, tant que la somme des variations des paramètres est supérieure à 0.001 (critère sans unité, radian + mm), alors la stabilité n'est pas atteinte par la méthode. Par expérience, il faut moins de 10 itérations pour atteindre ce critère.

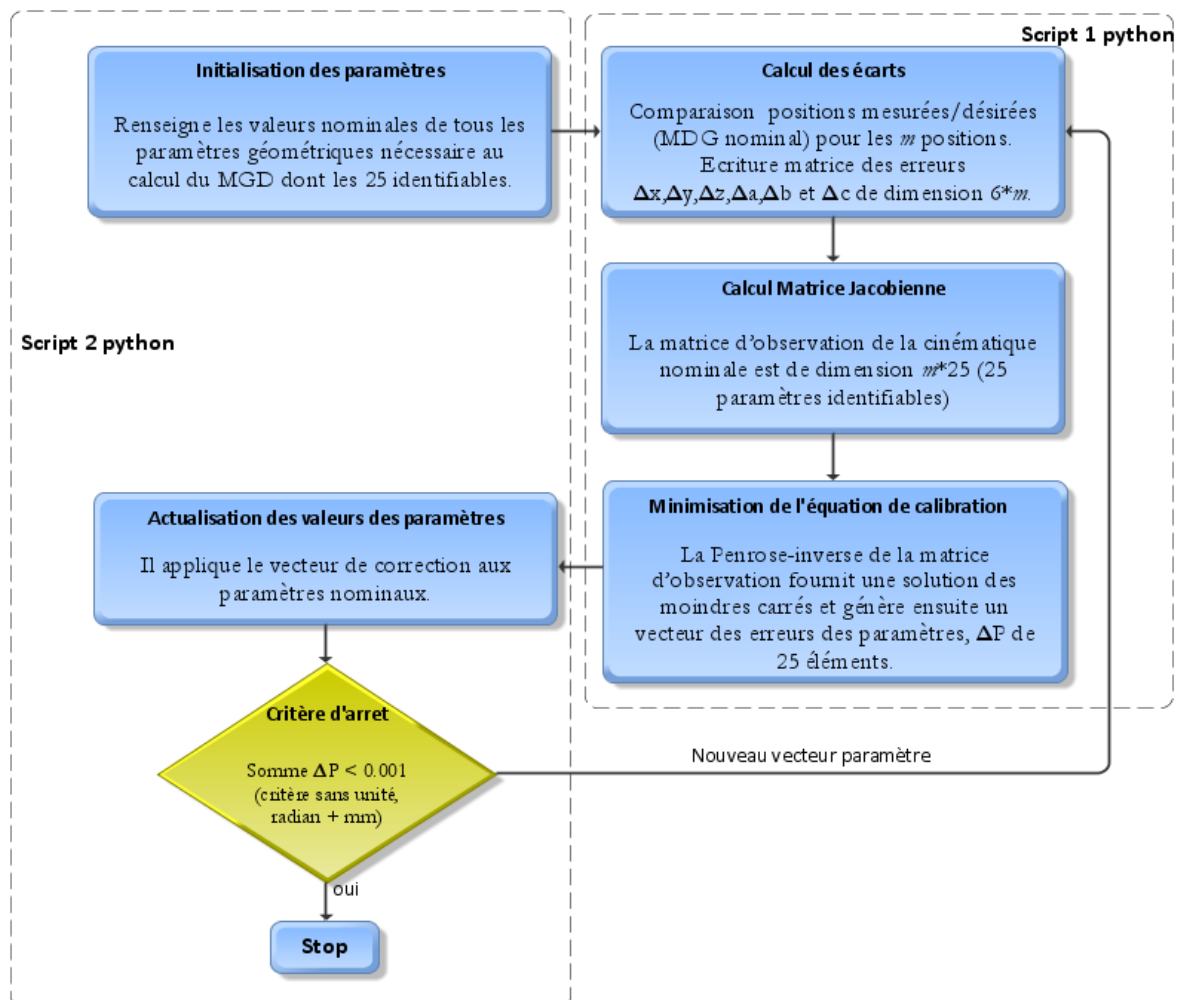


Figure 2-13 : Fonctions Scripts Matlab

4.6. Expérimentation et résultats

4.6.1. Paramètres de la correction

Parmi l'ensemble des méthodes de correction paramétrique, deux types se distinguent : les méthodes avec ou sans capteurs [DOM_02]. C'est la méthode avec capteur externe qui est choisie. Elle est basée sur la mesure de la position de la broche (R_7) par rapport au repère fixe (R_0). Le principal inconvénient de cette méthode est de trouver un capteur externe qui satisfait les critères de précision, de rapidité et de facilité de mise en œuvre de ces mesures. Le capteur utilisé est le C-Track présenté en section 1.2 de ce chapitre. Sa précision de mesure à $\pm 0.15\text{mm}$ est limitante et sera prise en compte pour évaluer les résultats. Cependant, ce moyen est simple d'utilisation et économiquement abordable devant le coût d'autres moyens de mesure plus précis. La précision de pose du robot annoncée par le constructeur de 1mm [KUK_14] permet de juger cet appareil apte pour caractériser un gain important en correction paramétrique.

Les mesures sont effectuées avec un nombre défini de configurations du robot : Le *tableau 2-4* résume une étude en simulation de la convergence de l'algorithme de correction en fonction du nombre de configurations mesurées du robot. Deux modèles géométriques simulent deux robots pour atteindre le critère d'arrêt de la méthode. Le premier contient les valeurs initiales des paramètres géométriques. Le second est volontairement paramétré avec des valeurs différentes, il représente le robot réel.

Pour cette étude où les résultats des mesures sont fournis par la modélisation du robot réel, le critère d'arrêt est atteint à partir de 40 positions et un nombre d'itérations élevé, 38. Le temps de calcul est rappelé (*Tableau 2-4*) à titre indicatif et pour justifier le temps de convergence des différentes solutions mais il n'est pas un critère en soit car cette optimisation est réalisée hors ligne.

Tableau 2-4 : Simulation de la convergence de la méthode en fonction du nombre de positions

Nombre de pose simulées	10	20	40	60	80
Nombre d'itérations	∞	∞	38	5	4
Convergence de la méthode	Divergence	Divergence	Converge	Converge	Converge
Temps de calcul	8.71min	2.14min	1.20min

Lors de l'expérimentation, l'imprécision de mesure du C-Track ne permet pas d'atteindre ce critère malgré 40 positions mesurées. Il est donc choisi d'utiliser 60 positions du robot pour alimenter l'algorithme de correction. Le critère d'arrêt est atteint après 10 itérations de la méthode. Ce paramétrage permet la convergence du vecteur $\Delta\bar{r}'$ vers zéro et une stabilisation de la solution.

4.6.2. Mesures des positions



Figure 2-14 : Principe du suivi optique

Le moyen optique C-Track s'utilise avec le logiciel « VXElement ». Cette machine de mesure tridimensionnelle détecte la position de cibles dans son espace de mesure de 8m^3 . Afin de couvrir l'espace de travail du robot et amener un maximum d'informations par le biais d'un espacement important entre les configurations mesurées, le C-Track est placé de tel sorte à percevoir en même temps et pour toutes les positions, le repère initial (repère R_0) et celui de l'outil (repère R_7 , *figure 2-14*).

1. Palpage du repère R_0 dans l'ensemble de la cellule d'usinage :

A l'aide d'un palpeur et de la rotation de l'axe 1, un cercle dont la normale en son centre détermine le vecteur Z_0 de la base est mesurée. La rotation du plateau diviseur qui se trouve devant le robot permet de mesurer un deuxième cercle. Les deux centres des cercles définissent le vecteur X_0 . Le plan Z_0 est palpé sur l'interface qui relie le robot au sol de la cellule et le changement de repère se fait ensuite pour obtenir la position de n'importe quelle cible dans le repère R_0 (*figure 2-15*).

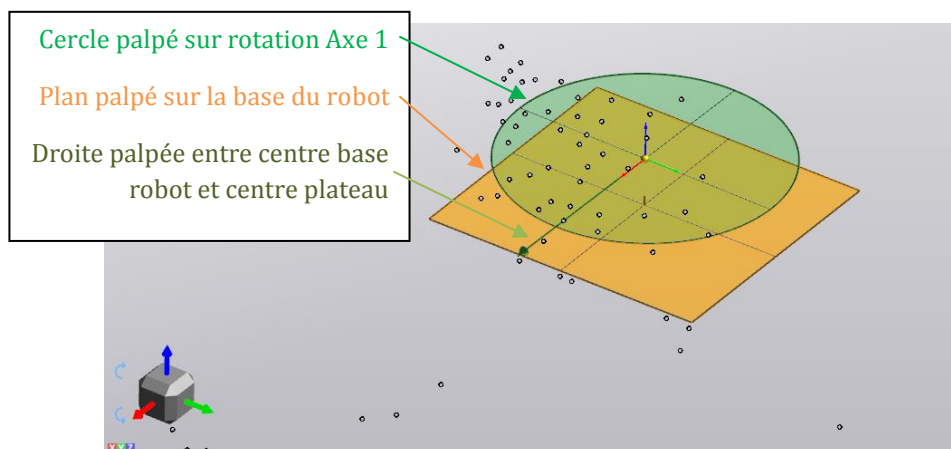


Figure 2-15 : Positionnement repère R_0 - mesures C-track

2. Palpage du repère R_7 de la broche d'usinage :

Afin de positionner le repère R_7 sur la broche, des cibles sont disposées sur le pourtour de celle-ci pour que sa position soit mesurable par le moyen dans n'importe quelle position et orientation (*figure 2-14*). Les cibles sont identifiées par le scanner et, à l'aide du palpeur, le centre de rotation de la broche est défini ainsi que le plan de jauge pour identifier l'axe Z_7 et son origine. Il suffit de palper un côté de la broche pour identifier le vecteur X_7 . Pendant la mesure, le modèle de suivi est identifié en rouge dans la suite logiciel (*figure 2-16*).

3. Mesure des positions articulaires pour la correction paramétrique :

La *figure 2-16* présente l'interface du logiciel VX Element. Il génère un fichier texte qui reprends les positions et orientations mesurées de la broche par rapport à R_0 pour chaque configuration articulaire.

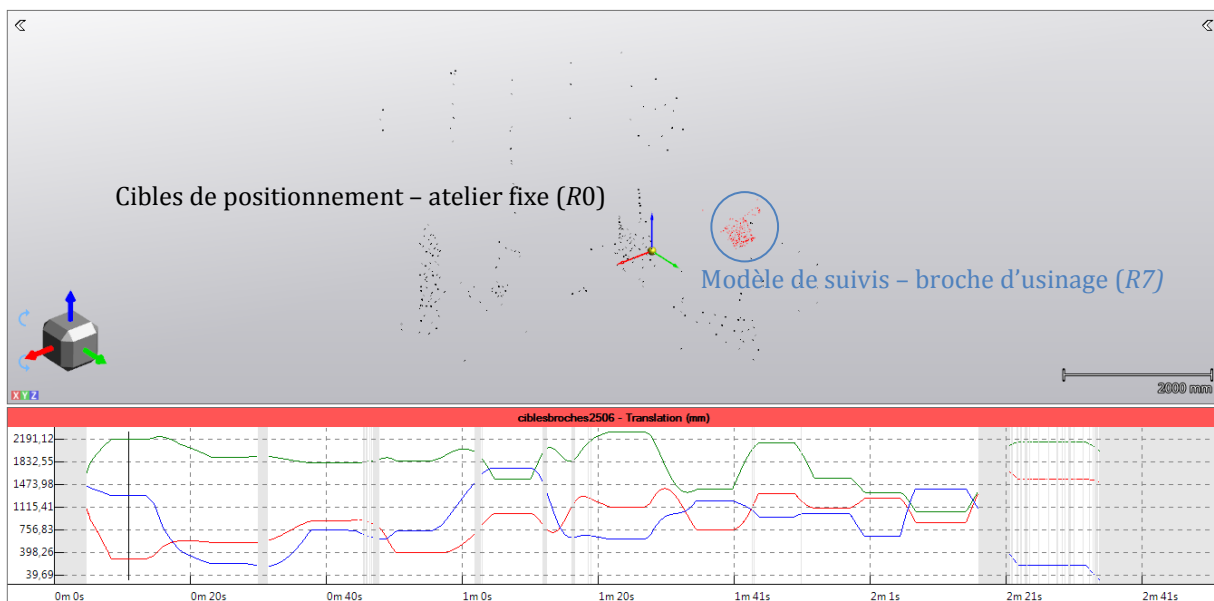


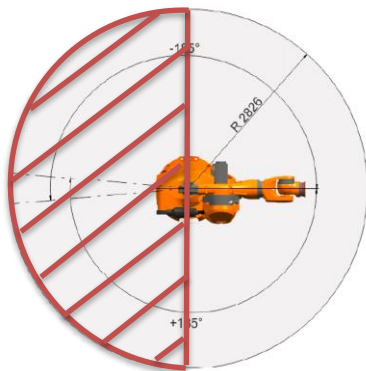
Figure 2-16 : Suivis dynamique C-Track - VX Element

Les poses articulaires sont choisies aléatoirement et commandées au robot. La notion de pose aléatoire est assurée par la fonction « random » sous Matlab qui garantit un échantillonnage cohérent avec l'objectif qui est d'augmenter la précision de pose uniformément dans l'espace de travail du robot. Pour se faire, les plages articulaires des axes du robot sont bornées afin de mesurer des positions atteignables dans cet espace. La *figure 2-14* démontre que le robot ne peut pas travailler dans la demi-sphère qui se trouve derrière lui sans risque de collision avec le mur d'enceinte de la cellule (*figure 2-17(a)*). Il ne faut pas non plus que l'effecteur du robot rentre en collision avec le plateau diviseur. La *figure 2-17(b)* présente le paramétrage de la fonction « random » qui propose les positions à mesurer et la simulation de ces positions grâce au MGD. Les configurations appliquées au vrai robot pour l'expérimentation sont répertoriées en *ANNEXE 6* et représentées sur la *figure 2-17(c)*.

Sur le vrai robot, les positions articulaires sont commandées à travers un programme où des temporisations entre chaque position assure un temps de mesure suffisant pour la stabilité

Amélioration de la précision d'un robot industriel

de la mesure. Elles ont une durée de 5 secondes et sont observables sur la mesure présentée (*figure 2-16*). Les valeurs de la position et de l'orientation pour une configuration mesurée seront les moyennes faites sur cette plage de temporisation. En introduisant des temporisations, le robot n'utilise pas ses « frein » d'axes qui ont tendances à modifier la position du TCP avant le verrouillage. Les mesures des positions sont effectuées 10 fois pour une incertitude de 0,095mm calculée sur les valeurs présentées. Ces positions moyennes sont répertoriées dans un fichier texte qui sera lu par le *script 1* de la méthode de correction. Pendant la mesure, les coordonnées cartésiennes estimées par le contrôleur du robot sont relevées afin de les comparer par la suite avec les mesures du C-Track.



(a) Espace de travail

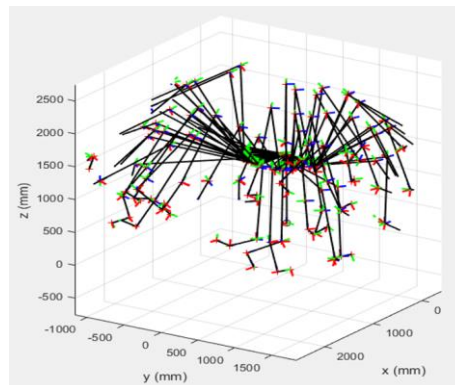
```
function [ Mat ] = calcula( )
%CALCULA1 Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here

A1 = rand(1,1) * (90-(-90)) -90;
A2 = rand(1,1) * (90-(-90)) -90;
A3 = rand(1,1) * (90-(-60)) -60;
A4 = rand(1,1) * (180-(-180)) -180;
A5 = rand(1,1) * (120-(-120)) -120;
A6 = rand(1,1) * (180-(-180)) -180;

Mat = [A1,A2,A3,A4,A5,A6];

end
```

(b) Code fonction « random »



(c) Simulation des 60 configurations du robot

Figure 2-17 : Espace de travail et choix des configurations de l'étude

4.6.3. Résultats

Les erreurs moyennes de position et d'orientation initiale du robot sont présentées dans la *figure 2-18* qui illustre déviations mesurées pour chaque pose. La norme du vecteur de l'erreur moyenne, $\|\overrightarrow{Pt_{th}} - Pt_{mes}\|$ s'élève à 7.25mm.

La différence entre les mesures expérimentales et les positions théoriques donnent le vecteur des erreurs de poses du robot $\Delta\vec{r}$. Ce dernier alimente l'équation de l'algorithme de correction qui, après avoir atteint le critère de stabilité, fournis les modifications à appliquer aux

Amélioration de la précision d'un robot industriel

paramètres de l'identification. Le *tableau 2-5* présente les valeurs du jeu des paramètres après modification.

Il est parfois difficile de modifier ces paramètres dans la commande du robot à cause d'un accès verrouillé par les fabricants de robots, comme c'est le cas pour le KUKA KR360. La cellule d'usinage étudiée, est équipée d'une commande Siemens 840D en sur-couche de la commande KRC4 du robot. Les paramètres du modèle géométrique de la commande Siemens sont modifiables grâce à la fonction « Run my robot » qui équipe cette commande. C'est donc à travers ce modèle géométrique que les paramètres géométriques seront actualisés.

Tableau 2-5 : Valeurs corrigées des paramètres géométriques

	$\alpha_i (x-1)$ en °		$d_i (x-1)$ en mm		$r_i (x)$ en mm		β_i en °		q en °		
	Nominal	Adapté	Nominal	Adapté	Nominal	Adapté	Nominal	Adapté	$q_i (x)$	Q_{Offset} (nominal)	Q_{Offset} (adapté)
J_1	3.1415	3,1417	0	-0,3554	-1045	-1044,6	-	-	θ_1	0	0,001
J_2	1.5707	1,5708	500	499,263	0	1,4267	-	-	θ_2	1.5707	1.5720
J_3	0	0,0003	-1300	-1301,1	X	X	0	-0,0002	θ_3	0	-0.0001
J_4	-1.5707	-1,5714	55	55,2888	-1025	-1024,4	-	-	θ_4	0	0,0004
J_5	1.5707	1,5710	0	0,1165	0	-0,1970	-	-	θ_5	0	0,0002
J_6	-1.5707	-1,5714	0	-0,2990	-425	424,277	-	-	θ_6	-1.5707	-1,5078
J_7	X	X	0	12,5575	X	X	-	-	X	X	X

Pour évaluer le gain de la correction, un nouveau jeu de positions articulaires est généré toujours à l'aide de la fonction « Random » sous Matlab et appliqué au robot après modification

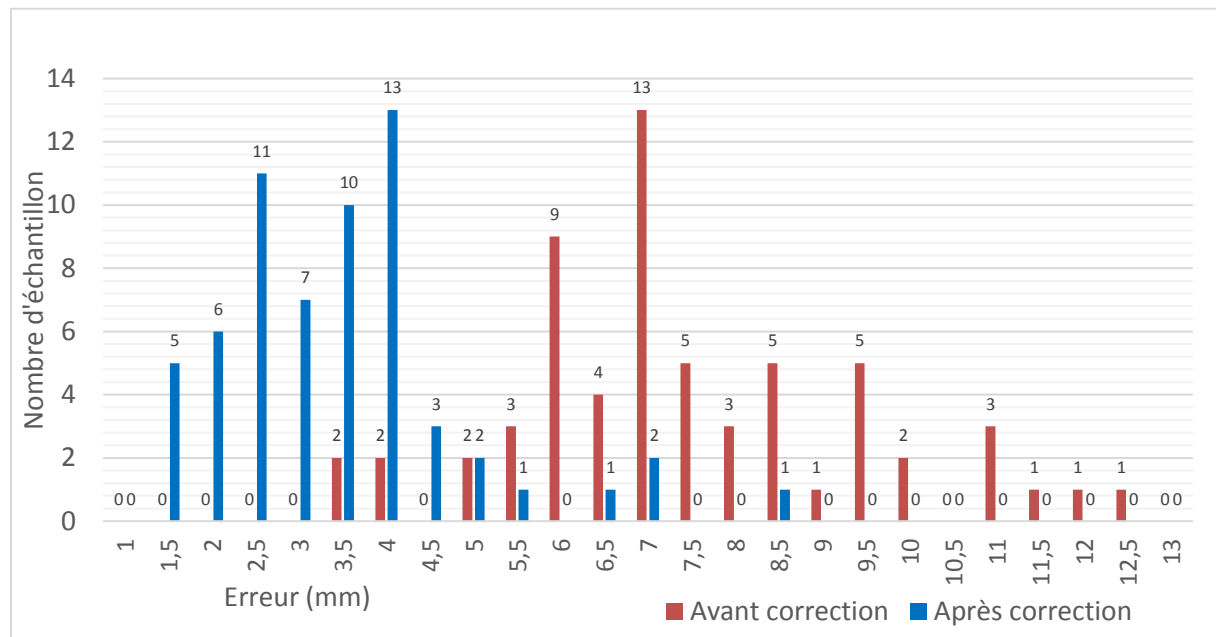


Figure 2-18 : Répartition des vecteurs erreur en nombre

Amélioration de la précision d'un robot industriel

des paramètres. Ces positions sont mesurées par le moyen de mesure externe en suivant la même procédure de mesure.

La *figure 2-18* présente la répartition des vecteurs erreurs déterminés avant correction (en orange) et après correction (en bleue). L'axe des ordonnées représente le nombre d'échantillons qui détiennent la même erreur. Avant correction, l'erreur moyenne est largement répandue entre 2,5mm et 12.5mm, soit un écart type $ET_{av} = 2.01\text{mm}$ pour une erreur moyenne de 7.25mm. Après correction, les normes des vecteurs erreurs sont moins étendues et comprises entre 1.5 et 8.5mm, soit un écart type de $ET_{ap} = 1.37\text{mm}$. Le nombre d'échantillons se resserre autour de 3.5mm, ce qui démontre la diminution de la moyenne des erreurs de pose avec une norme du vecteur des erreurs moyennes égale à 3.17mm. Le modèle géométrique corrigé de la commande Siemens, mis à jour avec les paramètres géométriques optimisés, adapte les coordonnées articulaires du robot pour atteindre la position cartésienne demandée.

Les moyennes des erreurs et leurs répartitions pour chaque composante cartésienne sont représentées sur la *figure 2-19*. Ces résultats présentent un gain de plus de 56% de l'erreur moyenne. Ce gain est calculé comme étant le rapport entre la valeur moyenne de l'erreur de pose initiale par rapport à celle obtenue après calibration. Une diminution de 32% de l'écart type des valeurs des erreurs de pose est également constatée.

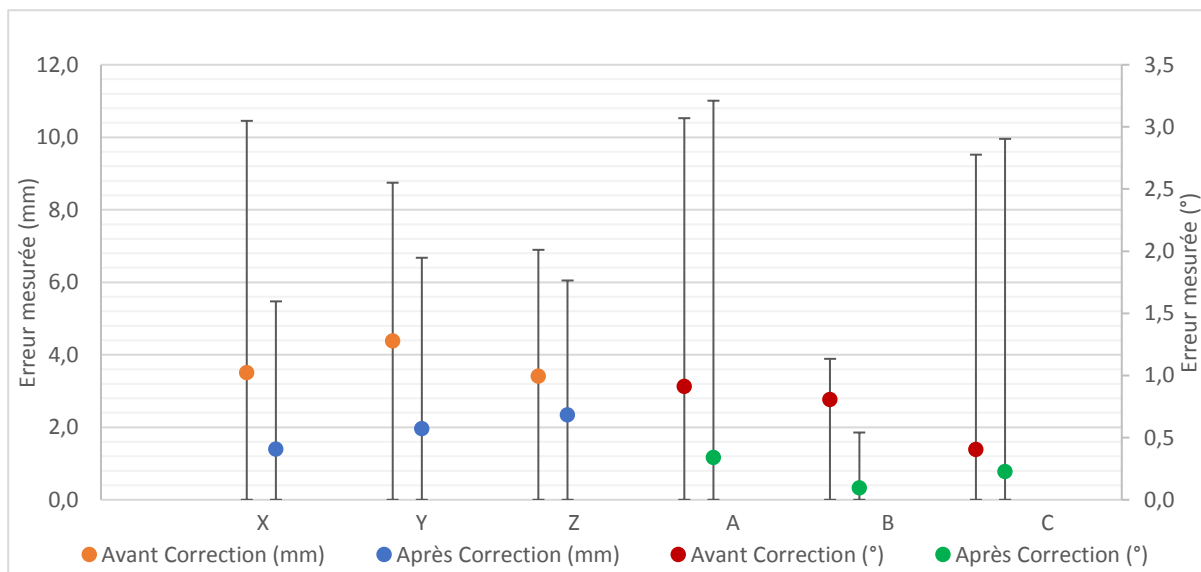


Figure 2-19 : Erreur de pose moyenne avant et après correction paramétrique - KUKA KR360

On observe (*figure 2-19*) que l'axe cartésien qui a le plus d'incidence sur la précision de pose est l'axe Z. Malgré une nette amélioration, après correction, il dévie en moyenne de 2mm sur l'ensemble de l'espace de travail mesuré. Il s'avère que cet axe cartésien révèle les imprécisions de pose causées par la gravité et la masse du robot. Cette imprécision ne peut être corrigée par la correction paramétrique car ce sont les flexibilités des éléments constitutifs du robot qui définissent la flexion de sa structure sous l'effet de son poids.

4.7. Limites de la compensation

Comme les résultats de cette méthode le démontrent, il n'est pas évident d'obtenir une précision de pose inférieure au millimètre avec une telle approche. Un moyen de mesure plus précis permettrait également d'améliorer ces résultats. Cette étude vise à améliorer la précision de pose absolue c'est-à-dire la précision observée entre la base zéro du robot et le repère de la broche d'usinage. De plus, l'étendue de l'erreur de pose est large dans toute la demi-sphère de travail mesurée. Dans le cas d'un travail local, la plage d'erreur observée serait diminuée. Ce dernier point sera traité dans le chapitre suivant.

Au regard des résultats obtenus devant ceux rapportés dans l'état de l'art de ce chapitre, ce développement donne des résultats tout autant efficaces. Pour des méthodes similaires, [NGU_15] présente de meilleurs résultats qui sont le fruit d'une expérimentation réalisée sur un robot possédant deux fois moins d'articulations et de bras que le nôtre. Les autres méthodes plus longues et coûteuses comme les modélisations élasto-statiques, en raideur ou en correction hors ligne démontrent des gains allant jusqu'à 60%.

Comme vu dans la première partie de ce chapitre, la correction paramétrique ne permet pas de compenser tous les défauts, comme les défauts de transmission dans les articulations ou les flexibilités des bras et celles des articulations. La limite de la correction paramétrique se trouve dans les défauts de nature aléatoire. Ces défauts caractérisent la répétabilité qui est généralement de l'ordre de 0.02mm pour des modèles de robot équivalent à celui utilisé ici.

5. Conclusion

Dans le but de réaliser l'usinage de grandes pièces en matériau composite Carbone/Epoxy, la robotique paraît être un axe de réponse pertinent et particulièrement les robots à cinématiques sérielles pour répondre aux besoins de flexibilité et d'adaptation. Cependant, ces machines sont développées pour répondre aux exigences d'opérations de type « pick and place », de peinture, de tâches répétitives, etc... Ces applications ne demandent pas, comme l'usinage, de hautes précisions de positionnement et de suivis de trajectoire.

Selon le cadre présenté dans le chapitre I, cette thèse propose des méthodes ré-exploitable afin d'offrir aux robots industriels standards l'opportunité de réaliser des opérations d'usinage de précision. Avant de réaliser des tâches d'usinage avec le robot de cette étude, des erreurs de positionnement en statique sont identifiées. Ce défaut est connu de la littérature et cette partie de l'étude y fait référence. Les causes de cette faible précision des robots sont multiples ainsi que les solutions existantes. Cependant, il n'est pas clairement identifié une méthode matériellement et financièrement abordable par un industriel pour corriger les erreurs de positionnement d'un robot. Il est donc nécessaire de continuer à développer et proposer de nouvelles méthodes susceptibles de répondre à ce besoin.

Dans ce chapitre, sont présentés les axes de développement choisis dans ces travaux. Une correction du modèle géométrique du robot contenu dans sa commande est réalisée pour

Amélioration de la précision d'un robot industriel

améliorer la précision de pose en statique du robot. Initialement de 7,25mm en moyenne, ce défaut est critique pour réaliser du suivi de trajectoire avec précision. La correction paramétrique est une méthode qui nécessite une modélisation géométrique du robot et des mesures expérimentales pour identifier les valeurs réelles des paramètres géométriques. En modifiant ces paramètres, le gain sur la pose en statique obtenu sur le robot KUKA KR360 est d'environ 56%. Ce qui permet une nouvelle précision de pose de 3.5mm en moyenne dans son espace de travail.

Le chapitre suivant est consacré au développement d'une correction hors-ligne qui permet de compenser les déviations causées par les efforts de coupe appliqués à l'outil pendant la phase d'usinage. Dans ce chapitre, des travaux ayant les mêmes objectifs sont présentés. Puis les spécificités de cette méthode réutilisable sont détaillées ainsi qu'une première expérimentation concluante. Le chapitre 4 présente la mise en place de cette méthode de correction sur l'application visée par nos travaux.

III. Méthode de correction hors ligne

1.	PREMIER USINAGE DU ROBOT KUKA KR360.....	107
2.	LA CORRECTION HORS-LIGNE.....	109
2.1.	Prémisses de la correction hors ligne	109
2.2.	Correction en usinage robotisé.....	110
2.3.	Principe de la correction miroir	112
3.	PREMIERS ESSAIS DE CORRECTION HORS LIGNE	113
3.1.	Mesures et identification des déflexions.....	114
3.2.	Première méthode de correction	116
3.3.	Résultats.....	118
3.4.	Conclusions	120
4.	HYPOTHESES DE TRAVAIL	120
4.1.	Liées au domaine d'application : Robot.....	120
4.2.	Liées à l'application : Usinage composite	121
4.3.	Liées aux moyens et à la mise en œuvre	121
5.	METHODOLOGIE CORRECTION HORS-LIGNE	122
5.1.	Protocole	122
5.2.	Processus de correction intelligent et autonome.....	123
5.2.1.	<i>Synchronisation des données.....</i>	<i>123</i>
5.2.2.	<i>Identification de la déviation</i>	<i>124</i>
5.2.3.	<i>Lissage de la déviation</i>	<i>124</i>
5.2.4.	<i>Modification du programme.....</i>	<i>129</i>
5.3.	Validation de la méthode de correction hors ligne.....	131
5.3.1.	<i>Protocole de mesure.....</i>	<i>131</i>
5.3.2.	<i>Analyse du programme de correction.....</i>	<i>133</i>
5.3.3.	<i>Analyse de la correction</i>	<i>133</i>
5.3.4.	<i>Validation et contrôle de la correction.....</i>	<i>136</i>
5.3.5.	<i>Discussion.....</i>	<i>139</i>
6.	CONCLUSION.....	140

Méthode de correction hors ligne

Comme défini dans le titre, l'objectif de ces travaux est d'augmenter la précision d'un robot pour des applications d'usinage de matériaux composites. Une première étude permet d'optimiser le processus de coupe et de préserver au maximum l'intégrité de l'outil. Un deuxième temps consacré à la mise en place d'une correction paramétrique démontre un gain important sur la qualité de la pose de la cellule robotisée en statique. Pour rappel, le critère qualité de l'application d'usinage du moule de réflecteur en composite Carbone/Epoxy est un critère RMS surfacique égal à 0.05mm. Il qualifie le respect dimensionnel et géométrique de la pièce. L'amélioration de la précision de pose constatée dans le chapitre 2 de l'ordre de 56% n'est pas suffisante pour qualifier le moyen dans cet intervalle de précision. Il est donc nécessaire d'aller plus loin. Pour cela, le développement d'une méthode de compensation hors ligne est étudié dans ce chapitre. L'objectif de cette méthode est notamment de compenser les déviations de l'outil causées par les efforts de coupe lors de l'usinage.

Pour entamer ce chapitre, les observations liées à un premier usinage sont présentées afin d'étudier le comportement du système robotique sous les contraintes du processus de coupe. Ensuite, un rapide état de l'art est proposé sur la correction hors ligne dont les premières applications sont dédiées aux machines-outils (CNC). Les premiers développements sur robots sont également mentionnés ainsi que les limitations de ces travaux.

Dans un second temps, la méthode de correction dite « miroir » est expérimentée sur un cas d'usinage simple. Cette mise en application permet de relever les limites de cette méthode dans notre contexte et de proposer une nouvelle méthode adaptée à l'usinage robotisée.

Enfin, un troisième temps est consacré à la présentation et à l'application de cette méthode adaptée. Les différentes étapes du processus de compensation sont détaillées et la mise en application, toujours sur un cas d'usinage simple, permet d'analyser les améliorations de cette correction. Les résultats sont ensuite discutés pour préparer une application d'usinage du moule de réflecteur proposée au chapitre 4.

1. Premier usinage du robot Kuka KR360

Un premier suivi dynamique d'usinage avec la cellule robotisée permet des observations utiles pour établir une stratégie d'usinage compatible avec un robot. Il s'agit d'un usinage plan avec une évolution de la position de l'outil sur les axes X et Y. Une fraise cylindrique deux tailles à quatre dents de diamètre 10mm réalise une rainure dans une éprouvette en composite Carbone/Epoxy. La profondeur de la rainure est de 5mm, l'avance par dent est fixée à 0.2mm pour une avance $V_f = 1600\text{mm/min}$ et une vitesse de coupe $V_c = 135\text{m/min}$, la vitesse de rotation de l'outil est donc de 4300tr/min. Le vecteur de la position mesurée de l'outil ($\overrightarrow{Pt_{mesuré}}$) est utilisé pour déterminer le vecteur des écarts (\vec{D}) de l'outil par rapport au vecteur de la position souhaitée ($\overrightarrow{Pt_{théo}}$), tels que l'exprime l'équation 3.1:

Équation 3.1

$$\vec{D} = \overrightarrow{Pt_{théo}} - \overrightarrow{Pt_{mesuré}}$$

La figure 3-1 présente, en fonction du temps, les coordonnées X et Y de l'outil en pointillés et les écarts déterminés sur les axes X et Y en traits pleins. L'outil effectue un mouvement hors matière avant la phase d'usinage délimitée par une ligne verticale verte.

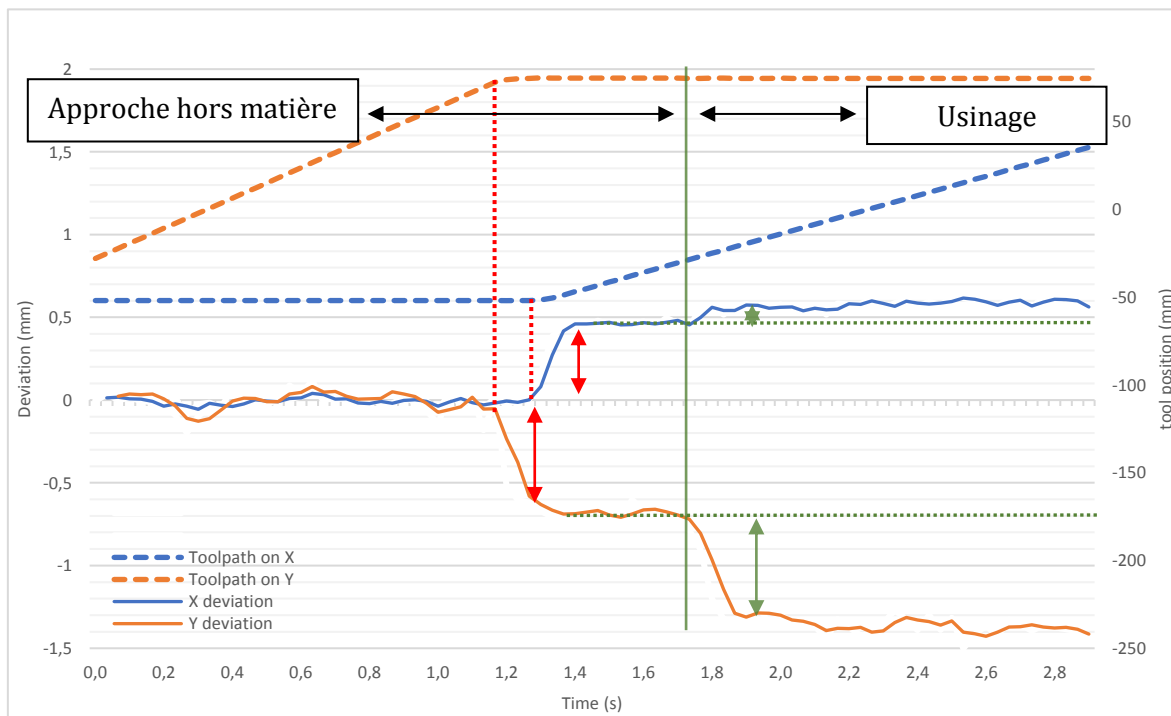


Figure 3-1 : Premier test d'usinage

Plusieurs valeurs de déviation se distinguent lors de cette mesure de trajectoire. Dès que la direction de l'avance de l'outil se modifie (lignes verticales rouges), une déviation apparaît (flèches rouges). C'est le cas pour les deux changements de direction sur X et sur Y qui engendrent

Méthode de correction hors ligne

respectivement des déviations de 0.5mm et 0.7mm. Pour les changements de direction observés, les articulations de la base du robot et des bras 1 et 2 (*figure 3-2*) adaptent leurs vitesses afin de respecter le parcours et la vitesse d'avance demandée par la commande. Les verticales rouges discontinues représentent les changements de trajectoire qui génèrent des variations de vitesse de rotation des axes rotoïdes du robot. Ces variations de vitesse mettent en évidence le jeu mécanique des engrenages et la flexibilité des articulations. Un autre phénomène appelé « inversion » caractérise le cas où une articulation passe d'une rotation dans un sens à son sens opposé. Ce phénomène n'est pas visible ici mais il engendre également des déviations causées par les jeux présents dans les articulations. En général, les inversions présentent des déviations en bout d'outil plus importantes que celles mesurées lors d'une grande variation de vitesse [COR_16]. [GAL_12] observe le même phénomène en suivi dynamique à l'aide d'un laser tracker. Il ajoute que l'amplitude de ces pics dépend de la posture du robot : car le principe fondamental de la dynamique admet qu'une masse en mouvement génère un moment de la force égal au produit du moment d'inertie par l'accélération angulaire. Par un effet de bras de levier, l'effort lié à la masse du robot génère un couple dans les liaisons rotoïdes. Plus le robot est déplié (bras tendu), plus ce couple généré est grand et les déviations observées sont importantes.

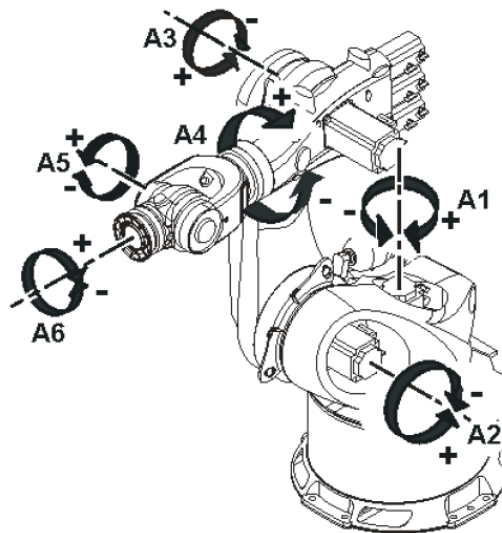


Figure 3-2 : Cinématique du robot Kuka KR360

Lors de l'entrée en matière, l'interaction outil/matière génère immédiatement une déviation suivant les axes X et Y respectivement de 0.1mm et 0.6mm (flèches vertes). Sans usinage, la structure du robot est uniquement soumise à la gravité et à son propre poids. Le processus de coupe engendre des interactions qui perturbent le positionnement. La déviation de l'organe final s'explique par la somme des flexibilités des différents éléments constitutifs du robot qui sont soumis à ces efforts. Dans ses travaux portant sur la correction de positionnement d'un robot, [ZHA_05] annonce une raideur moyenne des articulations d'un robot comme étant inférieure à $1\text{N}/\mu\text{m}$ alors que dans le cas d'une CNC standard, ces raideurs sont souvent supérieures à $50\text{N}/\mu\text{m}$. Dans ce cas d'un usinage d'aluminium, un effort d'usinage de 500N cause une erreur de positionnement de 1mm sur son robot contre 0.01mm pour une CNC.

Méthode de correction hors ligne

La platine de mesure d'efforts de coupe à capteurs piézoélectriques, présentée au chapitre 1, permet de mesurer les composantes de la force de coupe. Il s'avère que la force portée par l'axe Y est presque trois fois supérieure à celle portée par l'axe X. Le robot dévie donc dans la direction du vecteur d'effort appliqué à l'outil puisqu'une plus grande déviation est constatée suivant l'axe Y.

Ces premières mesures ont permis d'observer différents phénomènes lors d'un usinage : les déviations importantes sont causées par les flexibilités dans les articulations et par les efforts liés à la coupe. Il est important de mettre en place une stratégie d'usinage qui limite au maximum les variations de vitesses de rotation des axes du robot et l'effet bras de levier.

Pour compenser les déviations observées, il est choisi de mettre en place une méthode de correction hors ligne. Principe répandu dans le domaine de la fabrication par enlèvement de matière, ce type de pratique nécessite une adaptation particulière pour chaque contexte d'application.

2. La correction hors-ligne

Il existe deux types de correction de parcours, la correction hors ligne et la correction en ligne. La correction hors ligne est une correction qui est effectuée avant la phase d'usinage, tandis que la correction en ligne est effectuée pendant la phase d'usinage. La correction hors ligne est généralement utilisée pour des temps d'acquisition, d'analyse et de traitement des données longs. Dans son article, [SCH_16] met en œuvre les deux types de correction, la correction hors ligne et la correction en ligne. La première est basée sur un modèle de raideur et la simulation dynamique et la deuxième sur des mesures de suivi. Il conclut qu'il est difficile de cumuler les deux approches en raison du problème de synchronisation temporelle des deux corrections. Il conclut également que les boucles de rétroaction doivent encore être améliorées pour prétendre à une correction en ligne performante et que les capteurs externes sont actuellement la limite de cette méthode. Il faut ajouter que l'équipement pour l'application d'une correction en ligne est sophistiqué et coûteux. Il est également peu adapté à un environnement de travail industriel.

Toutes ces raisons et celles évoquées dans le chapitre 2 justifient le choix d'une correction hors ligne pour réduire l'imprécision de suivi de trajectoire du moyen usinant et atteindre le critère de qualité de l'application d'usinage traitée.

2.1. Prémisses de la correction hors ligne

La précision d'usinage est une des performances attendues d'un centre d'usinage après sa flexibilité de reconfiguration, elle reflète la précision finale des pièces réalisées. Il existe deux façons d'améliorer cette précision [CUI_12] : La prévention des erreurs de positionnement et la compensation de ces erreurs. La compensation des erreurs est la solution la plus utilisée par les travaux scientifiques pour des raisons de temps et de coût des développements plus faibles devant la modélisation ou l'anticipation des erreurs. La correction hors-ligne est issue de l'usinage sur machines-outils (CNC). Beaucoup de recherches à partir des années 80 se sont attachées à la résolution de cette problématique [RAM_00].

Méthode de correction hors ligne

Il existe deux types de compensation : la compensation logicielle et la compensation matérielle. La compensation matérielle présente de nombreux défauts dont la difficulté d'ajouter des composants dans un environnement d'usinage mais aussi le coût non négligeable de ces matériels, comme l'ajout de codeurs externes pour améliorer la précision d'une machine. Dans le cas des CNC, il s'agit de codeurs à niveau. Pour des applications robots ce sont des codeurs articulaires qui sont utilisés [AMB_17]. La compensation logicielle reste plus abordable et plus simple à mettre en place. Elle permet de compenser les erreurs en corrigeant les instructions de la commande numérique avant l'usinage (hors ligne) ou en les corrigeant en parallèle de l'usinage (en ligne). Les premiers travaux notables sont [DUF_87] et [LO_97], profitant de l'avancée de la technologie informatique en termes de rapidité de traitement et de calcul. Le premier développe une méthode de compensation logicielle (software). En utilisant un modèle cinématique, il réalise une compensation en « temps réel » mais observe que le temps de résolution du modèle reste un frein pour la démarche. Le deuxième utilise la mesure par MMT et une compensation logicielle hors-ligne dans le cas d'une opération d'usinage.

Plus récemment, de nouvelles méthodes de compensation logicielle permettent une réduction des erreurs de suivi de trajectoire de plus de 40% sur CNC. C'est le cas des travaux de [CUI_12], un algorithme est capable de reconstruire le programme FAO initial avec une modélisation des erreurs et une simulation du parcours de l'outil (*figure 3-3*).

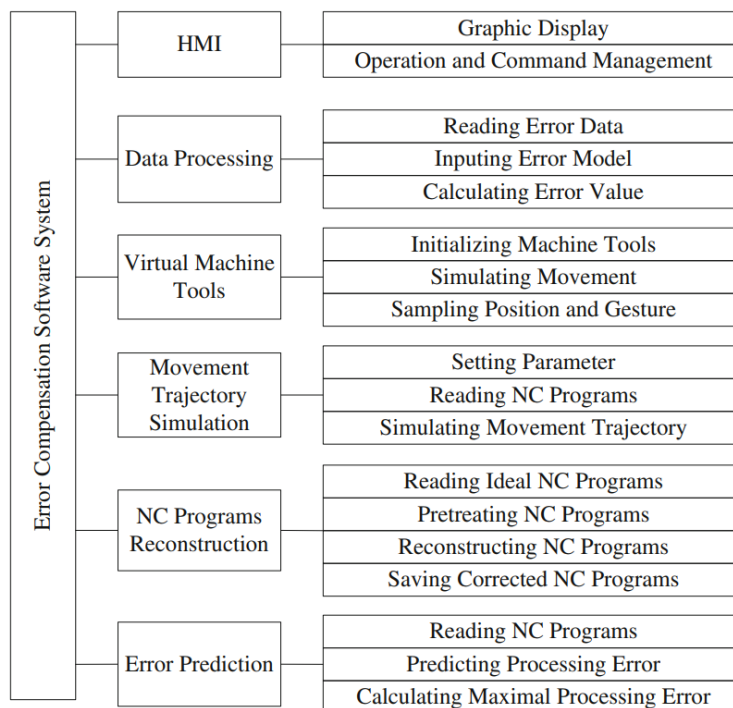


Figure 3-3: Organigramme de la compensation des erreurs par reconstruction du programme FAO [CUI_12]

2.2. Correction en usinage robotisé

En parallèle, les industriels annoncent le besoin de cellules d'usinage plus flexibles et plus abordables que celles impliquant des machines-outils conventionnelles. En association avec les

Méthode de correction hors ligne

fabricants de robots, des centres d'usinage robotisés voient le jour, accompagnés de leur problématique de faible précision d'usinage. Les activités de recherche en robotique se sont donc orientées dès les années 2000 sur des sujets de compensation de trajectoire et de correction des erreurs de pose de ces robots usineurs. Les avancées technologiques ont déjà améliorées la précision de pose pour des applications de manutention précise ou de tâches répétitives notamment par le moyen de la correction paramétrique, les précisions alors attendues dans le domaine de l'usinage de l'ordre du dixième de millimètre demandent des développements supplémentaires pour des robot gros porteurs.

Parmi ces travaux, [ZHA_05] est un des premiers à proposer une compensation logicielle en « temps réel » sur un robot industriel. A travers l'association d'une modélisation en raideur du robot ABB IRB 6400 et d'une mesure des efforts d'usinage, il détermine la déviation du TCP du robot pour la compenser en parallèle de l'exécution de la tâche d'usinage. Selon l'application de surfacage, la tolérance géométrique de la pièce usinée passe de 0.9mm à 0.3mm, pour un objectif de pré-usinage.

Des travaux consacrés à la prédiction des déviations d'un robot sont aussi intéressants comme [ABE_08] et [ABE_10]. Le développement d'un modèle d'effort couplé au modèle dynamique du robot permet de prédire les déviations de l'outil. La simulation de l'usinage montre une forte corrélation avec les valeurs de déviation mesurées en situation d'usinage réel.

Un axe de recherche très visité par la robotique est celui de la compensation des erreurs en raideur. Beaucoup de travaux s'appuient sur une modélisation en raideur et une identification expérimentale pour déterminer les déviations du TCP, conséquence des faibles raideurs du système robotisé. C'est le cas de [WAN2_09] qui obtient une amélioration de l'erreur de pose de 60% sur un robot moyen porteur. [GAL_12] développe une méthode d'identification des raideurs plus rapide, associée à un modèle d'effort. Il obtient une réduction de 50% sur l'erreur de pose avec une erreur résiduelle de 0,7mm pour un robot moyen porteur. Plus récemment, le travail de [COR_16] considère une nouvelle source d'erreur pour la compensation, celle des inversions des axes du robot. A l'aide d'une modélisation d'hystérésis dans le cas de la trajectoire d'un cercle, il prédit les déviations maximales et minimales caractéristiques des changements de sens de rotation des axes rotoïdes.

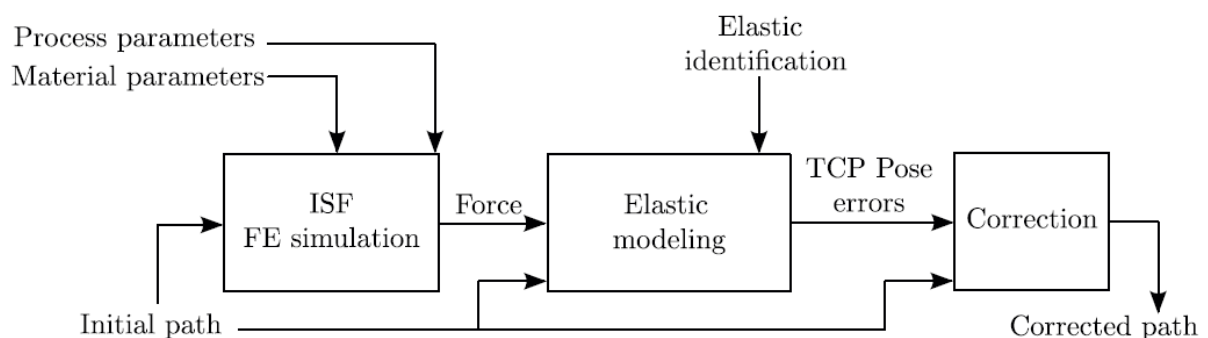


Figure 3-4 : Chaîne de compensation des déviations du robot [BEL_14]

Méthode de correction hors ligne

Cette recherche de précision de pose est également le sujet pour des procédés spéciaux comme l'ISF (Incremental Sheet Forming) : Les travaux de [BEL_14] se différencient par la modélisation élastique 3D du robot qui permet une identification paramétrique complète et adaptable à n'importe quel robot industriel. L'autre particularité notable de ses travaux est la prédiction des efforts du procédé par une simulation aux éléments finis. Cette prédiction est robuste pour des efforts inférieurs à 200N. Au-delà, une déviation entre la simulation et les efforts est constatés en raison des imprécisions d'identification des paramètres de raideur du modèle élastique. Cependant, les travaux de cet auteur (*figure 3-4*) donnent une amélioration de la précision de pose de plus de 70%, évaluée sur la réalisation en ISF d'une pièce cylindrique par un robot moyen porteur FANUC S420.

La plupart des travaux présentés ci-dessus font appel à une correction ou une compensation hors ligne. Cet état de l'art n'est pas exhaustif mais la plupart des sujets d'amélioration de précision des robots industriels font le choix de prédire les déviations par le biais de modélisation ou de simulation numérique. Les méthodes mises en œuvre sont généralement gourmandes en temps d'identification et en mesures expérimentales pour des résultats avoisinant le dixième de millimètre en termes de précision de pose moyenne.

2.3. Principe de la correction miroir

La correction miroir est depuis longtemps utilisée dans le monde de l'usinage car c'est une méthode fiable et robuste. Comme expliqué dans [OLA_12], au cours de la réalisation d'une trajectoire, une mesure des coordonnées de l'outil (trajectoire mesurée) est enregistrée et comparée à la trajectoire initialement prévue (trajectoire souhaitée). La *figure 3-5* tirée de [CAR_19], montre une série de points qui symbolise le parcours réel de l'outil et qui dénote une déviation par rapport au parcours souhaité. La méthode consiste à générer une trajectoire compensée en ajoutant un vecteur de correction ($\vec{\varepsilon}^*$) à la trajectoire souhaitée en tout point de mesure. Ce vecteur de correction est égal à la norme et opposé à la direction du vecteur d'erreur ($\vec{\varepsilon}$) qui caractérise l'écart entre les positions désirée et mesurée. Cette trajectoire compensée permet de faire coïncider le parcours réel avec le parcours désiré lors d'un second usinage. Une hypothèse forte est de considérer que : l'influence de la correction de la trajectoire est négligeable

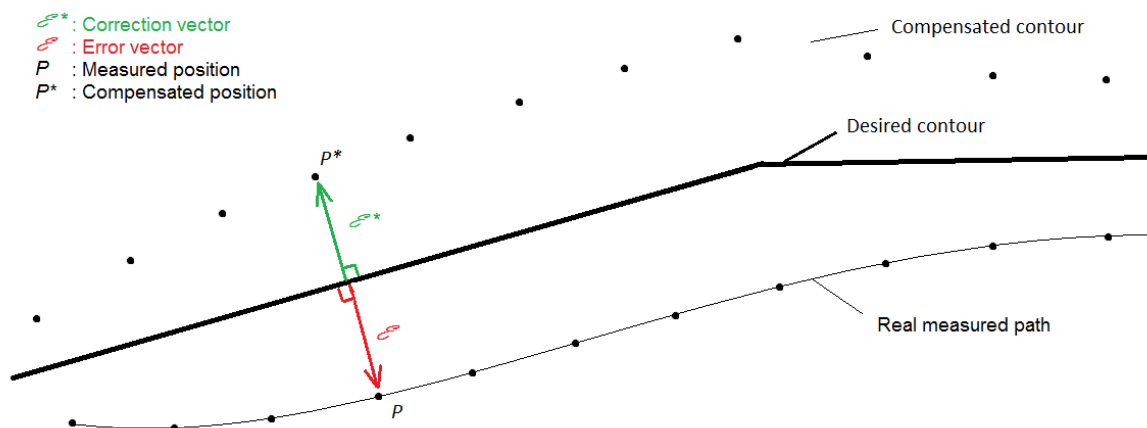


Figure 3-5 : Principe de la correction miroir [CAR_19]

Méthode de correction hors ligne

sur le comportement du système et sur l'erreur initiale. Cette hypothèse n'est valable que pour des corrections de faibles amplitudes.

La mesure expérimentale est une des complexités de cette méthode à cause de sa précision qui est variable selon le moyen utilisé. Dans le cas des machines-outils, les déviations sont faibles et inférieures à 5 centièmes. Il est donc difficile de trouver un moyen de mesure externe capable de les mesurer précisément et sans un bruit de mesure important [LO_98]. C'est pourquoi, plusieurs études consacrées à l'amélioration de la méthode miroir analysent cette erreur de mesure. Parmi elles, [LEI_08], [GUI_12] et [SHE_12] modifient la méthode en utilisant des courbes paramétriques telles que B-Spline ou NURBS pour réduire et lisser la part de l'erreur de mesure dans la correction. Dans ces différentes études, la compensation miroir est utilisée sur les machines-outils à commande numérique pour corriger le jeu mécanique des liaisons hélicoïdales des axes ou les déviations résultantes des efforts de coupe. Ces machines sont extrêmement rigides et la valeur de l'erreur de déviation sous effort est proche de 50 microns [HEN_15]. Dans notre cas, l'erreur mesurée sur notre robot est de l'ordre de quelques millimètres (*figure 3-1*).

3. Premiers essais de correction hors ligne

Une première approche de correction hors ligne est réalisée afin d'observer la réaction du robot à la correction de la trajectoire d'usinage. Dans ce premier essai, il est question de réaliser trois parcours d'usinage avec des profondeurs de passes différentes. En relevant les efforts mis en jeux lors de l'usinage, il sera possible de faire un parallèle entre la déviation et les efforts de coupe.

On utilise pour cela des éprouvettes réalisées avec le matériau composite de l'application. Il s'agit d'éprouvettes rectangulaires en composite carbone/Epoxy de dimensions 200*300mm. Elles sont obtenues par détourage d'une plaque issue du procédé d'infusion identique à celui des réflecteurs avant de recevoir deux perçages qui permettent de fixer l'éprouvette sur la table de mesure d'efforts de coupe (*figure 3-6*).

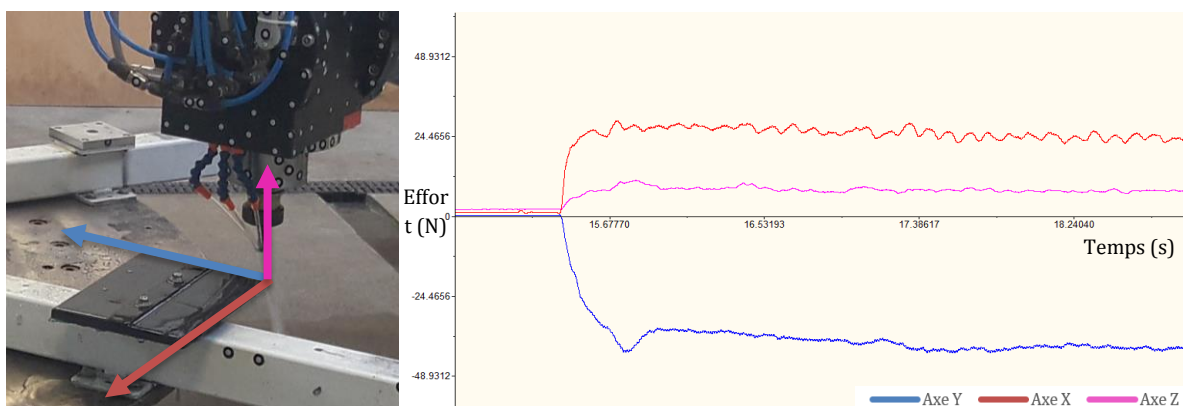


Figure 3-6 : Première correction hors ligne - Mesure d'effort

Méthode de correction hors ligne

Un parcours d'usinage d'ébauche est réalisé dans le sens long, sens X+ en orange sur la *figure 3-6*. Les paramètres d'usinage sont ceux définis selon la méthode COM développée dans le chapitre 1 : la vitesse de coupe est déterminée à $V_c=135\text{mm/min}$ et une avance par dent $f_z=0.2\text{mm/dt}$. Pour réaliser un nombre important d'essais sur notre éprouvette, l'engagement de l'outil est choisi à $A_e=3\text{mm}$ avec l'outil d'ébauche de diamètre 10mm.

Cette section se focalise sur l'essai d'usinage ayant une profondeur de passe axiale de 8mm car il est visuellement le plus intéressant. Les résultats permettront de faire le lien avec les deux autres essais qui ont respectivement des profondeurs de passe de 3 et 5mm.

3.1. Mesures et identification des déflexions

Le relevé d'effort pour l'usinage d'ébauche montre des efforts de coupe qui semblent relativement constants. Les données de mesure d'efforts sont filtrées par un filtre passe bas de Butterworth, cela permet de supprimer le bruit de mesure.

La *figure 3-6* présente le relevé de l'effort de coupe pour une passe d'usinage. Le vecteur d'effort moyen associé est d'environ 45N. Avec le même outil et un engagement de $A_e = 5.25\text{mm}$, le chapitre 1 présentait un vecteur d'effort moyen d'environ 100N. Cette différence s'explique par une profondeur de passe axiale inférieure (3mm) et par conséquent une section de coupe moins importante pour l'essai présenté dans cette section.

La *figure 3-7* montre l'écart entre la position souhaitée (en bleue) et la position mesurée (en rouge). La totalité de la trajectoire est représentée sur ce graphique. L'entrée et la sortie de l'outil dans la matière sont représentées par les lignes verticales oranges. On choisit de présenter particulièrement les données qui concernent l'axe Y car c'est l'axe le plus sollicité en termes

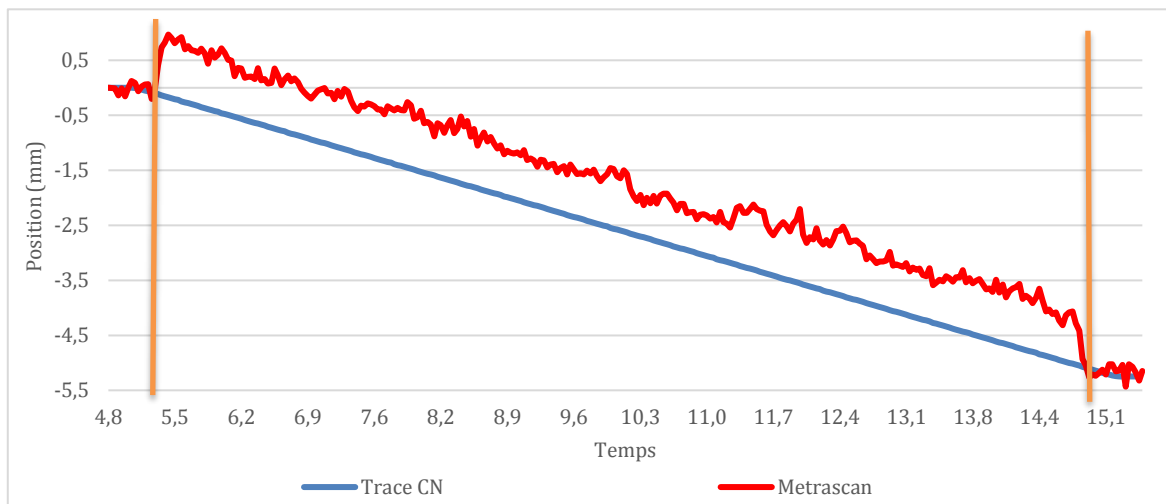


Figure 3-7 : Première correction hors ligne – Déviation de l'outil suivant l'axe Y du repère pièce

d'effort de coupe (*figure 3-6*). C'est notamment dans cette direction qu'est attendu la précision dimensionnelle de l'usinage (position de l'épaule lors du contourage).

Méthode de correction hors ligne

La trajectoire souhaitée est soustraite à celle mesurée pour déterminer la déviation de l'outil en fonction du temps. Les déviations maximales et minimales sont respectivement 1.04mm et 0.71mm pendant la phase d'usinage. La déviation moyenne calculée sur la totalité de l'enlèvement de matière est de 0.91mm par rapport à la trajectoire souhaitée avec un écart type de 0.22mm. Ce sont les efforts de coupe qui induisent cette déviation causée par la faible rigidité de notre système usinant comme identifié dans la bibliographie.

Un parallèle est fait entre les efforts de coupe et les déviations de l'outil pour trois opérations d'usinage sur le même parcours d'usinage (figure 3-8). Ce graphique montre que plus l'effort est important et plus la déviation de l'outil augmente. L'approximation linéaire de la déviation mesurée par rapport à l'effort mesuré (figure 3-8, graphique de droite), est obtenue suivant l'équation et le coefficient de détermination indiqués sur ce même graphique. Cette approximation passe par l'origine du graphique et permet donc de dire, en fonction des données que nous avons, que la déviation de la trajectoire paraît être proportionnelle à l'effort de coupe selon un coefficient de proportionnalité k égal à 0.022. Ce coefficient est déterminé avec la relation suivante :

Équation 3.2

$$Y_{\text{déviat}} = k * X_{\text{effort}}$$

Cette expression justifie que la raideur du robot est quasiment constante dans la plage d'efforts de coupe et dans l'espace de travail étudié. En effet, la position de l'outil évolue sur les 60mm² de la surface de l'éprouvette et représente de faibles déplacements entre chaque trajectoire d'essai à la vue de la taille du robot.

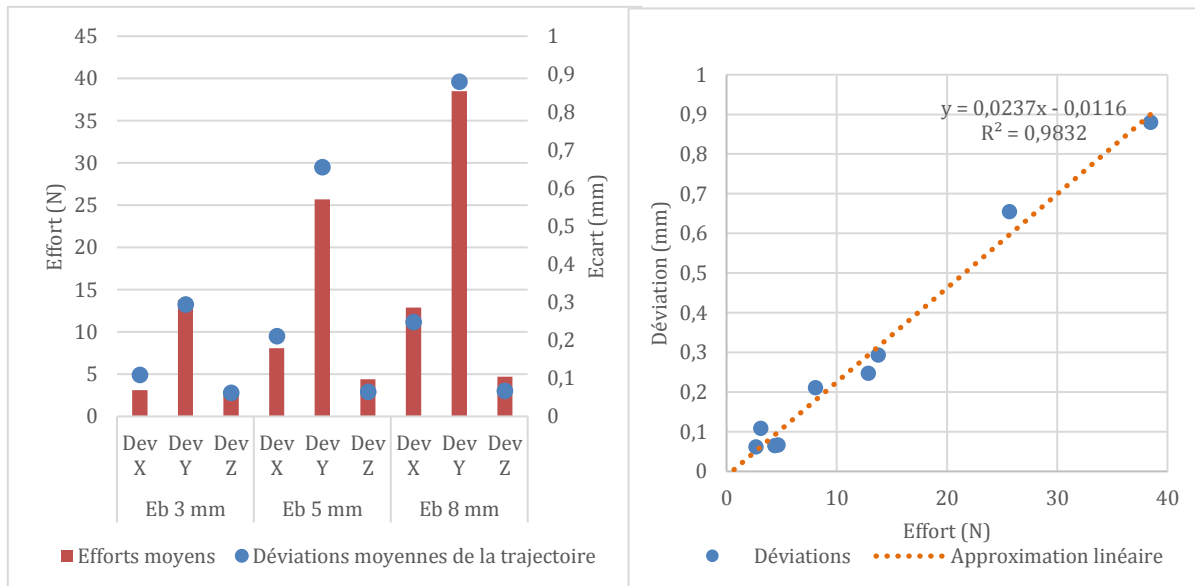


Figure 3-8: Première correction hors ligne - Etude force/déviation

Il est intéressant de vérifier que la déviation reste proportionnelle à l'effort si on s'assure de conserver des efforts de coupe inférieurs à une centaine de newtons. Car la proportionnalité observée n'est valable que pour de faibles efforts. En effet, la déviation du TCP d'un robot due à son comportement en raideur n'est généralement pas proportionnelle aux sollicitations

Méthode de correction hors ligne

extérieures (figure 3-9). Sur une plage d'efforts plus importante, cette corrélation donne lieu à une courbe logarithmique [BEL_14], ce qui conforte tout de même nos observations puisque pour de faibles sollicitations, la relation est localement quasi proportionnelle. D'un point de vue physique, ce phénomène est explicable : La déviation du TCP passe par plusieurs sources qui manquent de raideur et que l'on pourrait classer de la plus souple à la plus raide. C'est parce que toutes les sources de déformations de la structure du robot n'ont pas la même raideur qu'elles n'interviennent pas selon les mêmes amplitudes de sollicitation. Les jeux dans les articulations sont par exemple des sources de déviations qui sont très vite observables devant les déformations élastiques des bras qui seront visibles pour des efforts plus importants. Il y a donc dans un premier temps des sources de faibles raideurs qui confèrent à la déviation un caractère proportionnel à l'effort puis, des sources de raideurs importantes qui causent une déviation que pour des efforts élevés ne traduisant plus de proportionnalité. Il faut ajouter que l'assemblage complexe des liaisons rotoïdes du robot confèrent de fortes non-linéarités en raideur.

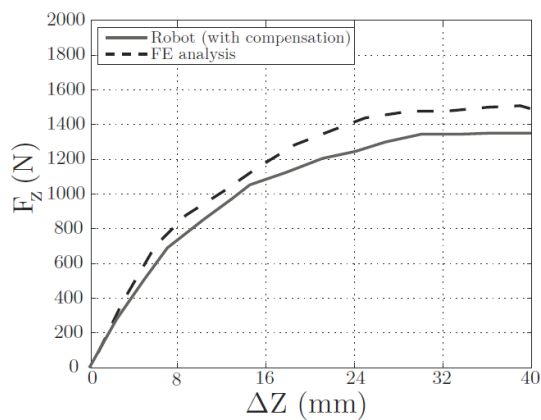


Figure 3-9 : Etude force/déviation en Z sur un robot FANUC S420 – [BEL_14]

3.2. Première méthode de correction

La méthode de correction dite « miroir » comprend trois étapes principales: la mesure de la position de l'outil par un capteur externe, l'analyse et le traitement des données, et enfin, l'étape de correction du parcours de l'outil. Pour cette dernière, il s'agit de modifier les coordonnées des points à corriger en appliquant un vecteur de correction pour chacun d'entre eux.

Pour respecter la méthode citée, le vecteur de correction serait normal à la trajectoire. Or dans notre cas d'étude, il est choisi normal par rapport à l'axe temporel et défini comme suit : $\overrightarrow{Pt_{mesuré} . Pt_{théo}}$ (figure 3-10). La norme du vecteur erreur est la distance qui sépare la position théorique et la position mesurée au même instant t .

Méthode de correction hors ligne

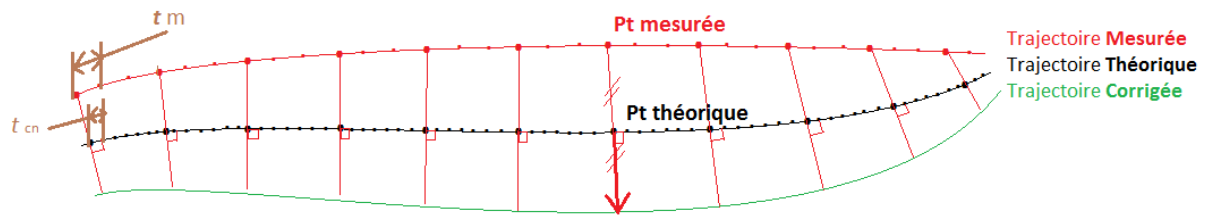


Figure 3-10: Première correction hors ligne – schéma méthode

La trajectoire imposée par la commande est généralement une suite d'interpolations linéaires (G1). La *figure 3-10* schématise la correction appliquée pour une trajectoire constituée de plusieurs points de passage. Pour faciliter la comparaison entre la trajectoire désirée et celle mesurée, nous relevons la position désirée dans la trace de servo fournie par la commande. Exprimée en fonction du temps, elle contient une succession de points enregistrés avec une période d'échantillonnage de 4ms (t_{cn}), huit fois plus élevée que celle du C-Track (*figure 3-10*, $t_m = 8 * t_{cn}$). Les coordonnées des points corrigés sont déterminées comme étant la différence entre les positions mesurées et les positions désirées par la commande après un recalage temporel.

La mesure de la déviation du robot pour une seule interpolation linéaire (*figure 3-7*), permet de déterminer les erreurs du parcours de l'outil. La déviation de l'axe Y est représentée sur la *figure 3-11*.

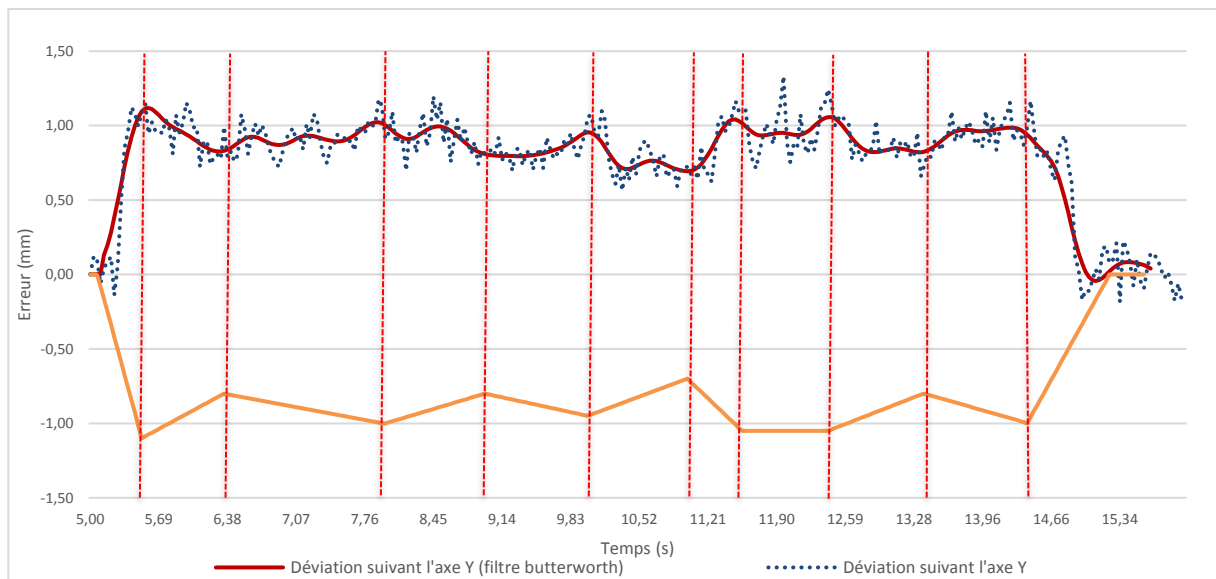


Figure 3-11: Première correction hors ligne - Identification des points de correction sur la trajectoire d'essai

Il est appliqué un filtre sur les données brutes du C-track pour retirer le bruit des mesures. Un filtre de passe-bas de Butterworth d'ordre 4 permet d'obtenir un signal lissé dans la bande passante. Pour une période de coupure de vingt points de mesure : $20 * 0.032ms = 0.64s$ soit une fréquence de coupure de 1.56Hz, ce filtrage nous permet d'identifier une tendance de la déviation. Dans la correction, on choisit d'intégrer des points de passage corrigés dont l'intervalle de temps est supérieur ou égal à 0.5s entre chaque. Ainsi, on peut corriger le parcours selon plusieurs

Méthode de correction hors ligne

extremums identifiés sur le signal de mesure lissé. Ces points sont représentés à l'aide de verticales rouges discontinues (*figure 3-11*).

La courbe orange représente la correction à appliquer à la trajectoire initiale, les valeurs de corrections sont donc opposées au sens de l'erreur calculée. En s'appuyant sur cette dernière figure, les vecteurs de correction des points sont énumérés dans le *tableau 3.1*.

Tableau 3.1: vecteurs de correction – valeurs en mm

Axe	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
X	0	-0.2	-0.05	-0.15	-0.1	-0.05	-0.2	-0.18	-0.05	-0.1	-0.1	0
Y	0	-1.1	-0.8	-1	-0.8	-0.95	-0.7	-1.05	-1.05	-0.8	-1	0
Z	0	+0.4	+0.25	0	+0.35	+0.15	+0.55	0	+0.05	+0.3	+0.1	0

Le programme initial de cette expérimentation ne possédant que deux points de passage (P0 et P11). Ces deux points sont les seuls à ne pas subir de modification puisqu'ils sont dans des zones hors matière et donc sans effort de coupe et sans déviation de l'outil.

En lieu et place d'une seule interpolation linéaire initiale, le programme corrigé contient 12 points. Les vecteurs de correction, contenant les trois valeurs de correction (x, y et z), sont calculés comme étant la somme de la position désirée avec l'erreur mesurée.

3.3. Résultats

La *figure 3-12* reprend la déviation mesurée initiale (courbe rouge) et présente celle mesurée après correction (courbe bleue). La différence notable entre ces deux mesures permet de conclure que la déviation est considérablement réduite. Le *tableau 3-2* annonce un gain de 80%

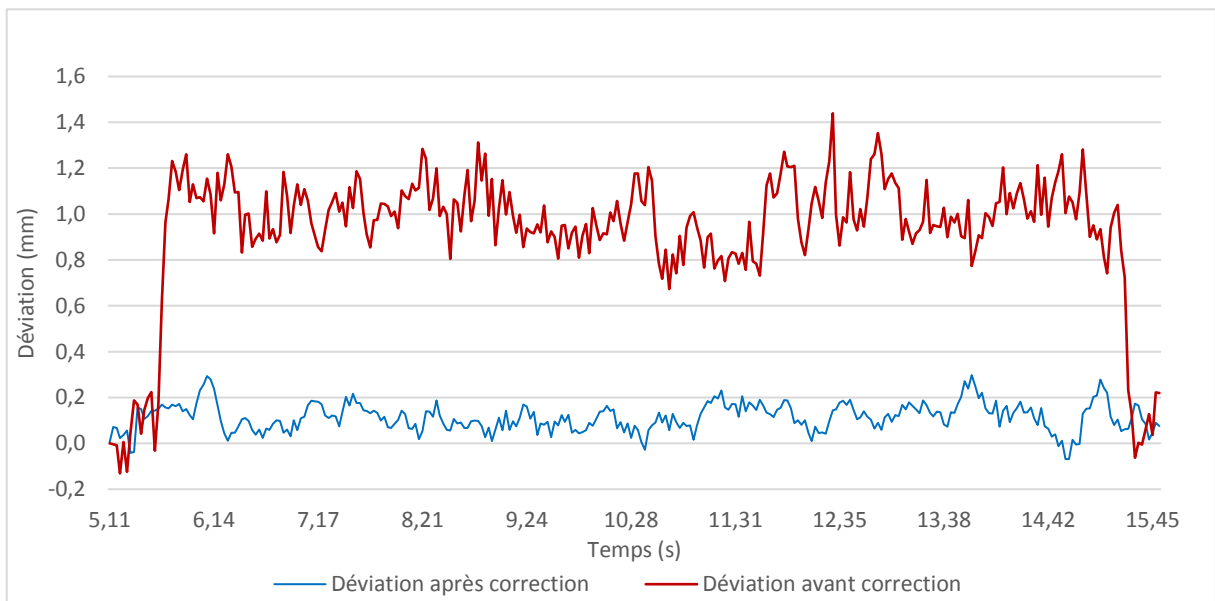


Figure 3-12: Première correction hors-ligne - Résultat correction miroir sur Y – Ap = 8mm

Méthode de correction hors ligne

et une déviation moyenne calculée de 0.15mm après correction, pour les déviations portées par l'axe Y. On observe une variabilité de la déviation de ± 0.1 mm autour de cette déviation moyenne. Cette variabilité résulte de la précision de mesure du C-Track.

La déviation résiduelle s'explique par la modification de la trajectoire de l'outil entraînant un engagement axial différent de la mesure initiale. En effet, la compensation permet à l'outil de se rapprocher de la trajectoire désirée et en même temps d'augmenter son engagement dans la matière d'environ 0.8mm. Ce qui a pour effet immédiat l'augmentation des efforts de coupe.

La variabilité de déviation est plus importante lors de la mesure initiale pour un vecteur d'effort de coupe moyen de 40N, que dans la mesure de la passe corrigée pour un vecteur d'effort plus important et égal à 55N environ. Cela vient conforter l'information de [BEL_14] : Pour de faibles efforts en bout d'outil, la déviation du robot est variable par ses souplesses et donc mal maîtrisée, alors que dans le cas d'efforts importants, sa déviation est stable et bien identifiée.

En appliquant cette méthode aux trois opérations de l'essai, il est possible d'exprimer les résultats de la correction entre les erreurs mesurées initiales et finales (*Tableau 3.2*). La part de réduction de la déviation initiale est représentée en pourcentage.

Tableau 3.2: Gain Correction miroir (%)

AXE	Ebauche 3mm			Ebauche 5mm			Ebauche 8mm		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Réduction déviations (%)	16	77	70	77	70	35	47	79	28
Réduction déviations par opération (%)	62			62			69		
Norme vecteur effort de coupe (N) - Avant/Après correction	14.8/16.4 (+10%)			26.5/32 (+20%)			40.4/54.82 (+35%)		

Cette méthode de correction améliore significativement le suivi de trajectoire du robot, elle permet de réduire les déviations de l'outil en moyenne de plus de 60%. Ces premiers résultats sont encourageants mais il faut garder à l'esprit que la trajectoire de cet essai reste peu complexe. Toutefois, cette compensation simple et rapide permet de pointer du doigt des limitations de la méthode et de sa mise en œuvre :

1. L'imprécision de mesure du moyen optique ne permet pas de se prononcer précisément sur la fluctuation des déviations mesurées après correction. Une analyse statistique de cette imprécision nous apportera plus tard de nouveaux éléments pour statuer.
2. Au cours de ces essais et pour une trajectoire de quelques centimètres, il est constaté que la déviation reste relativement constante sans modification des conditions d'usinage et des sollicitations externes appliquées à l'outil. Cela nous conforte dans l'idée suivante : La faible évolution de la configuration du robot afin de déplacer le TCP dans un rayon de 2 à 3cm et pour des conditions d'usinage stables n'entraîne pas une modification significative de sa déviation. Sa raideur

Méthode de correction hors ligne

peut être considérée comme étant constante pour un déplacement du TCP de quelques millimètres.

3. Dans le cas de l'ébauche, $A_p=8\text{mm}$, la correction engendre une augmentation de l'engagement de l'outil en moyenne de 0.8mm en Y. L'épaisseur du copeau est donc plus grande et résulte d'une hausse des efforts de coupe. Cette limitation de la méthode miroir est à prendre en compte pour des valeurs de correction importantes.
4. La multiplication d'interpolations linéaires, en lieu et place d'une seule initiale, va générer au niveau de la commande du robot une somme de consignes (accélération et décélération, variation de vitesse aux points de passage) affectant sans aucun doute la réponse dynamique du robot. On peut donc imaginer l'apparition de perturbations impactant la qualité du suivi de la trajectoire initiale. La réduction de la vitesse d'avance n'est pas envisageable pour pallier ces défauts dynamiques puisqu'elle régit en partie la qualité de la coupe et ne doit donc pas être modifiée. Pour alimenter ce constat, les temps d'usinage des deux parcours, initial et corrigé, sont relevés et respectivement de 9.78s et 10.03s . Pour une longueur d'usinage d'environ 30cm , la méthode appliquée allonge le temps du parcours pour les raisons évoquées. Il est donc nécessaire de veiller à respecter un nombre équivalent d'interpolations.

3.4. Conclusions

Les résultats de ces premiers essais sont encourageants et montrent l'intérêt de cette méthode, elle doit toutefois être améliorée et adaptée pour répondre au besoin industriel étudié.

La section suivante établit les bases sur lesquelles sera construite la méthode de correction hors ligne. Inspirés de ce premier essai de correction, les développements mathématiques et logiciels de ce travail sont justifiés par des critères d'analyse de signaux, spécifiques de l'application étudiée.

4. Hypothèses de travail

4.1. Liées au domaine d'application : Robot

La rigidité du robot est variable et dépend de sa posture [OLA_11]. Une hypothèse faite pour cette étude est de négliger cette variation de rigidité pour une compensation de la position de l'outil de quelques millimètres. Hypothèse 1: Il est alors supposé que le comportement du robot en un point mesuré reste identique en son point corrigé.

L'étude de proportionnalité entre les efforts de coupe exercés en bout de l'outil et la déviation du TCP du robot démontre une proportionnalité quasi-linéaire. D'autres travaux annoncent le contraire pour des efforts importants mais affichent des données qui confortent cette proportionnalité pour des efforts inférieurs à 100N comme ceux que nous mesurons.

Hypothèse 2 : Le système robotique conserve une déviation proportionnelle aux efforts exercés par le processus de coupe.

4.2. Liées à l'application : Usinage composite

Il est évident, au regard de la deuxième hypothèse, qu'une évolution des efforts de coupe entre l'état initial de la première mesure et l'état compensé du deuxième usinage entraîne une déviation de l'outil différente de celle mesurée. Cette observation ne remet pas en cause la première hypothèse puisque la raideur du système reste constante, c'est l'évolution des efforts qui modifie la réponse du robot.

La démarche de recalage devrait être itérative, en plusieurs étapes jusqu'à obtenir une précision suffisante compte-tenu de l'observation faite ci-dessus. Hypothèse 3 : Dans ces travaux, nous considérons une seule itération de correction. Cette hypothèse fera l'objet de discussions à la fin de ce chapitre.

La méthode présentée propose la correction d'un parcours d'usinage en s'appuyant sur les données de position mesurées de l'outil lors d'un premier parcours d'usinage. Il faut pour cela supposer des efforts identiques pour ces deux parcours d'usinage réalisés sur la même pièce. Hypothèse 4 : En d'autres termes, le matériau composite usiné est isotrope. Cette supposition n'est pas valable au niveau micro-structurel. Mais en raisonnant sur la section de coupe et en tenant compte du plan de drapage équilibré du stratifié, il est sensé de penser à des efforts de coupe constants pour des mêmes paramètres d'usinage.

4.3. Liées aux moyens et à la mise en œuvre

Nous avons vu dans la section précédente que le moyen utilisé, le C-Track, était limitant quant à sa faible précision de mesure de $\pm 0.15\text{mm}$. Il présente une enveloppe de mesure de 8m^3 , son fonctionnement est relativement simple et ne demande pas de matériel informatique spécifique et dédié sinon la suite logicielle qui l'accompagne. Autre point fort de cet outil pour un industriel, il est peu sensible aux fluctuations de l'environnement d'un atelier. Il s'adapte à n'importe quelle situation dans laquelle pourrait se trouver un robot d'usinage et ses caméras étanches lui permettent de travailler dans un environnement relativement humide. Enfin, lors d'un changement trop brutal de l'environnement, l'appareil le signale. Il est ensuite possible de le recalibrer avec une procédure simple et rapide, de même pour le palpeur manuel qui l'accompagne.

A l'aide de ce moyen, nous allons mesurer des trajectoires robot via des positions dans l'espace cartésien en connaissance des performances de ce moyen, il est donc nécessaire de déclarer une cinquième hypothèse.

L'imprécision de mesure du C-Track répond à une loi normale centrée autour de zéro, alors son écart type $\sigma = 0.05\text{mm}$ puisque son imprécision de mesure de $\pm 0.15\text{mm}$ correspond à la plage de normalité au niveau de confiance 99 %. Dans ce cas :

$$\sigma = IC^{99}/6$$

Avec IC^{99} : Intervalle de confiance 99%

La variabilité de la mesure du C-Track, impose à calculer le critère RMS de la mesure entre deux points dans le but de vérifier si le robot effectue une interpolation linéaire. Hypothèse 5 : Ce critère RMS inférieur à 0.1mm permet de valider une trajectoire linéaire. La valeur 0.1mm correspond à deux écarts types du capteur pour considérer un intervalle de confiance de 68%. Au-delà, la trajectoire est considérée non-linéaire.

5. Méthodologie correction hors-ligne

L'usinage de moule de réflecteur en Carbone/Epoxy exige une précision d'usinage importante. Le robot industriel Kuka KR360 faisant office de machine-outil dans la cellule d'usinage utilisée ne répond initialement pas à ce critère de précision. Pour répondre au besoin et améliorer la précision de pose, il est développé ici une méthode de correction hors ligne avec pour objectif de réaliser la pièce dans les tolérances demandées par la spécification du moule [ANNEXE 2](#).

Cette section présente l'ensemble des étapes de la méthode développée ici. Elles seront détaillées afin de justifier le caractère adapté de cette méthode et de comprendre la mise en œuvre qui sera également présentée.

5.1. Protocole

Le protocole de correction présenté ici est reproduit à chaque étape de la gamme d'usinage, ébauche et finition dans une phase d'apprentissage du comportement du robot.

Cette correction comporte cinq étapes qui s'appliquent donc sur la même pièce: Usiner et mesurer le parcours initial de l'outil, analyser les erreurs à l'aide du processus de correction, générer la trajectoire corrigée, usiner et mesurer le parcours corrigé de l'outil, analyser la pièce et déterminer le gain de la correction.

1. La première opération d'usinage est l'expérimentation de la trajectoire. La commande du robot exécute le programme FAO, c'est la trajectoire souhaitée. En même temps, le moyen optique C-Track mesure et enregistre la trajectoire réelle de l'outil.
2. Le processus de correction effectue l'analyse et le traitement des données du programme de commande numérique et de la mesure du suivi dynamique. Le résultat de cette étape est une déviation continue en fonction du temps.
3. La génération de la trajectoire de correction est déterminée à partir de la trajectoire souhaitée et de l'erreur de position identifiée.

Méthode de correction hors ligne

4. La deuxième opération d'usinage est l'expérimentation de la trajectoire corrigée. La commande du robot exécute le nouveau programme FAO. La trajectoire réelle est à nouveau contrôlée avec le suivi dynamique.
5. L'amélioration de la correction est déterminée par l'analyse de plusieurs données :
 - Le suivi dynamique du parcours corrigé.
 - Une mesure tridimensionnelle par le système ATOS. Ce dernier scanne la pièce pour comparer la surface usinée avec le modèle CAO de la pièce. Il définit le critère RMS de l'usinage.

Les étapes 2 et 3 sont réalisées par un processus autonome développé comme suit.

5.2. Processus de correction intelligent et autonome

Tel un post-processeur, cette procédure est basée sur des critères statistiques et physiques qui sont détaillés dans cette section. Elle s'appuie sur 4 fonctions ; la synchronisation temporelle des données d'entrée, le calcul de l'erreur de positionnement de l'outil, le lissage de l'erreur et la génération du parcours corrigé. Le développement de ce post traitement est codé sous python. Ce code est fourni en [ANNEXE 7](#).

5.2.1. Synchronisation des données

Le principe de correction s'effectue axe par axe. Il est schématisé par la [figure 3-13](#) [CAR_19], où un exemple de correction sur un axe cartésien est représenté. La trajectoire souhaitée est définie par le logiciel de FAO qui génère un programme au format ISO. Le programme CN est une succession de points de passage avec 3 coordonnées cartésiennes, 3 coordonnées d'orientation et des informations sur la vitesse d'avance de l'outil. Ces données de position et de vitesse de déplacement permettent de déduire la position souhaitée de l'outil (CAM_p) dans le temps. Le C-Track fournit les positions mesurées de l'outil (MES_p) sous la forme de points (composantes de translation X, Y, Z et composantes de rotation A, B, C). Ces points sont mesurés dans le temps à une fréquence de 30Hz.

Ces deux signaux (CAM_p) et (MES_p) sont synchronisés grâce à une pause de 2 secondes sur une position de l'outil définie en début du programme CN. La fonction de synchronisation recherche dans les données mesurées une succession de points, caractérisés par une position identique, correspondant à un temps équivalent à la pause programmée. Le $t=0$ est alors attribué au dernier point mesuré de cette position.

Après cela, cette fonction reconstruit la continuité du parcours souhaité. Indiqué dans le programme CN au moyen d'une interpolation linéaire (G1), la transition d'un point à l'autre s'effectue en ligne droite ([figure 3-13](#)).

Ces interpolations recréées permettent de déterminer la position souhaitée à tout instant t , en particulier celle correspondant à chacun des temps identifiés aux points de mesure du C-Track. Pour finir, cette fonction de synchronisation génère un tableau (DES_p), au même titre que

Méthode de correction hors ligne

les données mesurées (MES_p), qui renseigne successivement les coordonnées des points de la trajectoire souhaitée pour chaque temps associé aux points de mesure du C-Track.

La deuxième fonction utilise les deux tableaux DES_p et MES_p, de mêmes dimensions, correspondant respectivement aux points désirés et mesurés. Ils possèdent le même échantillonnage en temps.

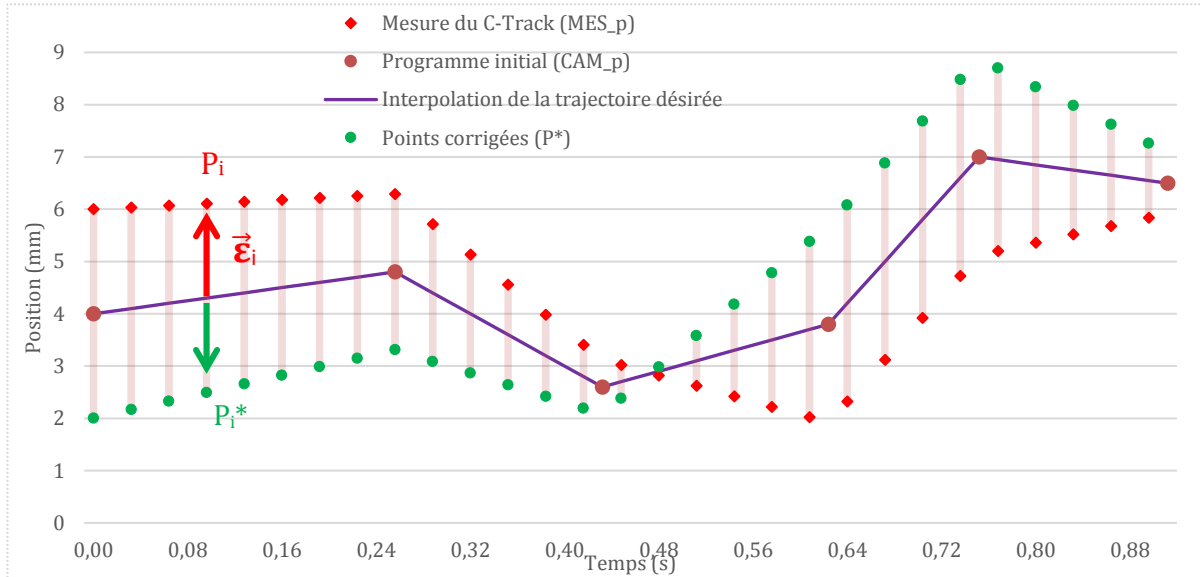


Figure 3-13: Schématisation du procédé de correction hors ligne [CAR_19]

5.2.2. Identification de la déviation

En comparant les points désirés avec ceux mesurés, cette fonction détermine par axe un écart (flèche rouge *figure 3-13*) qui est rapporté au vecteur d'erreur ($\vec{\epsilon}$). Contrairement au principe de la correction miroir expérimentée dans la section précédente, ce vecteur d'erreur ($\vec{\epsilon}$) n'est pas normal à la trajectoire souhaitée. Il est choisi un vecteur erreur comme étant normal par rapport à l'axe du temps. La synchronisation des données en temps permet de calculer ce vecteur automatiquement sans procéder à une transformation spatiale des données, ce qui demanderait plus de temps de calcul à notre processus de correction. Il est également plus rapide de traiter les problèmes de bruits de mesure dans cette configuration. La *figure 3-13* présente un exemple pour un axe (X, Y, Z, A, B ou C) : pour un point mesuré P_i , le point corrigé associé P_i^* est tel que l'équation 3.4:

Équation 3.4

$$P_i^* = P_i - \|\vec{\epsilon}_i\|$$

Avec : $\|\vec{\epsilon}_i\| = [MES_p]_i - [DES_p]_i$

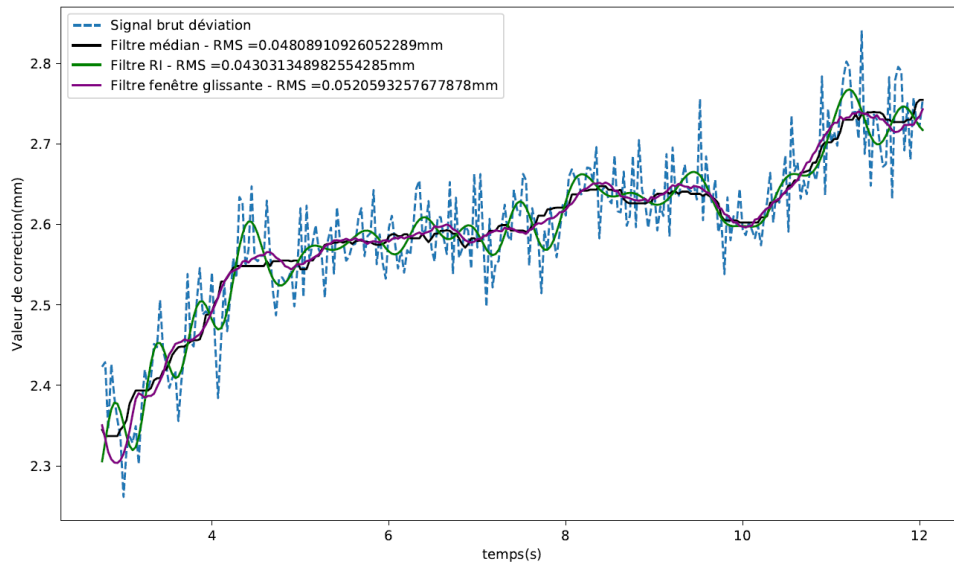
5.2.3. Lissage de la déviation

La déviation calculée présente une oscillation issue de la mesure du système optique (*figure 3-14(a)*) : une variabilité pouvant aller jusqu'à 0,2 mm entre deux points de mesure consécutifs. Si la correction de la FAO initiale observe les mêmes variations, des oscillations de

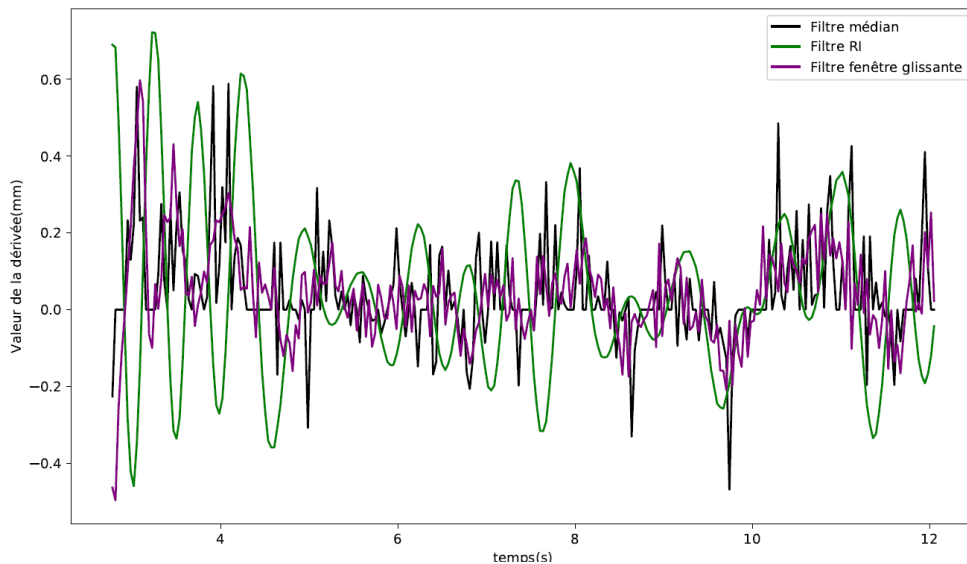
Méthode de correction hors ligne

commande néfastes à la qualité de la trajectoire peuvent apparaître, notamment par le biais de variations de vitesse de rotation des axes ou encore de phénomènes d'inversions. Un lissage de la déviation est nécessaire pour limiter cette variabilité dans la correction (*figure 3-17*).

Dans un premier temps, nous avons mis en place des filtres standards sur le signal des déviations calculées. Les filtres choisis sont dits « standard » parce qu'ils sont connus, rapide en temps de calcul et que leur robustesse a été éprouvée. La *figure 3-14* illustre les résultats de ces filtrages. Un filtre médian, un filtre à réponse impulsionnelle (Filtre RI) et un filtre à fenêtre glissante ont été testés. L'objectif est de réserver, au programme CN corrigé, une faible variation des valeurs de correction pour assurer le contrôle de la dynamique du mouvement du robot et limiter les phénomènes évoqués plus haut.



(a) Filtrages sur données brutes



(b) Dérivées premières des filtrages standards

Figure 3-14 : Filtrages standards du signal de mesure

Méthode de correction hors ligne

Le filtre médian propose un lissage du signal avec quelques extremums résiduels et une continuité intéressante contrairement au filtre RI qui génère un signal continu mais avec une grande amplitude influencée par les extremums du signal brut. La *figure 3-14(b)* présente la dérivée première pour ces trois filtres standards, le signal présentant les variations les moins importantes, bien qu'une excitation plus élevée, est le filtrage par fenêtre glissante. Le critère RMS associé à chaque filtrage dans la *figure 3-14(a)* est calculé sur la base des écarts entre le signal brut et le signal filtré. Ce critère ne présente pas une différence significative pour comparer les méthodes de filtrage. Les valeurs RMS avoisinent les 0.05mm, il n'est pas nécessaire de rechercher un critère RMS plus petit car cette valeur correspond à l'écart type de la mesure du C-Track (hypothèse 5).

Les paramètres renseignés pour effectuer le filtrage à fenêtre glissante sont les suivants ; le degré du polynôme utilisé pour faire passer les points d'un intervalle glissant et le nombre de points de l'intervalle. Un polynôme de degré deux permet d'identifier la courbure d'un signal alors qu'un polynôme de degré trois est généralement utilisé pour identifier des pics d'inflexion. Pour répondre à l'objectif, un polynôme de degré deux est donc choisi. Le nombre de points contenus dans l'intervalle doit être supérieur au degré du polynôme, sans quoi il n'y aurait pas de filtrage. Souvent déterminé par l'ordre de grandeur du détail que l'on souhaite observer, il est fixé à 10. Ce lissage permet d'identifier des tendances mais pourrait ne pas être fidèle pour de courtes variations du signal.

C'est pourquoi, inspiré du lissage par fenêtre glissante, nous développons un filtrage appelé « par zone » qui identifie automatiquement le nombre de zones équidimensionnelles et nécessaires pour être le plus représentatif possible du signal et ce, en tenant compte des variations du signal qu'elles soient courtes ou longues.

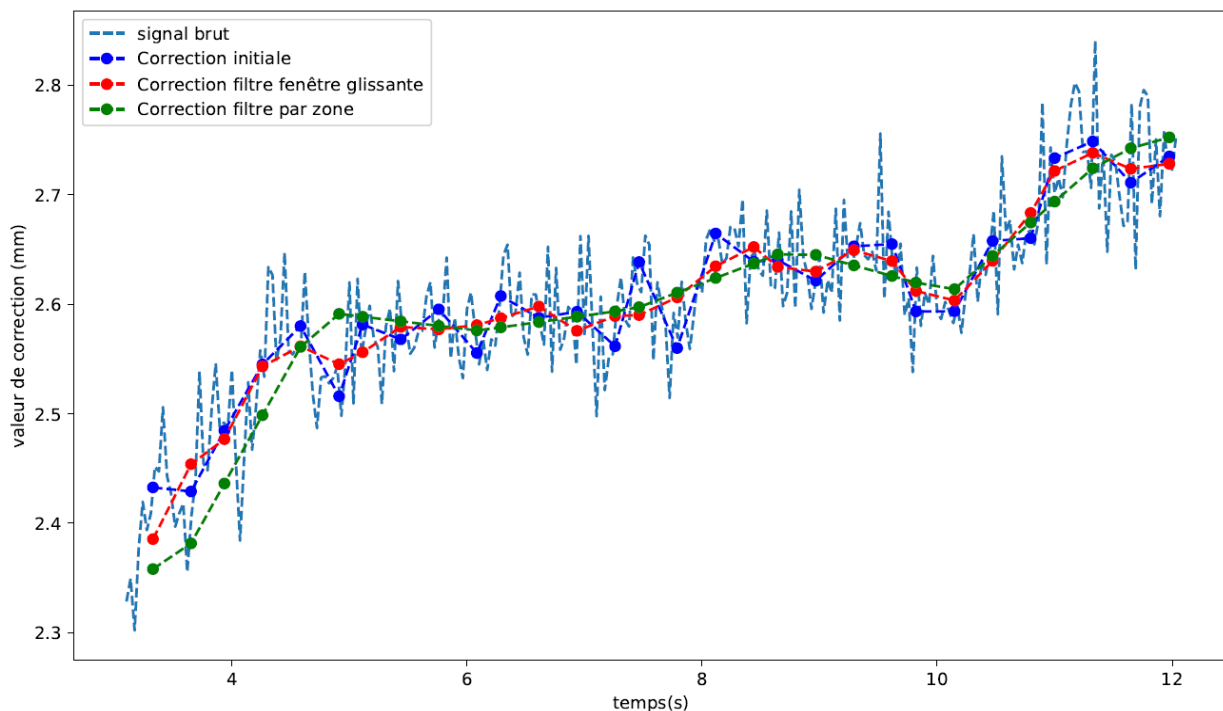


Figure 3-15 : Filtrages adaptées sur le signal de déviation

Méthode de correction hors ligne

La *figure 3-15* représente, pour comparaison, la compensation qui serait appliquée par la méthode miroir classique (courbe bleue), puis avec un filtrage à fenêtre glissante et enfin avec un filtrage par zone (en vert). Comme désiré dans le cadre de la compensation d'un robot, ce dernier filtrage possède la plus faible variabilité entre deux points de correction, la dérivée de ce signal filtré est également étudiée pour confirmer cette observation. Plus le signal de correction est lissé et moins le robot sera impacté par la correction.

Le filtrage par zone consiste à découper la séquence mesurée par zones et à identifier une régression linéaire sur chacune d'elles. Le choix du nombre de zones est régi par une procédure statistique itérative et contrainte. La première contrainte à respecter est de maintenir un minimum de $n = 40$ points de mesure par régression. Ce nombre de points détermine l'aspect "lissé" de la mesure sans pour autant manquer de données pour une régression représentative. Ce choix est le résultat d'un compromis biais-variance [THI_10], et de la minimisation du critère de la moyenne quadratique (RMS). Le RMS est la racine carrée de la moyenne d'un ensemble de nombre d'écartés élevés au carré, elle est mathématiquement calculée à l'aide de l'*équation 3.5*.

Équation 3.5

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n}(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \dots + \varepsilon_n^2)}.$$

La procédure est dite itérative car elle teste successivement tous les séquençages possibles et ne s'arrête que lorsque l'un des deux critères est atteint :

- 1- $RMS = 0.05\text{mm}$ (valeur de l'Ecart type du C-Track).
- 2- Critère de stabilisation du RMS en dessous d'une valeur de 0.1mm .

La régression linéaire du lissage du signal ne doit pas supprimer de l'information utile sur la déviation de l'outil. Pour s'en assurer, la valeur RMS est prise en compte :

- $RMS_{\text{regression}} \gg \sigma$ ($ET_{\text{C-Track}}$)
signifie que les écarts entre la mesure du moyen optique et la régression sont trop importants et que la régression n'est pas représentative du chemin réel.
- $RMS_{\text{regression}} = \sigma^{+/-0.01}$
signifie que les écarts sont similaires aux écarts de mesure du C-Track. Le lissage est donc représentatif de la trajectoire réelle.
- $RMS_{\text{regression}} \ll \sigma$
est impossible parce que l'écart-type du C-Track est le paramètre limitant la performance de la régression.

Le critère de stabilisation est une condition liée aux valeurs RMS des trois dernières itérations. Si pour des valeurs inférieures à 0.1mm , elles sont comprises dans un intervalle de $\pm 0.01\text{mm}$, alors l'itération sélectionnée est la première des trois itérations évaluées dans ce critère (*figure 3-16*).

Sur la base de douze trajectoires d'usinage similaires, une étude de convergence entre la valeur RMS et le nombre de zones de découpe du signal est présentée (*Figure 3-17*). Pour cet exemple d'usinage, la découpe en 8 zones de lissage permet de conserver un nombre suffisant de

Méthode de correction hors ligne

points de mesure par régression tout en minimisant le critère RMS. Ce compromis est réévalué pour chaque mesure.

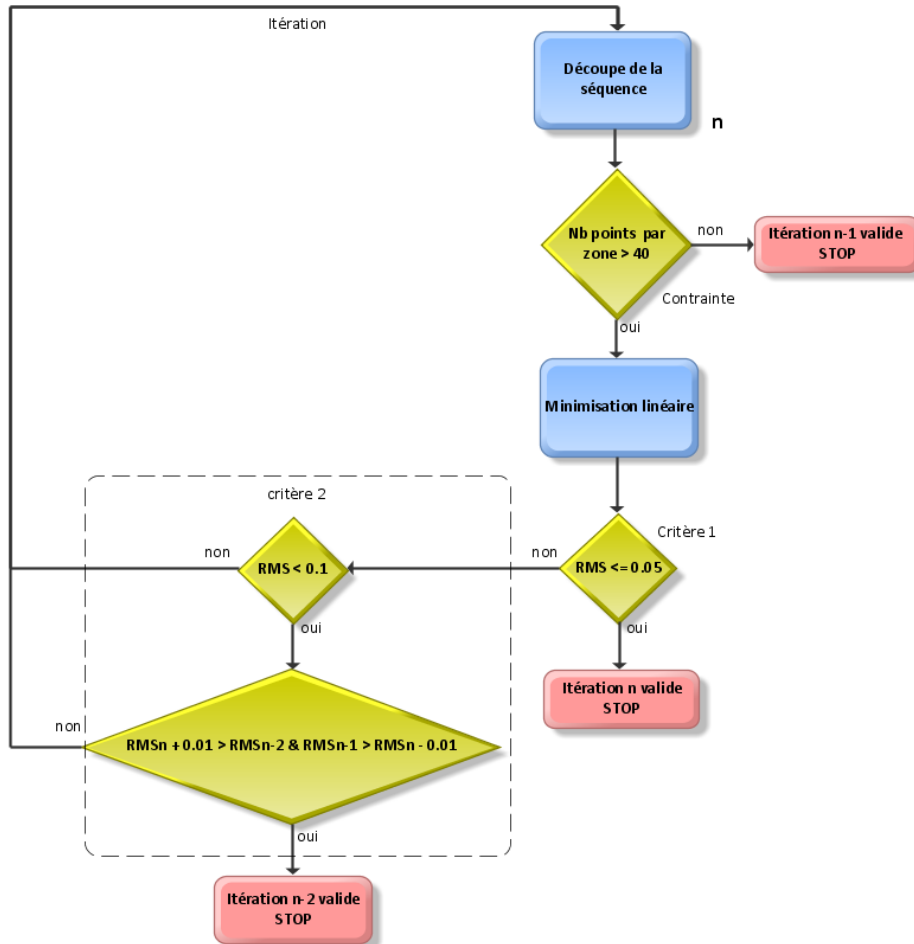


Figure 3-16 : Algorithme filtrage adapté

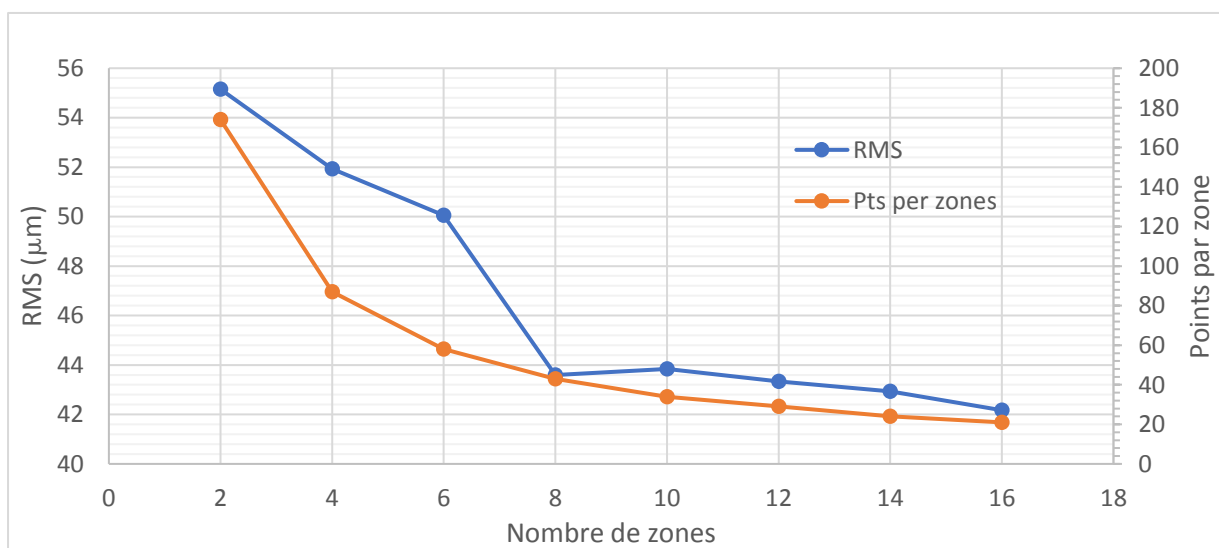


Figure 3-17 : Etude statistique du critère RMS en fonction du nombre zones - axe Y

5.2.4. Modification du programme

Dans l'exemple projeté (*figure 3-15*), le programme CN initial comporte 40 points lorsque le nombre de points mesurés par le C-track est de 370. Si tous les points de la mesure étaient pris en compte, alors le programme corrigé aurait beaucoup plus de points que le programme initial et il modifierait la réponse dynamique du robot, ce qui est à éviter. Le choix est donc de conserver le même nombre de points de passage. Les temps correspondant à chaque point de passage du programme initial permettent de contrôler ce critère du nombre de points de correction. Ainsi, Les déviations sont identifiées sur le signal des écarts lissés, en fonction des temps associés aux points du programme CN initial.

Cette fonction traite chaque axe de déviation séparément et applique un vecteur de compensation à six coordonnées à chaque point du programme d'origine. Le programme corrigé est ensuite édité au format ISO en préservant l'en-tête et la fin du programme, les caractéristiques d'avance et de rotation de l'outil.

En raison d'un travail en aval de l'usinage et de la mesure, il est juste de qualifier cette méthode comme étant une correction hors ligne. Les différentes étapes de cette méthode et les principales fonctions sont synthétisées dans la *figure 3-18*.

Cette partie concernait le développement des étapes 2 et 3 du protocole présenté plus haut. La section suivante développe les autres étapes de ce protocole à travers l'expérimentation de la méthode sur des éprouvettes de notre matériau déjà utilisées en section 3 de ce chapitre.

Méthode de correction hors ligne

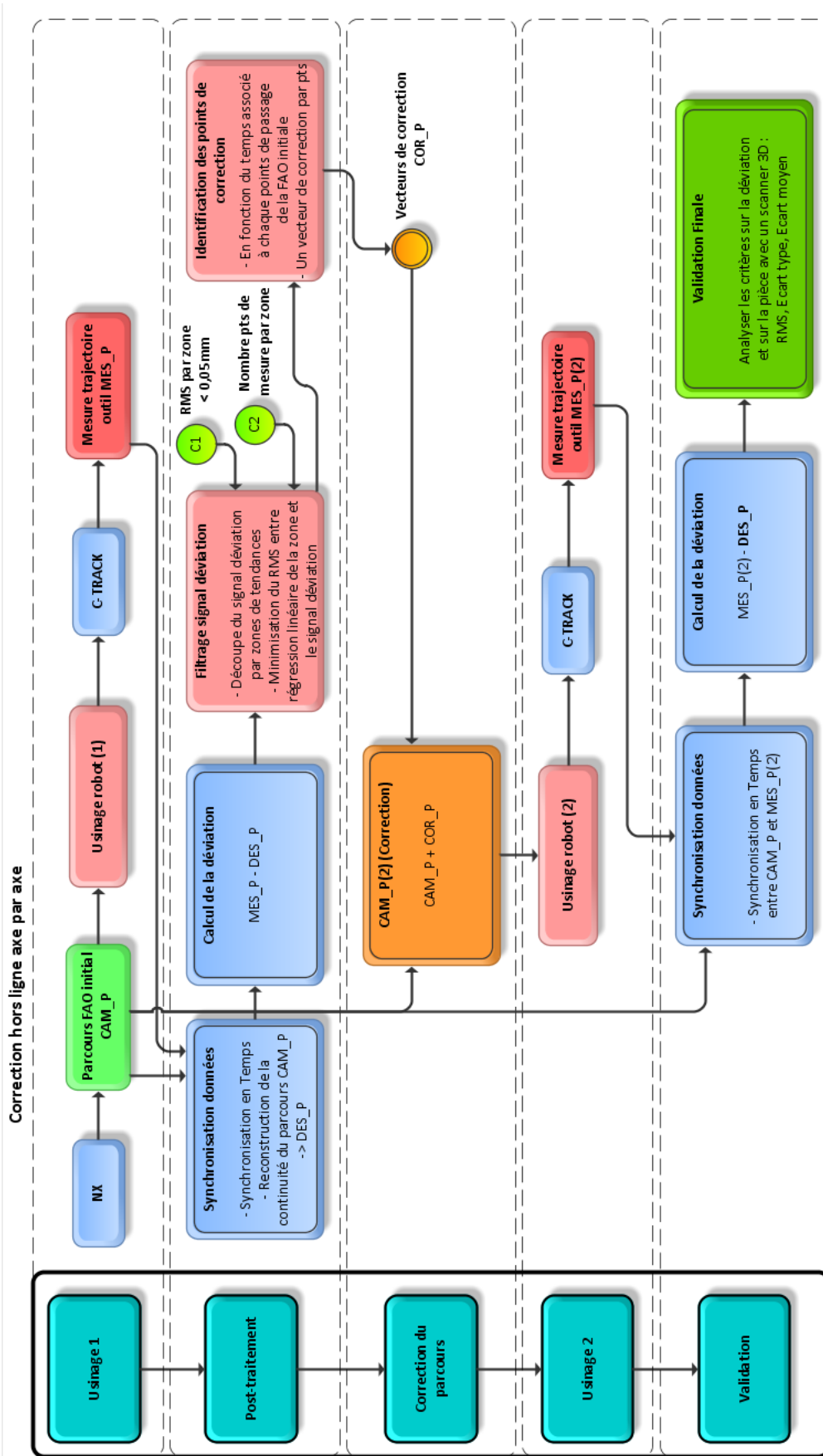


Figure 3-18 : Processus de correction hors ligne

5.3. Validation de la méthode de correction hors ligne

L'expérimentation de la méthode développée au-dessus est menée sur les éprouvettes de composite Carbone/Epoxy avec pour trajectoire d'usinage, une partie du parcours d'outil du moule de réflecteur. Ce programme représente environ treize secondes d'usinage. Une dizaine d'essais sont réalisés pour étudier la reproductibilité des mesures et des critères de performances, un seul de ces essais est utilisé pour les représentations graphiques de cette section dans un souci de cohérence. Ces 10 essais révèlent une déviation moyenne de l'outil égale à 2.47mm avec un écart type de 0.065mm, ce qui justifie d'une bonne répétitivité de nos essais.

5.3.1. Protocole de mesure

Comme le montre la *figure 3-19*, l'éprouvette de l'essai est fixée sur le plateau rotatif. La stratégie en spirale est adoptée au même titre que pour l'usinage du réflecteur, la rotation du plateau permet de limiter le parcours réalisé par le robot et génère l'avance de l'outil sur l'axe X du repère pièce. Le mouvement de l'effecteur du robot (broche) est donc décrit sur le plan Y-Z pour une coordonnée programme en X constante, $X = 0$, selon l'orientation du repère représenté en *figure 3-19*.

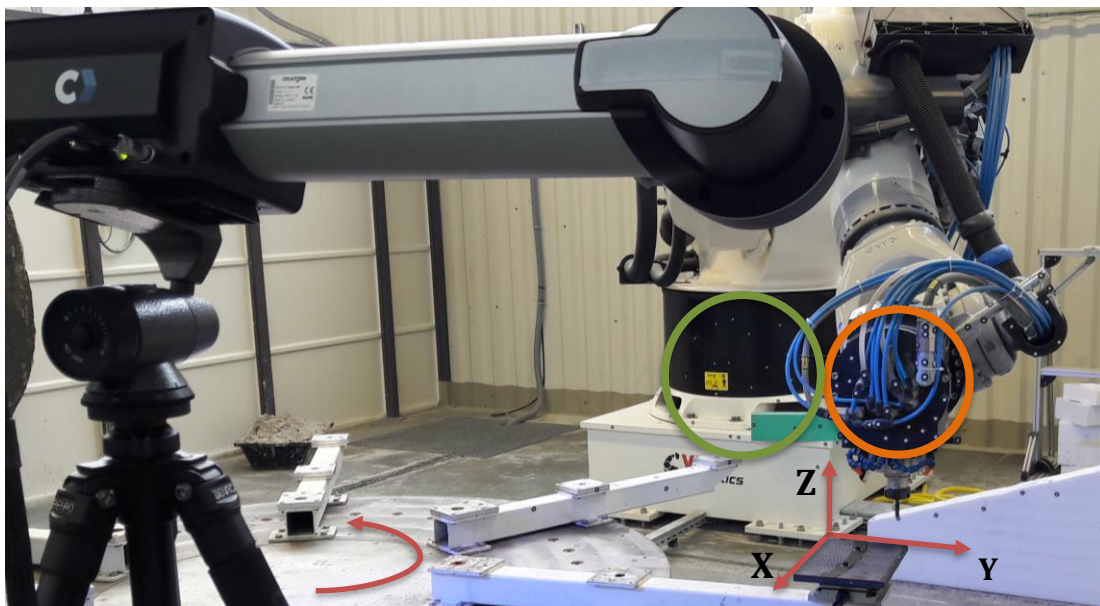


Figure 3-19 : Mise en œuvre de la correction hors ligne

Le C-Track est positionné face au robot de façon à observer à la fois le repère pièce et le repère final (positionné en bout de l'outil) *figure 3-19*. Une matrice de transformation permet au C-Track d'identifier le repère pièce en visualisant les cibles positionnées sur la base du robot (incluses dans le cercle vert de la *figure 3-19*). La suite du protocole de mesure est similaire à celui présenté dans la section 4.6.1 du chapitre 2.

La *figure 3-20* présente la trajectoire d'usinage. Seule la partie d'usinage est prise en compte par le post-processeur de correction. Cette partie de la trajectoire est comprise entre les deux lignes verticales oranges (*figure 3-20*).

Méthode de correction hors ligne

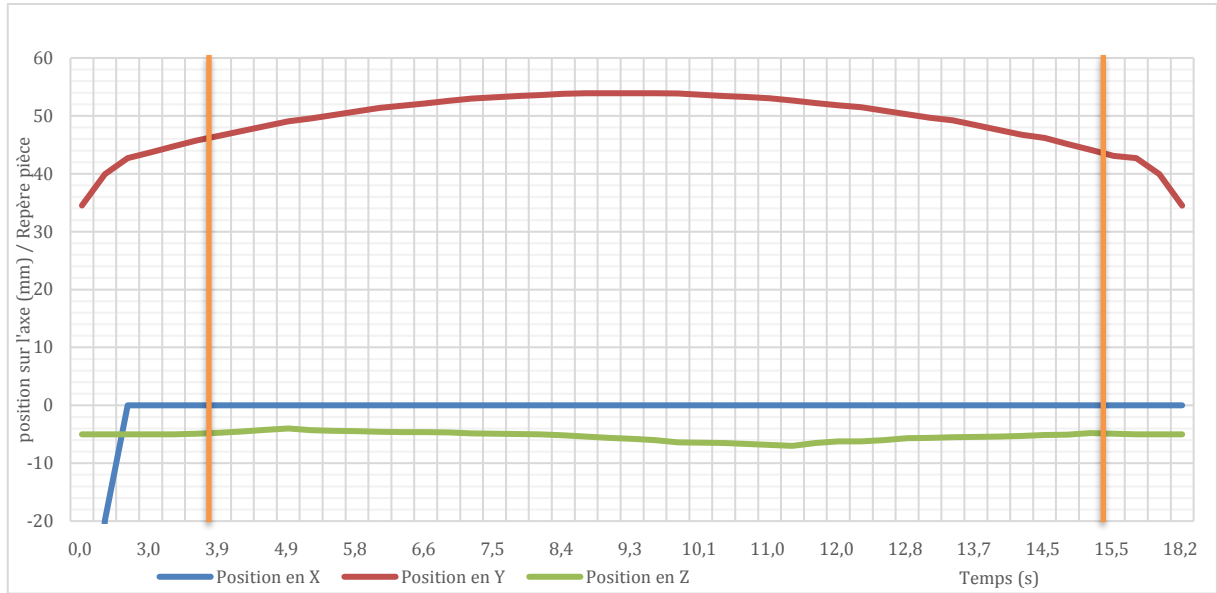


Figure 3-20 : Cordonnées X,Y et Z de la trajectoire souhaitée

Les paramètres d'usinage sont ceux définis selon la méthode COM développée dans le chapitre 1 : la vitesse de coupe est déterminée à $V_c = 135 \text{ mm/min}$, la profondeur de passe est définie à $A_p = 5 \text{ mm}$, et l'engagement de l'outil à $A_e = 5.25 \text{ mm}$ pour un notre outil d'ébauche de diamètre 10mm, et une avance par dent $f_z = 0.2 \text{ mm/dt}$.

La mesure des efforts de coupe dans les mêmes conditions que la méthode COM présentée au chapitre 1 permet de faire le parallèle entre les efforts de coupe relevés sur machine-outil, environ 100N (CH1), et ceux réalisés sur notre cellule d'usinage robotisée. Les efforts moyens relevés par la platine de mesure, par axe (figure 3-21), permettent de calculer un effort moyen de 55N avant correction. Les déviations de l'outil causées par la déflexion du robot, sous ces

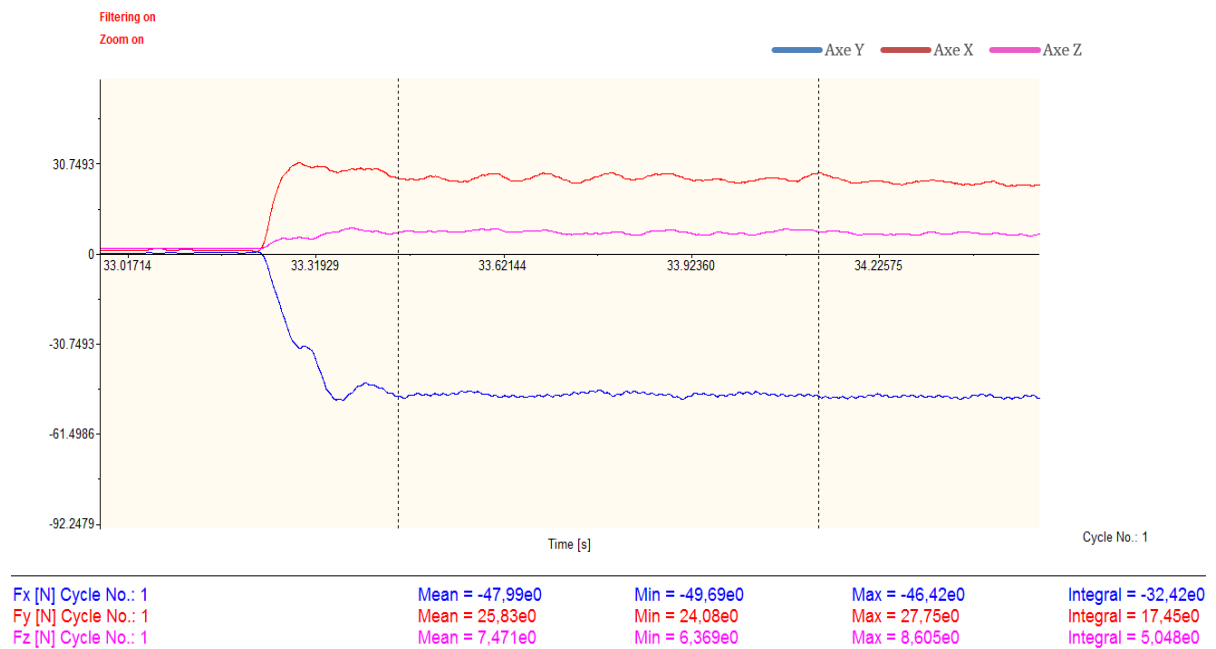


Figure 3-21 : mesure des efforts de coupe sur robot – Application méthode de correction hors ligne

Méthode de correction hors ligne

contraintes, expliquent la différence entre ces deux relevés. La suite de l'analyse de la méthode concernera l'axe Y puisque c'est l'axe le plus sollicité en effort. Cependant, la conclusion portera sur la correction des trois axes et des trois orientations qui caractérisent la position de l'outil.

5.3.2. Analyse du programme de correction

La *figure 3-22* présente les différentes étapes du traitement de la mesure de l'axe Y réalisées par le post-processeur comme présenté en section 6. L'écart évolue entre 2,2 mm et 2,4 mm, il est le résultat de nombreuses sources d'erreur. On sait que la sollicitation en effort de l'usinage est la principale cause de cette déviation. Cependant, la ligne en pointillé (*figure 3-22*) souligne un biais dans la déviation et indique qu'une autre source d'erreur est mesurée puisque l'engagement de l'outil dans le matériau est constant. Cette déviation est causée par la somme des erreurs de positionnement en statique du robot et des imprécisions de palpation du repère pièce de la part du robot et du C-Track, ce biais sera également compensé par la correction.

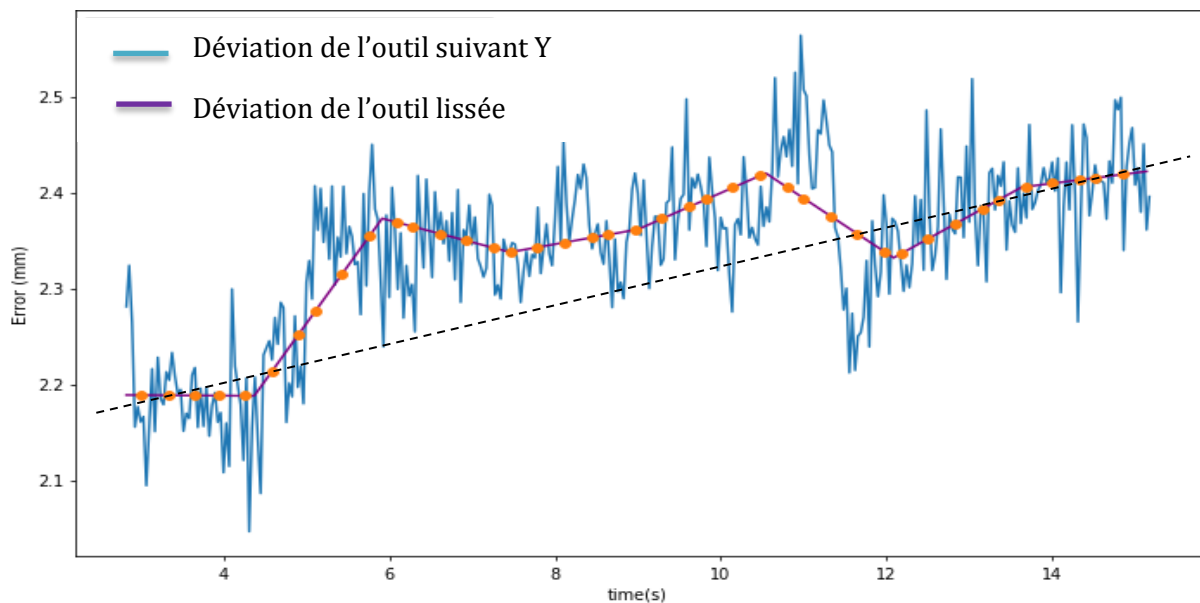


Figure 3-22 : Traitement de la mesure de l'axe Y

Pour cette déviation identifiée, la procédure itérative de lissage détermine un séquençage en 8 zones égales (*Figure 3-17*) :

- une régression minimisée $RMS_{\text{regression}} = 0,052 \text{ mm}$
- un nombre de points mesurés par régression $n > 46$.

Les points orange (*figure 3-22*) représentent, les valeurs de déviation à prendre en compte pour générer la correction en Y, identifiées avec les temps associés à chaque point de passage du parcours FAO initial.

5.3.3. Analyse de la correction

Une première observation se porte sur le temps d'usinage du parcours corrigé. C'est à dire le temps entre l'entrée et la sortie de l'outil dans la matière. Les relevés du C-Track donnent des

Méthode de correction hors ligne

temps de 12.968s pour le parcours corrigé contre 12.964s pour le parcours initial. La correction ne modifie pas le temps d'usinage, cela signifie que son impact sur la dynamique du robot est faible et que les critères choisis sont suffisamment limitants pour garantir un tel résultat.

Les *figures 3-23, 3-24 et 3-25* montrent respectivement pour les axes X, Y et Z l'erreur de positionnement de l'outil en fonction du temps, avant et après la correction de l'usinage. Le *tableau 3.3* présente les indicateurs de performance avant et après correction. Ces critères, issus de la mesure de la trajectoire, fournissent des informations supplémentaires pour l'analyse de cette correction. Il s'agit des déviations moyennes et des valeurs RMS calculées. Ces critères sont également mesurés dans la section suivante avec d'autres moyens de mesure pour caractériser la correction.

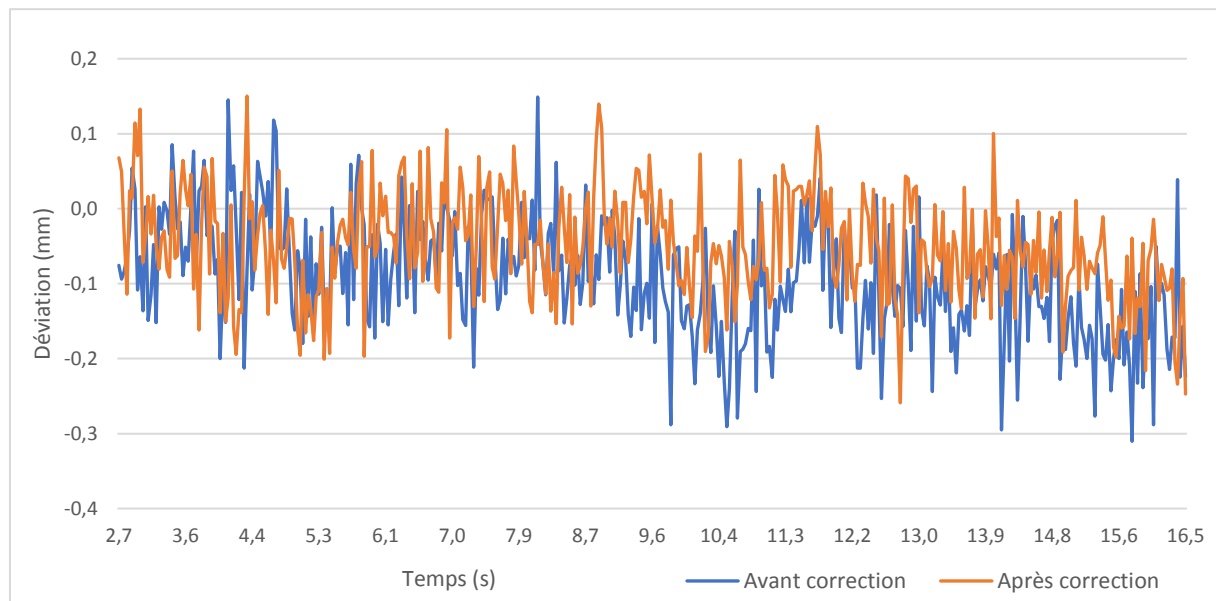


Figure 3-23 : Déviations avant et après correction - Axe X

Les indicateurs du *Tableau 3.3* démontrent que le parcours corrigé améliore d'environ 50% la précision de la position de l'outil sur l'axe X, bien que cette direction ne soit pas primordiale pour la qualité de l'usinage. Il est constaté une diminution de $40\mu\text{m}$ des valeurs de l'erreur moyenne et du RMS de la mesure. Malgré cette valeur RMS réduite, la *figure 3-23* permet d'observer que le bruit reste similaire pour les deux mesures, oscillant d'une valeur de l'incertitude de mesure du C-Track autour de la valeur moyenne de déviation.

Tableau 3.3 : Déviations mesurées - C-track

(mm)	Avant correction				Après correction			
	X	Y	Z	Vecteur erreur	X	Y	Z	Vecteur erreur
<i>Déviations moyenne</i>	-0,084	2,340	0,828	2,484	-0,043	0,323	0,049	0,329
<i>RMS (déviations)</i>	0,113	2,342	0,836	-	0,081	0,337	0,104	-

Méthode de correction hors ligne

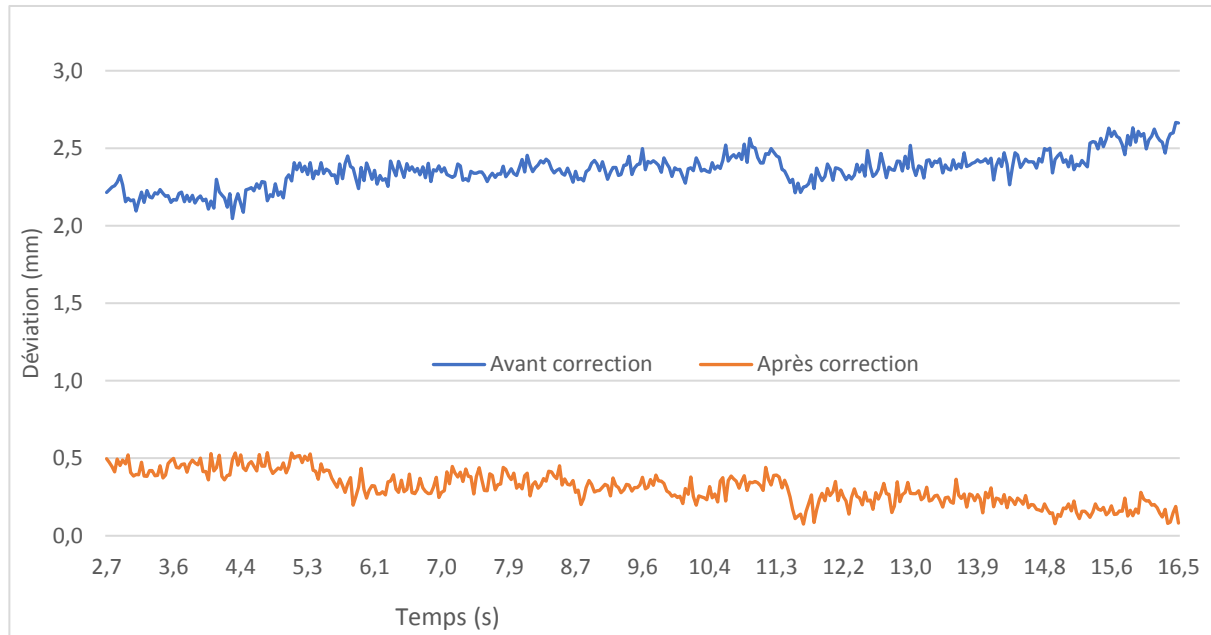


Figure 3-24 : Déviations avant et après correction - Axe Y

En ce qui concerne la trajectoire suivant l'axe Y, l'amélioration est plus importante (Figure 3-24). Les indicateurs montrent une diminution de 2 mm sur l'erreur moyenne, le critère RMS est également réduit. Entre la déviation moyenne initiale et celle corrigée, l'outil possède un engagement axial supérieur de 2,017mm. Par conséquent les efforts de coupe augmentent et modifient la réaction de la structure du robot. Une erreur résiduelle moyenne de 0,32 mm est toujours présente après correction, à cause de cette modification d'engagement de l'outil (Tableau 3.3). Un changement de tendance de la déviation est également observé. Initialement ascendante, elle est descendante après correction. Cette modification permet de pointer du doigt la non-linéarité de la déviation de la position de l'outil pour un déplacement de plus de 2mm.

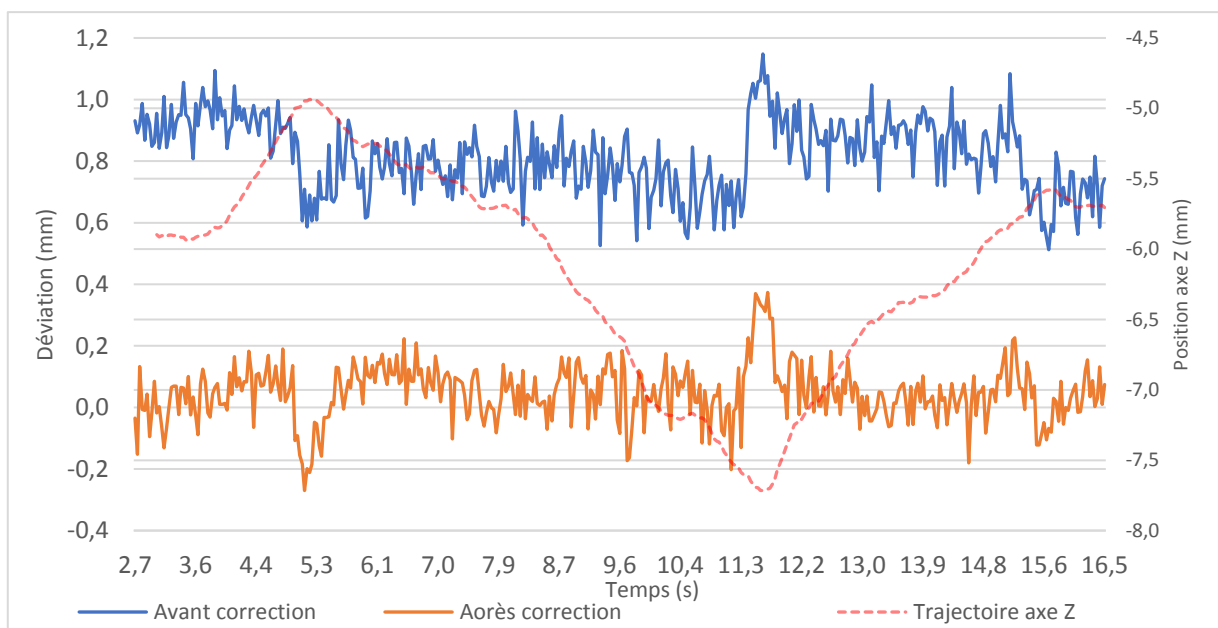


Figure 3-25 : Déviations avant et après correction - Axe Z

Méthode de correction hors ligne

De même, la correction est bénéfique pour la trajectoire de l'axe Z. Le *tableau 3.3* décrit un gain moyen d'environ 0,8 mm sur la déviation et le critère RMS. La déviation observée après correction oscille autour de zéro (*Figure 3-25*). Cependant, deux pics sont observés et identifiés pour des valeurs d'environ -0,2mm et +0,2mm. Pour expliquer ces défauts mesurés, la trajectoire suivant l'axe Z est représentée en rouge sur le même graphique. Cette trajectoire décrit deux extremums, le premier avec une valeur de +5mm sur l'axe et le second de -7,7mm atteint respectivement à $t = 5,1s$ et $t = 11,6s$. Le lien entre ces changements de trajectoire et les pics de déviations mesurés est clairement visible puisqu'ils apparaissent en même temps. Cette corrélation permet d'attribuer ces défauts de positionnement à la conséquence d'un changement de direction sur la trajectoire et d'une inversion du sens d'évolution d'une ou de plusieurs articulations du robot. Dans le cas du changement de l'évolution en Z, il s'agit d'une modification du sens de rotation des axes des bras 1 et 2.

Ces défauts d'inversion, déjà présentés dans la première section de ce chapitre, sont également identifiés sur la trajectoire initiale. Ils sont donc pris en compte par la correction. Leur complexité due au jeu ou non-linéarité dans les actionneurs ne peut être entièrement compensée. Les mêmes défauts apparaissent également sur les *figures 3-23 & 3-24* pour les axes X et Y à des valeurs de temps similaires. Les défauts constatés sont d'environ 0,1 mm et 0,2 mm à $t = 11,6s$, respectivement pour les axes X et Y. C'est à dire que ces inversions, conséquence de la trajectoire en Z, ont un impact sur le positionnement de l'outil sur les trois axes X, Y et Z.

Une déviation moyenne $\Delta_{\text{moy}} \approx 2,5\text{mm}$ (*Tableau 3.3*) est mesurée pour des sollicitations externes stables. La correction en corrige environ 80 %. L'outil génère donc plus d'enlèvement de matière et les efforts appliqués après correction sont plus importants et modifient la flexion du robot et par voie de conséquence, la déviation initialement mesurée. C'est pourquoi une déviation résiduelle est constatée après la correction $\Delta_{\text{res}} \approx 0,3\text{mm}$ (*Tableau 3.3*).

5.3.4. Validation et contrôle de la correction

Un scanner 3D sans contact de haute précision (ATOS) et une colonne de mesure sont utilisés pour effectuer des mesures sur les surfaces usinées de l'éprouvette. Ces mesures permettront de vérifier les bénéfices de la correction hors ligne développée. Le scanner 3D génère un nuage de points de la pièce pour recréer une surface à l'aide du logiciel associé ATOS, cette surface peut être comparée à la CAO de la même éprouvette mesurée avant usinage pour identifier les positions du passage de l'outil. La colonne de mesure indique les dimensions des références palpées.

Selon la stratégie d'usinage utilisée et l'orientation du repère sur l'éprouvette, il est possible de mesurer localement un écart entre les deux usinages (avant et après correction) sur les axes Y et Z. L'écart suivant l'axe Z est déterminé en mesurant la distance entre le plan inférieur de l'échantillon et le plan supérieur, avant et après le passage de l'outil.

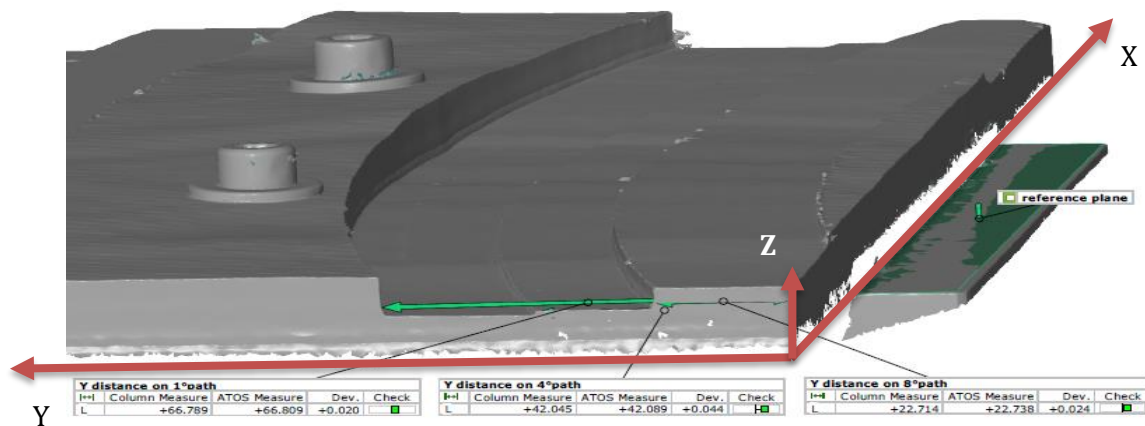


Figure 3-26 : Comparaison des moyens de mesure - Après correction

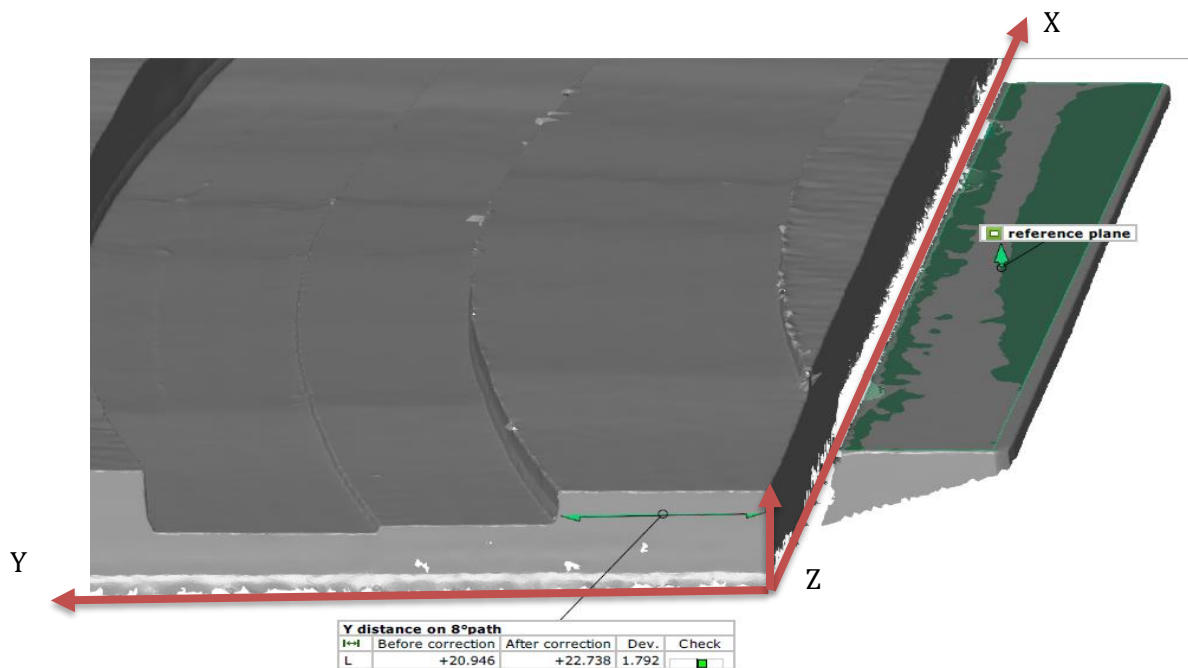


Figure 3-27 : Mesure position de l'outil en Y avant et après correction (ATOS)

Les figures 3-26 et 3-27 présentent les résultats des mesures des positions de l'outil suivant Y, pour trois usinages parmi les dix essais réalisés, avec les deux moyens de contrôle. Les valeurs mesurées à l'aide de la colonne de mesure sont renseignées dans le logiciel ATOS qui nous permet de calculer la déviation entre ces deux moyens de contrôle. Le tableau 3.4 reprend ces valeurs pour les comparer également avec les suivis dynamiques du C-Track afin de comparer l'ensemble des données liées aux positions initiales et corrigées de l'outil.

Méthode de correction hors ligne

Tableau 3.4 : Mesure position initiale de l'outil en Y et Z – Comparaison des moyens de mesures

Outil de mesure	Avant correction		Après correction		Déviation	
	Y (mm)	Z (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Y (mm)	Z (mm)
C-Track	25,151	7,913	26,917	8,007	1,766	0,920
ATOS	22,738	7,887	20,946	8,913	1,792	1,026
Colonne de mesure	22,714	7,865	20,920	8,897	1,794	1,032

Un écart moyen de 0,025 mm est constaté entre les mesures de la colonne et celles du scanner ATOS. Cette observation permet de désigner le scanner comme un moyen pouvant qualifier la correction en rappelant qu'il dispose d'une précision de mesure à 5 centièmes de millimètres.

En considérant les écarts initiaux déterminés par le suivi dynamique du premier usinage (ϵ_{ini}) et ceux mesurés par le scanner après correction (ϵ_{atos}), il est possible de déterminer le gain de correction dans le plan Y-Z (G_{YZ}) selon l'équation 3.6:

Équation 3.6

$$G_{YZ} = 1 - \frac{\epsilon_{atos}}{\epsilon_{ini}} * 100$$

ϵ_{ini} est la norme du vecteur de déviation mesuré lors du premier usinage et ϵ_{atos} est la norme du vecteur de déviation mesurée par le scanner ATOS après la correction comme les équations 3.7 & 3.8:

Équation 3.7

$$\epsilon_{ini} = \sqrt{\epsilon_{ini}^2 Y^2 + \epsilon_{ini}^2 Z^2}$$

Équation 3.8

$$\epsilon_{atos} = \sqrt{\epsilon_{atos}^2 Y^2 + \epsilon_{atos}^2 Z^2}$$

Le gain calculé est donc une comparaison entre les normes des vecteurs des déviations avant et après correction. C'est un pourcentage basé sur la déviation initiale. Dans ce cas, $G_{YZ} = 96,3\%$ dans le plan Y-Z.

Le suivi dynamique effectué par le C-Track donne des résultats proches de ceux observés avec le scanner ATOS. L'écart moyen entre les mesures du C-Track et celles du scanner ATOS est de 0,068mm (Tableau 3.4). Compte tenu de cet écart de mesure, une imprécision de +/-0,136mm (2*écart moyen de 0.068mm) peut donc être cumulée sur les mesures de déviations du C-Track (Tableau 3.3). La déviation initiale de l'outil est donc de 2,484^{+/-0,136} mm et d'environ 0,329^{+/-0,136} mm après correction. En étudiant le potentiel de la correction dans ces valeurs hautes et basses, la méthode de correction améliore la précision de positionnement de l'outil de 87^{+/-6} %.

5.3.5. Discussion

Certains aspects de notre travail doivent être discutés pour améliorer la compréhension des résultats et aussi pour introduire la poursuite de ces activités de recherche.

L'utilisation du système C-Track nécessite un palpé de repère de référence pour mesurer la position du robot. L'expérience a montré qu'un biais aléatoire affecte la mesure, il est lié à la manipulation du palpeur lors de la prise de repère et il participe à l'imprécision de mesure du moyen. Ces défauts résiduels affectent nos mesures et sont visibles dans la section 6.2, lorsqu'il est question d'un biais observé sur la déviation de l'outil suivant l'axe Y (*figure 3-21*). Cet écart est également présent lors de la comparaison des mesures des différents moyens de contrôle. Cependant, il est compensé par la correction. L'utilisation d'un appareil de mesure plus précis devrait améliorer les bénéfices de la méthode, notamment en réduisant les erreurs de décalage du référentiel de base.

L'hypothèse principale de cette étude est que la raideur du robot est constante localement autour de la position mesurée de l'outil. Elle est appliquée dans cette étude pour des corrections de l'ordre de quelques millimètres ($\Delta_{\text{moy}} \approx 2,5\text{mm}$ (*Tableau 3.3*)). L'engagement de l'outil dans le matériau lors de cette correction est donc fortement modifié, ce qui entraîne une évolution importante des efforts de coupe et de la réponse en flexion du robot. Ce constat ne remet pas en cause l'hypothèse du comportement constant en raideur lors de petits déplacements puisque qu'ici, le déplacement de l'outil est relativement grand et c'est la variation non-négligeable des sollicitations externes qui modifient la déviation du robot. Une des solutions serait de réaliser une itération de la méthode, pour laquelle la correction serait de quelques dixièmes de millimètres et où la variation des efforts externes deviendrait négligeable. Dans ce cas, l'hypothèse du comportement constant en raideur lors de petits déplacements serait vérifiée.

La méthode de correction hors ligne détaillée dans ce chapitre ne permet pas de corriger l'intégralité des défauts d'inversion qui sont directement liés aux jeux mécaniques au sein de la structure cinématique du robot. Certaines caractérisations dynamiques comme dans [COR_16] concluent que, généralement, les trois premières articulations du robot sont responsables d'une grande partie des problèmes d'inversion. En examinant le mouvement du robot dans les mesures effectuées ici, section 6.3, le mouvement de l'axe Z est la cause des inversions observées. Compte-tenu de la configuration du robot dans ces essais, les articulations en défaut sont les articulations des bras 1 et 2, car ce sont celles qui participent en grande partie à l'évolution de la trajectoire suivant Z et qui en modifient le sens d'évolution.

La trajectoire étudiée ne permet pas une inspection le long de l'axe X avec les dispositifs de contrôle utilisés. Les efforts appliqués à l'outil ne génèrent pas suffisamment de déviation sur cet axe pour identifier un gain significatif. Dans le cas d'étude présenté ci-dessus, les déviations suivant cette direction participent peu à l'imprécision dimensionnelle de la surface usinée.

Cette limitation nous oblige à faire des études statistiques pour caractériser les améliorations de la méthode. Le chapitre 4 présente un usinage dédié à l'application visée du moule de réflecteurs en composite Carbone/Epoxy. Celui-ci nous permettra de réaliser un contrôle dimensionnel 3D afin de présenter des résultats complets.

Méthode de correction hors ligne

L'écart expérimental après correction est d'environ $0,329^{+/-0,136}$ mm. Au regard de la littérature, [OLA_12] a obtenu de meilleurs résultats avec l'ajout d'une modélisation de la rigidité. Tout comme [COR_16] qui indique une déviation maximale de 0,153 mm par rapport à une trajectoire circulaire. Ces deux études sont expérimentées sur des robots « petit porteur » avec des structures plus rigides que celui étudié ici. Schneider & al [SCH_16] travaillant sur un robot comparable, obtiennent une déviation relative de +/-0,1 mm après le couplage de corrections hors ligne et temps réel. En ce qui concerne la compensation hors ligne uniquement, les déviations finales sont comprises entre 0,2mm et 0,46mm. Le résultat de l'essai présenté ci-dessus avec une déviation d'environ $0,329^{+/-0,136}$ mm après correction est donc relativement proche. La méthode développée ici peut être comparée à ces travaux cités en raison d'un temps de caractérisation plus court. Cela permet à notre méthode de répondre à un besoin industriel en temps et en précision.

6. Conclusion

Dans ce chapitre, une méthode de correction hors ligne, adaptée à l'usinage robotisé et utilisant un capteur de position externe, est explorée et appliquée. Inspirée de la correction miroir, elle compense les déviations mesurées en appliquant un vecteur de correction identifié en fonction du temps à chaque point du programme CN initial. L'avantage de la méthode décrite réside dans la rapidité de son traitement devant le gain de la compensation. Cette méthode améliore le positionnement de l'outil après la mesure d'un premier usinage. Un processus de traitement est ensuite appliqué pour générer un parcours d'outil compensé, capable de réduire de plus de 80% les déviations initiales du robot. Une caractéristique particulière de cette correction hors ligne est le traitement du signal adapté à la méthode de mesure. Cela permet l'utilisation d'un dispositif de mesure pour de grandes amplitudes de travail, en particulier pour la production de grandes pièces ou pour des applications d'usinage dans un environnement industriel.

Les résultats permettent de dire que la réponse du robot à la déflexion est localement proportionnelle aux efforts de coupe pour de faibles efforts stables. Cependant, les résultats ont également montré que cette même hypothèse peut être mise en défaut. En effet, la correction de position modifie les efforts d'usinage. Pour en tenir compte, l'itération de la méthode pour une deuxième compensation réduirait la déviation résiduelle mesurée ici. Pour cette deuxième itération, la déviation initiale réduite à quelques dixièmes de millimètre permettrait l'hypothèse de très petits déplacements et un comportement en raideur du robot quasi-identique. Une autre perspective est l'utilisation d'un capteur de position plus précis comme un laser de poursuite avec une précision de mesure fine.

Les premiers essais menés dans ce chapitre ont permis de mettre au point un protocole de compensation. Les trajectoires évaluées sont courtes et ne permettent pas de qualifier la méthode sur des pièces présentant de grandes surfaces usinées. En cela, ces essais sont limitants. Dans le chapitre 4, une application de la méthode de correction hors ligne sur l'usinage d'un moule de réflecteur en composite Carbone/Epoxy est présentée. Les surfaces obtenues avant et après correction constitueront une expertise et une démonstration des bénéfices et limitations de la méthode.

IV. Application à l'usinage d'un moule de réflecteur

1.	STRATEGIE D'USINAGE ET DE CORRECTION	144
1.1.	Stratégie d'usinage adaptée au robot.....	144
1.1.1.	<i>Gamme d'usinage.....</i>	<i>145</i>
1.1.2.	<i>Paramètres de dépinçage.....</i>	<i>145</i>
1.1.3.	<i>Phénomène d'inversion</i>	<i>148</i>
2.	Stratégie de correction du moule de réflecteur	148
2.1.1.	<i>Solution 1 : Correction hors ligne sur la base d'une mesure externe tous les n tours.....</i>	<i>149</i>
2.1.2.	<i>Solution 2 : Application de la méthode de correction hors-ligne – Mesure de la trajectoire totale.....</i>	<i>149</i>
2.2.	Caractérisation du moyen de mesure.....	153
2.2.1.	<i>Procédure de mesure du critère RMS géométrique</i>	<i>153</i>
2.2.2.	<i>Etude comparative – systèmes de mesure.....</i>	<i>155</i>
3.	METHODE DE CORRECTION HORS-LIGNE APPLIQUEE A L'USINAGE D'UN MOULE DE REFLECTEUR	156
3.1.	Usinage ébauche.....	156
3.2.	Usinage de demi-finition.....	160
3.2.1.	<i>Paramètres de lissage du signal de mesure.....</i>	<i>160</i>
3.2.2.	<i>Correction du programme de demi-finition</i>	<i>161</i>
3.2.3.	<i>Usinage de demi-finition corrigé.....</i>	<i>162</i>
3.2.4.	<i>Conclusion</i>	<i>163</i>
3.3.	Usinage de finition.....	164
3.3.1.	<i>Passe hors matière</i>	<i>164</i>
3.3.2.	<i>Paramètres de lissage du signal de mesure.....</i>	<i>165</i>
3.3.3.	<i>Usinage de finition – Erreur de pose corrigée</i>	<i>165</i>
3.3.4.	<i>Paramètres de lissage du signal de mesure.....</i>	<i>167</i>
3.3.5.	<i>Usinage de la finition corrigée.....</i>	<i>167</i>
3.3.6.	<i>Conclusion – Usinage de finition.....</i>	<i>168</i>
3.4.	Conclusion – Correction de la gamme d'usinage du moule de réflecteur ...	169

4.	SUIVI QUALITE PIECE.....	170
4.1.	Qualité dimensionnelle.....	170
4.1.1.	<i>Usinage ébauche sans correction paramétrique.....</i>	<i>170</i>
4.1.2.	<i>Usinage demi-finition.....</i>	<i>171</i>
4.1.3.	<i>Usinage demi-finition corrigée.....</i>	<i>172</i>
4.1.4.	<i>Usinage finition.....</i>	<i>172</i>
4.1.5.	<i>Usinage finition corrigée.....</i>	<i>173</i>
4.1.6.	<i>Conclusion.....</i>	<i>174</i>
4.2.	Usure des outils.....	174
4.2.1.	<i>Outil de demi-finition.....</i>	<i>174</i>
4.2.2.	<i>Outil de finition.....</i>	<i>175</i>
5.	DISCUSSION DES RESULTATS.....	177
5.1.	Comparaison bibliographie.....	178
5.2.	Conclusion.....	179

Application à l'usinage d'un moule de réflecteur

Les robots industriels ne sont pas initialement dédiés à l'usinage 5 axes de précision. Les développements décrits dans les chapitres précédents répondent au besoin industriel en améliorant la précision de pose et la qualité de suivi de trajectoire du robot KUKA KR360 d'un centre d'usinage robotisé.

A ce stade, l'étude des phénomènes liés au processus de coupe a permis de déterminer les outils et les conditions de coupe appropriés à chaque phase de la gamme d'usinage de la pièce composite. L'analyse des réponses du robot en termes de positionnement a permis de développer des méthodes de correction adaptées aux besoins de l'application. Les conclusions des chapitres précédents permettent donc d'anticiper un certain nombre de défauts et conditionnent le choix de la stratégie d'usinage et de correction à mettre en place pour la réalisation d'un moule. Le couplage des méthodes développées, à savoir la correction paramétrique et la correction hors-ligne, réduit les défauts de suivi de trajectoire de l'ordre de 80%. L'objectif de ce chapitre est de valider expérimentalement ces méthodes afin de vérifier les réponses aux critères de qualité de l'application d'usinage des moules de réflecteurs.

Les différents développements expérimentaux présentés dans ces travaux font appels à trois moyens de mesure externes :

- Le scanner C-Track utilisé pour mesurer les erreurs de suivi de trajectoire du robot au cours de l'usinage.
- Le scanner ATOS qui permet de reconstituer un modèle numérique de la surface usinée. Cette mesure permet d'obtenir les critères de rugosité (R_A) et de RMS géométrique.
- Le scanner haute précision INFINITEFOCUS qui a déjà permis, dans le premier chapitre, de caractériser des surfaces usinées pour l'application de la méthode COM. C'est à l'aide de ce moyen que les outils et conditions de coupe ont été déterminés pour l'application visée. Dans la suite, il permet de réaliser une étude comparative qui conforte les analyses des données du scanner 3D ATOS. Il est également utilisé pour caractériser l'usure des outils après usinage.

Pour caractériser expérimentalement les méthodes d'amélioration de précision de pose et de suivis de trajectoire du robot, ce chapitre aborde plusieurs sections. Premièrement, les stratégies d'usinage et de correction d'usinage d'un moule de réflecteur sont présentées. Une étude comparative des données de deux moyens de mesure de surfaces est également abordée. La deuxième section est dédiée à l'expérimentation de la correction hors-ligne sur la gamme d'usinage d'un moule. Dans la troisième section, l'évolution de la qualité de l'usinage est analysée en fonction des critères de l'application à partir d'un usinage d'ébauche sans correction paramétrique jusqu'à l'usinage de finition corrigé (corrections paramétrique et hors-ligne). Enfin, la dernière section propose une discussion des résultats et un parallèle avec différentes études scientifiques qui présentent des objectifs de recherche similaires.

1. Stratégie d'usinage et de correction

Le principal atout d'un robot étant l'adaptabilité, il est cependant peu précis. Sa cinématique sérielle et les souplesses des articulations sont les premières causes du défaut de positionnement de l'organe final. Afin de réduire les déviations et notamment les défauts d'inversion, il est nécessaire de mettre au point une stratégie d'usinage en adéquation avec les principales sources d'erreur de pose du robot.

1.1. Stratégie d'usinage adaptée au robot

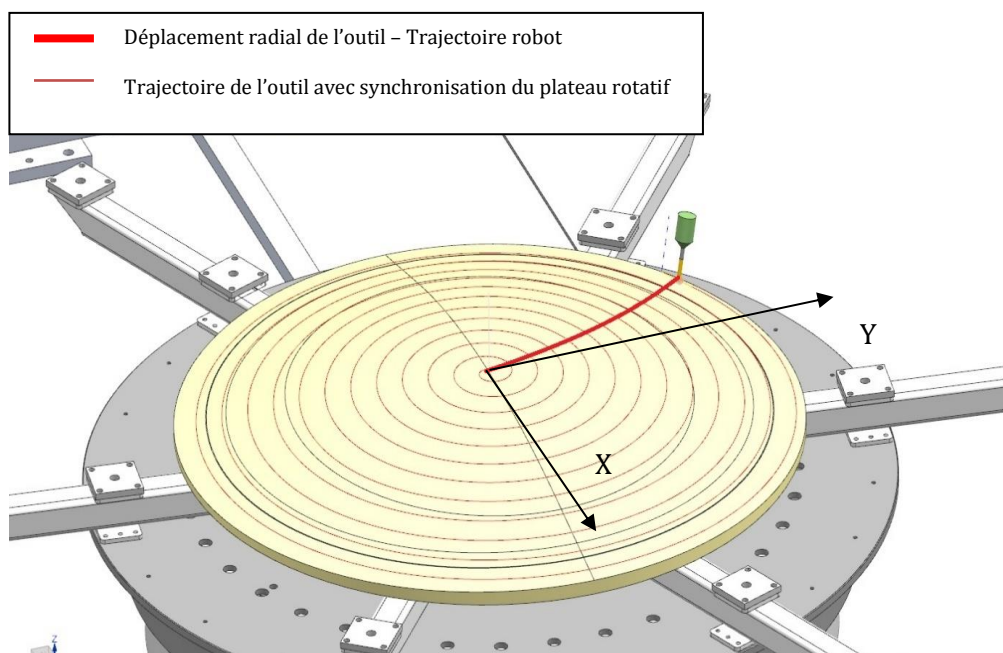


Figure 4-1 : Stratégie d'usinage en spirale

L'étude bibliographique du chapitre 2 et le développement d'une correction hors ligne au chapitre 3 ont démontré l'existence d'un défaut de positionnement des robots industriels lors de phénomènes d'inversion. Pour rappel, une inversion articulaire se produit lorsque la trajectoire implique une modification du sens de rotation du moteur de cette articulation [COR_16]. Les jeux mécaniques de l'articulation concernée sont visibles à travers une déviation de la position de l'organe final du robot par rapport à la position désirée. Ce défaut est fonction du nombre d'articulations en inversion et de la vitesse d'exécution de la trajectoire [COR_16]. Il peut être réduit par la correction hors ligne comme constaté dans les expérimentations du chapitre 3. N'étant pas complètement compensé, ce phénomène impacte les critères de qualité de l'usinage. Il s'agit du critère de respect dimensionnel du moule caractérisé par un RMS géométrique $< 0.05\text{mm}$ et du critère de rugosité $R_A < 1.6\mu\text{m}$. Ces critères sont définis dans le chapitre 1.

La présence d'un plateau rotatif permet d'utiliser la cellule d'usinage comme un centre de tournage. En s'appuyant sur ce plateau et sur la géométrie de la pièce, il est possible de mettre au point une stratégie d'usinage qui limite les amplitudes d'utilisation des moteurs des articulations du robot. La mise en place d'une stratégie d'usinage en spirale sur le plan X, Y (*Figure 4-1*) est le plus adapté pour limiter les déplacements du robot. Cette stratégie minimise également les changements de sens de rotation de ses moteurs pour le balayage de la surface du moule.

Le plateau est synchronisé sur l'avance de l'outil et les 6 articulations du robot génèrent le déplacement radial de l'outil. Pour usiner la pièce, le robot décrit une trajectoire quasi-circulaire autour de l'origine de sa base. La configuration initiale du robot est présentée *figure 4-2*. Il usine donc la pièce de son extrémité à son centre. Cette trajectoire est représentée en rouge sur la *figure 4-1*.

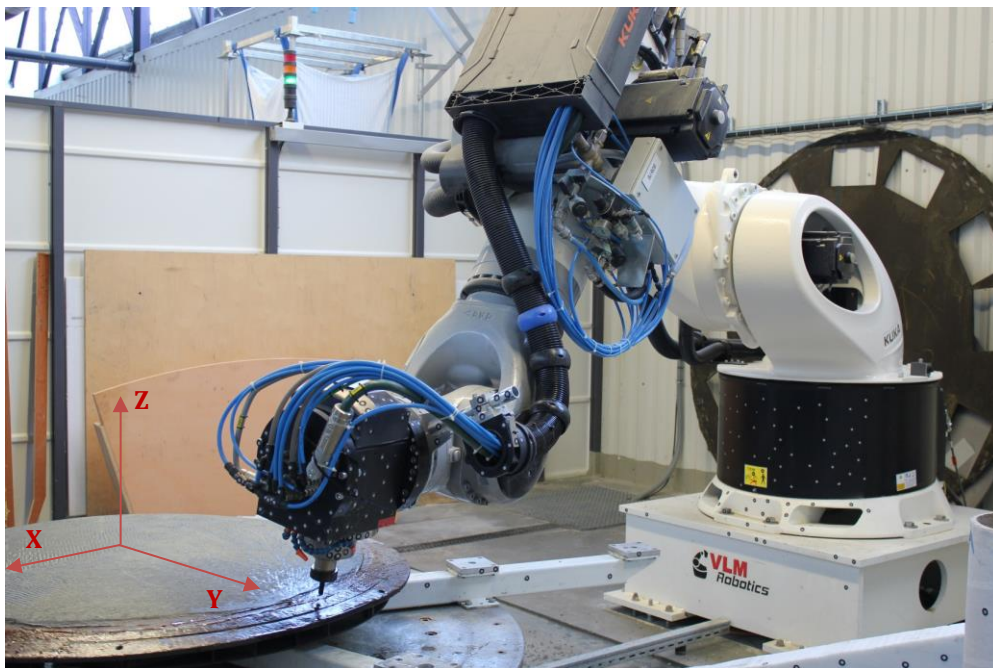


Figure 4-2 : Configuration robot pour usinage moule de réflecteur

1.1.1. Gamme d'usinage

Pour garantir des efforts de coupe constants lors des différents usinages, il faut assurer un engagement constant. Pour cela une première phase d'ébauche est destinée à éliminer les variations d'épaisseur de la surface brute que favorise le procédé d'infusion sous bêche à vide. La gamme d'usinage présente ensuite une phase de demi-finition réalisée à l'aide d'un outil cylindrique, dont l'axe est perpendiculaire à la surface usinée avec d'une profondeur de passe de 3mm. Enfin, une phase de finition réalisée à l'aide d'une fraise hémisphérique permet de garantir le critère de rugosité sur la base des conditions de coupe identifiées dans le chapitre 1.

1.1.2. Paramètres de dépinçage

L'utilisation d'une fraise hémisphérique ou d'une fraise torique est privilégiée pour l'usinage 5 axes. L'étude du chapitre 1 conclue sur l'utilisation d'une fraise hémisphérique.

L'emploi de ce type de fraise implique un dépinçage $\beta_{résultant}$ nécessaire pour éviter la coupe à vitesse nulle au centre de l'outil. En travail en 5 axes continu, il faut maîtriser deux paramètres de dépinçage qui sont : β_n et β_f [PRA_11]. Dans ces travaux, [PRA_11] définit les paramètres de dépinçages à partir d'un repère fixé sur une fraise boule (figure 4-3). Dans ce repère, l'angle de dépinçage dans le plan d'avance β_f , est l'angle entre la projection du vecteur outil \vec{z}_f dans le plan d'avance et le vecteur \vec{z}_p . L'angle de dépinçage dans le plan perpendiculaire β_n est l'angle entre la projection de \vec{z}_f dans le plan perpendiculaire au plan d'avance et le vecteur \vec{z}_p [PRA_15].

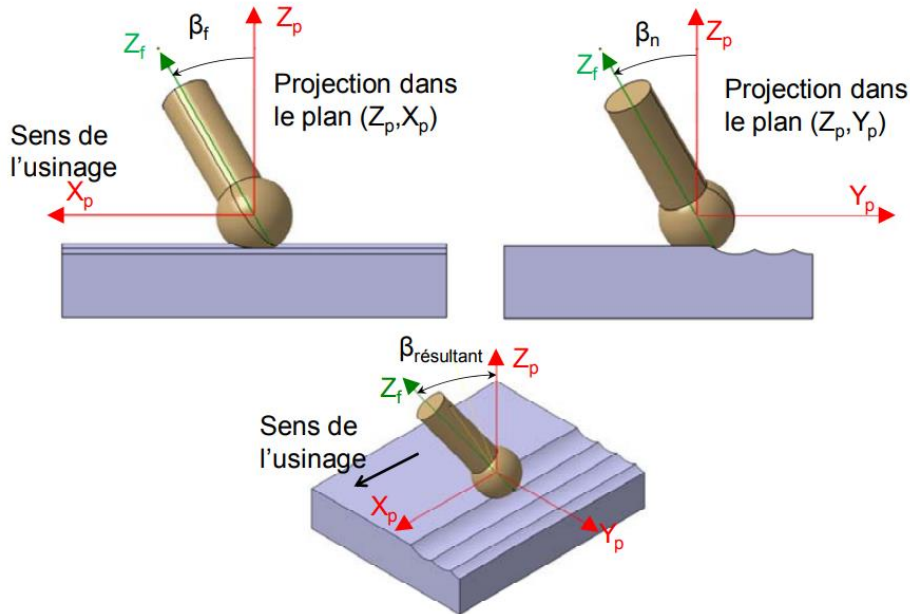


Figure 4-3 : Paramètres d'orientation de la fraise hémisphérique [PRA_11]

L'outil de demi-finition est caractérisé par une durée de vie de 2h30 déterminée au chapitre 1. Ce temps est en adéquation avec le temps d'usinage de la séquence, 1h45 rappelé dans le tableau 4.1 de la section suivante. Pour l'outil cylindrique de finition, cette durée de vie s'élève à 2h tandis que l'usinage doit durer 18h. Pour assurer l'intégrité de l'arête de coupe tout au long

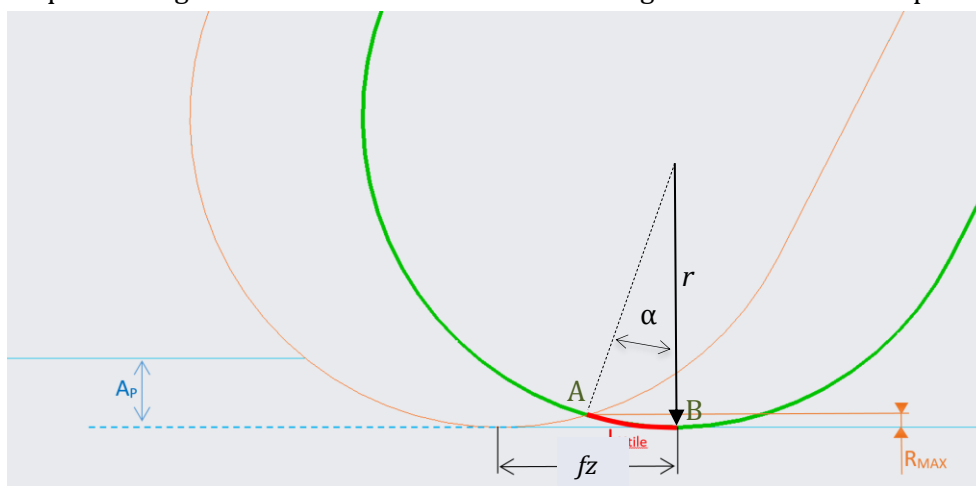


Figure 4-4 : Identifier la variation de l'angle β_n - Esquisse 2D

de cet usinage, un dépinçage variable de l'angle β_n est associé à la trajectoire de l'outil.

Pour identifier la valeur de variation de l'angle β_n , la longueur utile de l'engagement de l'outil dans la matière est calculée. Cette longueur d'arc notée L_{Utile} dans la *figure 4-4* correspond à la longueur développée du diamètre de l'outil en contact avec la matière qui ne sera pas réusinée par le passage de l'outil au tour suivant du plateau diviseur. Il est nécessaire de connaître la hauteur R_{MAX} pour calculer, dans un premier temps, la longueur de corde [AB] suivant l'*équation 4.1* en accord avec [DEV_14] :

Équation 4.1

$$R_{MAX} = 125 * \frac{fz^2}{r}$$

Avec fz comme étant l'avance de l'outil par tour du plateau diviseur et r le rayon de l'outil.

Pour les valeurs $f = 0.5\text{mm}$ et un rayon $r = 5\text{mm}$, on déduit une longueur de corde [AB] = 0.25mm. Il faut ensuite calculer l'angle α en degrés, à l'aide de l'*équation 4.2*, avant d'identifier L_{Utile} suivant l'*équation 4.3* :

Équation 4.2

$$\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{[AB]}{2 * r}$$

$$\alpha = 2 * \arcsin\left(\frac{[AB]}{2 * r}\right)$$

Équation 4.3

$$L_{utile} = \frac{\alpha * \pi * r}{180}$$

L'angle $\alpha = 1,376^\circ$ permet d'identifier une longueur d'arc $L_{Utile} = 0.25\text{mm}$. Autrement dit, il faut une variation de l'axe de l'outil de 1.376° pour renouveler complètement l'arête de coupe de l'outil dans cette zone de coupe utile. La durée de vie de l'arête en contact avec la matière est de 2h, le temps d'usinage est de 18h : Il faut donc renouveler l'arête de coupe 9 fois au cours du programme. La valeur de variation totale de l'angle β_n est donc égale à $9 * 1.376 = 12.375^\circ$.

Il est finalement choisi de prendre une valeur de sécurité sur ce critère pour assurer un temps d'usinage d'un point de l'arête de coupe de l'outil inférieur à 2h. L'angle β_n généré par l'axe A est paramétré de 25° à 5° , cette variation est continue tout au long de l'usinage et représente une rotation de 0.008° par tour de plateau. Cette variation influence l'orientation des efforts transmis au robot. Cependant, elle n'impacte pas la qualité de la correction qui se base sur la mesure de la position réelle de l'outil et non sur la mesure des efforts de coupe.

La vitesse de rotation de l'outil est adaptée à l'inclinaison β_n pour garantir une vitesse de coupe constante. Présentée dans la section 3.2 de ce chapitre, l'usure de l'arête de coupe est mesurée après l'usinage afin de vérifier si le paramétrage de l'angle β_n répond à l'objectif d'une usure de l'arête de coupe maîtriser tout au long de l'usinage de finition.

1.1.3. Phénomène d'inversion

Pour les phases d'ébauche et de demi-finition, l'évolution de l'articulation 1 (rotation de la base du robot) présente des phénomènes d'inversion pour conserver une orientation de l'outil normale à la surface du moule, ainsi que les articulations 4, 5 et 6. Les articulations 2 et 3 génèrent des inversions pour suivre la trajectoire en Z qui est oscillante (Figure 4-5). La stratégie mise en place n'élimine pas totalement le phénomène d'inversion. Cependant, elle présente l'avantage de ne pas faire tourner l'effecteur du robot autour de la pièce pour que l'outil suive sa trajectoire : Le robot adopterait dans ce cas-là une dynamique plus rapide et source d'importantes erreurs de suivi. Les axes présenteraient des amplitudes d'évolution plus grandes avec des phénomènes d'inversion qui sont critiques pour des vitesses d'avance rapides [COR_16].

Pour la phase de finition, l'orientation de l'outil est différente et caractérisée par les angles de dépinçage β_f et β_n (figure 4-3). β_f est nul et β_n est monotone tout au long de la trajectoire. Dans ce cas, l'axe 1 du robot n'est plus soumis à des problématiques d'inversion puisque l'évolution des coordonnées en X et Y est monotone. Les articulations 4 et 6 ont également une évolution monotone tout comme l'orientation de l'outil.

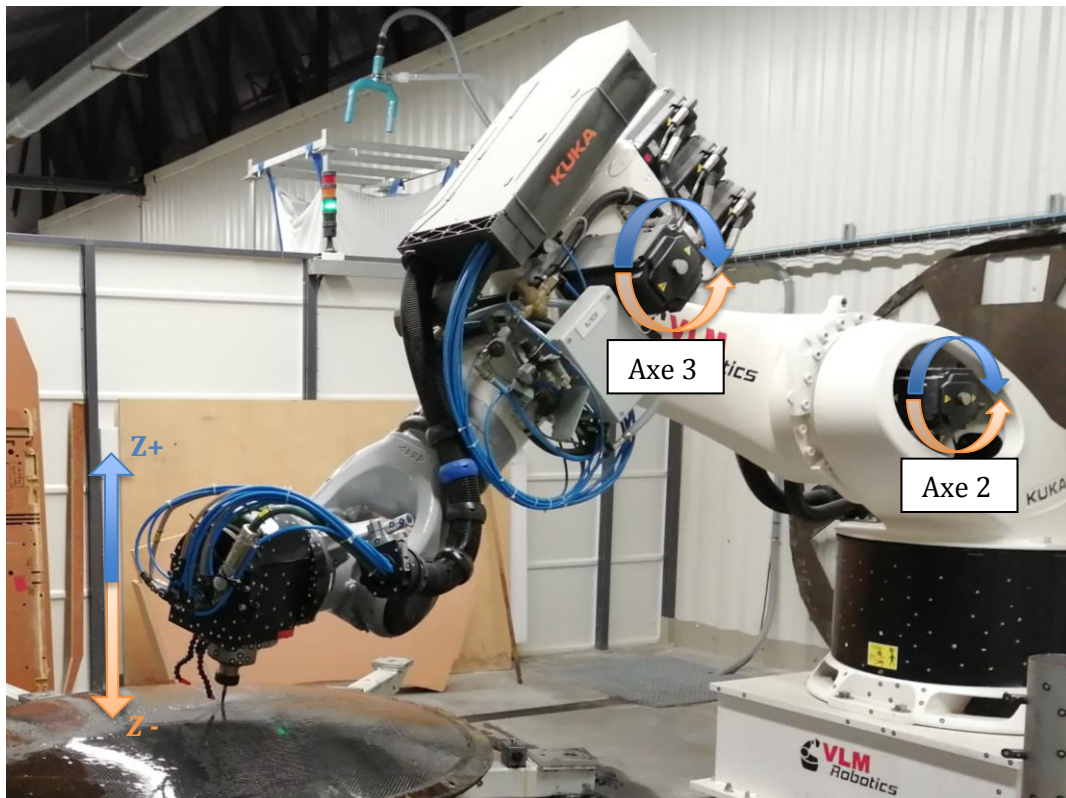


Figure 4-5 : Inversions des axes 2 et 3 – Oscillations suivant Z

2. Stratégie de correction du moule de réflecteur

Pour donner suite aux expérimentations du chapitre 3, deux stratégies de correction sont étudiées afin de réaliser l'usinage du moule :

2.1.1. Solution 1 : Correction hors ligne sur la base d'une mesure externe tous les n tours.

Cette stratégie consiste à relever de courtes périodes d'usinage sur la totalité du balayage et assurer une continuité dans la correction de ces périodes. Les relevés sont espacés entre eux d'un nombre n de tours du plateau rotatif (en bleue *figure 4-6*). Chaque relevé est traité suivant la méthode de correction hors ligne. Ainsi, le défaut de positionnement du robot est connu tous les n tours. Une continuité sur l'erreur mesurée est ensuite assurée avant de modifier le programme de commande.

La complexité d'une telle solution repose sur le choix des critères de continuité appliqués entre les différentes périodes mesurées. La synchronisation en temps est également importante pour identifier les points de passage mesurés au sein de la trajectoire désirée. Cette solution fait appel à l'hypothèse suivante : Entre chaque erreur de pose identifiée, le comportement du robot et les interactions entre l'outil et la matière sont tous les deux proportionnels au déplacement de l'outil sur sa trajectoire.

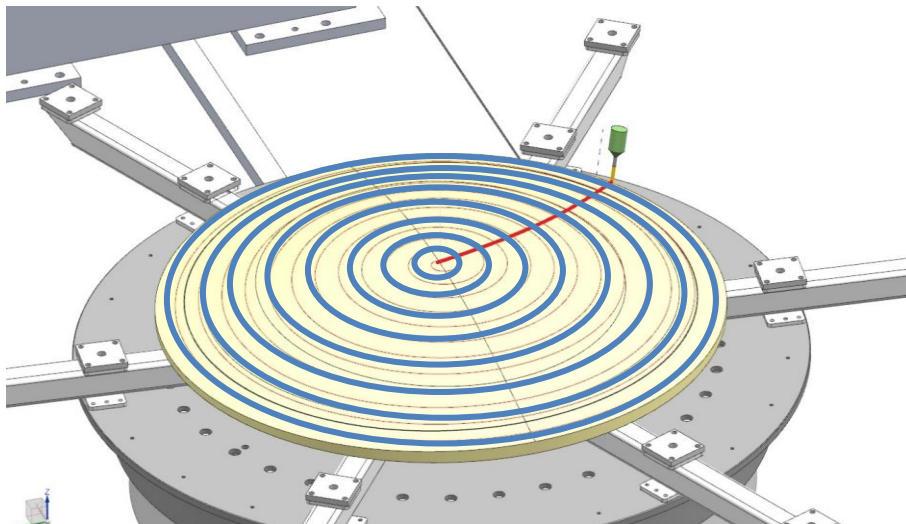


Figure 4-6 : Solution 1 – Mesure externe tous les n tour

Or, un lien proportionnel entre la raideur du robot et sa posture n'est pas démontré. Le long de sa trajectoire, le robot passe par des postures plus ou moins flexibles. Alors, sa réponse aux sollicitations de l'usinage varie localement. Si ces variations locales ne sont pas identifiées par la mesure, ou si elles font partie des relevés et que cela perturbe l'interpolation de la correction : Alors la correction hors ligne est erronée et les bénéfices de la méthode sont réduits.

C'est pourquoi cette solution n'est pas retenue au profit de la seconde.

2.1.2. Solution 2 : Application de la méthode de correction hors-ligne – Mesure de la trajectoire totale.

Appliquer la méthode de correction pour des usinages longs nécessite des moyens informatiques pour stocker un grand volume de données. Le nombre de cibles (suivies par le C-Track) est un paramètre qui influence la taille des fichiers générés. Selon les besoins de la

méthode, à savoir un échantillonnage de mesure de 0.33ms, l'outil informatique doit être en capacité de traiter et de mémoriser des fichiers de 600.000ko.

Malgré la durée de mesure, cette méthode éprouvée dans les expérimentations précédentes permet d'identifier et de corriger l'erreur de pose du robot sur la totalité de sa trajectoire.

Comme vue dans le chapitre 2, le défaut de positionnement de l'outil lors de l'usinage est le résultat de deux principales sources d'erreur. Il s'agit d'une part des erreurs géométriques liées à la fabrication et à l'assemblage du robot et d'autre part des erreurs non-géométriques liées aux jeux fonctionnels dans les articulations et aux souplesses dans les bras et les articulations. Les erreurs non-géométriques sont également fonction des efforts de coupe appliqués à l'outil. Ces efforts et moments exercés sur l'effecteur du robot (vecteur ω) induisent une déviation de ce dernier (vecteur δd) en fonction de la matrice de raideur (K_x) tel que défini dans l'équation 4.4 :

Équation 4.4

$$\omega = K_x * \delta d$$

Cette dépendance entre l'effort de coupe et la déviation de l'outil implique de limiter au maximum les variations de l'effort tout au long du processus de coupe pour proposer une correction relativement constante. Pour se faire, les paramètres d'engagement de l'outil dans la matière ne doivent pas évoluer au cours de l'usinage et cela pour chacune des trois phases de la gamme d'usinage. C'est pourquoi plusieurs étapes sont nécessaires pour la correction de chaque phase (*figure 4-7*) :

1. Ebauche

Deux usinages d'ébauche sont réalisés sans correction paramétrique et sans suivi de la position de l'outil, suivant la stratégie d'usinage présentées dans la section 1.1. Le premier usinage a pour objectif d'éliminer les variations d'épaisseur de la pièce brute. Il garantit un engagement constant de l'outil et un effort de coupe constant pour la passe suivante. Le deuxième usinage d'ébauche permet de situer qualitativement les performances initiales de la cellule d'usinage après la mesure de la surface usinée à l'aide du scanner ATOS.

2. Demi-finition

A partir de cette phase, le modèle géométrique corrigé remplace le modèle géométrique initial dans la commande du robot. La modification du modèle géométrique du robot (correction paramétrique) augmente sa précision de pose et conduit à une modification de la trajectoire de l'outil par rapport à la trajectoire d'ébauche réalisé avec le modèle géométrique initial. Il est donc nécessaire de réaliser un premier usinage de demi-finition. Cet usinage garantit un engagement constant de l'outil et un effort de coupe constant pour la passe suivante. Un deuxième usinage est ensuite réalisé en parallèle du suivi dynamique. La méthode de correction hors-ligne est appliquée pour générer un programme de commande corrigé. L'usinage de la trajectoire corrigé est également mesuré par le C-Track. Cela permet d'identifier les nouveaux défauts de positionnement et de calculer le gain sur la précision d'usinage pour cette première phase de correction.

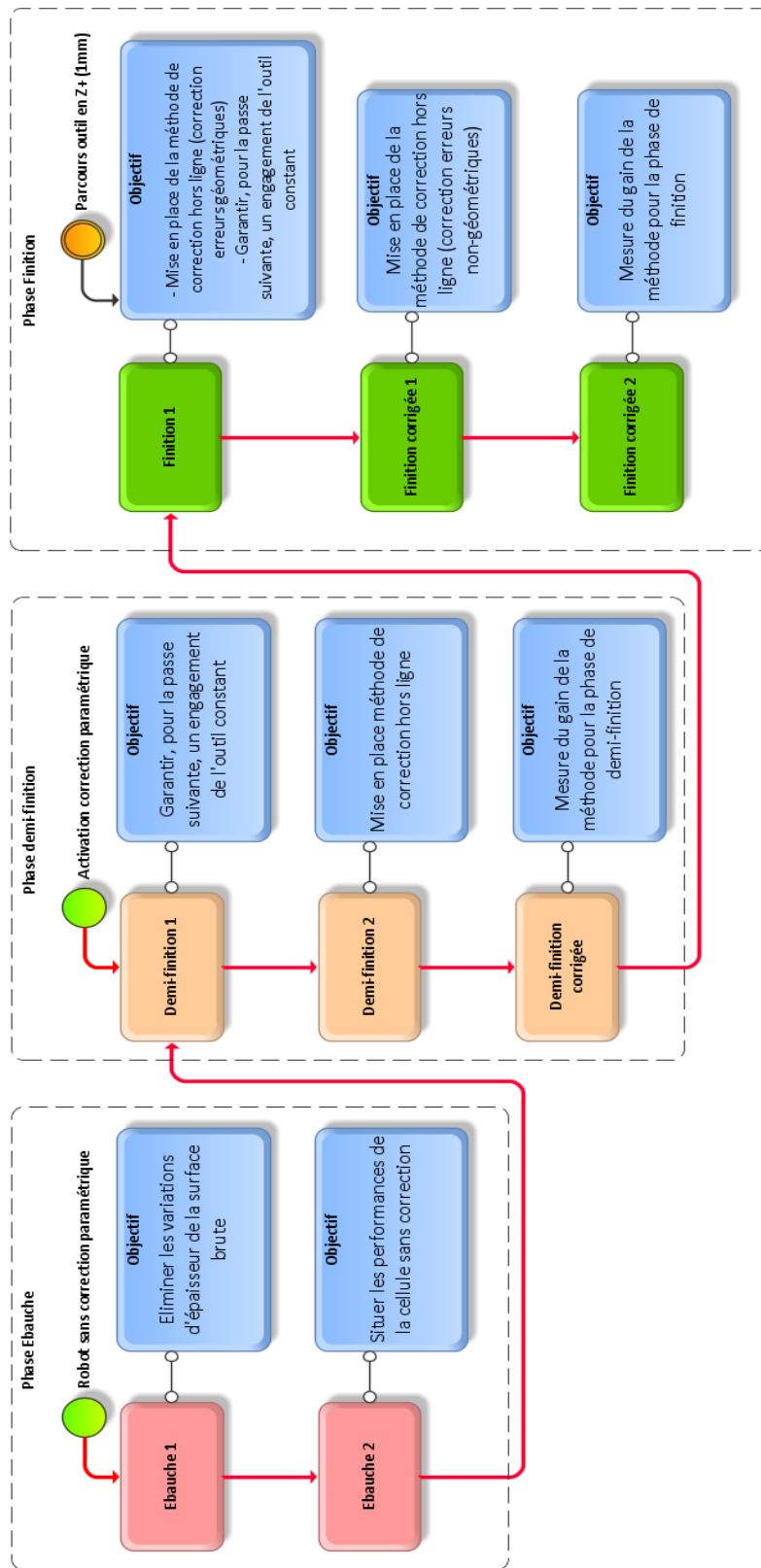


Figure 4-7 : Solution 2 - Mesure et correction de la trajectoire totale

3. Finition

A ce stade et pour la phase de demi-finition, la correction hors ligne a permis de corriger les défauts de type non-géométrique mais également les défauts géométriques résiduels qui n'étaient pas compensés par la correction paramétrique. L'usinage du parcours de finition sans correction effacerait, sur la surface usinée de la pièce, les bénéfices de la correction des erreurs géométriques résiduelles et l'engagement de l'outil souhaité constant ne serait pas respecté. C'est pourquoi, la trajectoire du parcours de finition de l'outil est mesurée avec une translation de 1mm en Z+ par rapport à la surface usinée de la pièce. L'outil n'est donc pas en contact avec la matière. Les défauts de positionnement de l'outil sont identifiés sans effort de coupe. La correction hors-ligne génère ensuite un programme de finition qui compense les déviations liées uniquement aux imprécisions géométriques résiduelles du robot. L'usinage de ce premier parcours de finition corrigé permet de conserver les bénéfices de la phase de demi-finition corrigée et de garantir un engagement constant de l'outil dans la matière. L'usinage du premier programme de finition corrigé est mesuré à l'aide du C-Track qui identifie une nouvelle déviation, cette fois-ci due aux faibles efforts de coupe (10N en moyenne). La méthode de correction hors-ligne propose un deuxième programme de finition corrigé. L'usinage et le suivi dynamique de ce dernier programme permettent de calculer le gain de la précision de pose pour cette phase de correction.

Le *tableau 4.1* ci-dessous reprend les conditions de coupe pour les trois phases d'usinage de la gamme. Les temps d'usinages sont déterminés par le logiciel de FAO.

Tableau 4.1 : Paramètres de coupe(cf:chapitre1) - Usinage moule

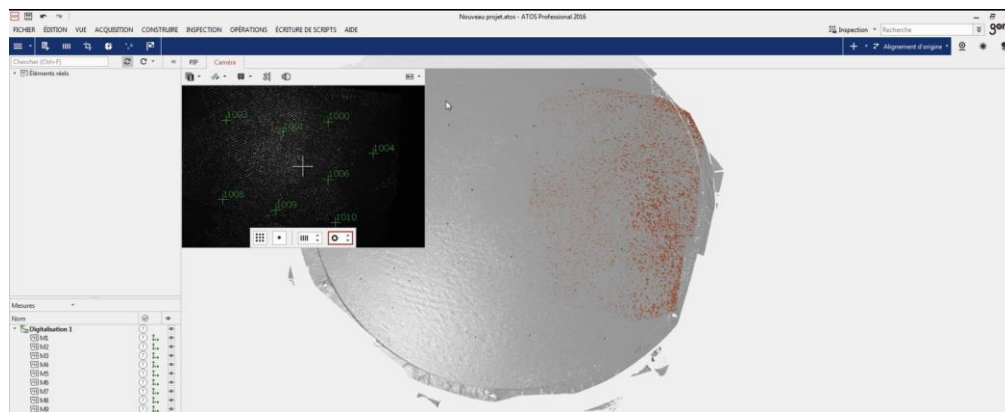
	VC (M/MIN)	FZ (MM/DT)	AE (MM)	AP (MM)	N (TR/MIN)	TEMPS D'USINAGE
EBAUCHE / DEMI-FINITION	135	0.2	5.25	3	4300	1h45
FINITION	180	0.14	0.346	0.1	5750	18h

2.2. Caractérisation du moyen de mesure

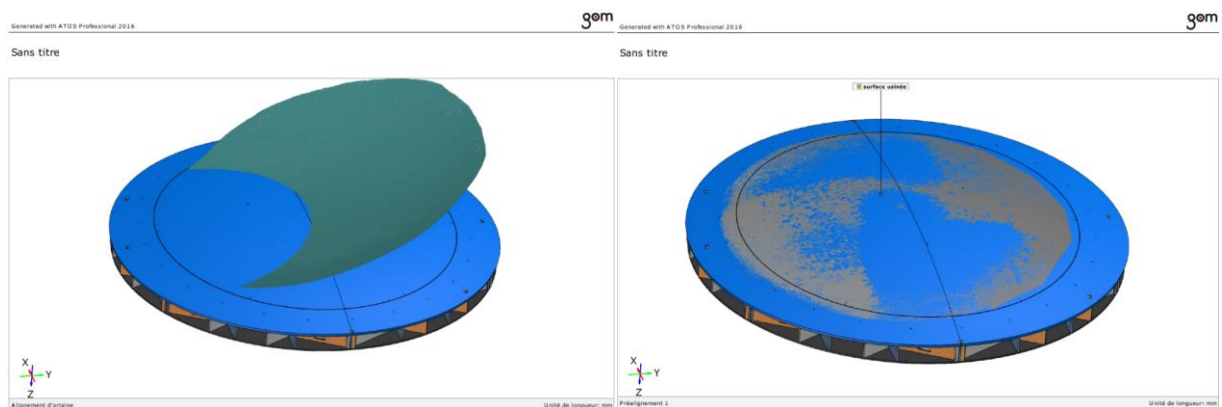
Pour positionner les développements par rapport à l'objectif RMS de l'application d'usinage, le moyen de mesure utilisé est le scanner ATOS. C'est le système qui qualifie les pièces après usinage dans le processus actuel.

2.2.1. Procédure de mesure du critère RMS géométrique

Une procédure décrit les différentes fonctions à utiliser pour mesurer le RMS du moule. Cette procédure est assurée par la suite logiciel associée au moyen ATOS :



(a) Digitalisation



(b) Alignement initial

(c) Meilleur ajustement

Figure 4-8 : Procédure d'identification du critère RMS - ATOS

- 1) Digitalisation (figure 4-8(a)): Après avoir réglé la position des caméras à la bonne distance focale, la mesure de plusieurs « patches¹ » génère ce que l'on appelle une digitalisation. Le matériau composite carbone/époxy possède une surface mate après usinage qui favorise la mesure car les reflets lumineux sur une surface brillante génèrent des points aberrants. Un réglage automatique du contraste optimise le nombre de points mesurés.

¹ Nom attribué à une séquence de mesure du scanner ATOS.

- 2) Polygonisation : La polygonisation permet de créer un maillage à partir du nuage de points de la digitalisation. Les paramètres de ce maillage sont également définis dans la procédure et ne sont pas modifiables. La polygonisation remplace localement un lot de 3 points de mesure par une valeur moyenne. Cela réduit le temps de calcul et l'influence des points aberrants sur le calcul des critères de qualité.
- 3) Alignement automatique et meilleur ajustement à la CAO (*figure 4-8(b&c)*): Par le biais d'une minimisation de l'écart moyen, ces deux fonctions permettent de trouver la meilleure position du maillage par rapport à la surface CAO.
- 4) Comparaison de la CAO au réel (*figure 4-9*): Cette fonction permet d'identifier en chaque point du maillage une erreur en x, y, z et le vecteur erreur par rapport à la surface CAO.
- 5) Calcul du critère RMS géométrique sur la base des vecteurs erreur mesurés.

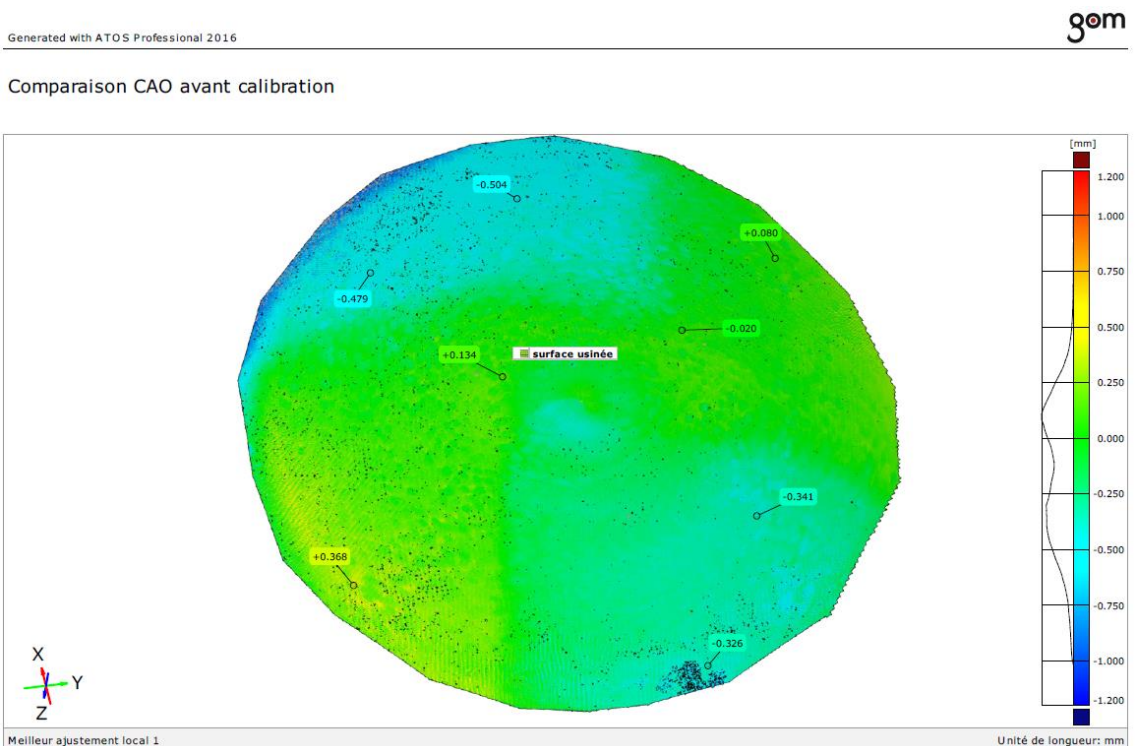


Figure 4-9 : Comparaison de la CAO au réel

2.2.2. Etude comparative – systèmes de mesure

Des mesures faites avec le système ATOS et le moyen de mesure haute précision INFINITEFOCUS présenté dans le premier chapitre, vont permettre de valider la capacité de mesure de ATOS pour l'application de l'usinage des moules de réflecteurs. En effet, avec une précision de mesure de +/-0.025mm, il se positionne à la limite de ses capacités pour le calcul d'un RMS géométrique attendu inférieur à 0.05mm.

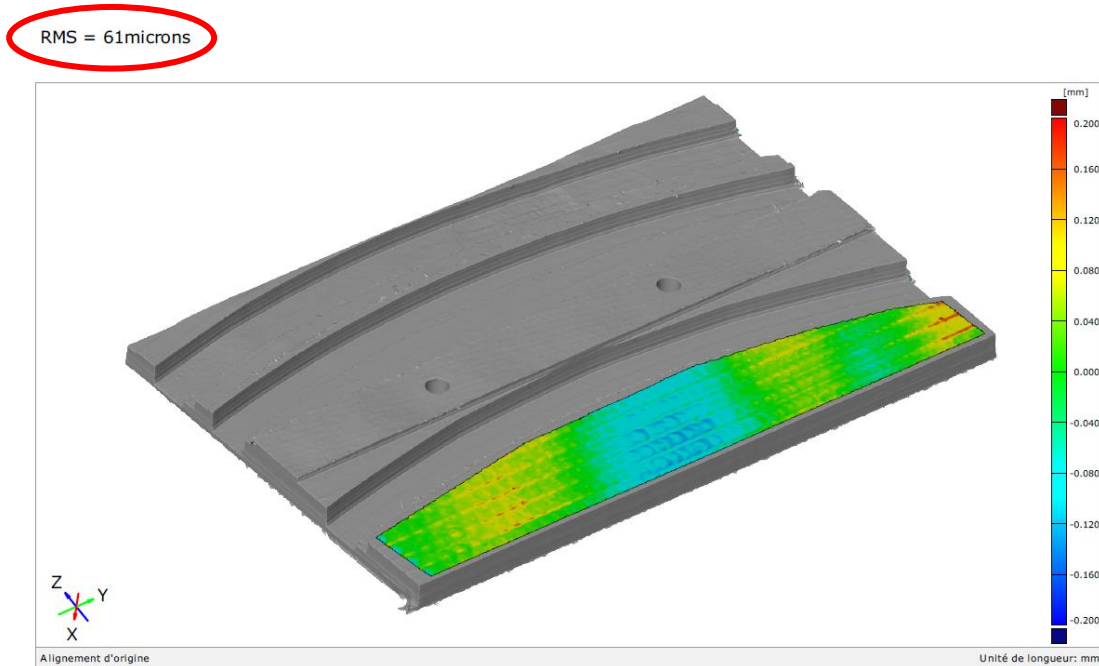


Figure 4-10 : RMS plan usiné robot - ATOS

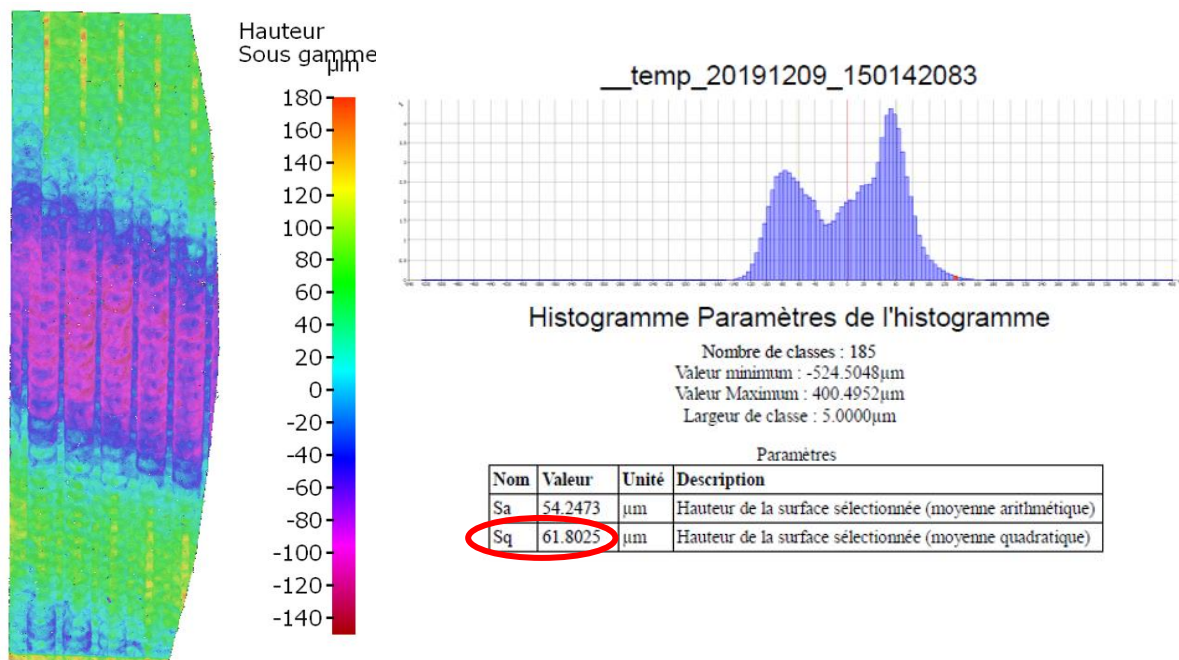


Figure 4-11 : RMS plan usiné robot - INFINITEFOCUS

La *figure 4-10* présente la mesure ATOS du RMS géométrique d'un plan usiné à l'aide du robot. La *figure 4-11* présente la mesure INFINITEFOCUS du RMS géométrique de ce même plan. Les deux moyens définissent un plan ajusté à la mesure (Best fit) avant d'identifier les écarts de chacun des points mesurés par rapport à ce dernier. Dans un premier temps, il est observé que les deux valeurs RMS sont identiques malgré une précision annoncée de plus de 150 fois supérieure pour le scanner haute précision ($0.3\mu\text{m}$). Ensuite, il est constaté que la répartition des erreurs est similaire pour les deux mesures. Cette comparaison permet de vérifier que le moyen ATOS est indiqué pour réaliser le contrôle dimensionnel des surfaces usinées et calculer des objectifs RMS avoisinant les $50\mu\text{m}$.

3. Méthode de correction hors-ligne appliquée à l'usinage d'un moule de réflecteur

Dans cette section, chaque phase de la gamme est introduite par les déviations mesurées de l'outil lors de l'usinage. A la fin de chaque sous-section, un tableau reprend les différents critères de qualité pour identifier un gain sur la précision de suivi de trajectoire entre les étapes de correction. Les bénéfices de chaque étape sont également identifiés.

Chaque usinage est réalisé avec un outil neuf. Les conditions de coupe étant similaires, l'usure de l'outil est considérée identique entre une phase d'usinage sans correction et la même phase corrigée.

3.1. Usinage ébauche

Un premier usinage d'ébauche est réalisé sans suivi de la position, pour éliminer les variations d'épaisseur du brut. Ensuite, le deuxième usinage d'ébauche sans correction paramétrique est réalisé avec le suivi de la position de l'outil afin d'identifier ses déviations dans la configuration initiale de la cellule d'usinage.

La déviation de l'outil suivant les 3 axes cartésiens et les 3 orientations est respectivement représentée sur les graphes *figure 4-12 (a) & (b)*. Une variation cyclique de la déviation sur chaque axe est observée. La *figure 4-13* présente une partie des trajectoires désirées et mesurées pour les axes X et Y. C'est la stratégie d'usinage en spirale qui implique cette évolution cyclique de la déviation de l'outil pour chacun des axes, un cycle correspondant à un tour du plateau. Les déviations observées sont dues aux imprécisions de palpé de l'origine du repère pièce par le palpeur du robot et celui du C-Track. Elles sont également et essentiellement dues aux erreurs des paramètres géométriques qui constituent le modèle géométrique nominal du robot. L'influence des erreurs géométriques n'est pas constante sur la déviation de l'outil, c'est pourquoi l'erreur moyenne évolue au cours de la trajectoire du robot pour chaque axe mesuré (*figure 4-12*). Pour l'axe Y, elle passe de 8mm à 3mm entre le début et la fin du parcours.

L'évolution cyclique de la déviation suivant les trois axes est principalement causée par l'erreur du paramètre $d7$ du modèle géométrique (c.f. Chapitre 2). Cette erreur déterminée lors de la correction paramétrique est de 12.5mm. Le paramètre $d7$ définit la distance entre le plan de

Application à l'usinage d'un moule de réflecteur

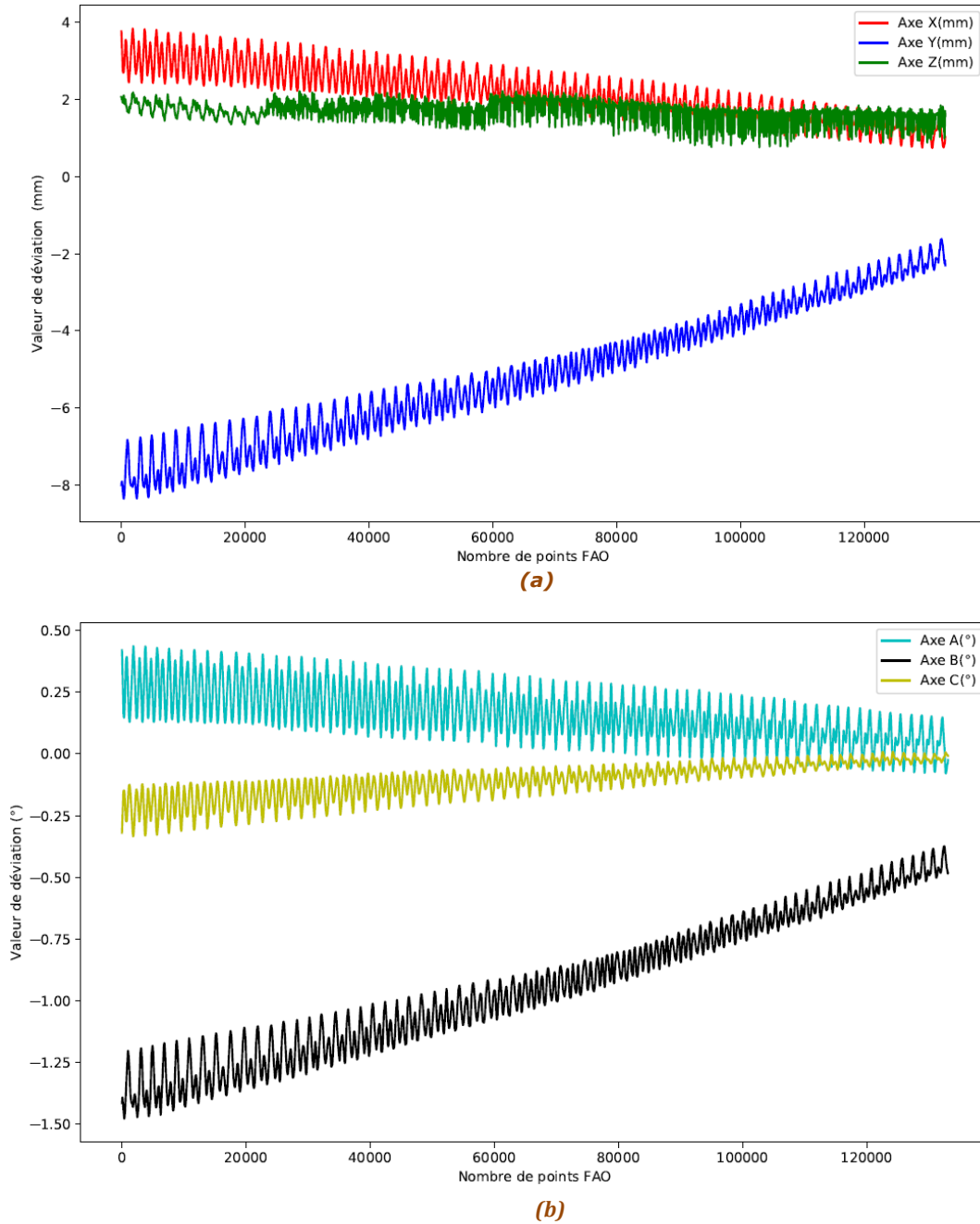


Figure 4-12 : Déviation TCP - 2^{ème} passe d'ébauche

jauges en Z de la broche et l'origine du repère de l'axe 6 du robot. Un défaut sur cette dimension est critique pour l'identification de la position du bout de l'outil. En effet, le bout de l'outil définit la base du vecteur d'orientation de l'outil. Comme présenté dans la [figure 4-14](#), une erreur sur le paramètre $d7$ impacte le plan de jauge (double flèche rouge [figure 4-14](#)). Lors d'une rotation θ de l'axe outil, une erreur de positionnement sur X, Y est visible et fonction sinus de l'angle θ . Pour la déviation suivant Z, elle est fonction cosinus de cet angle. Sur la [figure 4-14](#), la flèche verte symbolise le vecteur outil positionné en bout de l'outil et la flèche orange représente le vecteur outil avec un paramètre $d7$ erroné : Dans ce cas, l'évolution des axes A et B (angle θ) engendrent une déviation de la position de l'outil (double flèche noire).

Application à l'usinage d'un moule de réflecteur

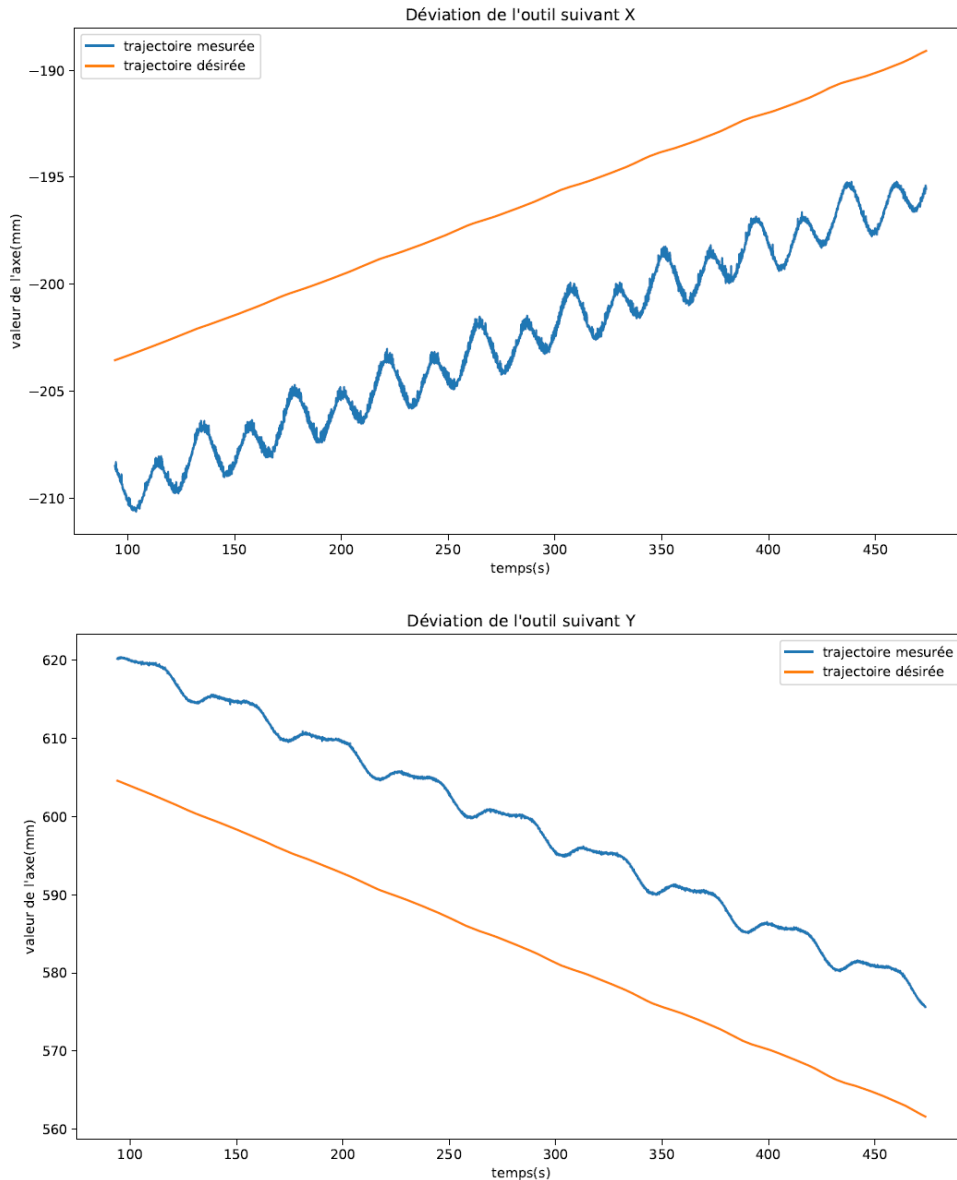


Figure 4-13 : Déviation suivant les axes X et Y - 2^{ème} passe d'ébauche

Pour mettre en évidence ce phénomène, la *figure 4-15 (a)* représente l'influence de l'orientation B sur la déviation de la trajectoire en X et celle de l'orientation A sur la déviation de la trajectoire en Y *figure 4-15 (b)*. En se basant sur le repère de la *figure 4-14*, et comme le présente la *figure 4-15*, une orientation en B- crée une déviation suivant X+. De la même façon, l'orientation A- crée une déviation suivant Y-.

Après ce premier usinage, la correction paramétrique, expliquée et appliquée au chapitre 2, propose un modèle géométrique corrigé qui vient remplacer le modèle nominal dans la commande du robot. En se basant sur les conclusions du chapitre 2, les déviations constatées ici seront normalement réduites d'au moins 56% après cette modification. Cela sera visible sur le *tableau 4.2* de la section 3.2.4.

Application à l'usinage d'un moule de réflecteur

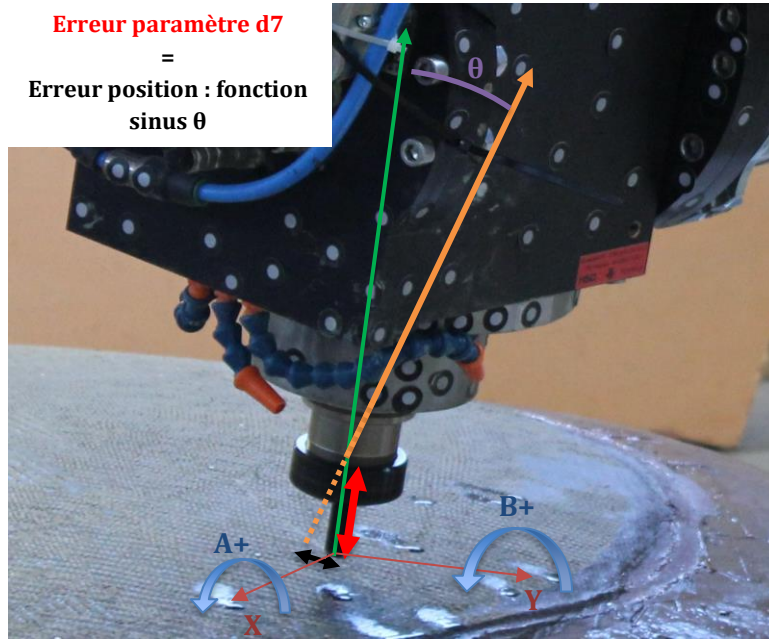
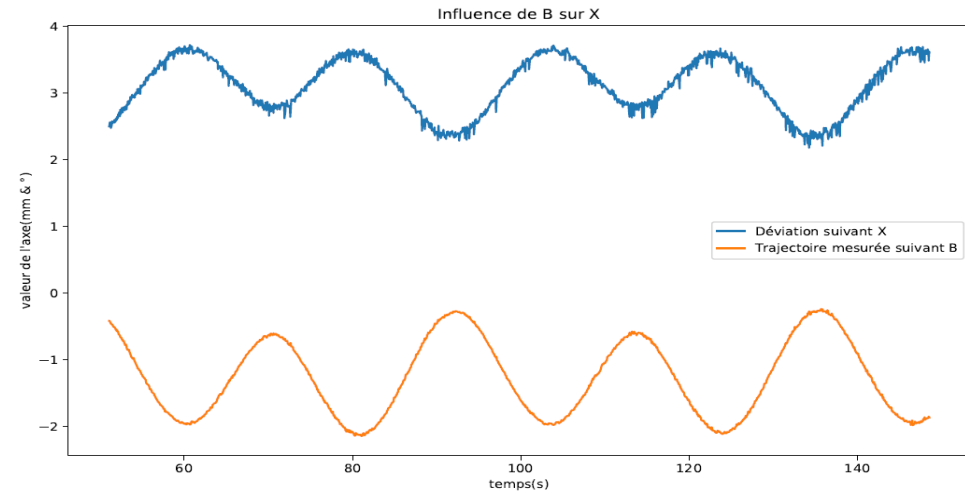
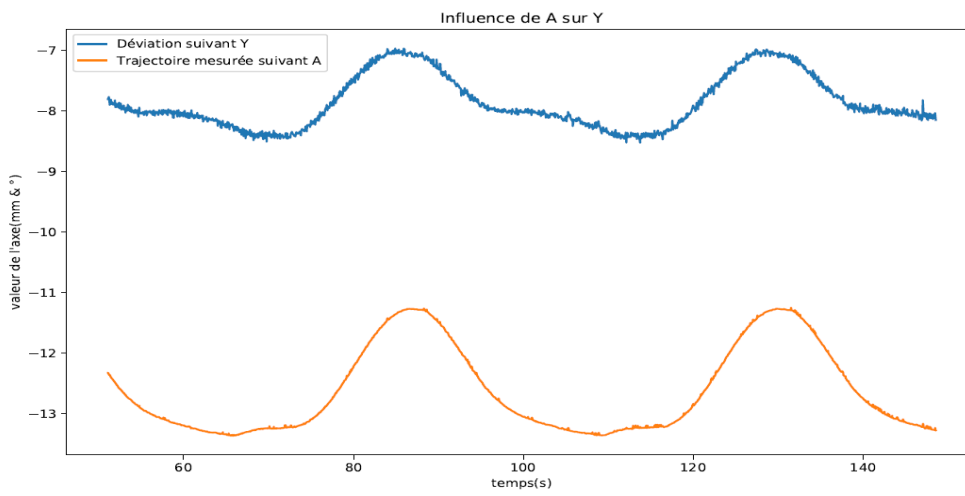


Figure 4-14 : Défaut paramètre d7



(a)



(b)

Figure 4-15 : Influence de l'orientation du vecteur outil sur sa position

3.2. Usinage de demi-finition

La méthode de correction hors ligne compare la position mesurée à la position désirée de l'outil et génère un programme corrigé comme présenté dans le chapitre 3. Après le deuxième usinage de demi-finition, la *figure 4-16* présente les valeurs de correction appliquées, par axe, à chaque point du programme FAO initial.

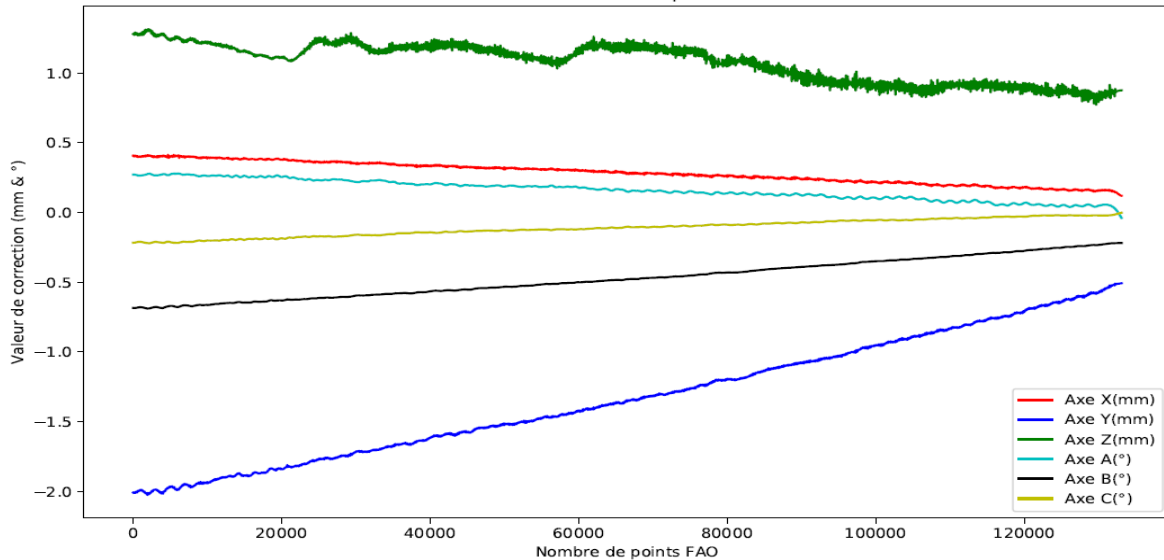


Figure 4-16 : Correction appliquée par axe - Demi-finition

Ces courbes représentent également les déviations constatées lors de l'usinage. Au regard des mesures réalisées sans correction paramétrique (*figure 4-12*), ces déviations sont réduites d'environ 70%. La correction des paramètres géométriques, à travers la modification du modèle géométrique, apporte un gain important dans la précision de pose et de suivi de trajectoire de l'outil.

L'erreur sur chacun des axes n'est pas constante comme elle devrait l'être avec des efforts de coupe constants. Cela s'explique principalement par deux phénomènes confondus dans la mesure des déviations :

- 1) Le modèle géométrique même corrigé, n'est pas exact. L'erreur de pose initiale du robot n'est pas complètement corrigée par la correction paramétrique. Une erreur géométrique résiduelle est toujours présente et elle évolue en fonction de la zone de travail et ainsi de la configuration du robot.
- 2) L'observation de l'évolution de la déviation sur la *figure 4-16* témoigne d'une évolution du comportement en raideur du robot. En effet, la déviation est fonction de la configuration du robot et des efforts externes. Ces derniers étant considérés constants, la réponse en raideur du système est donc variable et monotone suivant l'évolution de la configuration du robot sur sa trajectoire.

3.2.1. Paramètres de lissage du signal de mesure

La *figure 4-17* présente un extrait du signal mesuré et traité de la déviation de la trajectoire suivant Y. La méthode de lissage adaptée développée dans le chapitre précédent définit

automatiquement une découpe du signal de mesure en 1711 zones de lissage linéaire. Elle garantit un nombre de 107 points de mesure par zone et un critère RMS = 0.040mm.

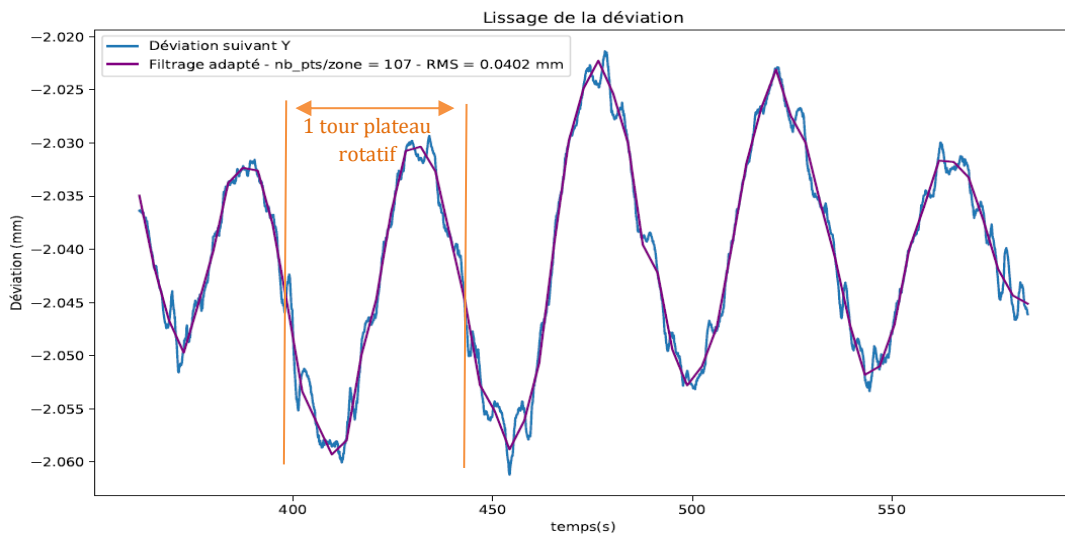


Figure 4-17 : Lissage adapté déviation axe Y – Demi-finition

Le signal de déviation de la *Figure 4-17* présente une variation cyclique de l'erreur. Le temps de ce cycle est représenté ici par deux droites verticales oranges. Également présent lors de l'usinage d'ébauche, ce cycle correspond à une période de rotation de 360° du plateau diviseur. Cette variation, d'environ +/-0.02mm, autour de la déviation moyenne est donc causée par les imprécisions de palpéage du C-Track et du robot.

3.2.2. Correction du programme de demi-finition

Les vecteurs erreur des six coordonnées de position et d'orientation sont identifiés pour chaque point FAO. Ils permettent de modifier le programme de commande comme présenté dans la *figure 4-18*. On constate que les six coordonnées évoluent alors que la position en rotation du plateau diviseur (coordonnée E1) reste inchangée. Ce programme modifié est utilisé pour réaliser le nouvel usinage de demi-finition corrigé.

<pre> :-----DEBUT PROG----- G1 X-207.2880 Y615.6690 Z189.4680 A-9.4331 B-4.0335 C18.1994 E1=-71.8332 N160 M8 ;Arrosage extérieur N170 G4 F5 ;Pause 5sec pour synchro CTRACK G1 X-207.2440 Y615.5360 Z188.7740 A-9.4273 B-4.0199 C18.2018 E1=-71.8232 G1 X-207.2020 Y615.4130 Z188.1450 A-9.4264 B-4.0113 C18.2033 E1=-71.7951 G1 X-207.1670 Y615.3090 Z187.6240 A-9.4247 B-4.0051 C18.2044 E1=-71.7526 G1 X-207.1400 Y615.2280 Z187.2250 A-9.4232 B-4.0026 C18.2048 E1=-71.7003 G1 X-207.1200 Y615.1680 Z186.9370 A-9.4215 B-4.0011 C18.2051 E1=-71.6424 G1 X-207.1060 Y615.1260 Z186.7400 A-9.4197 B-4.0003 C18.2053 E1=-71.5815 G1 X-207.0960 Y615.0980 Z186.6160 A-9.4179 B-3.9999 C18.2054 E1=-71.5190 G1 X-207.0910 Y615.0810 Z186.5490 A-9.4163 B-3.9997 C18.2054 E1=-71.4557 </pre>	<pre> :-----DEBUT PROG----- G1 X-206.9619 Y614.0928 Z190.6801 A-9.2363 B-4.5877 C18.0620 E1=-71.8332 N160 M8 ;Arrosage extérieur N170 G4 F5 ;Pause 5sec pour synchro CTRACK G1 X-206.9171 Y613.9602 Z189.9868 A-9.2306 B-4.5741 C18.0644 E1=-71.8232 G1 X-206.8749 Y613.8375 Z189.3583 A-9.2296 B-4.5655 C18.0658 E1=-71.7951 G1 X-206.8399 Y613.7337 Z188.8376 A-9.2279 B-4.5593 C18.0669 E1=-71.7526 G1 X-206.8130 Y613.6527 Z188.4388 A-9.2264 B-4.5569 C18.0674 E1=-71.7003 G1 X-206.7930 Y613.5928 Z188.1509 A-9.2247 B-4.5554 C18.0676 E1=-71.6424 G1 X-206.7791 Y613.5508 Z187.9541 A-9.2229 B-4.5546 C18.0678 E1=-71.5815 G1 X-206.7691 Y613.5229 Z187.8302 A-9.2211 B-4.5542 C18.0679 E1=-71.5190 G1 X-206.7641 Y613.5059 Z187.7633 A-9.2194 B-4.5539 C18.0680 E1=-71.4557 </pre>
--	--

Programme initial

Programme corrigé

Figure 4-18 : Correction du programme de demi-finition

3.2.3. Usinage de demi-finition corrigé

Un suivi de trajectoire est réalisé lors de l'usinage du parcours de demi-finition corrigé. En comparant la trajectoire mesurée de l'outil avec le programme de demi-finition initial, il est possible de déterminer les déviations de l'outil qui sont présentées sur les graphiques de la *figure 4-19*.

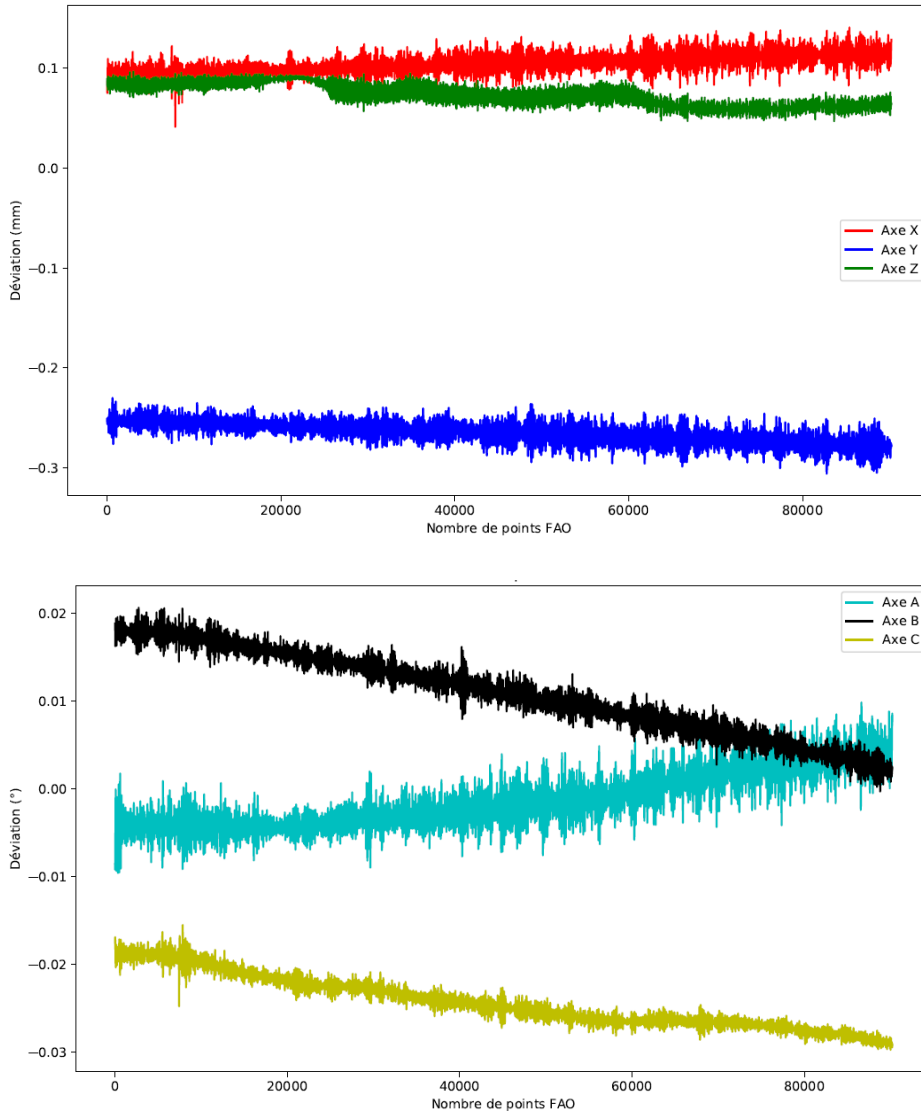


Figure 4-19 : Déviation de l'outil – Demi-finition corrigée

Ces résultats démontrent une réduction des déviations de l'outil d'environ 80% par rapport à celles mesurées avant correction (*figure 4-16*). En comparant la *figure 4-19* avec la *figure 4-16*, les valeurs de la déviation après correction évoluent nettement moins sur la totalité de la trajectoire. De plus, la variation cyclique de la déviation initiale (*figure 4-16*) attribuée aux erreurs de palpé n'apparaît plus après correction.

Cependant et comme dans les expérimentations du chapitre précédent, ces déviations sont encore de l'ordre de plusieurs dixièmes de millimètre. L'amélioration du suivi de la trajectoire par

l'outil se traduit par un vecteur de correction moyen de plus de 1.5mm en norme. Ce déplacement important par rapport à la trajectoire initialement mesurée entraîne la modification des conditions de coupe. L'enlèvement de matière est constant mais les efforts appliqués à l'outil sont modifiés.

En effet, la *figure 4-19* illustre que cette correction génère une surcompensation des axes A, B et C, avec des nouvelles déviations de signe opposé à celles initialement mesurées. En revanche, elle génère une sous-compensation des axes X, Y et Z, avec des nouvelles déviations de même signe que celles mesurées initialement.

La modification de la trajectoire entraîne une nouvelle réponse en déformation de la structure robotique qui ne peut pas être compensé par la méthode. Cela explique la déviation résiduelle observée.

3.2.4. Conclusion

Le *tableau 4.2* présente les valeurs moyennes, maximales et minimales des vecteurs d'erreur de position et d'orientation pour la passe d'ébauche et les passes de demi-finition. L'écart type (ET) de ces vecteurs caractérise l'amplitude d'évolution des déviations mesurées pour chaque passe. Plus l'écart type est faible, plus la déviation est constante sur l'ensemble de la séquence d'usinage. Les gains représentent la réduction de l'erreur entre une opération et la précédente. Excepté pour le gain total qui caractérise l'amélioration de la précision de l'outil entre l'ébauche sans correction paramétrique et la demi-finition corrigée, ce gain tient compte des bénéfices des deux méthodes de correction appliquées.

Tableau 4.2 : Amélioration de la précision d'usinage – Demi-finition

		EBAUCHE (SANS CORRECTION)	GAIN CORRECTION PARAMETRIQUE	DEMI- FINITION	GAIN CORRECTION HORS LIGNE	DEMI- FINITION CORRIGEE	GAIN TOTAL
ERREUR DE POSE (MM)	Moyenne	6.56	70%	1.91	85%	0.29	95%
	Max	9.53	73%	2.50	85%	0.48	95%
	Min	1.93	50%	0.95	81%	0.08	96%
	ET	2.86	75%	0.70	40%	0.42	85%
ERREUR D'ORIENTATION (°)	Moyenne	1.08	46%	0.58	76%	0.14	87%
	Max	1.54	50%	0.77	66%	0.26	83%
	Min	0.38	42%	0.22	90%	0.02	94%
	ET	0.51	41%	0.3	36%	0.19	62%

La correction paramétrique réduit de 70% et 46% respectivement les erreurs de positionnement et d'orientation du robot. Ces résultats sont supérieurs au gain de la méthode annoncée de 56% dans le chapitre 2. Cela s'explique par l'amélioration de la précision du robot évaluée dans un espace de travail réduit par rapport à l'étude du chapitre 2. Les écarts types sont réduits selon des facteurs similaires, cela caractérise une forte réduction de l'amplitude de l'erreur. En effet, l'évolution de l'erreur par axe est initialement fortement entachée par les imprécisions des paramètres géométriques. Ce phénomène est amplifié avec l'utilisation du

plateau diviseur qui permet de visualiser les extremums du défaut de positionnement pour chaque tour.

La correction hors ligne en demi-finition compense une grande partie des défauts de pose et d'orientation observés lors d'une première passe mesurée. L'erreur de pose à corriger varie entre 1 et 2mm. Les conditions d'engagement sont donc modifiées et la méthode ne parvient pas à compenser les nouveaux défauts de positionnement liés à ce changement. C'est pourquoi le gain concernant la pose et l'orientation sont respectivement de 85% et 76%.

Sur la base de la mesure de la position, les méthodes développées dans ces travaux apportent un gain de près de 90% sur la précision de suivi de trajectoire du robot par rapport à une situation initiale peu précise. Ces résultats seront affinés avec l'étude de la qualité géométrique de la pièce que propose la section 4 à venir.

3.3. Usinage de finition

3.3.1. Passe hors matière

Dans la phase de finition, une première trajectoire est réalisée hors matière. En mesurant la trajectoire de l'outil, il est possible de déterminer les déviations dues uniquement aux erreurs de pose et d'écartier les déviations causées par les efforts de coupe. La méthode de correction hors ligne est appliquée ensuite pour générer un programme de finition corrigé. Ainsi, l'usinage du parcours de finition corrigé tiendra compte de la compensation des erreurs géométriques du robot et des imprécisions de palpation des différents repères.

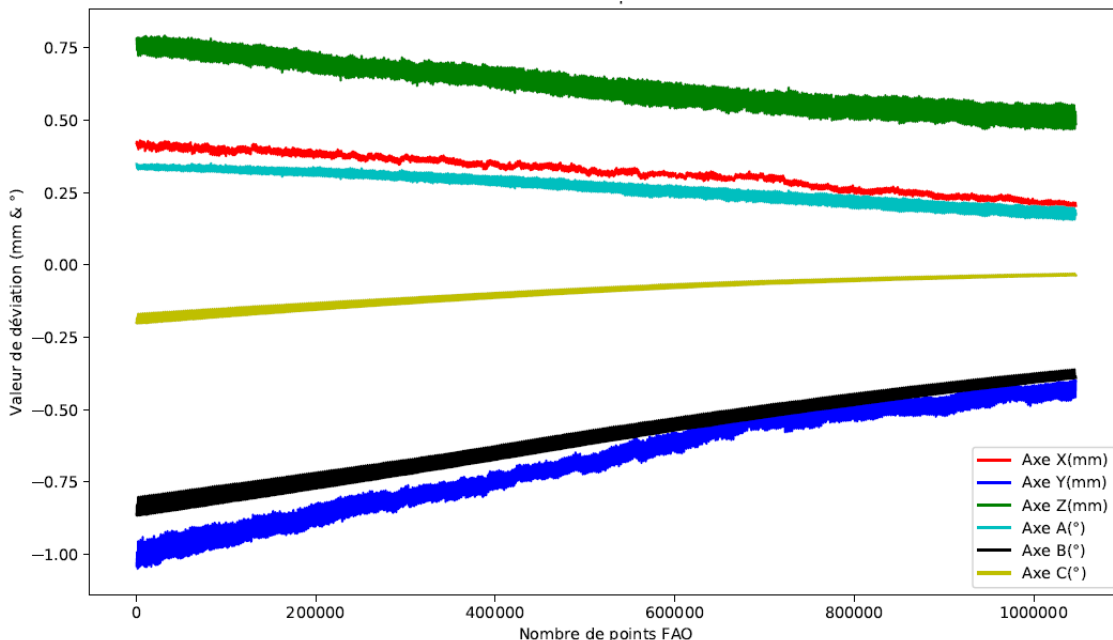


Figure 4-20 : Déviation par axe - Finition hors matière

Cette passe hors matière bénéficie de l'amélioration de la précision de pose par la correction paramétrique. La figure 4-20 présente des tendances de déviation similaires à celles

observées pour l'usinage de demi-finition. Cependant, les valeurs d'erreur sur les axes X, Y et Z sont environ deux fois moins importantes. Cela s'explique par l'absence d'effort de coupe.

3.3.2. Paramètres de lissage du signal de mesure

La *figure 4-21* présente le signal mesuré et traité de la déviation de la trajectoire suivant Y. L'algorithme de lissage adapté de notre étude définit automatiquement une découpe du signal de mesure en 7750 zones de lissage linéaire, avec un nombre de 142 points de mesure par zone et un critère RMS = 0.048mm. Ce dernier critère, inférieur à la précision de mesure du scanner C-Track, valide une bonne représentation de la déviation réelle de l'outil en éliminant les bruits de mesure.

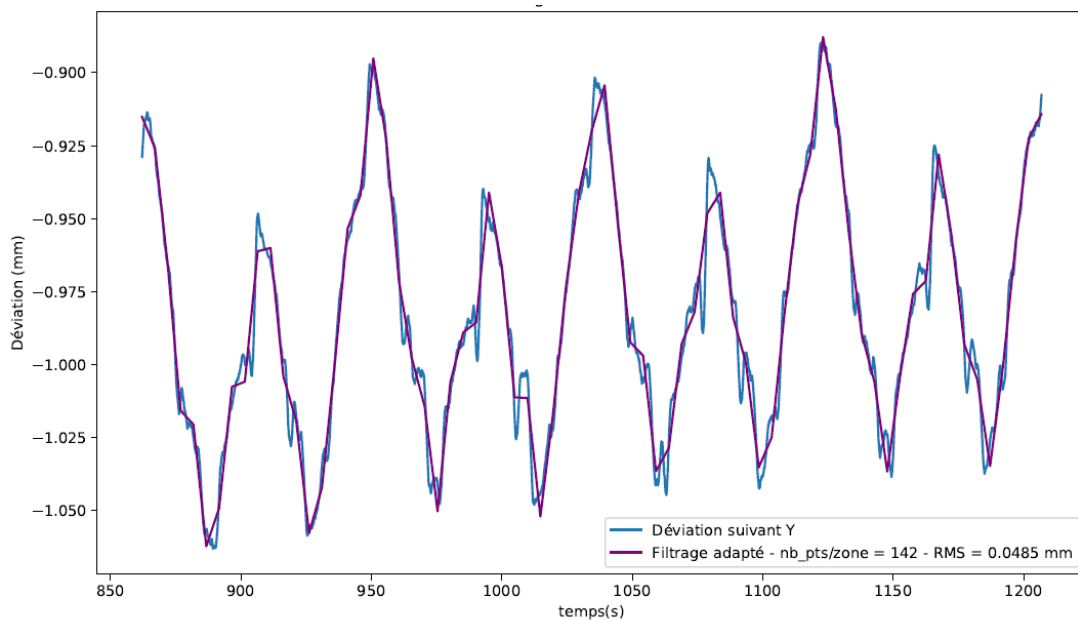


Figure 4-21 : Lissage adapté déviation axe Y – Finition hors matière

Comme pour la phase de demi-finition, conséquence de l'utilisation du plateau rotatif, une variation cyclique de la déviation est observée.

La méthode de correction hors ligne génère un programme corrigé en ajoutant les vecteurs de correction (*Figure 4-20*) à chaque point du programme initial.

3.3.3. Usinage de finition – Erreur de pose corrigée

La *figure 4-22* présente les valeurs de la correction pour chaque axe à appliquer au programme d'usinage de finition après compensation. Initialement monotone sur chaque axe et causée par les erreurs géométriques et les défauts de palpée, la déviation de la pose est significativement réduite (*figures 4-20 & 4-22*).

Application à l'usinage d'un moule de réflecteur

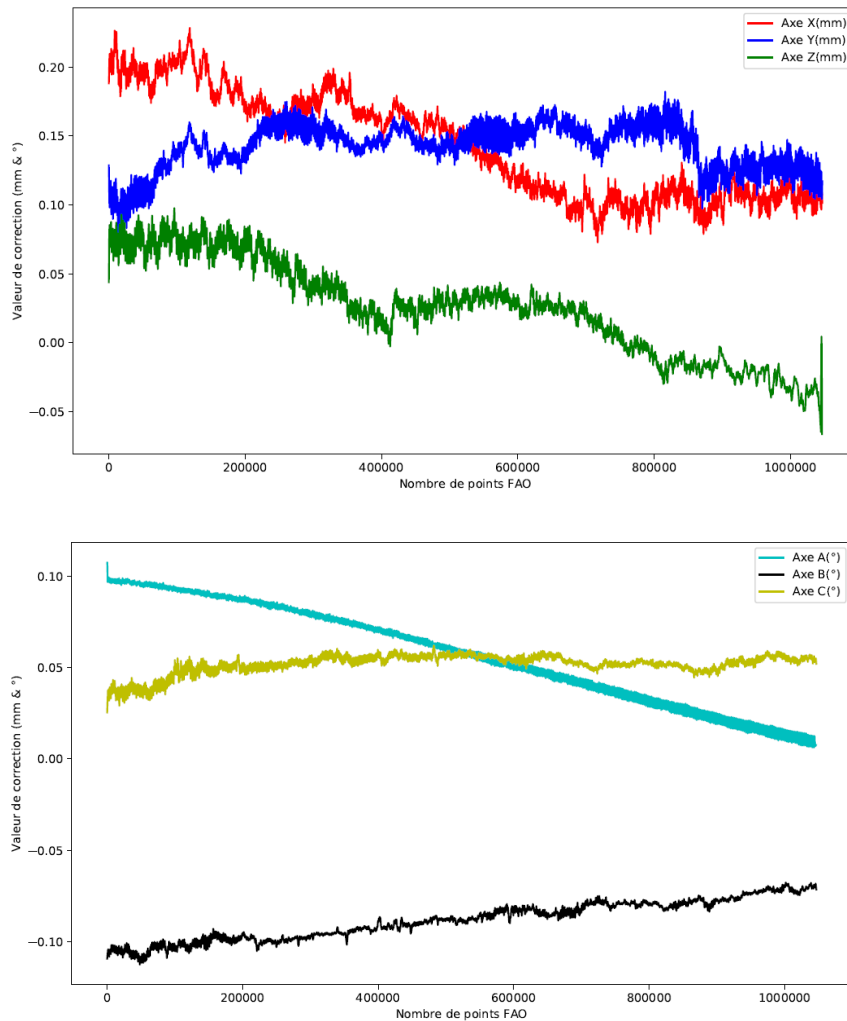


Figure 4-22 : Correction par axe – Finition, erreur de pose corrigée

Les déviations portées par les axes d'orientation de l'outil sont faibles. Les orientations B et C sont constantes tout au long du parcours alors que l'évolution de l'orientation A est monotone. L'évolution de l'erreur suivant ces orientations est ascendante ou descendante mais monotone, ce qui traduit d'une erreur de type géométrique et/ou de palpation et donc fonction de la configuration du robot. Des extremums sont également présents sur les relevés des orientations B et C. Ils sont causés par un bruit de mesure observable malgré le lissage du signal mesuré (figure 4-22).

Les efforts de coupe, identifiés au chapitre 1 pour cette phase de finition (10N), sont faibles devant ceux exercés lors de la phase de demi-finition. Ils présentent également une forte variabilité égale à +/-7N. Cette variabilité impacte la mesure et explique les extremums visibles sur les courbes X, Y et Z, figure 4-22. Malgré cette variabilité des efforts, cela n'explique pas les tendances ascendantes ou descendantes des déviations observées ici. Ces dernières ne sont donc pas seulement affectées par les efforts de coupe. Des erreurs résiduelles de pose ainsi que l'évolution de la raideur du robot dans l'amplitude de travail mesurée pourraient être à l'origine des tendances de déviation de l'outil.

3.3.4. Paramètres de lissage du signal de mesure

La *figure 4-23* présente le traitement du signal de la déviation de la trajectoire suivant Y. L'algorithme de lissage adapté de notre étude définit automatiquement une découpe du signal de mesure en 5530 zones de lissage linéaire, avec un nombre de 199 points de mesure par zone et un critère RMS = 0.046mm. La variation cyclique de la déviation due aux erreurs géométriques présente une amplitude de 0.02mm contre 0.1mm lors de l'usinage précédent. La méthode de correction appliquée pour compenser les erreurs de pose liées aux paramètres géométriques n'a pas complètement compensée ce défaut.

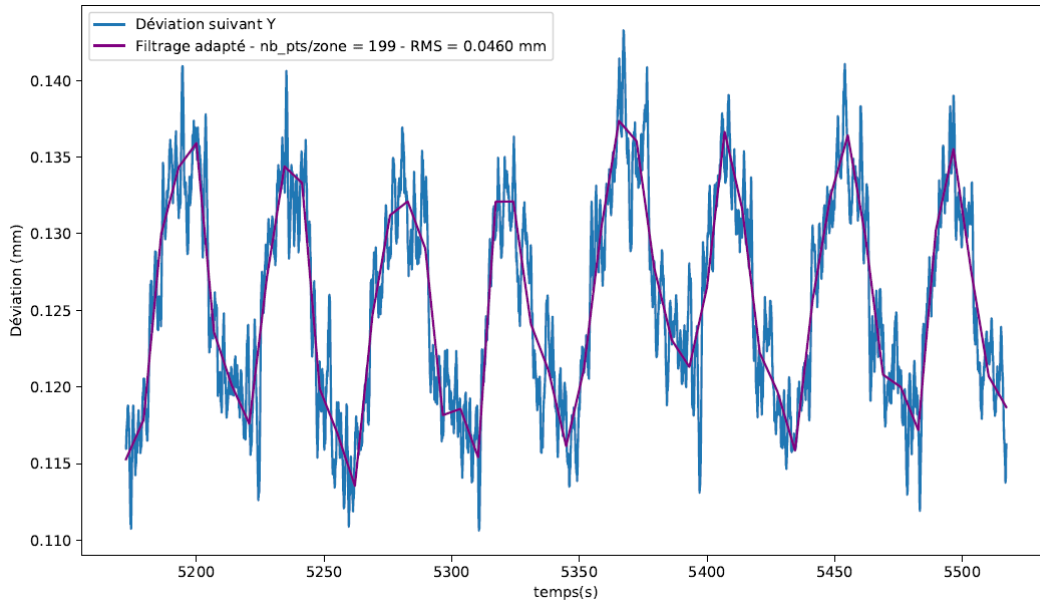


Figure 4-23 : Lissage adapté - déviation axe Y – Finition, erreur de pose corrigée

3.3.5. Usinage de la finition corrigée

La *figure 4-24* présente les déviations mesurées lors de cette passe de finition compensée. Les valeurs de déviation de l'outil portées par chaque axe sont significativement réduites. Concernant l'axe Y, la nouvelle déviation est opposée à celle mesurée avant correction (*Figure 4-22*). La trajectoire est donc surcompensée et cela peut s'expliquer par des valeurs de déviation proches de la précision de mesure du scanner C-Track.

La déviation suivant l'orientation A montre une variabilité d'amplitude supérieure à celles de B et C. Les coordonnées en B et C dans ce parcours sont constantes alors que A génère l'orientation β_n de l'axe outil par rapport à la normale à la surface. Cette normale évolue de manière cyclique avec la rotation du plateau et c'est pourquoi l'erreur d'orientation de l'axe A est également cyclique et d'une amplitude supérieure à celles des deux autres orientations.

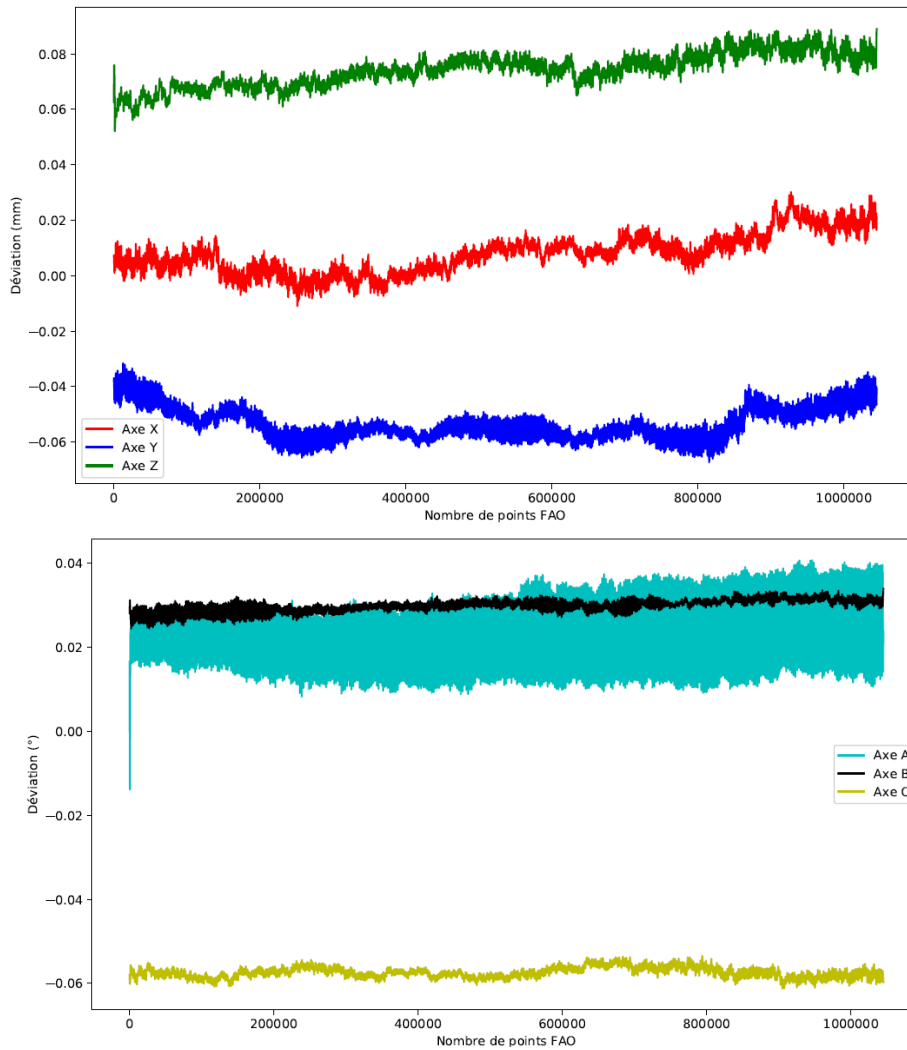


Figure 4-24 : Déviation de l'outil – finition corrigée

3.3.6. Conclusion – Usinage de finition

Le *tableau 4.3* présente les valeurs moyennes, maximales et minimales des vecteurs d'erreur de position et d'orientation pour les différentes passes de finition. Le premier gain correspond à la correction hors ligne réalisée à partir de la mesure d'une trajectoire sans enlèvement de matière. Puisque l'usinage du parcours de finition tient compte des améliorations de la correction paramétrique, les gains de 38% et 83% des vecteurs d'erreur de pose et d'orientation sont le résultat de la compensation des erreurs résiduelles du modèle géométrique ainsi que des erreurs de palpé.

Tableau 4.3 : Amélioration de la précision d'usinage - Finition

		FINITION HORS MATIERE	GAIN CORRECTION DE LA POSE	FINITION – POSE CORRIGEE	GAIN CORRECTION HORS LIGNE	FINITION CORRIGEE	GAIN TOTAL
ERREUR DE POSE (MM)	Moyenne	0.97	38%	0.6	83%	0.1	89%
	Max	1.38	31%	0.95	36%	0.6	56%
	Min	0.51	21%	0.4	67%	0.13	74%
	Ecart type	0.31	54%	0.14	14%	0.12	61%
ERREUR D'ORIENTATION (°)	Moyenne	0.66	83%	0.11	45%	0.06	90%
	Max	0.95	75%	0.16	12%	0.14	85%
	Min	0.37	81%	0.07	72%	0.02	94%
	Ecart type	0.23	82%	0.04	0%	0.04	82%

La première correction hors ligne compense les erreurs de pose et d'orientation respectivement de 83% et 45%. Les défauts moyens à corriger sont de 0.6mm pour la pose et de 0.11° pour l'orientation. Ces valeurs sont bien inférieures à celles observées lors de l'usinage de demi-finition, conséquence d'un effort de coupe réduit. Les faibles valeurs de correction font diminuer le gain de la méthode dont la principale limite est caractérisée par l'utilisation d'un capteur de position avec une précision de +/-0.15mm. Cela explique également l'amélioration de l'écart type de 14%, valeur plus faible que la correction du parcours de demi-finition où les déviations compensées sont plus grandes.

3.4. Conclusion – Correction de la gamme d'usinage du moule de réflecteur

Après l'application des méthodes de correction développées dans ces travaux à travers l'usinage d'un moule de réflecteur en composite Carbone/Epoxy, les améliorations de suivi de trajectoire ont pu être analysées.

Compte-tenu d'une précision de pose initialement dégradée, la méthode qui apporte la plus grande part de réduction des déviations est la correction paramétrique. Elle apporte un gain sur l'erreur de pose et d'orientation de l'outil respectivement de 70% et 46% (*tableau 4.2*).

La méthode de correction hors ligne apporte un gain qui est fonction de la valeur de l'erreur mesurée : Plus la déviation est importante et plus sa réduction sera grande. Ce gain tient également compte du moyen de mesure utilisé pour suivre la position de l'outil : L'utilisation d'un moyen de mesure plus précis augmenterait le gain de la méthode.

Sur la base des données des *tableaux 4.2 & 4.3*, le couplage des deux méthodes de correction améliore de 98% la précision de pose et de 95% l'orientation de l'outil.

4. Suivi qualité pièce

Il est choisi de suivre les critères qualité inscrits dans la spécification. Elle définit le processus de contrôle du moule de réflecteur. Dans cette partie de l'étude, ce sont les mesures de rugosité et de tolérance géométrique du moule qui qualifieront les bénéfices des développements. Les valeurs de ces critères permettront également un comparatif avec les résultats attendus au chapitre 1 en termes de rugosité de surface (*ANNEXE 2*).

4.1. Qualité dimensionnelle

En respectant la méthode de manipulation du moyen ATOS décrite en début de ce chapitre, les critères RMS sont déterminés après chaque usinage du processus de correction. Des mesures de la rugosité de surface (R_a) sont également réalisées pour observer l'évolution de ce critère qualité.

4.1.1. Usinage ébauche sans correction paramétrique

Le suivi dynamique pour cet usinage a présenté dans la section précédente des déviations importantes de l'outil par rapport à la trajectoire désirée. La *figure 4-25* présente les résultats de la comparaison entre la surface CAO désirée et la surface mesurée de la pièce après l'usinage d'ébauche sans correction paramétrique.

On constate des valeurs de déviation maximale autour du meilleur alignement automatique de +/-2mm et un résultat RMS_{E2} (RMS déterminé après le deuxième usinage d'ébauche) = 3.142mm. L'échelle chromatique met en évidence des points locaux d'écart important dans des zones d'écarts moyens (cercle rouge *figure 4-25*), ces défauts de surface sont le résultat de l'évolution localement importante de l'orientation de la broche. L'erreur des

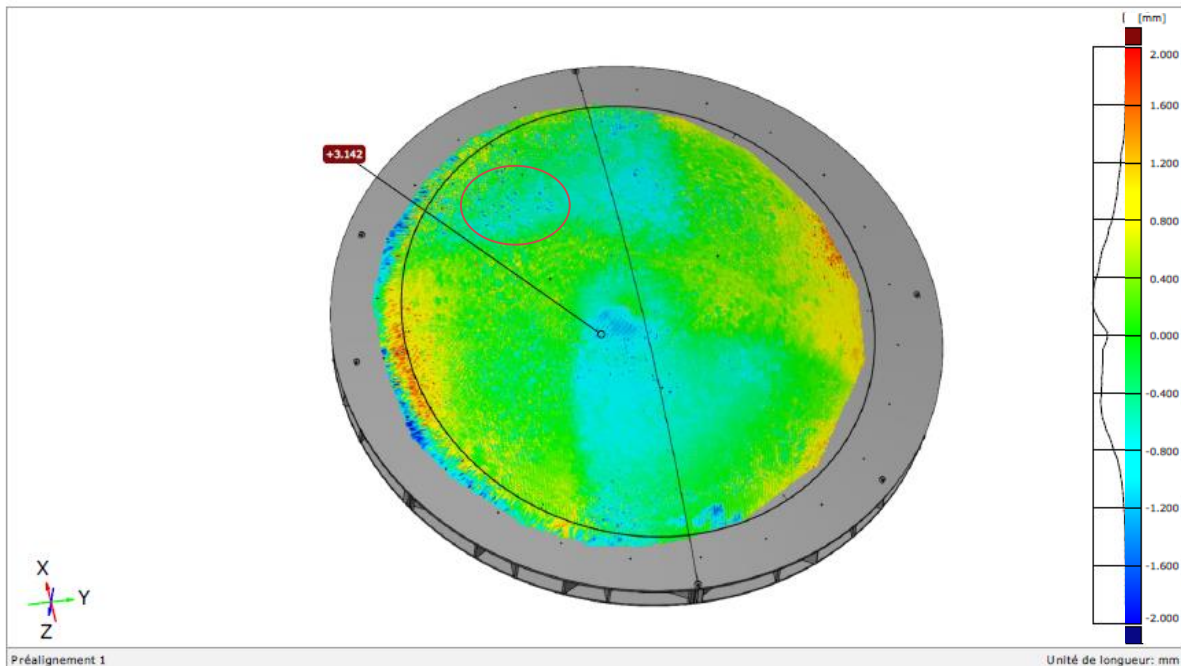


Figure 4-25 : Mesure RMS géométrique - 2^{ème} passe d'ébauche

paramètres géométriques dans l'état initial du robot entraîne, lors de ces variations d'orientation, un défaut de positionnement local. L'image de la *figure 4-26* permet de visualiser ce phénomène.

La rugosité moyenne de la surface usinée est déterminée suivant une procédure et sur la base de 10 relevés définis aléatoirement sur un maillage de points identifié sur la zone utile du moule. Sa valeur est de $R_{A,E2}$ (R_a mesurée après le deuxième usinage d'ébauche) = $12.3\mu\text{m}$.

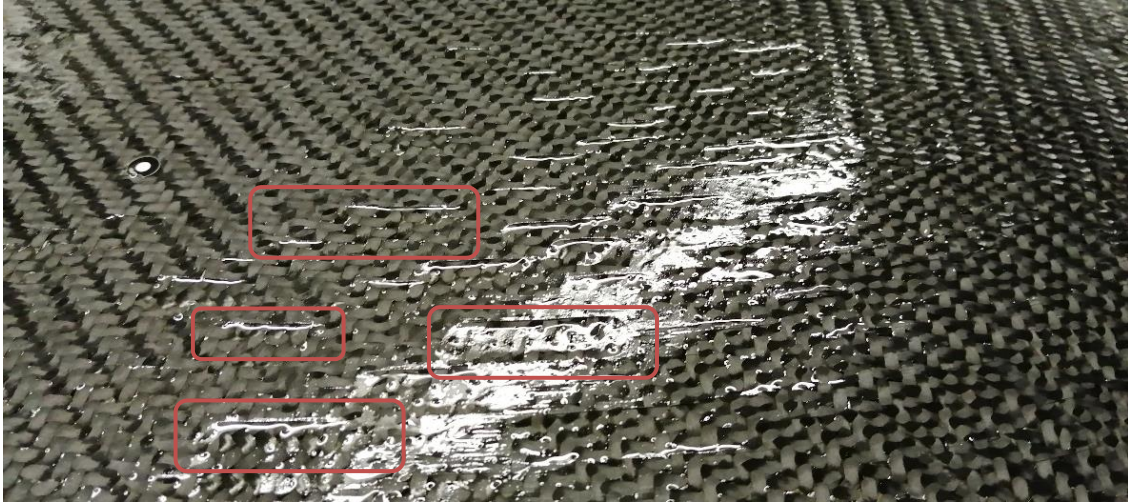


Figure 4-26 : Défauts de pose liés à l'orientation de la broche - 2ème passe d'ébauche ($R_{A,E2}$)

4.1.2. Usinage demi-finition

La modification du modèle géométrique améliore le résultat RMS géométrique de l'usinage d'ébauche puisque les écarts ont des valeurs réduites par rapport à la précédente mesure. Ils sont compris entre +/-0.4mm pour un résultat RMS_{DF} (RMS déterminé après l'usinage de demi-finition) = 0.162mm. Un rapport de 20 entre le RMS_{E2} et le RMS_{DF} s'explique par l'amélioration de la précision de pose de 70% que confère la correction paramétrique.

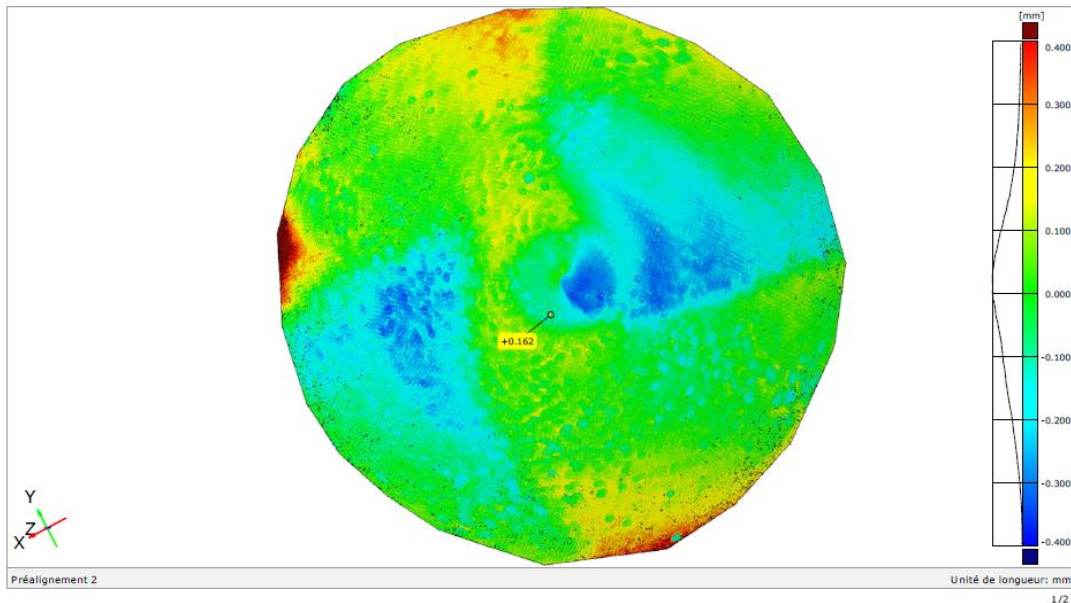


Figure 4-27 : Mesure RMS géométrique - Demi-finition

On observe toujours sur la *figure 4-27*, la présence de défauts de surface liés aux évolutions de l'orientation de l'outil. Ces défauts sont moins importants au regard de l'échelle chromatique. La rugosité moyenne de la surface usinée est de R_{A_DF} (R_a mesurée après l'usinage de demi-finition) = $5.26\mu\text{m}$.

4.1.3. Usinage demi-finition corrigée

Le programme corrigé de l'ébauche permet d'améliorer le résultat RMS. La *figure 4-28* présente la mesure du RMS_{DFC} (RMS déterminé après l'usinage de demi-finition corrigé) = 0.096mm . La répartition des écarts se resserre autour de 0 et les valeurs maximales sont $\pm 0.3\text{mm}$. Les impacts de l'outil dans la matière, déjà observés dans les mesures précédentes, sont visibles après cette phase de correction. Attribués à la conséquence des défauts du modèle géométrique lors d'une variation forte de l'orientation, ces impacts sont également le résultat des défauts d'inversion puisque la correction hors ligne permet de compenser les erreurs géométriques et de limiter les phénomènes d'inversion sans pour autant les éliminer. La rugosité moyenne de la surface usinée est de R_{A_DFC} (R_a mesurée après l'usinage de demi-finition corrigé) = $5.09\mu\text{m}$.

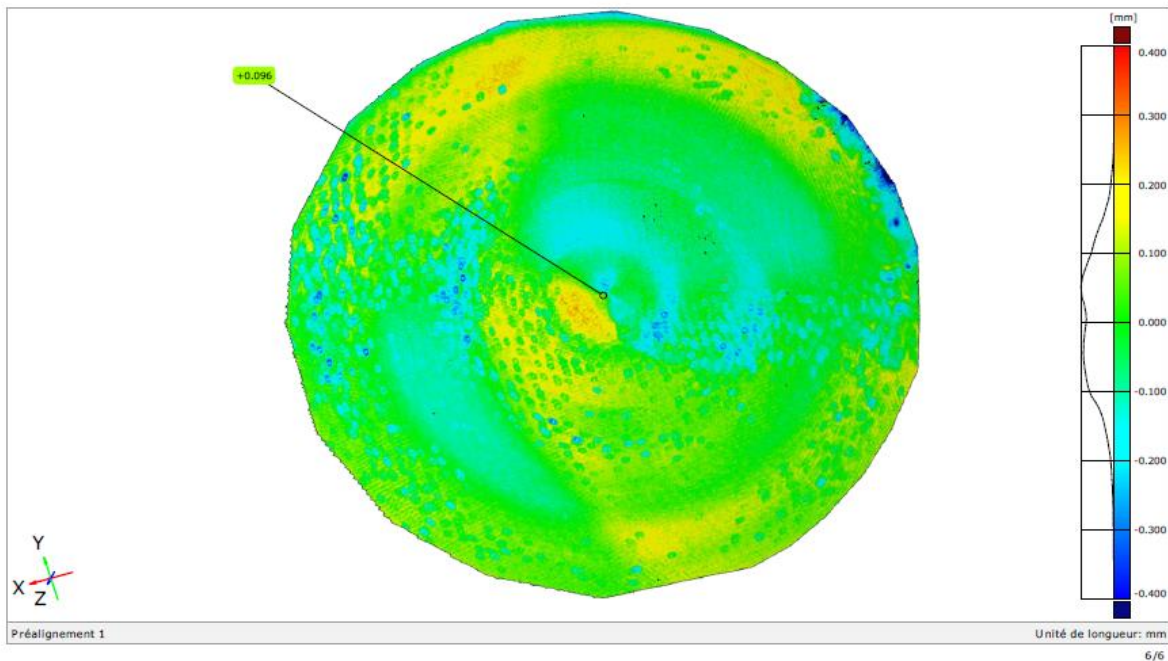


Figure 4-28 : Mesure RMS géométrique - Demi-finition corrigée

4.1.4. Usinage finition

L'usinage de finition présente une évolution de l'orientation moins importante et beaucoup plus lente avec un paramètre de vitesse d'avance beaucoup plus faible. La mesure de la surface s'effectue après l'usinage de finition qui compense les erreurs de pose (*figure 4-29*). Les défauts géométriques et d'inversion sont donc moins présents sur la surface mesurée, comme vue dans la section 2.3 de ce chapitre. La répartition des écarts se fait entre les valeurs $+0.27$ et -0.3 et le critère RMS_F (RMS déterminé après l'usinage de finition) = 0.102mm .

La rugosité moyenne de la surface usinée est déterminée comme étant $R_{A,F}$ (R_a mesurée après l'usinage de finition) = $3.15\mu\text{m}$.

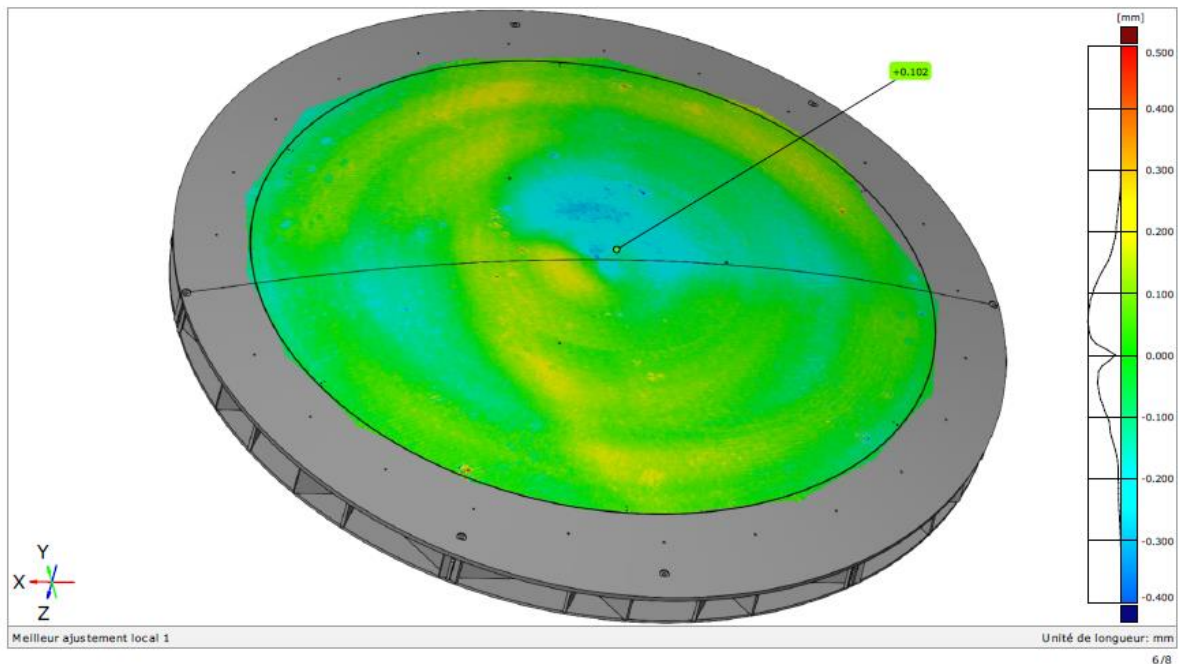


Figure 4-29 : Mesure RMS géométrique - Finition

4.1.5. Usinage finition corrigée

La correction de la passe de finition permet de réduire les défauts de forme et d'atteindre un RMS_{FC} (RMS déterminé après l'usinage de finition corrigé) = 0.086mm . Les écarts mesurés par rapport à l'alignement automatique se resserre autour de 0 et quelques défauts d'inversion sont

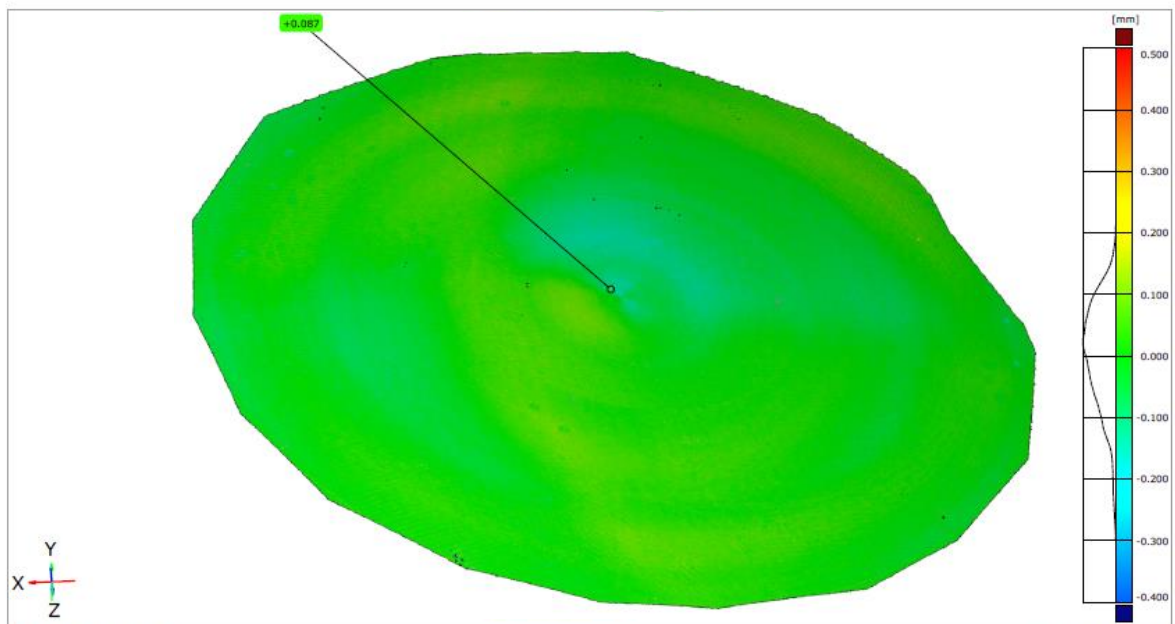


Figure 4-30 : Mesure RMS géométrique - Finition corrigée

toujours visibles (*figure 4-30*). La rugosité moyenne de la surface usinée est de R_{A_FC} (R_a mesurée après l'usinage de finition corrigé) = $2.55\mu\text{m}$.

4.1.6. Conclusion

Le *tableau 4.4* résume les valeurs des critères pour évaluer la qualité de surface et de forme du moule. Il présente également le gain associé à chaque étape de correction de la gamme.

La correction paramétrique apporte le gain le plus significatif, résultats RMS et R_A confondus. La méthode de correction hors ligne présente une réduction du critère RMS en fonction de la valeur de déviation à corriger : Plus la déviation mesurée est importante et plus le gain est élevé. Pour la demi-finition avec une déviation moyenne de 1.91mm , le gain RMS est de 40% alors que pour la finition avec une déviation avoisinant le millimètre, le gain RMS est de 16%.

Concernant le critère R_A , il est plus impacté par les paramètres d'usinage, comme le type d'outil et son engagement, que par la précision de pose du moyen d'usinage. Cependant, les effets indésirables des phénomènes d'inversion qui se traduisent par des traces en surface (*figure 4-26*) affectent ce critère. C'est pour cela que le gain R_A est plus important après la correction paramétrique qu'après la correction hors ligne.

Tableau 4.4 : Amélioration des critères de qualité de l'usinage du moule

	EBAUCHE SANS DEVELOPPEMENT	GAIN CORRECTION PARAMETRIQUE	DEMI-FINITION	GAIN CORRECTION HORS LIGNE	DEMI-FINITION CORRIGEE	FINITION	GAIN CORRECTION HORS LIGNE	FINITION CORRIGEE	GAIN TOTAL
RMS(MM)	3.14	94%	0.162	40%	0.096	0.102	16%	0.086	97%
$R_A(\mu\text{M})$	12.3	57%	5.26	3%	5.09	3.15	19%	2.55	79%

L'analyse de ces critères rejoint les conclusions de la section précédente liées aux données des mesures de la position de l'outil. La réduction du critère RMS de 97% pour le couplage des deux méthodes de correction est en adéquation avec le gain de 98% sur la déviation moyenne observée.

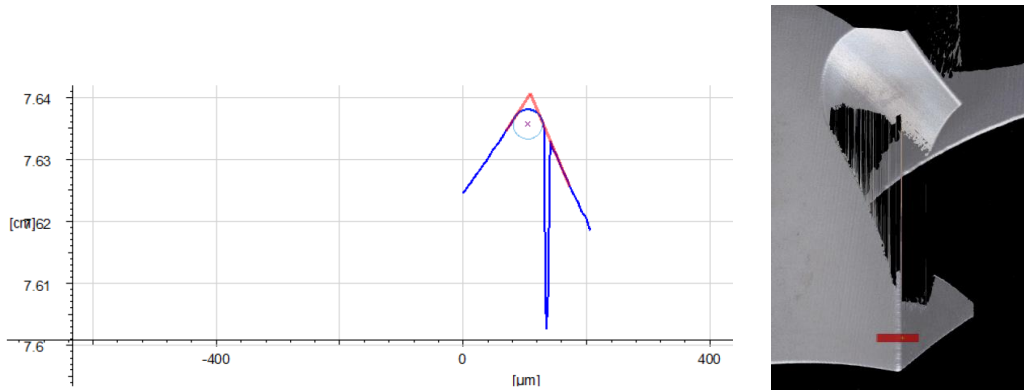
4.2. Usure des outils

Afin de vérifier les prévisions établies au chapitre 1 concernant l'usure des outils, les arêtes de coupe des deux outils de la gamme d'usinage ont été mesurées après les phases d'usinage corrigées avec le scanner INFINITEFOCUS. Un comparatif entre ces mesures et celles effectuées sur les mêmes outils, avant utilisation, permet de mettre en évidence l'usure des arêtes de coupe pour une séquence complète d'usinage.

4.2.1. Outil de demi-finition

Comme le présente la *figure 4-31*, la mesure du rayon de l'arête de coupe est initialement de $24\mu\text{m}$. Pour rappel, le critère d'usure retenu au chapitre 1 pour caractériser le rayon maximum dans le cas de l'outil d'ébauche et de demi-finition est le suivant : $r_{\text{ébauche}} < 100\mu\text{m}$. L'étude d'usure de ce même chapitre annonçait un rayon d'arête de coupe de $55\mu\text{m}$ après 105minutes d'usinage.

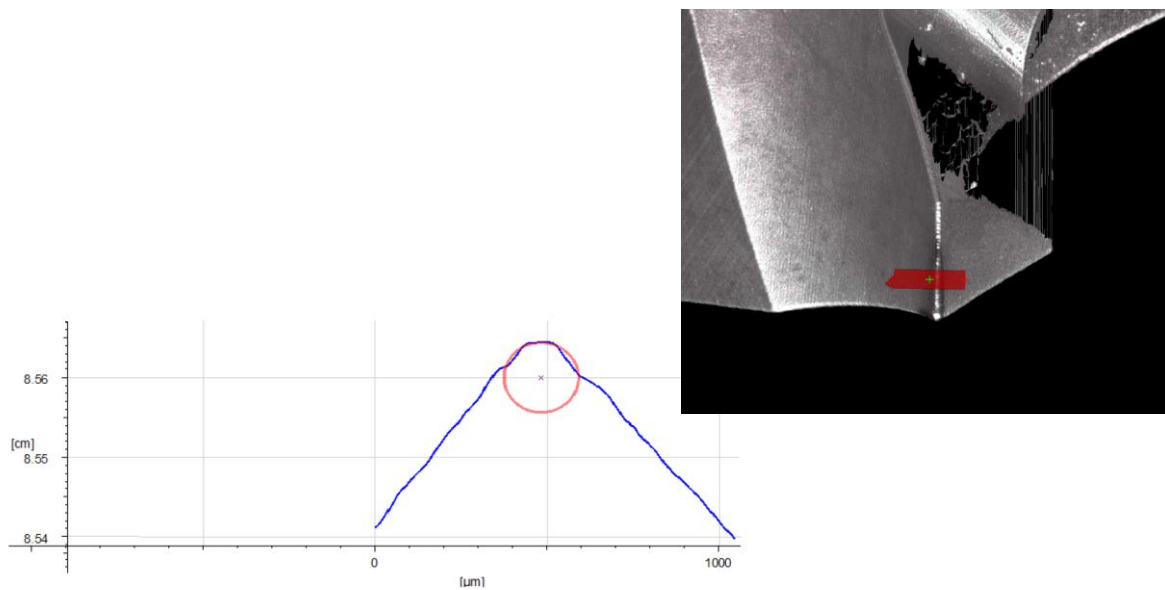
Le rayon d'arête moyen mesuré après un usinage de demi-finition de 1h45 est de $45.6\mu\text{m}$ (figure 4-32). Le critère d'usure n'est donc pas atteint ce qui permet de valider les conditions d'usinage pour cette phase de demi-finition.



Cercle

	Rayon [μm]	C x [μm]	C y [cm]	Ecart moyen [km]	Ecart Min [km]	Ecart Max [km]	Circonférence [μm]	Surface [μm^2]
Cercle 1	23.9543	104.9455	7.6358	0.0000	0.0000	0.0000	150.5094	1802.6759

Figure 4-31 : Mesure rayon d'arête de coupe initial – Outil demi-finition



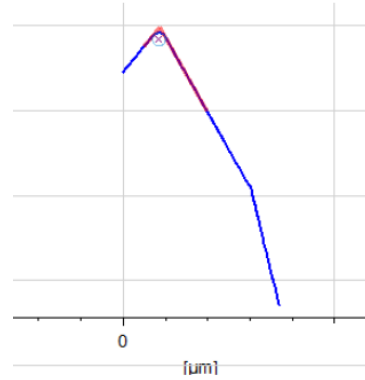
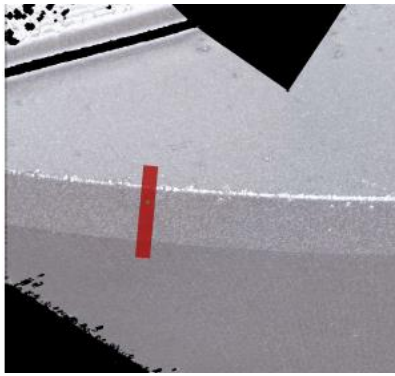
Cercle

	Rayon [μm]	C x [μm]	C y [cm]	Ecart moyen [μm]	Ecart Min [μm]	Ecart Max [μm]	Circonférence [μm]	Surface [μm^2]
Cercle 1	43.8258	192.5211	8.5600	5.2055	-6.4379	26.8054	275.3657	6034.0623

Figure 4-32 : Mesure de l'arête de coupe après usinage – Outil demi-finition

4.2.2. Outil de finition

La figure 4-33 présente la mesure du rayon de l'arête de l'outil hémisphérique consacré à la séquence de finition avant l'usinage. La valeur moyenne déterminée est $15\mu\text{m}$.



Cercle

	Rayon [µm]	C x [µm]	C y [µm]	Ecart moyen [µm]	Ecart Min [µm]	Ecart Max [µm]	Circonférence [µm]	Surface [µm²]
Cercle 1	15.6260	84.8349	970.5018	0.0000	0.0000	0.0000	98.1811	767.0891

Figure 4-33 : Mesure du rayon d'arête de coupe initial - Outil finition

Après l'usinage de finition corrigé, le rayon de l'arête de l'outil est mesuré comme le présente la figure 4-34. L'usure de l'arête est donc observée sur la longueur utilisée pendant l'usinage. Elle permet de conclure sur les bénéfices de l'évolution de l'angle β_n .

On relève respectivement de la mesure 1 à 4, les valeurs : $18.79\mu\text{m}$, $21.11\mu\text{m}$, $20.80\mu\text{m}$ (figure 4-35) et $18.39\mu\text{m}$.

Le chapitre 1 a défini la valeur maximale du rayon d'arête de coupe à travers le critère : $r_{\text{finition}} < 40\mu\text{m}$. Ce même chapitre prévoyait également un rayon d'arête de coupe $>80\mu\text{m}$ au-delà de 3h d'usinage. La solution envisagée de faire évoluer l'orientation de l'outil au cours de l'usinage

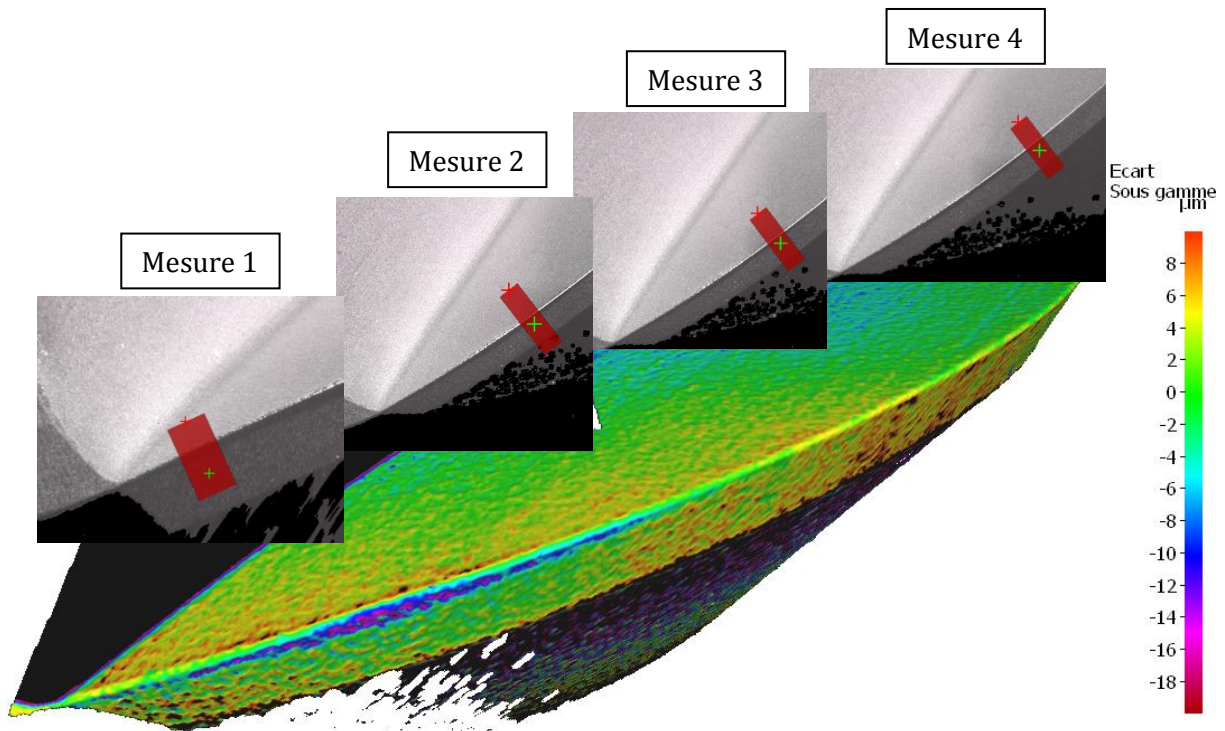


Figure 4-34 : Mesure du rayon d'arête de coupe - Outil finition corrigée

permet donc de répartir uniformément l'usure sur une longueur d'arête plus importante et d'éviter les reprises d'usinage avec un changement d'outil, forcément néfaste à la qualité d'usinage et au critère RMS. Le rayon d'arête de coupe reste inférieur au critère d'usure après 18h d'usinage, ce qui valide les conditions d'usinage de la phase de finition.

On relève, sur la *figure 4-35*, un recul de l'arête de coupe qui impact la qualité dimensionnelle de la pièce. Il s'agit en réalité d'un recul moyen de $8\mu\text{m}$ mesuré sur la totalité de la zone utile de l'arête. Cette valeur étant faible devant l'erreur résiduelle de pose du robot, elle n'est pas considérée significative.

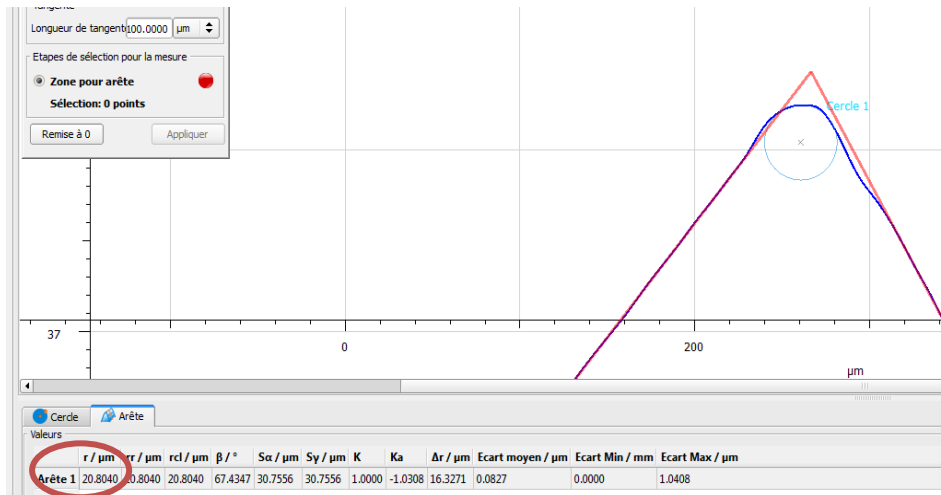


Figure 4-35 : Valeur arête de coupe Mesure N°3 – Outil finition corrigée

5. Discussion des résultats

L'objectif premier de ces travaux était d'améliorer la précision d'usinage du robot KUKA KR 360 de la cellule d'usinage utilisée pour le surfacage de moule de réflecteur. Les critères à atteindre dans ce contexte étaient : Un critère RMS géométrique et un critère de rugosité R_A . Le critère RMS caractérise la qualité dimensionnelle du moule et il doit être inférieur à la valeur de $50\mu\text{m}$ pour répondre à la spécification du produit. Le critère de rugosité est fixé à $1.6\mu\text{m}$. Cette précision d'usinage ne peut être atteinte que par la réduction de l'imprécision de positionnement et de suivi de trajectoire du robot, initialement de quelques millimètres.

Avec une précision de positionnement finale de 0.1mm et un défaut résiduel de 0.06° sur l'orientation de l'axe outil, le critère RMS géométrique est de $86\mu\text{m}$. L'objectif de l'application n'est donc pas atteint pour cette première expérimentation d'usinage d'un moule de réflecteur. Cependant, le résultat n'en reste pas moins positif puisqu'il améliore la précision d'usinage du robot de plus de 95%.

5.1. Comparaison bibliographie

Plusieurs études scientifiques présentent un objectif similaire à nos travaux. Elles ont, pour la plupart, fait le choix de développements différents pour améliorer la précision de pose des robots industriels.

[ZHA_05] et [WAN2_09] sont parmi les premiers à proposer une méthode de correction basée sur l'identification optimisée des raideurs des articulations d'un robot. Pour un robot moyen porteur, le ABB IRB 6400, et couplée à la mesure de l'effort d'usinage, cette méthode permet une déviation corrigée de 0.3mm.

Toujours sur la base d'un modèle de raideur optimisé mais avec un effort de coupe simulé, [ABE_10] améliore la précision de pose d'un moyen porteur de 20% à 30%. Le principal avantage de la méthode réside dans un processus de correction simulé et sans expérimentation nécessaire après l'identification des raideurs.

[DUM_10] apporte une nouvelle méthodologie plus rapide et adaptée à n'importe quel robot anthropomorphe pour l'identification des raideurs. La précision de pose atteinte en statique et sans efforts externes avec un KUKA KR240 est de 0.1mm.

[OLA_12] présente une méthode de compensation des erreurs articulaires. Elle est basée sur une identification en statique et une mesure précise des différents éléments du robot à l'aide d'un Laser Tracker. La compensation d'une trajectoire, hors matière, en spirale de diamètre 250mm permet de ramener la déviation du TCP de 0.288mm à 0.150mm avec un STAUBLI RX 170.

[COR_16] met en place une compensation hors ligne basée sur un modèle de raideur optimisé mais également sur des déviations mesurées à travers la mesure d'une pièce usinée. Son application pour l'usinage d'une trajectoire circulaire par un robot ABB IRB 6660 génère une déviation moyenne de 0.15mm.

Une solution d'identification des raideurs avec un double encodage des articulations du bras (axes 1, 2 et 3) et une dissociation du bras et du poignet est présentée par [AMB_17]. Elle permet à un robot KUKA KR300 d'adopter une précision de pose et sans efforts externes de 0.18mm contre 4mm initialement.

Une compensation hors ligne basée sur la mesure externe et sur l'amélioration d'un modèle cinématique est utilisée par [SCH_16]. Les résultats présentent une déviation moyenne de 0.086mm. Ces résultats sur un KUKA KR 125 sont convainquant pour l'usinage d'une rainure de 70mm de long.

Au regard de cette synthèse bibliographique, il est difficile de présenter en usinage robotisé des précisions de positionnement inférieures à 0.1mm. Pour un robot gros porteur usinant une pièce de 1000mm de diamètre, les résultats qui font suite aux développements présentés dans ce manuscrit sont comparables à ceux cités ci-dessus. La correction présentée ici est parfois plus performante que celles de la bibliographie. Ce bénéfice est le fruit du couplage de deux méthodes de compensation (correction paramétrique et correction hors-ligne).

5.2. Conclusion

Ce manuscrit décrit entre autres le développement de deux méthodes distinctes ayant pour but d'améliorer la précision d'usinage d'un robot anthropomorphe. Il s'agit en réalité d'améliorer la précision de pose, hors matière, pour la première et la précision de suivi de trajectoire, en usinage, pour la deuxième.

Dans ce chapitre, c'est le couplage de ces deux méthodes qui est expérimenté et analysé en termes de gain sur la précision d'usinage. Les conclusions du chapitre 2 présentent un gain de 56% sur la précision de pose dans l'ensemble de l'espace de travail du robot avec l'application d'une méthode de correction paramétrique. Celles du chapitre 3 concernent l'application d'une méthode de correction hors ligne pour des trajectoires isolées, elles montrent un gain de 80% sur la précision de suivi de trajectoire. Dans ce chapitre 4, l'amélioration de la précision d'usinage du robot pour l'usinage de la surface d'un moule en composite Carbone/Epoxy est de plus de 95%. Cela démontre l'efficacité du couplage de ces deux méthodes.

Ce résultat tient compte de l'analyse et de la caractérisation suffisamment précise des défauts de positionnement d'un robot industriel soumis à des efforts externes. La stratégie d'usinage adaptée en conséquence y participe également.

Le critère R_A final de l'expérimentation est annoncé égal à $2.55\mu\text{m}$, supérieur à la valeur définie par la spécification du produit qui est de $1.6\mu\text{m}$. Pour améliorer ce critère, les paramètres de coupe doivent évoluer. Une perspective serait un engagement de l'outil inférieur à 0.2mm . Des étapes de ponçage, qui ne sont pas réalisées dans cette étude, font parties du process de fabrication du moule et permettent également de réduire significativement cette rugosité.

Le scanner 3D ATOS est utilisé pour mesurer la qualité dimensionnelle de la pièce usinée. Le critère $RMS = 86\ \mu\text{m}$ résultant de cette expérimentation ne répond pas aux objectifs de l'application. Toutefois, deux modifications du processus de correction pourraient permettre d'atteindre un RMS inférieur.

En premier lieu, le moyen de mesure C-Track utilisé pour identifier la trajectoire réelle exécutée par le robot pourrait être remplacé par un moyen de mesure externe plus performant comme un Laser Tracker qui présente généralement une meilleure précision de mesure. Les bruits de mesure seraient donc réduits pour une correction plus performante. La déviation moyenne résiduelle qui avoisine aujourd'hui la précision de mesure du moyen serait également diminuée.

En deuxième lieu, le processus de compensation pourrait être itératif pour permettre à la méthode de compenser des déviations de plus en plus petites et de se rapprocher de l'objectif de l'application.

Il est intéressant de rappeler que la correction paramétrique peut aussi être optimisée en utilisant des pondérations associées aux déviations mesurées lors de l'identification des paramètres géométriques. En pondérant les déviations d'un espace de travail dédié, il est possible d'améliorer la qualité de la pose dans cet espace. Cela entraîne une augmentation du défaut de positionnement dans le reste de l'espace de travail.

V. Conclusion générale

Ces travaux de recherche répondent au contexte industriel de l'amélioration de la précision de l'usinage robotisé de pièces en matériau composite. Ils s'inscrivent dans le cadre de l'optimisation de l'usinage des matériaux composites et également dans le cadre de l'adaptation des robots industriels, initialement conçus pour des tâches peu exigeantes en termes de précision, au processus continu et complexe de l'usinage. Pour rendre un robot industriel capable de réaliser l'usinage de moules de réflecteurs satellites en Carbone/Epoxy faisant l'objet de cette étude, les axes principaux de recherche concernent les domaines de la modélisation et de l'identification paramétrique, mais également celui de la correction hors ligne assistée par un système de vision.

1. Synthèse des travaux de recherche

Le premier chapitre a présenté les matériaux composites, leur composition, leur mise en forme et leurs principales caractéristiques. Il a également exposé les différences majeures entre ces matériaux et les matériaux métalliques dont la première est l'anisotropie des composites, qui explique en partie la complexité de l'usinage de ces matériaux. Il a exposé ensuite le contexte de l'application d'usinage de moules de réflecteur en composites Carbone/Epoxy et les caractéristiques de ce matériau composite qui fait l'objet de la présente étude. Ce chapitre a également développé une méthode de caractérisation du couple outil/matière (méthode COM). Cette étude a permis d'analyser et de comparer le comportement de cinq outils choisis sur la base des conclusions d'une bibliographie sur l'usinage des matériaux composites proposée juste avant. Enfin, ce chapitre a renseigné le meilleur outil par opération d'usinage ainsi que ses conditions de coupe optimales pour maximiser sa durée de vie et la qualité de surface usinée.

Le deuxième chapitre aborde l'amélioration de la précision de positionnement de l'effecteur du robot. Il a introduit les notions de bases en robotique et plus particulièrement celles portant sur la précision des robots industriels. Il a présenté dans un premier temps les causes et sources d'erreur de ce positionnement avant de proposer un état de l'art sur les différents axes de la recherche robotique qui s'appliquent pour améliorer la précision des robots industriels sans modifications structurelles. Dans un second temps, il a développé le modèle géométrique du robot KUKA KR360 de l'étude. Cette étude a permis de mettre en évidence les conséquences des erreurs des paramètres géométriques du modèle initialement présent dans la commande du robot sur le positionnement de l'effecteur. Le troisième temps a été consacré au développement d'une méthode de correction paramétrique. Elle a identifié les erreurs des paramètres géométriques qui sont ensuite corrigés au sein d'un nouveau modèle géométrique à implanter dans la commande. Les résultats obtenus après la modification du modèle sont encourageants, mais démontrent une erreur résiduelle de positionnement de l'effecteur, c'est la conséquence de plusieurs sources

d'imprécision de mesure lors de l'identification basée sur des mesures de positions de l'effecteur à l'aide d'un système de tracking. Enfin, ce chapitre a conclu sur la nécessité de développer une méthode supplémentaire pour atteindre le critère de précision attendu par l'application étudiée.

Le troisième chapitre a présenté le développement d'une correction hors ligne de la position de l'effecteur du robot adaptée au contexte de l'application visée. Des premiers résultats d'erreur de positionnement du robot observés lors d'un usinage dans ce contexte ont été présentés afin de justifier le besoin de développer une nouvelle méthode de correction basée sur la mesure des déviations. Sur la base des conclusions du chapitre deux et après avoir proposé une bibliographie sur la correction hors ligne, ce chapitre a présenté les hypothèses de travail nécessaires au développement d'une méthode de correction hors ligne du programme de correction. Cette méthode a identifié les déviations de l'outil lors d'un premier usinage avant de générer un programme corrigé qui permet de compenser les déviations observées. Une attention particulière a été portée sur le processus de la méthode et notamment sur l'identification de l'erreur de pose basée sur la mesure de la position de l'effecteur par un système de tracking. Une expérimentation de la méthode a été proposée pour conclure sur une amélioration effective de la précision du positionnement de l'outil.

Le quatrième chapitre est dédié à l'exploitation des travaux présentés dans les chapitres précédents pour l'usinage d'un moule de réflecteur. Il présente la gamme d'usinage associée à cette pièce et le système ATOS (mesure MMT) qui permet de caractériser la précision de l'usinage dans le processus de fabrication de la pièce composite. Il rappelle les conditions de coupe définies dans le chapitre un pour paramétrer le programme de commande et met en application la correction hors ligne développée au chapitre trois. Il présente les résultats observés au cours de la méthode pour définir le gain des méthodes de correction paramétrique et de correction hors ligne. Enfin, il a proposé les différents relevés du moyen ATOS et les mesures de rugosités qui confirment ensemble les conclusions sur les bénéfices de chacune des méthodes.

2. Synthèse globale

Les connaissances sur l'usinage des matériaux composites sont actuelles et l'intérêt premier de ces travaux est de répondre précisément sur les caractéristiques auxquelles l'outil doit répondre. Les résultats de ces travaux apportent des réponses sur le type d'outils à privilégier et les conditions de coupe à adapter pour l'application concernée :

- il s'agit d'outils carbure avec un revêtement diamant ou d'outils PCD pour répondre au caractère fortement abrasif des composites.
- La géométrie de l'arête de coupe préconisée implique un rayon de bec inférieur à $10\mu\text{m}$ pour favoriser la coupe franche de la fibre ainsi qu'un angle de dépouille compris entre 3 et 15° pour limiter les frottements de la matière sur la face de dépouille. Un profil de type « ravageur » est aussi préconisé pour l'ébauche et la demi-finition, il favorise la coupe de la fibre avec l'alternance d'angles de coupe positifs et négatifs et réduit les efforts axiaux.
- La méthode COM utilisée a déterminé une vitesse de coupe optimale de 125m/min et une avance de 0.12mm/dt pour l'outil d'ébauche et de demi-finition choisi au

profil ravageur. Pour l'outil sphérique de finition, ces valeurs sont respectivement 180m/min et 0.09mm/dt.

Les conclusions de cette étude se penchent également sur l'importance de l'orientation des fibres par rapport au sens de l'avance de l'outil. Elle influence la qualité de la surface usinée ainsi que la vitesse d'usure de l'outil. Dans le contexte de ces travaux, le procédé d'élaboration de la pièce composite est verrouillée et ne peut donc pas être modifié.

Les sources du défaut de positionnement d'un robot industriel sont multiples, des erreurs géométriques, non-géométriques et des erreurs liées à l'environnement extérieur au robot comme la gravité ou les efforts qui s'appliquent à l'effecteur dus à la tâche du robot. Dans le but d'améliorer la précision de pose du robot et parce que toutes les sources d'erreur ne peuvent pas être traitées de la même façon, l'orientation de ces travaux est de mettre en place une correction paramétrique associée à une correction hors ligne. La première méthode permet de modifier les paramètres géométriques du robot identifiés expérimentalement dans le but de corriger les erreurs de type géométrique. La seconde méthode permet de compenser les déviations observées au cours d'un usinage, elle corrige l'erreur de position de l'outil causée par toutes les sources d'erreurs résiduelles confondues. Sans correction paramétrique, la correction hors ligne fournirait des résultats médiocres avec une erreur de pose moyenne initiale de 6.56mm, comme annoncée dans le chapitre 4. Les bénéfices de la première méthode réduisent cette erreur de pose à 1.91mm, erreur pour laquelle la méthode de correction hors ligne obtient de bons résultats avec une réduction de 85% après correction du programme de commande.

L'utilisation des méthodes développées dans ces travaux pour l'usinage d'un moule de réflecteur en composite Carbone/Epoxy permet de réduire l'erreur de pose moyenne de plus de 95% avec un vecteur erreur moyen résiduel de 0.1mm. Ce résultat est obtenu après une gamme composée d'une passe de demi-finition et une passe de finition, toutes les deux corrigées. Il s'accompagne de conclusions, sur l'état de surface et l'usure de l'outil, qui sont en adéquation avec les prévisions établies dans le chapitre un. Les outils sélectionnés et les conditions de coupe déterminées ont permis des usinages de 3 et 18h respectivement pour la demi-finition et la finition sans reprise d'outil, confirmant l'efficacité de la méthode devant la complexité d'usinage d'un composite.

3. Positionnement des travaux

Le besoin de l'entreprise Lauak Innovative Solution est identifié comme étant l'usinage d'un moule de réflecteur en répondant aux deux critères de l'application qui sont, le respect dimensionnel de la surface usinée caractérisé par un RMS géométrique inférieur à 0.05mm et un critère de rugosité de surface inférieur à 0.04 μ m après les étapes de ponçage et lustrage du moule. Ces étapes de finitions manuelles ne modifient pas le critère RMS après l'usinage, mais celui de la rugosité de surface se voit considérablement réduit. Sur la base des données de l'industriel, la rugosité de surface moyenne observée après usinage est de 2 μ m et les finitions évoquées permettent d'atteindre le critère de rugosité visé.

Les développements réalisés dans ces travaux lors de l'usinage d'un moule concluent sur un RMS géométrique de $0.086\mu\text{m}$ et une rugosité de surface de $2.55\mu\text{m}$. L'objectif industriel n'est donc pas atteint. Cependant, les bénéfices constatés des méthodes développées justifient l'intérêt qu'il faut consacrer afin de poursuivre ces recherches et améliorer l'efficacité des développements.

4. Limites des travaux

Dans la première partie de ces recherches, l'importance de l'orientation des fibres par rapport à l'avance de l'outil a été exposée. Le fait de ne pas pouvoir modifier le procédé de fabrication du moule constitue un verrou technologique qui réduit les possibilités de développement pour rendre le processus de coupe optimal.

Dans la seconde partie de l'étude, la correction paramétrique utilise un modèle de D-H modifié. Le développement prévoit d'ajouter à ce modèle le paramètre de Hayati pour l'articulation numéro 3 du robot. Le choix de ce modèle s'appuie sur les sources bibliographiques et sur sa rapidité de mise en place et de calcul, mais il peut constituer une limite au sens de la convergence de la méthode. Une autre limite constatée dans cette section est l'utilisation d'un système de tracking avec une précision de mesure de $\pm 0.15\text{mm}$ sur la position de l'effecteur du robot. Il est certain que cette valeur impacte le résultat de l'identification paramétrique.

Dans la troisième partie de l'étude, le développement de la correction hors ligne se fait également à l'aide du système de tracking utilisé pour la correction paramétrique. La précision de mesure de ce moyen impacte vraisemblablement les bénéfices de la compensation ainsi que l'évaluation du gain de la méthode malgré un gain similaire identifié à l'aide d'une MMT avec une précision de mesure de 0.05mm .

L'expérimentation qui conclue le chapitre trois révèlent un défaut de positionnement de l'outil localement observable lorsque la trajectoire suivant Z change de sens d'évolution (ascendante \rightarrow descendante et inversement). Ce défaut est appelé défaut d'inversion. Il apparaît quand un ou plusieurs axes du robot changent de sens de rotation. Pour assurer la continuité du suivi de trajectoire du robot, la vitesse d'un axe qui change de sens de rotation est très élevée et met en évidence les jeux mécaniques présents dans les articulations. Ces travaux ne se penchent pas particulièrement sur ce phénomène qui n'est que partiellement compensé par la correction hors ligne.

5. Perspectives

L'étude d'une modification du procédé de fabrication de la surface du moule pourrait aboutir à de nouvelles configurations de la fibre et apporter une réduction des efforts de coupe lors de l'usinage. Des efforts réduits seraient bénéfiques pour une prolongation de la vie de l'outil avec une usure moins importante. De plus, privilégier une orientation de la fibre à 0° dans les zones de passage du bout de l'outil permettrait un état de surface contrôlé en minimisant les

endommagements comme les fissurations hors plan ou encore la présence de fibres non-coupées. Cette même partie de l'étude fait la comparaison entre cinq outils standards. La veille technologique sur le choix de l'outil est constamment d'actualité puisque les avancés en termes de géométrie ou de revêtement pourraient aboutir sur l'identification de meilleures solutions que celles exposées dans ces travaux. Une autre perspective est de faire réaliser des outils spéciaux à chaque opération d'usinage sur la base des conclusions du premier chapitre.

Dans le chapitre deux, le processus de la correction paramétrique présenté admettrait une pondération associée à chaque position de l'effecteur du robot mesurée. En perspective, il serait possible de donner un poids plus important à un espace de travail dédié à l'application. La précision globale du robot dans tout son espace de travail serait plus élevée que celle obtenue ici. Cependant, sa précision dans l'espace de travail pondéré serait plus fine.

Appliquer les méthodes développées ici à l'aide d'un système de tracking plus précis que celui utilisé ici est une perspective intéressante qui permettrait d'obtenir de meilleurs résultats, de confirmer nos conclusions et d'apporter des éléments nouveaux lors de l'analyse des données.

Une perspective datée avec le partenaire industriel vise à évaluer les résultats des méthodes de correction pour l'usinage d'un second moule de réflecteur. Ce dernier présente une forme plus complexe que celle usinée et présentée au chapitre quatre.

Une autre perspective est d'améliorer la méthode de correction hors ligne en développant sa capacité à identifier et traiter différemment les inversions des axes du robot. Un traitement fin et ciblé permettrait une meilleure anticipation de ces défauts. Etant fonction de l'évolution de la position de l'effecteur, ce traitement peut également être réalisé avant la première mesure et sur la base du programme CN uniquement.

VI. Bibliographie

- [ABE_08] E. Abele, S. Rothenbücher, et M. Weigold. *Cartesian compliance model for industrial robots using virtual joints*. Production Engineering, vol. 2, pages 339–343, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11740-008-0118-0>
- [ABE_10] E. Abele et al. *Prediction of the tool displacement for robot milling applications using coupled models of an industrial robot and removal simulation*, Proceedings of the CIRP 2nd International Conference Process Machine Interactions Vancouver, BC, Canada, 2010.
- [ALM_08] F.A. Almeida, J. Sacramento, F.J. Oliveira, et R.F. Silva. *Micro- and nano-crystalline CVD diamond coated tools in the turning of EDM graphite*. Surface and Coatings Technology, vol. 203, pages 271–276, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.08.075>
- [AMB_17] A. Ambiehl, S. Garnier, K. Subrin, et B. Furet. *New method for decoupling the articular stiffness identification: Application to an industrial robot with double encoding system on its 3 first axis*, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Vancouver, pages 1478–1483, 2017. <https://doi.org/10.1109/IROS.2017.8205950>
- [ARO_96] D. Arola, M. Ramulu, D.H. Wang. *Chip formation in orthogonal trimming of graphite/epoxy composite*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, pages 121–133, 1996. [https://doi.org/10.1016/1359-835X\(95\)00013-R](https://doi.org/10.1016/1359-835X(95)00013-R)
- [BES_00] S. Besnard. *Etalonnage géométrique des robots série et parallèle*, Thèse de doctorat, Université de Nantes, France, 2000.
- [BIG_07] P. Bigras, M. Lambert, et C. Perron. *New formulation for an industrial robot force controller: Real-time implementation on a KUKA robot*, Systems, Man and Cybernetics, ISIC. IEEE International Conference, pages 2794–2799, 2007.
- [BRE_06] J.-F. Brethé, E. Vasselín, D. Lefebvre, B. Dakyo, et F. Havre. *Modélisation spatio-temporelle de la répétabilité des robots manipulateurs industriels par les ellipsoïdes stochastiques*. CIFA06, Bordeaux, 2006.
- [CAB_06] G. Cabral, P. Reis, R. Polini, E. Titus, N. Ali, J.P. Davim, et J. Grácio. *Cutting performance of time-modulated chemical vapour deposited diamond coated tool inserts during machining graphite*. Diamond and Related Materials, vol.15, pages 1753–1758, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2006.03.007>
- [CAB_08] G. Cabral, J. Gäbler, J. Lindner, J. Grácio, et R. Polini. *A study of diamond film deposition on WC–Co inserts for graphite machining: Effectiveness of SiC interlayers prepared by HFCVD*. Diamond and Related Materials, vol. 17, pages 1008–1014, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2008.03.017>

Bibliographie

- [CAR_20] G. Carriere, M. Benoussaad, V. Wagner, G. Dessein et B. Boniface. *Off-line correction method suitable for a machining robot: application to composite materials*. International Journal Advanced Manufacturing Technologie, vol. 110, pages 2361–2375, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05947-x>
- [CHA_06] H. Chanal. *Etude de l'emploi des machines-outils à structure parallèle en usinage*. Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal, 2006. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00698532>
- [CHA_12] H. Chanal, F. Paccot et E. Duc. *Sensitivity analysis of an overconstrained parallel structure machine tool, the Tripteor X7*, Applied Mechanics and Materials Vol. 162, pages 394–402, 2012. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.162.394>
- [CHE_03] M. Chérif. *Modélisation Générique des Efforts de Coupe en Fraisage pour la CFAO et la Surveillance d'Usinage*. Thèse de Doctorat, École Centrale de Nantes / Université de Nantes, 2003.
- [CHE_19] T. Chen, J. Xiang, F. Gao, X. Liu, et G. Liu. *Study on cutting performance of diamond-coated rhombic milling cutter in machining carbon fiber composites*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 103, pages 4731–4737, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03902-z>
- [COL_91] K. Colligan, et M. Ramulu. *Delamination in surface plies of graphite/epoxy caused by the edge trimming process*. Processing and Manufacturing of Composite Materials, New York, PED-vol. 49/MDvol. 27, pages. 113–125, 1991.
- [COR_16] M. Cordes, et W. Hintze. *Offline simulation of path deviation due to joint compliance and hysteresis for robot machining*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9461-z>
- [CRA_86] J. CRAIG, *Introduction to robotics-mechanics and control*, Livre, AddisonWesley, 1986.
- [CUI_12] G. Cui et al. *Geometric error compensation software system for CNC machine tools based on NC program reconstructing*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 63, no. 1-4, pages 169–180, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3895-0>
- [DAM_96] M. Damak. *Théorie et instrumentation pour l'étalonnage statique des robots: Vers une programmation hors-ligne industriellement efficace*. Thèse de doctorat. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers, Centre de Lille, 1996.
- [DAV_05] J.P. Davim et F. Mata. *Optimisation of surface roughness on turning fiber reinforced plastics (FRPs) with diamond cutting tool*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 26, pages 319–323, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00170-003-2006-2>
- [DEB_06] D. Deblaise. *Contribution à la modélisation et à l'étalonnage élasto géométriques des manipulateurs à structure parallèle*. Thèse, INSA de Rennes, 2006. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00333308>
- [DEN_55] J. Denavit et R. S. Hartenberg. *A Kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices*. Transactions of ASME – Journal of applied Mechanics, vol. 22, no. 2, pages 215–221, 1955.
- [DEV_14] P. De Vos. *Metal cutting theories in practice*. Livre, Lund-Fagersta, Suède: Seco tools AB, 2014.

Bibliographie

- [DOM_88] E. Dombre, et W. Khalil. *Modélisation et commande des robots*, Livre, Hermes, 1988.
- [DOM_02] E. Dombre. *Analyse et Modélisation des Robots manipulateurs* », Livre, Hermes, 2002.
- [DUB_06] L. Dubreuil, Y. Quinsat, et C. Lartigue. *Calibration sur modèle CAO pour la mesure par vision in-situ*, 2015. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01139851>
- [DUB_16] N. Duboust, D. Melis, C. Pinna, H. Ghadbeigi, A. Collis, S. Ayvar-Soberanis et K. Kerrigan. *Machining of Carbon Fibre: Optical Surface Damage Characterisation and Tool Wear Study*. Procedia CIRP, vol. 45, pages 71–74, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.170>
- [DUF_87] N. A. Duffie et S. J. Malmberg. *Error Diagnosis and Compensation Using Kinematic Models and Position Error Data*, CIRP Annales, vol. 36, no. 1, p. 355-58, 1987. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62621-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62621-3)
- [DUM_11] C. Dumas, A. Boudelier, S. Caro, S. Garnier, M. Ritou, et B. Furet. *Développement d'une cellule robotisée de détournage des composites*. Mécanique & Industries, vol. 12, pages 487–494, 2011. <https://doi.org/10.1051/meca/2011103>
- [DUM_10] C. Dumas, S. Caro, M. Chérif, S. Garnier, et B. Furet. *A methodology for joint stiffness identification of serial robots*, Intelligent Robots and Systems (IROS) IEEE/RSJ International Conference, pages 464–469, 2010. <https://doi.org/10.1109/IROS.2010.5652140>
- [ELS_04] I. El-Sonbaty, U.A. Khashaba, et T. Machaly. *Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites*, Composite Structures, vol. 63, no 3–4, pages 329–338, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(03\)00181-8](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(03)00181-8)
- [GAL_12] A. Gal. *Hybrid force-position control for manipulators with 4 degrees of freedom*, Proc. of the 15th WSEAS international conference on Systems, pages 358-363, 2012. <https://doi/abs/10.5555/2028395.2028460>
- [GAY_89] D. Gay. *Matériaux composites*. Livre, Hermes, 1989.
- [GOG_97] G. Gogu, P. Coiffet, et A. Barraco. *Représentation des déplacements des robots*, Livre, Hermes, 1997.
- [GOS_90] C. Gosselin et J. Angeles. *Singularity Analysis of Closed-Loop Kinematic Chains*. Robotics and Automation, Vol. 6, pages 281 - 290, 1990.
- [GUI_12] R. Guissa. *Méthodes de compensation des erreurs d'usinage utilisant la mesure sur machines-outils*. École Polytechnique de Montréal, 2012. <https://publications.polymtl.ca/1023/>
- [HAG_12] H. Hage. *Identification et simulation physique d'un robot Stäubli TX90 pour le fraisage à grande vitesse*, Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 2012. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00831071>
- [HAY_85] S. Hayati et M. Mirmarani. *Improving the absolute positioning accuracy of robot manipulators*. Journal of Robotic Systems, vol. 2, no. 4, pages 397-413, 1985. <https://doi.org/10.1002/rob.4620020406>
- [HEN_15] M. Henerichs, R. Voß, F. Kuster, et K. Wegener. *Machining of carbon fiber reinforced plastics: Influence of tool geometry and fiber orientation on the machining forces*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, vol. 9, pages 136–145, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2014.11.002>

Bibliographie

- [IFR_20] <http://www.ifr.org/news/ifr-press-release/global-survey-703/>, accès le 20/11/2020.
- [ILI_08] D. Ilescu. *Approches expérimentale et numérique de l'usinage à sec des composites carbone/époxy*. Thèse, Arts et Métiers ParisTech, 2008. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00005136>
- [ISO_16] ISO 9283 : *Robots manipulateurs industriels — Critères de performance et méthodes d'essai correspondantes*, révisée de février 2016.
- [KAL_10] D. Kalla, J. Sheikh-Ahmad et J. Twomey. *Prediction of cutting forces in helical end milling fiber reinforced polymers*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 50, pages 882–891, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.06.005>
- [KAR_13] Y. Karpat, et N. Polat. *Mechanistic force modeling for milling of carbon fiber reinforced polymers with double helix tools*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 62, pages 95–98, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.105>
- [KHA_76] W. Khalil. *Modélisation et commande par ordinateur du manipulateur MA23. Extension à la conception par ordinateur des manipulateurs*, Thèse de docteur-ingénieur, Montpellier, 1976.
- [KHA_91] W. Khalil et M. Gautier. *Calculation of the identifiable parameters for robots calibration*. IFAC Proceedings Volumes 24, pages 687–691, 1991.
- [KHA_99] W. Khalil et E. Dombre. *Modélisation, identification et commande des robots*, Livre, 2ème édition, Hermes, Paris, 1999.
- [KHA_02] W. Khalil et S. Besnard. *Geometric Calibration of Robots with flexible joints and links*, Journal of Intelligent and Robotics Systems, pages 357-379, 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1019687400225>
- [KHA_04] W. Khalil et E. Dombre. *Modeling, Identification and Control of Robots*. Livre, Butterworth-Heinemann, 2004.
- [KIM_92] K.S. Kim, D.G. Lee, Y.K. Kwak, et S. Namgung. *Machinability of carbon fiber-epoxy composite materials in turning*. Journal of Materials Processing Technology vol. 32, pages 553–570, 1992. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(92\)90253-O](https://doi.org/10.1016/0924-0136(92)90253-O)
- [KLO_99] F. Klocke, W. König, S. Rummenholler et C. Wurtz. *Milling of advanced Composites*, Machining of Ceramic and Composites, Eds.Marcel Dekker Inc., pages 249-265, 1999.
- [KOP_83] A. Koplev, A. Lystrup et T. Vorm. *Cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP*, Composites, vol. 14, no 4, pages 371-376, 1983. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(83\)90157-X](https://doi.org/10.1016/0010-4361(83)90157-X)
- [KOP_80] A. Koplev. *Cutting of CFRP with Single Edge Tool*, 3rd International Conference of Composite Materials, Paris, 1980. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=PASCAL8130354421>
- [KUK_14] https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/6b77eacacfe542d3b736af377562ecaa/0000171002_fr.pdf?rev=61a1946d4bba4a07949586480f52bb3f&hash=AFEB36206CB634AC33A5627A97EFCCE4 accès le 22-11-2020.

Bibliographie

- [LAS_10] L. Lastri. *Modélisation macromécanique et micromécanique de l'usinage des composites à matrice polymère et fibres longues*. Thèse de doctorat, 2010. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00005643>
- [LO_97] C-C. Lo et H. Chao-Yin. *A Method of Tool Path Compensation for Repeated Machining Process*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 38, no. 3, pages 205–13, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(97\)00049-7](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00049-7)
- [AUA_07] M.L. Auad, L. Zhao, H. Shen, S.R. Nutt et U. Sorathia. *Flammability properties and mechanical performance of epoxy modified phenolic foams*. Journal of Applied Polymer Science, vol. 104, pages 1399–1407, 2007. <https://doi.org/10.1002/app.24405>
- [MAR_08] S. Marie et P. Maurine. *Elasto-geometrical modelling of closed-loop industrial robots used for machining applications*, Robotics and Automation, ICRA. International Conference IEEE, pages 1294–1300, 2008. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543382>
- [MEJ_16] S. Mejri. *Identification et modélisation du comportement dynamique des robots d'usinage*. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2016. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01334573>
- [MIL_10] D. Milutinovic, M. Glavonjik, N. Slavkovic, Z. Dimic, S. Zinanovic, B. Kokotovic et L. Tanovic. *Reconfigurable robotic machining system controlled and programmed in a machine tool manner*. International Journal Advanced In Manufacturing Technologie, London, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2888-8>
- [MOO_84] B. W. Mooring et G. R. Tang. *An improved method for identifying the kinematic parameters in six axis robot*. proceedings of the 1984 ASME computers in engineering conference, pages 79-84, 1984.
- [MOO_91] R. B. Mooring, *Fundamentals of Manipulator Calibration*, Livre, Wiley-interscience, John Wiley & sons, 1991.
- [MOR_11] A. Morandau, R. Leroy, A. Bouchou et D. Bonhoure. *Usinage des composites renforcés en fibres de carbone : stratégie de surfaçage pour limiter les efforts de coupe*, 17èmes Journées Nationales Sur Les Composites (JNC17). pages 126. 2011. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00598111>
- [MUS_10] S. K. Mustafa, P. Y. Tao, G. Yang et I. Chen. *A geometrical approach for online error compensation of industrial manipulators*, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Canada, Montreal, pages 738-743, 2010. <https://doi.org/10.1109/AIM.2010.5695784>
- [NFE_93] AFNOR. *Essai de durée de vie des outils de tournage à partie active unique*. Norme Française E 66-505, 1993.
- [NFE_97] AFNOR. *Domaine de fonctionnement des outils coupants - Couple outil-matière*. Norme Française E 66-520-1/8, 1997.
- [NGU_15] H.-N. Nguyen, J. Zhou et H.-J. Kang. *A calibration method for enhancing robot accuracy through integration of an extended Kalman filter algorithm and an artificial neural network*. Neurocomputing, vol. 151, pages 996–1005, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.03.085>
- [NUB_13] A. Nubiola et I.A. Bonev. *Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 29, pages 236–245, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2012.06.004>

Bibliographie

- [OLA_11] A. Olabi. *Amélioration de la précision des robots industriels pour des applications d'usinage à grande vitesse*. Thèse, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2011. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00649019>
- [OLA_12] A. Olabi, M. Damak, R. Bearee, O. Gibaru et S. Leleu. *Improving the accuracy of industrial robots by offline compensation of joints errors*, Industrial Technology (ICIT), IEEE International Conference, pages 492–497, 2012. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2012.6209986>
- [PAN_06] Z. Pan, H. Zhang, Z. Zhu et J. Wang. *Chatter analysis of robotic machining process*. Journal of materials processing technology, vol. 173, pages 301–309, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.11.033>
- [PAU_81] R. P. Paul. *Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control*. MIT Press, Cambridge, 1981.
- [PRA_11] D. Prat et al. *Analyse des configurations d'usinage en 5 axes à la fraise hémisphérique*. page 6, 2011. <http://hdl.handle.net/2042/46687>
- [PRA_15] D Prat et al. *Développement et modélisation de stratégies de fraisage 5 axes de finition-Application à l'usinage de veines fermées*. Paris, ENSAM, 2014. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01130698>
- [PUW_98] H. Y. Pwu et H. Hocheng. *Chip formation model of cutting fiber-reinforced plastics perpendicular to fiber axis*, Transaction of ASME, vol. 120, pages 104-114, 1998. <https://doi.org/10.1115/1.2830100>
- [QIN_13] J. Qin. *Commande hybride position/force robuste d'un robot manipulateur utilisé en usinage et/ou en soudage*. Paris, Thèse, ENSAM, 2013. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00940035>
- [RAH_99] M. Rahman, S. Ramakrishna, J.R.S. Prakash et D.C.G. Tan. *Machinability study of carbon fiber reinforced composite*. Journal of materials processing technology, vol. 89, pages 292–297, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00040-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00040-0)
- [RAM_00] R. Ramesh, MA. Mannan et AN. Poo. *Error Compensation in Machine Tools – A Review*. Part I. Geometric, Cutting-force Induced and Fixture-dependent Errors. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 40, no. 9, pages 1235–1256, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(00\)00009-2](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00009-2)
- [REN_80] M. RENAUD. *The modeling and dynamic control of robot manipulators*. Université Toulouse III, 1980.
- [SCH_16] U. Schneider et al. *Improving robotic machining accuracy through experimental error investigation and modular compensation*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 85, no. 1-4, pages 3–15, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6021-2>
- [SHE_09] J.Y. Sheikh-Ahmad. *Machining of polymer composites*. Springer, London, 2009. <https://doi.org/10.100-978-0-387-68619-6>
- [SIC_08] B. Siciliano, et O. Khatib. *Handbook of robotics*. Springer, Berlin, 2008. <https://doi.org/10.100/978-3-319-32552-1>
- [SIC_09] B. Siciliano, et al. *Robotics: Modelling, Planning and Control*, Springer London, pages 39-103, 2009. https://doi.org/10.1007/978-1-84628-642-1_2

Bibliographie


- [SIE_18] SIEMENS. *CC ROCO – Cutting edge accuracy.pdf*, Sven Tauchmann, DF MC MTS, R&D PDMT 4, Siemens AG, Digital Factory, Motion Control, 2018.
- [SLA_12] M. Slamani, A. Nubiola et I. Bonev. *Assessment of the positioning performance of an industrial robot*. *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 39, pages 57–68, 2012. <https://doi.org/10.1108/01439911211192501>
- [STO_87] H. Stone. *Kinematic modeling, identification and control of robotics manipulators*, The Netherlands, pages 15-17, 1987. <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-1999-3>
- [TET_02] R. Teti. *Machining of composite materials*. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 51, pages 611–634, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61703-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61703-X)
- [VEI_86] W. Veitschegger and Chi-Haur Wu. *Robot accuracy analysis based on kinematics*, *IEEE Journal on Robotics and Automation*, vol. 2, no. 3, pages 171-179, 1986. <https://doi.org/10.1109/JRA.1986.1087054>
- [VOB_14] R. Voß, M. Henerichs, F. Kuster, et K. Wegener. *Chip Root Analysis after Machining Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) at Different Fiber Orientations*. *Procedia CIRP*, vol. 14, pages 217–222, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.013>
- [WAN_95] D. H. Wang, M. Ramulu et D. Arola. *Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: Unidirectional Laminate*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 35, no. 12, pages 1623-1638, 1995. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(95\)00014-O](https://doi.org/10.1016/0890-6955(95)00014-O)
- [WAN_03] X.M. Wang et L.C. Zhang. *An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, pages 1015-1022, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00090-7](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00090-7)
- [WAN1_09] P. Wang, J. Molimard, S. Drapier, A. Vautrin et P. Henrat. *Suivi du procédé de la fabrication Liquid Resin Infusion (LRI) sur simulateur industriel par capteurs distribués = Monitoring the Liquid Resin Infusion (LRI) manufacturing process under industrial environment using distributed sensors*, LAMON, P.O. et J. (Ed.), JNC16, Toulouse, France, pages 9, 2009. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00429542>
- [WAN2_09] J. Wang, H. Zhang et T. Fuhlbrigge. *Improving machining accuracy with robot deformation compensation*, *Intelligent Robots and Systems, International Conference On. IEEE*, pages 3826–3831, 2009. <https://doi.org/10.1109/IROS.2009.5353988>
- [WAN_16] K. Wang. *Modélisation d'un robot manipulateur en vue de la commande robuste en force utilisé en soudage FSW*. Thèse, Paris, ENSAM, 2016. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01305951>
- [WEB_10] R. J Webster et B. A. Jones. *Design and Kinematic Modeling of Constant Curvature Continuum Robots: A Review*. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 29, no. 13, pages 1661–1683, 2010. <https://doi.org/10.1177/0278364910368147>
- [WHI_86] D. E. Whitney, C. A. Lozinski et J. M. Rourke. *Industrial Robot Forward Calibration Method and Results*. *ASME*, vol. 108, no. 1, pages 1–8, 1986. <https://doi.org/10.1115/1.3143737>
- [ZHA_01] L. Zhang, H. Zhang et M. W. Xiang. *A force Prediction Model for cutting unidirectional fibre-reinforced plastics*, *Machining Science and Technology*, vol. 5, no 3, pages 293-305, 2001. <https://doi.org/10.1081/MST-100108616>

Bibliographie

- [ZHA_05] H. Zhang, J. Wang, G. Zhang, Z. Gan, Z. Pan, H. Cui et Z. Zhu. *Machining with flexible manipulator: toward improving robotic machining performance*. IEEE, pages 1127–1132, 2005. <https://doi.org/10.1109/AIM.2005.1511161>

VII. ANNEXES

ANNEXE 1 : Fiche technique – tissu 48600



HexForce® 48600 U 1250
 TISSU CARBONE HR / HS CARBON FABRIC
Fiche Technique / Product Data

Renfort Textile pour Composites Hautes Performances*Textile Reinforcement for High Performance Composites***DEFINITION / DESCRIPTION**

Edition 10/2010 / Issue 10/2010

Type de fils <i>Type of yarns</i>	Chaîne / Warp : AS4 C GP 12K Trame / Weft : AS4 C GP 12K
Masse nominale / <i>Nominal weight</i>	600 g/m ² 17,70 oz/sq ²
Armure <i>Weave style</i>	SERGE 2/2 TWILL 2/2
Poudrage <i>Powdering</i>	
Traitement <i>Finish</i>	
Largeur standard <i>Standard width</i>	1250 mm 49 in

CARACTERISTIQUES / CHARACTERISTICS

Contexture nominale <i>Nominal construction</i>	Chaîne / Warp : 3,7 fils-yarns/cm Trame / Weft : 3,7 coups-picks/cm
Répartition en masse <i>Weight distribution</i>	Chaîne / Warp : 50 % Trame / Weft : 50 %
Epaisseur / <i>Thickness (*)</i>	0,62 mm

PROPRIETE MECANIQUE SUR STRATIFIE* / MECHANICAL PROPERTIES ON LAMINATE*

Mise en oeuvre (50 min à 120°C, vide 0,85 bar, pression 3 bars) / Cure cycle (60 min at 120°C, vacuum 0,85 bar, pressure 3 bars)

	Traction chaîne <i>Warp tensile</i>	Flexion chaîne <i>Warp flexural</i>	C.I.L. chaîne <i>Warp I.L.S.S.</i>
Contrainte / <i>Strength (Mpa)</i>			
Module / <i>Modulus (Gpa)</i>			
Normes / <i>Standards</i>			

**Nota: Les valeurs moyennes ci-dessus sont obtenues sur la base d'un stratifié epoxy de 0,6 mm avec 60 % de fibres en volume.
 **NB : The above average values are obtained with epoxy laminate of 0.6 mm at 60 % of fibres in volume.

IMPORTANT

Les renseignements contenus dans la présente fiche produit sont fondés sur nos connaissances actuelles et sur les résultats d'essais effectués avec un constant souci d'objectivité. Ils doivent être adaptés à chaque cas particulier. Les performances du produit après utilisation étant liées aux conditions particulières de mise en œuvre, elles ne sauraient engager notre responsabilité.

All information is believed to be accurate but is given without acceptance of liability. Users should make their own assessment of the suitability of any product for the purpose required. All sales are made subject to our standard terms of sales which include limitations on liability and other important terms.

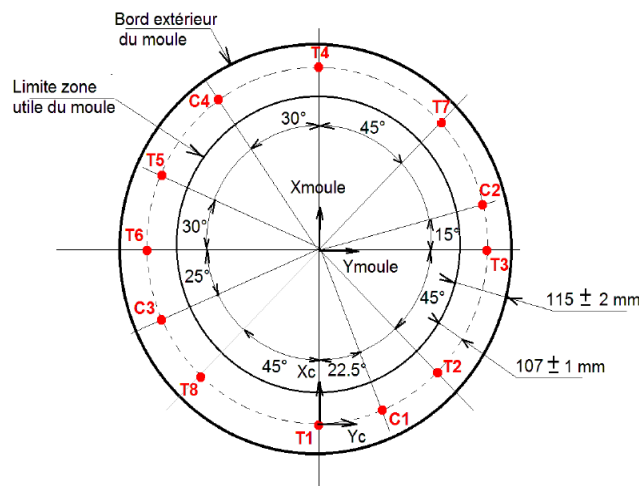


For European sales office telephone numbers
 and a full address list please go to:
<http://www.hexcel.com/contact/salesoffices>

© Copyright, Hexcel

ANNEXE 2 : Spécification du moule de réflecteur (items en rapport avec le travail de thèse)

SPECIFICATION TECHNIQUE POUR LA REALISATION DE MOULES COMPOSITES AUTORAIDIS POUR REFLECTEURS



Pour limiter l'impact du CTE hors du plan lié à la résine du CFRP, on limitera l'épaisseur du moule à 10mm en zone utile.

Après usinage final de la surface, l'épaisseur de la zone utile sera comprise entre 10 mm maximum et 6 mm minimum.

7.6 ETAT DE SURFACE.

La rugosité du moule est spécifiée selon la zone considérée :

Surface active $R_a \leq 0,4 \mu\text{m}$

Par défaut le contrôle de rugosité sera effectué en différents points répartis sur la surface contrôlée.

En cas de traces ou de rayures d'usinage résiduelles, n'ayant pas été supprimées par les opérations de polissage, un contrôle de rugosité supplémentaire sera impérativement effectué sur ces zones afin d'identifier si elles sont acceptables lors du contrôle final.

Tout défaut en creux de la surface utile, de taille supérieure à 4 mm devra être signalé au client.

7.7 DISPERSION QUADRATIQUE DE PRECISION DE FORME

7.7.1 RMS global

La surface active du moule aura un RMS < 0.03 mm pour un diamètre utile inférieur à 1200 mm et un RMS < 0.05 mm pour un diamètre utile ≥ 1200 mm.

7.11.1 Contrôle 3D

De manière préférentielle, le contrôle 3D se fera avec une Machine de Mesure Tridimensionnelle (MMT). Cette mesure sera effectuée avant le polissage et l'application du vernis bouche pore.

ANNEXE 3 : Caractéristiques de la matrice Epoxy



Fiche Technique - v2.0 - 18.06.2014
Version précédente - 14.06.2010

RESOLTECH HTG-240

Durcisseur HTG-245

Système époxy structural d'infusion à haut T_G

- Haut T_G >240°C
- Faible viscosité et excellente mouillabilité
- Hautes résistances thermomécaniques



RESOLTECH HTG-240 / HTG-245 est un système époxy spécialement formulé pour la réalisation de moules et de pièces composites structurales exigeants des T_G élevées pouvant aller jusqu'à 240°C.

Grâce à sa faible viscosité et son haut pouvoir mouillant, le système HTG-240 / HTG-245 permet l'infusion ou l'injection de larges pièces composites structurales tout en garantissant aux opérateurs des conditions de travail optimales de part la faible exposition aux produits chimiques. La faible évolution de la viscosité au cours du temps à partir du mélange rend le système particulièrement performant pour de l'infusion. Toutefois ce système n'est pas recommandé pour de la stratification en voie humide car le durcisseur HTG-245 est sensible à l'air ambiant. Pour de telles applications, on préférera employer le système HTGL-210 / HTGL-216 (T_G jusqu'à 210°C).

Le système HTG-240 / HTG-245 garantit de hautes propriétés inter laminaires et une résistance aux chocs importante grâce à son exceptionnelle mouillabilité qui lui confère une affinité avec tous types de renforts même l'aramide.

Une fois réticulées, les pièces réalisées peuvent être démoulées après une cuisson à faible température (8h @ 40°C). Les propriétés thermomécaniques optimales seront obtenues après un cycle de cuisson adapté défini ultérieurement dans la fiche technique.

ANNEXE 4 : Table dynamométrique

Description :

Le dynamomètre se compose de quatre capteurs de force à 3 composants sous forte précharge entre une plaque de base et une plaque de couverture. Les composantes de la force sont mesurées pratiquement sans déplacement.

Un amplificateur de charge à 3 canaux est intégré au dynamomètre. Par conséquent, le signal de sortie du dynamomètre est de faible impédance.

Le dynamomètre et l'unité de contrôle répondent aux exigences CE selon la directive européenne 89/336/CEE et sont conformes aux normes CEM pour les équipements industriels (émission d'interférences EN 50081-2 et immunité aux interférences EN 50082-2). L'unité de commande L'unité de commande est facile à utiliser et comprend un bloc d'alimentation, un clavier et des affichages d'état, ainsi qu'un connecteur pour le raccordement au réseau avec des affichages d'état ainsi qu'un connecteur pour l'entrée de signaux.

Les caractéristiques de cette table de mesure d'effort sont les suivantes :

KISTLER

measure. analyze. innovate.

Type 9257BA, 9403, 5233A1



Technical Data

Dynamometer Type 9257BA

Range 1	F_x, F_y F_z	kN kN	-0,5 ... 0,5 -1 ... 1
Range 2	F_x, F_y F_z	kN kN	-1 ... 1 -2 ... 2
Range 3	F_x, F_y F_z	kN kN	-2 ... 2 -5 ... 5
Range 4 F_z for F_x and $F_y \leq 0,5 F_z$	F_x, F_y F_z	kN kN	-5 ... 5 ¹⁾ -5 ... 10 ²⁾
Overload F_z for F_x and $F_y \leq 0,5 F_z$	F_x, F_y, F_z F_z	kN kN	-7,5/7,5 -7,5/15
Threshold		N	<0,01
Sensitivity Range 1	F_x, F_y F_z	mV/N mV/N	10,0 5,00
Linearity, all ranges		% FSO	$\leq \pm 1$
Hysteresis, all ranges		% FSO	$\leq 0,5$
Cross talk		%	$\leq \pm 3$
Rigidity	C_x, C_y C_z	kN/ μ m kN/ μ m	>1 >2
Natural frequency (mounted on flanges)	$f_n(x,y)$ $f_n(z)$	kHz kHz	$\approx 2,0$ $\approx 3,5$
Operating temperature range		°C	0 ... 60
Drift (charge amplifier) at 25 °C	F_x, F_y F_z	N/s N/s	$\leq \pm 0,005$ $\leq \pm 0,01$
Ground isolation		M Ω	>100
Connecting cable (integral)	l	m	5
Degree of protection			IP 67
Weight		kg	7,4

¹⁾ Application of force inside and max. 25 mm above top plate area.

²⁾ Range for turning, application of force at point A.

ANNEXE 5 : Suite des expérimentations de la méthode COM (CHAPITRE 1)

Outil E.B :

Les préconisations d'utilisation de cet outil indiquent une vitesse de coupe $V_C = 150\text{m/min}$. Afin de couvrir une plage de vitesse de coupe incluant la vitesse de coupe préconisée, une série de 7 essais est réalisée avec des vitesses de coupe allant de 80m/min jusqu'à 320m/min .

L'effort moyen relevé pour ces essais est $F_R = 104.3\text{ N}$. Avec $V_C = 320\text{m/min}$, l'outil subi une dégradation majeure et l'effort résultant augmente fortement, $F_R = 198\text{ N}$. Cet essai-là n'est pas représenté dans la *figure A4-1* Pour conserver une échelle graphique qui permet de visualiser la faible évolution de W_C . L'inflexion qui définit la vitesse de coupe $V_{cmin} = 125\text{m/min}$ est indiquée par une flèche rouge (*figure A4-1*).

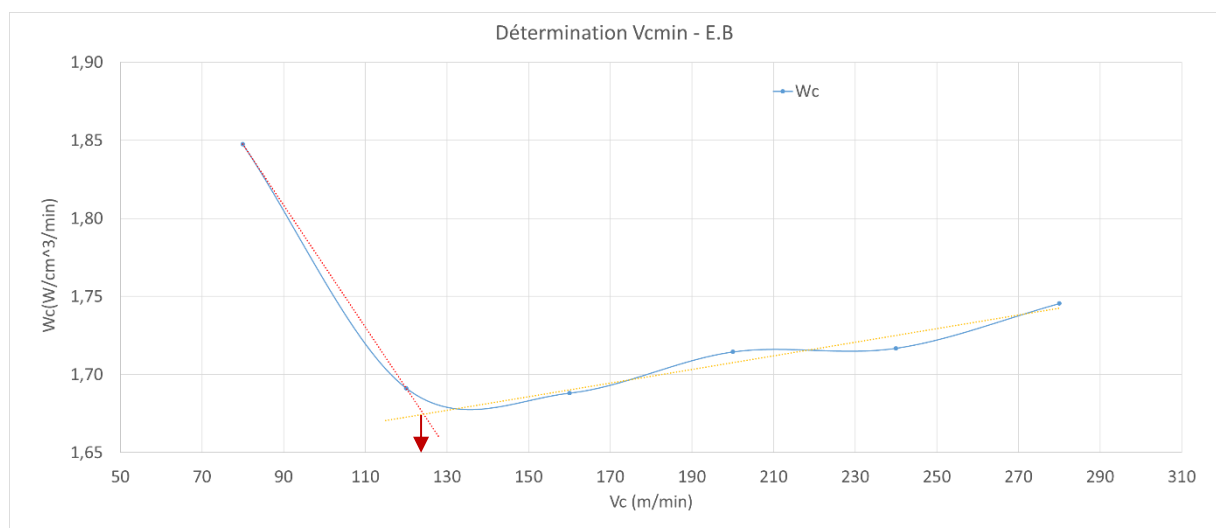


Figure A4-1 : Vcmin - E.B

La vitesse d'avance préconisée pour cet outil est $f_Z = 0.05\text{mm/dent}$. Le graphique de la *figure A4-2* présente deux tendances principales de la courbe W_C , elles sont représentées en rouge et en orange. La valeur associée à l'intersection de ces deux régressions linéaires est $f_Z = 0.12\text{mm/dent}$.

ANNEXES

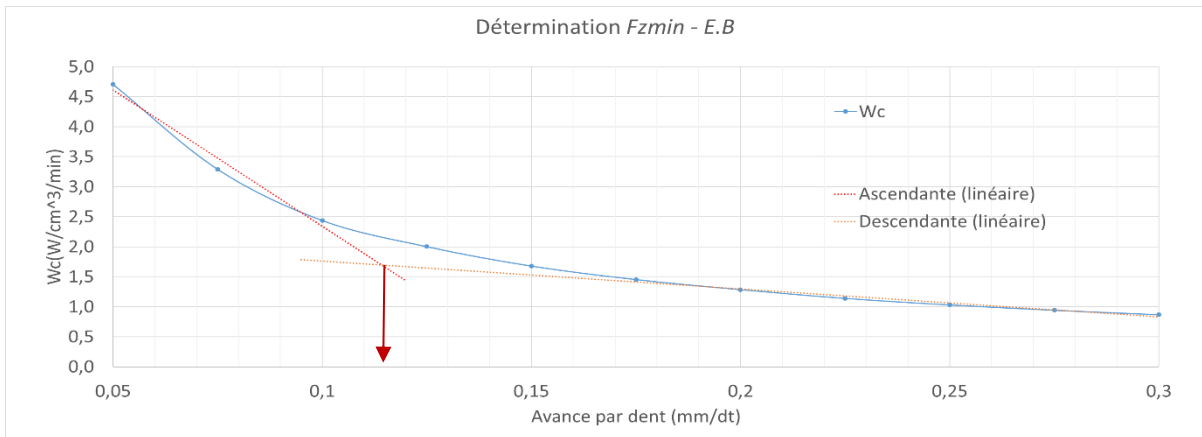


Figure A4-2 : F_{zmin} - E.B

Outil E.C :

Pour cet outil, une série de 8 essais est paramétrée avec une vitesse de coupe allant de 100m/min à 240m/min (figure A4-3).

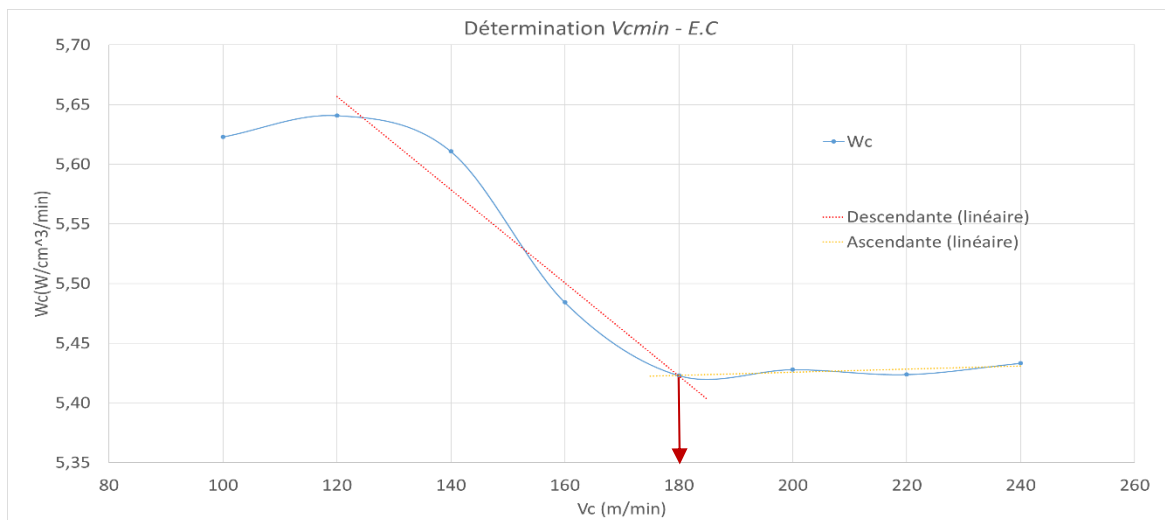
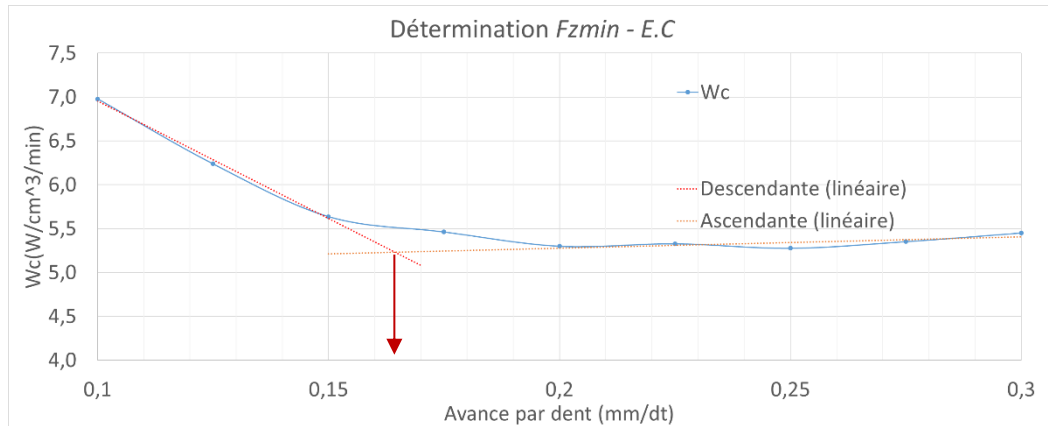


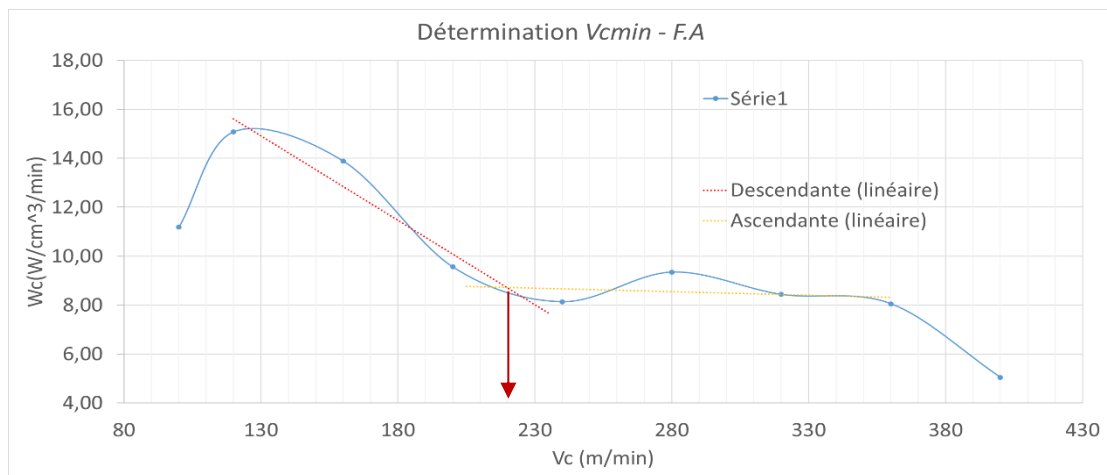
Figure A4-3 : V_{cmin} - E.C

Les mesures d'efforts révèlent un effort de coupe résultant moyen sur les essais $F_R = 75.7N$. L'inflexion définit une vitesse de coupe identifiée est $V_{cmin} = 180m/min$.

La figure A4-4 présente l'évolution de W_C en fonction de l'avance sur une série de 9 essais. Comme pour l'outil E.B, on distingue deux tendances pour identifier $f_z = 0.16mm/dent$.

Figure A4-4 : F_{zmin} - E.C**Outil F.A :**

Les préconisations du fournisseur indiquent une vitesse de coupe $V_c = 150$ m/min. Une série de 9 essais est réalisée et couvre une vitesse de coupe allant de 100 m/min jusqu'à 400 m/min.

Figure A4-5 : V_{cmin} - F.A

Les mesures d'efforts révèlent un effort de coupe résultant moyen sur les essais $F_R = 10.1$ N. $V_{cmin} = 220$ m/min apparaît comme le point d'inflexion de l'évolution de W_c figure A4-5.

Les mesures de W_c présentées figure A4-6 nous permettent d'identifier un $f_z = 0.08$ mm/dent qui correspond à la plage d'utilisation de l'outil défini une avance entre 0.05 et 0.1 mm/dent. Une deuxième inflexion démontre un autre point de fonctionnement qui présenterait une faible énergie spécifique de coupe pour une avance de 0.18 mm/dent. L'outil ayant 6 dents, l'avance par tour serait très élevée pour réaliser une passe de finition, l'état de surface serait impacté notamment par une rugosité plus grande.

ANNEXES

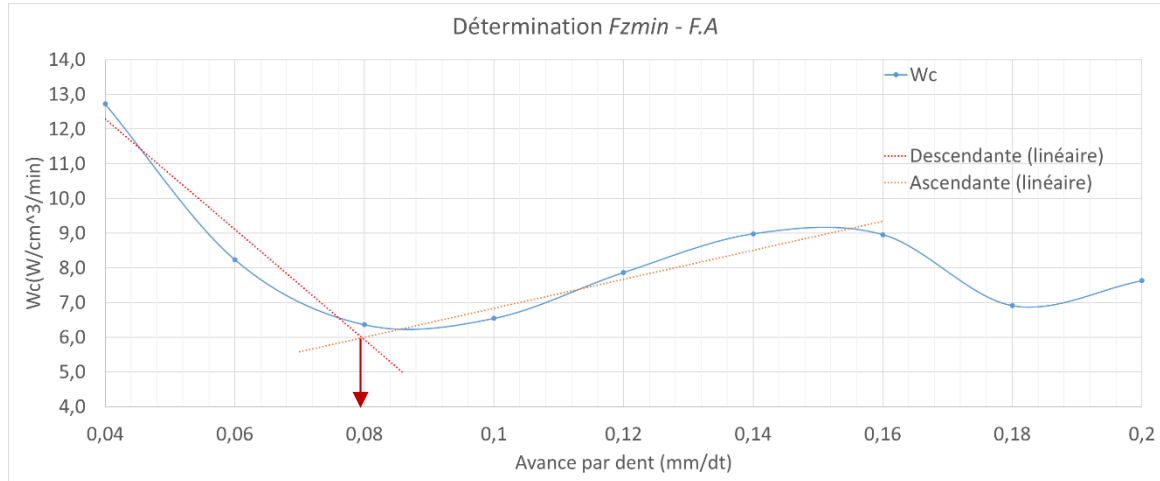


Figure A4-6 : F_{zmin} - F.A

Outil F.B :

Les préconisations du fournisseur indiquent une vitesse de coupe $V_c = 380$ m/min. Une série de 8 essais est réalisée avec une vitesse de coupe allant de 120m/min jusqu'à 400m/min.

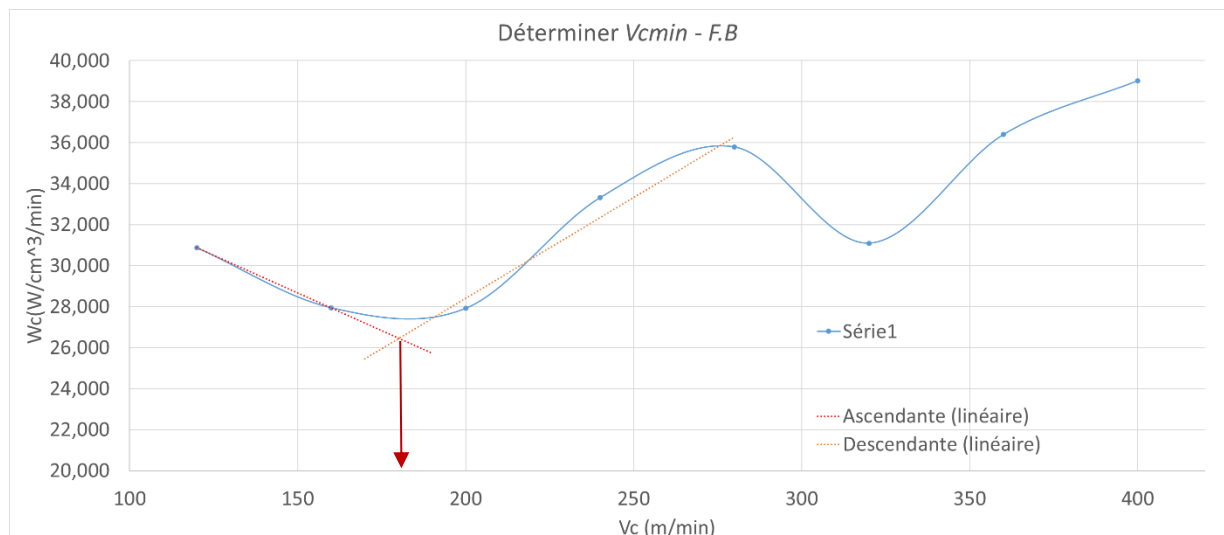


Figure A4-7 : V_{cmin} - F.B

Les mesures d'efforts révèlent un effort de coupe résultant moyen sur ces essais $F_R = 11,3$ N. Deux inflexions sont visibles sur la [figure A4-7](#), l'objectif étant de minimiser W_c , c'est l'inflexion la plus basse du graphique qui permet d'identifier la vitesse de coupe optimale de $V_{cmin} = 180$ m/min.

ANNEXES

En faisant varier l'avance entre 0.04 et 0.2mm/dent, le graphique de la *figure A4-8* permet de visualiser le point de rupture de W_c est clairement identifié et apparait pour l'avance $f_z = 0.09\text{mm/dent}$, proche de celle préconisée qui est de 0.08mm/dent.

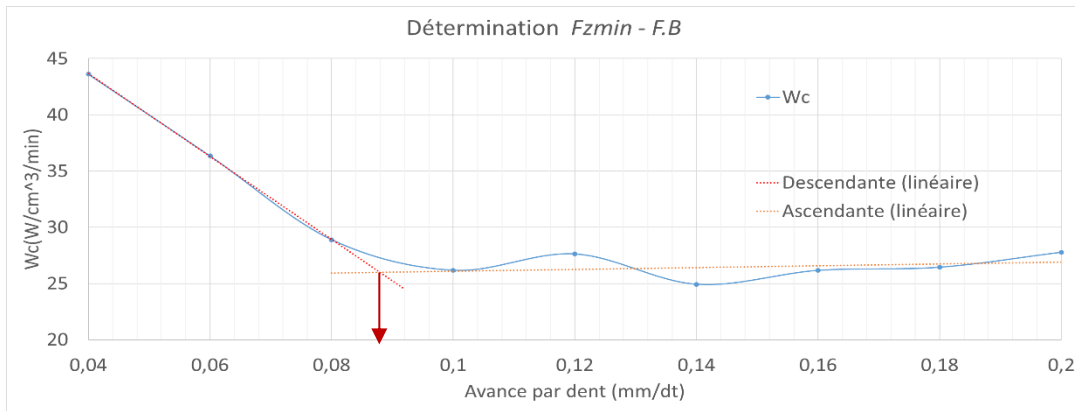


Figure A4-8 : $F_{zmin} - F.B$

ANNEXE 6 : Calcul du MGD du robot

Pour calculer le MGD du robot KUKA KR360, un script Matlab est utilisé. La *figure A6-1* présente ce script. Premièrement, les variables articulaires des 6 articulations sont renseignées ainsi que la variable q_7 qui est toujours égale à 0 car elle définit la rotation de la broche d'usinage qui ne modifie pas la position du bout de l'outil considéré dans cette étude comme le TCP du robot. Les paramètres du modèle géométrique initial sont ensuite renseignés.

Le calcul du MGD revient à calculer les coordonnées de position et d'orientation du TCP. Pour cela, les matrices de passage ${}^i T_j$ sont déterminées à l'aide de la fonction "transTij" (*figure A6-2*) et la matrice de passage du repère atelier au repère TCP est calculée avec l'*équation A6.1*. La matrice de passage du repère 2 au repère 3 est déterminée à l'aide de la fonction "transTijB" (*figure A6-3*) qui intègre le paramètre géométrique de Hayati dans la transformation.

Équation A6.1

$${}^A T_7 = {}^A T_0 {}^0 T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3 {}^3 T_4 {}^4 T_5 {}^5 T_6 {}^6 T_7$$

```
clear all;
close all;

%----- VARIABLES ARTICULAIRES -----
q1 = 20; q2 = 40; q3 = -60; q4 = -20; q5 = 40; q6 = -30; q7 = 0;
%----- PARAMETRES GEOMETRIQUES -----
% position dans l'atelier
x = 0; y = 0; z = 0;
d2 = 500 ; d3 = -1300; d4 = 55;
d1 = 0; d5 = 0; d6 = 0; d7 = 0;
r1 = -1045; r4 = -1025; r7 = -210;
r2 = 0; r3 = 0; r5 = 0; r6 = -425;
a1 = pi; a2 = pi/2; a3 = 0; a4 = -pi/2; a5 = pi/2; a6 = -pi/2; a7 = pi/2;
Q1 = 0; Q2 = pi/2; Q3 = 0; Q4 = 0; Q5 = 0; Q6 = -pi/2; Q7 = -pi/2;
B3 = 0;

%----- MATRICES DE PASSAGE ij -----
TA0 = transTij0( x,y,z ); %Matrice de passage du repère atelier au repère base robot
T01 = transTij( a1,d1,q1,r1,Q1 );
T12 = transTij( a2,d2,q2,r2,Q2 );
T23 = transTijB( a3,d3,q3,r3,Q3,B3 ); %Matrice de passage du repère 3 au repère 3 (Paramètre Hayati)
T34 = transTij( a4,d4,q4,r4,Q4 );
T45 = transTij( a5,d5,q5,r5,Q5 );
T56 = transTij( a6,d6,q6,r6,Q6 );
T67 = transTij( a7,d7,q7,r7,Q7 );

%----- MATRICES DE PASSAGE 0Tj -----
TA1 = TA0*T01;
TA2 = TA1*T12;
TA3 = TA2*T23;
TA4 = TA3*T34;
TA5 = TA4*T45;
TA6 = TA5*T56;
TA7 = TA6*T67;

% Afficher les repères et les axes du robot
print_robot_init('MGD init',TA0,TA1,TA2,TA3,TA4,TA5,TA6,TA7);
%----- CALCUL DES COORDONNEES OPERATIONNELLES -----
[Xm,Ym,Zm] = computeXYZ(TA7)
[Am,Bm,Cm] = computeABC(TA7)
```

Figure A6-1 : Script Matlab – Calcul MGD KUKA KR360

Le script permet d'afficher la configuration géométrique du robot avec la représentation de ses repères et de ses bras de liaison (*figure A6-3*). Il exprime enfin les valeurs

ANNEXES

des coordonnées X, Y, Z, A, B et C du TCP du robot (ou position du bout de l'outil). Ces valeurs sont identifiées dans la matrice de transformation ${}^A T_7$ du repère atelier au repère 7.

<pre>function [Tij] = transTij(a,d,q,r,Q) %UNTITLED Summary of this function goes here % Detailed explanation goes here q = q*pi/180; tet=q+Q; T11=cos(tet); T12=-sin(tet); T13=0; T14=d; T21=cos(a)*sin(tet); T22=cos(a)*cos(tet); T23=-sin(a); T24=-r*sin(a); T31=sin(a)*sin(tet); T32=sin(a)*cos(tet); T33=cos(a); T34=r*cos(a); T41=0; T42=0; T43=0; T44=1; Tij=[T11 T12 T13 T14; T21 T22 T23 T24; T31 T32 T33 T34; T41 T42 T43 T44]; end</pre>	<pre>function [Tij] = transTijB(a,d,q,r,Q,B) %TRANSJ-1TJ Summary of this function goes here % Detailed explanation goes here q = q*pi/180; B = B*pi/180; tet=q+Q; T11=cos(tet)*cos(B); T12=-sin(tet); T13=-cos(tet)*sin(B); T14=d; T21=cos(a)*sin(tet)*cos(B)-sin(a)*sin(B); T22=cos(a)*cos(tet); T23=-cos(a)*sin(tet)*sin(B)-sin(a)*cos(B); T24=-r*sin(a); T31=sin(a)*sin(tet)*cos(B)+cos(a)*sin(B); T32=sin(a)*cos(tet); T33=-sin(a)*sin(tet)*sin(B)+cos(a)*cos(B); T34=r*cos(a); T41=0; T42=0; T43=0; T44=1; Tij=[T11 T12 T13 T14; T21 T22 T23 T24; T31 T32 T33 T34; T41 T42 T43 T44]; end</pre>
---	---

(a) Sans hayati

(b) avec hayati

Figure A6-2 : Fonctions Matlab – Calcul matrices de passage

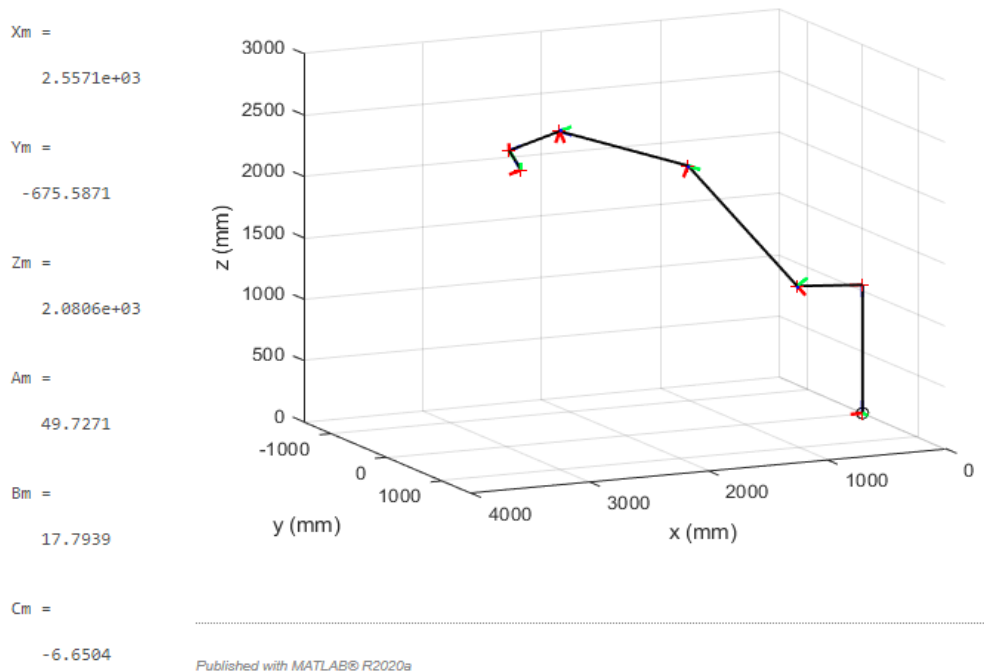


Figure A6-3 : Résultats du calcul du MGD - Matlab

ANNEXES

ANNEXE 7 : Configurations robot – Correction paramétrique

```

function [ BP ] = choixdepose( )
%CHOIXDEPOSE Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here

BP = [-79.1152  -60.0742   77.4188 -16.6401   24.8034   13.0352   ;
-75.4448  -22.2759   111.4621   6.7544  -79.2607   48.6456   ;
-74.9731  -37.404   89.485   45.9504   69.2429   76.8146   ;
-67.6922  -50.9643  106.7698   74.7855  -48.6441  -62.477   ;
-65.8579  -78.7398  110.5448  -85.7094  -53.9276  -90.3242   ;
-65.2416  -19.7991   79.1034  150.2978  51.2578   42.6015   ;
-56.2571  -73.3821  101.8047  -2.4792   46.1021  -28.7188   ;
-48.7884  -35.8059   73.6032  -69.6309  48.5671  -81.8909   ;
-46.2986  -55.7598   91.9016  -28.1544  39.9046  -28.9527   ;
-43.8406  -38.6539   82.4024   8.1479   65.2888  -52.3398   ;
-41.3513  -80.2946  103.9549  -14.0157  68.6765  -29.5871   ;
-46.2871  -8.2576   54.2155   53.1    -64.1542  -48.2503   ;
-52.3896  -9.4846   90.7852  -6.3064  73.3052  -81.2779   ;
-77.6149  -68.04   77.7778   30.8891  -22.5524  47.5966   ;
-55.6337  -57.1747   73.382   -75.8777  12.0064  -59.2862   ;
-39.264   -46.1403   92.5647  -0.1768   1.8022  -19.867   ;
-38.1871  -58.5477   71.8356  52.7914  55.4588  -81.9601   ;
-32.7467  -88.0785  114.5847  29.1104  -8.902   15.0771   ;
-35.9668  -17.7504   65.0045  -34.6937  -26.3578  -50.2384   ;
-24.1531  -23.6495   86.5107   54.3961  77.2422  75.0934   ;
-31.9551  -21.5261   72.4221  -92.8475  -66.5839  29.9164   ;
-24.0414  -63.0801   91.6526  19.5883  49.9791  -33.8225   ;
-20.7686  -41.7014   52.6626  -41.9119  17.2473  -52.2494   ;
-17.3058   6.7419  -45.6892   7.9836  -45.0453  -60.0594   ;
-13.9238  -25.2709  23.7479  87.3163  -18.1597  -25.4319   ;
-10.7847  -47.2857   71.1682  75.0743  -1.5701  69.8521   ;
 4.9824   -52.0477  102.1213  -54.4314  -5.3621  62.1534   ;
 8.0489   -35.2689   78.9497  44.2093  -0.7259  78.8668   ;
 8.8755   -30.5238   32.9207  -50.1708  61.5623  -30.9957   ;
 9.4158   -50.7404   55.8549  -97.9098  -30.9925  140.7344   ;
11.6963   -35.9688   67.5326  -58.8049  80.1073  -85.2272   ;
13.5891   5.4093  -18.7395  -90.4936  -11.6067  -98.0234   ;
16.487   -30.1371   67.9595  -20.7368  97.0453  -168.0554   ;
-10.7936  -43.6295   52.792   -97.679  -104.5951  96.2386   ;
-15.9132  10.4749   -1.578   17.0719  -17.4302  -21.0854   ;
-8.9292  -52.979   74.9476  94.5308  91.7967  -77.4179   ;
15.2354  -38.6805   64.1598  -111.2449  -13.7928  -38.3719   ;
17.7343  -52.9076   92.6354  39.9776  21.3208  -93.9513   ;
18.6242  -47.3898   95.6739  41.4507  48.4616  -48.1641   ;
19.4159  -25.8746   39.4332  -74.4223  4.4126  -12.6587   ;
26.5712  -32.0983   87.2208  89.0348  -60.3024  27.6707   ;
34.6558  -44.333   65.6869  -87.6819  48.2334  -39.2349   ;
35.659   -33.3472   46.0319  -74.3971  89.8253  -69.1982   ;
22.5459   7.7512   5.8556  -76.5262  0.3982   94.1566   ;
36.4864  -62.3537   83.0186  14.7183  43.1361  -166.8373   ;
39.3046  -3.1351   77.8201  -34.9709  -79.9305  9.9726   ;
44.1983  -26.3733   80.5675  -63.1612  13.4702  -46.0113   ;
48.4406  -60.3208  102.7663  51.0154  -28.2948  -61.1166   ;
54.4071  -13.6392   49.3296  -0.5927  74.1577  -51.6568   ;
63.1283  -43.944   113.6648  39.3334  10.7303  46.7715   ;
65.2879  -51.5703  106.037  -58.119  4.9354  13.379   ;
61.0145  -12.0131  50.5937  -176.8568  -55.418  89.6466   ;
58.52   -39.052   111.607  17.551  -35.544  65.133   ;
48.3938  -83.2746  107.5782  97.9744  -2.2595  59.1706   ;
48.6514  -64.9782  89.5809  -16.7683  59.9665  49.925   ;
53.7032  -35.9282  59.5933  30.7624  42.335  4.9734   ;
64.1478  -90.562   119.2971  39.1088  70.4469  100.2753   ;
65.0052  -51.5147  70.4111  34.2862  40.839  -6.3906   ;
71.7275  -88.1845  118.9576  7.9964  34.3143  79.9085   ;
73.1598  -64.3168  56.2717  26.7172  50.921  110.7399   ;
82.0884  -61.1868  72.4007  -25.636  77.7072  -78.6459   ;
87.1917  -14.1061  109.7003  -71.6755  66.2555  -28.2539   ];

```

ANNEXE 8 : Programme de correction hors ligne

```

"""
Created on Wed Jan  8 11:57:55 2020

@author: g.carriere
"""
from scipy import poly1d, sqrt, sum, mean
from scipy.optimize import minimize
from bisect import bisect
from IO_excel import LectureCourbeXSLX_tolistarray
from IO_Robot import EcrireMPF
# parametres
NomFichierScan = "scanP5.xlsx"
NomFichierFAO = "FAOZ5.xlsx"
NomProgramme = 'pourrésultats2.1.mpf'
NomPdf = 'pourrésultats2.1.pdf'
# lecture des donnees dans un fichier CSV.
[scan_t, scan_x, scan_y, scan_z, scan_a, scan_b, scan_c] = LectureCourbeXSLX_tolistarray(NomFichierScan,TroncateStart=[1, 0])
[FAO_t, FAO_x, FAO_y, FAO_z, FAO_a, FAO_b, FAO_c, FAO_E1] = LectureCourbeXSLX_tolistarray(NomFichierFAO,TroncateStart=[1, 0])
### fonctions generiques
def calc_Ecart_seg(list_f, seg_t, seg_x) :
    """
    calcule les ecarts de chaque point avec la fonction de chaque segment FAO
    """
    EC = []
    for i in range(len(list_f)):
        EC.append((list_f[i](seg_t[i]) - seg_x[i]))
    return EC

def calc_MC_seg(list_f, seg_t, seg_x) :
    """
    calcule les moindres carres de chaque segment
    """
    MC = []
    for i in range(len(list_f)):
        MC.append(sum((list_f[i](seg_t[i]) - seg_x[i])**2))
    return MC

def calc_RMS_seg(list_f, seg_t, seg_x) :
    """
    calcule les RMS de chaque segment
    """
    RMS = []
    for i in range(len(list_f)):
        RMS.append(sqrt(mean((list_f[i](seg_t[i]) - seg_x[i])**2)))
    return RMS

def ListToFlin(t, x) :
    """
    Liste de fonction linéaire (entre G1)
    """
    f_seg = []
    for i in range(len(x)-1) :
        a = (x[i+1]-x[i])/(t[i+1]-t[i])
        b = x[i] - a * t[i]
        f_seg.append(poly1d([a, b]))
    return f_seg

```

```

def Filt_apt_gap(FAO_t, FAO_a, scan_a, scan_t):
    """
    Calcul de la déviation suivant L'axe a entre FAO et scan
    """
    # découpe de la mesure par segments FAO
    iDecoupe = [bisect(scan_t,t) for t in FAO_t]
    seg_t = [scan_t[iDecoupe[i]:iDecoupe[i+1]] for i in range(len(iDecoupe)-1) ]
    seg_a = [scan_a[iDecoupe[i]:iDecoupe[i+1]] for i in range(len(iDecoupe)-1) ]
    # Déviations entre données scan et les segments FAO
    ec = []
    se = []
    Ecart_A = calc_Ecart_seg(ListToFlin(FAO_t,FAO_a), seg_t, seg_a)
    for i in range(len(Ecart_A)): ec += Ecart_A[i].tolist() #list coordonnées y
    for i in range(len(seg_t)): se += seg_t[i].tolist() #list coordonnées x(temps)
    return ec,se

def Filt_zone(Ecartx,tx):
    """
    Filtrage de la déviation calculée par une polyligne
    """
    i = 1
    plage = temps[-1]-temps[0] #plage de temps (s)
    while i <= 8:
        Pas_t = plage/i #pas de temps(s)
        T = [((j*Pas_t)+temps[0]) for j in range(i)]
        T.append(temps[-2])
        # découpe par segments
        iDecoupe = [bisect(temps,t) for t in T]
        tDecoupe = [bisect(FAO_t,t) for t in T] #découpe ièmes G1/zone
        seg_T = [FAO_t[tDecoupe[i]:tDecoupe[i+1]] for i in range(len(tDecoupe)-1)]
        seg_t = [temps[iDecoupe[i]:iDecoupe[i+1]] for i in range(len(iDecoupe)-1)]
        seg_a = [liste[iDecoupe[i]:iDecoupe[i+1]] for i in range(len(iDecoupe)-1)]
        #Valeur de correction initiale
        a_reg_cont = [(liste[j]) for j in iDecoupe]
        ### optimisation globale par interpolation lineaire
        def func_min(x):
            f_seg = ListToFlin(T, x)
            MC = sum(calc_MC_seg(f_seg, seg_t, seg_a)) # calcul du moindre carre
            return MC
        resu = minimize(func_min, a_reg_cont)
        a_minimize_lin = resu.x
        nb = len(seg_a[0])
        if resu.success == True : print('SUCCESS!')
        else : print('FAIL...', resu.nit)
        #Calcul RMS optim/ecart et vérification critère nombre de point par régression linéaire
        k = len(liste)
        RMS = sqrt((resu.fun)/k)
        i = i + 1
        NewG,T2 = [],[]
        f_seg = ListToFlin(T,a_minimize_lin)
        for i in range(len(f_seg)):
            NewG += (f_seg[i](seg_T[i])).tolist()
            T2 += seg_T[i].tolist()
        NewG1 = [NewG[0] for j in range(tDecoupe[0])]
        # Valeur des points avant l'entrée en matière - correction identique au premier point dans la matière
        NewG13 = [NewG[-1] for j in range(len(FAO_t)-(tDecoupe[-1]+tDecoupe[0]-3))]
        # valeur des points après la sortie de matière - correction identique au dernier point dans la matière
        NewG.extend(NewG13)
        NewG1.extend(NewG)
        return NewG1

```

```

def Calc_Corr(Cor_z,FAO_a):
    """
    Modification de la FAO par la correction axe par axe
    """
    FAO_zone = []
    FAO_zone = Cor_z + FAO_a

    return FAO_zone

def Mini_prog(FAO_a,scan_a):
    """
    Caclul de la déviation / Filtrage /correction
    """
    Ecarts_A,talb = Filt_aft_gap(FAO_t, FAO_a, scan_a, scan_t)
    Corr_zone = Filt_zone(Ecarts_A,talb)
    FAO_zone = Calc_Corr(Corr_zone,FAO_a)
    return Ecarts_A,talb,Corr_zone,FAO_zone

def RMS_liste(liste):
    ecart = []
    for i in range(liste):
        j = 80 + i
        ecart.append((liste[j])*(liste[j]))
    RMS = sqrt(sum(ecart)/len(ecart))
    return RMS

#####
##### DEBUT PROGRAMME #####
#appel du mini_prog axe par axe
Ecarts_X,talx,Corr_zonex,Fonex = Mini_prog(FAO_x,scan_x)
Ecarts_Y,taly,Corr_zoney,Foney = Mini_prog(FAO_y,scan_y)
Ecarts_Z,talz,Corr_zonez,Fonez = Mini_prog(FAO_z,scan_z)
Ecarts_A,tala,Corr_zonea,Fonea = Mini_prog(FAO_a,scan_a)
Ecarts_B,talb,Corr_zoneb,Foneb = Mini_prog(FAO_b,scan_b)
Ecarts_C,talc,Corr_zonec,Fonec = Mini_prog(FAO_c,scan_c)
#calcul de la deviation moyenne
Mx = sum(Ecarts_X)/len(Ecarts_X)
My = sum(Ecarts_Y)/len(Ecarts_Y)
Mz = sum(Ecarts_Z)/len(Ecarts_Z)
V_erreur = sqrt((Mx*Mx)+(My*My)+(Mz*Mz))
print ('X mean error = ',(Mx))
print ('Y mean error = ',(My))
print ('Z mean error = ',(Mz))
print ('Vector mean error = ', (V_erreur))
#calcul RMS
RMS_x=RMS_liste(Ecarts_X)
RMS_y=RMS_liste(Ecarts_Y)
RMS_z=RMS_liste(Ecarts_Z)
print ('X axis RMS = ', (RMS_x))
print ('Y axis RMS = ', (RMS_y))
print ('Z axis RMS = ', (RMS_z))
#Ecriture programme corrigé via autre script
Programme = EcrireMPF(Fonex, Foney, Fonez, Fonea, Foneb, Fonec, FAO_E1, NomProgramme)

```

Résumé

Amélioration de la précision de robots industriels : Application à l'usinage de pièces composites.

La robotisation de l'industrie est en constante augmentation depuis l'apparition de robots industriels agiles et flexibles. Les robots industriels poly-articulés ont vu, ces dernières années, leurs coûts diminuer et leurs performances augmenter. Ils répondent alors à un besoin de compétitivité croissant et à des enjeux économiques importants pour les industriels. Dans le contexte de l'usinage de formes gauches pour la réalisation de grands supports composites (quatre mètres de diamètre) dont la précision de forme attendue est de quelques centièmes, ces robots ne sont pas initialement compatibles avec de tels critères de performance.

La littérature décrit des méthodes qui améliorent la précision des robots industriels comme par exemple l'identification des raideurs articulaires associée à un modèle élasto-statique, ou la modélisation des efforts avec mesure dynamique des forces pendant l'usinage. Ces méthodes sont difficilement applicables dans un contexte industriel, car elles sont trop coûteuses en temps et en investissements liés aux moyens d'identification.

Cette thèse présente une nouvelle méthode de correction du positionnement du robot lors de l'exécution d'une trajectoire d'usinage. Cette compensation hors ligne permet de maîtriser et d'optimiser l'exploitation de robots industriels sériels pour l'usinage d'une pièce composite. Après avoir identifié les conditions de coupe optimales, correspondant au couple outil/matière de l'application étudiée ici, la méthodologie de ces travaux est exposée. Elle s'appuie sur le couplage de deux méthodes de correction de la position du robot complémentaires. La première est l'identification des paramètres géométriques du robot. Il s'agit d'identifier la valeur exacte des paramètres du modèle géométrique du robot et de les modifier au sein de la commande. Cet étalonnage permet de compenser les erreurs de type géométrique et d'améliorer la précision de pose absolue du robot dans l'ensemble de son espace de travail. La deuxième méthode est une compensation de la trajectoire hors ligne. Cette méthode, rapidement applicable, est adaptée à tout robot sériel 6 axes, contrairement aux méthodes existantes qui nécessitent une modélisation et une caractérisation du robot. Après avoir mesuré la position de l'outil pendant une première opération d'usinage, cette mesure est comparée au point de consigne initial du programme pour identifier la déviation du robot. Un processus adapté et autonome est utilisé pour rééditer le parcours d'outil afin de compenser la déviation sur la totalité du parcours de l'outil. Une nouvelle opération d'usinage quantifie la correction en produisant une pièce avec des tolérances de forme améliorées.

En plus de l'étude du couple outil/matière et de la définition d'une stratégie optimale pour l'usinage de la pièce d'application, cette thèse présente des résultats encourageants. La

Résumé

méthodologie de compensation, appliquée à la pièce de l'étude, améliore la précision de pose du robot de plus de 80%.

Ces travaux apportent un intérêt certain pour les applications industrielles qui nécessitent des méthodes rapides avec un minimum de moyens et de temps de développement. A ce stade, le fait de mesurer un premier parcours d'usinage pour obtenir un second usinage de qualité représente l'inconvénient principal de la méthode qui implique le supplément d'outils et de matière à prévoir dans la conception de la pièce brute.

Mots clefs : Usinage robotique, Usinage composite, Précision robotique, Compensation d'erreur, Méthode de correction, Compensation par vision, Robotique instrumentée.

Abstract

Improvement of industrial robot's accuracy: Machining composite parts application

Industry's robotization is constantly increasing since the appearance of agile and flexible industrial robots. In recent years, their costs have decreased and their performance has increased. They meet a need for competitiveness and important economic issues for manufacturers. In the context of machining left-handed shapes for the realization of large composite supports (four meters in diameter) whose expected shape accuracy is a few hundredths, these robots are not initially compatible with such performance criteria.

The literature describes methods that improve the accuracy of industrial robots, such as the identification of joint stiffnesses associated with an elasto-static model, or stress modeling with dynamic measurement of forces during machining. These methods are difficult to apply in an industrial context because they are too costly in terms of time and investments related to the identification means.

This thesis presents a new method to correct the robot positioning during the execution of a machining trajectory. This off-line compensation allows to control and optimize the operation of serial industrial robots for the machining of a composite part. After having identified the optimal cutting conditions, corresponding to the tool/material couple of the application studied here, the methodology of this work is exposed. It is based on the coupling of two complementary methods of correction of the robot position. The first one is the identification of the geometrical parameters of the robot. This involves identifying the exact value of the parameters of the robot's geometric model and modifying them within the control. This calibration allows to compensate for geometrical errors and to improve the absolute pose accuracy of the robot in its entire workspace. The second method is an off-line trajectory compensation. This method is quickly applicable and is suitable for any 6-axis serial robot, unlike existing methods that require robot modeling and characterization. After measuring the tool position during an initial machining operation, this measurement is compared to the initial program setpoint to identify the robot deviation. An intelligent, autonomous process is used to re-edit the toolpath to compensate for the deviation over the entire toolpath. A new machining operation quantifies the correction by producing a part with improved shape tolerances.

In addition to the study of the tool/material pair and the definition of an optimal strategy for machining the application part studied, this thesis presents encouraging results. The compensation methodology, applied to the study part, improves the robot's positioning accuracy by more than 80%.

Abstract

This work will be really interesting for industrial applications that require fast methods with a minimum of devices and development time. At this stage, the fact that we can measure a first machining path to obtain a second quality machining represents the main disadvantage of the method which implies the additional tools and material to be foreseen in the design of the raw part.

Keywords : Robotic machining, Composite machining, Robotic precision, Error compensation, Correction method, Vision-based compensation, Instrumented robotics.