## TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION .....1

CHAPITRE 1 REVUE LITTÉRAIRE .....3
1.1 La qualité de détourage de stratifiés de composites carbone/époxy (CFRP).....3
1.1.1 L'occurrence et la propagation de la délamination de surface ..... 3
1.2 La qualité de détourage d'un robot sériel à six articulations rotatives .....14
1.2.1 La rigidité de robot sériel pour le détourage..... 14
1.2.2 L'influence de la position de la tâche à détourer sur la qualité ..... 17
1.2.3 L'influence de la redondance cinématique du robot sur la qualité ..... 19
1.2.4 Méthodologies d'optimisation de la qualité de l'usinage de robot sériel ..... 22

CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE.....27
2.1 Introduction.....27
2.2 Méthodologie expérimentale pour évaluer la qualité de détourage robotisé .....27
2.2.1 Description de l'outil à détourer ..... 28
2.2.2 Description de la cellule robotisée et du gabarit d'usinage ..... 28
2.2.3 Réponses observées pour tous les plans expérimentaux avec la cellule robotisée ..... 31
2.2.4 Description des configurations robot CR10 et CR20 ..... 32
2.2.5 Sommaire des opérations de rainurage réalisées ..... 33
2.2.6 Identification des échantillons de CFRP détourés et de leurs conditions de coupe ..... 36
2.2.7 Plans expérimentaux de rainurages OP10P1 et OP20P1 ..... 37
2.2.8 Plans expérimentaux de rainurages OP10P4 et OP20P4 ..... 44
2.2.9 Plan expérimental OP30P3 ..... 48
2.2.10 Plans expérimentaux OP50P5 et OP50P6..... 53
2.3 Expérimentation pour évaluer la qualité de rainurage de stratifié CFRP sur centre d'usinage numérique .....62
2.3.1 Plans expérimentaux de rainurages OP10P2 et OP20P2 sur centre d'usinage numérique ..... 62

CHAPITRE 3 TRAITEMENT DE RÉSULTATS .....67
3.1 Forces de coupe orthogonales.....67
3.1.1 Efforts de coupe pour l'opération OP10P1 45° CR10 Y ..... 68
3.1.2 Efforts de coupe pour l'opération OP20P1 -45° CR20 X..... 70
3.1.3 Efforts de coupe pour l'opération sur centre d'usinage OP10P2 -45°..... 73
3.1.4 Efforts de coupe pour l'opération sur centre d'usinage OP20P2 45° ..... 75
3.1.5 Efforts de coupe pour l'opération OP10P4 45° CR10 Y ..... 77

3.1.6 Efforts de coupe pour l'opération OP20P4 -45° CR20 X ..... 80
3.1.7 Efforts de coupe pour l'opération OP30P3 45° CR20 X ..... 82
3.1.8 Efforts de coupe pour l'opération OP30P3 -45° CR20 X ..... 85
3.1.9 Efforts de coupe pour l'opération OP50P5 45° CR10 Y ..... 87
3.1.10 Efforts de coupe pour l'opération OP50P5 -45° CR10 X ..... 89
3.1.11 Efforts de coupe pour l'opération OP50P5 -45° CR20 X ..... 91
3.1.12 Efforts de coupe pour l'opération OP50P5 45° CR20 Y ..... 93
3.1.13 Efforts de coupe pour l'opération OP50P6 -45° CR10 Y ..... 95
3.1.14 Efforts de coupe pour l'opération OP50P6 45° CR10 X ..... 97
3.1.15 Efforts de coupe pour l'opération OP50P6 45° CR20 X ..... 99
3.1.16 Efforts de coupe pour l'opération OP50P6 -45° CR20 Y ..... 101
3.1.17 Conclusion ..... 103
3.2 Rugosité longitudinale de stratifiés rainurés .....104
3.2.1 Vérification de la répétitivité de mesure de la rugosité longitudinale .... 107
3.2.2 Rugosité de stratifié rainuré des opérations OP10P1, OP20P1 et OP10P2 ..... 107
3.2.3 Rugosité de plis à -45° et 45° des opérations OP10P1 et OP10P2 ..... 114
3.2.4 Conclusion ..... 121
3.3 Délamination de surface de stratifiés rainurés .....122
3.3.1 Délaminations de l'opération OP10P1 45° CR10 Y ..... 129
3.3.2 Délaminations de l'opération OP20P1 -45° CR20 X ..... 134
3.3.3 Délaminations de l'opération OP10P2 -45° sur centre d'usinage ..... 139
3.3.4 Délaminations de l'opération OP20P2 45° sur centre d'usinage ..... 143
3.3.5 Délaminations de l'opération OP10P4 45° CR10 Y ..... 148
3.3.6 Délaminations de l'opération OP20P4 -45° CR20 X ..... 157
3.3.7 Délaminations de l'opération OP30P3 45° CR20 X ..... 162
3.3.8 Délaminations de l'opération OP30P3 -45° CR20 X ..... 168
3.3.9 Délaminations de l'opération OP50P5 45° CR10 Y ..... 172
3.3.10 Délaminations de l'opération OP50P5 -45° CR10 X ..... 177
3.3.11 Délaminations de l'opération OP50P5 -45° CR20 X ..... 180
3.3.12 Délaminations de l'opération OP50P5 45° CR20 Y ..... 183
3.3.13 Délaminations de l'opération OP50P6 -45° CR10 Y ..... 191
3.3.14 Délaminations de l'opération OP50P6 45° CR10 X ..... 194
3.3.15 Délaminations de l'opération OP50P6 45° CR20 X ..... 203
3.3.16 Délaminations de l'opération OP50P6 -45° CR20 Y ..... 208
3.3.18 Conclusion générale ..... 212

CHAPITRE 4 ANALYSE DE RÉSULTATS ET DISCUSSION .....215
4.1 Identification de l'influence des facteurs sur les efforts de coupe moyens .....215
4.1.1 L'influence de la vitesse d'avance et de coupe sur les efforts de coupe moyens ..... 215
4.1.2 Influence de la configuration du robot et de la direction de rainurage robotisée sur les efforts normaux moyens des opérations des plaques P5 et P6 ..... 222

4.1.3 Conclusion ..... 224
4.2 Identification de l'influence des conditions de coupe sur les critères de rugosité Ra et Rt.....226
4.2.1 Influence de conditions de coupe sur la rugosité Ra et Rt pour un pli orienté à -45° des opérations OP10P1 CR10 robotisées et OP10P2 sur centre d'usinage..... 227
4.2.2 Influence des conditions de coupe sur Ra et Rt pour un pli orienté à 45° de l'opération OP10P1 CR10 robotisée et OP10P2 sur centre d'usinage..... 231
4.2.3 Conclusion ..... 237
4.3 Identification de l'influence des conditions de coupe sur la délamination de surface.....238
4.3.1 Comparaison de la présence et de la longueur moyenne de la délamination de surface entre les opérations..... 238
4.3.2 Influence de la vitesse d'avance et de coupe sur la longueur moyenne des FNC en avalant de l'OP10P4 45° CR10 Y ..... 241
4.3.3 Influence de la vitesse d'avance sur la longueur moyenne de l'ARM en opposition de l'OP20P1 -45° CR20 X, l'OP20P4 -45° CR20 X et l'OP10P2 -45° ..... 244
4.3.4 Influence de la vitesse d'avance sur la longueur moyenne de l'ARM des plaques P3, P5 et P6 avec un pli de surface orienté à -45° .. 246
4.3.5 Conclusion ..... 248

CONCLUSION 249

RECOMMANDATIONS .....251

ANNEXE I SPÉCIFICATIONS DE LA TABLE DYNAMOMÉTRIQUE KISTLER 9255B .....253

ANNEXE II SPÉCIFICATIONS DU ROBOT KUKA KR 500-2 MT.....257

ANNEXE III SPÉCIFICATIONS DU POSITIONNEUR 2 AXES KUKA DKP-400.....267

ANNEXE IV SPÉCIFICATIONS DE LA BROCHE HSD MECHATRONIC ES789 .....269

ANNEXE V ARTICLES EN COURS DE PUBLICATION PRÉSENTANT LES RÉSULTATS DE CE MÉMOIRE.....271

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....335

## LISTE DES TABLEAUX

Page


Tableau 2.1 Configuration des axes du robot CR10 et CR20 pour une même position du TCP : X 1738 mm, Y 2524 mm et Z 960 mm à l'origine du plan de coupe ..... 32

Tableau 2.2 Opérations de rainurage sur une plaque CFRP fabriquée par AFP et cuite en autoclave ..... 34

Tableau 2.3 Opérations de rainurage dans une plaque CFRP fabriquée par pose à la main de plis et cuite sous presse ..... 35

Tableau 2.4 Les 5 facteurs du plan expérimental OP10P1 45° CR10 Y ..... 38

Tableau 2.5 Les 5 facteurs du plan expérimental OP20P1 -45° CR20 X ..... 39

Tableau 2.6 Vitesses de coupe et d'avance ..... 39

Tableau 2.7 Orientation de plis du stratifié symétrique rainuré ..... 40

Tableau 2.8 Les 5 facteurs du plan expérimental OP10P4 45° CR10 Y ..... 44

Tableau 2.9 Les 5 facteurs du plan expérimental OP20P4 -45° CR20 X ..... 45

Tableau 2.10 Orientation des 10 plis symétriques du stratifié rainuré ..... 46

Tableau 2.11 Orientation des 12 plis symétriques du stratifié rainuré ..... 46

Tableau 2.12 Les 5 facteurs de l'opération OP30P3 45° CR20 X ..... 48

Tableau 2.13 Vitesses de coupe et d'avance du plan OP30P3 ..... 49

Tableau 2.14 Orientation des 12 plis symétriques du stratifié rainuré ..... 50

Tableau 2.15 Vitesses de coupe et d'avance des plans OP50P5 et OP50P6 ..... 53

Tableau 2.16 Les 5 facteurs du plan OP50P5 45° CR10 Y ..... 54

Tableau 2.17 Les 5 facteurs du plan OP50P5 -45° CR10 X ..... 54

Tableau 2.18 Les 5 facteurs du plan OP50P5 -45° CR20 X ..... 56

Tableau 2.19 Les 5 facteurs du plan OP50P5 45° CR20 Y ..... 56

Tableau 2.20 Les 5 facteurs du plan OP50P6 -45° CR10 Y ..... 58

Tableau 2.21 Les 5 facteurs du plan OP50P6 45° CR10 X ..... 58

Tableau 2.22 Les 5 facteurs du plan OP50P6 45° CR20 X ..... 60

Tableau 2.23 Les 5 facteurs du plan OP50P6 -45° CR20 Y ..... 60

Tableau 3.1 Paramètres de mesure de rugosité ..... 105

Tableau 3.2 Évaluation de la précision du profilomètre ..... 107

Tableau 3.3 Répétabilité de la mesure de rugosité ..... 107

Tableau 3.4 Conditions de coupe contrôlées par la mesure de la rugosité ..... 108

Tableau 3.5 Conditions de coupe contrôlées par la mesure de rugosité ..... 115

Tableau 3.6 Facteurs observés à chaque rainure pour caractériser la délamination ..... 126

Tableau 3.7 LM de fibres non coupées (FNC) du pli supérieur en entrée et en sortie, OP10P1 45° CR10 Y ..... 131

Tableau 3.8 LM d'ARM du pli supérieur en entrée et sortie, OP10P1 45° CR10 Y ..... 132

Tableau 3.9 LM de délamination au pli inférieur, OP20P1 -45° CR20 X..... 135

Tableau 3.10 LM de FNC normales au pli supérieur, OP20P1 - 45° CR20 X..... 135

Tableau 3.11 LM de délamination du pli inférieur, OP10P2 -45°..... 139

Tableau 3.12 LM de délamination du pli supérieur, OP10P2 -45°..... 141

Tableau 3.13 LM de FNC du pli supérieur, OP20P2 45° ..... 144

Tableau 3.14 LM d'ARM en entrée et en sortie du pli supérieur, OP20P2 45°..... 147

Tableau 3.15 LM de délamination du pli inférieur, OP20P4 -45° CR20 X ..... 157

Tableau 3.16 LM de FNC du pli supérieur, OP20P4 -45° CR20 X ..... 159

Tableau 3.17 LM d'ARM du pli supérieur orienté à 45° de l'OP30P3 ..... 167

Tableau 3.18 LM de FNC du pli supérieur de l'OP50P5 45° CR10 Y ..... 174

Tableau 3.19 LM de FNC normales au pli supérieur de l'OP50P6 45° CR20 X ..... 204

Tableau 3.20 LM de l'ARM du pli supérieur de l'OP50P6 45° CR20 X ..... 207

Tableau 4.1 Analyse de variance des efforts normaux moyens des opérations des plaques P5 et P6 ..... 222

Tableau 4.2 Analyse de variance pour Ra mesuré sur un pli orienté à -45° de l'OP10P1 CR10 et l'OP10P2 sur centre d'usinage ..... 227

Tableau 4.3 Analyse de variance pour Rt mesuré sur un pli orienté à -45° de l'OP10P1 CR10 et l'OP10P2 sur centre d'usinage ..... 230

Tableau 4.4 Analyse de variance pour Ra mesuré sur un pli orienté à 45° de l'OP10P1 CR10 et l'OP10P2 sur centre d'usinage ..... 232

Tableau 4.5 Analyse de variance pour Rt mesuré sur un pli orienté à 45° de l'OP10P1 CR10 et l'OP10P2 sur centre d'usinage ..... 235

Tableau 4.6 Analyse de variance pour la longueur moyenne de FNC du pli supérieur en avalant de l'OP10P4 45° CR10 Y ..... 241

Tableau 4.7 Analyse de variance pour la longueur moyenne d'ARM du pli supérieur en opposition des plaques P1, P2 et P4 pour un pli de surface orienté à -45° ..... 245

Tableau 4.8 Analyse de variance pour la longueur moyenne d'ARM du pli supérieur des plaques P3, P5 et P6 pour un pli de surface orienté à -45° ..... 247

## LISTE DES FIGURES

Page


Figure 1.1 Usure de la surface de dépouille (mm) par outil en fonction de la distance détourée d'un stratifié quasi isotrope Tirée de (Inoue et Hagino, 2013) ..... 4

Figure 1.2 Types de délamination, Tirée de (Bérubé, 2012). a) Délamination d'un pli extérieur d'un stratifié. b) Fibres non coupées (FNC) normales à la surface détourée. c) Fibres non coupées (FNC) vues de l'intérieur de la face détourée. d) Arrachement de matières (ARM) d'un pli extérieur à l'arête de la surface détourée ..... 5

Figure 1.3 Mécanisme de coupe de détourage orthogonale en fonction de l'orientation de plis unidirectionnels Tirée de (Ramulu, 1997) ..... 6

Figure 1.4 Image d'une caméra vidéo à haute vitesse de la formation du copeau pendant l'usinage de composites unidirectionnels a) orienté à 0°, b) orienté à 45°, c) orienté à 90°, d) orienté à -45° Tirée de (Iliescu, 2008) ..... 7

Figure 1.5 Angle de l'orientation du pli unidirectionnel ($\boldsymbol{\theta}$) de 45° (tel qu'illustré), 0°, 90° ou -45° Tirée de (Ramulu, 1997)..... 8

Figure 1.6 a) Angle d'orientation des fibres. b) et c) Angle de coupe des fibres, Tirée de (Hintze, Hartmann et Schutte, 2011)..... 9

Figure 1.7 Délamination en fonction de l'angle de coupe de fibre critique $\boldsymbol{\theta}$ Tirée de (Hintze, Hartmann et Schutte, 2011) ..... 10

Figure 1.8 Délamination en fonction de la largeur d'usinage sur le diamètre de l'outil pour une orientation du pli de surface de -45° Tirée de (Hintze, Hartmann et Schutte, 2011) ..... 11

Figure 1.9 Propagation de la délamination pour une orientation du pli de surface à —45° Tirée de (Hintze, Hartmann et Schutte, 2011) ..... 12

Figure 1.10 Délamination en opposition et en avalant pour une orientation de pli de surface à 45° Tirée de (Hintze, Hartmann et Schutte, 2011) ..... 13

Figure 1.11 Montage expérimental Tirée de (Claudiu et al., 2012) ..... 16

Figure 1.12 Trois positions pour un test d'impact Tirée de (Claudiu et al., 2012) ..... 17

Figure 1.13 Une pièce d'essai et les deux positions de détourage Tirée de (Dumas et al., 2012) ..... 18

Figure 1.14 Différence dimensionnelle entre les pièces de résine et d'alliage d'aluminium usinés en deux placements Tirée de (Dumas et al., 2011c) ..... 19

Figure 1.15 Pièce d'essais expérimentaux Tirée de (Dumas et al., 2011c) ..... 20

Figure 1.16 Angle $\gamma i$ entre un axe lié au corps de la broche et la direction d'avance de l'outil pour une trajectoire numérique Tirée de (Dumas et al., 2011c) ..... 20

Figure 1.17 Fenêtre de programmation RobotMaster enrichie avec les isocontours tenant compte des efforts de coupe Tirée de (Dumas et al., 2011c) ..... 21

Figure 1.18 Mesure de la déviation de l'outil de pièces détourées en fonction de la position de l'outil et de la configuration du robot Tirée de (Dumas et al., 2011c). ..... 22

Figure 1.19 Alignement du point d'application des efforts de coupe avec l'axe 6 du robot Tirée de (Dumas et al., 2011c) ..... 23

Figure 1.20 Écarts entre l'usinage dans le LAB et celui dans l'alliage d'aluminium pour les placements 1 et 2 Tirée de (Dumas et al., 2011c) ..... 25

Figure 1.21 Compensation de la déformation en temps réel à l'aide d'un modèle de rigidité et d'un senseur de force Tirée de (Zhang et al., 2005) ..... 26

Figure 2.1 Outil à deux flutes en PCD et à angle d'hélice nul Tirée de (Bérubé, 2012) ..... 28

Figure 2.2 Robot KUKA KR 500-2 MT sur axe linéaire « E1 » et positionneur de 2 axes KUKA DKP-400 (No 1). Le repère global de la cellule est représenté en bas à gauche ..... 30

Figure 2.3 Vue explosée de l'assemblage d'un stratifié de CFRP (No 1), du gabarit d'usinage (No 2 et 3) et de la table dynamométrique (No 4) ..... 31

Figure 2.4 Configuration du robot CR10 lors de rainurages. a) Vue isométrique b) Vue du dessus de CR10 et des directions de rainurage X et Y ..... 33

Figure 2.5 Configuration du robot CR20 lors de rainurages. a) Vue isométrique b) Vue du dessus de CR20 et des directions de rainurage X et Y ..... 33

Figure 2.6 Identification des échantillons de CFRP détouré et de leurs conditions de coupe ..... 36

Figure 2.7 Opération de rainurage parallèle à l'axe Y global de la cellule avec le gabarit d'usinage sur le positionneur à 2 axes KUKA DKP-400 lors de l'OP10 ..... 37

Figure 2.8 Opération de rainurage parallèle à l'axe X global de la cellule avec le gabarit d'usinage monté sur le positionneur à 2 axes KUKA DKP-400 lors de l'OP20 ..... 38

Figure 2.9 Schéma de la plaque CFRP percée, a) 49 trous de fixation pour des vis ¼-20UNC, b) 36 trous de dégagement d'un diamètre de ¾ de pouce ..... 40

Figure 2.10 Identification des échantillons de CFRP en fonction des conditions de coupe OP10P1 ..... 42

Figure 2.11 Identification des échantillons de CFRP en fonction des conditions de coupe OP20P1 ..... 43

Figure 2.12 Description des échantillons de CFRP détourés des opérations OP10P4 et OP20P4 ..... 47

Figure 2.13 Description de l'opération de perçage du stratifié de CFRP pour l'OP30P3, a) 49 trous de fixation, b) 24 trous de dégagement pour l'outil à rainurer ..... 49

Figure 2.14 Opération de rainurage OP30P3 45° avec des plis de surface orientés à 45° ..... 51

Figure 2.15 Opération de rainurage OP30P3 -45° avec des plis de surface orientés à moins 45° après une rotation de —90° autour de l'axe Z global par le DKP400 ..... 52

Figure 2.16 Opérations de rainurage OP50P5 45° CR10 Y et OP50P5 -45° CR10 X ..... 55

Figure 2.17 Opérations de rainurage OP50P5 45° CR20 Y et OP50P5 -45° CR20 X ..... 57

Figure 2.18 Opérations de rainurage OP50P6 -45° CR10 Y et OP50P6 45° CR10 X ..... 59

Figure 2.19 Opérations de rainurage OP50P6 -45° CR20 Y et OP50P6 45° CR20 X ..... 61

Figure 2.20 Centre d'usinage numérique HURON K2X10 ..... 63

Figure 2.21 Plaque CFRP, gabarit et table KISTLER installés sur centre d'usinage numérique HURON K2X10 ..... 63

Figure 2.22 Directions respectives de rainurage X et Y des opérations OP10P2 et OP20P2 ..... 64

Figure 2.23 Identification d'échantillons de stratifiés de CFRP détourés des opérations OP10P2 et OP20P2 ..... 66

Figure 3.1 Direction des efforts de coupe orthogonaux pour chaque essai ..... 67

Figure 3.2 Signal de force pour 4 tours d'outil servant à calculer la force moyenne ..... 67

Figure 3.3 Effort d'avance moyen en fonction de l'avance de l'OP10P1 45° CR10 Y ..... 69

Figure 3.4 Effort normal moyen en fonction de l'avance de l'OP10P1 45° CR10 Y ..... 69

Figure 3.5 Effort axial moyen en fonction de l'avance de l'OP10P1 45° CR10 Y ..... 69

Figure 3.6 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP10P1 45° CR10 Y ..... 70

Figure 3.7 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP10P1 45° CR10 Y ..... 70

Figure 3.8 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP20P1 -45° CR20 X ..... 71

Figure 3.9 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP20P1 -45° CR20 X ..... 72

Figure 3.10 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP20P1 -45° CR20 X ..... 72

Figure 3.11 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP20P1 -45° CR20 X ..... 72

Figure 3.12 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance sur centre d'usinage, OP10P2 -45° ..... 74

Figure 3.13 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe sur centre d'usinage, OP10P2 -45° ..... 74

Figure 3.14 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance sur centre d'usinage, OP10P2 -45° ..... 74

Figure 3.15 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe sur centre d'usinage, OP10P2 -45° ..... 75

Figure 3.16 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance sur centre d'usinage, OP20P2 45° ..... 76

Figure 3.17 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe sur centre d'usinage, OP20P2 45° ..... 76

Figure 3.18 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance sur centre d'usinage, OP20P2 45° ..... 77

Figure 3.19 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe sur centre d'usinage, OP20P2 45° ..... 77

Figure 3.20 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP10P4 45° CR10 Y ..... 79

Figure 3.21 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP10P4 45° CR10 Y ..... 79

Figure 3.22 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP10P4 45° CR10 Y ..... 79

Figure 3.23 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP10P4 45° CR10 Y ..... 80

Figure 3.24 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP20P4 -45° CR20 X ..... 81

Figure 3.25 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP20P4 -45° CR20 X ..... 81

Figure 3.26 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP20P4 -45° CR20 X ..... 82

Figure 3.27 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP20P4 -45° CR20 X ..... 82

Figure 3.28 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP30P3 45° CR20 X ..... 83

Figure 3.29 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP30P3 45° CR20 X ..... 84

Figure 3.30 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP30P3 45° CR20 X ..... 84

Figure 3.31 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP30P3 45° CR20 X ..... 84

Figure 3.32 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP30P3 -45° CR20 X ..... 86

Figure 3.33 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP30P3 -45° CR20 X ..... 86

Figure 3.34 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP30P3 -45° CR20 X ..... 86

Figure 3.35 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP30P3 -45° CR20 X ..... 87

Figure 3.36 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P5 45° CR10 Y ..... 88

Figure 3.37 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P5 45° CR10 Y ..... 88

Figure 3.38 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P5 45° CR10 Y ..... 88

Figure 3.39 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P5 45° CR10 Y ..... 89

Figure 3.40 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P5 -45° CR10 X ..... 90

Figure 3.41 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P5 -45° CR10 X ..... 90

Figure 3.42 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P5 -45° CR10 X ..... 91

Figure 3.43 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P5 -45° CR10 X ..... 91

Figure 3.44 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P5 -45° CR20 X ..... 92

Figure 3.45 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P5 -45° CR20 X ..... 92

Figure 3.46 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P5 -45° CR20 X ..... 93

Figure 3.47 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P5 -45° CR20 X ..... 93

Figure 3.48 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P5 45° CR20 Y ..... 94

Figure 3.49 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P5 45° CR20 Y ..... 94

Figure 3.50 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P5 45° CR20 Y ..... 95

Figure 3.51 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P5 45° CR20 Y ..... 95

Figure 3.52 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P6 -45° CR10 Y ..... 96

Figure 3.53 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P6 -45° CR10 Y ..... 96

Figure 3.54 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P6 -45° CR10 Y ..... 97

Figure 3.55 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P6 -45° CR10 Y ..... 97

Figure 3.56 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P6 45° CR10 X ..... 98

Figure 3.57 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P6 45° CR10 X ..... 98

Figure 3.58 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P6 45° CR10 X ..... 99

Figure 3.59 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P6 45° CR10 X ..... 99

Figure 3.60 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P6 45° CR20 X ..... 100

Figure 3.61 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P6 45° CR20 X ..... 100

Figure 3.62 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P6 45° CR20 X ..... 101

Figure 3.63 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P6 45° CR20 X ..... 101

Figure 3.64 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P6 -45° CR20 Y ..... 102

Figure 3.65 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P6 -45° CR20 Y ..... 102

Figure 3.66 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P6 -45° CR20 Y ..... 103

Figure 3.67 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P6 -45° CR20 Y ..... 103

Figure 3.68 Directions d'avance de mesures de la rugosité ..... 104

Figure 3.69 Montage du profilomètre et du microscope pour la mesure de rugosité ..... 106

Figure 3.70 Images du microscope lors de mesure de la rugosité ..... 106

Figure 3.71 Vue normale de la surface détourée en opposition de l'OP10P1 45° CR10 Y avec un grossissement de 100 ..... 108

Figure 3.72 Surfaces rainurées et mesurées de l'OP10P1 et de l'OP20P1 ..... 109

Figure 3.73 Surfaces rainurées et mesurées de l'OP10P2 sur centre d'usinage ..... 110

Figure 3.74 Ra en fonction de la vitesse d'avance pour l'OP10P1, l'OP20P1 et l'OP10P2 (centre d'usinage) ..... 111

Figure 3.75 Ra sans les données aberrantes en fonction de la vitesse d'avance pour l'OP10P1, l'OP20P1 et l'OP10P2 (centre d'usinage) ..... 111

Figure 3.76 Ra en fonction de la vitesse de coupe pour l'OP10P1, l'OP20P1 et l'OP10P2 (centre d'usinage) ..... 112

Figure 3.77 Rt en fonction de la vitesse d'avance pour l'OP10P1, l'OP20P1 et l'OP10P2 (centre d'usinage) ..... 112

Figure 3.78 Rt en fonction de la vitesse de coupe pour l'OP10P1, l'OP20P1 et l'OP10P2 (centre d'usinage) ..... 113

Figure 3.79 Ra (µm) pour l'OP10P1, l'OP20P1 et l'OP20P1 ..... 113

Figure 3.80 Rt (µm) pour l'OP10P1, l'OP20P1 et l'OP20P1 ..... 114

Figure 3.81 Moyenne et écarts types de Ra pour chaque orientation de pli (°) ..... 115

Figure 3.82 Moyenne et écarts types de Rt pour chaque orientation de pli (°) ..... 116

Figure 3.83 Moyenne et écarts types de Ra pour chaque opération de rainurage ..... 116

Figure 3.84 Moyenne et écarts types de Rt pour chaque opération de rainurage ..... 117

Figure 3.85 Ra en fonction de la vitesse d'avance pour une orientation de pli de -45° ..... 117

Figure 3.86 Rt en fonction de la vitesse d'avance pour une orientation de pli de -45° ..... 118

Figure 3.87 Ra en fonction de la vitesse d'avance pour un pli orienté à 45° ..... 118

Figure 3.88 Rt en fonction de la vitesse d'avance pour un pli orienté à 45° ..... 119

Figure 3.89 Ra en fonction de la vitesse de coupe pour un pli orienté à -45° ..... 119

Figure 3.90 Rt en fonction de la vitesse de coupe pour un pli orienté à -45° ..... 120

Figure 3.91 Ra en fonction de la vitesse de coupe pour un pli orienté à 45° ..... 120

Figure 3.92 Rt en fonction de la vitesse de coupe pour un pli orienté à 45° ..... 121

Figure 3.93 Microscope Keyence VHX-500FE du laboratoire de métrologie de l'ÉTS ..... 123

Figure 3.94 Microscope Keyence VHX 2000 du laboratoire de composite du CTA ..... 123

Figure 3.95 Vue normale aux plis d'un échantillon par le microscope VHX 2000 ..... 124

Figure 3.96 Échantillon CFRP rainuré et installé sur le gabarit d'usinage sur le pli inférieur avec le pli noir supérieur visible ..... 125

Figure 3.97 Les trois zones : entrée, centrale et sortie par échantillon rainuré ..... 125

Figure 3.98 Observation de fibres non coupées (FNC) normales aux plis du stratifié, a) Installation de l'échantillon sous la lentille du microscope b) Mesure de FNC normales aux plis du stratifié ..... 126

Figure 3.99 Mesure de fibres non coupées (FNC) normales aux plis de surface ..... 127

Figure 3.100 Observation de fibres non coupées (FNC) normales à la surface de coupe a) Installation de l'échantillon sous la lentille du microscope b) Mesure de FNC normale à la surface rainurée c) Mesure de FNC normale à la surface rainurée ..... 128

Figure 3.101 Mesure d'arrachement de matière (ARM) normale à la surface de coupe ..... 129

Figure 3.102 LM de FNC normales au pli supérieur au centre, OP10P1 45° CR10 Y ..... 130

Figure 3.103 NM de FNC normales au pli supérieur au centre, OP10P1 45° CR10 Y ..... 131

Figure 3.104 LM de FNC normales à la surface rainurée au centre, OP10P1 45° CR10 Y ..... 132

Figure 3.105 NM de FNC normales à la surface rainurée au centre, OP10P1 45° CR10 Y ..... 132

Figure 3.106 LM d'ARM normale à la surface rainurée, OP10P1 45° CR10 Y ..... 133

Figure 3.107 NM d'ARM normale à la surface rainurée, OP10P1 45° CR10 Y ..... 133

Figure 3.108 LM d'ARM du pli supérieur au centre, OP20P1 -45° CR20 X ..... 136

Figure 3.109 NM d'ARM du pli supérieur au centre, OP20P1 -45° CR20 X ..... 136

Figure 3.110 LM d'ARM du pli supérieur en sortie, OP20P1 -45° CR20 X ..... 137

Figure 3.111 NM d'ARM du pli supérieur en sortie, OP20P1 -45° CR20 X ..... 137

Figure 3.112 Arrachement de matière (ARM) en avalant et en sortie à 0.46 mm/rev et 200 m/min, OP20P1 -45° CR20 X ..... 137

Figure 3.113 Délamination en sortie du pli inférieur de l'OP10P2 -45° a) ARM à 650 m/min et 0.46 mm/rev b) FNC normales au pli inférieur à 650 m/min et 0.36 mm/rev ..... 140

Figure 3.114 LM d'ARM du pli supérieur au centre de l'OP10P2 -45° ..... 142

Figure 3.115 NM d'ARM du pli supérieur au centre de l'OP10P2 -45° ..... 142

Figure 3.116 LM d'ARM du pli supérieur en sortie de l'OP10P2 -45° ..... 142

Figure 3.117 NM d'ARM du pli supérieur en sortie de l'OP10P2 -45° ..... 143

Figure 3.118 LM de FNC normales au pli supérieur au centre, OP20P2 45° ..... 145

Figure 3.119 NM de FNC normales au pli supérieur au centre, OP20P2 45° ..... 145

Figure 3.120 LM de FNC normales au pli supérieur en sortie, OP20P2 45° ..... 145

Figure 3.121 NM de FNC normales au pli supérieur en sortie, OP20P2 45° ..... 146

Figure 3.122 LM de FNC normales à la surface rainurée au centre, OP20P2 45° ..... 146

Figure 3.123 NM de FNC normales à la surface rainurée au centre, OP20P2 45° ..... 146

Figure 3.124 LM d'ARM normaux à la surface rainurée au centre, OP20P2 45° ..... 147

Figure 3.125 NM d'ARM normaux à la surface rainurée au centre, OP20P2 45° ..... 147

Figure 3.126 LM de FNC normales au pli supérieur en entrée, OP10P4 45° CR10 Y ..... 149

Figure 3.127 NM de FNC normales au pli supérieur en entrée, OP10P4 45° CR10 Y ..... 149

Figure 3.128 LM de FNC normales au pli supérieur au centre, OP10P4 45° CR10 Y ..... 150

Figure 3.129 NM de FNC normales au pli supérieur au centre, OP10P4 45° CR10 Y ..... 150

Figure 3.130 LM de FNC normales au pli supérieur en sortie, OP10P4 45° CR10 Y ..... 150

Figure 3.131 NM de FNC normales au pli supérieur en sortie, OP10P4 45° CR10 Y ..... 151

Figure 3.132 LM de FNC normales à la surface rainurée en entrée, OP10P4 45° CR10 Y ..... 151

Figure 3.133 NM de FNC normales à la surface rainurée en entrée, OP10P4 45° CR10 Y ..... 152

Figure 3.134 LM de FNC normales à la surface rainurée au centre, OP10P4 45° CR10 Y ..... 152

Figure 3.135 NM de FNC normales à la surface rainurée au centre, OP10P4 45° CR10 Y ..... 152

Figure 3.136 LM de FNC normales à la surface rainurée en sortie, OP10P4 45° CR10 Y ..... 153

Figure 3.137 NM de FNC normales à la surface rainurée en sortie, OP10P4 45° CR10 Y ..... 153

Figure 3.138 LM d'ARM normales à la surface rainurée en entrée, OP10P4 45° CR10 Y ..... 154

Figure 3.139 NM d'ARM normales à la surface rainurée en entrée, OP10P4 45° CR10 Y ..... 154

Figure 3.140 LM d'ARM normales à la surface rainurée au centre, OP10P4 45° CR10 Y ..... 154

Figure 3.141 NM d'ARM normales à la surface rainurée au centre, OP10P4 45° CR10 Y ..... 155

Figure 3.142 LM d'ARM normales à la surface rainurée en sortie, OP10P4 45° CR10 Y ..... 155

Figure 3.143 NM d'ARM normales à la surface rainurée en sortie, OP10P4 45° CR10 Y ..... 155

Figure 3.144 FNC délaminées au-delà de la surface rainurée en avalant pour 200 m/min et 0.41 mm/rev, OP10P4 45° CR10 Y ..... 156

Figure 3.145 LM d'ARM normales à la surface rainurée en entrée, OP20P4 -45° CR20 X ..... 159

Figure 3.146 NM d'ARM normales à la surface rainurée en entrée, OP20P4 -45° CR20 X ..... 160

Figure 3.147 LM d'ARM normales à la surface rainurée au centre, OP20P4 -45° CR20 X ..... 160

Figure 3.148 NM d'ARM normales à la surface rainurée au centre, OP20P4 -45° CR20 X ..... 160

Figure 3.149 LM d'ARM normales à la surface rainurée en sortie, OP20P4 -45° CR20 X ..... 161

Figure 3.150 LM d'ARM normales à la surface rainurée en sortie, OP20P4 -45° CR20 X ..... 161

Figure 3.151 LM de FNC normales au pli supérieur en entrée, OP30P3 45° CR20 X ..... 163

Figure 3.152 NM de FNC normales au pli supérieur en entrée, OP30P3 45° CR20 X ..... 163

Figure 3.153 LM de FNC normales au pli supérieur au centre, OP30P3 45° CR20 X ..... 164

Figure 3.154 NM de FNC normales au pli supérieur au centre, OP30P3 45° CR20 X ..... 164

Figure 3.155 LM de FNC normales au pli supérieur en sortie, OP30P3 45° CR20 X ..... 164

Figure 3.156 NM de FNC normales au pli supérieur en sortie, OP30P3 45° CR20 X ..... 165

Figure 3.157 LM de FNC normales à la surface rainurée en entrée, OP30P3 45° CR20 X ..... 165

Figure 3.158 NM de FNC normales à la surface rainurée en entrée, OP30P3 45° CR20 X ..... 165

Figure 3.159 LM de FNC normales à la surface rainurée au centre, OP30P3 45° CR20 X ..... 166

Figure 3.160 NM de FNC normales à la surface rainurée au centre, OP30P3 45° CR20 X ..... 166

Figure 3.161 LM de FNC normales à la surface rainurée en sortie, OP30P3 45° CR20 X ..... 166

Figure 3.162 NM de FNC normales à la surface rainurée en sortie, OP30P3 45° CR20 X ..... 167

Figure 3.163 LM d'ARM normal à la surface rainurée en entrée de l'OP30P3 -45° CR20 X..... 169

Figure 3.164 NM d'ARM normal à la surface rainurée en entrée de l'OP30P3 -45° CR20 X..... 170

Figure 3.165 LM d'ARM normal à la surface rainurée au centre de l'OP30P3 -45° CR20 X..... 170

Figure 3.166 NM d'ARM normal à la surface rainurée au centre de l'OP30P3 -45° CR20 X..... 170

Figure 3.167 LM d'ARM normal à la surface rainurée en sortie de l'OP30P3 -45° CR20 X..... 171

Figure 3.168 NM d'ARM normal à la surface rainurée en sortie de l'OP30P3 -45° CR20 X..... 171

Figure 3.169 FNC d'échantillons rainurés de l'OP50P5 45° CR10 Y (rainures horizontales dans la vue). ..... 173

Figure 3.170 LM de l'ARM du pli supérieur en entrée de l'OP50P5 45° CR10 Y ..... 174

Figure 3.171 NM de l'ARM du pli supérieur en entrée de l'OP50P5 45° CR10 Y ..... 175

Figure 3.172 LM de l'ARM du pli supérieur au centre de l'OP50P5 45° CR10 Y ..... 175

Figure 3.173 NM de l'ARM du pli supérieur au centre de l'OP50P5 45° CR10 Y ..... 175

Figure 3.174 LM de l'ARM du pli supérieur en sortie de l'OP50P5 45° CR10 Y ..... 176

Figure 3.175 NM de l'ARM du pli supérieur en sortie de l'OP50P5 45° CR10 Y ..... 176

Figure 3.176 LM de l'ARM du pli supérieur en entrée de l'OP50P5 -45° CR10 X ..... 178

Figure 3.177 NM de l'ARM du pli supérieur en entrée de l'OP50P5 -45° CR10 X ..... 178

Figure 3.178 LM de l'ARM du pli supérieur au centre de l'OP50P5 -45° CR10 X ..... 178

Figure 3.179 NM de l'ARM du pli supérieur au centre de l'OP50P5 -45° CR10 X ..... 179

Figure 3.180 LM de l'ARM du pli supérieur en sortie de l'OP50P5 -45° CR10 X ..... 179

Figure 3.181 NM de l'ARM du pli supérieur en sortie de l'OP50P5 -45° CR10 X ..... 179

Figure 3.182 LM de l'ARM du pli supérieur en entrée de l'OP50P5 -45° CR20 X ..... 181

Figure 3.183 NM de l'ARM du pli supérieur en entrée de l'OP50P5 -45° CR20 X ..... 181

Figure 3.184 LM de l'ARM du pli supérieur au centre de l'OP50P5 -45° CR20 X ..... 182

Figure 3.185 NM de l'ARM du pli supérieur au centre de l'OP50P5 -45° CR20 X ..... 182

Figure 3.186 LM de l'ARM du pli supérieur en sortie de l'OP50P5 -45° CR20 X ..... 182

Figure 3.187 NM de l'ARM du pli supérieur en sortie de l'OP50P5 -45° CR20 X ..... 183

Figure 3.188 LM de FNC normales au pli supérieur en entrée de l'OP50P5 45° CR20 Y ..... 184

Figure 3.189 NM de FNC normales au pli supérieur en entrée de l'OP50P5 45° CR20 Y ..... 185

Figure 3.190 LM de FNC normales au pli supérieur au centre de l'OP50P5 45° CR20 Y ..... 185

Figure 3.191 NM de FNC normales au pli supérieur au centre de l'OP50P5 45° CR20 Y ..... 185

Figure 3.192 LM de FNC normales au pli supérieur en sortie de l'OP50P5 45° CR20 Y ..... 186

Figure 3.193 NM de FNC normales au pli supérieur en sortie de l'OP50P5 45° CR20 Y ..... 186

Figure 3.194 LM de FNC normales à la surface rainurée en entrée de l'OP50P5 45° CR20 Y ..... 186

Figure 3.195 NM de FNC normales à la surface rainurée en entrée de l'OP50P5 45° CR20 Y ..... 187

Figure 3.196 LM de FNC normales à la surface rainurée au centre de l'OP50P5 45° CR20 Y ..... 187

Figure 3.197 NM de FNC normales à la surface rainurée au centre de l'OP50P5 45° CR20 Y ..... 187

Figure 3.198 LM de FNC normales à la surface rainurée en sortie de l'OP50P5 45° CR20 Y ..... 188

Figure 3.199 NM de FNC normales à la surface rainurée en sortie de l'OP50P5 45° CR20 Y ..... 188

Figure 3.200 LM de l'ARM en entrée de l'OP50P5 45° CR20 Y ..... 188

Figure 3.201 NM de l'ARM en entrée de l'OP50P5 45° CR20 Y ..... 189

Figure 3.202 LM de l'ARM au centre de l'OP50P5 45° CR20 Y ..... 189

Figure 3.203 NM de l'ARM au centre de l'OP50P5 45° CR20 Y ..... 189

Figure 3.204 LM de l'ARM en sortie de l'OP50P5 45° CR20 Y ..... 190

Figure 3.205 NM de l'ARM en sortie de l'OP50P5 45° CR20 Y ..... 190

Figure 3.206 LM de l'ARM en entrée de l'OP50P6 -45° CR10 Y ..... 192

Figure 3.207 NM de l'ARM en entrée de l'OP50P6 -45° CR10 Y ..... 192

Figure 3.208 LM de l'ARM au centre de l'OP50P6 -45° CR10 Y ..... 192

Figure 3.209 NM de l'ARM au centre de l'OP50P6 -45° CR10 Y ..... 193

Figure 3.210 LM de l'ARM en sortie de l'OP50P6 -45° CR10 Y ..... 193

Figure 3.211 NM de l'ARM en sortie de l'OP50P6 -45° CR10 Y ..... 193

Figure 3.212 FNC de l'OP50P5 45° CR10 X d'une longueur plus importante en opposition (Rainures verticales rainurées du haut vers le bas) ..... 195

Figure 3.213 LM de FNC normales au pli supérieur en entrée de l'OP50P6 45° CR10 X ..... 196

Figure 3.214 NM de FNC normales au pli supérieur en entrée de l'OP50P6 45° CR10 X ..... 196

Figure 3.215 LM de FNC normales au pli supérieur au centre de l'OP50P6 45° CR10 X ..... 196

Figure 3.216 NM de FNC normales au pli supérieur au centre de l'OP50P6 45° CR10 X ..... 197

Figure 3.217 LM de FNC normales au pli supérieur en sortie de l'OP50P6 45° CR10 X ..... 197

Figure 3.218 NM de FNC normales au pli supérieur en sortie de l'OP50P6 45° CR10 X ..... 197

Figure 3.219 LM de FNC normales à la surface rainurée en entrée de l'OP50P6 45° CR10 X ..... 198

Figure 3.220 NM de FNC normales à la surface rainurée en entrée de l'OP50P6 45° CR10 X ..... 198

Figure 3.221 LM de FNC normales à la surface rainurée au centre de l'OP50P6 45° CR10 X ..... 198

Figure 3.222 NM de FNC normales à la surface rainurée au centre de l'OP50P6 45° CR10 X ..... 199

Figure 3.223 LM de FNC normales à la surface rainurée en sortie de l'OP50P6 45° CR10 X ..... 199

Figure 3.224 NM de FNC normales à la surface rainurée en sortie de l'OP50P6 45° CR10 X ..... 199

Figure 3.225 LM de l'ARM en entrée de l'OP50P6 45° CR10 X ..... 200

Figure 3.226 NM de l'ARM en entrée de l'OP50P6 45° CR10 X ..... 200

Figure 3.227 LM de l'ARM au centre de l'OP50P6 45° CR10 X ..... 201

Figure 3.228 NM de l'ARM au centre de l'OP50P6 45° CR10 X ..... 201

Figure 3.229 LM de l'ARM en sortie de l'OP50P6 45° CR10 X ..... 201

Figure 3.230 NM de l'ARM en sortie de l'OP50P6 45° CR10 X ..... 202

Figure 3.231 LM de FNC normales à la surface rainurée en entrée de l'OP50P6 45° CR20 X ..... 204

Figure 3.232 NM de FNC normales à la surface rainurée en entrée de l'OP50P6 45° CR20 X ..... 205

Figure 3.233 LM de FNC normales à la surface rainurée au centre de l'OP50P6 45° CR20 X ..... 205

Figure 3.234 NM de FNC normales à la surface rainurée au centre de l'OP50P6 45° CR20 X ..... 205

Figure 3.235 LM de FNC normales à la surface rainurée en sortie de l'OP50P6 45° CR20 X ..... 206

Figure 3.236 NM de FNC normales à la surface rainurée en sortie de l'OP50P6 45° CR20 X ..... 206

Figure 3.237 LM de l'ARM du pli supérieur en entrée de l'OP50P5 -45° CR20 Y ..... 209

Figure 3.238 NM de l'ARM du pli supérieur en entrée de l'OP50P5 -45° CR20 Y ..... 209

Figure 3.239 LM de l'ARM du pli supérieur au centre de l'OP50P5 -45° CR20 Y ..... 210

Figure 3.240 NM de l'ARM du pli supérieur au centre de l'OP50P5 -45° CR20 Y ..... 210

Figure 3.241 LM de l'ARM du pli supérieur en sortie de l'OP50P5 -45° CR20 Y ..... 210

Figure 3.242 NM de l'ARM du pli supérieur en sortie de l'OP50P5 -45° CR20 Y ..... 211

Figure 4.1 Efforts d'avance moyens en fonction de la vitesse d'avance pour les opérations des plaques P1, P2(centre d'usinage), P3 et P4 ..... 216

Figure 4.2 Efforts d'avance moyens en fonction de la vitesse de coupe pour les opérations des plaques P1, P2(centre d'usinage), P3 et P4 ..... 216

Figure 4.3 Efforts normaux moyens en fonction de la vitesse d'avance pour les opérations des plaques P1, P2 (centre d'usinage), P3 et P4 ..... 217

Figure 4.4 Efforts normaux moyens en fonction de la vitesse de coupe pour les opérations des plaques P1, P2 (centre d'usinage), P3 et P4 ..... 217

Figure 4.5 Efforts d'avance moyens en fonction de la vitesse d'avance pour les opérations des plaques P3, P5 et P6 ..... 219

Figure 4.6 Efforts d'avance moyens en fonction de la vitesse de coupe pour les opérations des plaques P3, P5 et P6 ..... 219

Figure 4.7 Efforts normaux moyens en fonction de la vitesse d'avance pour les opérations des plaques P3, P5 et P6 ..... 220

Figure 4.8 Efforts normaux moyens en fonction de la vitesse de coupe pour les opérations des plaques P3, P5 et P6 ..... 220

Figure 4.9 Coefficient de détermination ($R^2$) des équations de régression linéaire des forces moyennes en fonction de la vitesse d'avance pour chaque opération ..... 221

Figure 4.10 Coefficient de détermination ($R^2$) des équations de régression linéaire des forces moyennes en fonction de la vitesse de coupe pour chaque opération ..... 221

Figure 4.11 Analyse de variance des efforts normaux moyens des opérations des plaques P5 et P6 ..... 223

Figure 4.12 Interaction entre la configuration du robot et la direction de rainurage sur les efforts normaux moyens des opérations des plaques P5 et P6 ..... 224

Figure 4.13 ANOVA graphique pour Ra et une orientation du pli à -45°, OP10P1 CR10 et OP10P2 sur centre d'usinage ..... 229

Figure 4.14 Interaction entre la vitesse d'avance (Va) et les opérations pour des valeurs moyennes de Ra et un pli orienté à -45° ..... 229

Figure 4.15 ANOVA graphique pour Rt et une orientation du pli à -45°, OP10P1 CR10 et OP10P2 sur centre d'usinage ..... 230

Figure 4.16 Interaction entre la vitesse d'avance (Va) et les opérations pour des valeurs moyennes de Rt et un pli orienté à -45° ..... 231

Figure 4.17 ANOVA graphique pour Ra et une orientation du pli à 45°, OP10P1 CR10 et OP10P2 sur centre d'usinage ..... 233

Figure 4.18 Interaction entre la vitesse d'avance (Va) et les opérations pour des valeurs moyennes de Ra et un pli orienté à 45° ..... 234

Figure 4.19 Interaction entre la vitesse de coupe (Vc) et les opérations pour des valeurs moyennes de Ra et un pli orienté à 45° ..... 234

Figure 4.20 ANOVA graphique pour Rt mesuré sur un pli orienté à 45° de l'OP10P1 CR10 et l'OP10P2 sur centre d'usinage ..... 236

Figure 4.21 Interaction entre la vitesse de coupe (Vc) et les opérations pour des valeurs moyennes de Rt mesurées sur un pli orienté à 45° ..... 236

Figure 4.22 Pourcentage (%) des échantillons rainurés présentant des FNC pour un pli orienté à 45° ..... 239

Figure 4.23 Pourcentage (%) des échantillons rainurés présentant des ARM pour un pli de surface orienté à —45° ..... 240

Figure 4.24 Longueur moyenne (mm) d'ARM au centre par mode de coupe en fonction des opérations ..... 240

Figure 4.25 ANOVA graphique pour la longueur moyenne des FNC en avalant au centre et au pli supérieur de l'OP10P4 45° CR10 Y ..... 242

Figure 4.26 Moyennes et intervalles de confiance de la longueur moyenne de FNC en avalant de l'OP10P4 45° CR10 Y en fonction de la vitesse d'avance ..... 243

Figure 4.27 Moyennes et intervalles de confiance de la longueur moyenne de FNC en avalant de l'OP10P4 45° CR10 Y en fonction de la vitesse de coupe ..... 243

Figure 4.28 ANOVA graphique pour la longueur moyenne d'ARM en opposition au centre et au pli supérieur des plaques P1, P2 et P4 pour un pli de surface orienté à -45° ..... 245

Figure 4.29 Moyennes et intervalles de confiance de la longueur moyenne d'ARM en opposition des plaques P1, P2 et P4 pour un pli orienté à -45° en fonction de la vitesse d'avance ..... 246

Figure 4.30 ANOVA graphique pour la longueur moyenne d'ARM au centre et au pli supérieur des plaques P3, P5 et P6 pour un pli de surface orienté à -45° ..... 248

## LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

| | |
|---|---|
| CFRP | Carbon fiber reinforced polymer (Fibres de carbone renforcées de polymère) |
| TCP | Tool center point (Centre de l'outil) |
| DDL | Degré de liberté |
| ISO | Organisation internationale de normalisation |
| ANSI | American national standards institute |
| OP## | Opération de rainurage suivie du numéro à deux chiffres. |
| P# | Plaque stratifiée rainurée suivie du numéro à un chiffre |
| CR## | Configuration du robot suivie du numéro à deux chiffres |
| PCD | Polycrystalline diamond (Diamant polycristallin) |
| AFP | Automated fiber placement (Placement de fibres automatisé) |
| FNC | Fibres non coupées |
| ARM | Arrachement de matière |
| LM | Longueur moyenne |
| NM | Nombre de mesures |
| Dir | Direction de rainuage dans la cellule robotisée |

## LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

| | |
|---|---|
| $i$ | Le i - nième point d'une trajectoire numérique parcouru par le TCP. |
| $n$ | Le nombre de points d'une trajectoire numérique parcourus par le TCP. |
| $\gamma_i$ | Angle entre un axe lié au corps de la broche et la direction d'avance de l'outil pour une trajectoire numérique, Figure 1.16. |
| Vc | Vitesse de coupe (m/min) |
| Va | Vitesse d'avance (mm/rev) |

# INTRODUCTION

Le robot sériel à grand degré de liberté muni d'une broche pour le détourage gagne en popularité dans plusieurs industries. Ce robot possède un grand rayon d'opération et peut être installé sur un rail linéaire pour bonifier son aire de travail. De plus, la redondance de tâche (Conkur et Buckingham, 1997) de ces robots sériels permet le détourage de composantes à géométries complexes et de grandes dimensions à un coût inférieur à un centre d'usinage numérique à axe linéaire de grande envergure. Cependant, la qualité de détourage à l'échelle industrielle de ces robots doit continuer à être optimisée pour répondre aux besoins du domaine aéronautique.

L'objectif du présent travail est de caractériser la qualité de détourage robotisé de stratifié quasi isotrope à plis unidirectionnels composés de fibre de carbone et d'époxy. La qualité de surface rainurée est caractérisée en fonction des vitesses d'avance et de coupe, de l'orientation des plis de surface, de la configuration du robot et de la direction de rainurage dans la cellule robotisée. Un second objectif est de déterminer si la qualité de rainurage robotisée diffère de celle obtenue sur centre d'usinage pour les mêmes vitesses et la même orientation des plis de surface du stratifié. Les efforts de coupe, la rugosité de la surface rainurée et la délamination de surface sont acquis pour caractériser la qualité de rainurage.

Au premier chapitre, la première section présente une revue littéraire sur la délamination de surface engendrée par le détourage de stratifiés composites carbone/époxy. La deuxième section est consacrée aux principaux facteurs qui influencent la qualité de l'usinage d'un robot sériel à six axes rotatifs. Au second chapitre, la méthodologie des opérations de rainurage robotisé et sur centre d'usinage est présentée en fonction des facteurs. Au troisième chapitre, les résultats des efforts de coupe, de la rugosité de surface et la délamination de surface sont présentés en fonction des opérations et de leurs facteurs. Au dernier chapitre, les analyses de variance et les discussions des résultats en fonction des facteurs sont présentées.

# CHAPITRE 1

# REVUE LITTÉRAIRE

Cette revue littéraire présente une première section sur la délamination de plis de surface engendrés par le détourage de stratifiés composés de fibres de carbone et d'époxy. La deuxième section est consacrée aux principaux facteurs qui influencent la qualité de l'usinage d'un robot sériel à six axes rotatifs.

## 1.1 La qualité de détourage de stratifiés de composites carbone/époxy (CFRP)

Le détourage de stratifiés peut engendrer de la délamination de surface hors tolérances et mener au rejet coûteux de la pièce. Il est ainsi important de comprendre les facteurs qui sont les plus influents sur l'occurrence de la délamination de surface. L'objectif de cette section est de présenter les différents types de délamination visuelle engendrée lors de détourage. Les facteurs influents sur l'occurrence et la propagation de la délamination de surface sont présentés pour comprendre les conditions de coupe propices à la délamination.

### 1.1.1 L'occurrence et la propagation de la délamination de surface

Plusieurs études expérimentales ont démontré que l'orientation des fibres d'un pli unidirectionnel par rapport à la surface détourée influence fortement le mécanisme de rupture des fibres et la délamination (Hagino et Inoue, 2013; Hintze, Hartmann et Schutte, 2011; Iliescu, 2008; Koplev, Lystrup et Vorm, 1983; Pecat, Rentsch et Brinksmeier, 2012; Pwu et Hocheng, 1998; Ramulu, 1997; Wang, Ramulu et Arola, 1995a; 1995b; Wang et Zhang, 2003). L'occurrence de délamination est aussi influencée par la géométrie de l'outil tel que la dimension du rayon de bec et l'angle d'hélice (Bérubé, 2012; Hagino et Inoue, 2013; Hintze, Hartmann et Schutte, 2011; Inoue et Hagino, 2013; Kaneeda, 1991; Wang et Zhang, 2003). L'usure de l'outil mène à une évolution de sa géométrie telle que l'augmentation du rayon de bec, qui influence à son tour la délamination de surface (Hamedanianpour et Chatelain, 2013; Hintze, Hartmann et Schutte, 2011; Inoue et Hagino, 2013; Pwu et Hocheng, 1998). La

délamination de surface est visible pour un rayon de bec de 45 µm et plus avec un outil PCD à angle d'hélice nul selon Hintze et coll. lors du détourage de stratifiés. Cependant, les outils en PCD sont très résistants à l'usure comparativement à d'autres matériaux pour le détourage de stratifié CFRP (Bérubé, 2012; Inoue et Hagino, 2013; Wang et al., 1995). Inoue et coll. ont effectué des essais de détourage d'un stratifié quasi isotrope de 21 plis composites carbone/époxy. Ils ont arrêté leurs essais lorsqu'une usure de la surface de dépouille de 0.2 mm est observée sur l'outil ou lorsque 30 m de détourage est atteint. L'outil PCD à angle d'hélice nul a été le plus résistant à l'usure et a généré les plus faibles délaminations et efforts de coupe, Figure 1.1 (Inoue et Hagino, 2013). Bérubé a comparé les performances d'outils pour le détourage de stratifié CFRP et l'outil PCD à angle d'hélice nul a aussi été retenu comme étant le plus performant. Pour ses qualités, l'outil PCD à angle d'hélice nul sera utilisé pour les essais expérimentaux de détourage avec cellule robotisée.

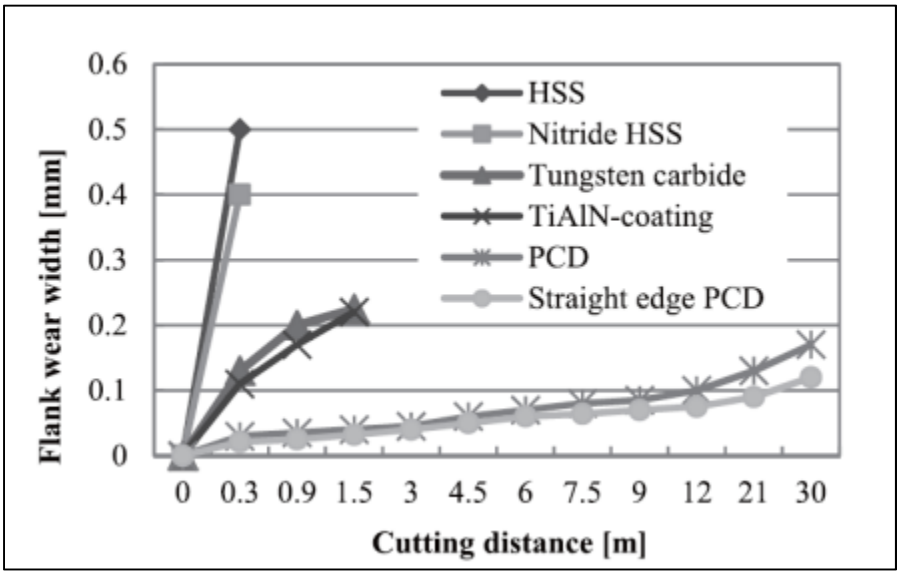



Figure 1.1 Usure de la surface de dépouille (mm) par outil en fonction de la distance détourée d'un stratifié quasi isotrope
Tirée de (Inoue et Hagino, 2013)

Outre l'influence de l'orientation du pli et de la géométrie de l'outil, la vitesse d'avance est le facteur le plus influent sur la délamination et la rugosité de surface détourées (Davim et Reis, 2005). Deux principaux types de délamination de surface sont observés lors du détourage de

stratifiés quasi isotropes à plis unidirectionnels : les fibres non coupées (FNC) (Figure 1.2a, b, c) et l'arrachement de matière (ARM) (Figure 1.2d), (Bérubé, 2012; Hintze, Hartmann et Schutte, 2011; Ramulu, 1997). Le pli supérieur non supporté par le gabarit d'usinage est plus propice au délaminage apparent (Bérubé, 2012; Hintze, Hartmann et Schutte, 2011). Des fibres de carbone peuvent rester non coupées à la surface détourée telle qu'illustrée à la Figure 1.2 b). Lors de détourage, elles sont présentes surtout lorsque l'outil sort de la matière par un dégagement (Bérubé, 2012). Une image d'un microscope à balayage électronique des travaux de Bérubé présente un exemple d'arrachement de matière d'une surface détourée à la Figure 1.2 d).

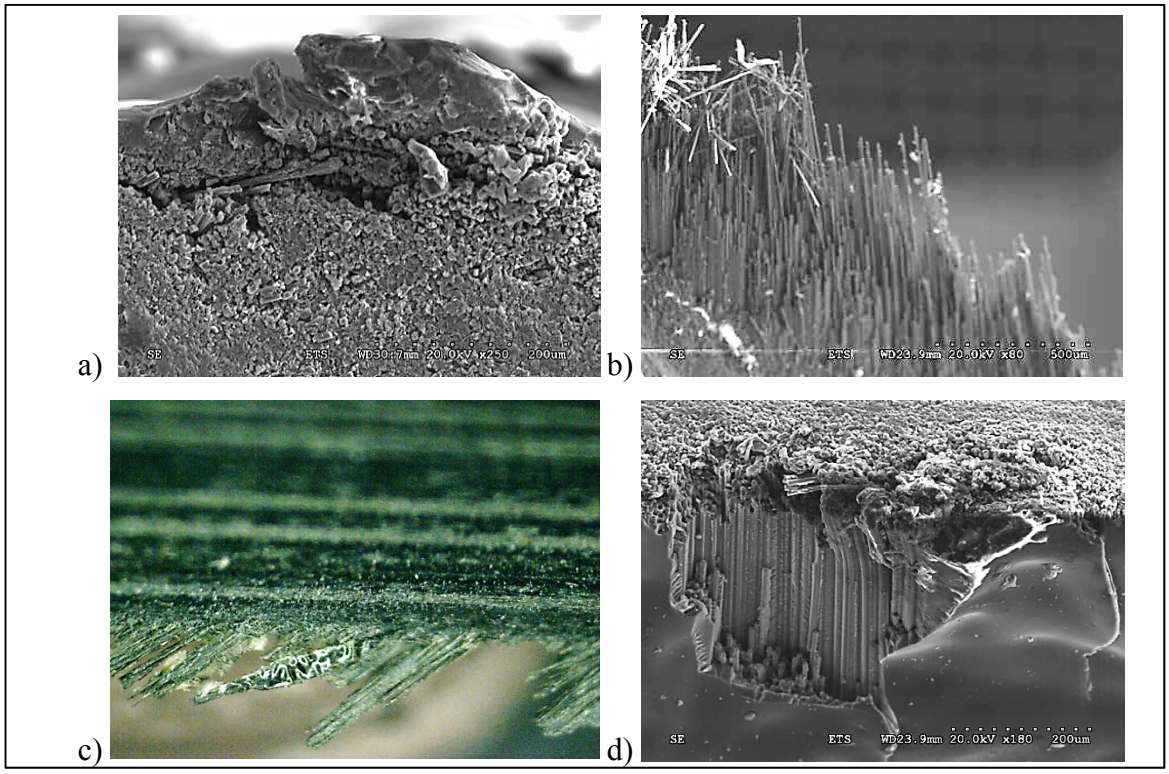



Figure 1.2 Types de délamination, Tirée de (Bérubé, 2012). a) Délamination d'un pli extérieur d'un stratifié. b) Fibres non coupées (FNC) normales à la surface détourée. c) Fibres non coupées (FNC) vues de l'intérieur de la face détourée. d) Arrachement de matières (ARM) d'un pli extérieur à l'arête de la surface détourée

#### 1.1.1.1 Les mécanismes de rupture des fibres

Les Figure 1.3 et Figure 1.4 présentent les mécanismes de rupture en fonction de l'orientation des fibres (Iliescu, 2008; Ramulu, 1997). Pour un angle de 0°, un premier mode de rupture est le chargement de la fibre suivie de la délamination entre la fibre et la matrice. Le second mode est le chargement de la fibre en flexion suivie de la rupture par flambage de la fibre normale à sa direction, Figure 1.3a (Iliescu et al., 2010; Iliescu, 2008; Ramulu, 1997). Pour un angle de 15° à 90°, il y a rupture de la fibre par cisaillement normal à la fibre suivie d'une rupture de la matrice par cisaillement le long des fibres contre l'outil (Iliescu et al., 2010; Iliescu, 2008; Ramulu, 1997; Wang et Zhang, 2003). Pour un pli d'une orientation négative de -45°, une rupture normale à la direction des fibres sous le niveau de la surface détourée est observée telle qu'illustrée à la Figure 1.3f (Iliescu et al., 2010; Iliescu, 2008; Ramulu, 1997; Wang et Zhang, 2003).

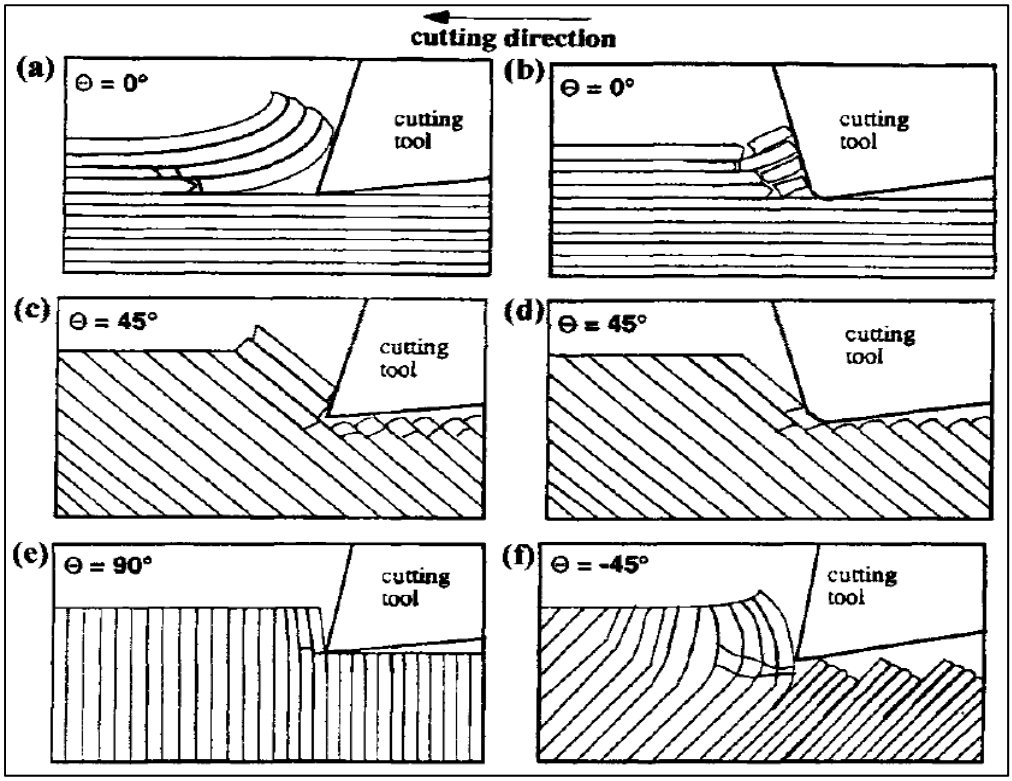



Figure 1.3 Mécanisme de coupe de détourage orthogonale en fonction de l'orientation de plis unidirectionnels Tirée de (Ramulu, 1997)

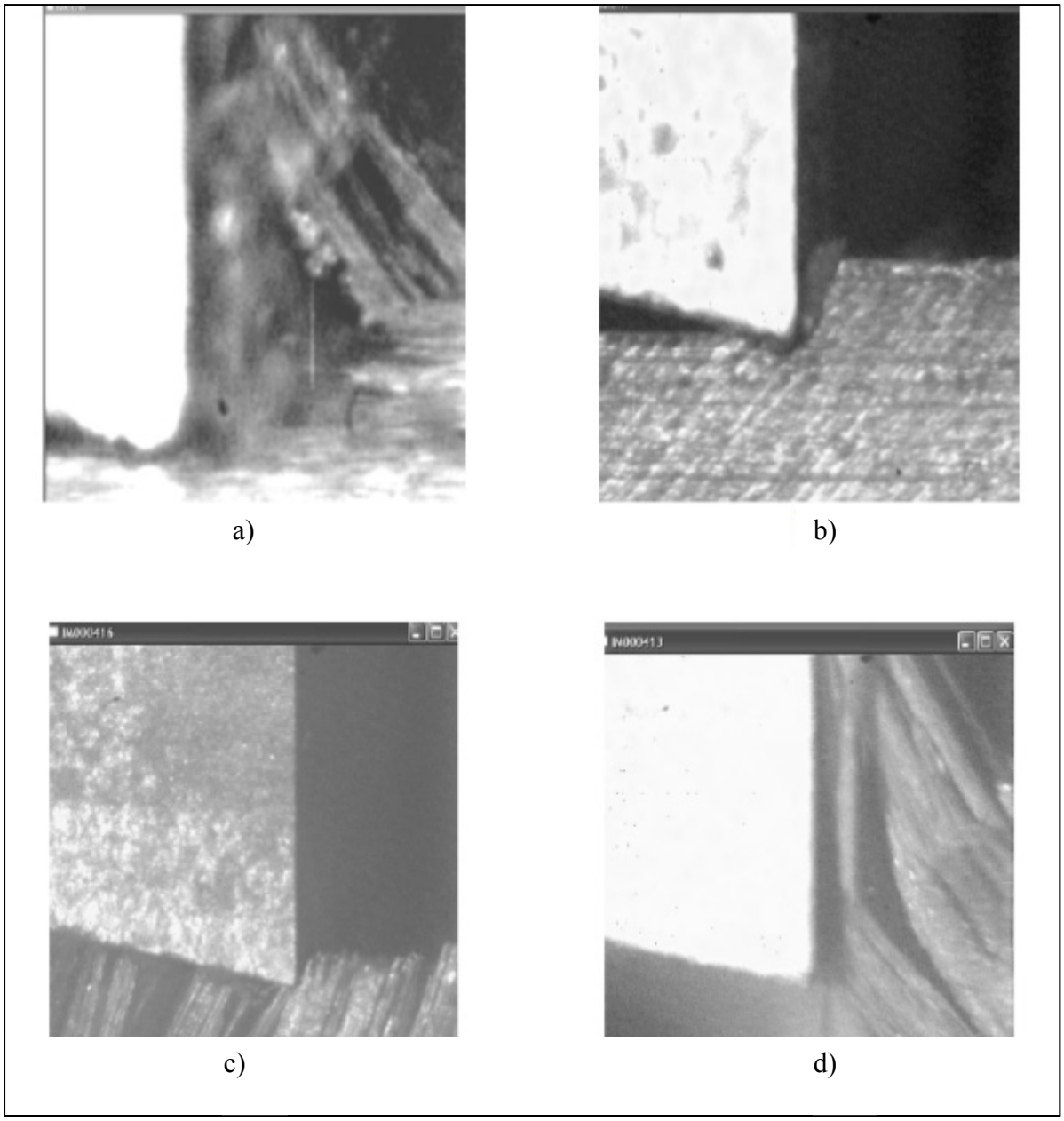



Figure 1.4 Image d'une caméra vidéo à haute vitesse de la formation du copeau pendant l'usinage de composites unidirectionnels a) orienté à 0°, b) orienté à 45°, c) orienté à 90°, d) orienté à -45° Tirée de (Iliescu, 2008)

L'angle de l'orientation des fibres entre la direction d'avance et la surface détourée est représenté par différentes méthodes dans la littérature, tel qu'illustré aux Figure 1.5 et Figure 1.6. Au cours de ces travaux, la nomenclature des Figure 1.3 et Figure 1.5 est utilisée pour représenter l'angle entre l'orientation d'un pli et la direction d'avance de l'outil soit 45° ou —45°.

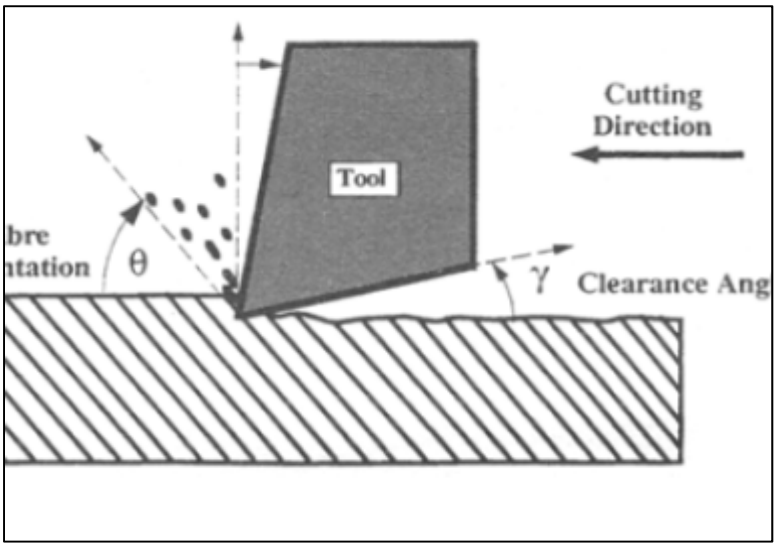



Figure 1.5 Angle de l'orientation du pli unidirectionnel ($\boldsymbol{\theta}$) de 45° (tel qu'illustré), 0°, 90° ou -45° Tirée de (Ramulu, 1997)

#### 1.1.1.2 Délamination de surface lors de détourage et de détourage

Pour éviter toute ambiguïté, il est important de départir deux types d'angle pour observer l'occurrence et la propagation de la délamination en détourage, (Hintze, Hartmann et Schutte, 2011). L'angle entre les fibres d'un pli unidirectionnel et la direction d'avance de l'outil est présenté à la Figure 1.6a. L'angle entre les fibres d'un pli unidirectionnel et la normale au rayon de l'outil est nommé angle de coupe des fibres par Hintze et coll. à la Figure 1.6b,c. Cette différence permet de visualiser la délamination de surface en fonction de l'angle de coupe à la suite d'essais expérimentaux de détourage. L'angle de coupe est variable entre la surface détourée en opposition et en avalant lors du détourage d'un pli unidirectionnel de surface tel qu'illustré à la Figure 1.6c.

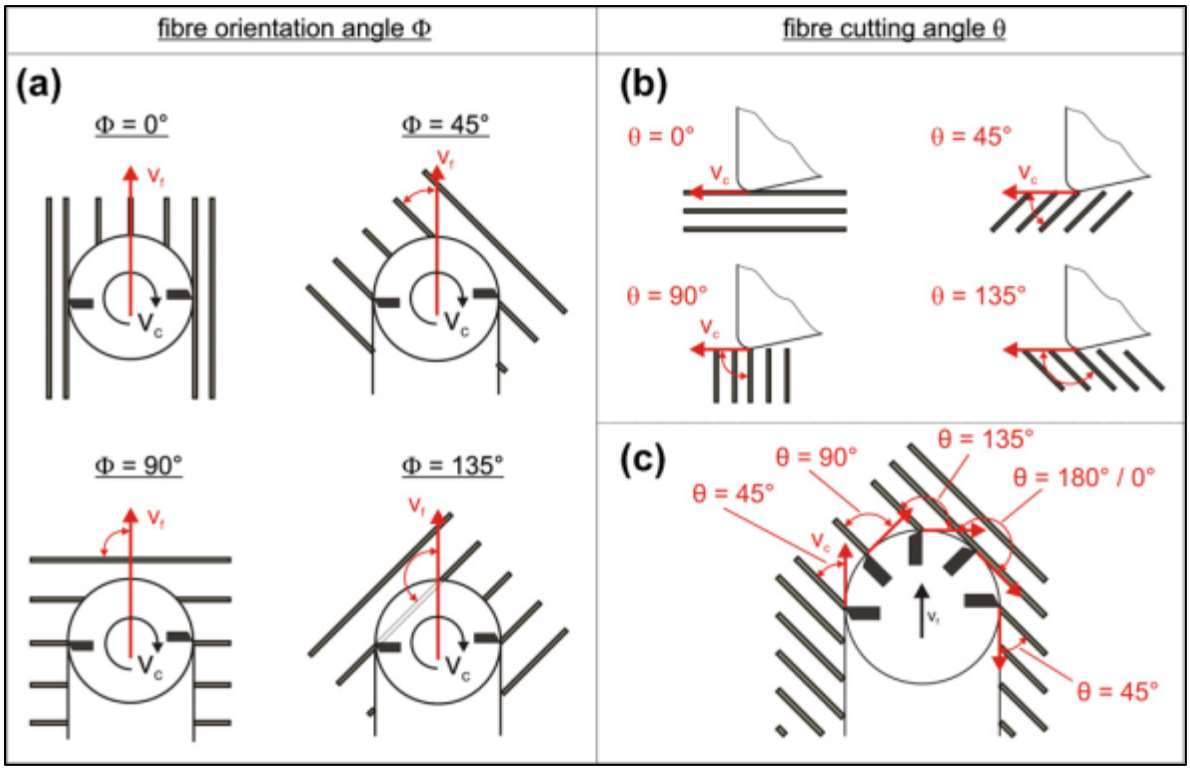



Figure 1.6 a) Angle d'orientation des fibres. b) et c) Angle de coupe des fibres, Tirée de (Hintze, Hartmann et Schutte, 2011)

Hintze et coll. ont effectué des rainurages de stratifiés unidirectionnels avec un arrêt en matière pour caractériser la délamination de 4 orientations de pli unidirectionnel, Figure 1.7. Ils ont utilisé un outil PCD à deux flutes dont le rayon de coupe est de 90 µm pour visualiser la délamination. Ils ont observé un intervalle critique de l'angle de coupe de $90° \leq \theta \leq 180°$ pour l'occurrence de délamination de surface. Karpat et coll. ont aussi observé expérimentalement que la force tangentielle maximale était positionnée à l'intérieur de cet intervalle critique de l'angle de coupe (Karpat, Bahtiyar et Değer, 2012). L'occurrence de délamination et la longueur des fibres non coupées (FNC) sont influencées par la largeur de passe lors de détourage à la Figure 1.8. La délamination est présente pour une largeur de passe à l'intérieur de l'intervalle critique de l'angle de coupe. La longueur de fibres non coupées est limitée à la largeur $a_{e180°}$ . Cette largeur correspond à un angle de coupe de 0°/180°, qui implique un changement du mécanisme de rupture des fibres (Ramulu, 1997).

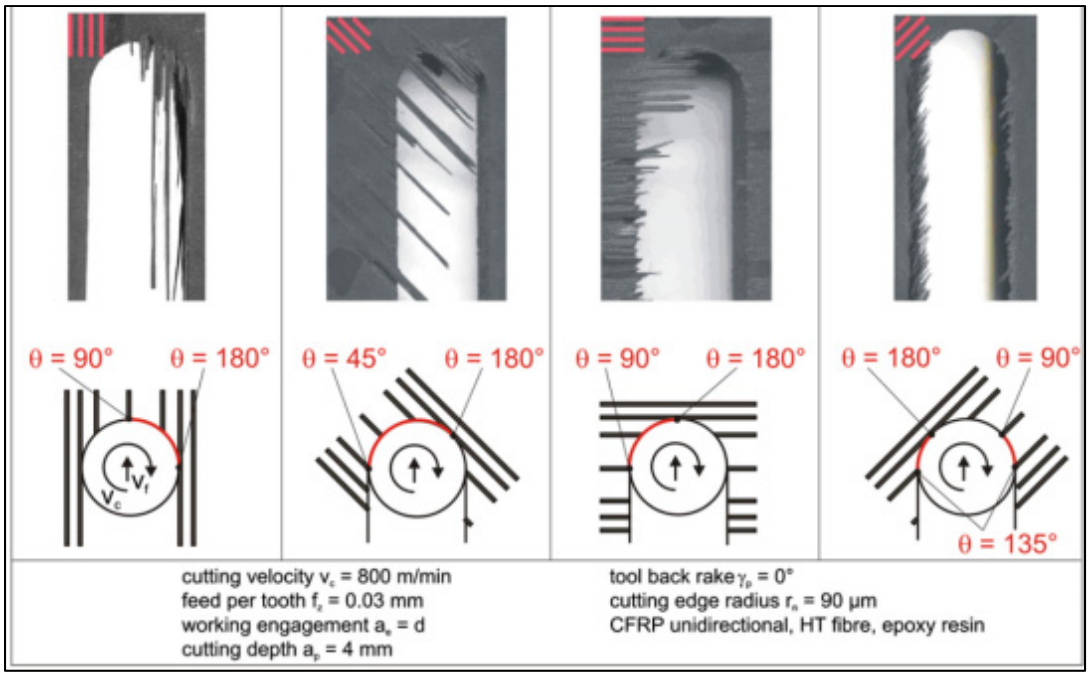



Figure 1.7 Délamination en fonction de l'angle de coupe de fibre critique $\boldsymbol{\theta}$
Tirée de (Hintze, Hartmann et Schutte, 2011)

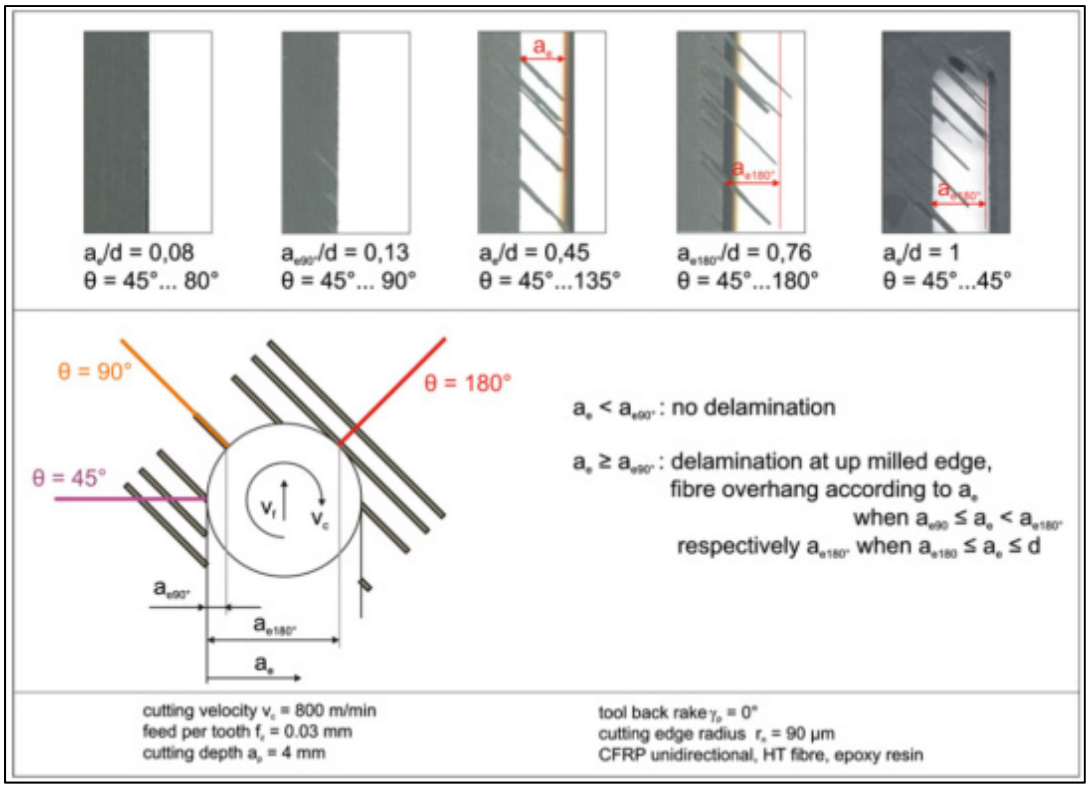



Figure 1.8 Délamination en fonction de la largeur d'usinage sur le diamètre de l'outil pour une orientation du pli de surface de -45°
Tirée de (Hintze, Hartmann et Schutte, 2011)

La délamination crée dans l'intervalle critique de l'angle de coupe $90° \leq \theta < 180°$ est par la suite propagée dans l'intervalle $45° < \theta < 90°$ en opposition par les retours successifs des flutes de l'outil lors de son avance, Figure 1.9. Lorsque l'angle de coupe diminue avec l'avance de l'outil après le premier contact à 180°, cela crée une propagation de la délamination existante en dehors de l'intervalle critique de l'angle de coupe (Hintze, Hartmann et Schutte, 2011).

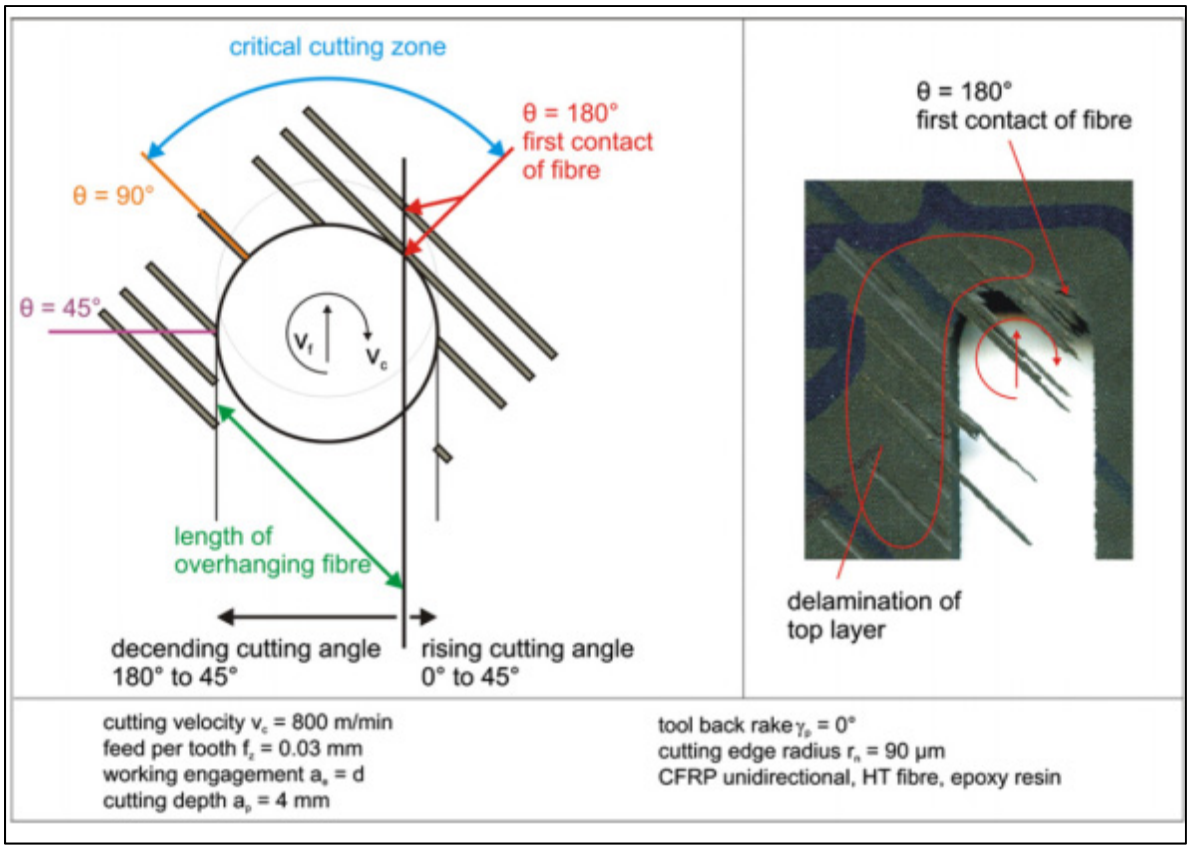



Figure 1.9 Propagation de la délamination pour une orientation du pli de surface à —45° Tirée de (Hintze, Hartmann et Schutte, 2011)

L'intervalle critique de l'angle de coupe est présent en opposition et en avalant pour une orientation du pli de surface de 45° à la Figure 1.10, ce qui génère des fibres non coupées (FNC). La position où l'angle de coupe est de 180° ou 90° détermine la longueur de fibres non coupées et aussi un changement du mécanisme de rupture. Les orientations du pli de surface de 45° et -45° incluent l'intervalle critique d'angle de coupe où l'occurrence et la propagation de la délamination de surface sont plus propices tels qu'illustrés aux Figure 1.9 et Figure 1.10 (Hintze, Hartmann et Schutte, 2011). Hintze et coll. ont utilisés des stratifiés anisotropes à plis unidirectionnels donc l'interface entre les plis est constante et parallèle.

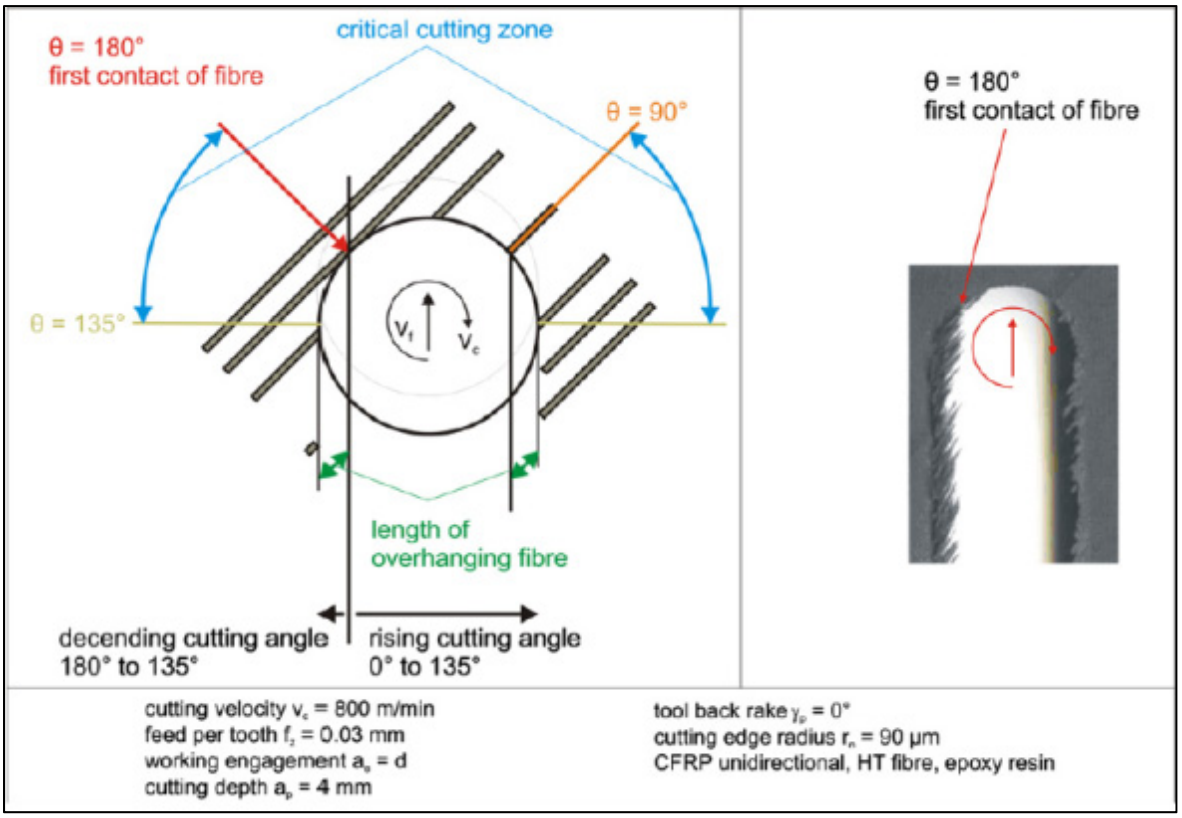



Figure 1.10 Délamination en opposition et en avalant pour une orientation de pli de surface à 45° Tirée de (Hintze, Hartmann et Schutte, 2011)

Santiuste et coll. ont modélisé par éléments finis en trois dimensions le comportement d'un stratifié quasi isotrope à plis unidirectionnels lors de son détourage. Ils ont observé selon leur modèle que l'occurrence de délamination d'un pli unidirectionnel est plus élevée s'il est situé en surface plutôt qu'à l'intérieur du stratifié (Santiuste, Miguelez et Soldani, 2011; Santiuste et al., 2012). Ils ont aussi observé que la séquence d'empilement des plis d'un stratifié quasi isotrope a une influence sur l'occurrence de la délamination lors du détourage (Santiuste et al., 2012). Les interfaces de l'orientation de plis 0°/90° et 0°/±45° présentent les plus grandes occurrences de délamination (Santiuste et al., 2012). Les orientations de 45° et -45° du pli de surface seront utilisées pour les essais expérimentaux de rainurage robotisé. Il sera ainsi possible d'observer la délamination de surface en opposition et en avalant à la suite d'essais expérimentaux de rainurage robotisé.

## 1.2 La qualité de détourage d'un robot sériel à six articulations rotatives

Plusieurs facteurs propres au robot sériel à six degrés de liberté (DDL) influencent leur qualité d'usinage. Le principal facteur est la faible rigidité de leurs articulations qui influence la précision d'usinage (Abele, Weigold et Rothenbucher, 2007; Dumas et al., 2011a; Dumas et al., 2011d; Olabi, 2011; Zhang et al., 2005). Le nombre élevé de DDL et le grand rayon de travail des robots sériel pour accomplir des tâches à géométrie complexe sont des avantages qui justifient leur implantation. Cet avantage permet une grande liberté de position et d'orientation d'une tâche dans l'espace de travail du robot. De plus, un nombre élevé de DDL engendre aussi la redondance de tâche (Conkur et Buckingham, 1997) puisqu'une opération de détourage demande cinq DDL (Dumas et al., 2012). Les critères de performance tels que la vitesse et l'accélération en translation et en rotation sont encadrés par les normes ISO 9283 et ANSI R15.05-1. Une première section présente l'influence de la rigidité sur la qualité de l'usinage. Une seconde section présente l'influence de la position et de l'orientation de l'outil dans l'espace de travail du robot sur la qualité dimensionnelle d'une pièce usinée. Une dernière section présente des méthodologies d'optimisation de la qualité de l'usinage de robot sériel à la commande.

### 1.2.1 La rigidité de robot sériel pour le détourage

La faible rigidité des robots sériels à six axes rotatifs est un problème pour leur capacité à usiner avec précision des tâches générant des efforts de coupe considérable (Abele, Weigold et Rothenbucher, 2007; Claudiu et al., 2012; Dumas et al., 2012; Olabi, 2011; Zhang et al., 2005). Plusieurs méthodes sont utilisées pour connaître la rigidité d'un robot sériel en fonction de la configuration de ses six axes et de la position du centre de l'outil (TCP) dans son espace de travail. L'analyse des fréquences propres de la structure du robot permet d'observer la variation de la rigidité en fonction de la position du TCP (Claudiu et al., 2012). Le modèle de rigidité est calculé à partir des déformations mesurées lorsque le robot est soumis à des charges statiques. L'acquisition expérimentale de la déformation statique d'un

robot peut être mesurée sur une articulation à la fois ou directement au TCP (Abele, Weigold et Rothenbucher, 2007; Olabi, 2011; Zhang et al., 2005). La déformation peut aussi être acquise en mesurant l'ensemble des déformations de la structure à l'aide d'un instrument de mesure laser à trois dimensions (Dumas et al., 2011b). L'objectif est d'établir une carte de rigidité du robot pour l'intégrer dans un modèle servant à compenser les déviations dynamiques de la structure causées par les efforts de coupe prévus.

#### 1.2.1.1 Analyse fréquentielle de basses fréquences de résonance par un impact

Un test d'impact avec une observation des fréquences de résonnance de la structure en fonction de différentes positions du TCP permet d'observer une variation de la rigidité (Claudiu et al., 2012). Des tests d'impacts ont permis à Claudiu et coll. de mesurer dans les basses fréquences, inférieures à 250 Hz, des résonnances de la structure d'un robot sériel Kuka KR240 à trois différentes distances entre le TCP et la base, Figure 1.11 et Figure 1.12. Ils ont analysé les fréquences dans les trois directions X, Y et Z à chaque position par un test d'impact. Ils ont observé une variation de 10 % des fréquences de résonnance dans les trois directions entre chaque position. Les basses fréquences de résonance ont augmenté en X et diminué en Y et Z de P1 vers P3, Figure 1.12. Ces observations montrent que plus le TCP s'éloigne de la base du robot, plus la structure du robot est rigide dans la direction X et inversement dans les directions Y et Z (Claudiu et al., 2012).

#### 1.2.1.2 Analyse des vibrations lors de la rotation de la broche

Une analyse des vibrations dans les trois directions sur la partie statique de la broche lorsqu'elle est en rotation permet d'identifier des fréquences de résonances critiques en fonction de l'excitation périodique de l'outil en rotation. Cette même analyse permet aussi d'identifier des problèmes de débalancement, de désalignement et de roulement de la broche pouvant faire partie d'un plan de maintenance (Claudiu et al., 2012).

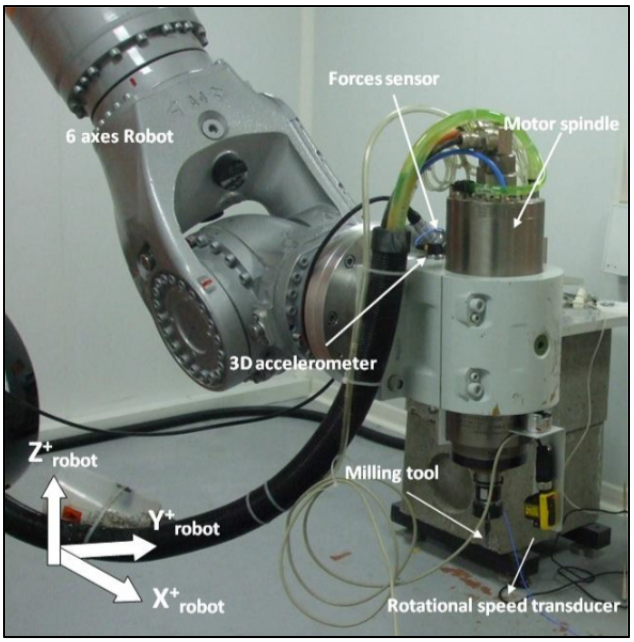



Figure 1.11 Montage expérimental
Tirée de (Claudiu et al., 2012)

#### 1.2.1.3 Analyse des vibrations lors du détourage

Une analyse des vibrations lors de détourage dans un composite d'aluminium et de résine permet à Claudiu et coll. d'observer une variation de la rigidité du robot entre deux positions de travail du TCP. Ils ont utilisé le montage expérimental de la Figure 1.11 et les mêmes paramètres de coupe pour les deux rainures à P1 et P2 de la Figure 1.12. L'amplitude de l'accélération dans la direction X est beaucoup plus grande en P1 qu'en P2 et aussi plus grande dans les directions Y et Z en P1 qu'en P2 (Claudiu et al., 2012). Ils ont appliqué un filtre dans le domaine fréquentiel à bande pour faire ressortir les basses fréquences des signaux d'accélération lors des deux rainurages. Cela a permis d'identifier une résonance de la structure du robot entre 7 et 11 Hz causée par une excitation des variations des efforts de coupe. Ces résultats et ceux de l'analyse d'impacts démontrent une plus grande rigidité en X de la structure du robot lorsque le TCP est à une plus grande distance de sa base (Claudiu et al., 2012).

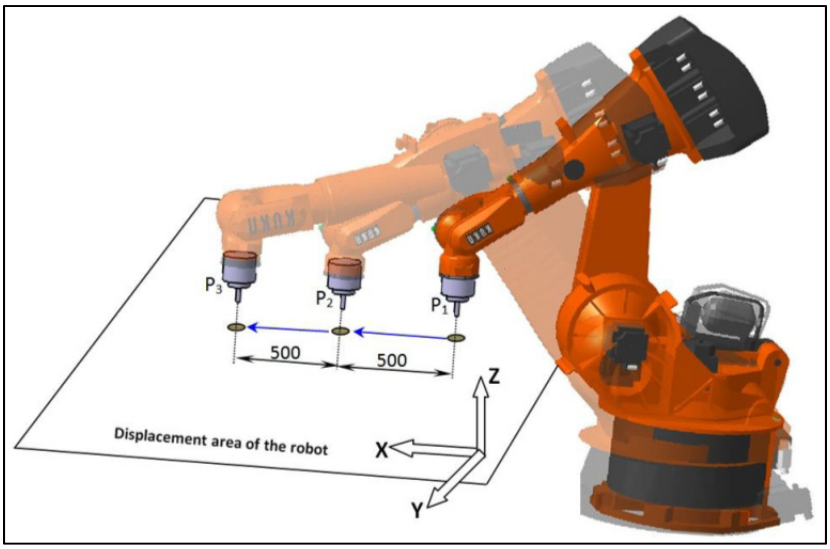



Figure 1.12 Trois positions pour un test d'impact
Tirée de (Claudiu et al., 2012)

### 1.2.2 L'influence de la position de la tâche à détourer sur la qualité

Dumas et coll. ont expérimenté le détourage de deux pièces d'essais d'alliages d'aluminium à deux positions différentes dans l'espace de travail du robot, Figure 1.13. De plus, ils ont aussi expérimenté le détourage de deux pièces de résine tendre aux deux positions. La résine génère très peu d'effort de coupe en comparaison avec l'alliage d'aluminium. Cela permet de comparer la trajectoire de détourage des pièces en alliage d'aluminium avec la trajectoire des pièces en composite de résine pour une même position et non par rapport à la trajectoire commandée. De ce fait, il est possible d'isoler et de mesurer l'influence des efforts de coupe sur l'erreur de suivi de la trajectoire (Dumas et al., 2011c).

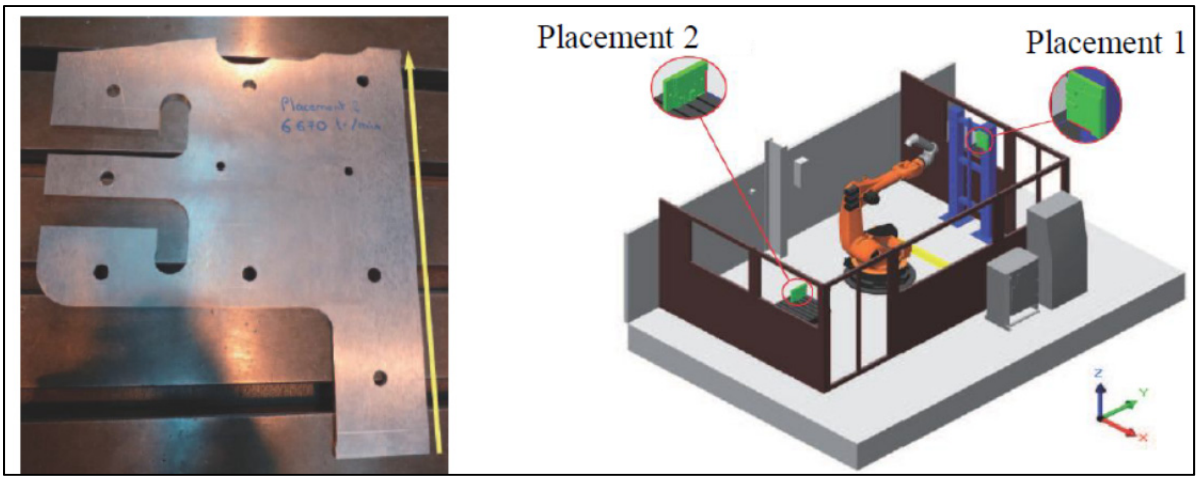



Figure 1.13 Une pièce d'essai et les deux positions de détourage
Tirée de (Dumas et al., 2012)

Les résultats de mesure des pièces montrent une déviation de l'outil de la trajectoire deux fois plus grande à la position 1 qu'à la position 2 pour les mêmes conditions de coupe à l'exception de la matière de la pièce, Figure 1.14. Ainsi, la position et l'orientation de la pièce dans l'espace de travail du robot influencent la précision de détourage (Dumas et al., 2011a; Dumas et al., 2012). Une des principales causes qui explique la différence de déviation de trajectoire c'est la variation de la déformation des axes A1, A2 et A3 en fonction de la position du TCP pour un même effort de coupe, (Dumas et al., 2011a). Pour un même effort de coupe qui engendre un moment sur l'axe A1, plus la distance entre cet axe et le TCP sera grande, plus la déformation de cet axe sera grande, (Dumas et al., 2011a).

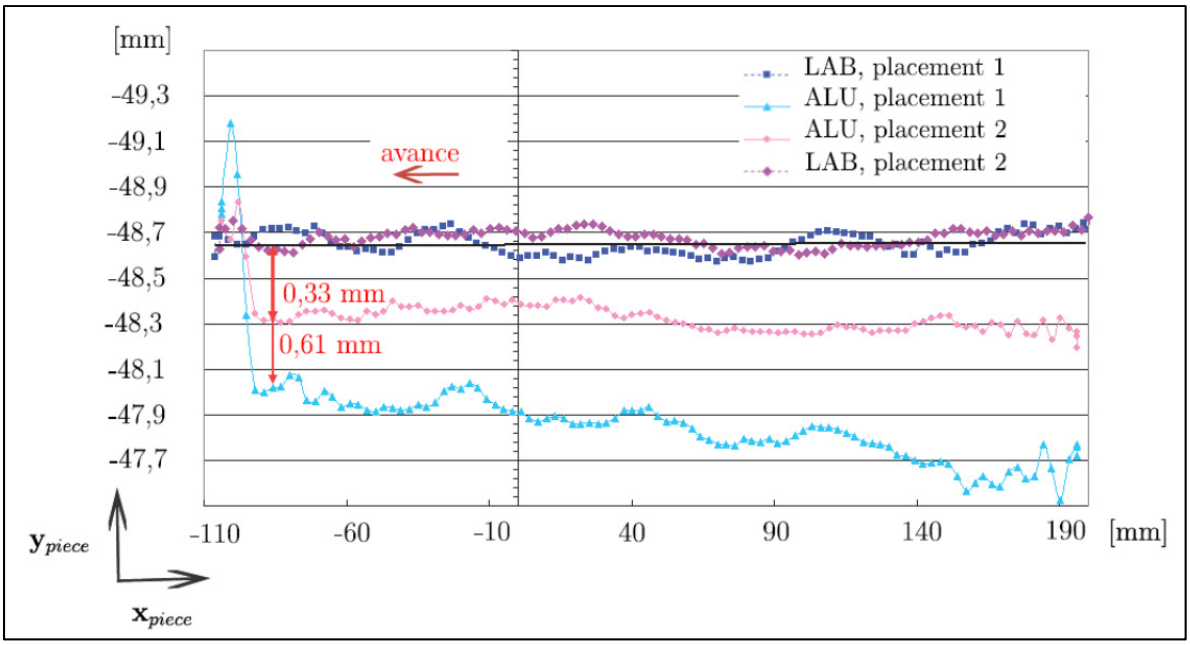



Figure 1.14 Différence dimensionnelle entre les pièces de résine et d'alliage d'aluminium usinés en deux placements Tirée de (Dumas et al., 2011c)

### 1.2.3 L'influence de la redondance cinématique du robot sur la qualité

Le robot KUKA KR270-2 utilisé par Dumas et coll. pour expérimenter l'influence de la redondance cinématique sur la qualité de détourage possède six degrés de liberté (DDL). L'opération de détourage utilise seulement cinq degrés de liberté puisque l'angle de rotation $\gamma$ de la broche autour de l'axe de l'outil n'est pas fixé à la Figure 1.16. Ainsi, l'opération de détourage demande moins de degrés de liberté que le robot en possède, donc il est redondant de tâche (Conkur et Buckingham, 1997). La redondance est caractérisée par l'angle de rotation de la broche par rapport à l'axe de l'outil pour ces essais. Deux pièces sont détourées en ligne droite sur un côté de 16 mm, comme à la Figure 1.15, avec deux différentes configurations des axes. Cependant, la position et l'orientation de la pièce dans l'espace du robot et les conditions de coupe sont identiques.

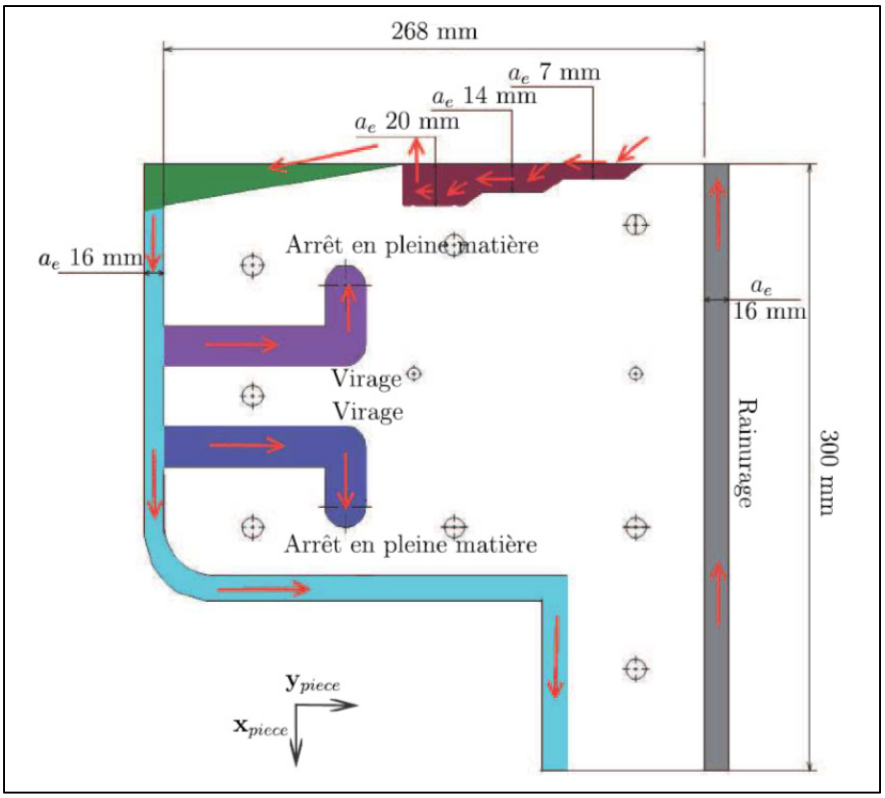



Figure 1.15 Pièce d'essais expérimentaux
Tirée de (Dumas et al., 2011c)

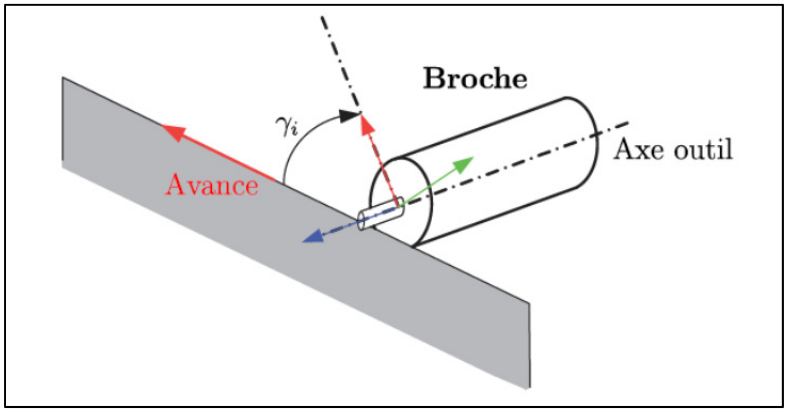



Figure 1.16 Angle $\boldsymbol{\gamma_i}$ entre un axe lié au corps
de la broche et la direction d'avance de l'outil
pour une trajectoire numérique
Tirée de (Dumas et al., 2011c)

Selon (Dumas et al., 2011c), l'interface de l'extension Robotmaster du logiciel Mastercam produit de CNC Software Inc., permet de simplifier la sélection de l'angle de rotation $\gamma_i$ lors de la programmation d'une trajectoire à détourer en fonction des limites de chaque axe du robot. Dumas et coll. ont enrichi l'interface de cette extension logicielle sous la forme d'isocontours de la déviation de l'outil lors du détourage, en tenant compte d'un effort de coupe constant pour toute la trajectoire. Ainsi, la Figure 1.17 représente la ligne blanche supérieure et la ligne noire inférieure indiquant respectivement la meilleure configuration d'axes et la pire. L'abscisse représente les coordonnées de la trajectoire discrète et l'ordonnée représente l'angle de rotation $\gamma_i$. Une pièce est détourée avec le suivi de la courbe blanche et l'autre avec le suivi de la courbe noire.

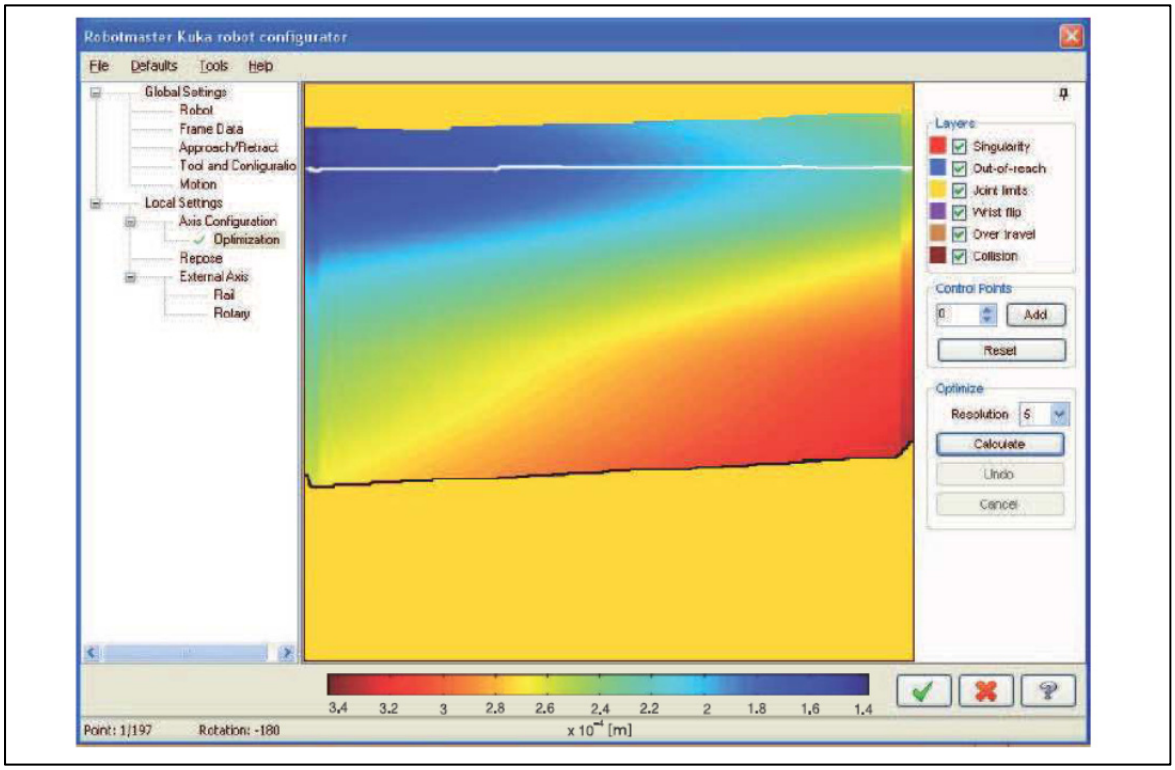



Figure 1.17 Fenêtre de programmation RobotMaster enrichie avec les isocontours tenant compte des efforts de coupe Tirée de (Dumas et al., 2011c)

Les résultats de mesure des pièces montrent une différence de dimensions du profil détouré entre les deux pièces allant jusqu'à 0.5 mm (Dumas et al., 2012). Les mesures des deux détourages des pièces en alliages d'aluminium sont présentées à la Figure 1.18 et elles sont comparées au détourage d'une pièce de résine (LAB, courbe supérieure) générant peu d'effort de coupe sur l'outil. Ces résultats montrent l'influence de la redondance d'un robot sur la précision de l'usinage en fonction de la position de l'outil dans l'espace de travail.

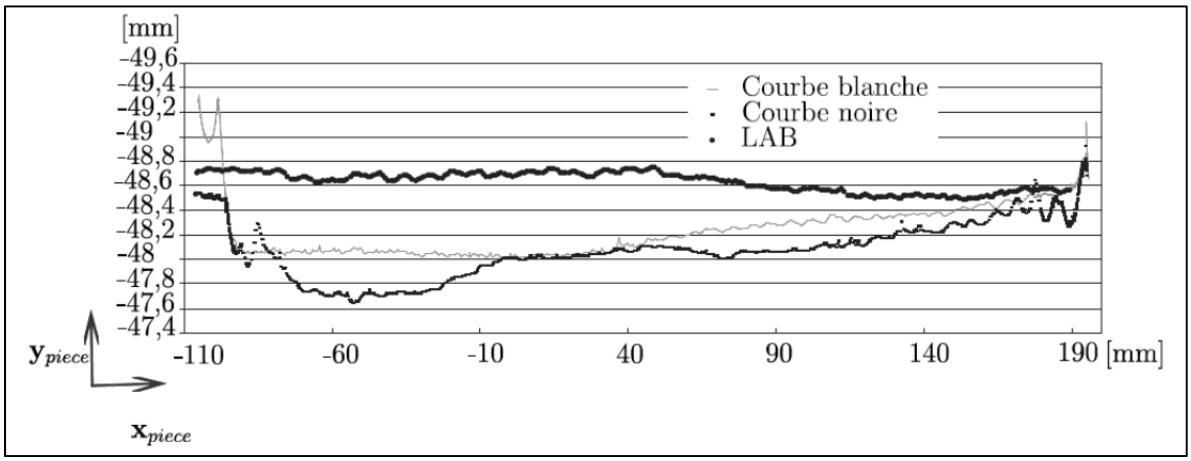



Figure 1.18 Mesure de la déviation de l'outil de pièces détourées en fonction de la position de l'outil et de la configuration du robot Tirée de (Dumas et al., 2011c).

### 1.2.4 Méthodologies d'optimisation de la qualité de l'usinage de robot sériel

La qualité de l'usinage est en partie caractérisée par la précision de la trajectoire de l'outil en termes de déviation de profil et d'erreur dimensionnelle. Dans cette section, la position et l'orientation de la tâche à détourer sont optimisées en fonction de paramètres propres au détourage robotisé pour améliorer la précision de l'usinage. Des méthodologies d'optimisation de la trajectoire qui utilisent un modèle d'efforts de coupe et de rigidité du robot sont présentées pour optimiser la précision de l'usinage.

#### 1.2.4.1 Positionnement optimal de la pièce à détourer dans l'espace de travail du robot

La position et l'orientation de la pièce détourée dans l'espace du robot déterminent la direction des forces de coupe sur l'outil contrôlé par la main du robot. L'objectif est d'aligner la direction de ces forces de coupe avec la direction dont la structure du robot est la plus rigide pour une position donnée du TCP. Un montage judicieux de la broche sur la main du robot, comme à la Figure 1.19, permet de limiter les couples autour de l'axe 6, en positionnant le plus possible le point d'application des efforts de coupe sur cet axe (Dumas et al., 2011c). Il est aussi possible de voir des robots dont la broche est installée à la place de l'axe 6 en sacrifiant un DDL, (Abele, Weigold et Rothenbucher, 2007). Le positionnement optimal de la pièce à détourer peut être obtenu si l'on connaît les efforts de coupe engendrés sur l'outil et le modèle plastostatique du robot construit selon la convention de Denavit-Hartenberg (Dumas et al., 2012). Une méthodologie est proposée par Dumas et coll., elle est définie par la définition d'un critère de la qualité d'usinage et la résolution d'un problème d'optimisation.

Figure 1.19 Alignement du point d'application des efforts de coupe avec l'axe 6 du robot
Tirée de (Dumas et al., 2011c)

#### 1.2.4.2 Optimisation de trajectoire pour deux placements expérimentaux

L'objectif est de minimiser la déviation de la trajectoire causée par les efforts de coupe lors du détourage. L'optimisation de la trajectoire de détourage tient compte de plusieurs contraintes :

- Les limites angulaires des joints du robot ;
- La précision de trajectoire demandée par la tâche ;
- L'espace de travail dégagé de tout obstacle pour le robot et accessible à la fixation d'une pièce ;
- L'absence de singularité du robot ;
- La continuité de trajectoire de chaque joint du robot est recommandée.

Le problème d'optimisation est résolu sous la forme de deux problèmes imbriqués (Dumas et al., 2011c):

- Le premier est la définition de l'ensemble des placements de la pièce à détourer en tenant compte des contraintes du problème.
- Le second consiste à optimiser pour chaque placement la trajectoire et l'orientation de l'outil en respectant les contraintes du problème.

Le premier problème de l'ensemble des placements ne peut être résolu automatiquement sans l'intervention humaine sur le logiciel MASTERCAM (Dumas et al., 2011c) à cause de la nature propre de chaque cellule robotisée. Cependant, le second problème peut être optimisé par un modèle de rigidité du robot et des efforts de la tâche. Le deuxième placement présente une déviation maximale moins grande de l'outil et semble être plus pertinent (Dumas et al., 2011c). Deux pièces réalisées et mesurées montrent que le second placement est bien meilleur que le premier avec une déformation normale à la surface usinée d'environ 0.26 mm contre environ 0.39 mm pour le premier placement, Figure 1.20.

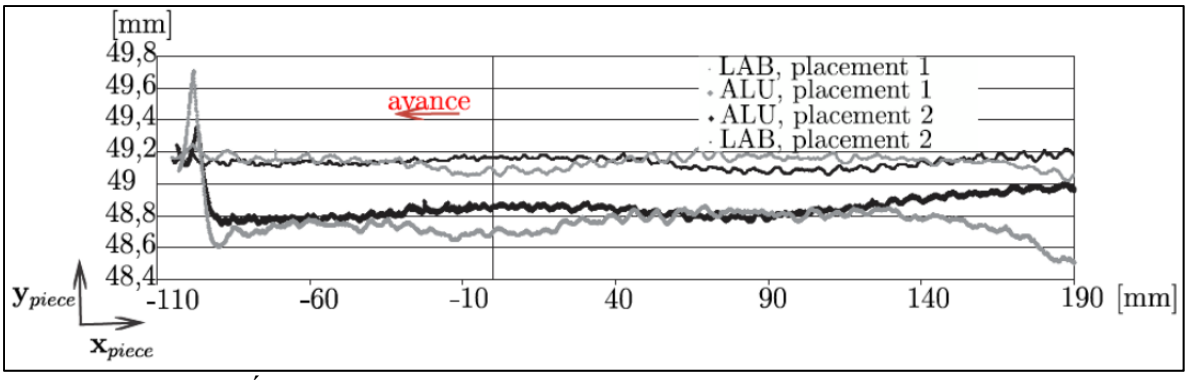



Figure 1.20 Écarts entre l'usinage dans le LAB et celui dans l'alliage d'aluminium pour les placements 1 et 2 Tirée de (Dumas et al., 2011c)

Cette méthode permet de diminuer de façon significative les défauts dimensionnels d'une pièce à cause des déformations du robot. Cependant, la connaissance ou la mesure des efforts de coupe exercés sur le robot sont essentielles pour son application. De plus, il est préférable de pouvoir positionner la pièce à différents endroits dans l'espace de travail du robot pour ne pas se limiter à l'optimisation de la redondance du robot. Cela limite son application pour la fabrication de lots de pièces de moyennes à grandes séries dont les efforts de coupe sont identifiables et non négligeables (Dumas et al., 2011c). L'application de cette méthode d'optimisation risque d'être limitée par le peu de positionnement disponible d'une pièce de grande envergure en CFRP dans l'espace de travail d'un robot.

#### 1.2.4.3 Compensation de la trajectoire commandée par la méthode de la trajectoire miroir

Une autre méthode permettant une plus grande liberté est la compensation de la trajectoire commandée des déviations prévues par la méthode de la trajectoire miroir (Dumas et al., 2011c). Cette méthode permet de calculer la trajectoire numérique déviée à l'aide des efforts de coupe de la tâche et des rigidités du robot. Ensuite, une trajectoire compensée est générée hors ligne pour le détourage robotisé en cellule. La méthode de la trajectoire miroir permet de compenser les erreurs dues à la flexibilité du robot (Dumas et al., 2011c). Cependant, il est nécessaire de connaître les efforts de coupe de la tâche et les rigidités de la structure du robot.

#### 1.2.4.4 Compensation de la trajectoire commandée par un modèle de rigidité et un senseur de force

Cette méthode permet la compensation des déformations du robot à l'aide d'un modèle de rigidité et d'un senseur de force en temps réel (Zhang et al., 2005). Cependant, cette méthode de compensation nécessite l'utilisation d'un senseur de force installé entre la broche et l'effecteur du robot. Un senseur de force à l'effecteur n'est pas une solution souhaitable pour une implantation industrielle de cellule robotisée d'usinage. Les efforts de coupe sont acquis en temps réel et filtrés à la Figure 1.21. Ensuite, le poids de la broche et de l'outil est compensé et le résultat est traduit par rapport au repère du robot. Les déformations causées par les efforts de coupe sont calculées en temps réel à l'aide du modèle de rigidité et les commandes des articulations du robot sont compensées. Les essais expérimentaux d'usinage avec la compensation implantée ont permis d'améliorer la qualité de surface de 0.9 mm à 0.3 mm (Zhang et al., 2005). Plusieurs autres méthodes de compensation de la déviation de la trajectoire existent à l'aide de divers axes externes pour la compensation en temps réel. Cependant, ces méthodes ne sont pas des solutions propres au détourage robotisé et l'objectif est de se limiter au détourage robotisé sans s'étendre sur les diverses asservissements.

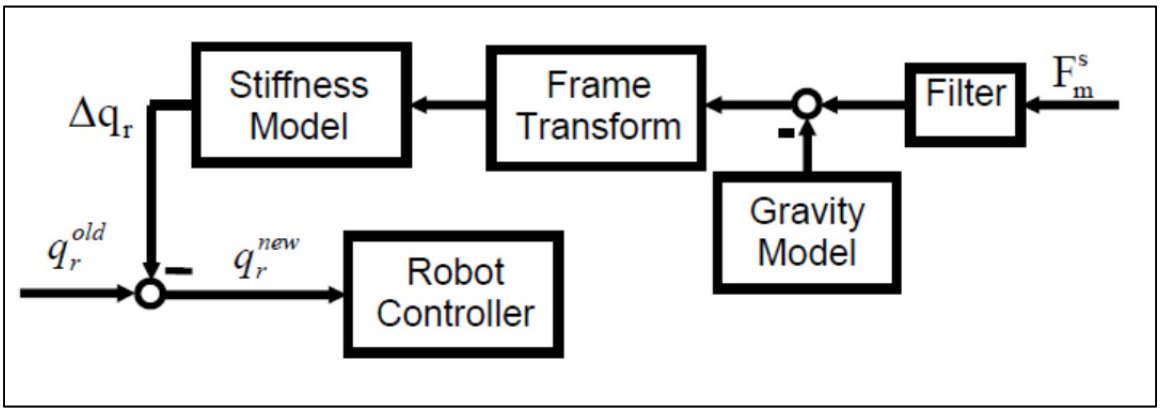



Figure 1.21 Compensation de la déformation en temps réel à l'aide d'un modèle de rigidité et d'un senseur de force Tirée de (Zhang et al., 2005)

# CHAPITRE 2

# MÉTHODOLOGIE

## 2.1 Introduction

La qualité de détourage est évaluée à partir de plans d'expériences composés d'essais de rainurages de stratifiés de composites carbone/époxy (CFRP) par un robot sériel KUKA KR 500-2 MT. L'objectif principal de ce travail consiste à caractériser la qualité de détourage robotisée en fonction de la configuration du robot, des conditions de coupe et de l'orientation des plis de surface d'un stratifié. Les conditions de coupe sont composées de la vitesse de coupe et de la vitesse d'avance. La qualité du détourage est évaluée par l'observation de la délamination et de l'état de surface des échantillons de CFRP détourés. Un plan d'expérience utilisant les mêmes facteurs est appliqué pour évaluer la qualité de détourage d'un même type de stratifié CFRP sur un centre d'usinage numérique HURON K2X10. L'objectif de ce plan d'expérience sur centre d'usinage est de comparer ses réponses de qualité avec les réponses des plans d'expériences de rainurage robotisé. Les prochaines sections décrivent les équipements utilisés avec tous les plans expérimentaux. La section suivante présente un sommaire des plans expérimentaux et leurs facteurs. Ensuite, les sections suivantes présentent, plus en détail, les plans expérimentaux OP10P1, OP20P1, OP30P3, OP50P5 et OP50P6 réalisés avec une cellule robotisée et les deux plans expérimentaux OP10P2 et OP20P2 réalisés avec un centre d'usinage numérique HURON K2X10.

## 2.2 Méthodologie expérimentale pour évaluer la qualité de détourage robotisé

Les plans expérimentaux permettront d'évaluer la qualité de détourage de stratifié de CFRP en fonction des conditions de coupe et à deux placements distincts dans la cellule robotisée. Les conditions de coupe sont composées de vitesses de coupe et de vitesses d'avance. Un premier objectif est de déterminer les conditions de coupe et le placement qui donne les meilleures réponses en matière de qualité de détourage robotisé. Un plan de criblage est mis

en œuvre pour déterminer si la qualité du détourage robotisé de stratifié de CFRP est conforme aux normes de l'industriel pour les deux placements dans la cellule robotisée.

### 2.2.1 Description de l'outil à détourer

Tous les plans expérimentaux utilisent une fraise de deux flutes déportées en diamant polycristallin (PCD) d'un diamètre de 9.525 mm. Les angles d'attaque et de dépouille sont de 10° et de 20° respectivement. L'angle d'hélice est nul. Cet outil a été sélectionné en fonction des résultats qu'il a démontrés lors des travaux de Bérubé. L'outil est inspecté avant et après une ou deux opérations de rainurage. Une opération comporte un maximum de 1 mètre de rainurage.

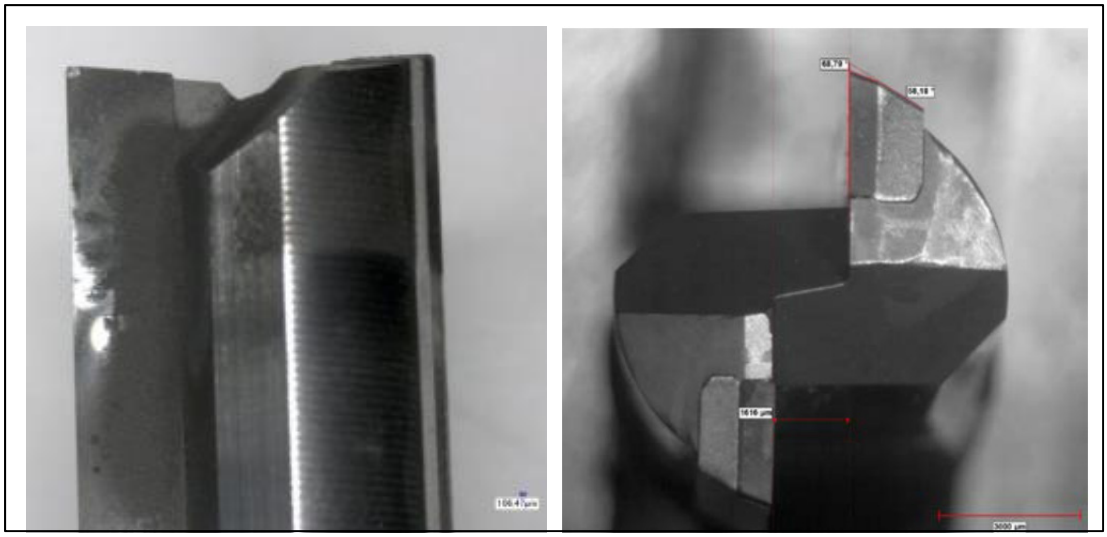


Figure 2.1 Outil à deux flutes en PCD et à angle d'hélice nul
Tirée de (Bérubé, 2012)

### 2.2.2 Description de la cellule robotisée et du gabarit d'usinage

Le robot sériel KUKA KR 500-2 MT à 6 axes est installé sur un axe linéaire « E1 » et manipule une broche HSD Mechatronic ES 789 de 24 000 tours par minute maximum, Figure 2.2. Le robot possède une capacité nominale admissible de 500 kg et est programmé à

l'aide du logiciel CAD/CAM Robotmaster. Le gabarit d'usinage comporte deux plaques d'alliage d'aluminium pour fixer les échantillons de CFRP à la table dynamométrique KISTLER 9255B, Figure 2.3. L'assemblage du gabarit d'usinage et de la table de force est installé sur le positionneur de 2 axes KUKA DKP-400 situé dans l'espace de travail du robot, Figure 2.2. L'axe linéaire qui supporte le robot et les axes du positionneur sont statiques lors des rainurages. La cellule robotisée et le gabarit sont utilisés pour tous les plans expérimentaux à l'exception des opérations OP10P2 et OP20P2 effectuées sur centre d'usinage. Les opérations OP10P2 et OP20P2 utilisent le même gabarit d'usinage. Cependant, elles utilisent une autre table dynamométrique de même modèle. La table KISTLER 9255B possède une gamme d'acquisitions selon le plan XY de plus ou moins 20 kN et selon l'axe Z de -10 à 40 kN. La fréquence propre de la table dynamométrique est d'environ 3 kHz. Les spécifications de la table dynamométrique KISTLER 9255B sont disponibles à l'ANNEXE I. Les spécifications du robot KUKA KR 500-2MT sont disponibles à l'ANNEXE II. Les spécifications du positionneur 2 axes DKP-400 sont disponibles à l'ANNEXE III. Les spécifications de la broche HSD MECHATRONIC ES789 sont disponibles à l'ANNEXE IV.

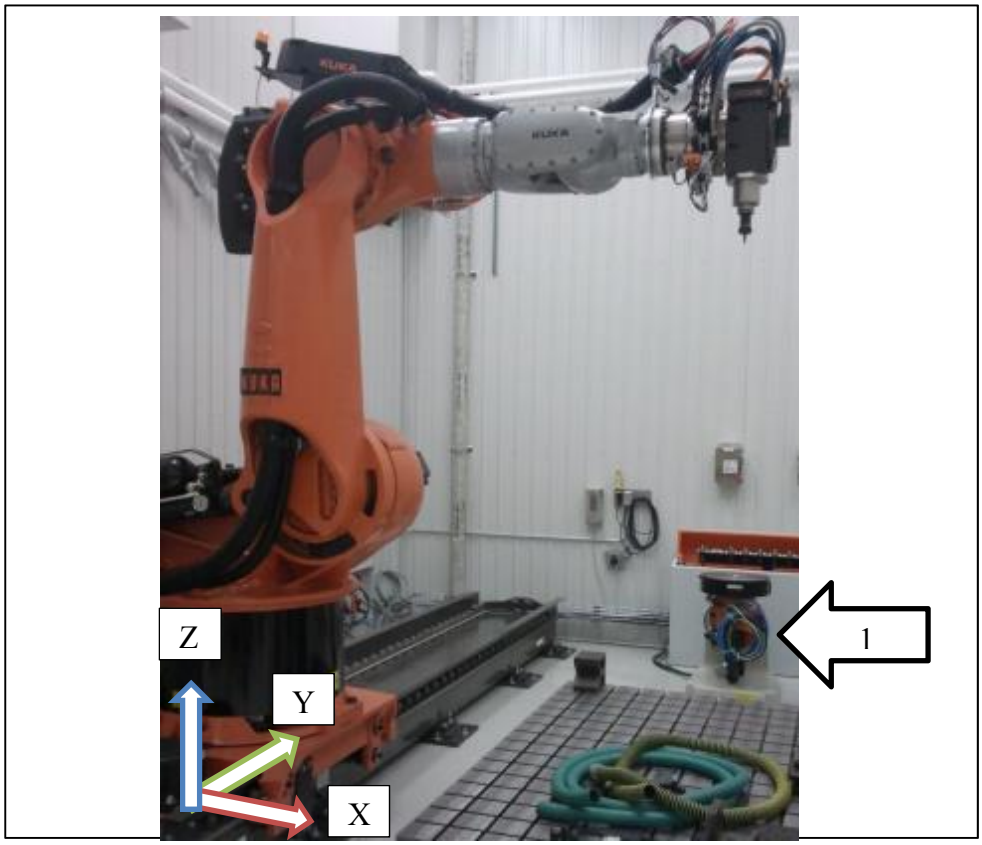



Figure 2.2 Robot KUKA KR 500-2 MT sur axe linéaire « E1 » et positionneur de 2 axes KUKA DKP-400 (No 1).
Le repère global de la cellule est représenté en bas à gauche

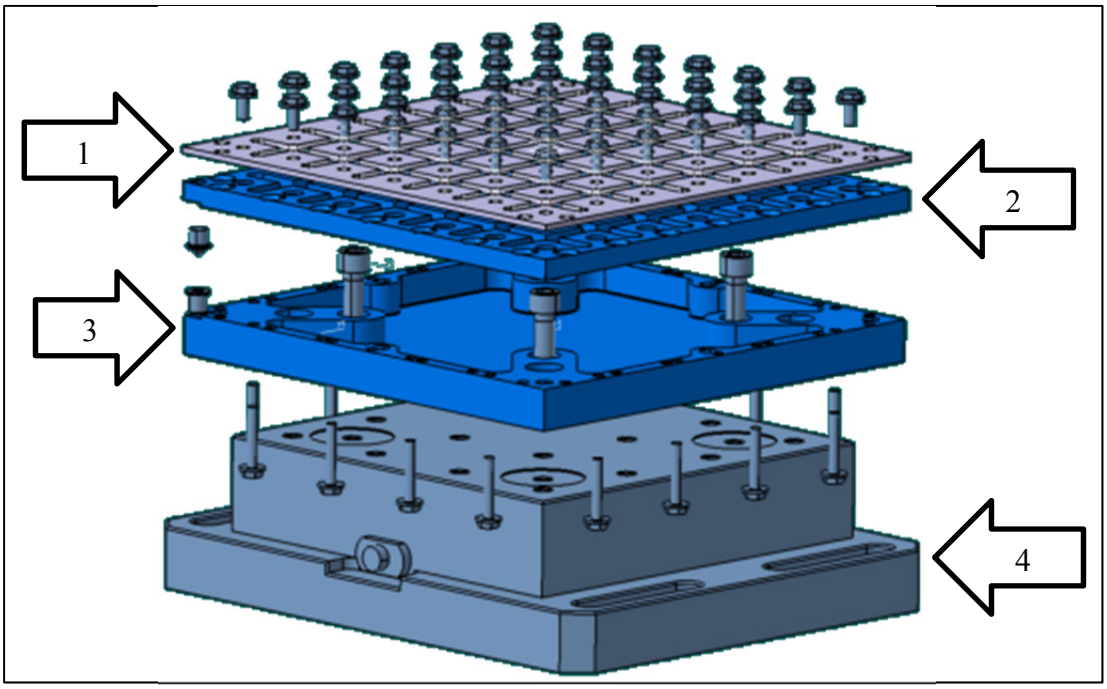



Figure 2.3 Vue explosée de l'assemblage d'un stratifié de CFRP (No 1), du gabarit d'usinage (No 2 et 3) et de la table dynamométrique (No 4)

### 2.2.3 Réponses observées pour tous les plans expérimentaux avec la cellule robotisée

Les réponses de qualités observées sont toutes les mêmes pour les plans expérimentaux utilisant la cellule robotisée décrite à la section précédente 2.2.2.

Les réponses sont les suivantes :

- Les forces de coupe orthogonales en Newton (N) selon les directions d'avance, normale et axiale de l'outil;
- La rugosité de surface en micromètre (µm), critères Ra et Rt;
- La déviation de profils et l'erreur de positionnement en millimètre (mm).

Les réponses de qualité suivantes sont mesurées à l'aide d'un microscope muni d'une lentille de vingt agrandissements :

- Les fibres non coupées (FNC) normales aux plis de surface en millimètre (mm);
- Les fibres non coupées (FNC) normales à la surface de coupe en millimètre (mm);

- Les arrachements de matières (ARM) de plis de surface en millimètre (mm).

Les forces de coupe sont acquises lors du rainurage robotisé, les autres réponses sont mesurées à partir des échantillons de CFRP détourés. L'audiovisuel des opérations de rainurage robotisé est enregistré à l'aide d'une caméra commerciale installée dans la cellule. L'analyse de la déviation de profils et de l'erreur de positionnement est présentées dans un article en cour de publication détaillé à l'ANNEXE V (Slamani, Gauthier et Chatelain, 2014a).

### 2.2.4 Description des configurations robot CR10 et CR20

Deux placements sont obtenus en déplaçant la base du robot sur l'axe linéaire « E1 » tout en conservant la même position du gabarit sur le positionneur à 2 axes. Un premier placement noté CR10 est défini au Tableau 2.1 et représenté à la Figure 2.4. Un second placement noté CR20 est aussi défini au Tableau 2.1 et représenté à la Figure 2.5. Pour une même position de l'outil représenté à la Figure 2.4 et Figure 2.5 la distance entre la base du robot et l'outil est de 2669 mm pour CR10 et de 1816 mm pour CR20. Une position du TCP plus éloignée de la base du robot engendre un moment plus important sur l'axe A1 pour une même force de coupe à l'outil. Ainsi, la déformation de l'axe A1 devrait être plus importante à CR10 qu'à CR20 pour un même effort de coupe. Une différence de déviation de trajectoire est observée entre trois configurations des axes A1, A2 et A3 lors d'essais expérimentaux de rainurage robotisé de stratifiés, (Dumas et al., 2011a).

Tableau 2.1 Configuration des axes du robot CR10 et CR20 pour une même position du TCP : X 1738 mm, Y 2524 mm et Z 960 mm à l'origine du plan de coupe

| Notation | E1 | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CR10 | -500 mm | -39.04° | -29.44° | 81.74° | 57.64° | -67.45° | -165.93° |
| CR20 | -3050 mm | 26.66° | -42.30° | 143.67° | 37.51° | -99.09° | -127.78° |

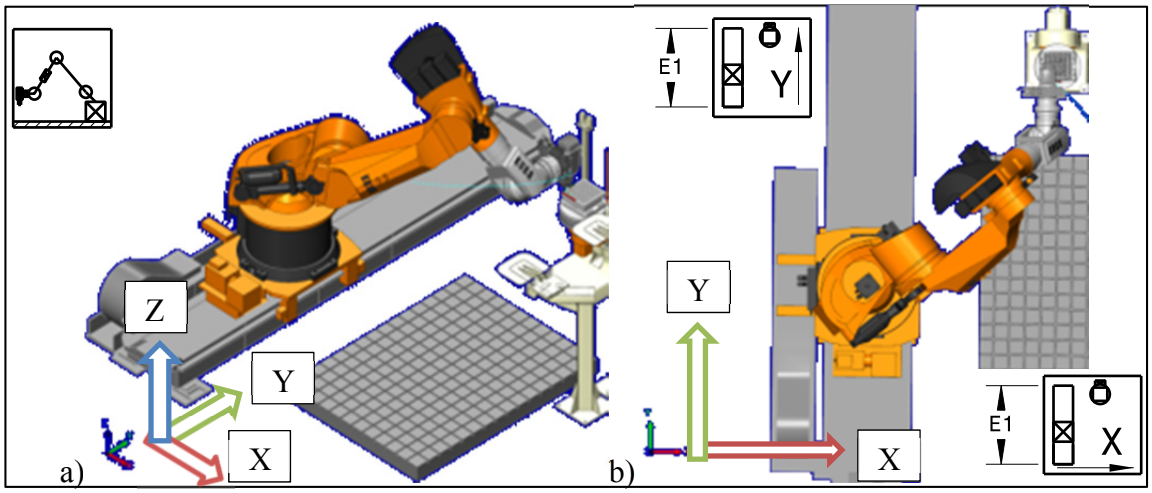



Figure 2.4 Configuration du robot CR10 lors de rainurages. a) Vue isométrique b) Vue du dessus de CR10 et des directions de rainurage X et Y

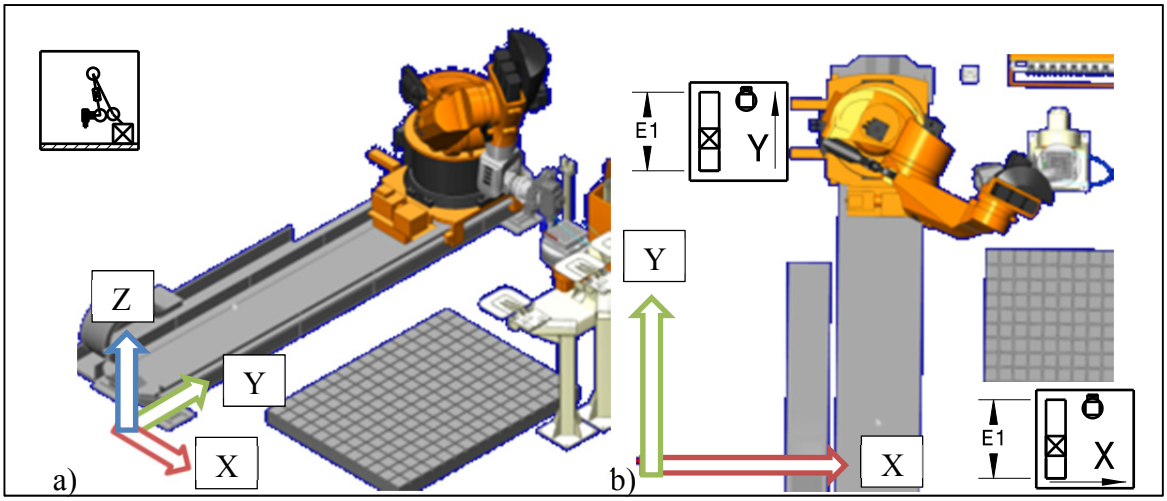



Figure 2.5 Configuration du robot CR20 lors de rainurages. a) Vue isométrique b) Vue du dessus de CR20 et des directions de rainurage X et Y

### 2.2.5 Sommaire des opérations de rainurage réalisées

L'objectif de cette section est de résumer la nomenclature des opérations de rainurage et de leurs facteurs. Toutes les opérations utilisent le même type d'outil de coupe tel que mentionné précédemment. Le Tableau 2.2 présente les opérations de rainurage robotisé des trois plaques stratifiées P1, P4 et P2(sur centre d'usinage), qui sont fabriquées par AFP et cuites en autoclave. Les opérations au Tableau 2.2 comportent les mêmes vitesses de coupe

et d'avance. Le Tableau 2.3 présente les opérations de rainurage de 3 plaques stratifiées P3, P5 et P6, qui sont fabriquées par pose de plis à la main et cuites sous presse. Les opérations OP30 comportent les mêmes vitesses de coupe et d'avance. Les opérations OP50 comportent les mêmes vitesses de coupe et d'avance.

Tableau 2.2 Opérations de rainurage sur une plaque CFRP fabriquée par AFP et cuite en autoclave

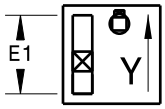
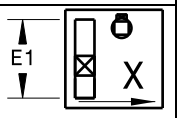
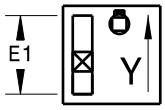
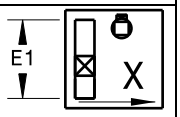
| | Configuration du robot | | Orientation du pli de surface du stratifié | | Direction de rainurage dans la cellule robotisée | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | CR10 | CR20 | 45° | -45° | Y | X |
| OP10 P1<br>45° CR10 Y | | | | |  | |
| OP20 P1<br>-45° CR20 X | | | | | |  |
| OP10 P4<br>45° CR10 Y | | | | |  | |
| OP20 P4<br>-45° CR20 X | | | | | |  |
| OP10 P2<br>-45° | Centre d'usinage | | | | Centre d'usinage | |
| OP20 P2<br>45° | Centre d'usinage | | | | Centre d'usinage | |

Tableau 2.3 Opérations de rainurage dans une plaque CFRP fabriquée par pose à la main de plis et cuite sous presse

| | Configuration du robot | | Orientation du pli de surface du stratifié | | Direction de rainurage dans la cellule robotisée | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | CR10 | CR20 | 45° | -45° | Y | X |
| OP30 P3 45° CR20 X | | | | | | E1 X |
| OP30 P3 -45° CR20 X | | | | | | E1 X |
| OP50 P5 45° CR10 Y | | | | | E1 Y | |
| OP50 P5 -45° CR10 X | | | | | | E1 X |
| OP50 P5 -45° CR20 X | | | | | | E1 X |
| OP50 P5 45° CR20 Y | | | | | E1 Y | |
| OP50 P6 -45° CR10 Y | | | | | E1 Y | |
| OP50 P6 45° CR10 X | | | | | | E1 X |
| OP50 P6 45° CR20 X | | | | | | E1 X |
| OP50 P6 -45° CR10 Y | | | | | E1 Y | |

### 2.2.6 Identification des échantillons de CFRP détourés et de leurs conditions de coupe

L'identification matricielle des échantillons détourés de CFRP est représentée à la Figure 2.6 à titre d'exemple pour les plans expérimentaux décrits dans les prochaines sections. Les échantillons de CFRP sont identifiés à l'aide d'une numérotation de 4 chiffres. Le premier chiffre désigne la rangée et le second la colonne pour positionner l'échantillon sur la plaque de CFRP. Les deux derniers chiffres désignent le numéro de la plaque de CFRP.

Les conditions de coupe sont identifiées par deux numéros séparés par un tiret. Le premier numéro désigne la vitesse de coupe (Vc) en mètre par minute. Le second numéro à deux chiffres désigne la vitesse d'avance (Va) en centième de millimètre par révolution d'outil. Les rainures sont usinées d'abord dans l'ordre croissant des vitesses de coupe et ensuite dans l'ordre croissant des vitesses d'avance. La flèche sous les conditions de coupe indique la direction et le sens d'avance de l'outil.

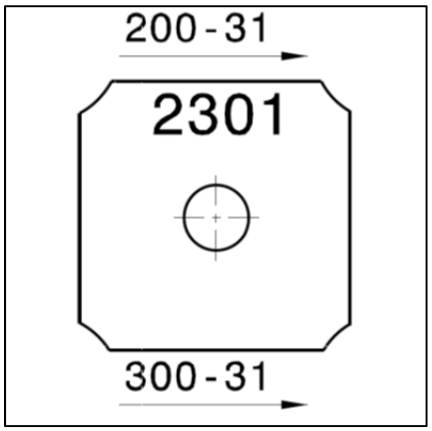



Figure 2.6 Identification des échantillons de CFRP détouré et de leurs conditions de coupe

### 2.2.7 Plans expérimentaux de rainurages OP10P1 et OP20P1

Chaque plan d'expérience consiste au rainurage de 42 essais de CFRP à l'aide de la cellule robotisée et du gabarit décrits à la section précédente. L'assemblage du gabarit d'usinage et de la table dynamométrique est installé sur le positionneur à 2 axes pour chaque opération, voir les Figure 2.7 et Figure 2.8. La configuration du robot CR10 employée à l'opération OP10P1 est décrite précédemment. La configuration du robot CR20 employée à l'OP20P1 est aussi décrite précédemment. Le stratifié rainuré est décrit à la section 2.2.7.2. Une opération de perçage est effectuée avant l'opération de rainurage pour fixer le stratifié sur le gabarit d'usinage, section 2.2.7.1 et Figure 2.9. L'outil utilisé est légèrement usagé avant ces deux opérations de rainurage et il est décrit à une section précédente. Les 49 échantillons détourés sont identifiés selon une matrice numérique et la disposition des conditions de coupe de l'OP10P1 et l'OP20P1 est décrite à la section 2.2.7.3. La configuration du robot est légèrement différente à cause de la limitation des axes lors de l'OP20P1 pour une vitesse d'avance de 0.20 mm/rev à toutes les vitesses de coupe, de 0.25 mm/rev à 600 m/min et de 0.25 mm/rev à 650 m/min. La différence de configuration du robot influence sa rigidité pour ces conditions de coupe.

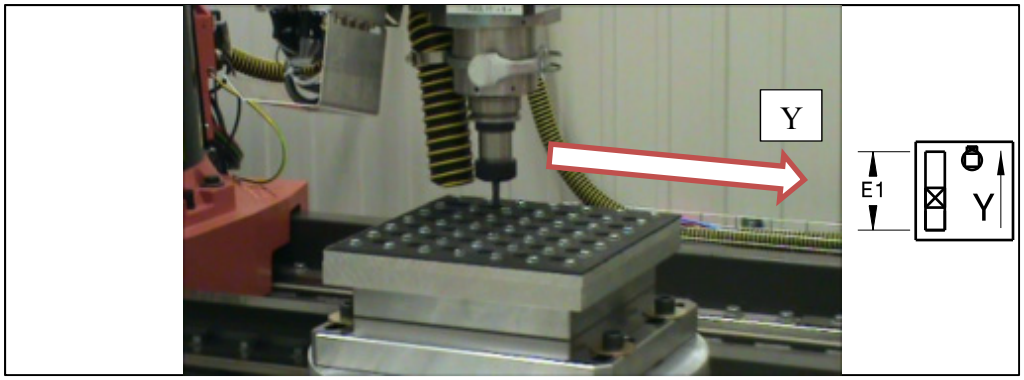



Figure 2.7 Opération de rainurage parallèle à l'axe Y global de la cellule avec le gabarit d'usinage sur le positionneur à 2 axes KUKA DKP-400 lors de l'OP10

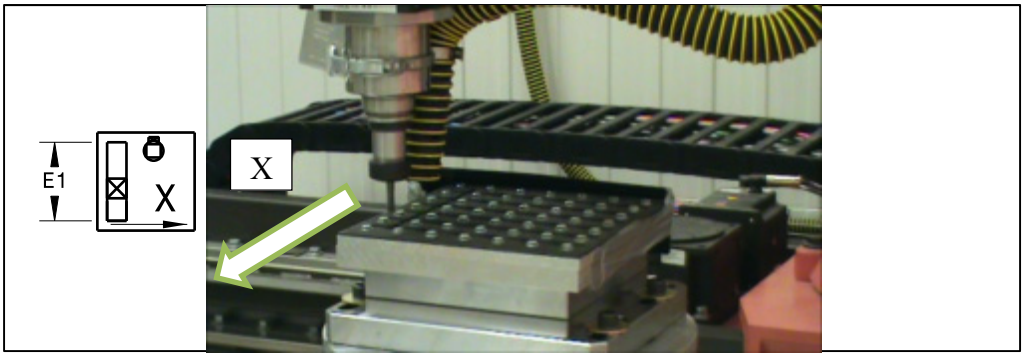



Figure 2.8 Opération de rainurage parallèle à l'axe X global de la cellule avec le gabarit d'usinage monté sur le positionneur à 2 axes KUKA DKP-400 lors de l'OP20

Tableau 2.4 Les 5 facteurs du plan expérimental OP10P1 45° CR10 Y

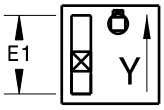
| | |
|---|---|
| • La configuration du robot CR10 détaillée à une section précédente | |
| • Une orientation de fibre des plis de surface du stratifié à 45° | |
| • Une direction de rainurage selon l'axe Y du repère de la cellule robotisée et parallèle à l'axe « E1 » de la cellule robotisée, Figure 2.7 |   |
| • Les 6 vitesses de coupe en mètre par minute (m/min) | Tableau 2.6 |
| • Les 7 vitesses d'avance en millimètre par révolution d'outil (mm/tour) | Tableau 2.6 |

Tableau 2.5 Les 5 facteurs du plan expérimental OP20P1 -45° CR20 X

| | |
|---|---|
| • La configuration du robot CR20 détaillée à une section précédente | |
| • Une orientation de fibre des plis de surface du stratifié à moins 45° | |
| • Une direction de rainurage selon l'axe X du repère de la cellule robotisée, c'est-à-dire, perpendiculaire à l'axe « E1 » de la cellule robotisée, Figure 2.8 | E1 X |
| • Les 6 vitesses de coupe en mètre par minute (m/min) | Tableau 2.6 |
| • Les 7 vitesses d'avance en millimètre par révolution d'outil (mm/tour) | Tableau 2.6 |

Tableau 2.6 Vitesses de coupe et d'avance

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Vitesses de coupe (Vc) (m/min) | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 | |
| Révolution par minute (RPM) | 6684 | 10 026 | 13 367 | 16 709 | 20 051 | 21 722 | |
| Fréquence par flute (Hz) | 222 | 334 | 445 | 556 | 668 | 724 | |
| Vitesse d'avance (Va) (mm/rev) | 0.203 | 0.254 | 0.305 | 0.356 | 0.406 | 0.457 | 0.508 |

Les plans d'expériences OP10P1 et OP20P1 ont les mêmes réponses sélectionnées en fonction de l'évaluation de la qualité et de la précision du rainurage, voir la section précédente 2.2.3.

#### 2.2.7.1 Description de l'opération de perçage de plaques de CFRP

Une opération de perçage est effectuée sur centre d'usinage avant les opérations de rainurage. Cette opération comporte 49 trous de fixation et 36 trous de dégagement pour l'outil à rainurer, Figure 2.9.

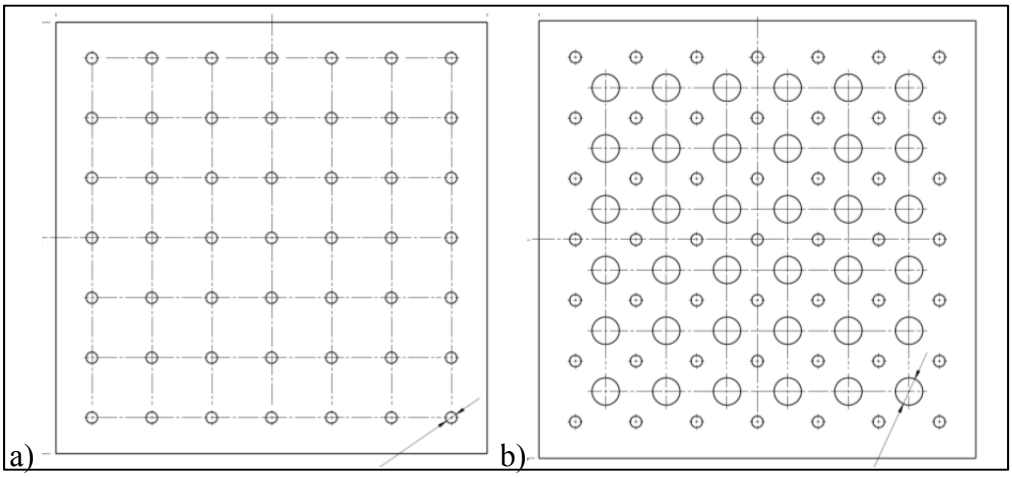



Figure 2.9 Schéma de la plaque CFRP percée, a) 49 trous de fixation pour des vis ¼-20UNC, b) 36 trous de dégagement d'un diamètre de ¾ de pouce

#### 2.2.7.2 Description du stratifié CFRP rainuré

Le matériau rainuré est une plaque de stratifié symétrique quasi isotrope composée de 24 plis unidirectionnels de fibre de carbone et d'une matrice époxy. Le dernier pli sous la plaque est un treillis de cuivre. La plaque est produite par automated fiber placement (AFP) et cuite en autoclave dans un laboratoire industriel du domaine aéronautique. L'orientation des plis du stratifié est détaillée à l'équation (2.1) et au Tableau 2.7.

$$[-45/90/45/0/\pm45/90/\pm45/0/\mp45]_S \tag{2.1}$$

Tableau 2.7 Orientation de plis du stratifié symétrique rainuré

| No pli | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Orientation(°) | -45 | 90 | 45 | 0 | 45 | -45 | 90 | 45 | -45 | 0 | -45 | 45 |

#### 2.2.7.3 Description des séquences de rainurages des plans expérimentaux OP10P1 45° CR10 Y et OP20P1 -45° CR20 X

L'identification des échantillons de CFRP et de leurs conditions de coupe est décrite à la section précédente 2.2.6. Les vitesses de coupe augmentent en fonction des rangées et les vitesses d'avance augmentent en fonction des colonnes pour l'OP10P1 et orthogonalement pour l'OP20P1. Le facteur de l'orientation des plis de surface est indiqué par rapport aux directions de rainurage. Les axes globaux X et Y de la cellule robotisée indiquent aux Figure 2.10 et Figure 2.11 l'orientation des rainures des opérations OP10P1 et OP20P1 respectivement.

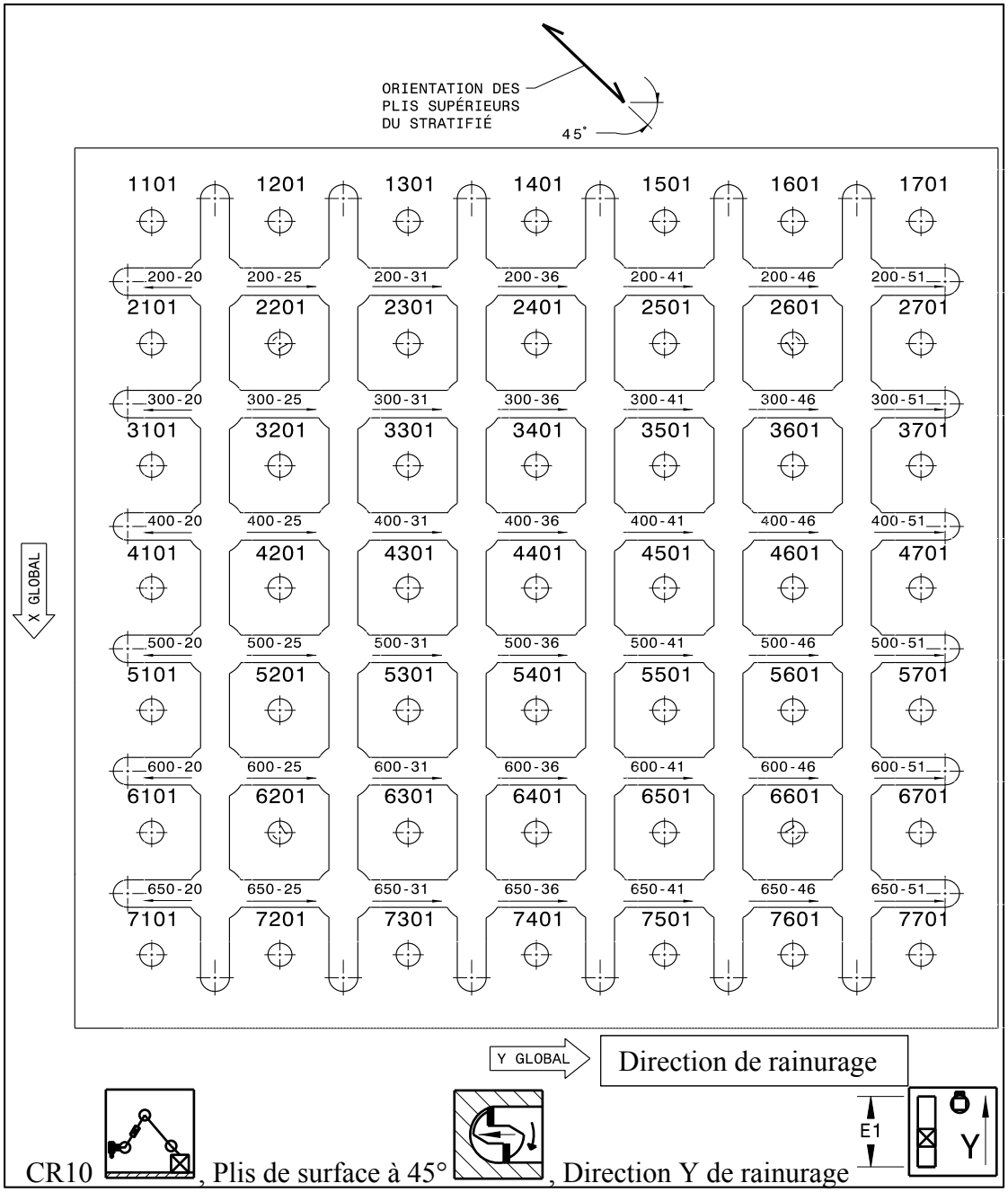



Figure 2.10 Identification des échantillons de CFRP en fonction des conditions de coupe OP10P1

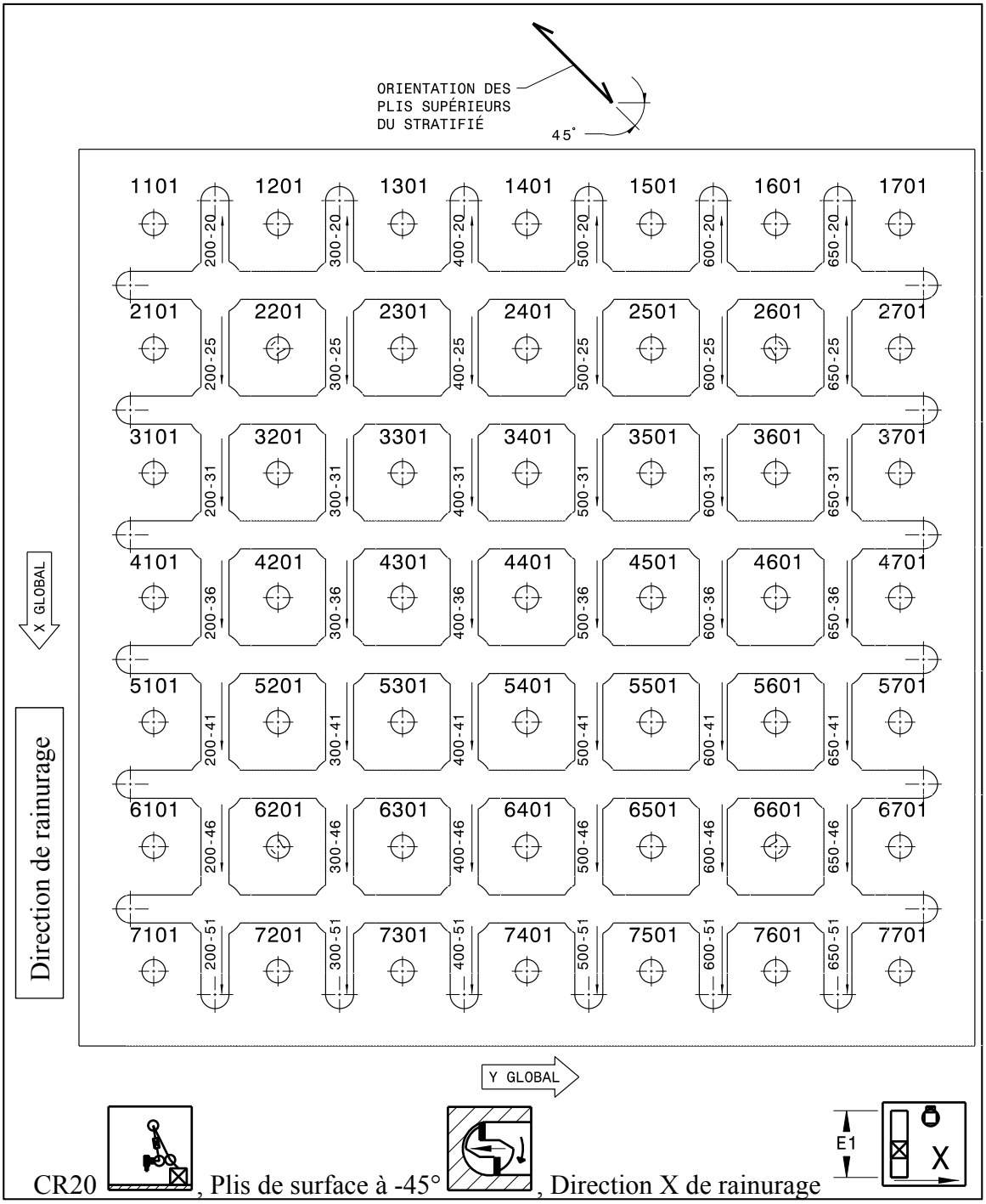



Figure 2.11 Identification des échantillons de CFRP en fonction des conditions de coupe OP20P1

### 2.2.8 Plans expérimentaux de rainurages OP10P4 et OP20P4

Les deux plans expérimentaux de la plaque P4 se distinguent seulement des deux précédents de la plaque P1 par les choix d'un outil neuf et d'un stratifié à deux quantités de plis décrit à la section 2.2.8.1. Il était nécessaire de reproduire les opérations de rainurage OP10 et OP20 à l'aide d'un outil neuf pour comparer l'influence de l'usure de l'outil sur les réponses de qualité. La configuration du robot CR10 est employée à l'opération OP10P4 et la configuration du robot CR20 est employée à l'OP20P4. Le stratifié subit une opération de perçage avant l'opération de rainurage pour être fixé sur le gabarit d'usinage tel que précédemment. Les 49 échantillons de CFRP détourés sont identifiés selon une matrice numérique à la section 2.2.8.2. Les conditions de coupe expérimentées sont décrites précédemment au Tableau 2.6. Elles sont les mêmes que celles des opérations robotisées OP10P1, OP20P1 et sur centre d'usinage OP10P2 et OP20P2. La configuration du robot est légèrement différente à cause de la limitation des axes lors de l'OP20P4 pour une vitesse d'avance de 0.20 mm/rev à toutes les vitesses de coupe, de 0.25 mm/rev à 600 m/min et de 0.25 mm/rev à 650 m/min. Cette légère différence de configuration de robot influence sa rigidité et peut avoir un impact sur les résultats de qualité et de précision pour ces conditions de coupe.

Tableau 2.8 Les 5 facteurs du plan expérimental OP10P4 45° CR10 Y

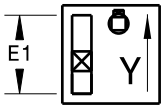
| | |
|---|---|
| • La configuration du robot CR10 détaillée à la section précédente 2.2.2 et représentée à la Figure 2.4 | |
| • Une orientation de fibre des plis de surface du stratifié à 45° | |
| • Une direction de rainurage selon l'axe Y du repère de la cellule robotisée et parallèle à l'axe « E1 » de la cellule robotisée, Figure 2.7 et Figure 2.4 |   |
| • Les 6 vitesses de coupe en mètre par minute (m/min) | Tableau 2.6 |
| • Les 7 vitesses d'avance en millimètre par révolution d'outil (mm/tour) | Tableau 2.6 |

Tableau 2.9 Les 5 facteurs du plan expérimental OP20P4 -45° CR20 X

| | |
|---|---|
| • La configuration du robot CR20 détaillée à la section précédente 2.2.4 et représentée à la Figure 2.5 | |
| • Une orientation de fibre des plis de surface du stratifié à moins 45° | |
| • Une direction de rainurage selon l'axe X du repère de la cellule robotisée, c'est-à-dire, perpendiculaire à l'axe « E1 » de la cellule robotisée, Figure 2.8 et Figure 2.5 | E1 X |
| • Les 6 vitesses de coupe en mètre par minute (m/min) | Tableau 2.6 |
| • Les 7 vitesses d'avance en millimètre par révolution d'outil (mm/tour) | Tableau 2.6 |

Les plans d'expériences OP10P4 et OP20P4 ont les mêmes réponses sélectionnées en fonction de l'évaluation de la qualité et de la précision du rainurage, voir la section précédente 2.2.3.

#### 2.2.8.1 Description du stratifié CFRP rainuré aux opérations OP10P4 et OP20P4

Le matériau rainuré est une plaque de stratifié symétrique quasi isotrope composée de 20 et 24 plis unidirectionnels de fibre de carbone et d'une matrice époxy. Ce changement d'épaisseur du stratifié est la différence entre le plan d'expérience de la plaque P4 et celui de la plaque P1 à l'exception de l'utilisation d'un outil neuf pour la plaque P4. Le dernier pli sous la plaque est un treillis de cuivre. La plaque est produite par automated fiber placement (AFP) et cuite en autoclave dans un laboratoire industriel du domaine aéronautique. L'orientation des plis du stratifié à 20 plis est détaillée à l'équation (2.2) et au Tableau 2.10. L'orientation des plis du stratifié à 24 plis est détaillée à l'équation (2.3) et au Tableau 2.11. Le stratifié est séparé en deux par un changement du nombre de plis symétrique de 20 à 24 plis selon la limite représentée en trait fantôme sur la Figure 2.12.

$$[-45/90/45/0/\pm45/90/\pm45/0]_S \tag{2.2}$$

Tableau 2.10 Orientation des 10 plis symétriques du stratifié rainuré

| No pli | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Orientation(°) | -45 | 90 | 45 | 0 | 45 | -45 | 90 | 45 | -45 | 0 |

$$[-45/90/45/0/\pm45/90/\pm45/0/\mp45]_S \tag{2.3}$$

Tableau 2.11 Orientation des 12 plis symétriques du stratifié rainuré

| No pli | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Orientation(°) | -45 | 90 | 45 | 0 | 45 | -45 | 90 | 45 | -45 | 0 | -45 | 45 |

#### 2.2.8.2 Description des séquences de rainurages des plans expérimentaux OP10P4 45° CR10 Y et OP20P4 -45° CR20 X

L'identification des échantillons de CFRP et de leurs conditions de coupe est décrite à la section précédente 2.2.6. Les vitesses de coupe augmentent en fonction des rangées et les vitesses d'avance augmentent en fonction des colonnes pour l'OP10P4 et orthogonalement pour l'OP20P4. Les axes globaux X et Y de la cellule robotisée indiquent à la Figure 2.12 l'orientation des rainures des opérations OP10P4 et OP20P4 respectivement. Le facteur de l'orientation des plis de surface est indiqué par rapport aux directions de rainurages. Il y a 4 trous de 9 mm de diamètres qui sont percés aux coins de la plaque de CFRP par le robot avant chaque opération de rainurage. Ces trous servent de repère relatif à la position des rainures lors de l'inspection sur CMM.

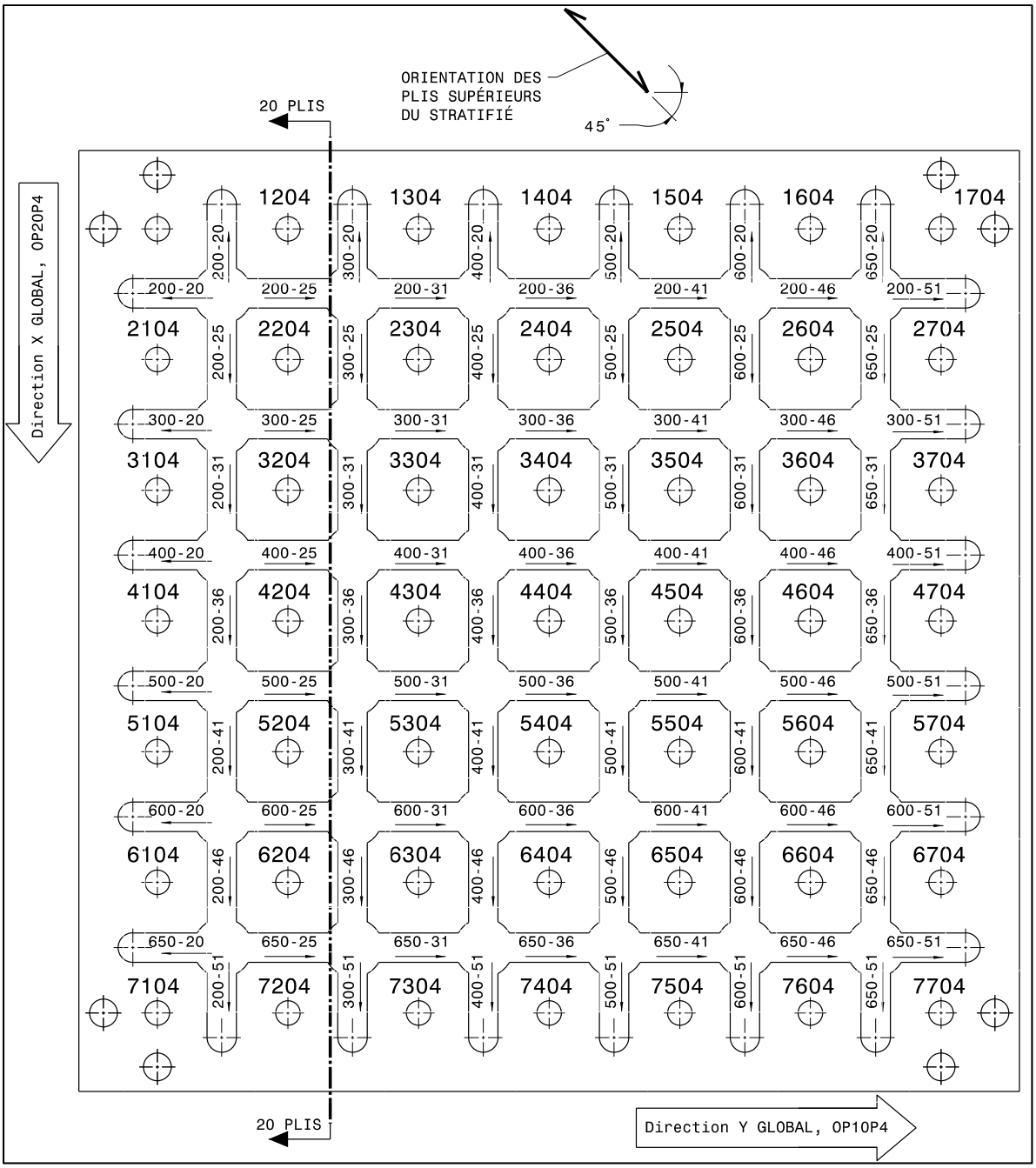
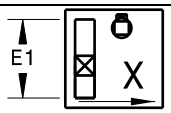



Figure 2.12 Description des échantillons de CFRP détourés des opérations OP10P4 et OP20P4

### 2.2.9 Plan expérimental OP30P3

Ce plan d'expérience consiste au rainurage de 24 essais avec une configuration du robot CR20. L'objectif est d'observer les réponses de qualités en fonction de l'orientation des plis de surface de plus ou moins 45° du stratifié de CFRP sans l'interaction de la configuration du robot et la direction de rainurage. Les essais sont moins nombreux et plus longs que les plans précédents pour comparer les réponses de qualité sur une plus longue distance qu'un pouce. Ce plan d'expérience est séparé en deux opérations de 12 essais chacune avec une orientation de plis de surface propre à chaque séquence. La cellule robotisée et le gabarit d'usinage utilisés sont décrits à la section précédente 2.2.2. L'assemblage du gabarit d'usinage et de la table dynamométrique est installé sur le positionneur à 2 axes, voir la Figure 2.8. La configuration du robot CR20 est décrite précédemment et illustrée à la Figure 2.5. Le stratifié de CFRP rainuré est décrit à la section 2.2.9.1. Le stratifié est percé avant l'opération de rainurage pour être fixé sur le gabarit à rainurer, Figure 2.13. L'outil neuf utilisé est décrit à la section précédente 2.2.1. Les échantillons de CFRP détourés et leur condition de coupe sont identifiés selon une matrice numérique à la section 2.2.9.2. Les conditions de coupe expérimentées sont décrites au Tableau 2.13.

Tableau 2.12 Les 5 facteurs de l'opération OP30P3 45° CR20 X

| | |
|---|---|
| • La configuration du robot CR20 détaillée à la section précédente 2.2.4 et représentée à la Figure 2.5 | |
| • Une orientation de la fibre des plis de surface du stratifié à 45° | |
| • Une direction de rainurage selon l'axe X du repère de la cellule robotisée, c'est-à-dire, perpendiculaire à l'axe « E1 » de la cellule robotisée, Figure 2.8 et Figure 2.5 |   |
| • Les 4 vitesses de coupe en mètre par minute (m/min) | Tableau 2.13 |
| • Les 3 vitesses d'avance en millimètre par révolution d'outil (mm/tour) | Tableau 2.13 |

L'opération OP30P3 -45° CR20 X dont l'orientation des plis de surface du stratifié est de moins 45° conserve les 4 autres facteurs de l'OP30P3 45° CR20 X.

Tableau 2.13 Vitesses de coupe et d'avance du plan OP30P3

| Vitesses de coupe (Vc) (m/min) | 150 | 200 | 300 | 400 |
|---|---|---|---|---|
| Révolution par minute (RPM) | 5013 | 6684 | 10 026 | 13 367 |
| Fréquence par flute (Hz) | 167 | 222 | 334 | 445 |
| Vitesse d'avance (Va) (mm/rev) | 0.1524 | 0.2032 | 0.254 | |

Le plan d'expérience OP30P3 a les mêmes réponses sélectionnées en fonction de l'évaluation de la qualité et de la précision du rainurage que les autres plans réalisés avec la cellule robotisée, voir la section précédente 2.2.3. Une opération de perçage sur CNC qui comporte 24 trous de dégagement pour l'outil à rainurer et 49 trous de fixation est décrite à la Figure 2.13.

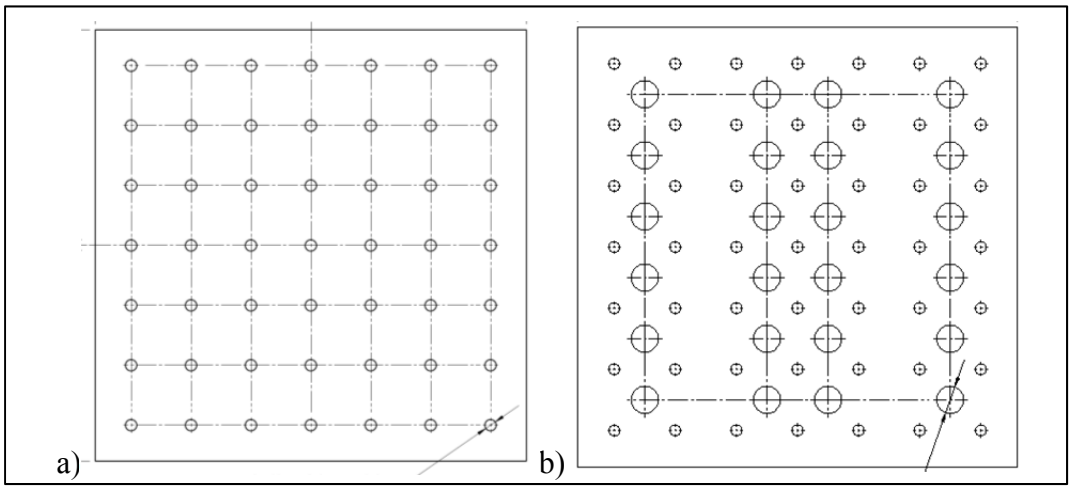



Figure 2.13 Description de l'opération de perçage du stratifié de CFRP pour l'OP30P3, a) 49 trous de fixation, b) 24 trous de dégagement pour l'outil à rainurer

#### 2.2.9.1 Description du stratifié CFRP rainuré

Le matériau rainuré est une plaque de stratifié symétrique quasi isotrope composée de 24 plis unidirectionnels de fibre de carbone et d'une matrice époxy. Le dernier pli sous la plaque est un treillis de cuivre. La plaque est produite par la pose à la main des plis et par l'application d'un vide à tous les 4 plis posés. Ensuite, elle est cuite sous vacuum et presse dans un laboratoire industriel du domaine aéronautique. L'orientation des plis du stratifié est détaillée à l'équation (2.4) et au Tableau 2.14.

$$[-45/90/45/0/\pm45/90/\pm45/0/\mp45]_S \tag{2.4}$$

Tableau 2.14 Orientation des 12 plis symétriques du stratifié rainuré

| No pli | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Orientation(°) | -45 | 90 | 45 | 0 | 45 | -45 | 90 | 45 | -45 | 0 | -45 | 45 |

#### 2.2.9.2 Description des opérations de rainurages des OP30P3 45° CR20 X et OP30P3 -45° CR20 X

L'identification des échantillons de CFRP et de leurs conditions de coupe est décrite à la section précédente 2.2.6. L'orientation des plis de surface est indiquée par rapport aux directions de rainurage. Les axes globaux X et Y de la cellule robotisée sont indiqués aux Figure 2.14 et Figure 2.15. Les rainures du plan expérimental OP30P3 sont parallèles à l'axe X global. À la Figure 2.14 les plis de surface sont orientés à 45° pour toutes les conditions de coupe. Trois échantillons sont rainurés en une séquence pour chaque condition de coupe. Ensuite, la table tournante pivote de 90° l'assemblage pour permettre le rainurage des échantillons de CFRP avec des plis de surface à moins 45° représentés à la Figure 2.15. Deux échantillons sont rainurés en une séquence pour chaque condition de coupe. Il y a 4 trous de 9 mm de diamètres qui sont percés aux coins de la plaque de CFRP par le robot avant chaque opération de rainurage. Ces trous servent de repère relatif à la position des rainures lors de l'inspection sur CMM.

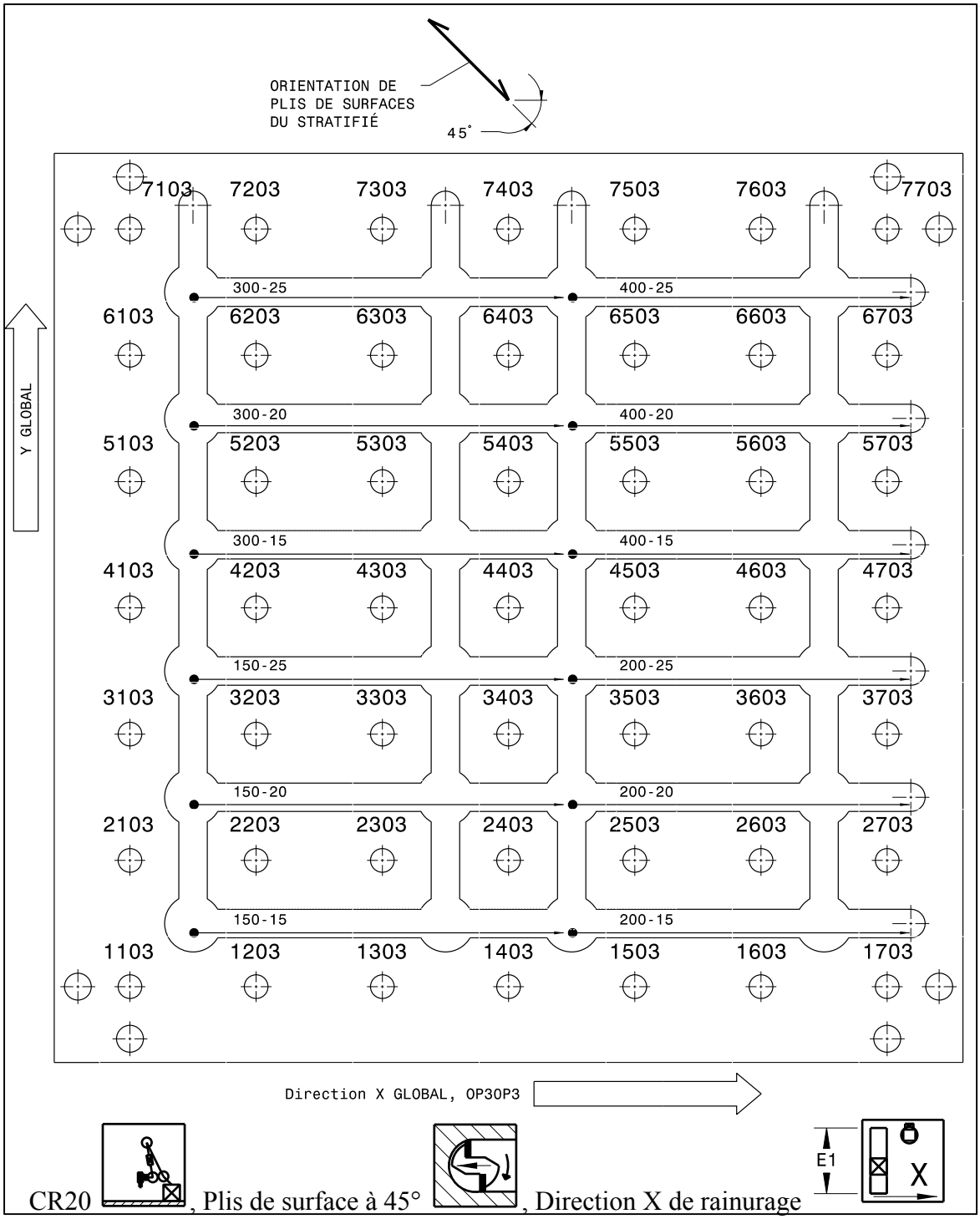



Figure 2.14 Opération de rainurage OP30P3 45° avec des plis de surface orientés à 45°

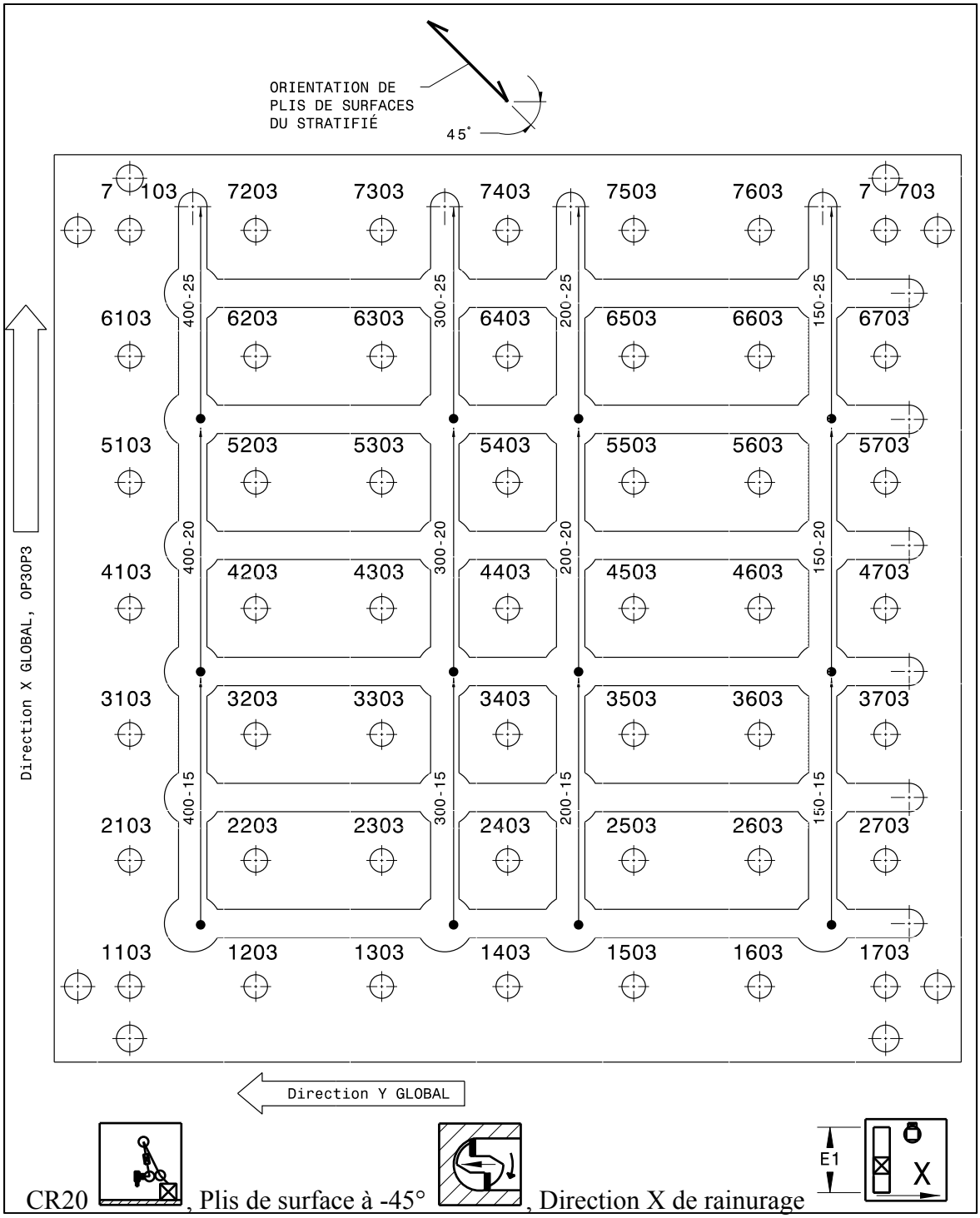



Figure 2.15 Opération de rainurage OP30P3 -45° avec des plis de surface orientés à moins 45° après une rotation de —90° autour de l'axe Z global par le DKP400

### 2.2.10 Plans expérimentaux OP50P5 et OP50P6

Chaque plan expérimental comporte 4 opérations de rainurage de 12 essais chacun à l'aide de la cellule robotisée. L'objectif est d'observer les réponses de qualités et de déterminer l'influence des facteurs suivants : l'orientation des plis de surface du stratifié de plus ou moins 45°, les deux configurations du robot et les deux directions de rainurage. La cellule robotisée et le gabarit d'usinage utilisés sont décrits à la section précédente 2.2.2. L'assemblage du gabarit d'usinage et de la table dynamométrique est installé sur le positionneur à 2 axes, voir les Figure 2.7 et Figure 2.8. Les configurations du robot CR10 et CR20 sont décrites à la section précédente 2.2.4 et illustrée aux Figure 2.4 et Figure 2.5. Le stratifié de CFRP rainuré est décrit à la section précédente 2.2.9.1. Le stratifié est percé avant l'opération de rainurage pour être fixé sur le gabarit à rainurer, voir la section précédente 2.2.7.1. L'opération OP50P5 utilise un outil usagé de 2 mètres précédemment utilisé pour le rainurage de la plaque P4. L'opération OP50P6 utilise un outil usagé de 2 mètres de rainurage de l'opération OP30P3. Le modèle d'outil utilisé est décrit à la section précédente 2.2.1. Les conditions de coupe expérimentées sont décrites au Tableau 2.15. Les opérations ont les mêmes réponses sélectionnées en fonction de l'évaluation de la qualité et de la précision du rainurage que les autres plans réalisés avec la cellule robotisée.

Tableau 2.15 Vitesses de coupe et d'avance des plans OP50P5 et OP50P6

| | | | |
|---|---|---|---|
| Vitesses de coupe (m/min) | 150 | 200 | 300 |
| Révolution par minute (RPM) | 5013 | 6684 | 10 026 |
| Fréquence par flute (Hz) | 167 | 222 | 334 |
| Vitesse d'avance (pouce/tour) | 0.1524 | 0.2032 | 0.254 |

#### 2.2.10.1 Plans expérimentaux OP50P5 45° CR10 Y et OP50P5 -45° CR10 X

Le plan OP50P5 -45° CR10 X comporte les mêmes vitesses et la même configuration robot. Cependant, l'orientation des plis de surface sont de -45° et la direction de rainurage est X.

L'identification des séquences de rainurages est illustrée à la Figure 2.16. Il y a 4 trous de 9 mm de diamètres qui sont percés aux coins de la plaque de CFRP par le robot avant chaque opération de rainurage. Ces trous servent de repère relatif à la position des rainures lors de l'inspection sur CMM. Les plans OP50P5 45° CR10 Y et OP50P5 -45° CR10 X comportent les 5 facteurs suivants :

Tableau 2.16 Les 5 facteurs du plan OP50P5 45° CR10 Y

| | |
|---|---|
| • La configuration du robot CR10 détaillée à la section précédente 2.2.2 et représentée à la Figure 2.4 | |
| • Une orientation de fibre des plis de surface du stratifié à 45° | |
| • Une direction de rainurage selon l'axe Y du repère de la cellule robotisée et parallèle à l'axe « E1 » de la cellule robotisée, Figure 2.7 et Figure 2.4 | E1 Y |
| • Les 3 vitesses de coupe en mètre par minute (m/min) | Tableau 2.15 |
| • Les 3 vitesses d'avance en millimètre par révolution d'outil (mm/tour) | Tableau 2.15 |

Tableau 2.17 Les 5 facteurs du plan OP50P5 -45° CR10 X

| | |
|---|---|
| • La configuration du robot CR10 détaillée à la section précédente 2.2.2 et représentée à la Figure 2.4 | |
| • Une orientation de la fibre des plis de surface du stratifié à moins 45° | |
| • Une direction de rainurage selon l'axe X du repère de la cellule robotisée, c'est-à-dire, perpendiculaire à l'axe « E1 » de la cellule robotisée, Figure 2.8 et Figure 2.5 | E1 X |
| • Les 3 vitesses de coupe en mètre par minute (m/min) | Tableau 2.15 |
| • Les 3 vitesses d'avance en millimètre par révolution d'outil (mm/tour) | Tableau 2.15 |

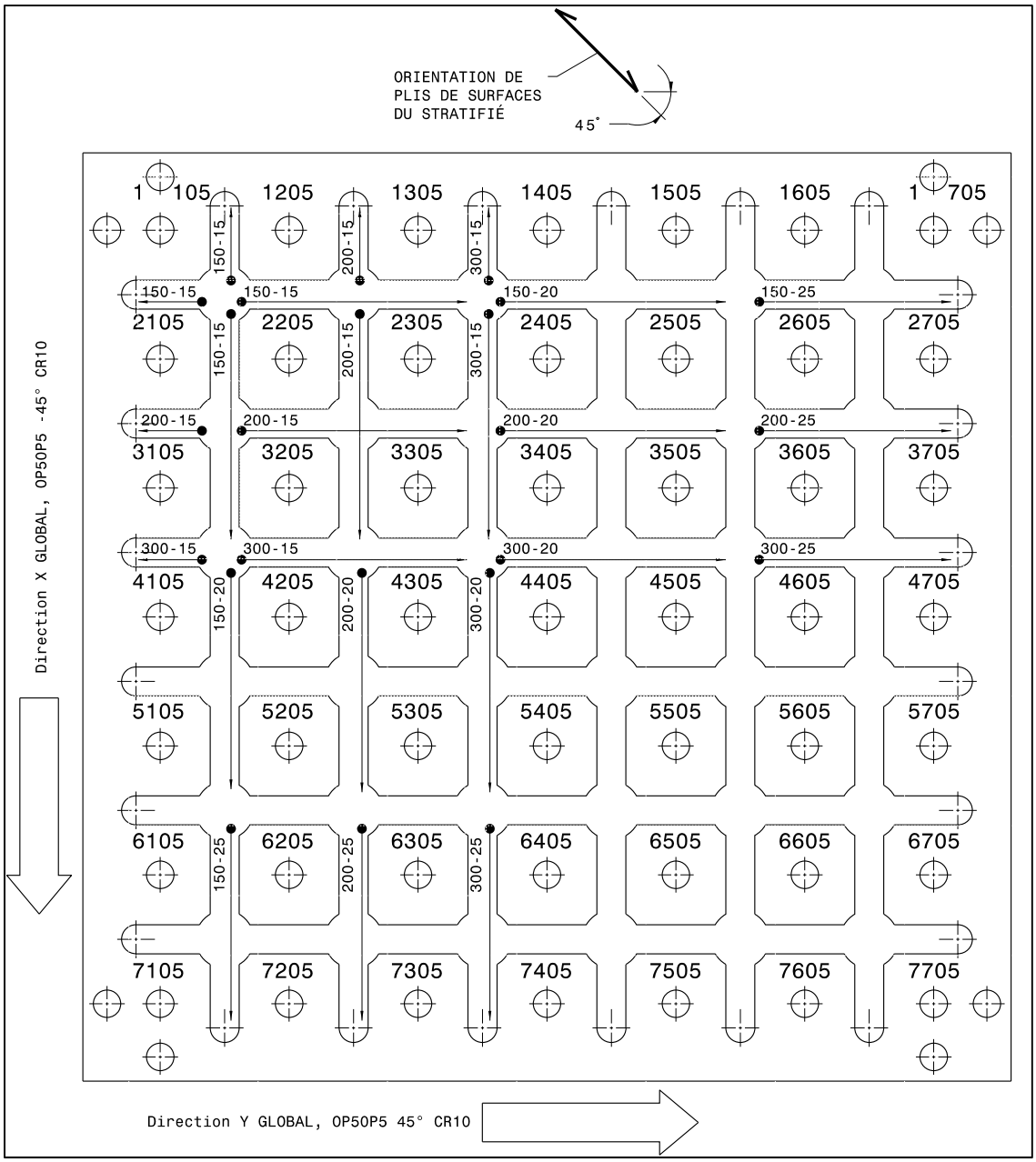



Figure 2.16 Opérations de rainurage OP50P5 45° CR10 Y et OP50P5 -45° CR10 X

### 2.2.10.2 Plans expérimentaux OP50P5 -45° CR20 X et OP50P5 45° CR20 Y

Le plan OP50P5 45° CR20 Y comporte les mêmes vitesses et la même configuration robot. Cependant, l'orientation des plis de surface sont de 45° et la direction de rainurage est Y.

L'identification des séquences de rainurages est illustrée à la Figure 2.17. Il y a 4 trous de 9 mm de diamètres qui sont percés aux coins de la plaque de CFRP par le robot avant chaque opération de rainurage. Ces trous servent de repère relatif à la position des rainures lors de l'inspection sur CMM. Les plans OP50P5 -45° CR20 X et OP50P5 45° CR20 Y comportent les 5 facteurs suivants :

Tableau 2.18 Les 5 facteurs du plan OP50P5 -45° CR20 X

| | |
|---|---|
| • La configuration du robot CR20 détaillée à la section précédente 2.2.4 et représentée à la Figure 2.5 | |
| • Une orientation de la fibre des plis de surface du stratifié à moins 45° | |
| • Une direction de rainurage selon l'axe X du repère de la cellule robotisée, c'est-à-dire, perpendiculaire à l'axe « E1 » de la cellule robotisée, Figure 2.8 et Figure 2.5 | E1 X |
| • Les 3 vitesses de coupe en mètre par minute (m/min) | Tableau 2.15 |
| • Les 3 vitesses d'avance en millimètre par révolution d'outil (mm/tour) | Tableau 2.15 |

Tableau 2.19 Les 5 facteurs du plan OP50P5 45° CR20 Y

| | |
|---|---|
| • La configuration du robot CR20 détaillée à la section précédente 2.2.4 et représentée à la Figure 2.5 | |
| • Une orientation de la fibre des plis de surface du stratifié à 45° | |
| • Une direction de rainurage selon l'axe Y du repère de la cellule robotisée et parallèle à l'axe « E1 » de la cellule robotisée, Figure 2.7 et Figure 2.4 | E1 Y |
| • Les 3 vitesses de coupe en mètre par minute (m/min) | Tableau 2.15 |
| • Les 3 vitesses d'avance en millimètre par révolution d'outil (mm/tour) | Tableau 2.15 |

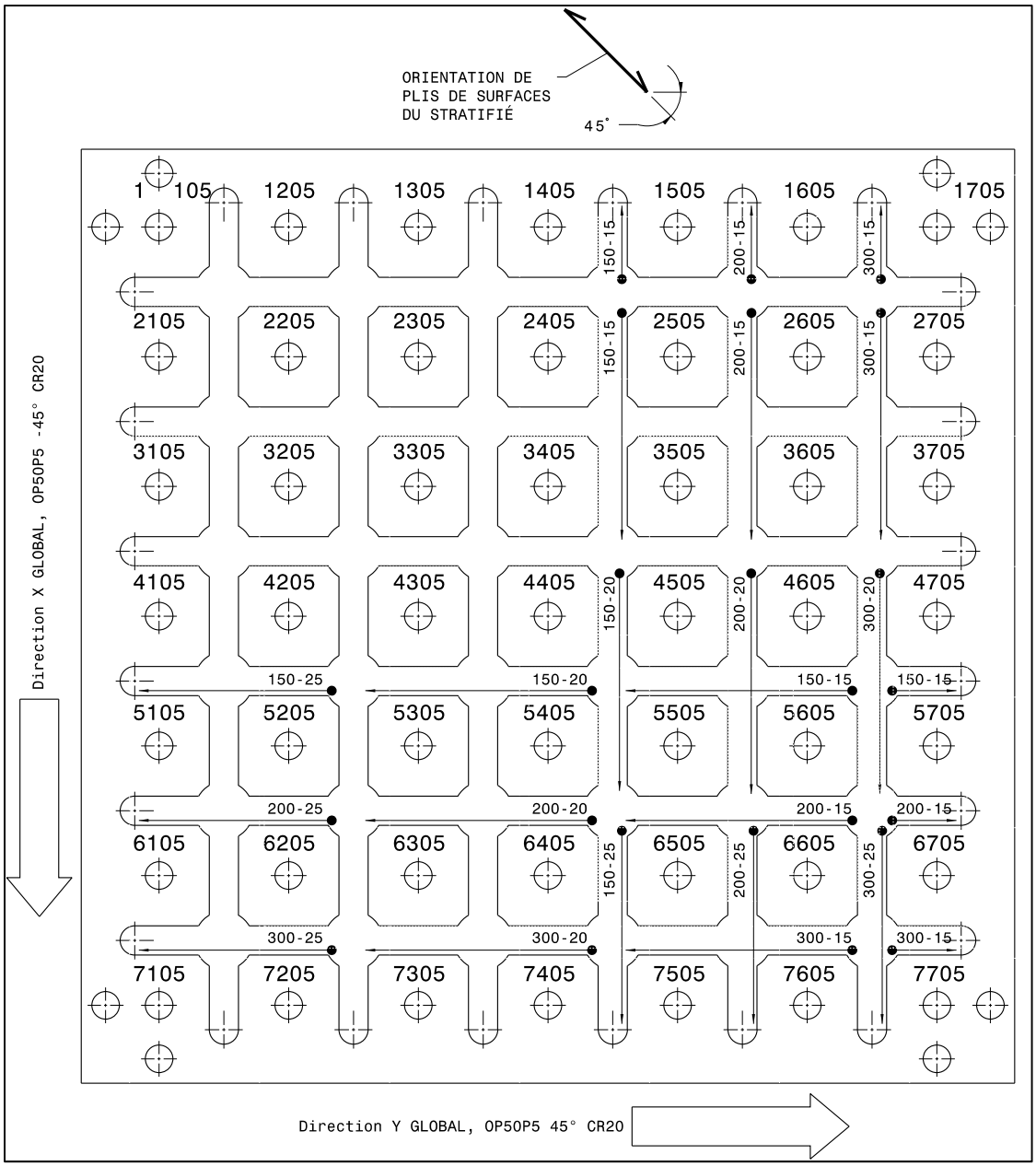



Figure 2.17 Opérations de rainurage OP50P5 45° CR20 Y et OP50P5 -45° CR20 X

### 2.2.10.3 Plans expérimentaux OP50P6 -45° CR10 Y et OP50P6 45° CR10 X

Le plan OP50P6 45° CR10 X comporte les mêmes vitesses et la même configuration robot. Cependant, l'orientation des plis de surface sont de 45° et la direction de rainurage est X.

L'identification des séquences de rainurages est illustrée à la Figure 2.18. Il y a 4 trous de 9 mm de diamètres qui sont percés aux coins de la plaque de CFRP par le robot avant chaque opération de rainurage. Ces trous servent de repère relatif à la position des rainures lors de l'inspection sur CMM. Le plan OP50P6 -45° CR10 Y comporte les 5 facteurs suivants :

Tableau 2.20 Les 5 facteurs du plan OP50P6 -45° CR10 Y

| | |
|---|---|
| • La configuration du robot CR10 détaillée à la section précédente 2.2.2 et représentée à la Figure 2.4 | |
| • Une orientation de fibre des plis de surface du stratifié à moins 45° | |
| • Une direction de rainurage selon l'axe Y du repère de la cellule robotisée et parallèle à l'axe « E1 » de la cellule robotisée, Figure 2.7 et Figure 2.4 | E1 Y |
| • Les 3 vitesses de coupe en mètre par minute (m/min) | Tableau 2.15 |
| • Les 3 vitesses d'avance en millimètre par révolution d'outil (mm/tour) | Tableau 2.15 |

Tableau 2.21 Les 5 facteurs du plan OP50P6 45° CR10 X

| | |
|---|---|
| • La configuration du robot CR10 détaillée à la section précédente 2.2.2 et représentée à la Figure 2.4 | |
| • Une orientation de fibre des plis de surface du stratifié à 45° | |
| • Une direction de rainurage selon l'axe X du repère de la cellule robotisée, c'est-à-dire, perpendiculaire à l'axe « E1 » de la cellule robotisée, Figure 2.8 et Figure 2.5 | E1 X |
| • Les 3 vitesses de coupe en mètre par minute (m/min) | Tableau 2.15 |
| • Les 3 vitesses d'avance en millimètre par révolution d'outil (mm/tour) | Tableau 2.15 |

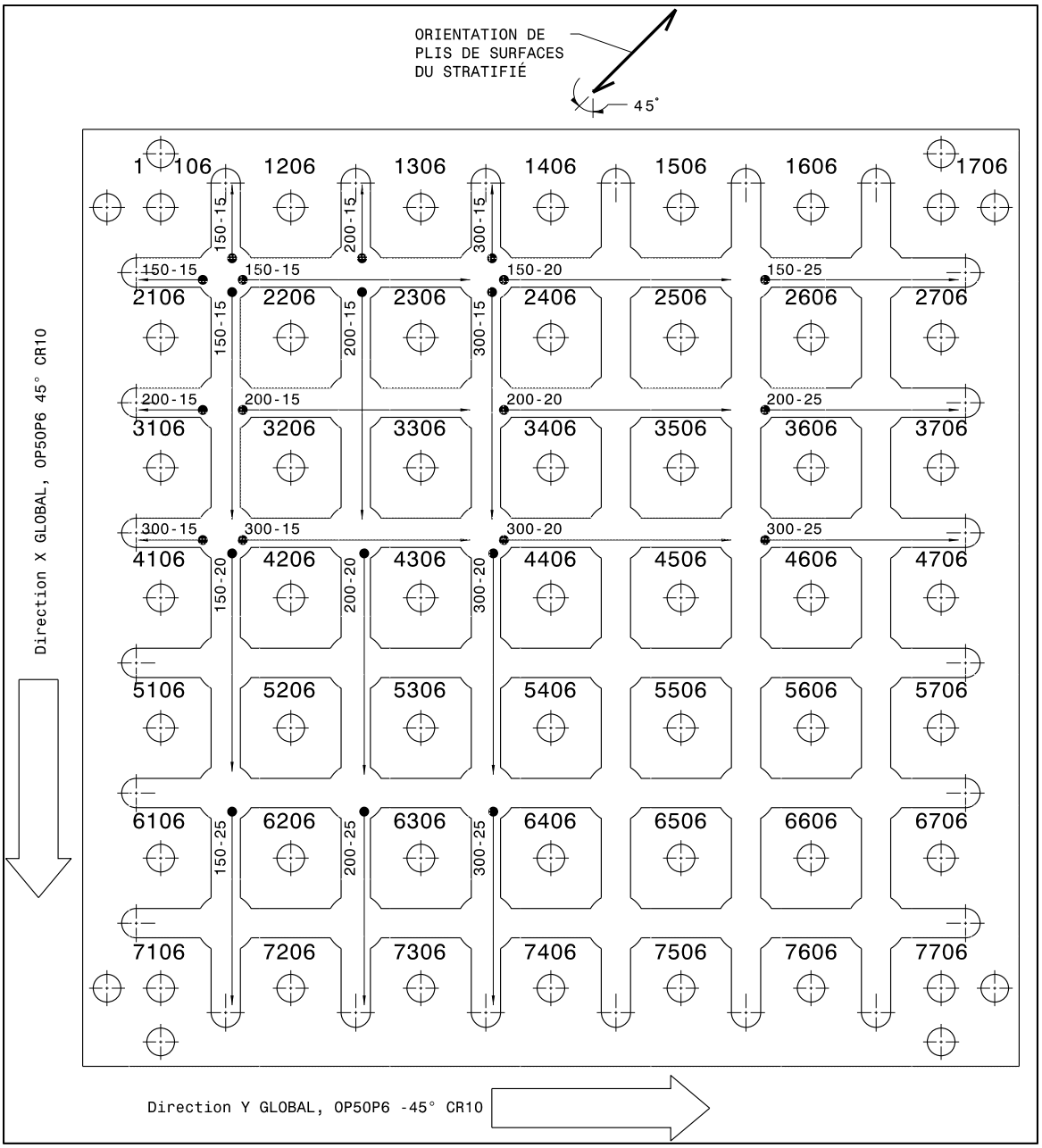



Figure 2.18 Opérations de rainurage OP50P6 -45° CR10 Y et OP50P6 45° CR10 X

### 2.2.10.4 Plans expérimentaux OP50P6 45° CR20 X et OP50P6 -45° CR20 Y

Le plan OP50P6 -45° CR20 Y comporte les mêmes vitesses et la même configuration robot. Cependant, l'orientation des plis de surface sont de -45° et la direction de rainurage est Y.

L'identification des séquences de rainurages est illustrée à la Figure 2.19. Il y a 4 trous de 9 mm de diamètres qui sont percés aux coins de la plaque de CFRP par le robot avant chaque opération de rainurage. Ces trous servent de repère relatif à la position des rainures lors de l'inspection sur CMM. Le plan OP50P6 45° CR20 X comporte les 5 facteurs suivants :

Tableau 2.22 Les 5 facteurs du plan OP50P6 45° CR20 X

| | |
|---|---|
| La configuration du robot CR20 détaillée à la section précédente 2.2.4 et représentée à la Figure 2.5 | |
| Une orientation de la fibre des plis de surface du stratifié à 45° | |
| Une direction de rainurage selon l'axe X du repère de la cellule robotisée, c'est-à-dire, perpendiculaire à l'axe « E1 » de la cellule robotisée, Figure 2.8 et Figure 2.5 | E1 X |
| Les 3 vitesses de coupe en mètre par minute (m/min) | Tableau 2.15 |
| Les 3 vitesses d'avance en millimètre par révolution d'outil (mm/tour) | Tableau 2.15 |

Tableau 2.23 Les 5 facteurs du plan OP50P6 -45° CR20 Y

| | |
|---|---|
| La configuration du robot CR20 détaillée à la section précédente 2.2.4 et représentée à la Figure 2.5 | |
| Une orientation de la fibre des plis de surface du stratifié à moins 45° | |
| Une direction de rainurage selon l'axe Y du repère de la cellule robotisée et parallèle à l'axe « E1 » de la cellule robotisée, Figure 2.7 et Figure 2.4 | E1 Y |
| Les 3 vitesses de coupe en mètre par minute (m/min) | Tableau 2.15 |
| Les 3 vitesses d'avance en millimètre par révolution d'outil (mm/tour) | Tableau 2.15 |

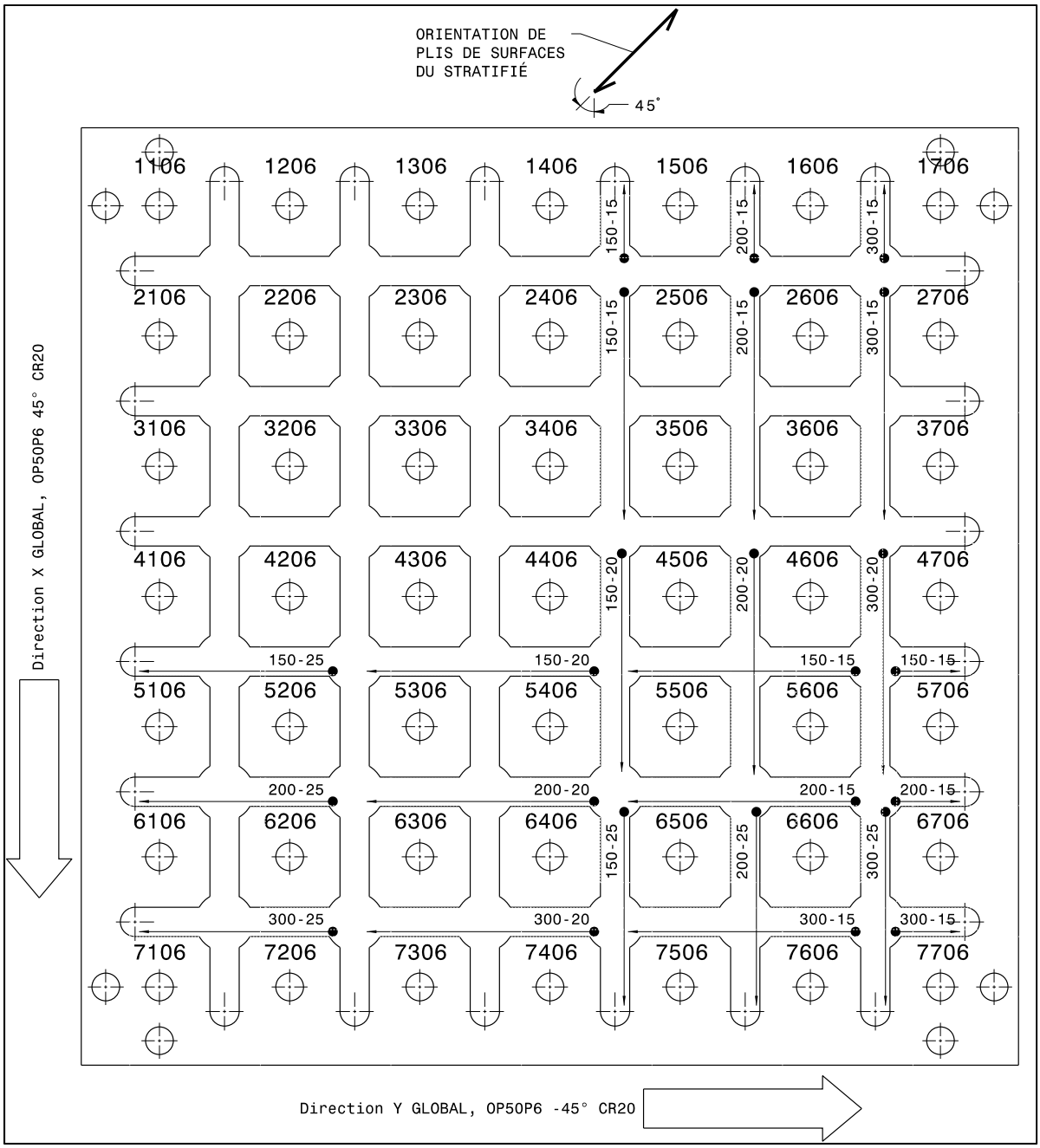



Figure 2.19 Opérations de rainurage OP50P6 -45° CR20 Y et OP50P6 45° CR20 X

## 2.3 Expérimentation pour évaluer la qualité de rainurage de stratifié CFRP sur centre d'usinage numérique

Deux opérations de rainurages OP10P2 et OP20P2 sont effectuées sur un stratifié de CFRP avec un centre d'usinage numérique. L'objectif est de comparer les réponses de qualité de ces opérations avec les réponses obtenues des plans expérimentaux avec la cellule robotisée. Le stratifié CFRP utilisé est d'une même fabrication et caractéristique que celui des opérations OP10P1 et OP20P1.

### 2.3.1 Plans expérimentaux de rainurages OP10P2 et OP20P2 sur centre d'usinage numérique

Chaque plan d'expérience consiste au rainurage de 42 essais de CFRP à l'aide du centre d'usinage numérique HURON K2X10, Figure 2.20. Le gabarit et la table dynamométrique KISTLER utilisés sont décrits à la section précédente 2.2.2. L'assemblage de la plaque CFRP, du gabarit d'usinage et de la table dynamométrique est installé sur au centre de la table du centre d'usinage numérique, Figure 2.21. Le stratifié de CFRP de 24 plis rainuré est décrit à la section précédente 2.2.7.2 et il est de même caractéristique que celui des opérations OP10P1 et OP20P1. Le stratifié subit une opération de perçage avant l'opération de rainurage pour être fixé sur le gabarit d'usinage, section précédente 2.2.7.1 et Figure 2.9. L'outil neuf utilisé est décrit à la section précédente 2.2.1. Les 49 échantillons de CFRP détourés sont identifiés selon une matrice numérique à la section 2.3.1.1. Les conditions de coupe expérimentées sont décrites précédemment au Tableau 2.6 et sont les mêmes que ceux des opérations OP10P1, OP20P1, OP10P4 et OP20P4. L'opération de rainurage OP10P2 est parallèle à l'axe X et l'OP10P2 est parallèle à l'axe Y du centre d'usinage numérique, Figure 2.22.

Figure 2.20 Centre d'usinage numérique HURON K2X10

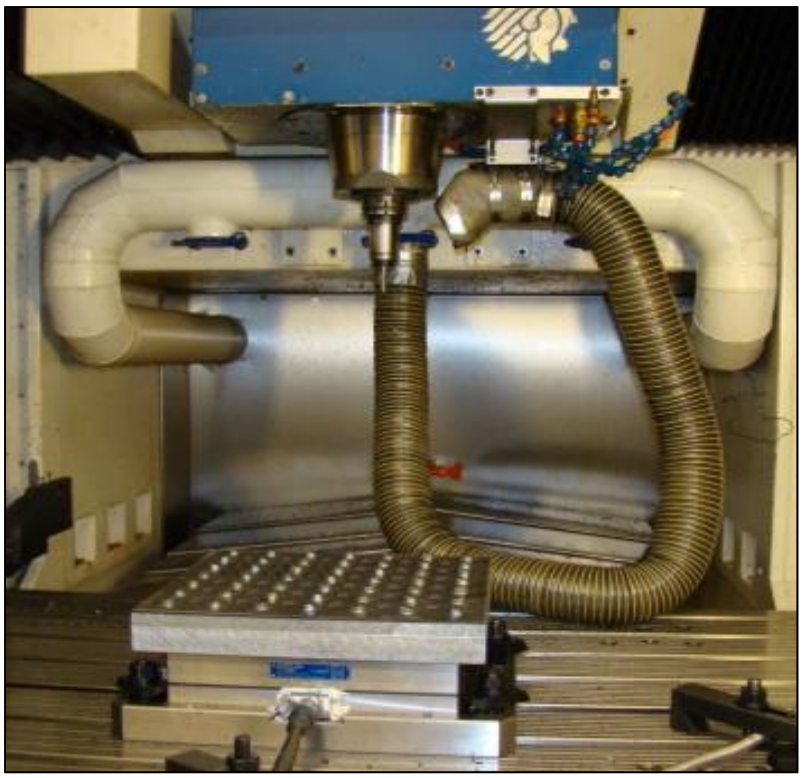


Figure 2.21 Plaque CFRP, gabarit et table KISTLER installés sur centre d'usinage numérique HURON K2X10

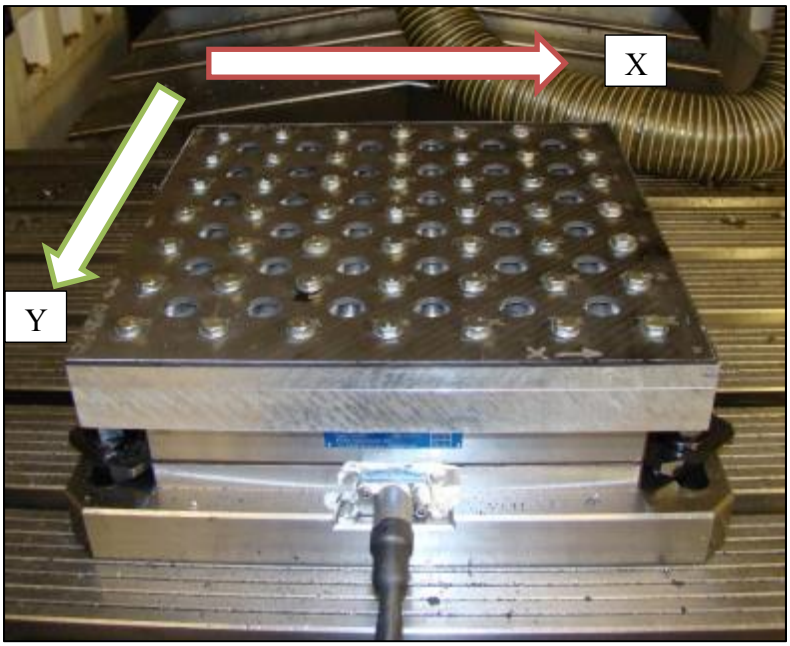



Figure 2.22 Directions respectives de rainurage X et Y des opérations OP10P2 et OP20P2

Les plans d'expériences OP10P2 et OP20P2 ont les mêmes réponses sélectionnées en fonction de l'évaluation de la qualité du rainurage, voir la section précédente 2.2.3.

Le plan expérimental OP10P2 comporte les 3 facteurs suivants :

- Une orientation de la fibre des plis de surface du stratifié à moins 45° ;
- Les 6 vitesses de coupe en mètre par minute (m/min), Tableau 2.6;
- Les 7 vitesses d'avance en millimètre par révolution d'outil (mm/tour), Tableau 2.6.

Le plan expérimental OP20P2 comporte les 3 facteurs suivants :

- Une orientation de la fibre des plis de surface du stratifié à 45° ;
- Les 6 vitesses de coupe en mètre par minute (m/min), Tableau 2.6;
- Les 7 vitesses d'avance en millimètre par révolution d'outil (mm/tour), Tableau 2.6.

#### 2.3.1.1 Description des échantillons de stratifié CFRP détourés à l'OP10P2 et OP20P2

Les échantillons de CFRP sont identifiés à l'aide d'une numérotation de 4 chiffres, Figure 2.23. Les deux premiers chiffres désignent la rangée et la colonne sur la plaque. Les deux derniers chiffres désignent le numéro de la plaque de CFRP.

Les conditions de coupe sont identifiées par deux numéros séparés par un tiret. Le premier numéro désigne la vitesse de coupe en mètre par minute. Le second numéro à deux chiffres désigne la vitesse d'avance en centième de millimètre par révolution d'outil.

Les vitesses de coupe augmentent en fonction des rangées et les vitesses d'avance augmentent en fonction des colonnes pour l'OP10P2 et orthogonalement pour l'OP20P2. Les rainures sont usinées d'abord dans l'ordre croissant des vitesses de coupes et ensuite dans l'ordre croissant des vitesses d'avance. La flèche sous les conditions de coupes indique la direction et le sens d'avance de l'outil.

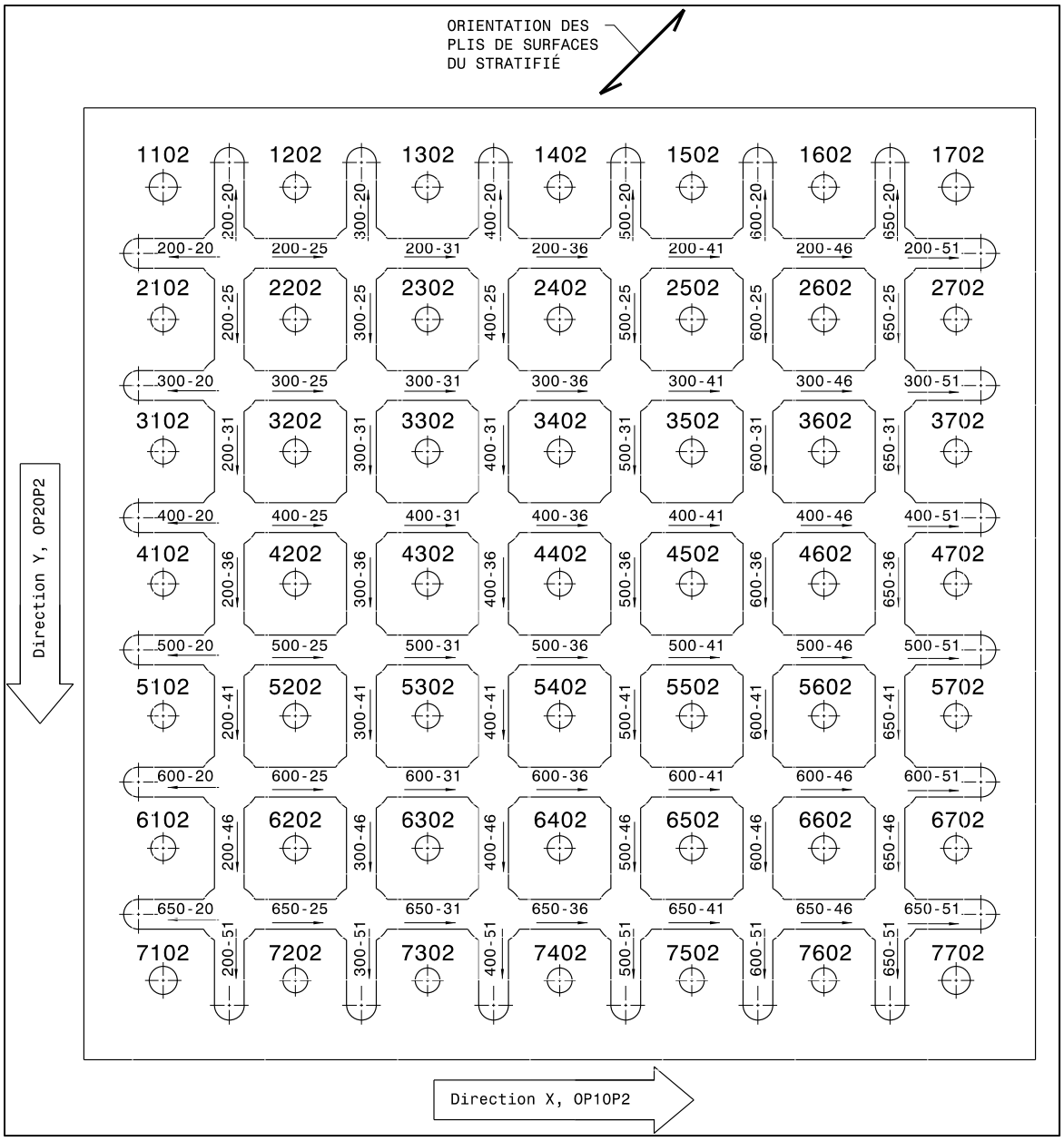



Figure 2.23 Identification d'échantillons de stratifiés de CFRP détourés des opérations OP10P2 et OP20P2

# CHAPITRE 3

# TRAITEMENT DE RÉSULTATS

## 3.1 Forces de coupe orthogonales

Les résultats des forces de coupe moyennes sont présentés par opérations dans la section suivante. Les efforts de coupe sont échantillonnés à 25 kHz. Les directions d'effort normal, axial et d'avance sont illustrées à la Figure 3.1 pour chaque essai.

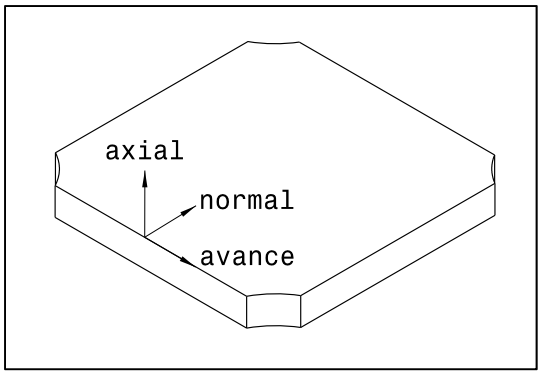



Figure 3.1 Direction des efforts de coupe orthogonaux pour chaque essai

Les forces moyennes sont calculées à partir d'un échantillon de 4 révolutions d'outil pour chaque essai telles qu'illustrées à la Figure 3.2. Il est facile de distinguer les 8 passages des 2 flutes de l'outil PCD dans le stratifié CFRP. L'outil utilisé a un angle d'hélice nul ce qui engendre un effort moyen axial faible sans tendance. Chaque droite de régression de graphiques des sections suivantes est calculée à partir de la valeur moyenne d'efforts moyens pour les 6 vitesses de coupe ou les 7 vitesses d'avance.

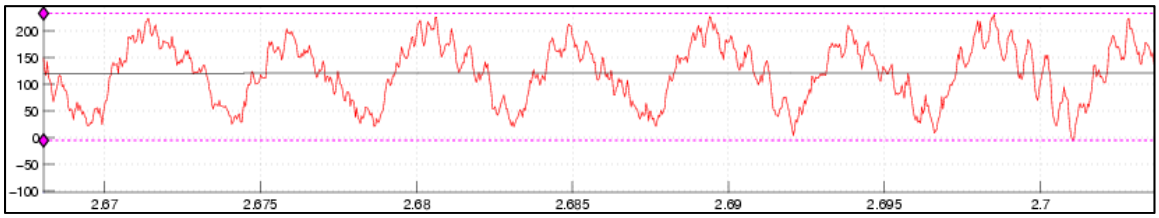



Figure 3.2 Signal de force pour 4 tours d'outil servant à calculer l'effort moyen

### 3.1.1 Efforts de coupe pour l'opération OP10P1 45° CR10 Y

Cette opération de rainurage est la première de deux sur la première plaque P1. La seconde opération OP20P1 -45° CR20 X comporte les mêmes vitesses avec la configuration du robot CR20, la direction X de rainurage dans la cellule robotisée et le pli de surface orienté à -45°. Le signal de force de l'essai à 650 m/min et 0.3048 mm/rev est corrompu à l'enregistrement donc il n'est pas présent dans les graphiques.

La vitesse d'avance influence les efforts moyens d'avance à la Figure 3.3. Les efforts d'avance moyens ont une tendance parallèle et sont légèrement supérieurs à ceux des opérations de la plaque P2 sur centre d'usinage en fonction de la vitesse d'avance. Les efforts d'avance moyens sont égaux à ceux de la deuxième opération de cette plaque l'OP20P1 -45° CR20 X en fonction de la vitesse d'avance. La vitesse d'avance n'influence pas les efforts normaux moyens à la Figure 3.4. Les efforts normaux moyens ont une tendance parallèle et sont supérieurs à ceux de l'OP20P2 45° sur centre d'usinage en fonction de la vitesse d'avance. Les efforts d'avance moyens sont supérieurs aux efforts normaux moyens pour une vitesse supérieure à 0.36 mm/rev. Les efforts axiaux sont faibles et sans tendances à la Figure 3.5 avec l'utilisation d'un outil dont l'angle d'hélice est nul et ils ne seront pas illustrés pour les opérations suivantes.

La vitesse de coupe n'influence pas les efforts d'avance moyens à la Figure 3.6 et elle a une faible influence les efforts normaux moyens à la Figure 3.7. Les efforts moyens d'avance et normaux sont similaires à ceux de la deuxième opération de cette plaque l'OP20P1 -45° CR20 X en fonction de la vitesse de coupe. Les efforts d'avance moyens sont légèrement supérieurs à ceux des opérations de la plaque P2 sur centre d'usinage en fonction de la vitesse de coupe. Les efforts normaux moyens sont supérieurs à ceux de l'OP20P2 45° et sont supérieurs de 90 N à ceux de l'OP10P2 -45° sur centre d'usinage en fonction de la vitesse de coupe.

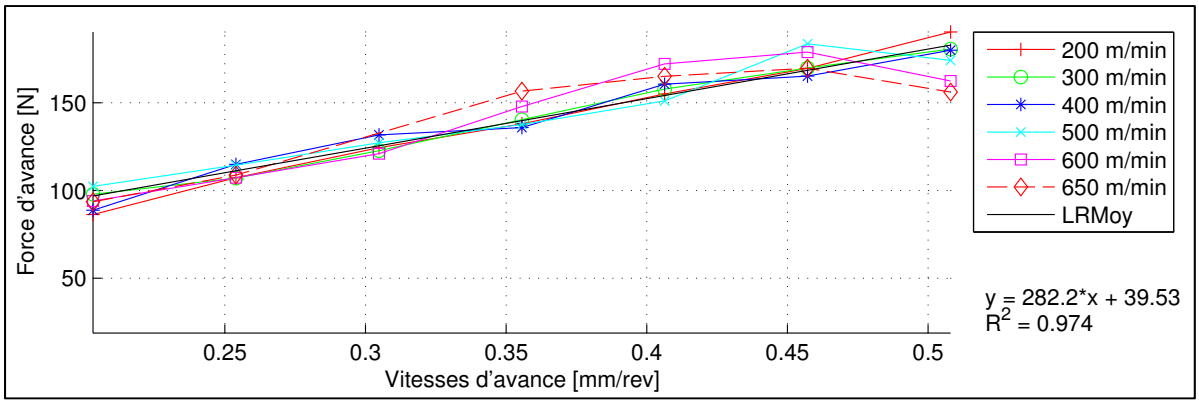



Figure 3.3 Effort d'avance moyen en fonction de l'avance de l'OP10P1 45° CR10 Y

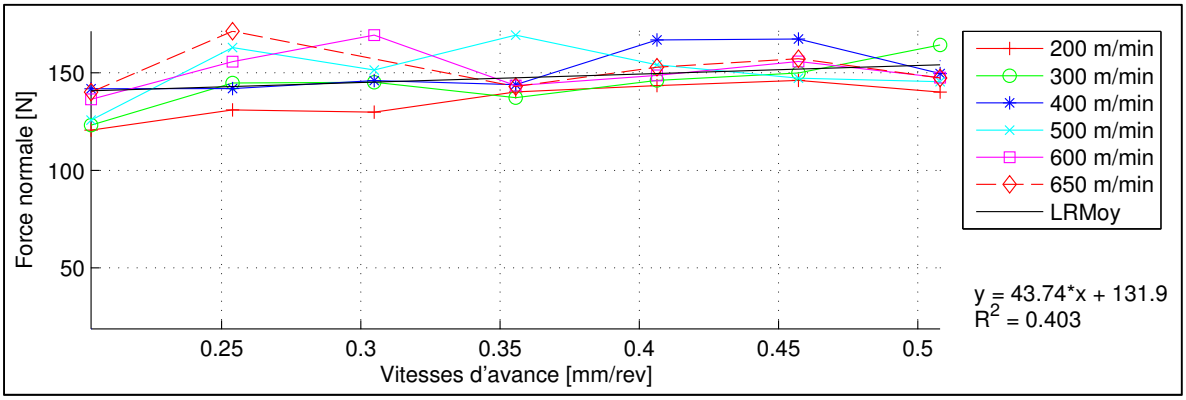



Figure 3.4 Effort normal moyen en fonction de l'avance de l'OP10P1 45° CR10 Y

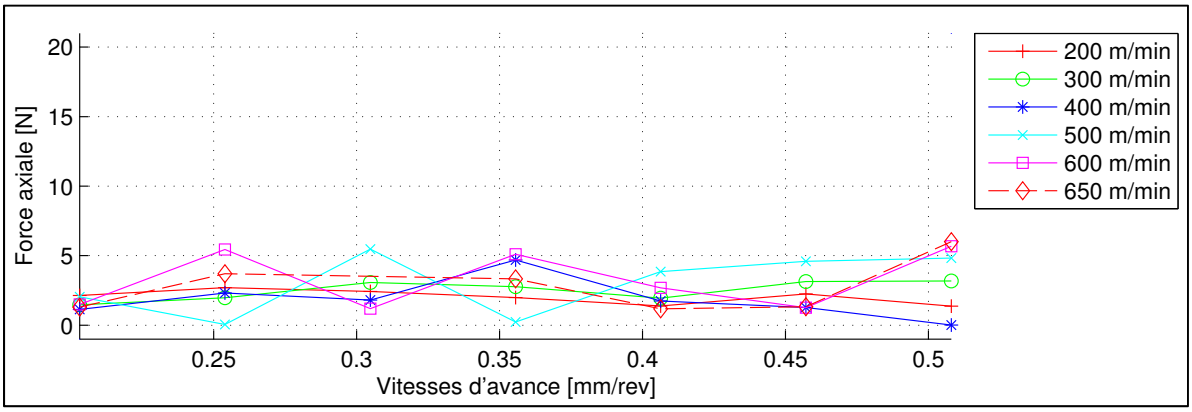



Figure 3.5 Effort axial moyen en fonction de l'avance de l'OP10P1 45° CR10 Y

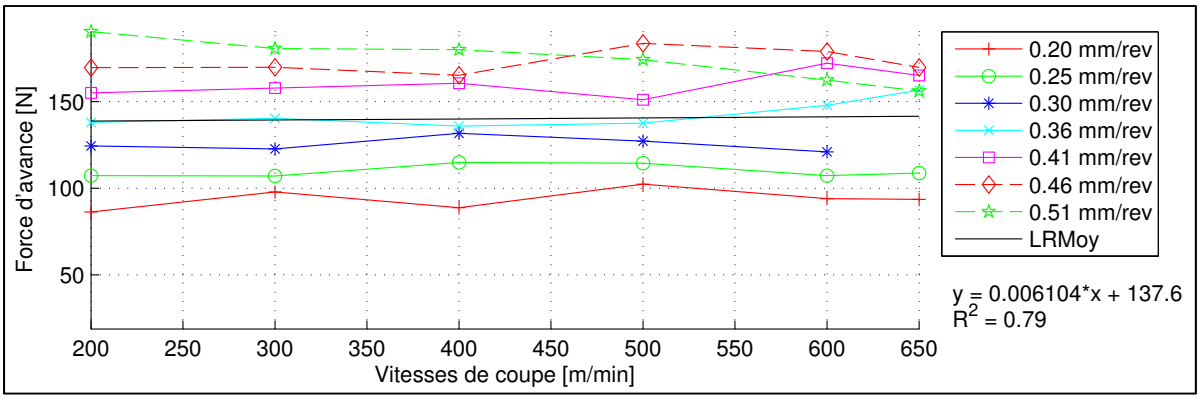



Figure 3.6 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP10P1 45° CR10 Y

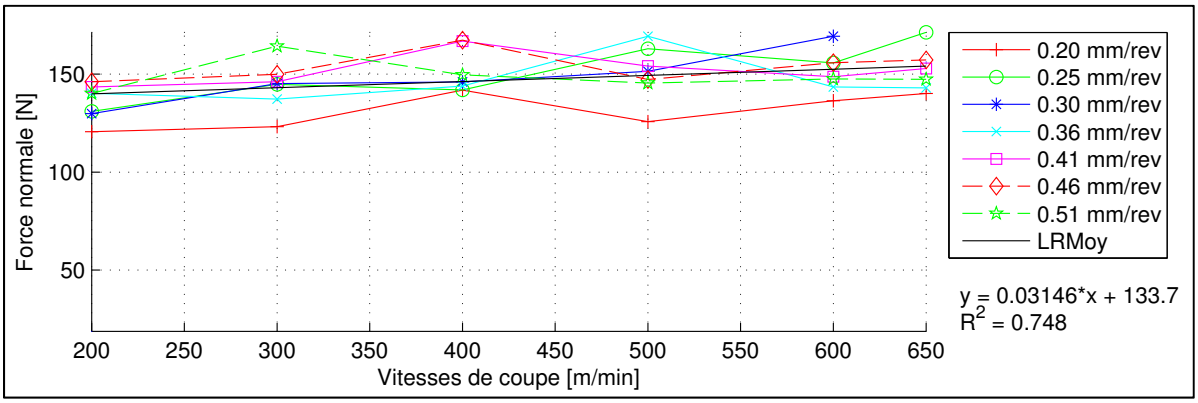



Figure 3.7 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP10P1 45° CR10 Y

### 3.1.2 Efforts de coupe pour l'opération OP20P1 -45° CR20 X

Cette opération de rainurage est la deuxième de deux sur la première plaque P1. La première opération OP10P1 45° CR10 Y comporte les mêmes vitesses avec la configuration du robot CR10, la direction Y de rainurage dans la cellule robotisée et le pli de surface orienté à 45°. Le signal de force de l'essai à 600 m/min et 0.2032 mm/rev est corrompu à l'enregistrement donc il n'est pas présent dans les graphiques.

La vitesse d'avance influence les efforts d'avance moyens à la Figure 3.8. La vitesse de coupe n'influence pas les efforts d'avance moyens à la Figure 3.9. Les efforts d'avance moyens sont similaires à ceux de la première opération de cette plaque

l'OP10P1 45° CR10 Y en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Les efforts d'avance moyens ont une tendance parallèle et sont supérieurs à ceux des opérations de la plaque P2 sur centre d'usinage en fonction de la vitesse d'avance. Les efforts d'avance moyens sont légèrement supérieurs à ceux des opérations de la plaque P2 sur centre d'usinage en fonction de la vitesse de coupe.

La vitesse d'avance a une faible influence sur les efforts normaux moyens à la Figure 3.10. La vitesse de coupe a une faible influence sur les efforts normaux moyens à la Figure 3.11. Les efforts normaux moyens sont similaires à ceux de la première opération de cette plaque l'OP10P1 45° CR10 Y en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Les efforts normaux moyens ont une tendance parallèle et sont supérieurs à ceux de l'OP20P2 45° sur centre d'usinage en fonction de la vitesse d'avance. Les efforts normaux moyens sont supérieurs à ceux des opérations de la plaque P2 sur centre d'usinage P2 en fonction de la vitesse de coupe. Les efforts d'avance moyens sont supérieurs aux efforts normaux moyens pour une vitesse supérieure à 0.40 mm/rev. Les efforts axiaux sont faibles et sans tendances avec l'utilisation d'un outil dont l'angle d'hélice est nul et ils ne sont pas illustrés.

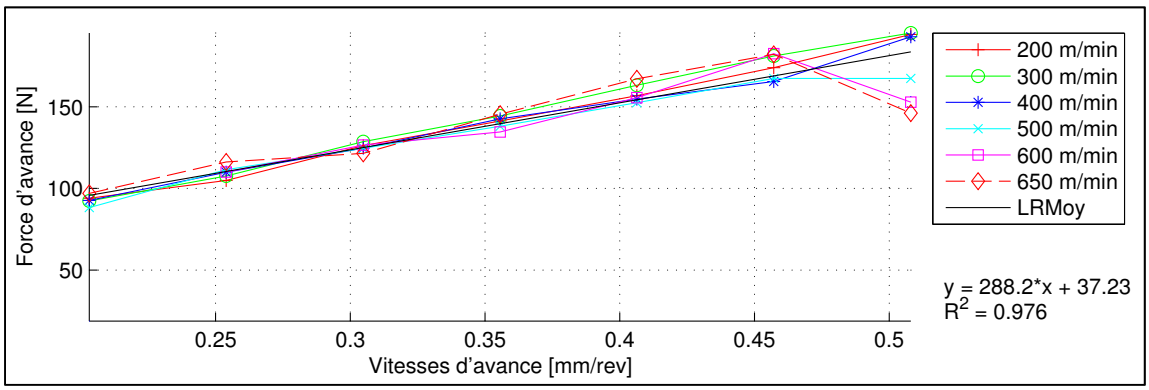



Figure 3.8 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP20P1 -45° CR20 X

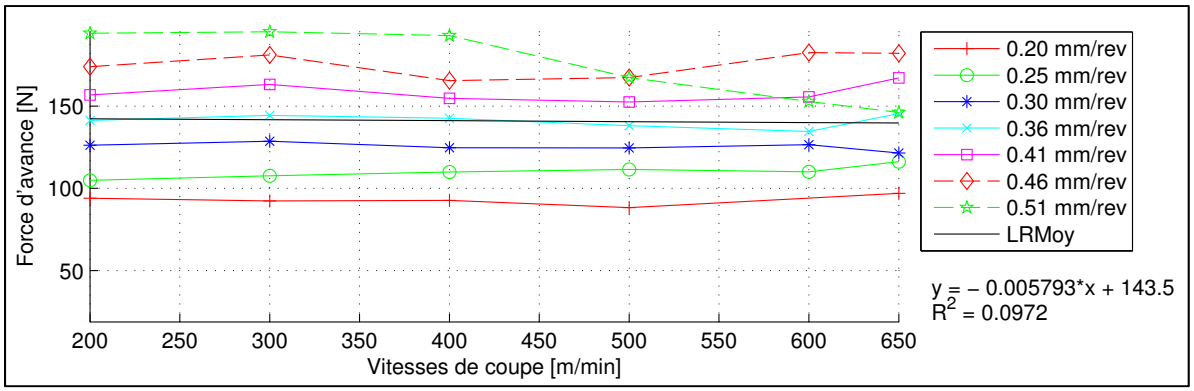



Figure 3.9 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP20P1 -45° CR20 X

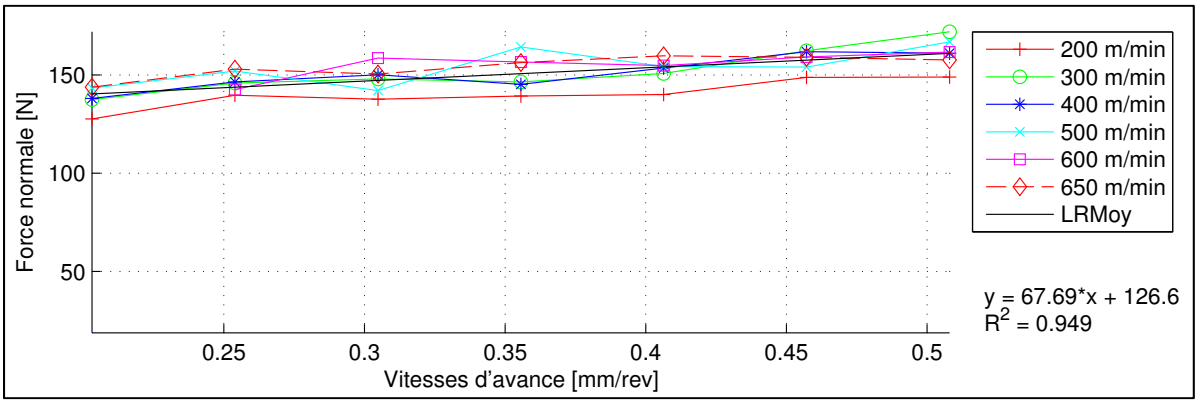



Figure 3.10 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP20P1 -45° CR20 X

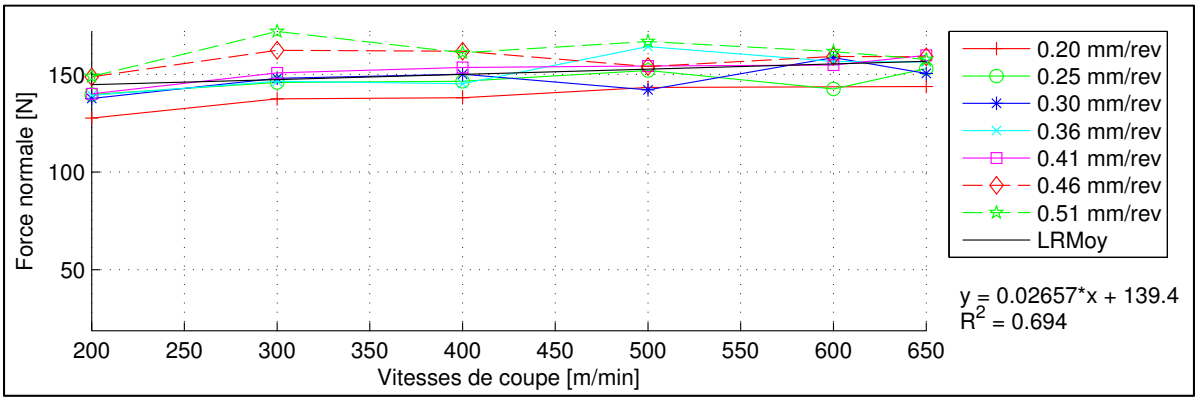



Figure 3.11 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP20P1 -45° CR20 X

### 3.1.3 Efforts de coupe pour l'opération sur centre d'usinage OP10P2 -45°

Cette opération de rainurage est la première de deux sur la plaque P2 et sur centre d'usinage. La seconde opération OP20P2 45° comporte les mêmes vitesses avec un pli de surface orienté à 45°. La vitesse d'avance influence les efforts d'avance moyens à la Figure 3.12. La vitesse de coupe n'influence pas les efforts d'avance moyens à la Figure 3.13. Les efforts d'avance moyens sont similaires à ceux de la deuxième opération OP20P2 45° de cette plaque en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Les efforts d'avance moyens ont une tendance plus forte et sont supérieurs à ceux des opérations robotisées de la plaque P4 en fonction de la vitesse d'avance. Les efforts d'avance moyens n'ont aucune tendance et sont similaires à ceux des opérations de la plaque P4 en fonction de la vitesse de coupe.

La vitesse d'avance n'influence pas les efforts normaux moyens à la Figure 3.14. La vitesse de coupe a une faible influence sur les efforts normaux moyens à la Figure 3.15. Les efforts normaux moyens n'ont aucune tendance et sont similaires à ceux des opérations de la plaque P4 en fonction de la vitesse d'avance. Les efforts normaux moyens ont une tendance parallèle et sont inférieurs à ceux de la deuxième opération de cette plaque l'OP20P2 45° en fonction de la vitesse de coupe. Les efforts normaux moyens ont une tendance parallèle et sont similaires à ceux de l'OP10P4 45° CR10 Y en fonction de la vitesse de coupe. Les efforts d'avance moyens sont supérieurs aux efforts normaux moyens pour l'ensemble des vitesses d'avance. Les efforts axiaux sont faibles et sans tendance avec l'utilisation d'un outil dont l'angle d'hélice est nul et ils ne sont pas illustrés.

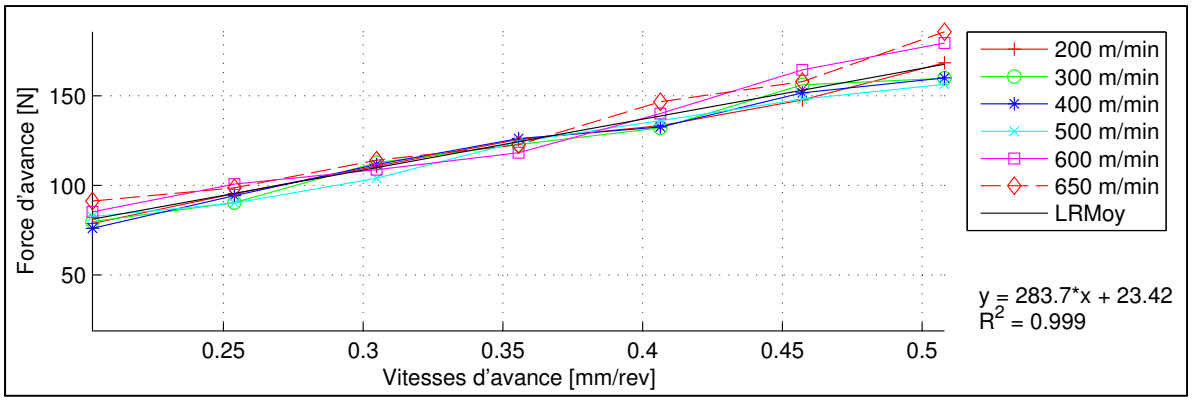



Figure 3.12 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance sur centre d'usinage, OP10P2 -45°

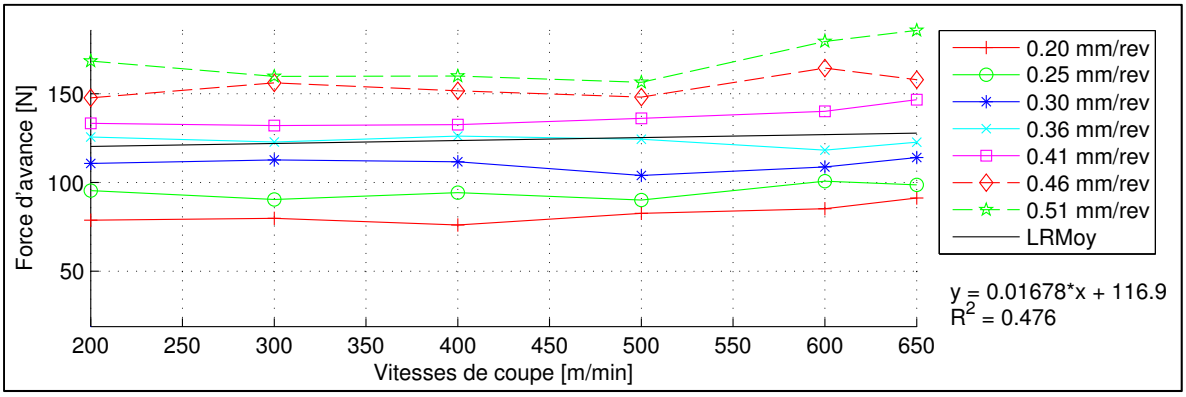



Figure 3.13 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe sur centre d'usinage, OP10P2 -45°

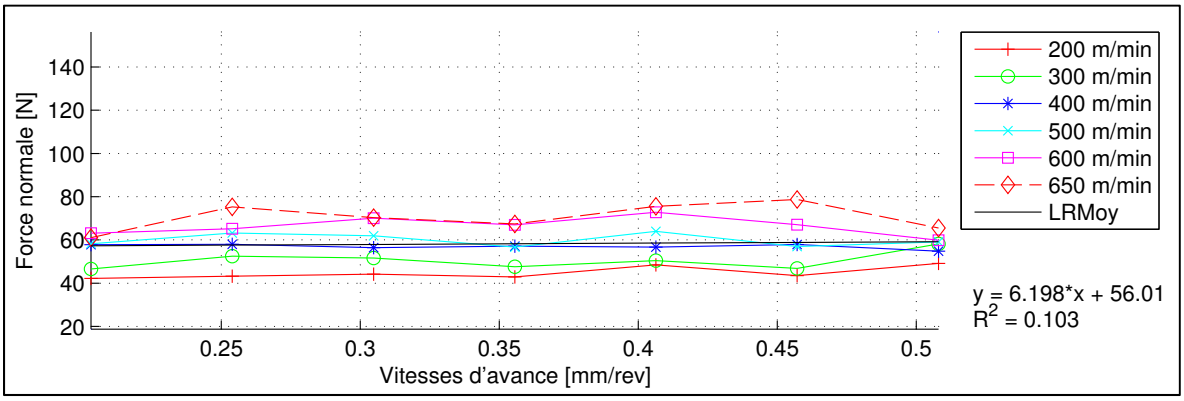



Figure 3.14 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance sur centre d'usinage, OP10P2 -45°

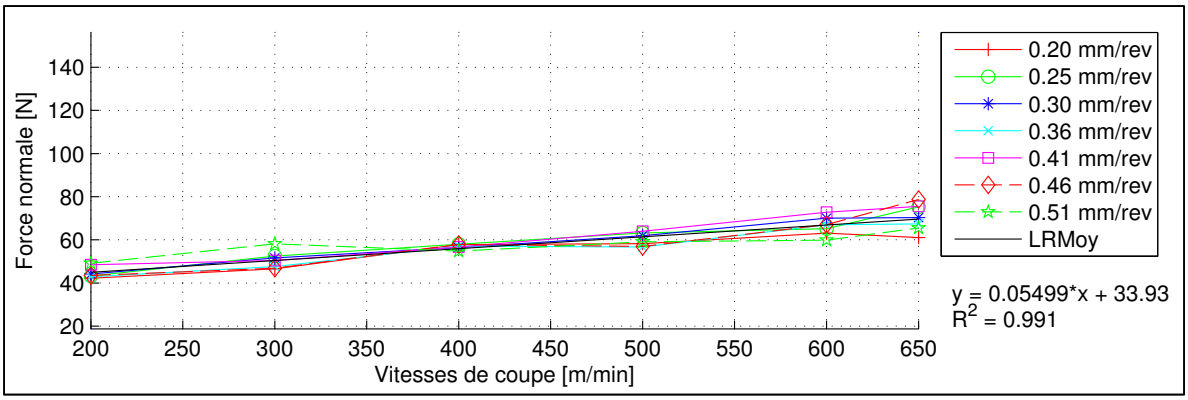



Figure 3.15 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe sur centre d'usinage, OP10P2 -45°

### 3.1.4 Efforts de coupe pour l'opération sur centre d'usinage OP20P2 45°

Cette opération de rainurage est la deuxième de deux sur la plaque P2 et sur centre d'usinage. La première opération OP10P2 -45° comporte les mêmes vitesses avec un pli de surface orienté à -45°. La vitesse d'avance influence les efforts d'avance moyens à la Figure 3.16. La vitesse de coupe n'influence pas les efforts d'avance moyens à la Figure 3.17. Les efforts d'avance moyens sont similaires à ceux de la première opération OP10P2 -45° de cette plaque en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Les efforts d'avance moyens ont une tendance plus forte et sont supérieurs à ceux des opérations robotisées de la plaque P4 en fonction de la vitesse d'avance. Les efforts d'avance moyens n'ont aucune tendance et sont similaires à ceux des opérations de la plaque P4 en fonction de la vitesse de coupe.

La vitesse d'avance a une faible influence sur les efforts normaux moyens à la Figure 3.18. La vitesse de coupe a une faible influence sur les efforts normaux moyens à la Figure 3.19. Les efforts normaux moyens ont une tendance plus forte et sont légèrement supérieurs à ceux des opérations de la plaque P4 en fonction de la vitesse d'avance. Les efforts normaux moyens ont une tendance parallèle et sont supérieurs à ceux de la première opération de cette plaque l'OP10P2 -45° en fonction de la vitesse de coupe. Les efforts normaux moyens ont une tendance parallèle et sont supérieurs à ceux de l'OP10P4 45° CR10 Y en fonction de la vitesse de coupe. Les efforts d'avance moyens sont supérieurs aux efforts normaux moyens

pour une vitesse d'avance supérieure à 0.20 mm/rev. Les efforts axiaux sont faibles et sans tendance avec l'utilisation d'un outil dont l'angle d'hélice est nul et ils ne sont pas illustrés.

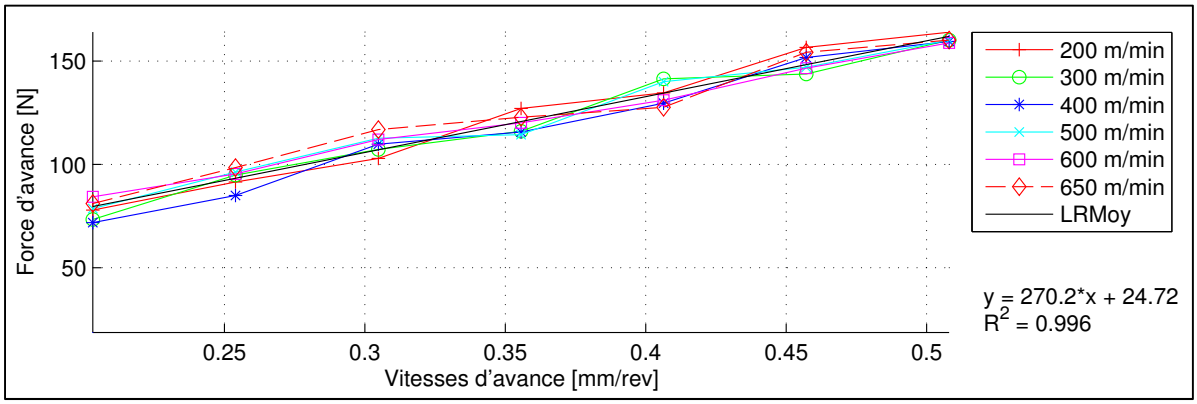



Figure 3.16 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance sur centre d'usinage, OP20P2 45°

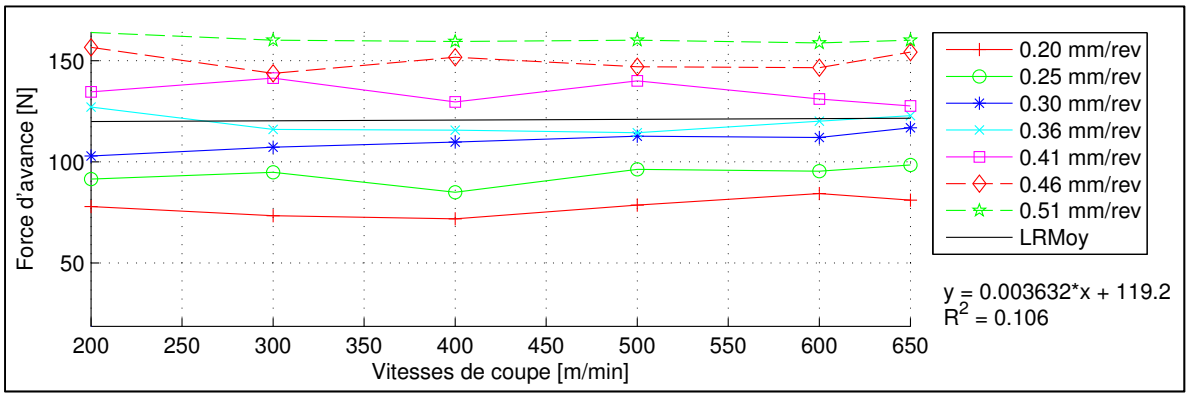



Figure 3.17 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe sur centre d'usinage, OP20P2 45°

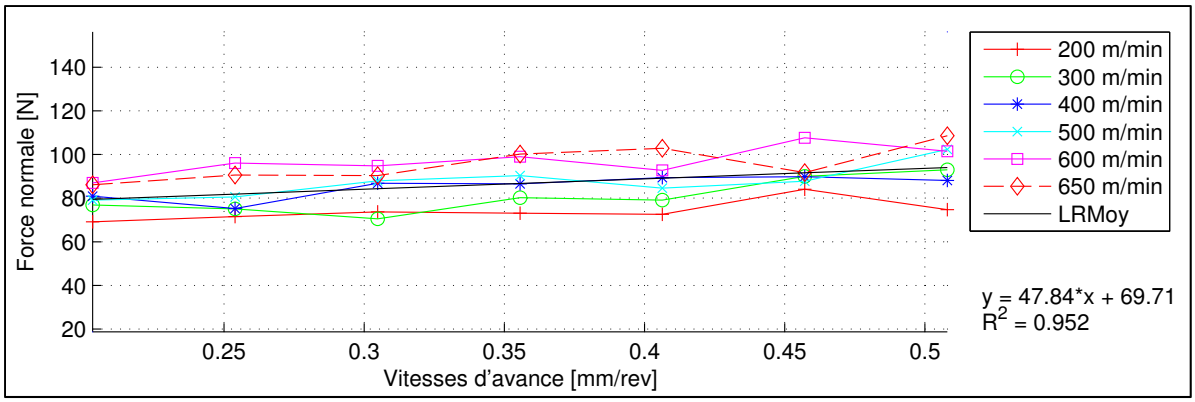



Figure 3.18 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance sur centre d'usinage, OP20P2 45°

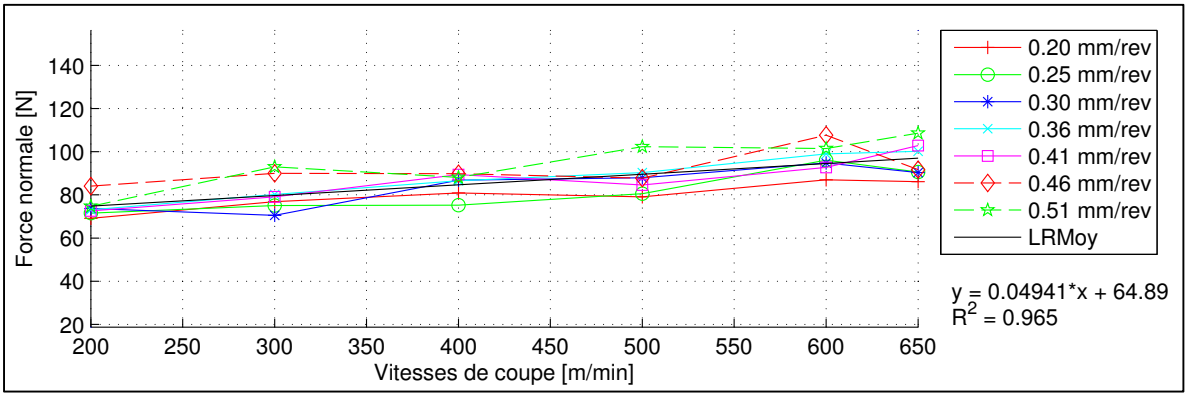



Figure 3.19 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe sur centre d'usinage, OP20P2 45°

### 3.1.5 Efforts de coupe pour l'opération OP10P4 45° CR10 Y

Cette opération de rainurage robotisée est la première de deux sur la plaque P4. La seconde opération OP20P4 -45° CR20 X comporte les mêmes vitesses avec la configuration du robot CR20, la direction X de rainurage dans la cellule robotisée et le pli de surface orienté à -45°. Les forces moyennes pour les vitesses d'avance de 0.2032 et 0.2540 mm/rev sont plus élevées pour l'ensemble des vitesses de coupe puisque le stratifié est de 24 plis et de 20 plis pour les autres vitesses d'avance. Les signaux de force des essais à 300 m/min et 0.5080 mm/rev et à 400 m/min et 0.3048 mm/rev sont corrompus à l'enregistrement donc ne sont pas présents dans les graphiques.

La vitesse d'avance influence les efforts d'avance moyens à la Figure 3.20. La vitesse de coupe n'influence pas les efforts d'avance moyens à la Figure 3.21. Les efforts d'avance moyens sont similaires à ceux de la deuxième opération OP20P4 -45° CR20 X de cette plaque en fonction de la vitesse d'avance. Les efforts d'avance moyens ont une tendance plus faible et sont inférieurs à partir de 0.20 mm/rev en comparaison avec les efforts d'avance moyens des opérations de la plaque P2 sur centre d'usinage en fonction de la vitesse d'avance. Les efforts d'avance moyens ont une tendance plus faible et sont inférieurs à ceux des opérations robotisées de la plaque P1 en fonction de la vitesse d'avance. Les efforts d'avance moyens n'ont aucune tendance et sont légèrement inférieurs à ceux des opérations de la plaque P2 en fonction de la vitesse de coupe. Les efforts d'avance moyens n'ont aucune tendance et sont inférieurs à ceux des opérations de la plaque P1 en fonction de la vitesse de coupe.

La vitesse d'avance n'influence pas les efforts normaux moyens à la Figure 3.22. La vitesse de coupe a une faible influence sur les efforts normaux moyens à la Figure 3.23. Les efforts normaux moyens n'ont aucune tendance et sont similaires à ceux de l'OP20P4 -45° CR20 X et l'OP10P2 -45° en fonction de la vitesse de coupe. Les efforts normaux moyens sont inférieurs à ceux des opérations robotisées de la plaque P1 en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Les efforts normaux moyens ont une tendance parallèle à ceux des opérations de la plaque P2 et P1 en fonction de la vitesse de coupe. Les efforts d'avance moyens sont supérieurs aux efforts normaux moyens pour l'ensemble des vitesses d'avance. Les efforts axiaux sont faibles et sans tendance avec l'utilisation d'un outil dont l'angle d'hélice est nul et ils ne sont pas illustrés.

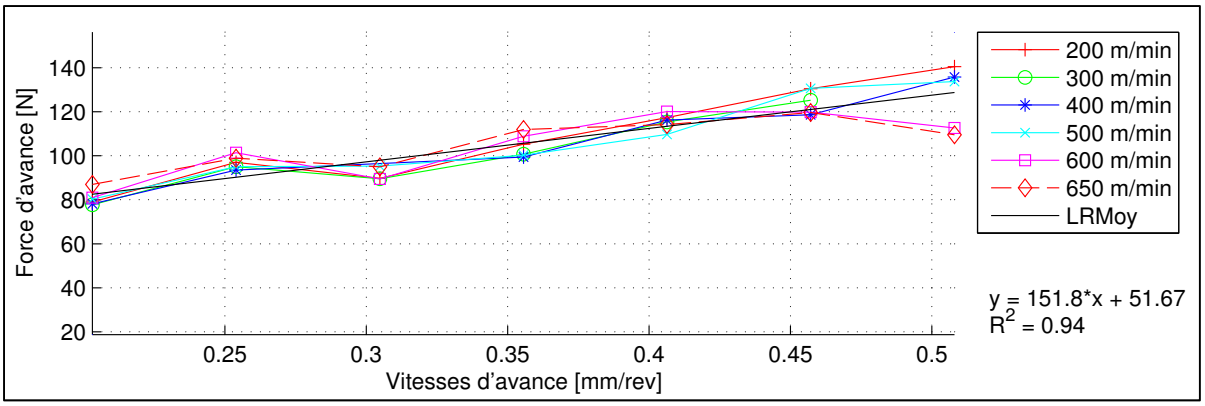



Figure 3.20 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP10P4 45° CR10 Y

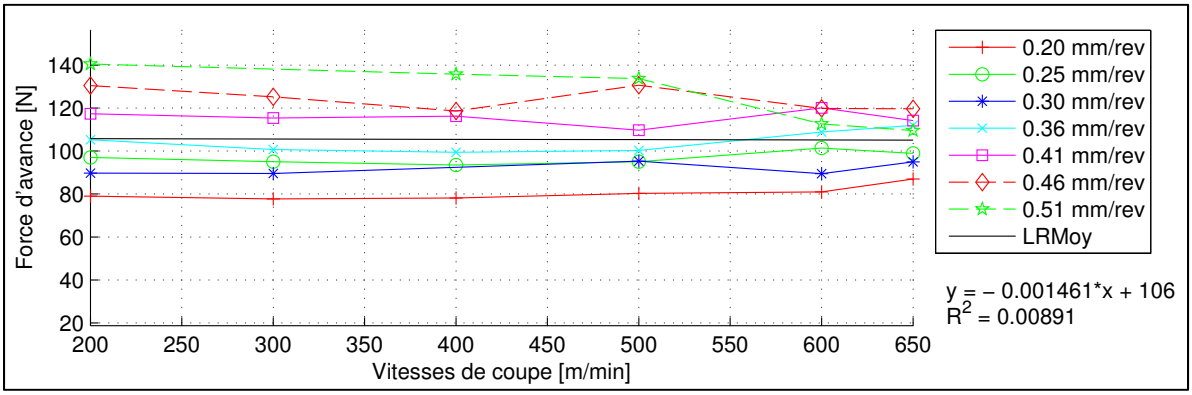



Figure 3.21 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP10P4 45° CR10 Y

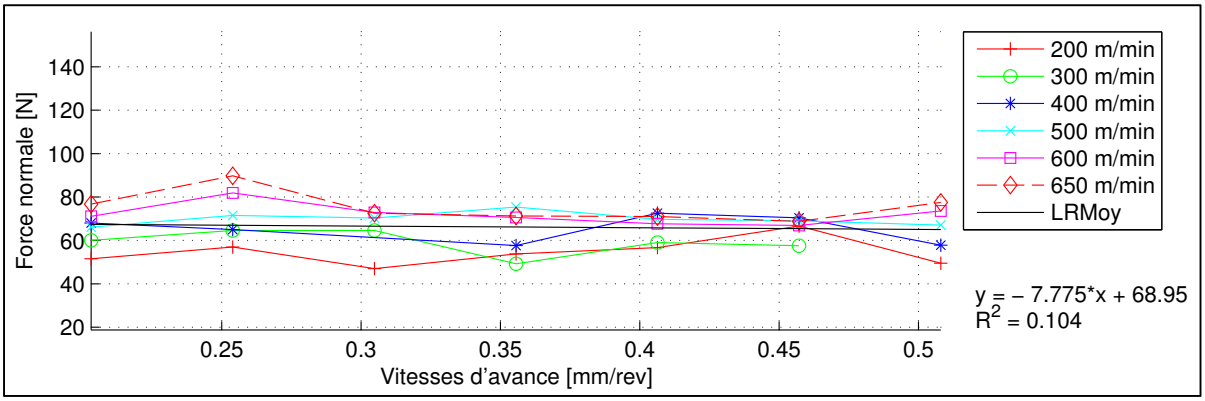



Figure 3.22 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP10P4 45° CR10 Y

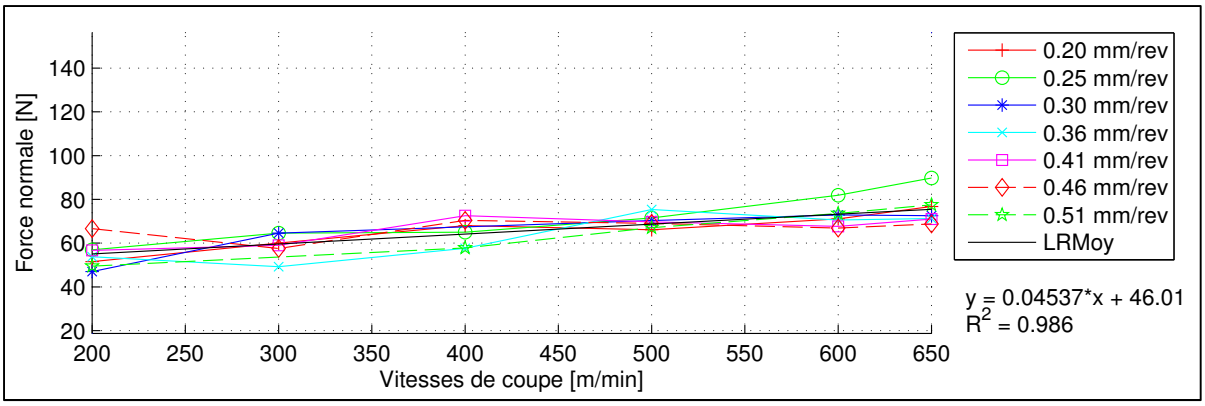



Figure 3.23 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP10P4 45° CR10 Y

### 3.1.6 Efforts de coupe pour l'opération OP20P4 -45° CR20 X

Cette opération de rainurage robotisée est la deuxième de deux sur la plaque P4. La première opération OP10P4 45° CR10 Y comporte les mêmes vitesses avec la configuration du robot CR10, la direction Y de rainurage dans la cellule robotisée et le pli de surface orienté à 45°. Les efforts moyens pour la vitesse de coupe de 200 m/min sont plus élevées pour l'ensemble des vitesses d'avance puisque le stratifié est de 24 plis et de 20 plis pour les autres vitesses de coupe.

La vitesse d'avance influence les efforts d'avance moyens à la Figure 3.24. La diminution de l'effort moyen d'avance pour 0.51 mm/rev est probablement causée par un problème d'acquisition des efforts de coupe sur une distance de rainurage 20 % plus faible que les autres échantillons. La vitesse de coupe n'influence pas les efforts d'avance moyens à la Figure 3.25. Les efforts d'avance moyens sont similaires à ceux de la première opération OP10P4 45° CR10 Y de cette plaque en fonction de la vitesse d'avance. Les efforts d'avance moyens ont une tendance plus faible et sont inférieurs à ceux des opérations de la plaque P2 et P1 en fonction de la vitesse d'avance. Les efforts d'avance moyens n'ont aucune tendance et sont inférieurs à ceux des opérations de la plaque P2 et P1 en fonction de la vitesse de coupe. La vitesse d'avance et de coupe n'influence pas les efforts normaux moyens aux Figure 3.26 et Figure 3.27. Les efforts normaux moyens n'ont aucune tendance et sont

similaires à ceux de l'OP10P4 45° CR10 Y et l'OP10P2 -45° en fonction de la vitesse de coupe. Les efforts normaux moyens sont inférieurs à ceux des opérations robotisées de la plaque P1 en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Les efforts normaux moyens sont légèrement supérieurs à ceux des opérations OP10P4 45° CR10 Y et OP10P2 -45° en fonction de la vitesse de coupe. Les efforts d'avance moyens sont supérieurs aux efforts normaux moyens pour l'ensemble des vitesses d'avance. Les efforts axiaux sont faibles et sans tendance avec l'utilisation d'un outil dont l'angle d'hélice est nul et ils ne sont pas illustrés.

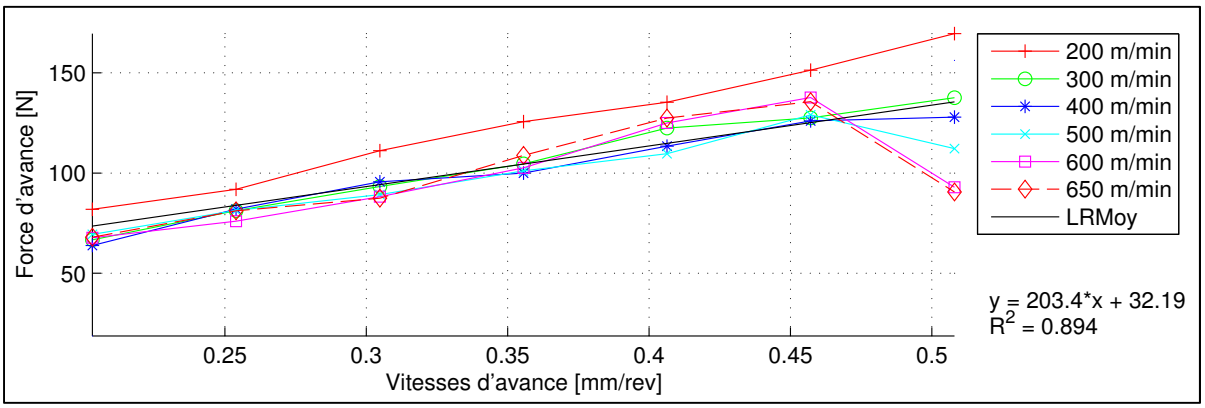



Figure 3.24 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP20P4 -45° CR20 X

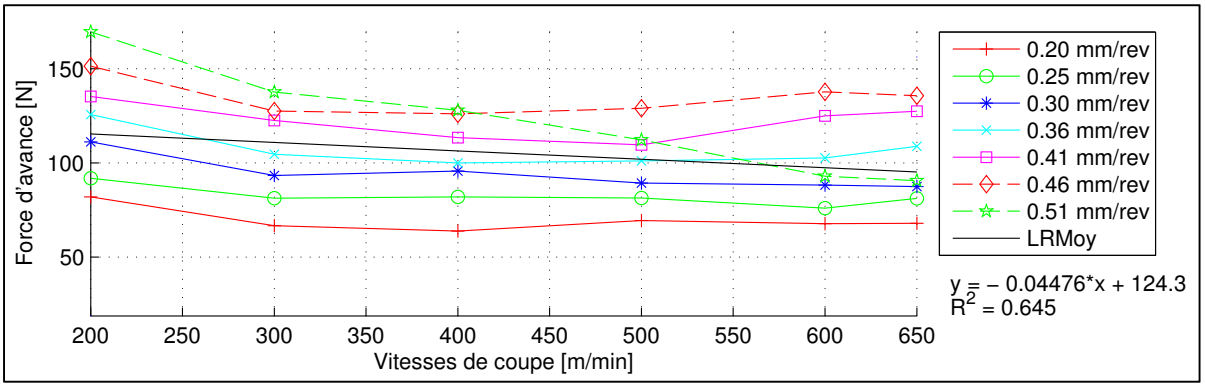



Figure 3.25 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP20P4 -45° CR20 X

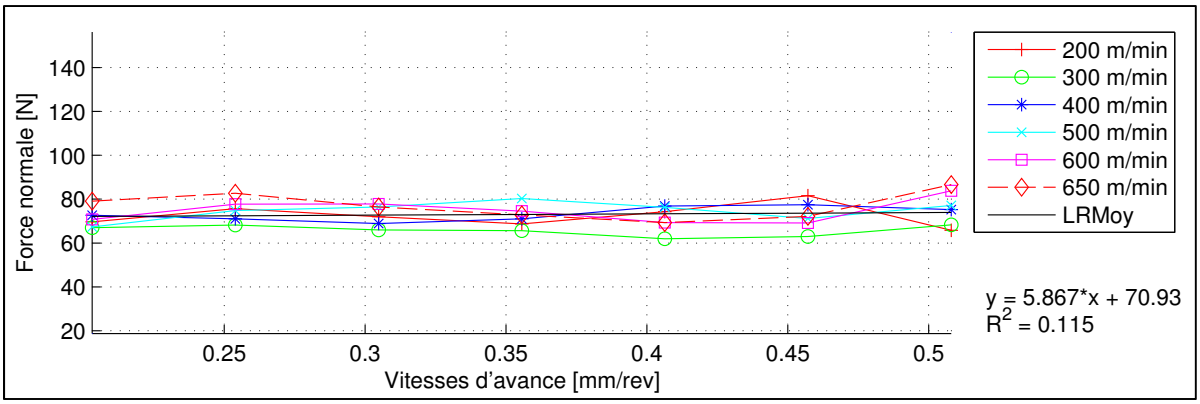



Figure 3.26 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP20P4 -45° CR20 X

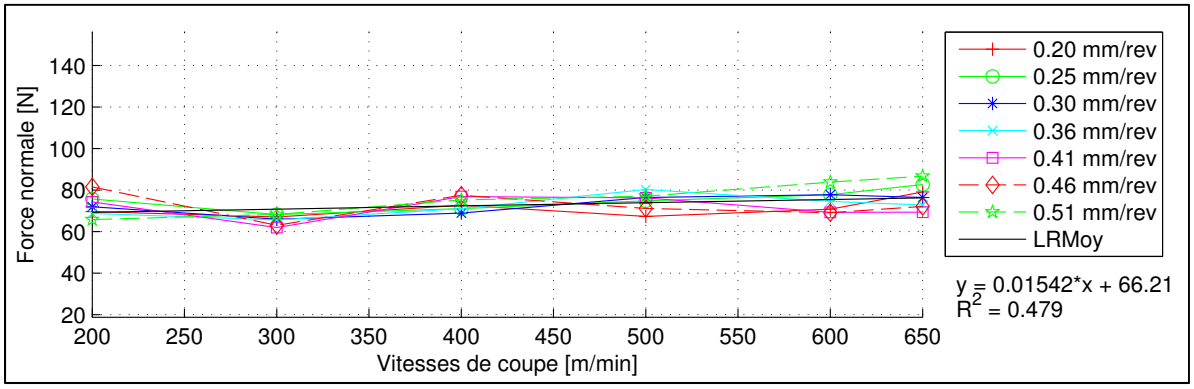



Figure 3.27 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP20P4 -45° CR20 X

### 3.1.7 Efforts de coupe pour l'opération OP30P3 45° CR20 X

Cette opération de rainurage robotisée est la première de deux sur la plaque P3. La seconde opération OP30P3 -45° CR20 X comporte les mêmes vitesses, la même configuration du robot CR20, la même direction X de rainurage dans la cellule robotisée et un pli de surface orienté à -45°. La vitesse d'avance influence les efforts d'avance moyens à la Figure 3.28. La vitesse de coupe n'influence pas les efforts d'avance moyens à la Figure 3.29. Les efforts d'avance moyens sont légèrement inférieurs à ceux de la seconde opération OP30P3 -45° CR20 X en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Ils sont similaires à ceux des opérations de la plaque P2 et P4 en fonction de la vitesse d'avance. Les efforts d'avance

moyens sont inférieurs à ceux des opérations de la plaque P1 en fonction de la vitesse d'avance. Les efforts d'avance moyens sont inférieurs à ceux des opérations des plaques P1, P2 et P4 en fonction de la vitesse de coupe.

La vitesse d'avance influence les efforts normaux moyens à la Figure 3.30. La vitesse de coupe influence les efforts normaux moyens à la Figure 3.31. Les efforts normaux moyens ont une tendance parallèle et sont inférieurs à ceux de la seconde opération OP30P3 -45° CR20 X de cette plaque en fonction de la vitesse d'avance. Les efforts normaux moyens ont une tendance plus forte à ceux des opérations des plaques P1, P2 et P4 en fonction de la vitesse d'avance. Les efforts normaux moyens sont supérieurs à ceux des opérations des plaques P2 et P4 en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Les efforts normaux moyens sont inférieurs à ceux des opérations de la plaque P1 en fonction de la vitesse d'avance. Les efforts normaux moyens ont une tendance plus forte et sont inférieurs à ceux de la seconde opération OP30P3 -45° CR20 X en fonction de la vitesse de coupe. Les efforts normaux moyens ont une tendance plus forte et sont inférieurs à ceux des opérations de la plaque P1 en fonction de la vitesse de coupe. Les efforts d'avance moyens sont supérieurs aux efforts normaux moyens à partir de 0.25 mm/rev. Les efforts axiaux sont faibles et sans tendances avec l'utilisation d'un outil dont l'angle d'hélice est nul et ils ne sont pas illustrés.

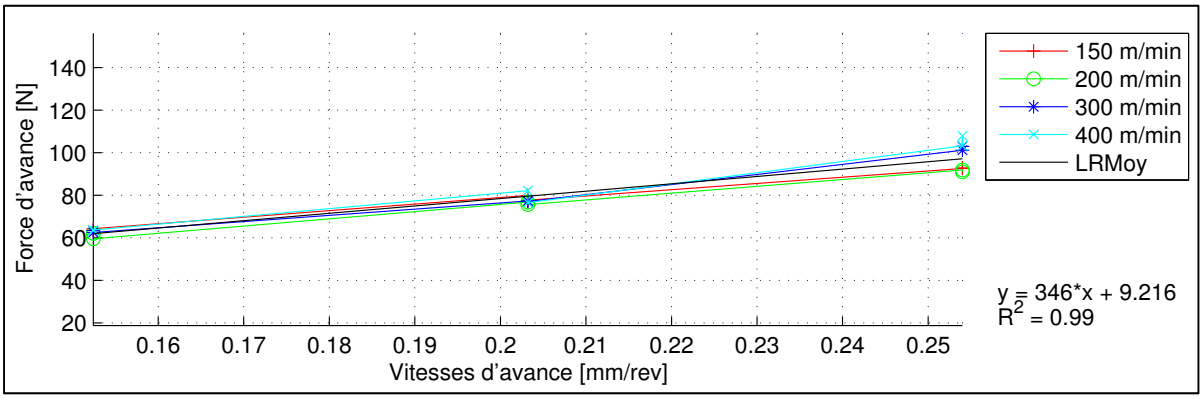



Figure 3.28 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP30P3 45° CR20 X

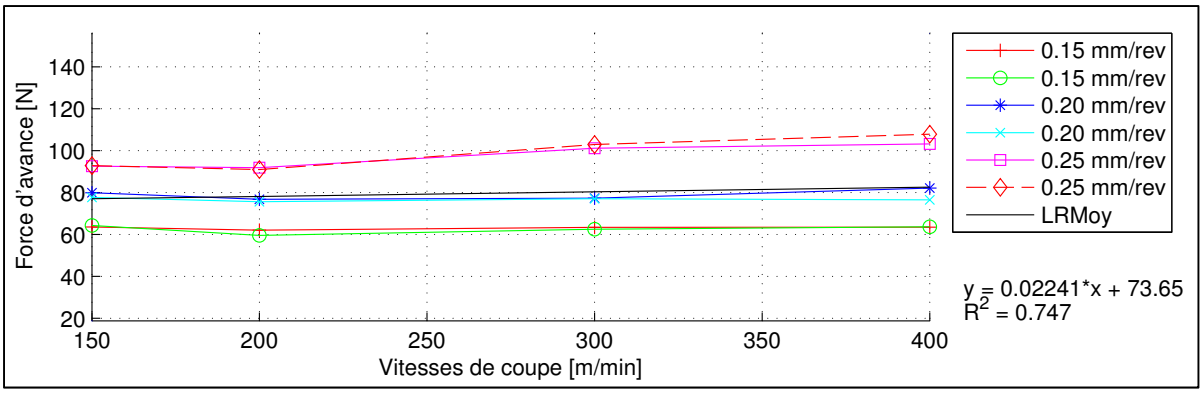



Figure 3.29 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP30P3 45° CR20 X

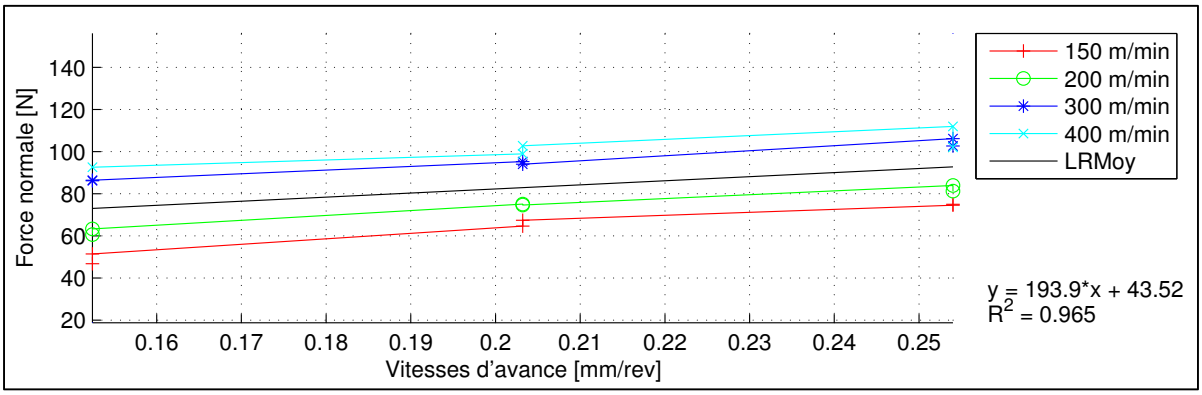



Figure 3.30 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP30P3 45° CR20 X

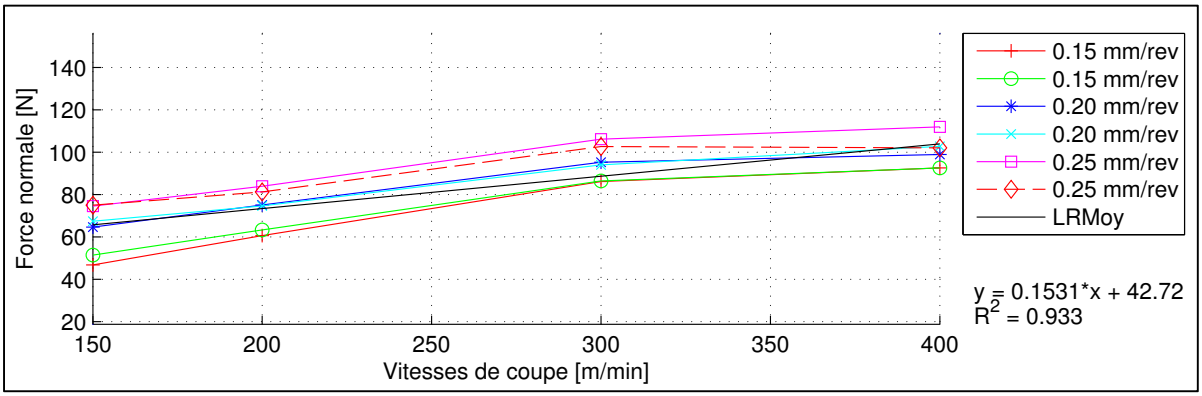



Figure 3.31 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP30P3 45° CR20 X

### 3.1.8 Efforts de coupe pour l'opération OP30P3 -45° CR20 X

Cette opération de rainurage robotisée est la deuxième de deux sur la plaque P3. La première opération OP30P3 45° CR20 X comporte les mêmes vitesses, la même configuration du robot CR20, la même direction X de rainurage dans la cellule robotisée et un pli de surface orienté à 45°. La vitesse d'avance influence les efforts d'avance moyens à la Figure 3.32. La vitesse de coupe n'influence pas les efforts d'avance moyens à la Figure 3.33. Les efforts d'avance moyens sont légèrement supérieurs à ceux de la première opération OP30P3 45° CR20 X en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Ils sont similaires à ceux des opérations de la plaque P1 en fonction de la vitesse d'avance. Les efforts d'avance moyens sont supérieurs à ceux des opérations des plaques P2 et P4 en fonction de la vitesse d'avance. Les efforts d'avance moyens sont inférieurs à ceux des opérations des plaques P1, P2 et P4 en fonction de la vitesse de coupe.

La vitesse d'avance influence les efforts normaux moyens à la Figure 3.34. La vitesse de coupe influence les efforts normaux moyens à la Figure 3.35. Les efforts normaux moyens ont une tendance parallèle et sont supérieurs à ceux de la première opération OP30P3 45° CR20 X de cette plaque en fonction de la vitesse d'avance. Les efforts normaux moyens ont une tendance plus forte à ceux des opérations des plaques P1, P2 et P4 en fonction de la vitesse d'avance. Les efforts normaux moyens sont supérieurs à ceux des opérations des plaques P2 et P4 en fonction de la vitesse d'avance. Les efforts normaux moyens ont une tendance plus forte et sont inférieurs à ceux des opérations de la plaque P1 en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Les efforts d'avance moyens sont inférieurs aux efforts normaux moyens pour l'ensemble des vitesses d'avance. Les efforts axiaux sont faibles et sans tendance avec l'utilisation d'un outil dont l'angle d'hélice est nul et ils ne sont pas illustrés. Les efforts normaux moyens ont une tendance plus faible et sont supérieurs à ceux de la première opération OP30P3 45° CR20 X de cette plaque en fonction de la vitesse de coupe. Les efforts normaux moyens et sont supérieurs à ceux des opérations des plaques P2 et P4 en fonction de la vitesse de coupe.

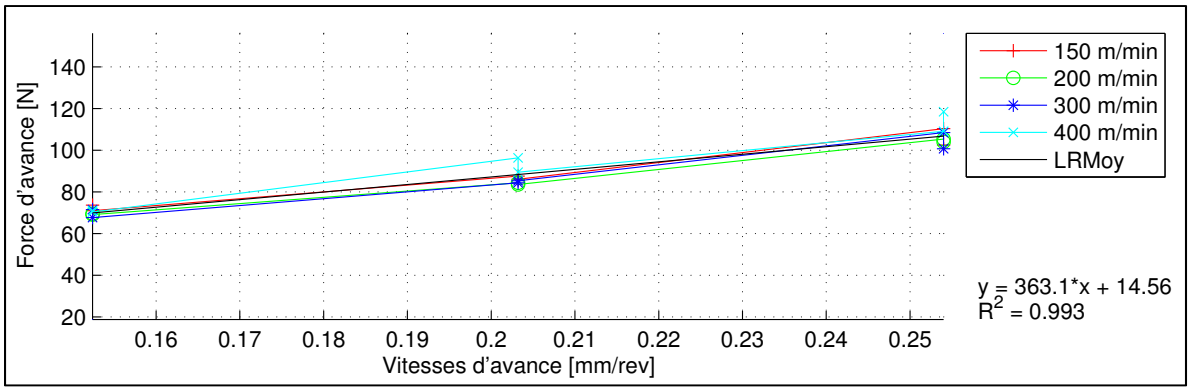



Figure 3.32 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP30P3 -45° CR20 X

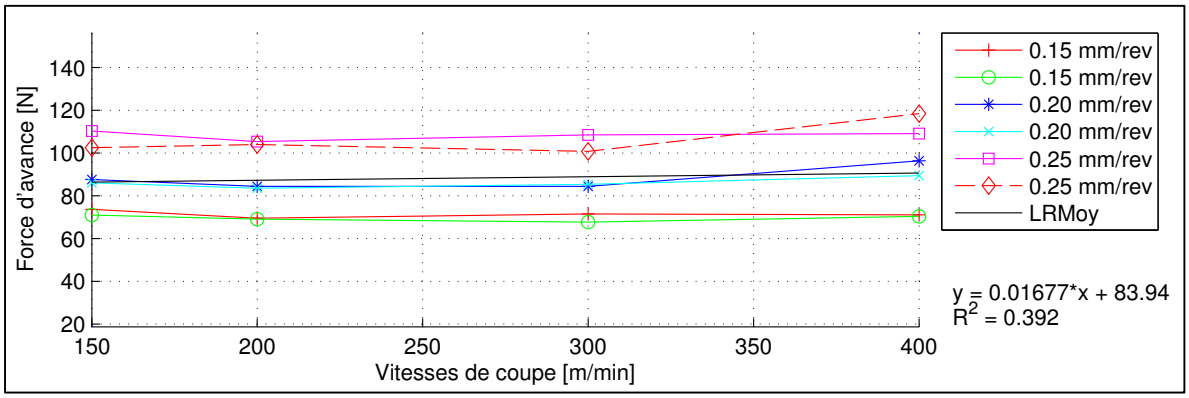



Figure 3.33 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP30P3 -45° CR20 X

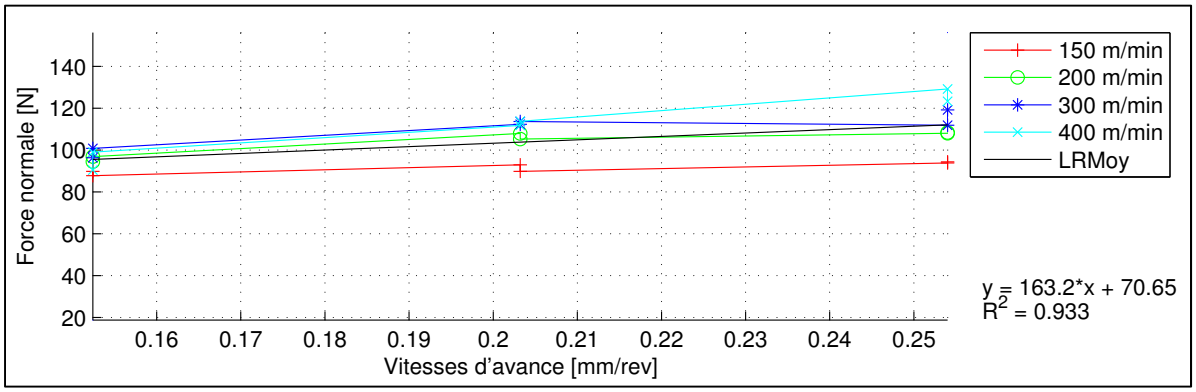



Figure 3.34 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP30P3 -45° CR20 X

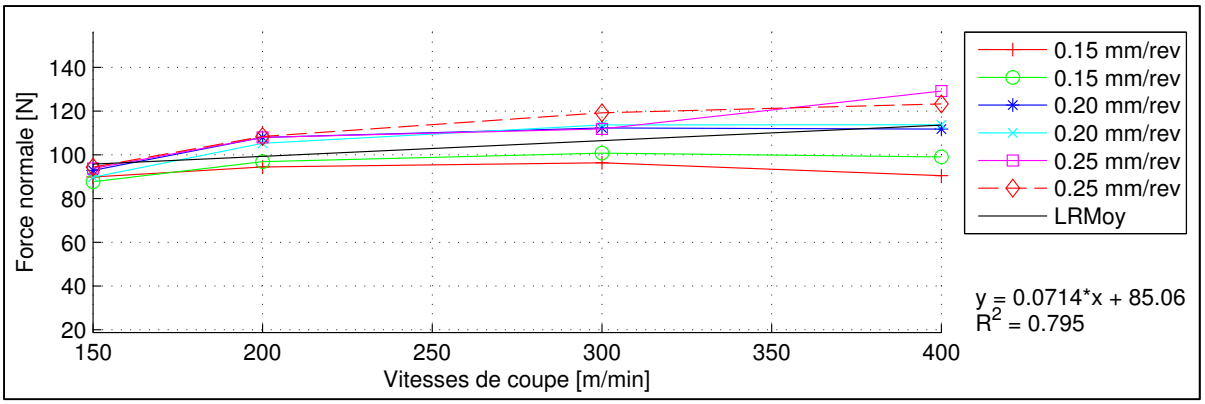



Figure 3.35 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP30P3 -45° CR20 X

### 3.1.9 Efforts de coupe pour l'opération OP50P5 45° CR10 Y

Cette opération de rainurage robotisée est la première de quatre sur la plaque P5. L'opération suivante OP50P5 -45° CR10 X comporte les mêmes vitesses, la même configuration du robot CR10, une direction orthogonale de rainurage X dans la cellule robotisée et un pli de surface orienté à -45°. La vitesse d'avance influence les efforts d'avance moyens à la Figure 3.36. La vitesse de coupe n'influence pas les efforts d'avance moyens à la Figure 3.37. Les efforts d'avance moyens sont légèrement inférieurs à ceux des opérations OP50P5 -45° CR20 X et l'OP50P6 -45° CR20 Y en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Ils sont similaires à ceux des autres opérations des plaques P5, P6 et P3 en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. La vitesse d'avance influence les efforts normaux moyens à la Figure 3.38. La vitesse de coupe influence les efforts normaux moyens à la Figure 3.39. Les efforts normaux moyens sont légèrement inférieurs à ceux des autres opérations de cette plaque en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Les efforts normaux moyens sont supérieurs à ceux des opérations de la plaque P3 en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Les efforts normaux moyens sont supérieurs à ceux de l'OP50P6 -45° CR10 Y et sont similaires à ceux des autres opérations de la plaque P6 en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Les efforts d'avance moyens sont inférieurs aux efforts normaux moyens pour l'ensemble des vitesses d'avance. Les efforts axiaux sont faibles et sans tendance avec l'utilisation d'un outil dont l'angle d'hélice est nul et ils ne sont pas illustrés.

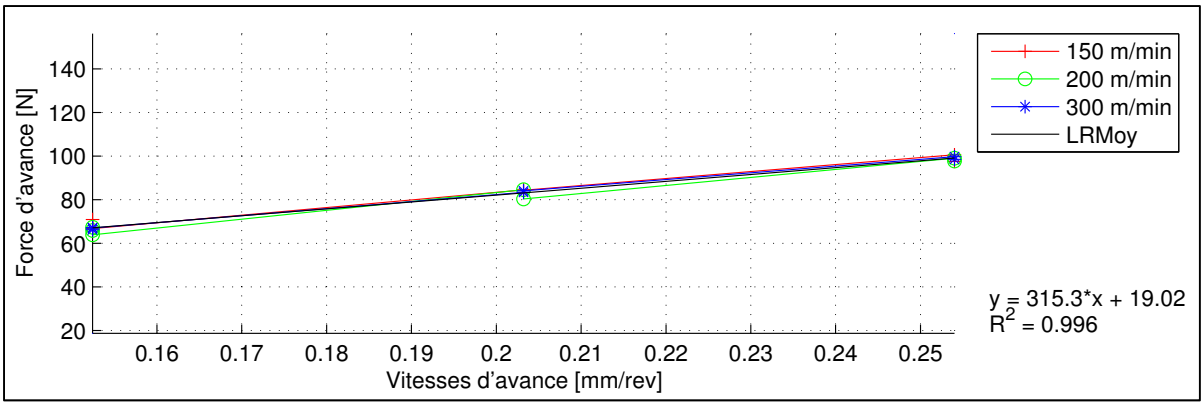



Figure 3.36 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P5 45° CR10 Y

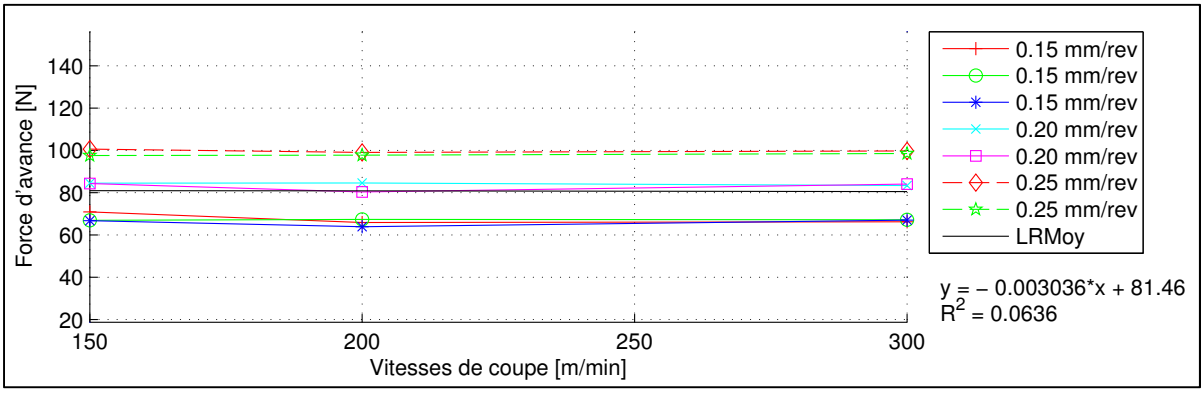



Figure 3.37 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P5 45° CR10 Y

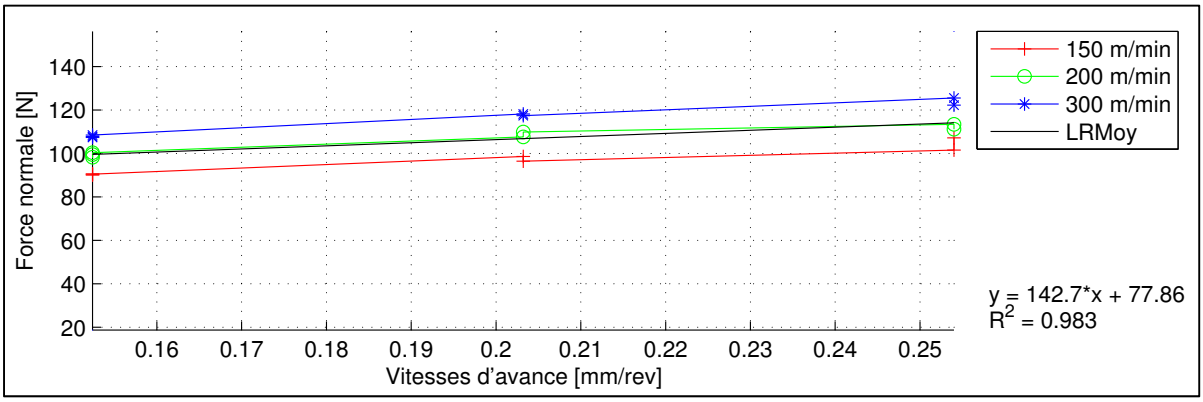



Figure 3.38 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P5 45° CR10 Y

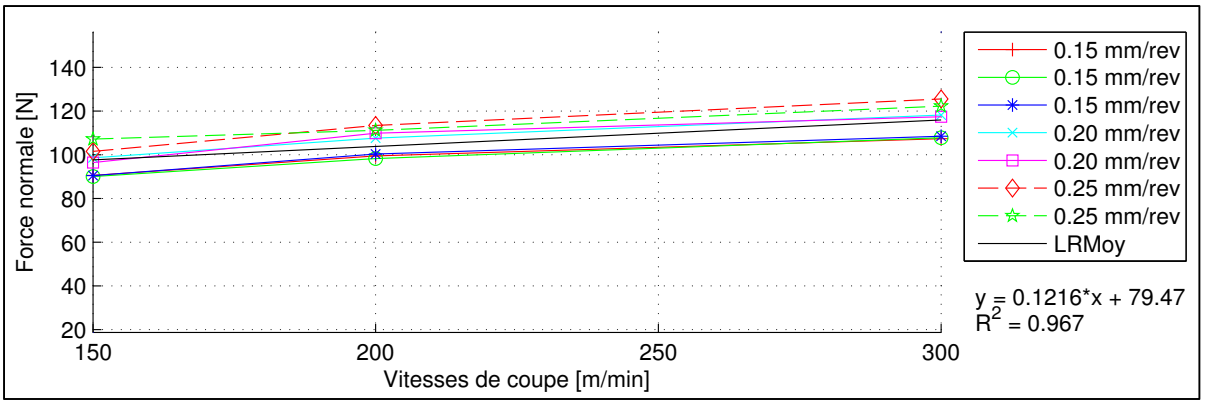



Figure 3.39 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P5 45° CR10 Y

### 3.1.10 Efforts de coupe pour l'opération OP50P5 -45° CR10 X

Cette opération de rainurage robotisée est la deuxième de quatre sur la plaque P5. L'opération suivante OP50P5 -45° CR20 X comporte les mêmes vitesses, la même direction de rainurage X dans la cellule robotisée, une configuration du robot CR20 et un pli de surface orienté à -45°. La vitesse d'avance influence les efforts d'avance moyens à la Figure 3.40. La vitesse de coupe n'influence pas les efforts d'avance moyens à la Figure 3.41. Les efforts d'avance moyens sont légèrement inférieurs à ceux des opérations OP50P5 -45° CR20 X et OP50P6 -45° CR20 Y en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Ils sont similaires à ceux des autres opérations des plaques P5, P6 et P3 en fonction de la vitesse d'avance et de coupe.

La vitesse d'avance influence les efforts normaux moyens à la Figure 3.42. La vitesse de coupe influence les efforts normaux moyens à la Figure 3.43. Les efforts normaux moyens sont légèrement inférieurs à ceux des opérations OP50P5 45° CR20 Y et OP50P5 -45° CR20 X et sont légèrement supérieurs à ceux de l'opération précédente OP50P5 45° CR10 Y de cette plaque en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Les efforts normaux moyens sont supérieurs à ceux des opérations de la plaque P3 en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Les efforts normaux moyens sont similaires à ceux de l'opération

OP50P6 -45° CR20 Y et sont supérieurs à ceux des autres opérations de la plaque P6 en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Les efforts d'avance moyens sont inférieurs aux efforts normaux moyens pour l'ensemble des vitesses d'avance. Les efforts axiaux sont faibles et sans tendance avec l'utilisation d'un outil dont l'angle d'hélice est nul et ils ne sont pas illustrés.

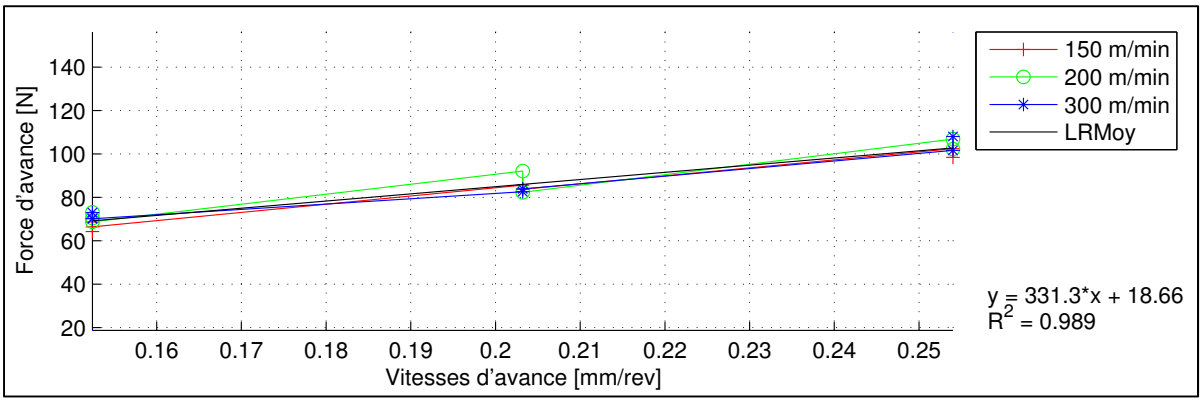



Figure 3.40 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P5 -45° CR10 X

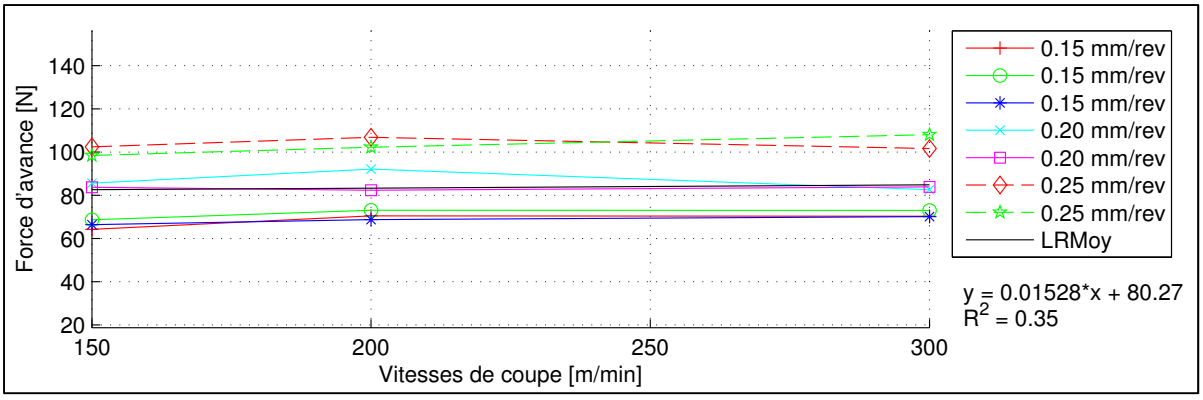



Figure 3.41 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P5 -45° CR10 X

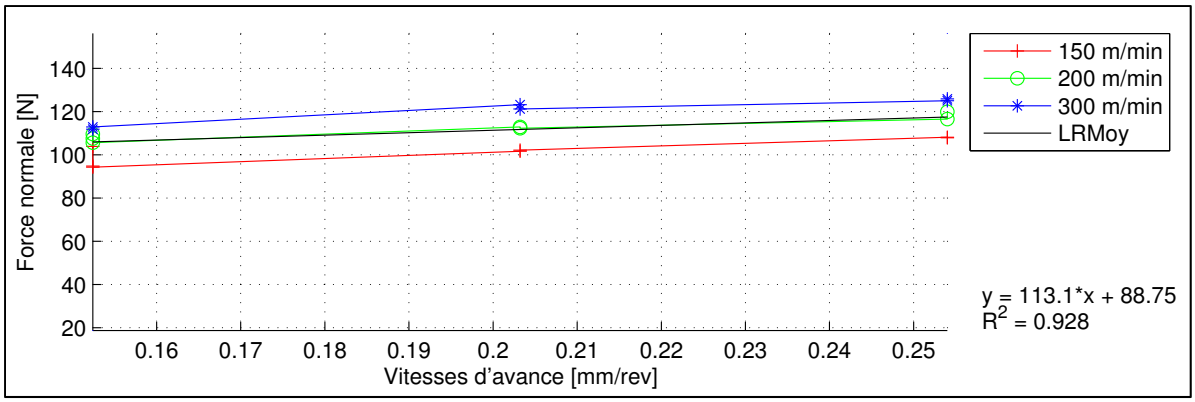



Figure 3.42 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P5 -45° CR10 X

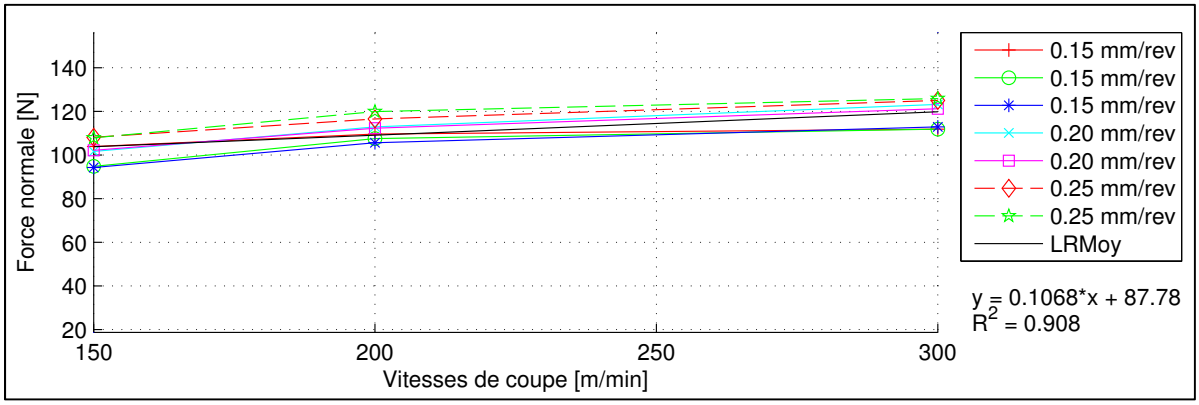



Figure 3.43 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P5 -45° CR10 X

### 3.1.11 Efforts de coupe pour l'opération OP50P5 -45° CR20 X

Cette opération de rainurage robotisée est la troisième de quatre sur la plaque P5. L'opération suivante OP50P5 45° CR20 Y comporte les mêmes vitesses, la même configuration du robot CR20, une direction de rainurage Y dans la cellule robotisée et un pli de surface orienté à 45°. La vitesse d'avance influence les efforts d'avance moyens à la Figure 3.44. La vitesse de coupe n'influence pas les efforts d'avance moyens à la Figure 3.45. Les efforts d'avance moyens sont supérieurs à ceux des autres opérations des plaques P5, P3 et P6 en fonction de la vitesse d'avance et de coupe.

La vitesse d'avance influence les efforts normaux moyens à la Figure 3.46. La vitesse de coupe influence les efforts normaux moyens à la Figure 3.47. Les efforts normaux moyens sont légèrement inférieurs à ceux de l'OP50P5 45° CR20 Y et sont supérieurs à ceux des autres opérations de cette plaque en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Les efforts normaux moyens sont supérieurs à ceux des opérations des plaques P3 et P6 en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Les efforts d'avance moyens sont inférieurs aux efforts normaux moyens pour l'ensemble des vitesses. Les efforts axiaux sont faibles et sans tendance avec l'utilisation d'un outil dont l'angle d'hélice est nul et ils ne sont pas illustrés.

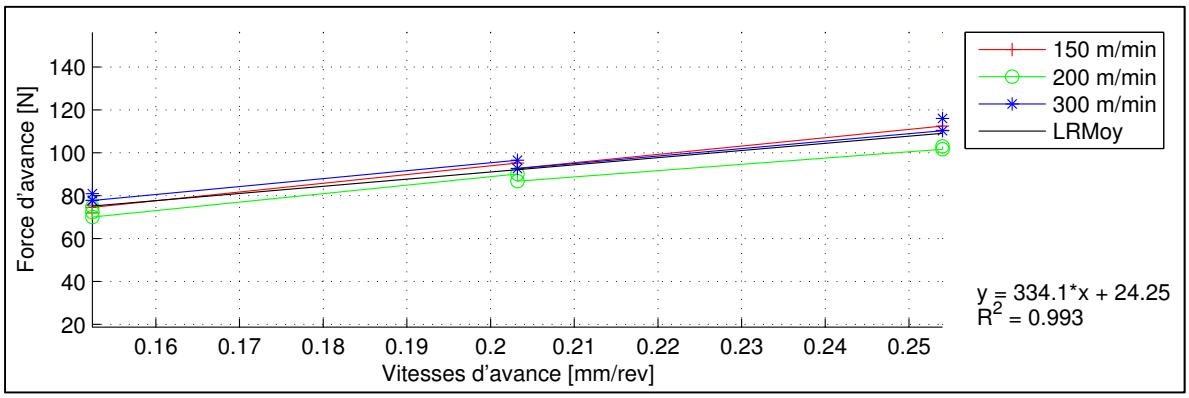



Figure 3.44 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P5 -45° CR20 X

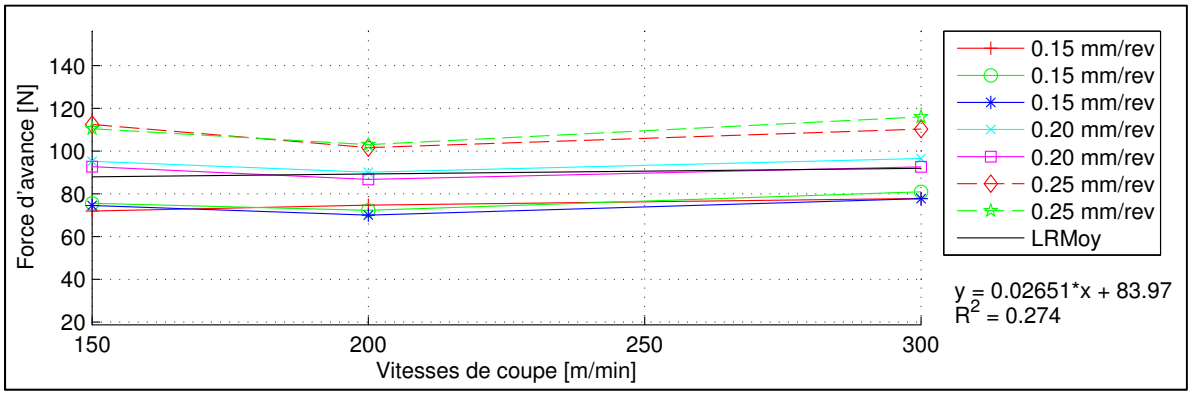



Figure 3.45 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P5 -45° CR20 X

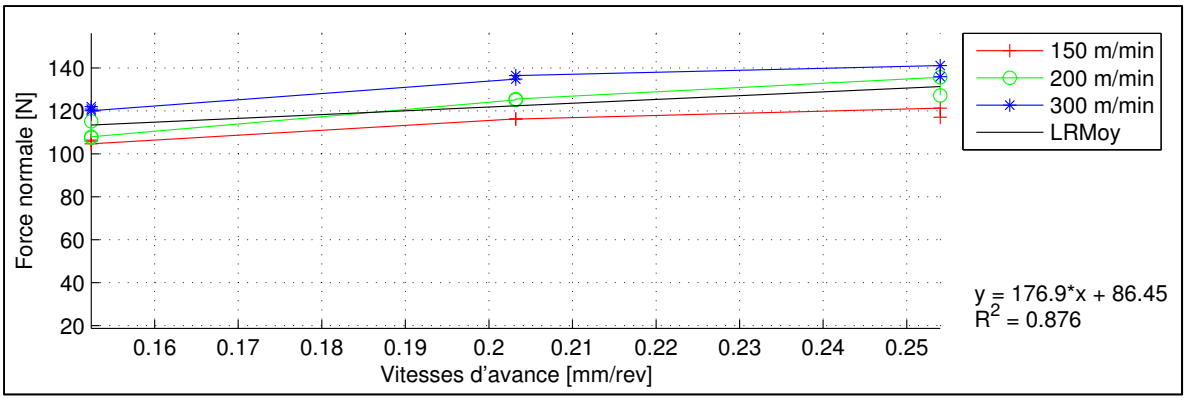



Figure 3.46 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P5 -45° CR20 X

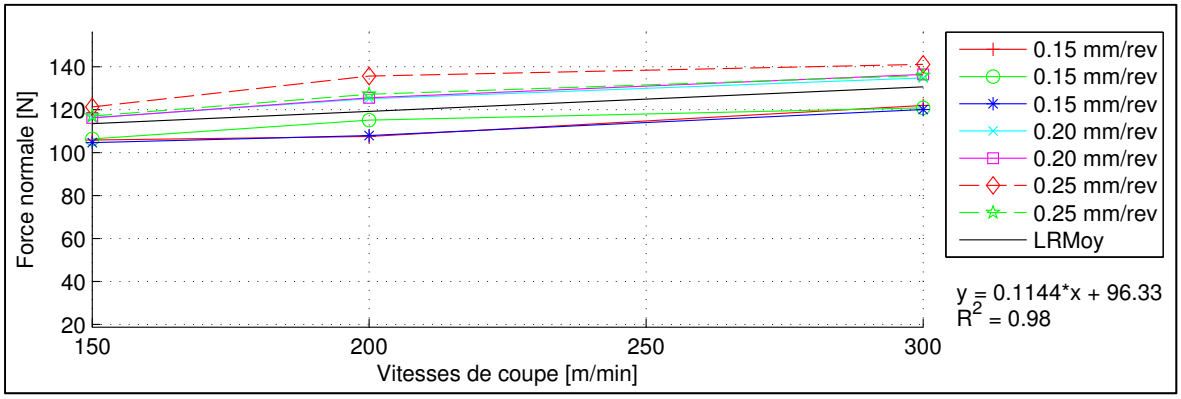



Figure 3.47 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P5 -45° CR20 X

### 3.1.12 Efforts de coupe pour l'opération OP50P5 45° CR20 Y

Cette opération de rainurage robotisée est la quatrième de quatre sur la plaque P5 et elle comporte les mêmes vitesses, une configuration du robot CR20, une direction de rainurage Y dans la cellule robotisée et un pli de surface orienté à 45°. La vitesse d'avance influence les efforts d'avance moyens à la Figure 3.48. La vitesse de coupe n'influence pas les efforts d'avance moyens à la Figure 3.49. Les efforts d'avance moyens sont légèrement inférieurs à ceux des opérations OP50P5 -45° CR20 X et OP50P6 -45° CR20 Y en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Ils sont similaires à ceux des autres opérations des plaques P3, P5 et P6 en fonction de la vitesse d'avance et de coupe.

La vitesse d'avance influence les efforts normaux moyens à la Figure 3.50. La vitesse de coupe influence les efforts normaux moyens à la Figure 3.51. Les efforts normaux moyens sont supérieurs à ceux des autres opérations de cette plaque et des plaques P3 et P6 en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Les efforts d'avance moyens sont inférieurs aux efforts normaux moyens pour l'ensemble des vitesses. Les efforts axiaux sont faibles et sans tendance avec l'utilisation d'un outil dont l'angle d'hélice est nul et ils ne sont pas illustrés.

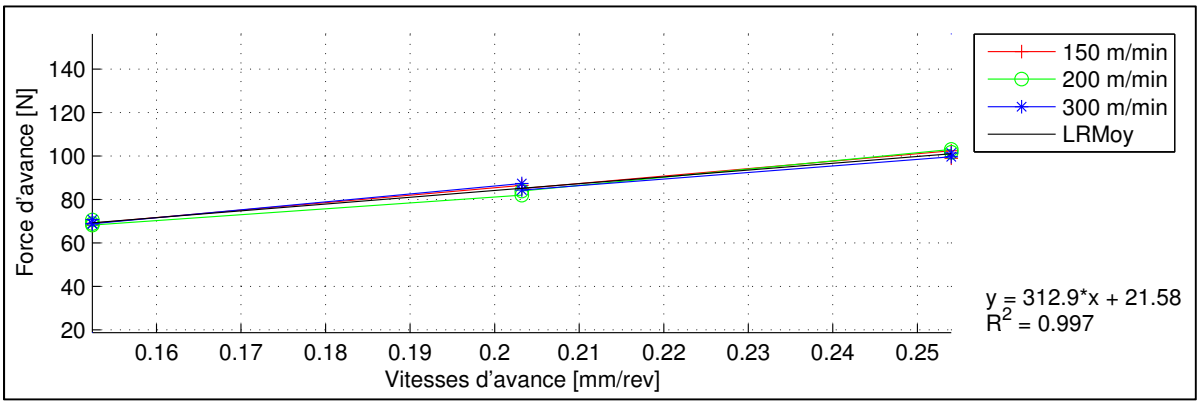



Figure 3.48 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P5 45° CR20 Y

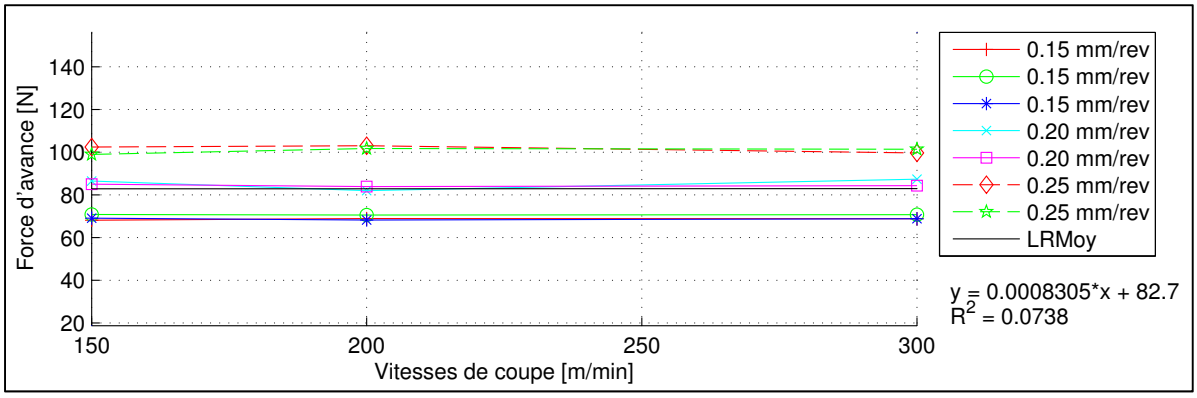



Figure 3.49 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P5 45° CR20 Y

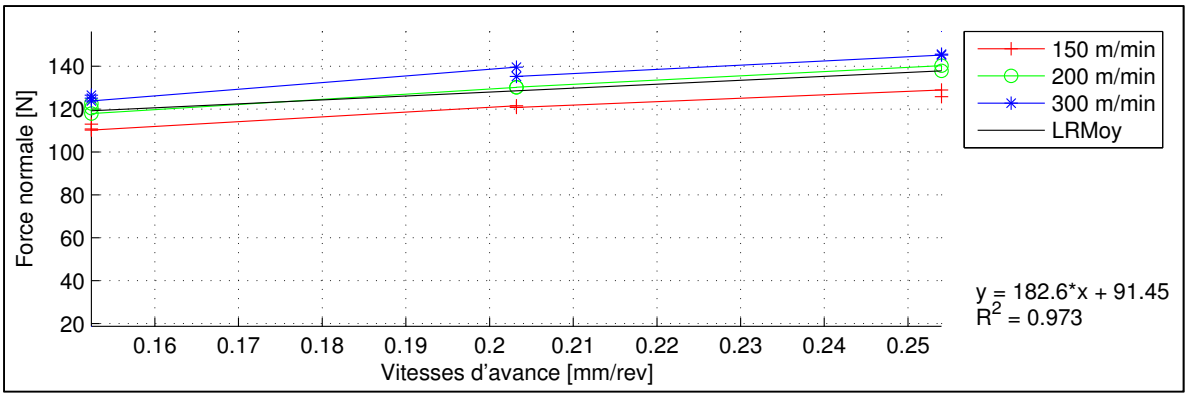



Figure 3.50 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P5 45° CR20 Y

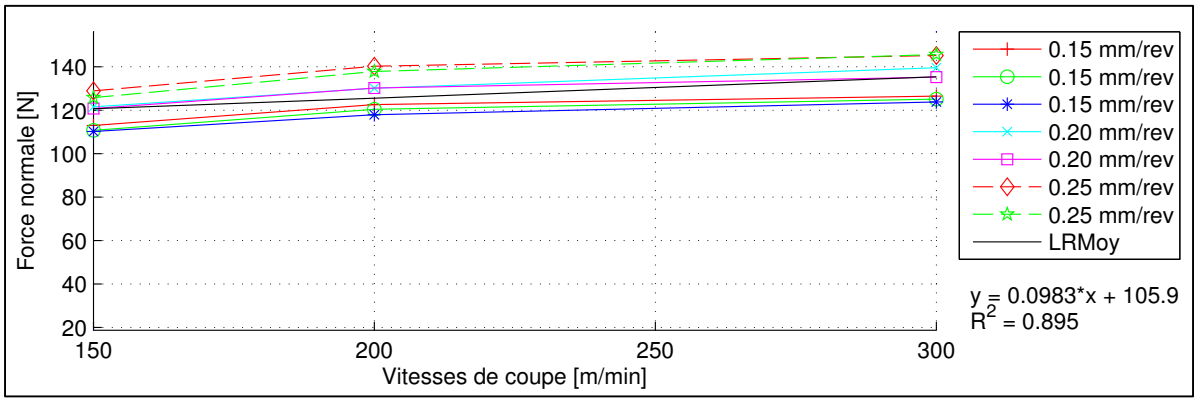



Figure 3.51 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P5 45° CR20 Y

### 3.1.13 Efforts de coupe pour l'opération OP50P6 -45° CR10 Y

Cette opération de rainurage robotisée est la première de quatre sur la plaque P6 et elle comporte les mêmes vitesses, une configuration du robot CR10, une direction de rainurage Y dans la cellule robotisée et un pli de surface orienté à -45°. La vitesse d'avance influence les efforts d'avance moyens à la Figure 3.52. La vitesse de coupe n'influence pas les efforts d'avance moyens à la Figure 3.53. Les efforts d'avance moyens sont légèrement inférieurs à ceux des opérations OP50P5 -45° CR20 X et OP50P6 -45° CR20 Y en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Ils sont similaires à ceux des autres opérations des plaques P3, P5 et P6 en fonction de la vitesse d'avance et de coupe.

La vitesse d'avance n'influence pas les efforts normaux moyens à la Figure 3.54. La vitesse de coupe influence les efforts normaux moyens à la Figure 3.55. Les efforts normaux moyens sont légèrement supérieurs à ceux de l'OP30P3 45° CR20 X et inférieurs à ceux des autres opérations des plaques P3, P5 et P6 en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Les efforts d'avance moyens sont inférieurs aux efforts normaux moyens pour les vitesses de 0.15 et 0.20 mm/rev et de 200 et 300 m/min. Les efforts axiaux sont faibles et sans tendance avec l'utilisation d'un outil dont l'angle d'hélice est nul et ils ne sont pas illustrés.

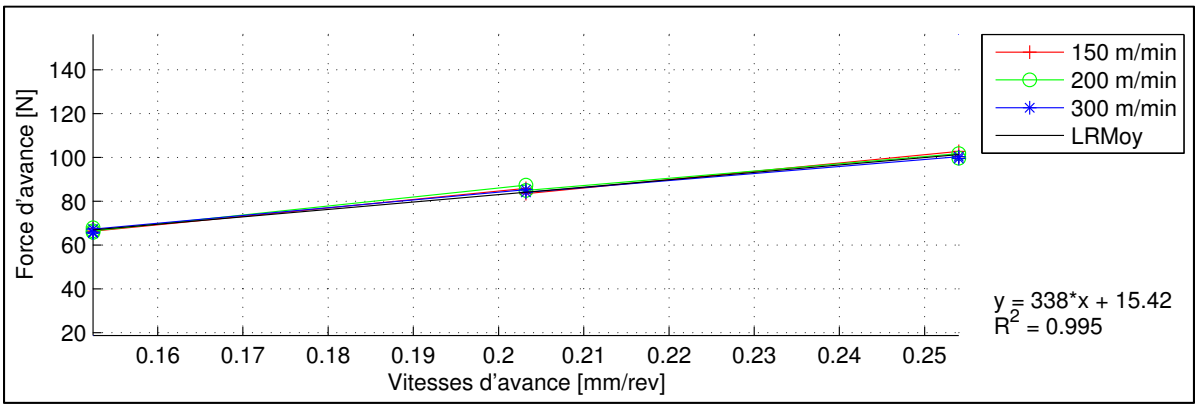



Figure 3.52 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P6 -45° CR10 Y

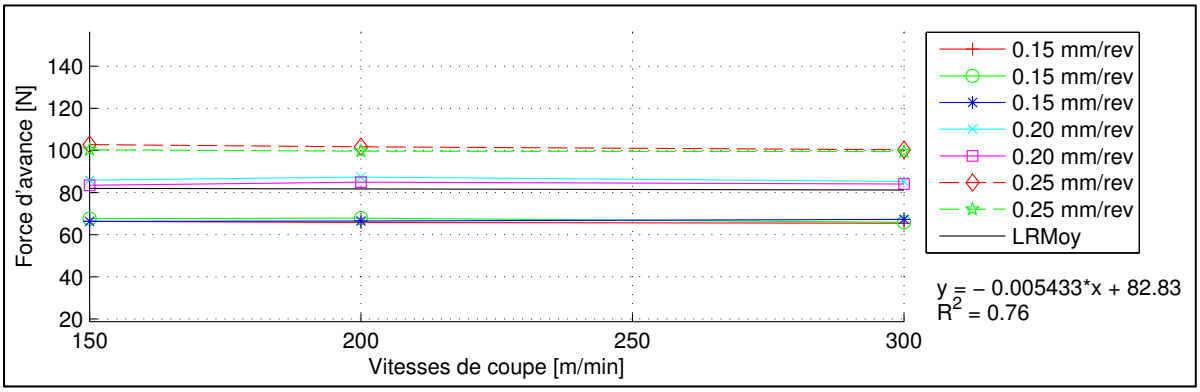



Figure 3.53 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P6 -45° CR10 Y

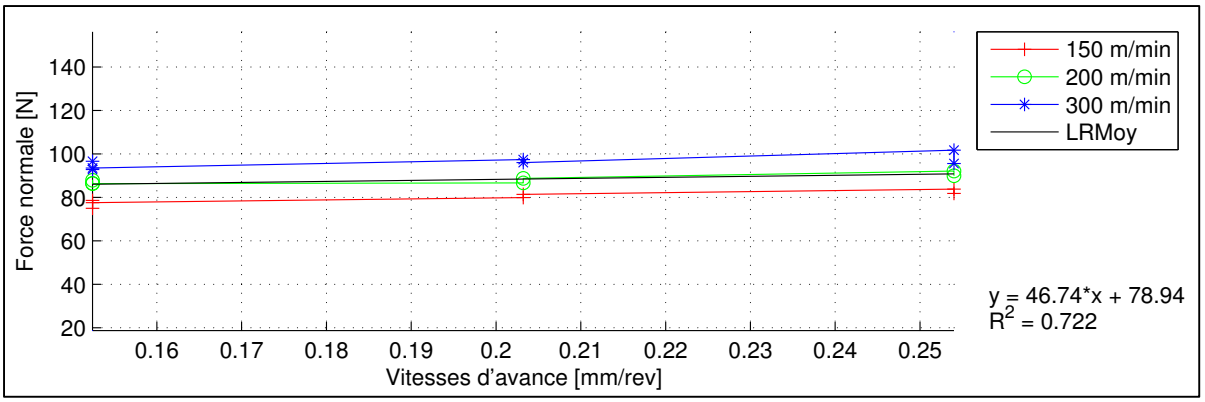



Figure 3.54 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P6 -45° CR10 Y

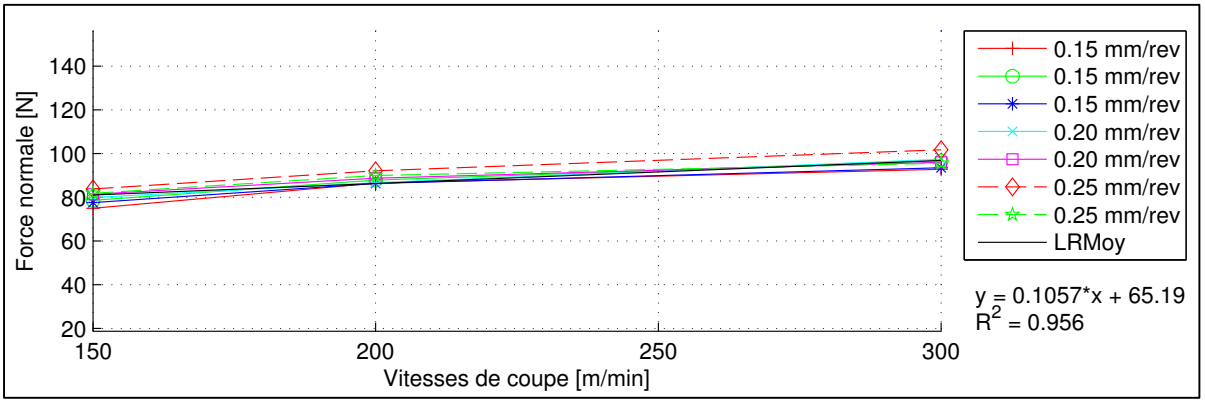



Figure 3.55 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P6 -45° CR10 Y

### 3.1.14 Efforts de coupe pour l'opération OP50P6 45° CR10 X

Cette opération de rainurage robotisée est la deuxième de quatre sur la plaque P6 et elle comporte les mêmes vitesses, une configuration du robot CR10, une direction de rainurage X dans la cellule robotisée et un pli de surface orienté à 45°. La vitesse d'avance influence les efforts d'avance moyens à la Figure 3.56. La vitesse de coupe n'influence pas les efforts d'avance moyens à la Figure 3.57. Les efforts d'avance moyens sont légèrement inférieurs à ceux des opérations OP50P5 -45° CR20 X et OP50P6 -45° CR20 Y en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Ils sont similaires à ceux des autres opérations des plaques P3, P5 et P6 en fonction de la vitesse d'avance et de coupe.

La vitesse d'avance influence les efforts normaux moyens à la Figure 3.58. La vitesse de coupe influence les efforts normaux moyens à la Figure 3.59. Les efforts normaux moyens sont supérieurs à ceux de l'OP30P3 45° CR20 X et inférieurs à ceux des opérations OP50P5 -45° CR20 X et OP50P6 -45° CR20 Y en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Ils sont similaires aux autres opérations des plaques P3, P5 et P6 en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Les efforts d'avance moyens sont inférieurs aux efforts normaux moyens pour l'ensemble des vitesses. Les efforts axiaux sont faibles et sans tendance avec l'utilisation d'un outil dont l'angle d'hélice est nul et ils ne sont pas illustrés.

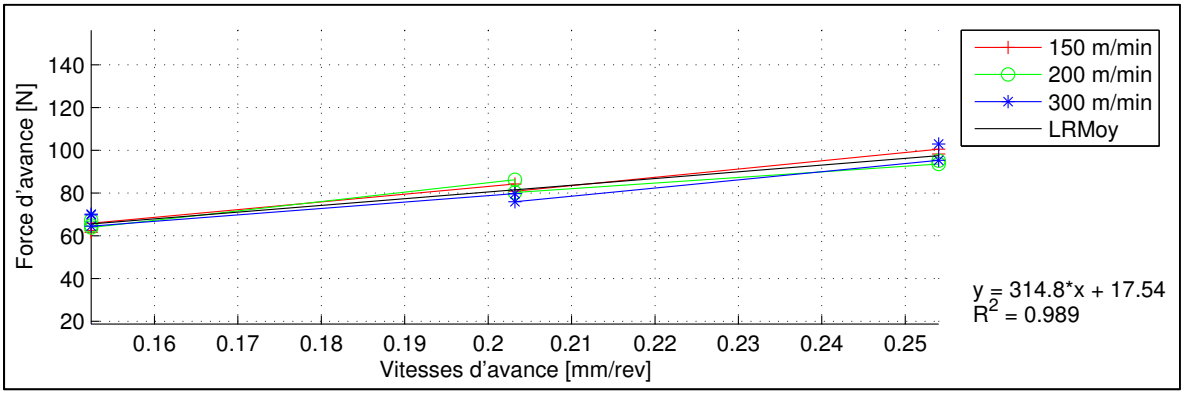



Figure 3.56 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P6 45° CR10 X

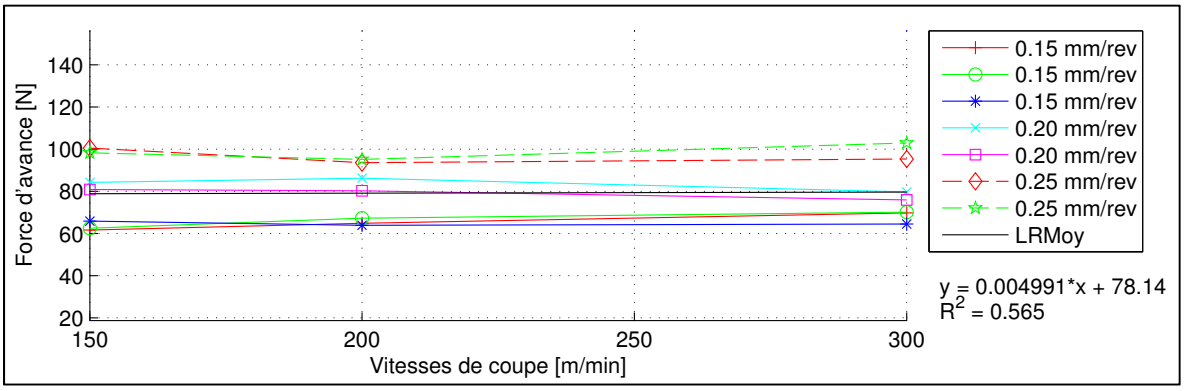



Figure 3.57 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P6 45° CR10 X

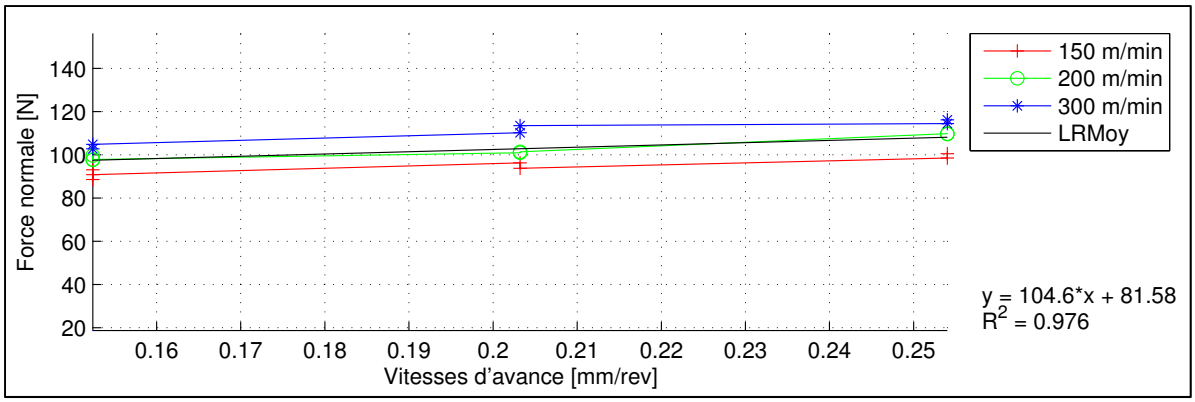



Figure 3.58 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P6 45° CR10 X

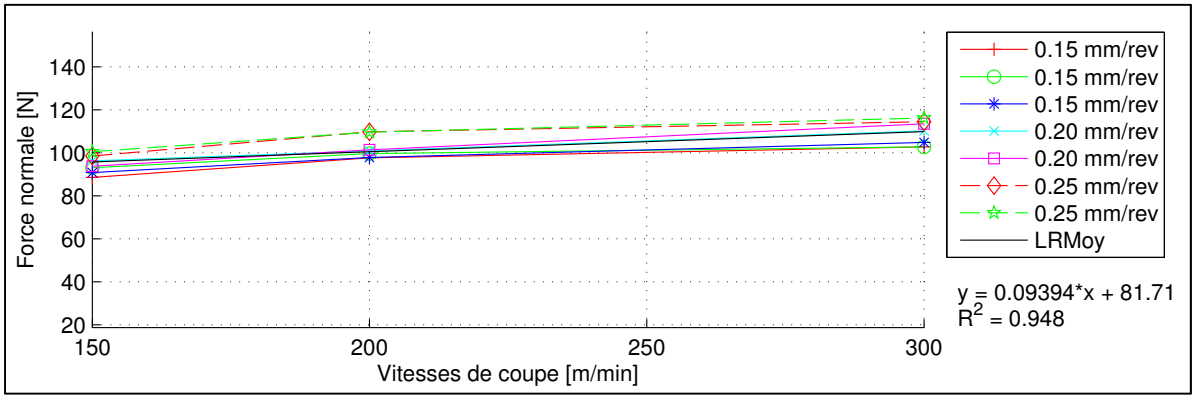



Figure 3.59 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P6 45° CR10 X

### 3.1.15 Efforts de coupe pour l'opération OP50P6 45° CR20 X

Cette opération de rainurage robotisée est la troisième de quatre sur la plaque P6 et elle comporte les mêmes vitesses, une configuration du robot CR20, une direction de rainurage X dans la cellule robotisée et un pli de surface orienté à 45°. La vitesse d'avance influence les efforts d'avance moyens à la Figure 3.60. La vitesse de coupe n'influence pas les efforts d'avance moyens à la Figure 3.61. Les efforts d'avance moyens sont légèrement inférieurs à ceux des opérations OP50P5 -45° CR20 X, OP50P6 -45° CR20 Y et OP30P3 -45° CR20 X en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Ils sont similaires à ceux des autres opérations des plaques P3, P5 et P6 en fonction de la vitesse d'avance et de coupe.

La vitesse d'avance a une influence faible sur les efforts normaux moyens à la Figure 3.62. La vitesse de coupe influence les efforts normaux moyens à la Figure 3.61. Les efforts normaux moyens sont supérieurs à ceux de l'OP30P3 45° CR20 X et sont similaires à ceux de l'OP30P3 -45° CR20 X en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Ils sont similaires aux autres opérations des plaques P3, P5 et P6 en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Les efforts d'avance moyens sont inférieurs aux efforts normaux moyens pour l'ensemble des vitesses. Les efforts axiaux sont faibles et sans tendance avec l'utilisation d'un outil dont l'angle d'hélice est nul et ils ne sont pas illustrés.

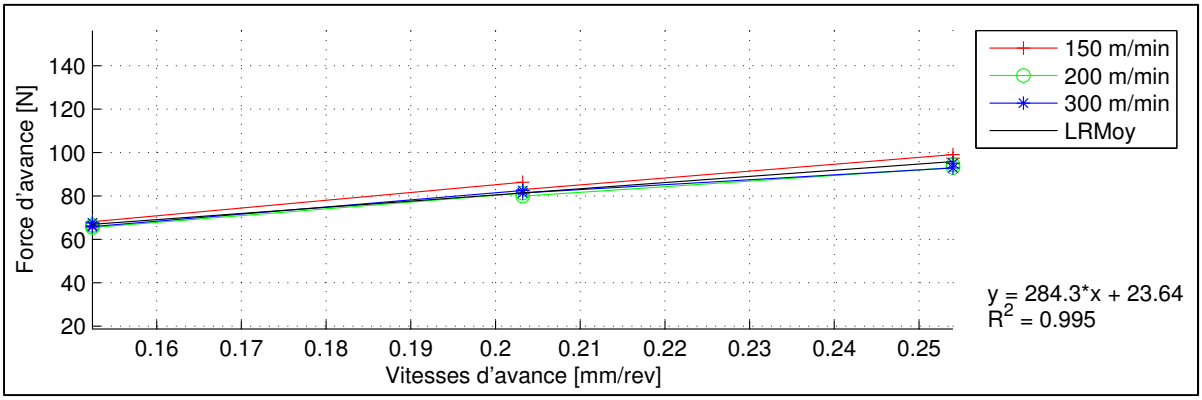



Figure 3.60 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P6 45° CR20 X

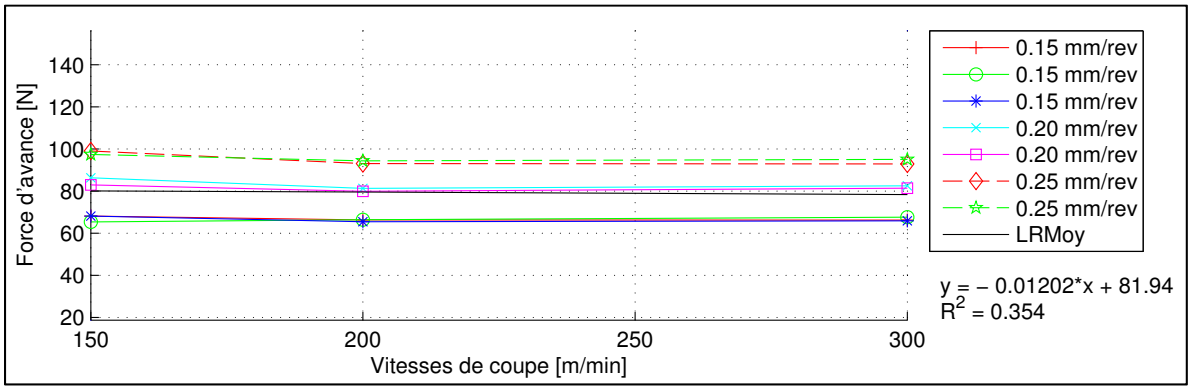



Figure 3.61 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P6 45° CR20 X

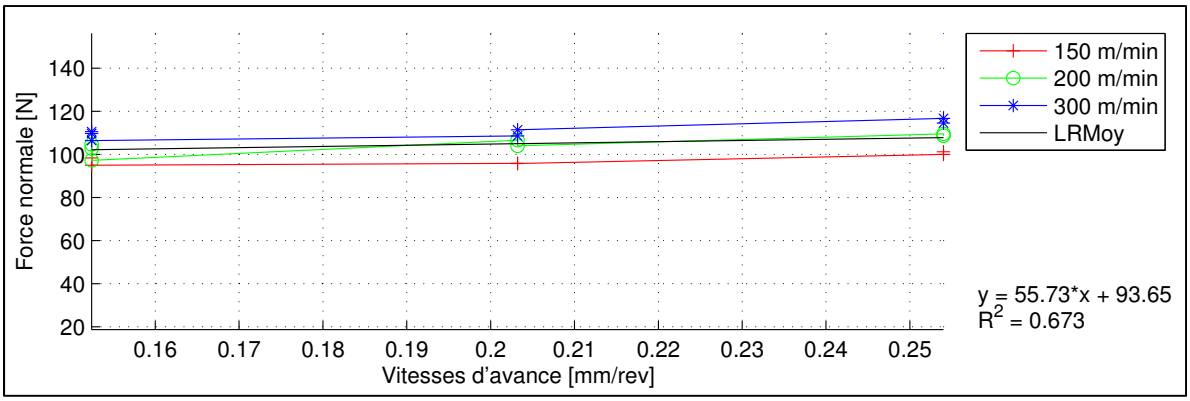



Figure 3.62 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P6 45° CR20 X

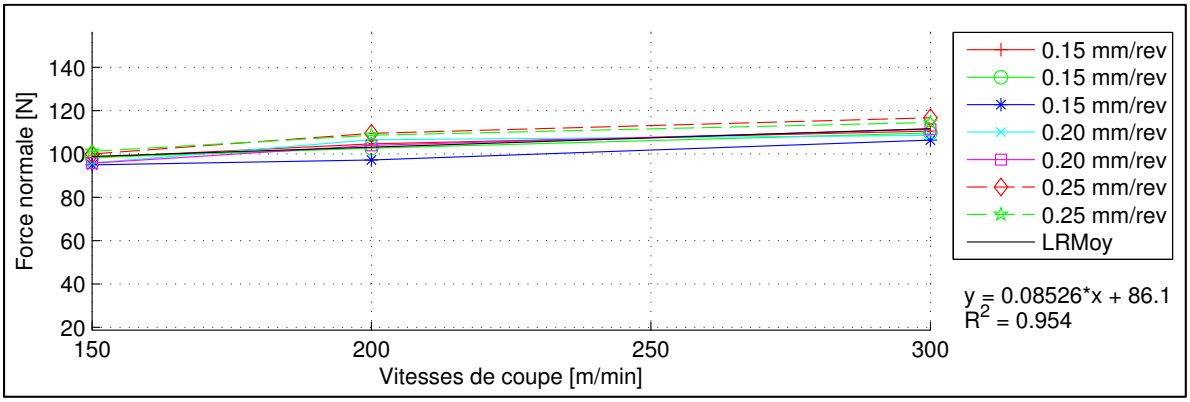



Figure 3.63 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P6 45° CR20 X

### 3.1.16 Efforts de coupe pour l'opération OP50P6 -45° CR20 Y

Cette opération de rainurage robotisée est la quatrième de quatre sur la plaque P6 et elle comporte les mêmes vitesses, une configuration du robot CR20, une direction de rainurage Y dans la cellule robotisée et un pli de surface orienté à -45°. La vitesse d'avance influence les efforts d'avance moyens à la Figure 3.64. La vitesse de coupe a une faible influence sur les efforts d'avance moyens à la Figure 3.65Figure 3.61. Les efforts d'avance moyens sont similaires à ceux des opérations OP50P5 -45° CR20 X et OP30P3 -45° CR20 X en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Ils sont supérieurs à ceux des autres opérations des plaques P3, P5 et P6 en fonction de la vitesse d'avance et de coupe.

La vitesse d'avance influence les efforts normaux moyens à la Figure 3.66. La vitesse de coupe influence les efforts normaux moyens à la Figure 3.67. Les efforts normaux moyens sont inférieurs à ceux des opérations OP50P5 45° CR20 Y et OP50P5 -45° CR20 X en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Ils sont supérieurs aux autres opérations des plaques P3, P5 et P6 en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Les efforts d'avance moyens sont inférieurs aux efforts normaux moyens pour l'ensemble des vitesses. Les efforts axiaux sont faibles et sans tendance avec l'utilisation d'un outil dont l'angle d'hélice est nul et ils ne sont pas illustrés.

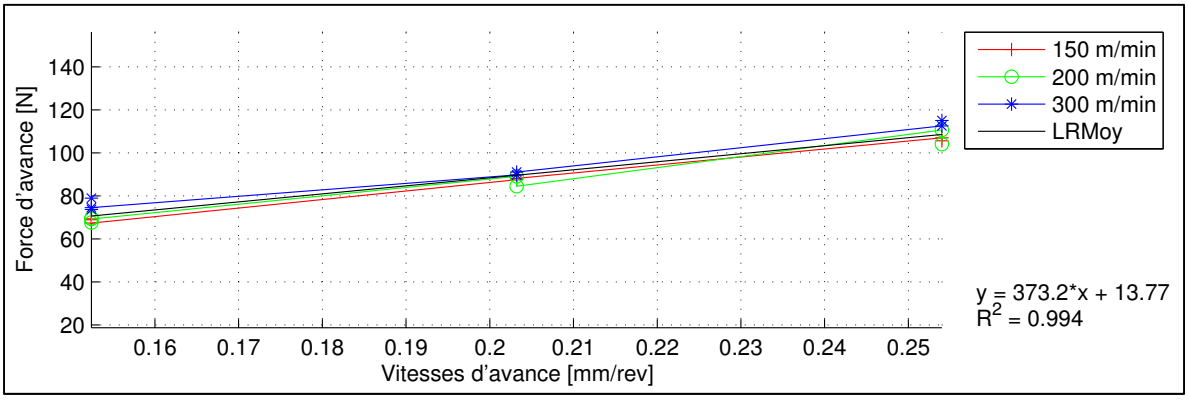



Figure 3.64 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P6 -45° CR20 Y

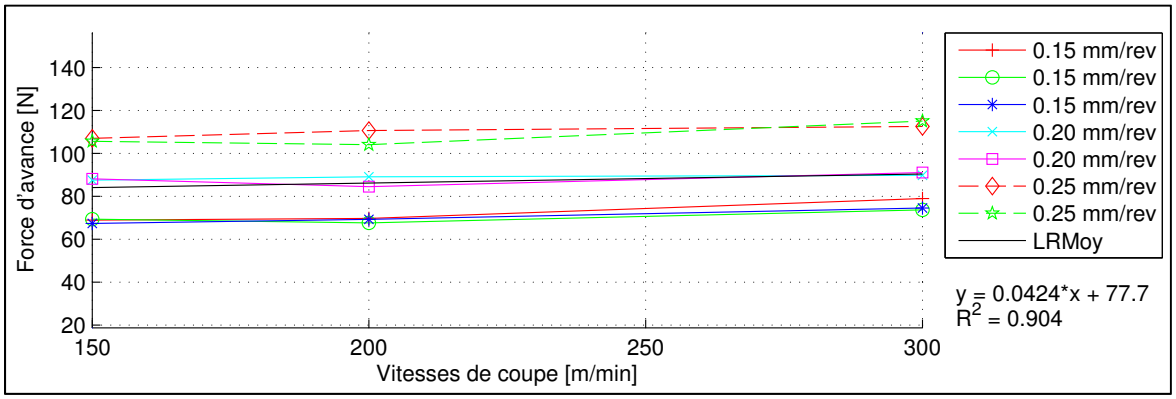



Figure 3.65 Effort d'avance moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P6 -45° CR20 Y

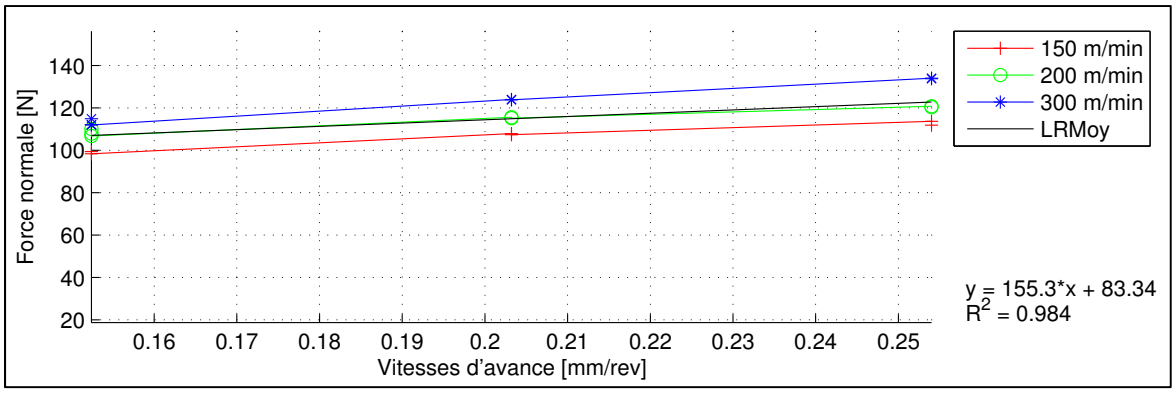



Figure 3.66 Effort normal moyen en fonction de la vitesse d'avance de l'OP50P6 -45° CR20 Y

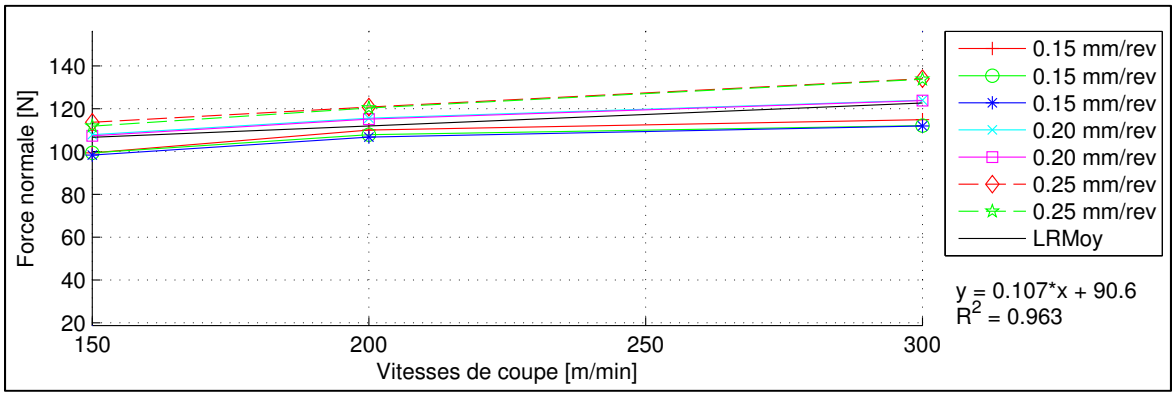



Figure 3.67 Effort normal moyen en fonction de la vitesse de coupe de l'OP50P6 -45° CR20 Y

### 3.1.17 Conclusion

L'effort d'avance moyen est influencé par la vitesse d'avance et n'est pas influencé par la vitesse de coupe pour l'ensemble des opérations robotisées et sur centre d'usinage. La vitesse d'avance a une faible influence sur l'effort normal moyen pour une majorité des opérations à l'exception des quatre opérations OP10P2 -45°, OP10P4 45° CR10 Y, OP20P4 -45° CR20 X, OP50P6 -45° CR10 Y et OP50P6 45° CR20 X. L'effort normal moyen est influencé par la vitesse de coupe pour l'ensemble des opérations. L'effort axial moyen est quasi nul étant donné l'angle d'hélice nul de l'outil. Les efforts normaux moyens des opérations des plaques P2 et P4 sont inférieurs aux efforts d'avance moyens en fonction des vitesses d'avance et de coupe. À l'inverse, pour les plaques P1, P3, P5 et P6, les efforts normaux sont supérieurs aux

efforts d'avance moyens en fonction des vitesses d'avance et de coupe. Normalement, les efforts normaux moyens sont inférieurs aux efforts d'avance moyens lors du rainurage d'un matériau isotrope, (Zaghbani et al., 2012a). Les pentes des efforts de coupe moyens en fonction des vitesses d'avance et de coupe sont parallèles entre les opérations des plaques P1 et P2. Cependant, l'amplitude des efforts moyens des opérations de la plaque P1 est supérieure à ceux des opérations de la plaque P4 et P2. Des analyses statistiques des efforts d'avance moyens des opérations de la plaque P1 permettent de constater une influence significative de la configuration du robot en fonction des vitesses d'avance et de coupe (Slamani, Gauthier et Chatelain, 2014b).

## 3.2 Rugosité longitudinale de stratifiés rainurés

L'objectif de mesurer la rugosité longitudinalement est de déterminer les conditions de coupe qui minimalisent les paramètres de rugosité Ra et Rt. La moyenne arithmétique Ra et la hauteur maximale du profile de rugosité Rt sont mesurées le long de plis rainurés parallèles à la direction d'avance de l'outil, Figure 3.68. Seulement les surfaces détourées en opposition sont mesurées. La rugosité des plis est mesurée selon la norme ASME B46.1, (ASME, 2009). Les paramètres de mesures sont représentés au Tableau 3.1.

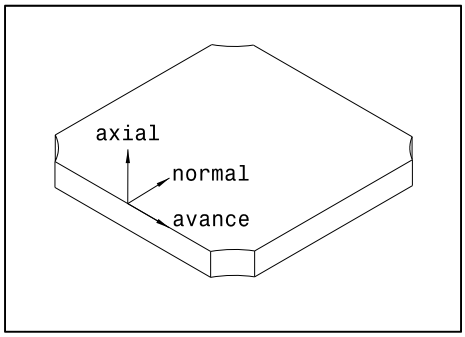



Figure 3.68 Directions d'avance de mesures de la rugosité

Tableau 3.1 Paramètres de mesure de rugosité

| | |
|---|---|
| Longueur de parcouru par la pointe | 4.8 mm |
| Longueur de mesure | 4 mm |
| Longueur d'échantillonnage | 0.8 mm |
| Nombre d'échantillons | 5 |
| Nombres de points échantillonnés | 9600 |
| Critères mesurés | Ra et Rt (µm) |

Le montage utilisé implique l'utilisation d'un microscope Keyence VHX-500FE et d'un profilomètre Mitutoyo Surftest SJ-400, Figure 3.69. Les mesures sont acquises avec une pointe de 90° d'un rayon de 2 µm et le logiciel d'acquisition SURFPAK-SJ de Mitutoyo. L'utilisation du microscope est pour assurer le suivi du pli mesuré par la pointe tout au long de la mesure longitudinale de rugosité, Figure 3.70. La pointe en diamant du profilomètre est nettoyée aux 4 mesures pour éviter l'accumulation de la poussière de carbone sur celle-ci. La position longitudinale de la mesure sur le pli est choisie aléatoirement. Le diamant est toujours positionné le long d'un même pli lors d'une mesure. Les surfaces détourées sont soufflées avant d'être mesurées pour éliminer un maximum de poussière de carbone en surface.

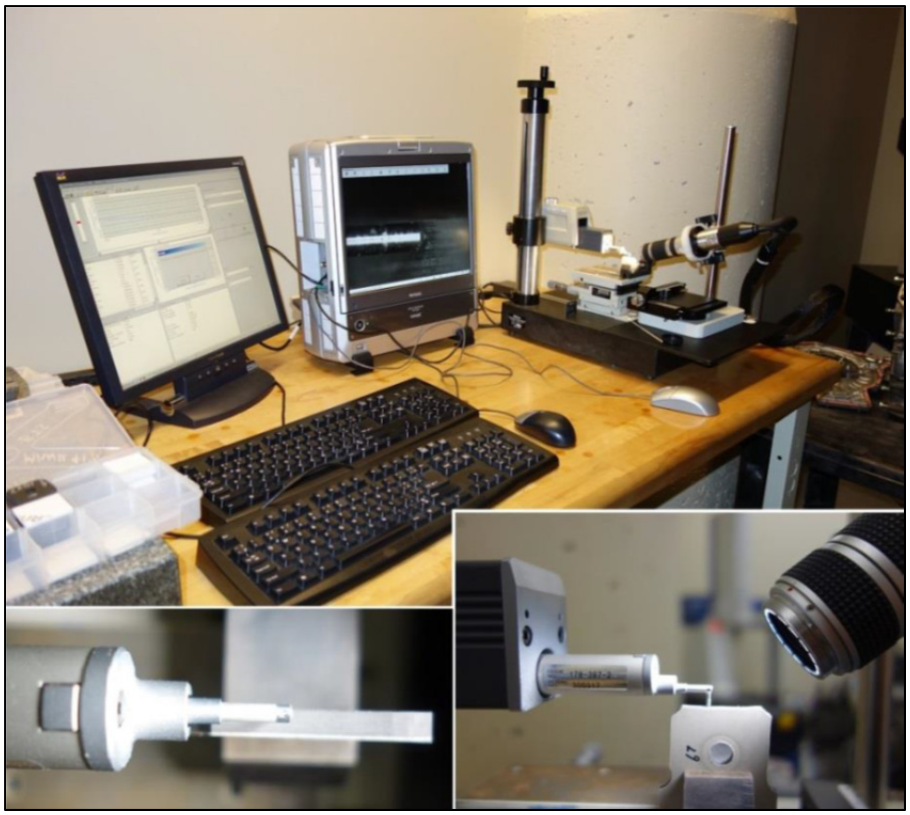


Figure 3.69 Montage du profilomètre et du microscope pour la mesure de rugosité

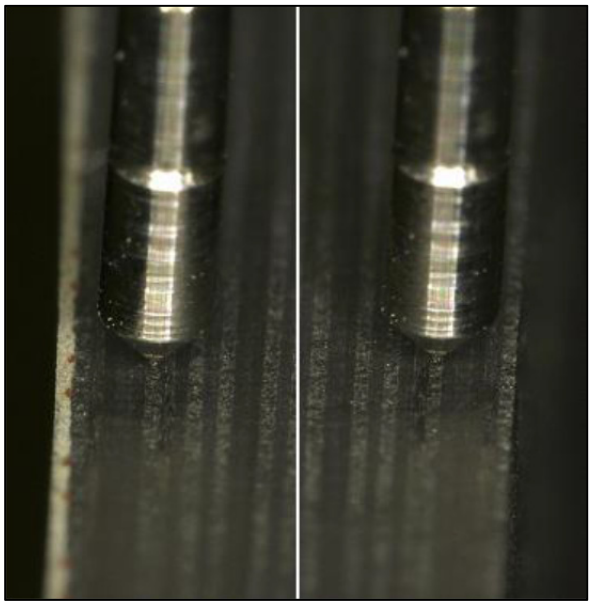


Figure 3.70 Images du microscope lors de mesure de la rugosité

### 3.2.1 Vérification de la répétitivité de mesure de la rugosité longitudinale

La précision du profilomètre est évaluée à l'aide de 3 mesures identiques d'un même pli sans manipulation entre chaque mesure. Les résultats de mesures Ra et Rt sont présentés au Tableau 3.2 en fonction des facteurs qui identifient l'échantillon mesuré de l'OP10P1 pour cette évaluation.

Tableau 3.2 Évaluation de la précision du profilomètre

| Orientation du pli (°) | Vc (m/min) | Va (mm/rev) | Paramètre | 1re mesure | 2e mesure | 3e mesure | Écart type |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| -45° | 300 | 0.254 | Ra | 1.118 | 1.261 | 1.288 | 0.091 |
| | | | Rt | 8.250 | 9.156 | 9.159 | 0.524 |

Le profilomètre semble être précis selon les résultats. La répétabilité des mesures est évaluée par 6 mesures aléatoires du même pli que celui mesuré pour évaluer la précision du profilomètre. Les résultats de mesures Ra et Rt sont présentés au Tableau 3.3 en fonction des facteurs qui identifient l'échantillon mesuré de l'OP10P1 pour cette évaluation. La répétabilité des mesures est très faible donc il sera impossible de définir un modèle.

Tableau 3.3 Répétabilité de la mesure de rugosité

| Paramètre | Mesure | | | | | | Analyse |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1re | 4e | 5e | 6e | 7e | 8e | Écart type |
| Ra | 1.118 | 2.945 | 2.369 | 4.655 | 5.104 | 5.703 | 1.783 |
| Rt | 8.250 | 28.82 | 22.914 | 33.859 | 47.271 | 50.089 | 15.624 |

### 3.2.2 Rugosité de stratifié rainuré des opérations OP10P1, OP20P1 et OP10P2

Les opérations de rainurage OP10P1, OP20P1 et OP10P2 comportent chacune 42 conditions de coupe. La rugosité est mesurée sur 12 surfaces rainurées en opposition pour chaque opération afin de limiter le temps de mesure étant donné que la rugosité en avalant est reconnue pour être supérieure. Chaque vitesse de coupe et d'avance du Tableau 3.4 est

contrôlée à deux reprises. Les 5$^{e}$ et 20$^{e}$ plis ou 6$^{e}$ et 19$^{e}$ plis d'une orientation de -45° sont mesurés, voir l'encadré de l'orientation de l'équation (3.1) et la Figure 3.71. La mesure de ces plis permet de comparer la rugosité des plis supérieurs à celle des plis inférieur d'une orientation de -45°. Deux mesures par plis sont effectuées pour un total de 48 mesures par opérations de rainurage. Les surfaces mesurées de l'OP10P1 et l'OP20P1 sont présentées à la Figure 3.72. Les surfaces mesurées de l'OP10P2 sur centre d'usinage sont présentées à la Figure 3.73. L'objectif est de déterminer l'influence des conditions de coupe sur les critères de rugosité Ra et Rt. Un second objectif est de déterminer si la configuration du robot et le type de machine influencent les critères Ra et Rt.

Tableau 3.4 Conditions de coupe contrôlées par la mesure de la rugosité

| Vitesse de coupe | Vitesse d'avance |
|---|---|
| m/min | mm/rev |
| 200 | 0.2032 |
| 300 | 0.2540 |
| 400 | 0.3048 |
| 500 | 0.3556 |
| 600 | 0.4064 |
| 650 | 0.4572 |

$$[-45/90/45/0/\boxed{\pm 45}/90/\pm 45/0/\mp 45]_s \tag{3.1}$$

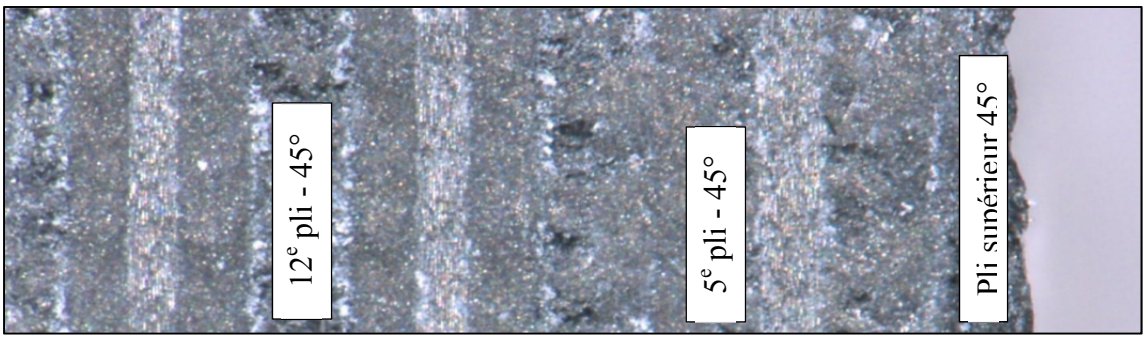



Figure 3.71 Vue normale de la surface détourée en opposition de l'OP10P1 45° CR10 Y avec un grossissement de 100

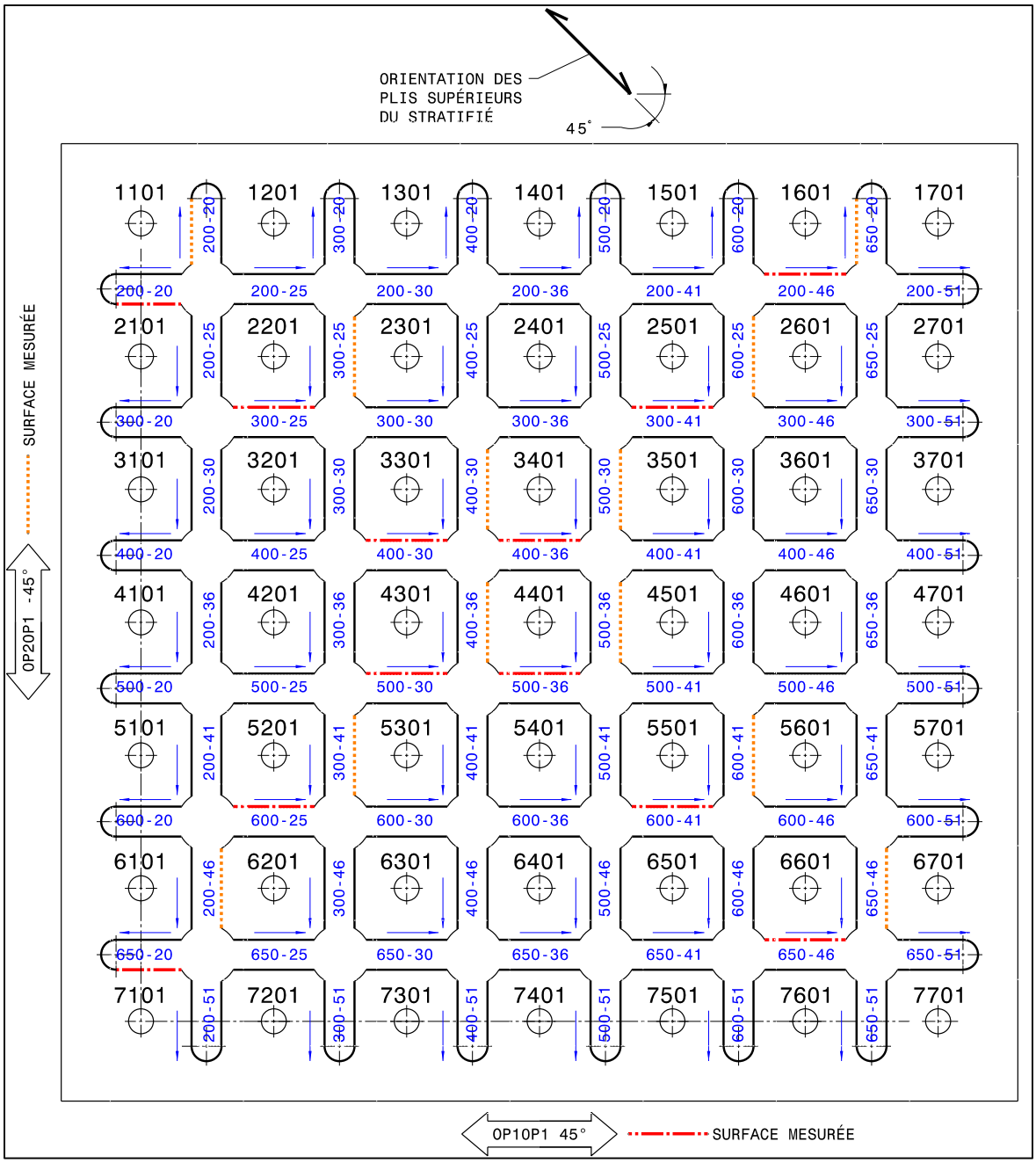



Figure 3.72 Surfaces rainurées et mesurées de l'OP10P1 et de l'OP20P1

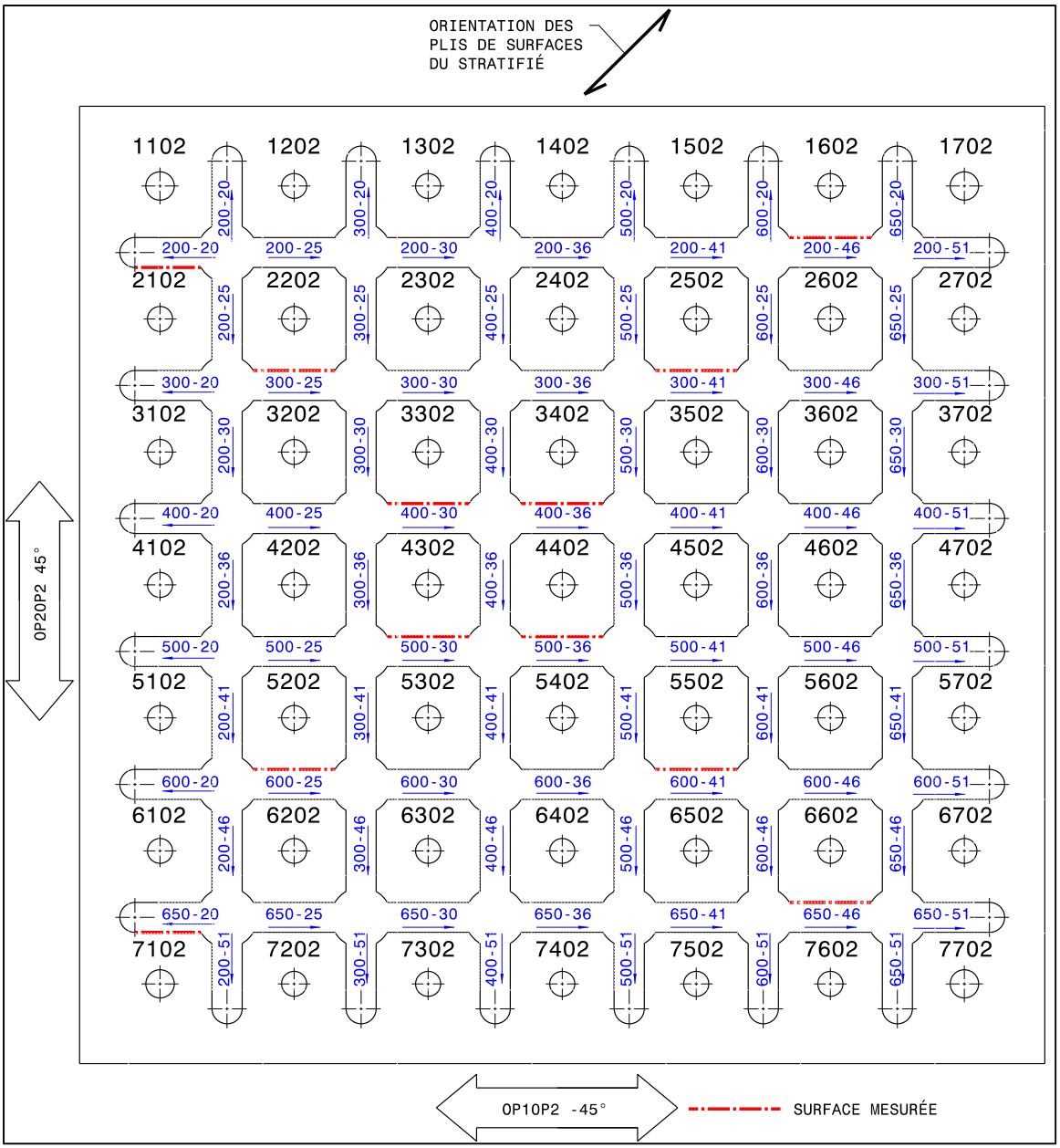



Figure 3.73 Surfaces rainurées et mesurées de l'OP10P2 sur centre d'usinage

Les résultats de la moyenne arithmétique Ra pour les trois opérations sont présentés à la Figure 3.74 en fonction de la vitesse d'avance et à la Figure 3.76 en fonction de la vitesse de coupe. Malgré le retrait des données aberrantes à la Figure 3.75, le coefficient de détermination reste faible entre la vitesse d'avance et le critère Ra et l'étendue des résultats est très grande.

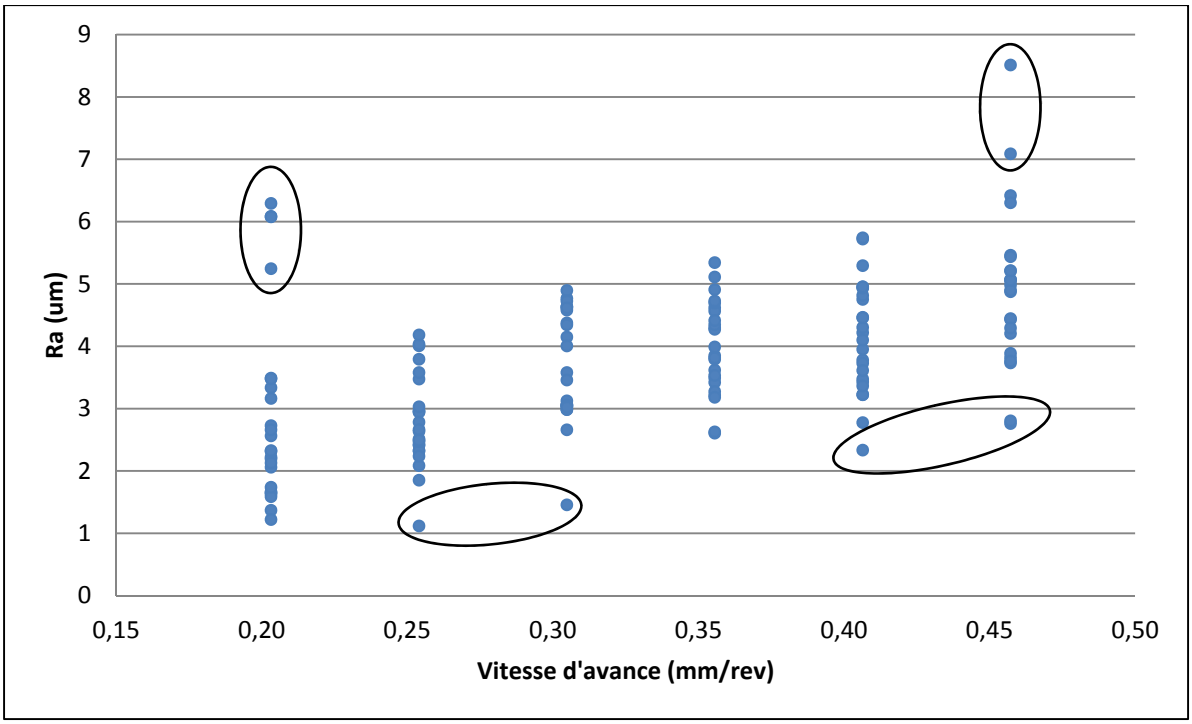



Figure 3.74 Ra en fonction de la vitesse d'avance pour l'OP10P1, l'OP20P1 et l'OP10P2 (centre d'usinage)

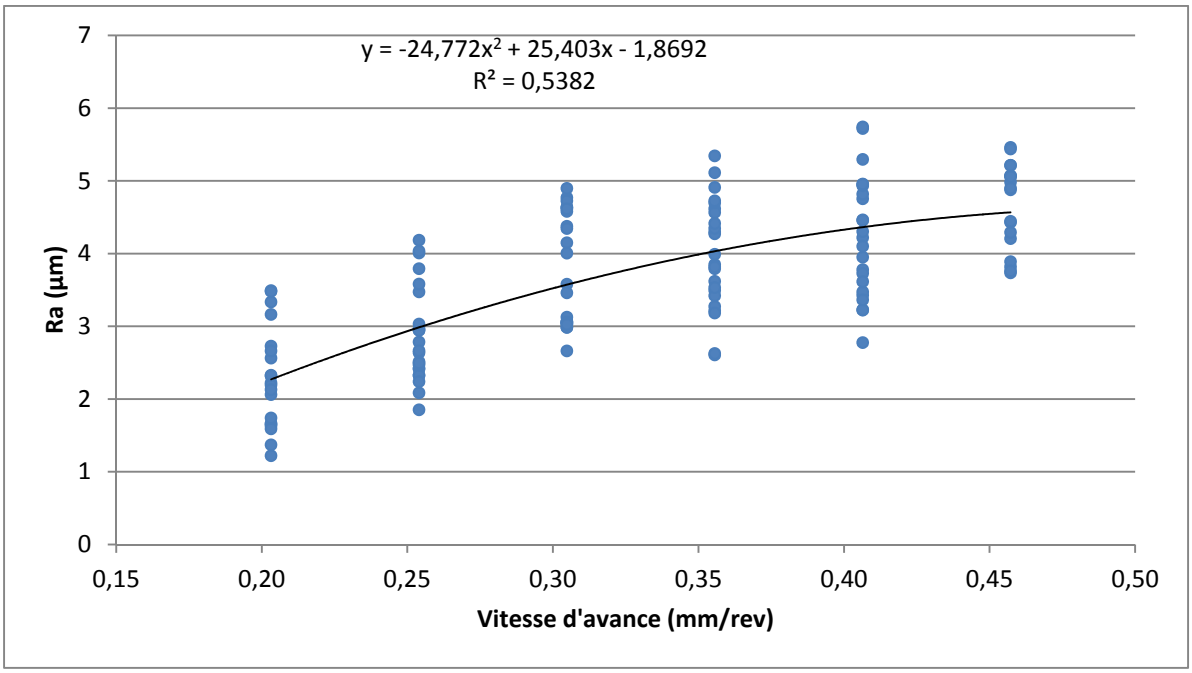



Figure 3.75 Ra sans les données aberrantes en fonction de la vitesse d'avance pour l'OP10P1, l'OP20P1 et l'OP10P2 (centre d'usinage)

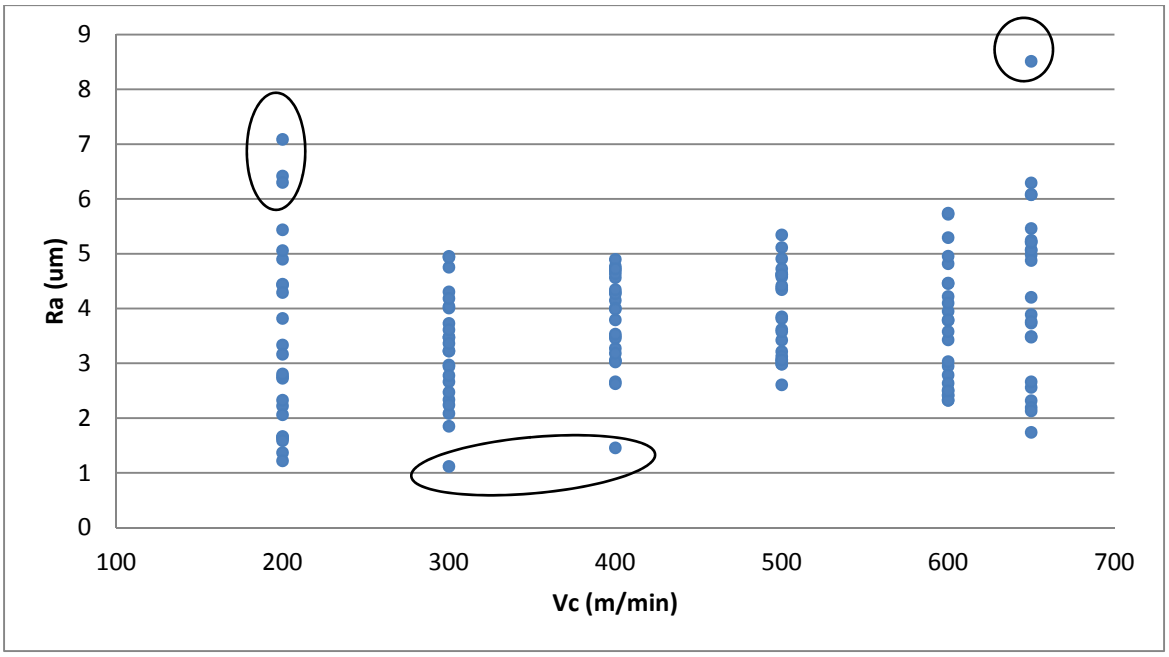



Figure 3.76 Ra en fonction de la vitesse de coupe pour l'OP10P1, l'OP20P1 et l'OP10P2 (centre d'usinage)

Les résultats de la hauteur maximale du profile de rugosité Rt pour les trois opérations sont présentés à la Figure 3.77 en fonction de la vitesse d'avance et à la Figure 3.78 en fonction de la vitesse de coupe.

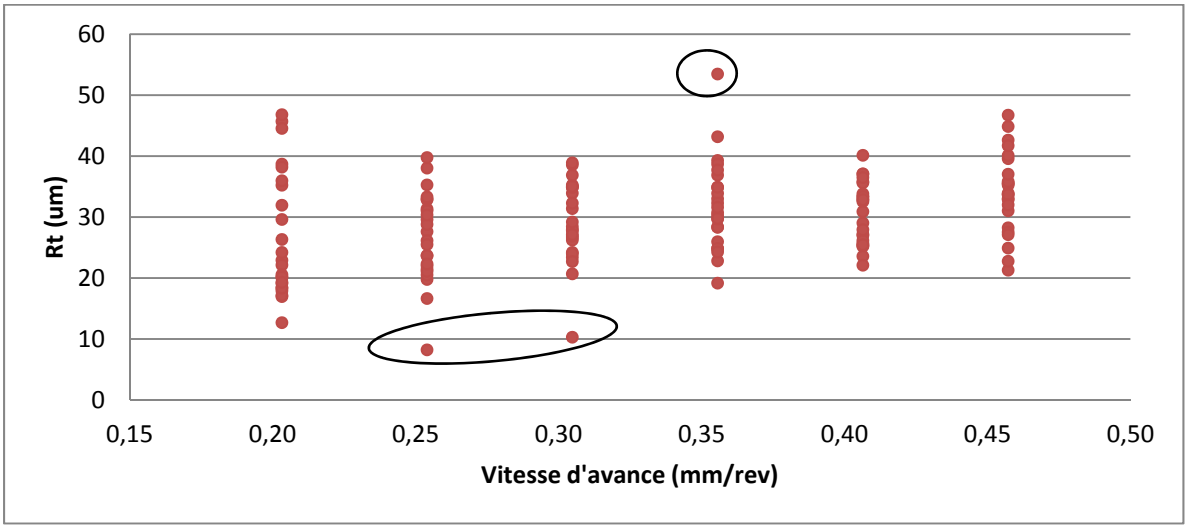



Figure 3.77 Rt en fonction de la vitesse d'avance pour l'OP10P1, l'OP20P1 et l'OP10P2 (centre d'usinage)

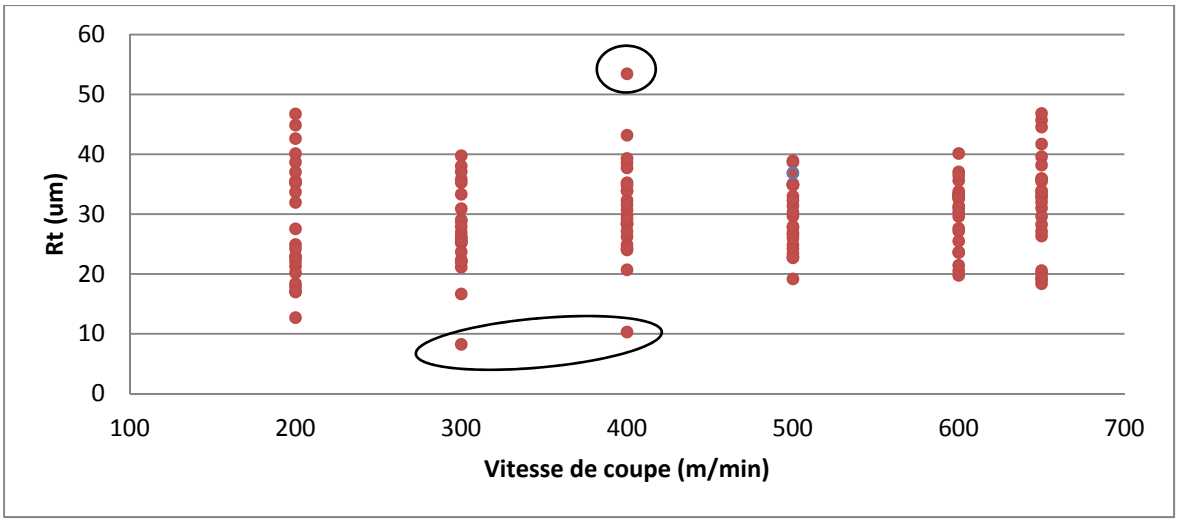



Figure 3.78 Rt en fonction de la vitesse de coupe pour l'OP10P1, l'OP20P1 et l'OP10P2 (centre d'usinage)

Il est possible d'identifier certaines données aberrantes à partir des graphiques de résultats Ra et Rt en fonction des conditions de coupe. Les moyennes et les écarts type de Ra et de Rt par opération de rainurage sont présentés à la Figure 3.79 et à la Figure 3.80 respectivement. Les influences de la vitesse d'avance, de la vitesse de coupe, de la configuration du robot et le type de machine sur les critères de rugosité Ra et Rt sont à analyser.

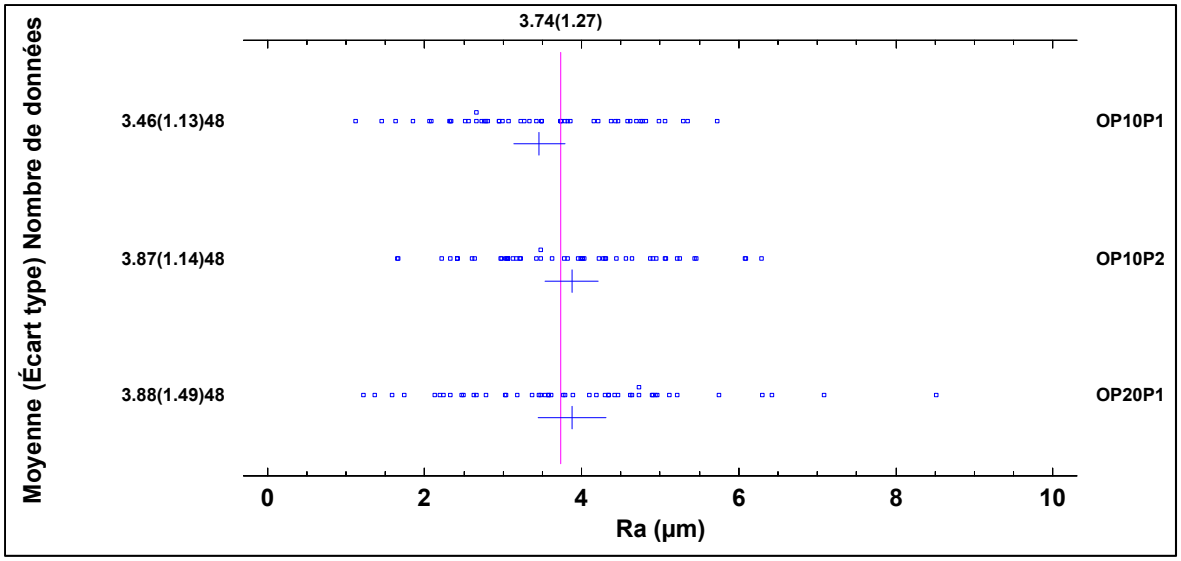



Figure 3.79 Ra (µm) pour l'OP10P1, l'OP20P1 et l'OP20P1

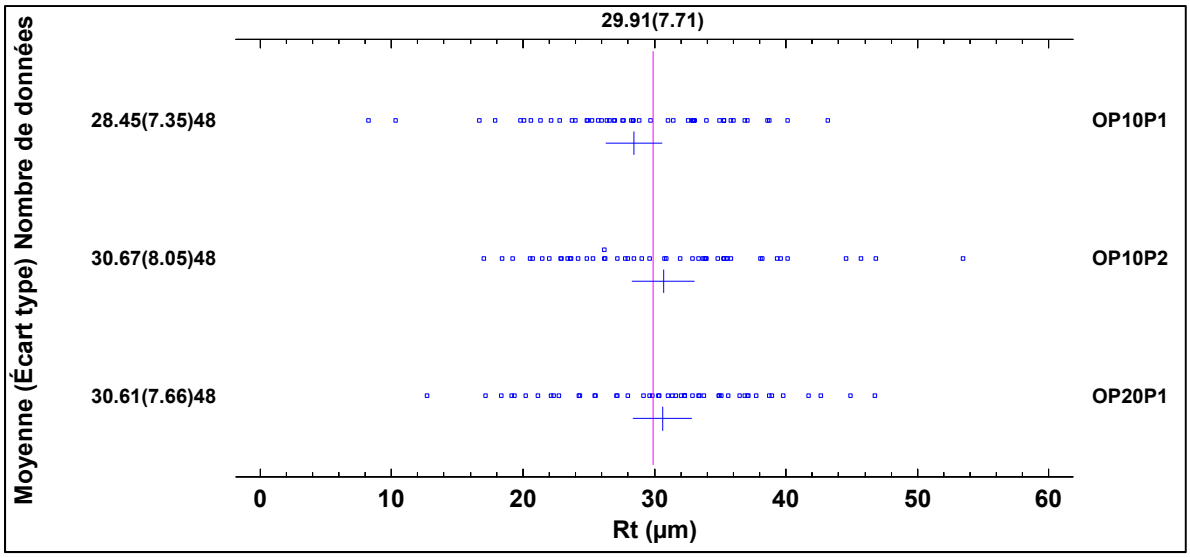



Figure 3.80 Rt (µm) pour l'OP10P1, l'OP20P1 et l'OP20P1

### 3.2.3 Rugosité de plis à -45° et 45° des opérations OP10P1 et OP10P2

Les opérations de rainurage OP10P1 et OP10P2 (centre d'usinage) comportent chacune 42 conditions de coupe. La rugosité est mesurée sur 15 surfaces rainurées en opposition pour chaque opération afin de limiter le temps de mesure. Les plis 20$^{e}$ et 19$^{e}$ d'une orientation de -45° et 45° sont mesurés, voir l'encadré de l'orientation des plis à l'équation (3.2). Ce sont les plis symétriques aux 5$^{e}$ et 6$^{e}$ plis présentés à la Figure 3.71.

$$[-45/90/45/0/\boxed{\pm 45}/90/\pm 45/0/\mp 45]_S \tag{3.2}$$

Deux mesures par plis sont effectuées pour un total de 60 mesures par opérations de rainurage. Chaque vitesse de coupe et d'avance du Tableau 3.5 est contrôlée à deux reprises. L'objectif est de déterminer l'influence des conditions de coupe sur les critères de rugosité Ra et Rt des plis orientés à 45° et -45°. Un second objectif est de déterminer si le type de machine influence les critères Ra et Rt.

Tableau 3.5 Conditions de coupe contrôlées par la mesure de rugosité

| Vitesse de coupe (Vc) (m/min) | Vitesse d'avance (Va) (mm/rev) |
|---|---|
| 200 | 0.2540 |
| 400 | 0.3048 |
| 650 | 0.3556 |
| | 0.4064 |
| | 0.4572 |

Les Figure 3.81 et Figure 3.82 présente les moyennes et écarts type de Ra et Rt respectivement pour chaque orientation de plis. Il y a une plus grande dispersion des résultats pour un pli à -45° qu'à 45°. L'orientation du pli à -45° et 45° influence fortement les critères Ra et Rt donc il est préférable de présenter les résultats en fonction des conditions de coupe séparément pour chaque orientation de pli. Les Figure 3.83 et Figure 3.84 présentent les moyennes et écarts type de Ra et Rt respectivement pour chaque opération de rainurage. Une analyse est nécessaire pour déterminer l'influence des types de machine sur les critères Ra et Rt de rugosité.

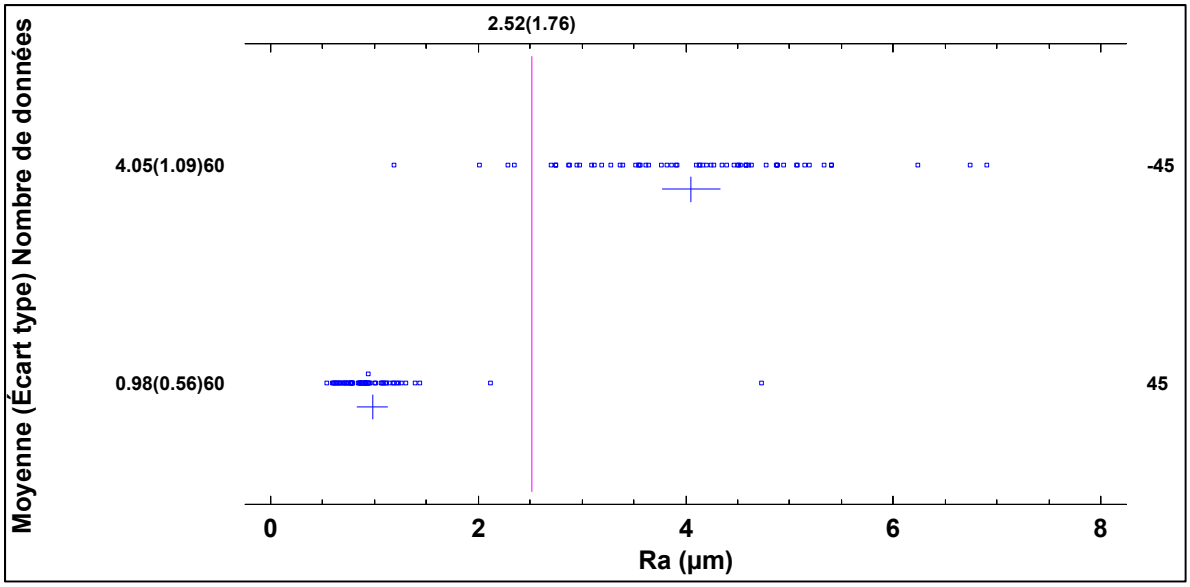



Figure 3.81 Moyenne et écarts types de Ra pour chaque orientation de pli (°)

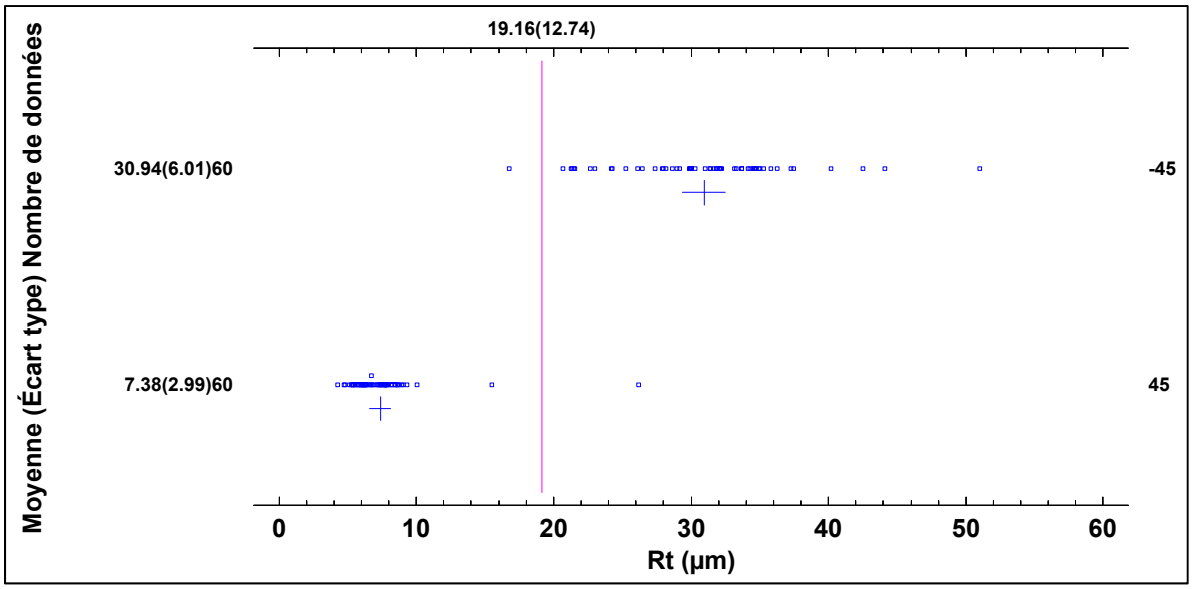



Figure 3.82 Moyenne et écarts types de Rt pour chaque orientation de pli (°)

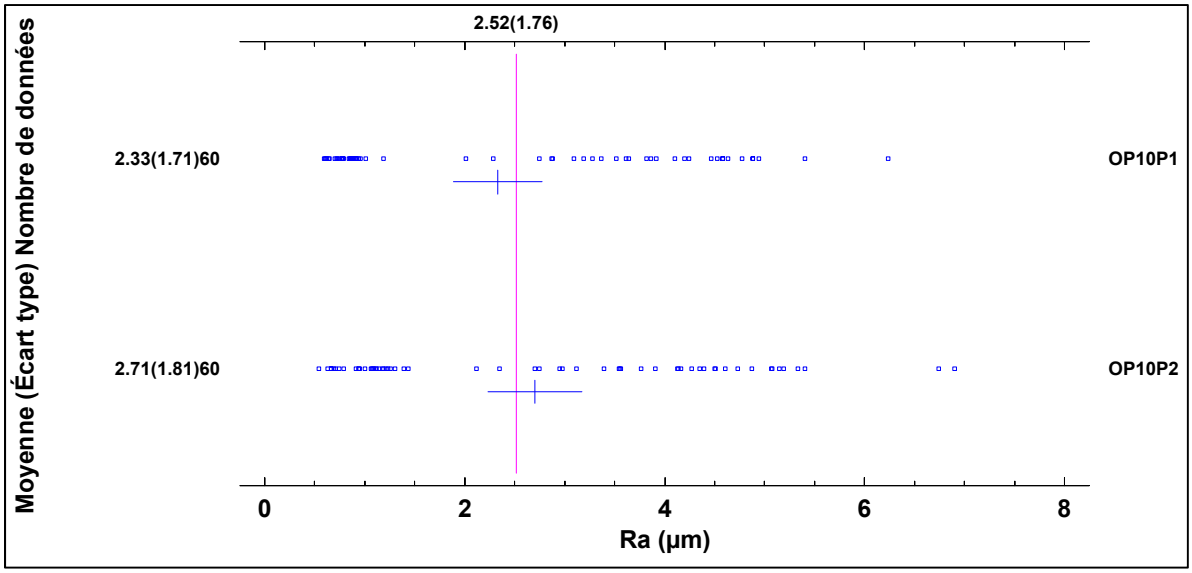



Figure 3.83 Moyenne et écarts types de Ra pour chaque opération de rainurage

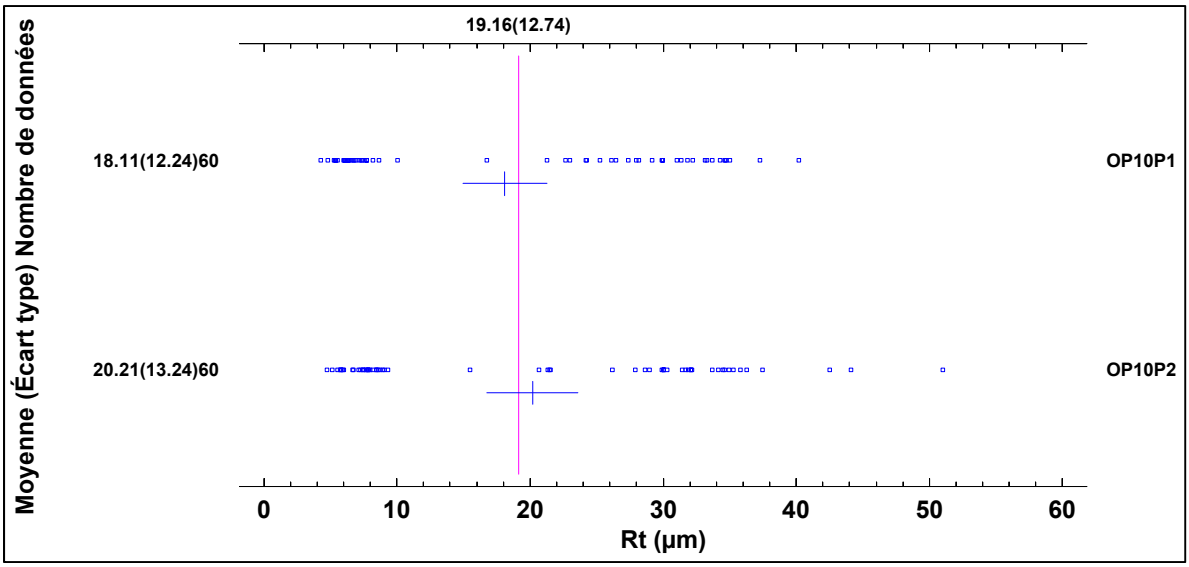



Figure 3.84 Moyenne et écarts types de Rt pour chaque opération de rainurage

Les Figure 3.85 et Figure 3.86 présentent les critères Ra et Rt respectifs en fonction de la vitesse d'avance pour une orientation de pli de -45°. Certaines données sont aberrantes et encerclées. La dispersion des résultats est très élevée et il est difficile d'envisager un modèle de régression.

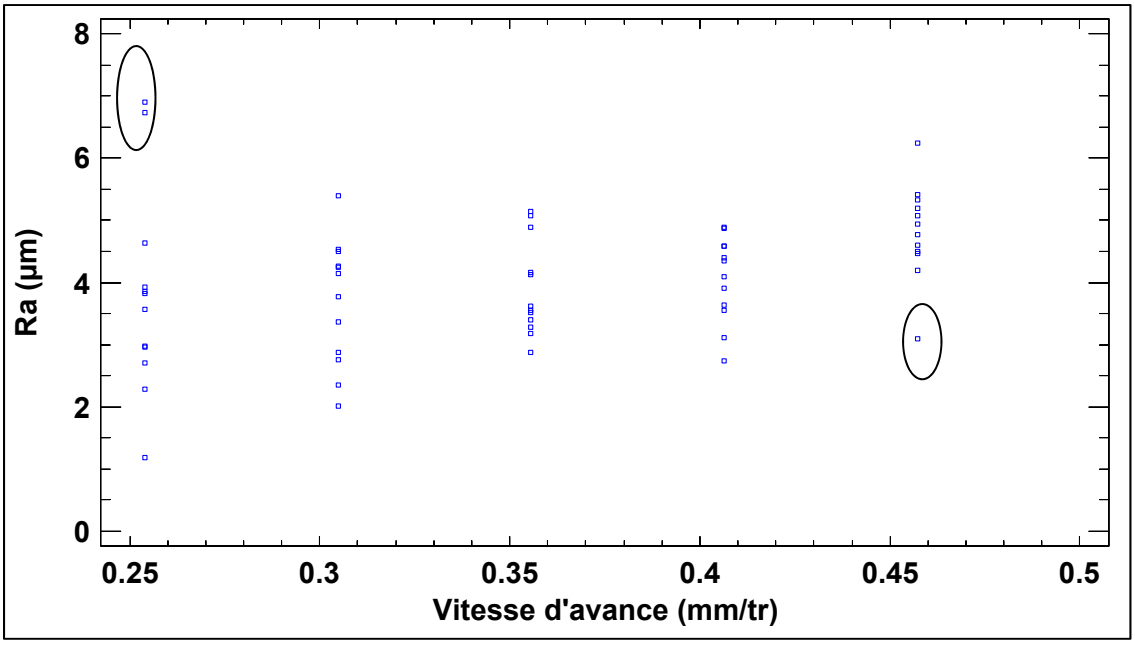



Figure 3.85 Ra en fonction de la vitesse d'avance pour une orientation de pli de -45°

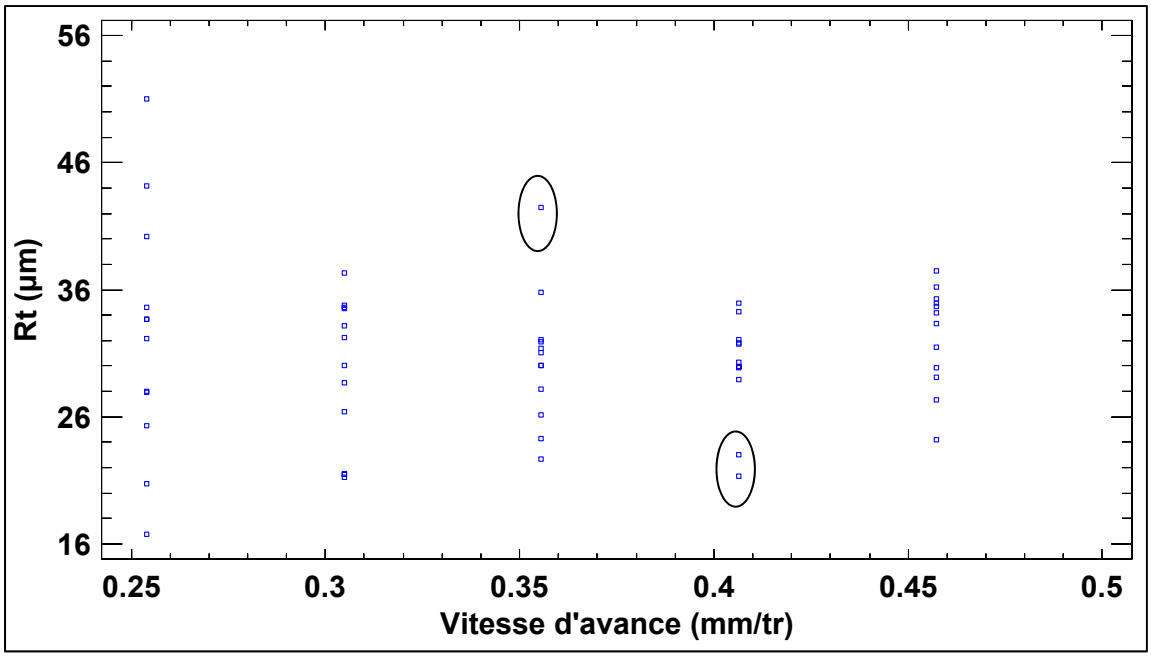



Figure 3.86 Rt en fonction de la vitesse d'avance pour une orientation de pli de -45°

Les Figure 3.87 et Figure 3.88 présentent les critères Ra et Rt respectifs en fonction de la vitesse d'avance pour une orientation de pli de 45°. Certaines données sont aberrantes et encerclées.

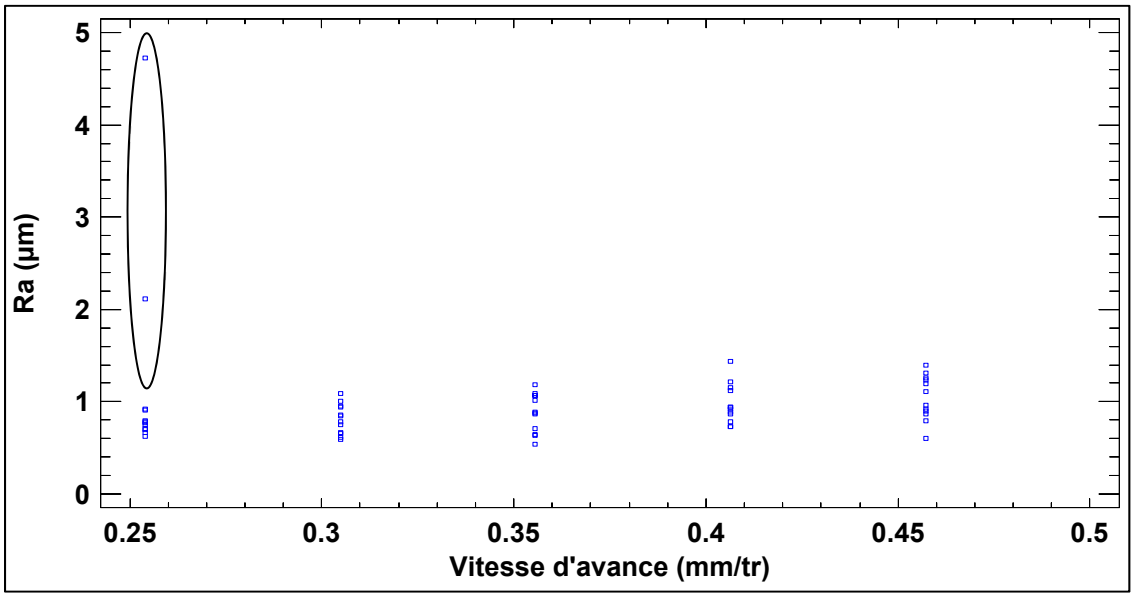



Figure 3.87 Ra en fonction de la vitesse d'avance pour un pli orienté à 45°

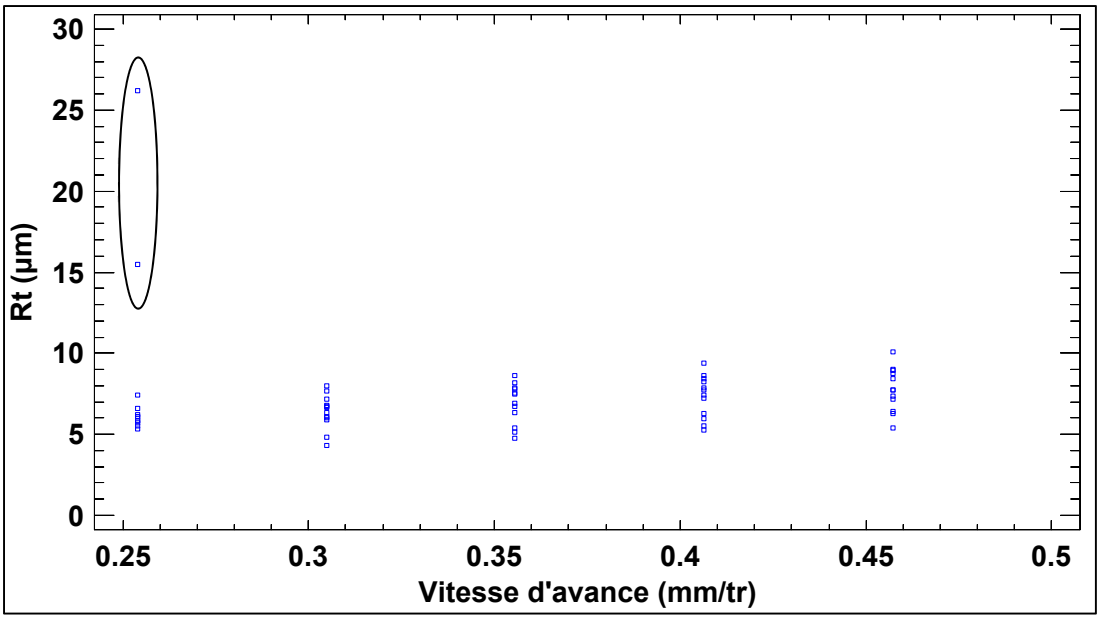



Figure 3.88 Rt en fonction de la vitesse d'avance pour un pli orienté à 45°

Les Figure 3.89 et Figure 3.90 présentent les critères Ra et Rt respectifs en fonction de la vitesse de coupe pour une orientation de pli de -45°. Certaines données sont aberrantes et encerclées.

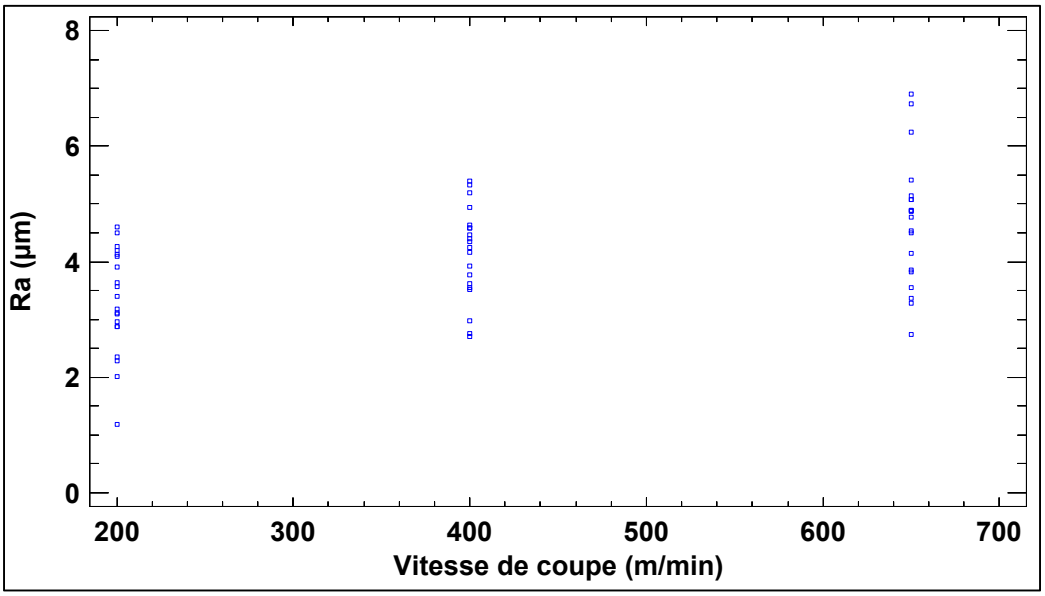



Figure 3.89 Ra en fonction de la vitesse de coupe pour un pli orienté à -45°

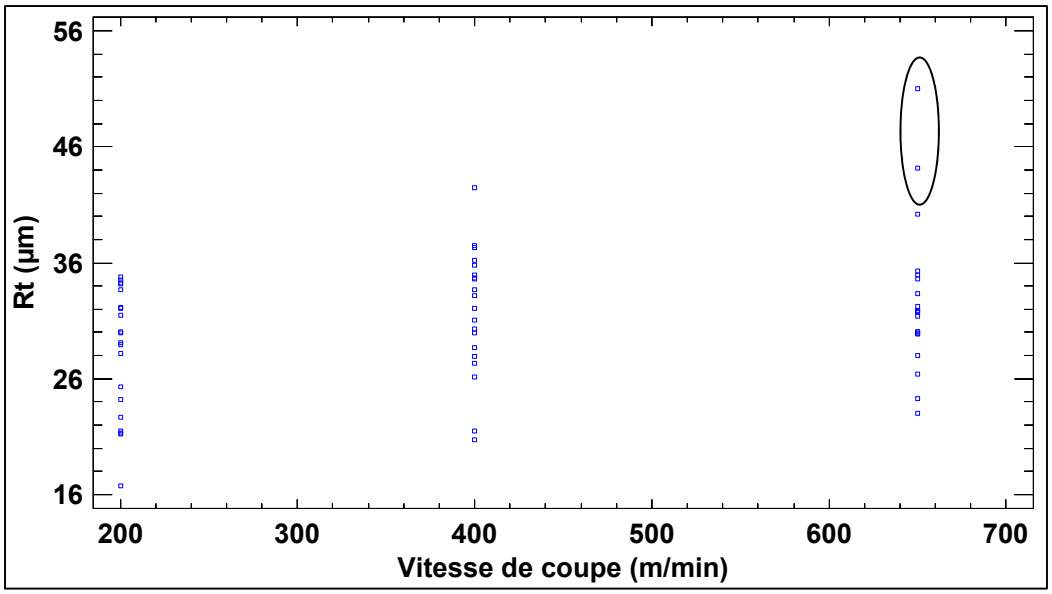



Figure 3.90 Rt en fonction de la vitesse de coupe pour un pli orienté à -45°

Les Figure 3.91 et Figure 3.92 présentent les critères Ra et Rt respectifs en fonction de la vitesse de coupe pour une orientation de pli de 45°. Certaines données sont aberrantes et encerclées.

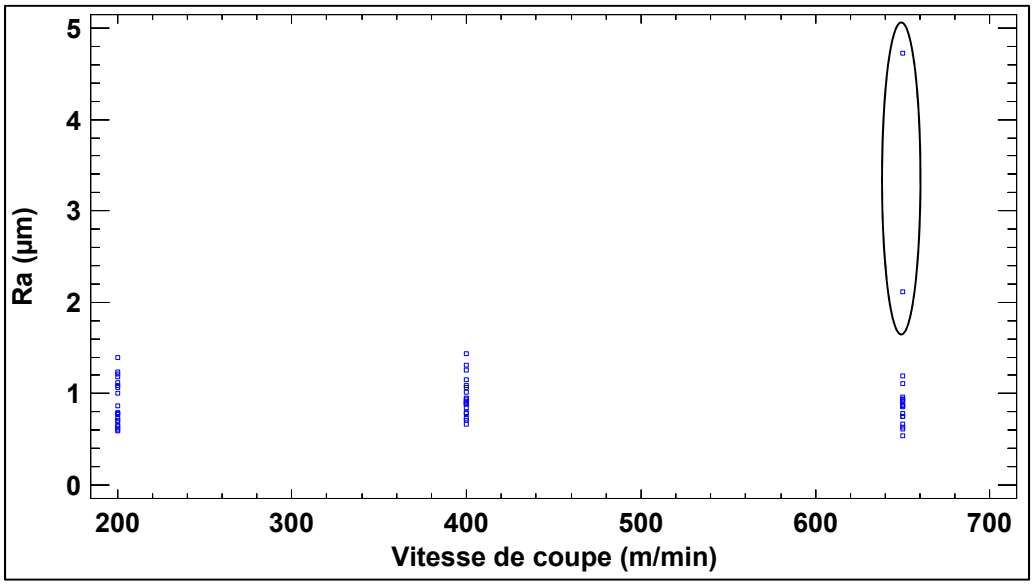



Figure 3.91 Ra en fonction de la vitesse de coupe pour un pli orienté à 45°

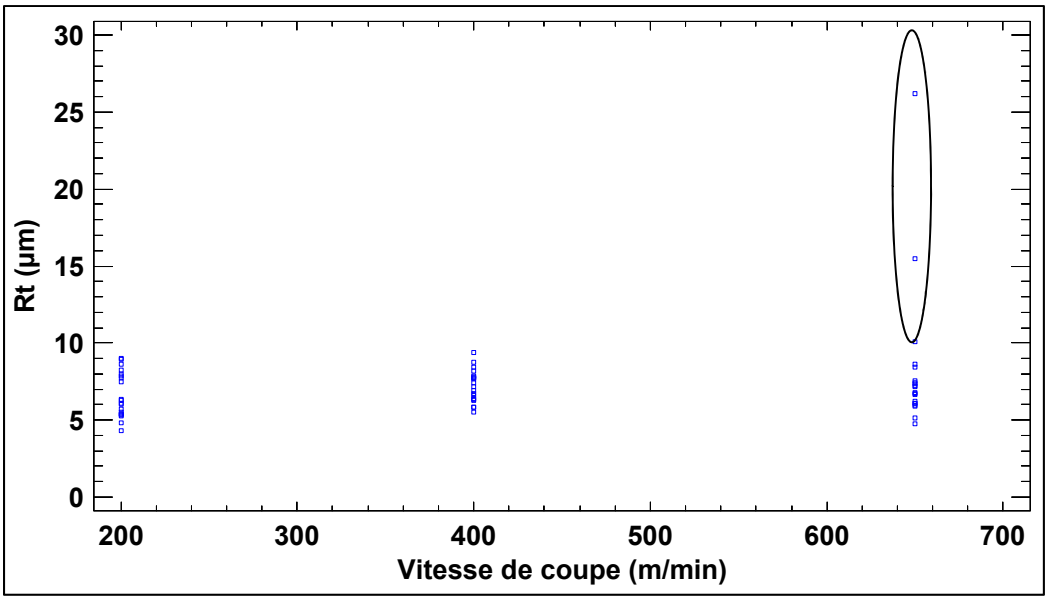



Figure 3.92 Rt en fonction de la vitesse de coupe pour un pli orienté à 45°

### 3.2.4 Conclusion

La dispersion de résultats des critères Ra et Rt est plus élevée pour une orientation de plis à -45° qu'à 45° ce qui est quand même aussi élevée pour une orientation de 45°. Cette dispersion élevée rend difficile d'établir un modèle de régression entre ces critères de rugosité et les conditions de coupe. L'orientation de pli de -45° et 45° influence fortement les critères Ra et Rt de rugosité. L'influence de la vitesse d'avance semble aussi être significative sur les critères de rugosité pour une même orientation d'un pli. Les critères de rugosité d'un pli à -45° sont en moyenne deux fois plus élevé que pour un pli rainuré à 45°. L'influence de la vitesse de coupe et du type de machine-outil sera peut-être confirmée sur les critères de rugosité Ra et Rt avec l'aide d'une analyse de variance au prochain chapitre.

## 3.3 Délamination de surface de stratifiés rainurés

Tous les échantillons de CFRP rainurés sont contrôlés pour trois types de délaminations visuelles :

- Les fibres non coupées (FNC) normales aux plis du stratifié en millimètre (mm), voir aux Figure 3.98 et Figure 3.99;
- Les fibres non coupées (FNC) normales à la surface rainurée en millimètre (mm), voir à la Figure 3.100;
- Les arrachements de matières (ARM) de plis de surface en millimètre (mm), voir à la Figure 3.101.

L'inspection de la délamination se limite à la délamination visible au microscope à vingt agrandissements. Aucune technique plus invasive n'est utilisée comme l'ultrason et autre procédé non destructif. Les trois types de délaminations sont inspectés à l'aide d'un microscope Keyence VHX-500FE du laboratoire de métrologie de l'ÉTS, Figure 3.93. Il est possible d'observer et de mesurer 80 % de la longueur totale d'un échantillon de 2.5 cm à un agrandissement de vingt fois avec le microscope VHX-500FE. Un second microscope, le microscope Keyence VHX 2000 du CTA est capable de mesurer un échantillon entier de CFRP rainuré, Figure 3.94 et Figure 3.95. Les opérations de rainurage OP10P1, OP20P1, OP10P2 et OP20P2 sont inspectées à l'aide du premier microscope VHX-500FE et les opérations OP10P4, OP20P4, OP30P3, OP50P5 et OP50P6 sont inspectées à l'aide du second microscope.

Figure 3.93 Microscope Keyence VHX-500FE
du laboratoire de métrologie de l'ÉTS

Figure 3.94 Microscope Keyence VHX 2000
du laboratoire de composite du CTA

Figure 3.95 Vue normale aux plis d'un échantillon par le microscope VHX 2000

Chaque surface rainurée est inspectée et subdivisée en 6 zones d'observations selon deux facteurs. Un premier facteur comporte le pli supérieur et le pli inférieur du stratifié, Figure 3.96. Le pli inférieur est en contact avec le gabarit d'usinage lors du rainurage. Un second facteur est la séparation en trois zones selon la position de l'outil à chaque rainure, Figure 3.97. La première zone est l'entrée de l'outil en matière et la deuxième zone est centrale lorsque l'outil est considéré en régime permanent dans la matière. La dernière zone est la sortie graduelle de l'outil de la matière observable par une plus grande amplitude dans les signaux de force et une déviation de trajectoire marquée de l'outil sur le robot. Un essai de rainurage mesure 2.5 cm et la zone d'entrée et de sortie mesure environ 7 mm chacune, Figure 3.97.

Figure 3.96 Échantillon CFRP rainuré et installé sur le gabarit d'usinage sur le pli inférieur avec le pli noir supérieur visible

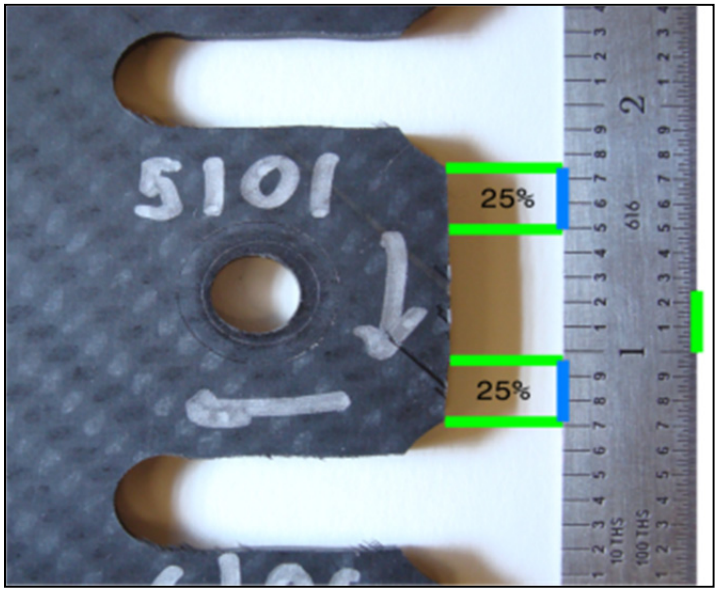



Figure 3.97 Les trois zones : entrée, centrale et sortie par échantillon rainuré

Chaque rainurage comporte plusieurs facteurs pour caractériser la délamination qui sont présentés au Tableau 3.6.

Tableau 3.6 Facteurs observés à chaque rainure pour caractériser la délamination

| Facteurs : | | | |
|---|---|---|---|
| Position du pli de surface | Supérieur | Inférieur | |
| Mode de coupe | Opposition | Avalant | |
| Position de l'outil | Entrée | Centrale | Sortie |
| Type de délamination (mm) | FNC normales aux plis de surface | FNC normales à la surface de coupe | ARM normal à la surface de coupe |

Les fibres non coupées (FNC) normales aux plis de surface sont observées dans une direction normale à la surface de coupe à l'aide d'un microscope, Figure 3.98. Une image d'un microscope à balayage électronique est présentée à la Figure 1.2 (Bérubé, 2012) de ce type de délamination. La longueur des fibres est mesurée à partir du dessus du pli de surface jusqu'à la fin de la fibre en millimètre, Figure 3.99. La valeur moyenne et maximale des mesures de chaque échantillon est calculée et observée.

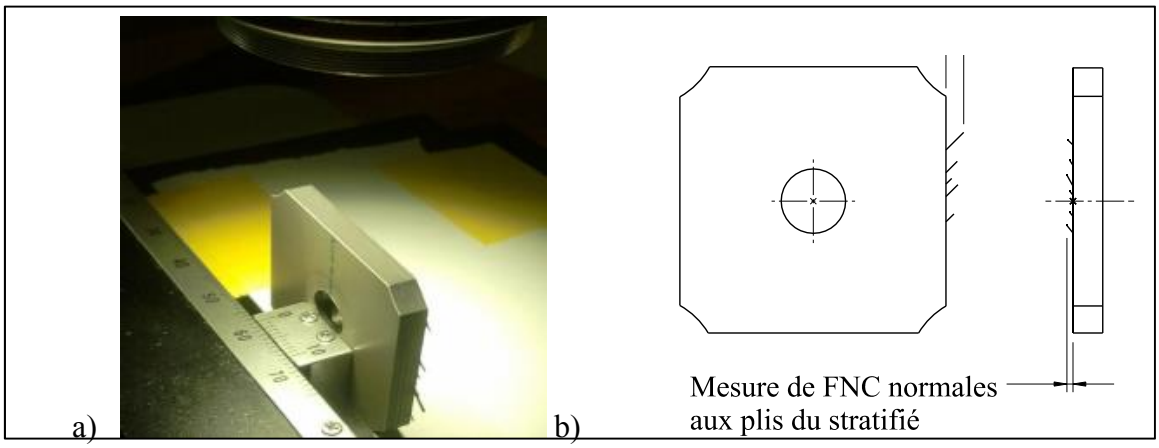



Figure 3.98 Observation de fibres non coupées (FNC) normales aux plis du stratifié,
a) Installation de l'échantillon sous la lentille du microscope
b) Mesure de FNC normales aux plis du stratifié

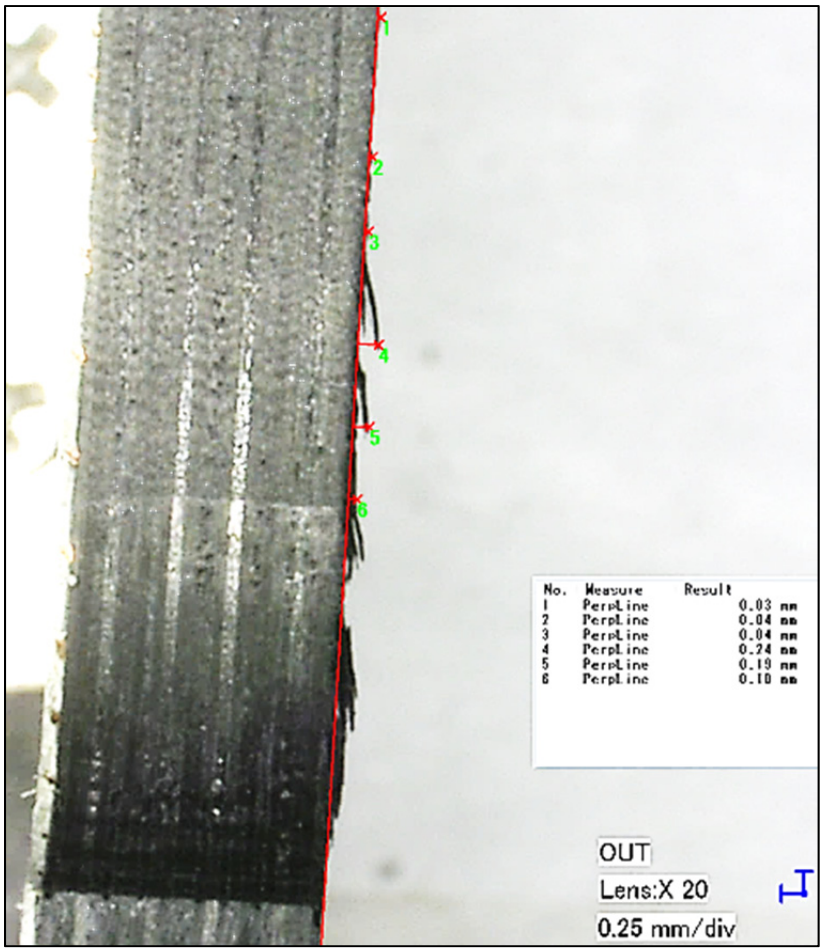



Figure 3.99 Mesure de fibres non coupées (FNC) normales aux plis de surface

Les FNC normales à la surface rainurée sont observées dans une direction normale aux plis du stratifié par le microscope, Figure 3.95 et Figure 3.100. La longueur des fibres est mesurée à partir de la surface détourée jusqu'à la fin de la fibre en millimètre, Figure 3.100. La valeur moyenne et maximale des mesures de chaque échantillon est calculée et observée. Les résultats de mesures de longueur de FNC doivent prendre en considération le fait que les FNC peuvent être facilement altérées par la manipulation des échantillons rainurés après leur démontage du gabarit. L'objectif est de mesurer un maximum de fibres générées par le rainurage avant leur altération complète par manipulation. Les échantillons rainurés sont photographiés par une caméra commerciale telle qu'à la Figure 3.96 pour éviter toute perte d'identification de FNC. Advenant le cas d'une altération complète de FNC avant la mesure

au microscope, les photos post rainurage peuvent confirmer la présence de FNC sans toutefois en déterminer la longueur.

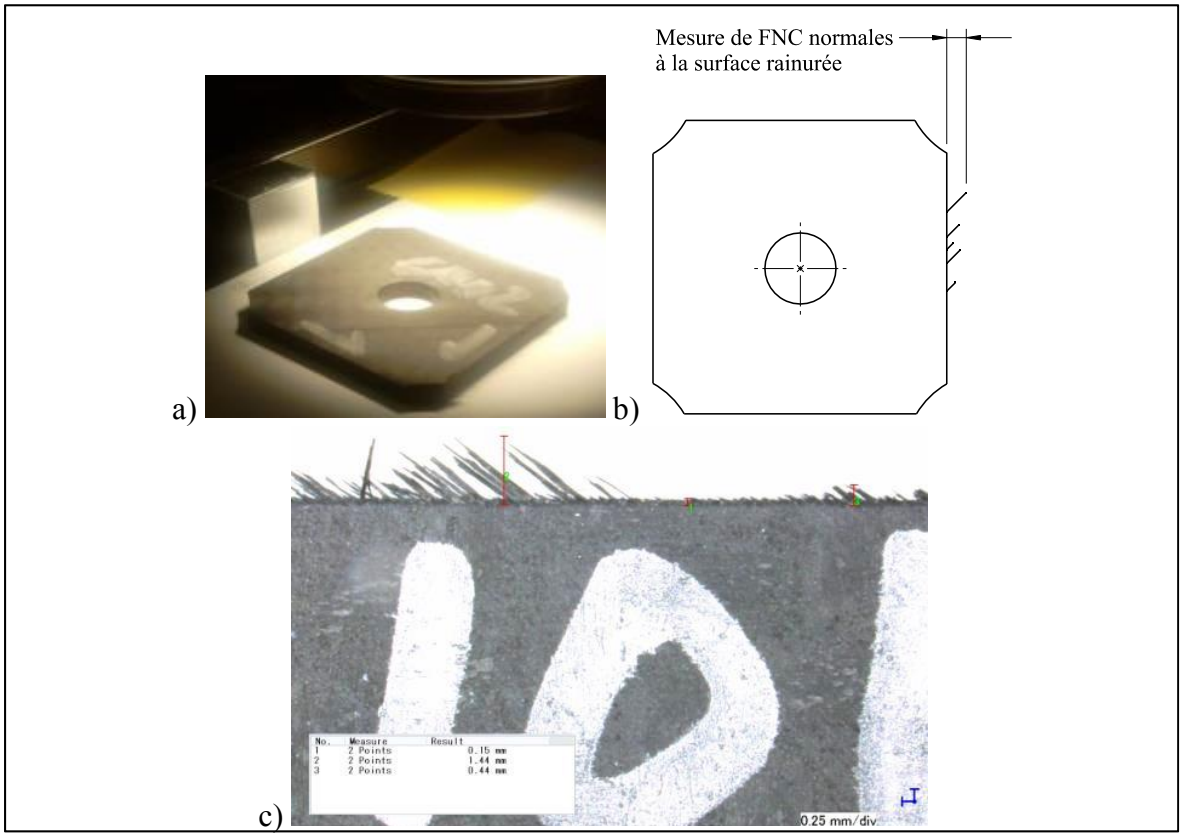



Figure 3.100 Observation de fibres non coupées (FNC) normales à la surface de coupe a) Installation de l'échantillon sous la lentille du microscope b) Mesure de FNC normale à la surface rainurée c) Mesure de FNC normale à la surface rainurée

L'arrachement de matière (ARM) de plis de surface est observé dans une direction normale aux plis du stratifié par un microscope, Figure 3.100 a). La longueur des ARM est mesurée à partir de la surface de coupe jusqu'à la fin de l'arrachement dans la matière, Figure 3.101. La valeur moyenne et maximale des mesures de chaque échantillon est calculée et observée.

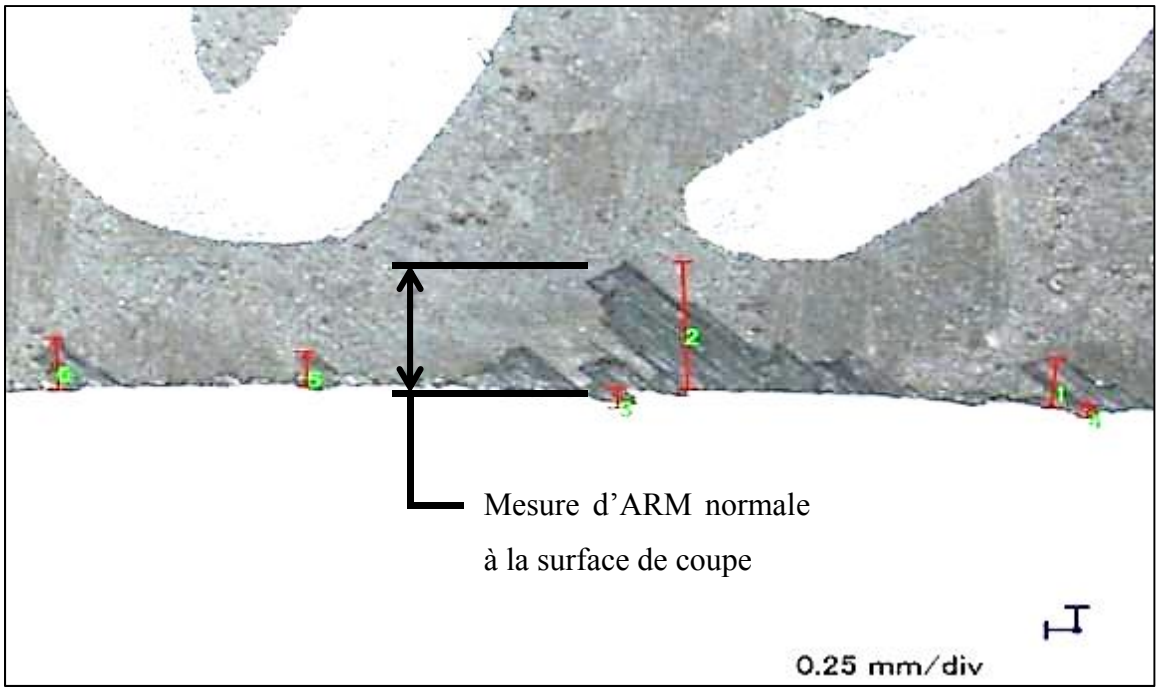



Figure 3.101 Mesure d'arrachement de matière (ARM) normale à la surface de coupe

### 3.3.1 Délaminations de l'opération OP10P1 45° CR10 Y

L'inspection de la première opération de rainurage de la première plaque P1 est effectuée avec un microscope muni d'une lentille à 20 agrandissements. L'objectif est de caractériser la délamination pour :

- une configuration du robot éloigné CR10;
- une orientation du pli de surface à 45° par rapport à la direction de rainurage;
- 6 vitesses de coupe et 7 vitesses d'avance;
- une direction de rainurage Y dans la cellule robotisée.

La plaque P1 est fabriquée par AFP et cuite en autoclave. Le stratifié est le même que l'OP20P1 et de même fabrication que le stratifié P2 et P4. Les 42 conditions de rainurage sont observées.

Pour le pli inférieur, aucun des 3 types de délamination n'est observé. Une très faible occurrence de délamination du pli inférieur supporté par le gabarit a aussi été observée à la suite d'expérimentations du rainurage de stratifié (Bérubé, 2012; Hintze, Hartmann et Schutte, 2011).

Pour le pli supérieur, les 3 types de délamination sont observés sur plusieurs surfaces rainurées. Au centre, la longueur moyenne (LM) et le nombre de mesures (NM) de FNC normale au pli supérieur est affiché aux Figure 3.102 et Figure 3.103 respectivement. Les FNC observées au centre des échantillons s'observent sur toute la longueur de l'échantillon détouré donc en entrée, au centre et en sortie. Le Tableau 3.7 présente quelques exceptions de fibres non coupées (FNC) observées en sortie ou en entrée et non observées au centre. La longueur de fibre de ce type de délamination est moins importante en opposition pour les vitesses d'avance de 0.2032 et 0.5080 mm/rev.

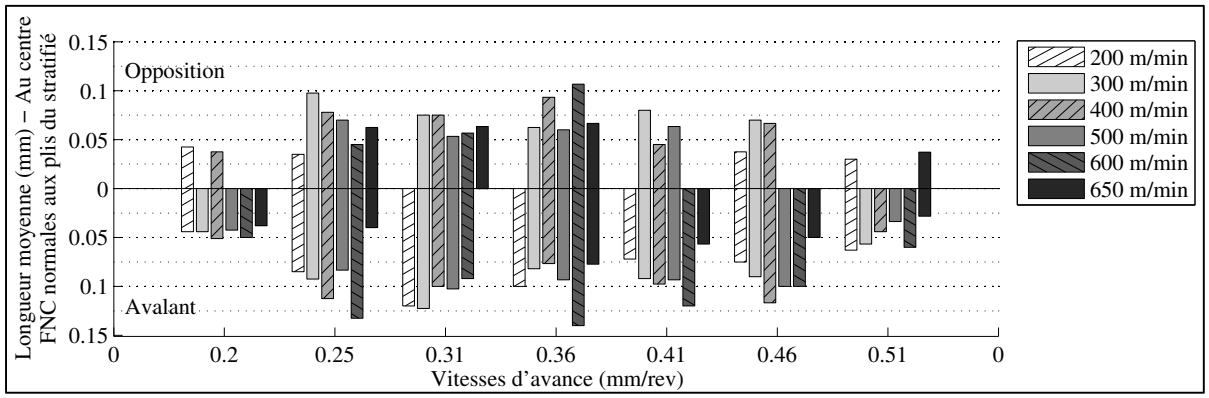



Figure 3.102 LM de FNC normales au pli supérieur au centre, OP10P1 45° CR10 Y

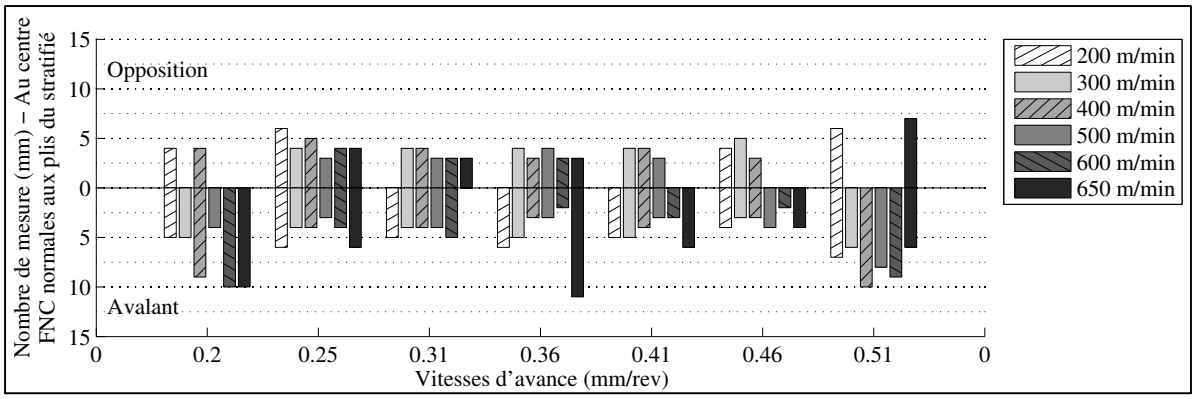



Figure 3.103 NM de FNC normales au pli supérieur au centre, OP10P1 45° CR10 Y

Tableau 3.7 LM de fibres non coupées (FNC) du pli supérieur en entrée et en sortie, OP10P1 45° CR10 Y

| | Mode de coupe | Position de l'outil | NM | LM (mm) | Vc (m/min) | Va (mm/rev) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| FNC normales aux plis | Opposition | Sortie | 6 | 0.11 | 300 | 0.20 |
| | | | 1 | 0.07 | 500 | 0.46 |
| | | | 3 | 0.04 | 600 | 0.46 |
| FNC normales à la surface rainurée | Opposition | Sortie | 1 | 1.39 | 600 | 0.20 |
| | | | 1 | 1.20 | 600 | 0.46 |
| | | Entrée | 1 | 1.39 | 600 | 0.20 |

Au centre, la longueur moyenne (LM) et le nombre de mesures (NM) de FNC normale à la surface rainurée sont présentés aux Figure 3.104 et Figure 3.105 respectivement. Il y a quelques échantillons où les fibres sont plus longues en sortie et en entrée au Tableau 3.7. La grande variation et l'absence de tendance des longueurs moyennes de fibres sont probablement causées par la facilité à être altéré lors de l'inspection sur CMM et lors de la manipulation des échantillons après démontage. Cependant, pour une orientation de plis de surface à 45°, il est possible d'observer que les FNC sont un type de délamination présent et difficile à contrôler pour ces conditions de coupe. En entrée et en sortie, trois cas d'arrachements de matière sont observés, Tableau 3.8.

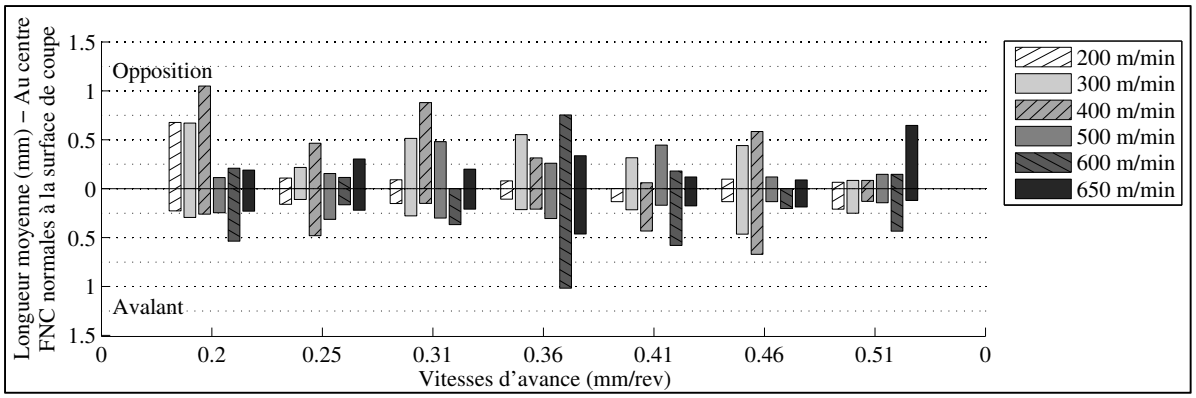



Figure 3.104 LM de FNC normales à la surface rainurée au centre, OP10P1 45° CR10 Y

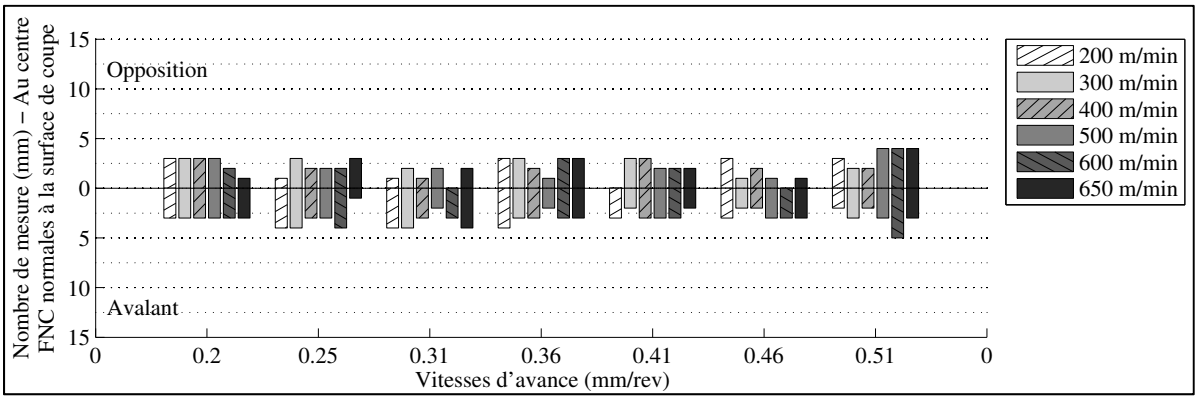



Figure 3.105 NM de FNC normales à la surface rainurée au centre, OP10P1 45° CR10 Y

Tableau 3.8 LM d'ARM du pli supérieur en entrée et sortie, OP10P1 45° CR10 Y

| Mode de coupe | Position de l'outil | NM | LM (mm) | Vc (m/min) | Va (mm/rev) |
|---|---|---|---|---|---|
| Opposition | Sortie | 1 | 0.12 | 600 | 0.51 |
| Avalant | Entrée | 1 | 0.87 | 200 | 0.46 |
| | | 2 | 0.63 | 300 | 0.41 |

La LM de l'ARM est plus importante en avalant qu'en opposition au centre aux Figure 3.106 et Figure 3.107. Il est peu présent en opposition à une vitesse d'avance de 0.20 mm/rev et n'est pas présent à une vitesse de coupe de 200 m/min. La longueur moyenne de l'ARM semble être influencée par la vitesse d'avance en avalant.

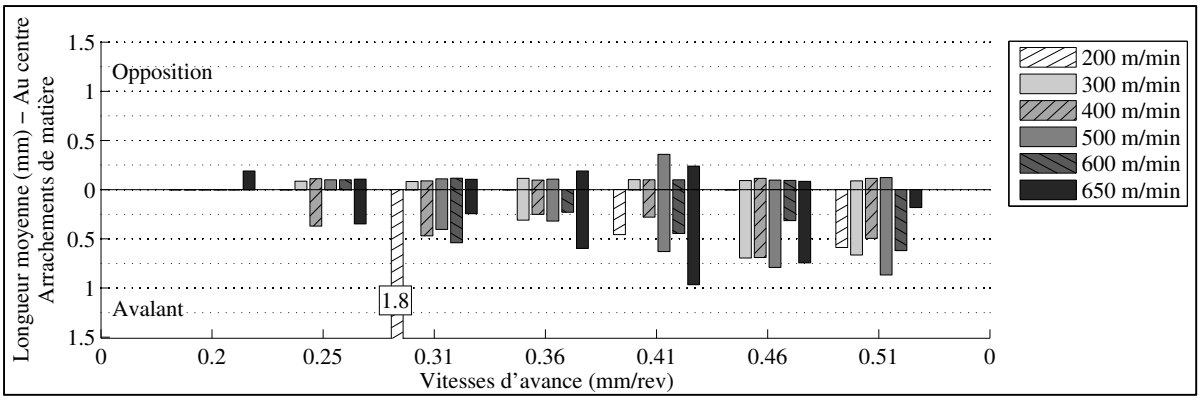



Figure 3.106 LM d'ARM normale à la surface rainurée, OP10P1 45° CR10 Y

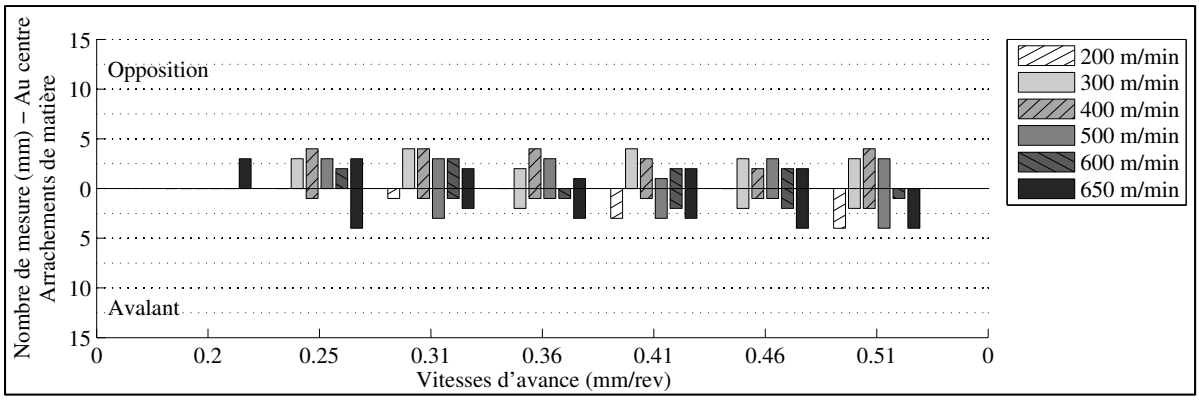



Figure 3.107 NM d'ARM normale à la surface rainurée, OP10P1 45° CR10 Y

#### 3.3.1.1 Conclusion

Aucune délamination n'est observée au pli inférieur. En opposition, une vitesse de 200 m/min et une vitesse d'avance entre 0.25 et 0.41 mm/rev donnent les longueurs de FNC les plus faibles. La longueur moyenne des FNC normales aux plis est de 0.06 mm en opposition et de 0.08 mm en avalant. La longueur moyenne des FNC normales à la surface rainurée est de 0.32 mm en opposition et de 0.28 mm en avalant. Les FNC sont fortement

présentes aux deux modes de coupe et la dispersion des résultats est élevée. Aucun ARM n'est observé à une vitesse de 0.20 mm/rev et une vitesse de coupe inférieure à 650 m/min. La longueur moyenne de l'ARM est de 0.12 mm en opposition et de 0.55 mm en avalant. La vitesse d'avance semble influencer la longueur moyenne d'ARM en avalant à la Figure 3.106. Les fibres non coupées (FNC) sont plus présentes que l'ARM à une vitesse inférieure à 0.31 mm/rev et pour un pli de surface orienté à 45°. Les FNC sont présentes en avalant et en opposition telle qu'observée expérimentalement par Hintze et coll. pour un pli orienté à 45° (Hintze, Hartmann et Schutte, 2011).

### 3.3.2 Délaminations de l'opération OP20P1 -45° CR20 X

L'inspection de la deuxième opération de la première plaque P1 est effectuée avec un microscope muni d'une lentille à 20 agrandissements. L'objectif est de caractériser la délamination pour :

- une configuration du robot rapprochée CR20;
- une orientation de plis de surface à -45° par rapport à la direction de rainurage;
- 6 vitesses de coupe et 7 vitesses d'avance;
- une direction de rainurage Y orthogonale à celle de l'OP10.

La plaque P1 est fabriquée par AFP et cuite en autoclave. L'outil est le même qui a été utilisé lors de l'opération précédente OP10P1. Le stratifié est le même que l'OP10P1 et de même fabrication que le stratifié P2 et P4. Les 42 conditions de rainurage sont observées.
Pour le pli inférieur en sortie et en avalant, deux mesures d'ARM et une mesure de FNC normales au pli inférieur sont observées à des vitesses élevées au Tableau 3.9. Au pli supérieur, aucune FNC normale à la surface rainurée n'est observée. La longueur moyenne (LM) de FNC normales au pli supérieur est présentée au Tableau 3.10.

Tableau 3.9 LM de délamination au pli inférieur, OP20P1 -45° CR20 X

| | Mode de coupe | Position de l'outil | NM | LM (mm) | Vc (m/min) | Va (mm/rev) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| FNC normales aux plis | Avalant | Sortie | 1 | 0.15 | 500 | 0.41 |
| ARM | Avalant | Sortie | 1 | 0.30 | 500 | 0.46 |
| | | | 1 | 1.52 | 600 | 0.46 |

Tableau 3.10 LM de FNC normales au pli supérieur, OP20P1 -45° CR20 X

| | Mode de coupe | Position de l'outil | NM | LM (mm) | Vc (m/min) | Va (mm/rev) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| FNC normales au pli supérieur | Opposition | Sortie | 1 | 0.05 | 600 | 0.36 |
| | Avalant | Entrée | 3 | 0.10 | 300 | 0.41 |
| | | | 2 | 0.08 | 600 | 0.46 |
| | | | 1 | 0.05 | 600 | 0.51 |
| | | | 1 | 0.10 | 650 | 0.46 |
| | | Centre | 3 | 0.06 | 600 | 0.41 |
| | | | 1 | 0.04 | 600 | 0.51 |
| | | Sortie | 1 | 0.04 | 600 | 0.51 |
| | | | 2 | 0.05 | 650 | 0.41 |

Les FNC normales aux plis de surface sont observées à des vitesses d'avance supérieures à 0.30 mm/rev et à des vitesses de coupe supérieures à 500 m/min à l'exception d'un cas de 300 m/min. La majorité des FNC sont observées en avalant et aux extrémités des échantillons.

En entrée et en avalant, une mesure d'ARM est observée de 0.64 mm à 400 m/min et 0.31 mm/rev. Au centre et en opposition, aucun ARM n'est observé à une vitesse d'avance inférieure à 0.31 mm/rev à l'exception d'un cas à 650 m/min aux Figure 3.108 et Figure

3.107. Même observation au centre et en avalant à une vitesse d'avance inférieure à 0.41 mm/rev sauf exception d'un cas à 300m/min. Au centre, la longueur moyenne (LM) de l'ARM est de 0.50 mm en opposition et de 0.53 mm en avalant. En sortie, la longueur moyenne élevée en avalant et le nombre de mesures d'ARM sont présentés aux Figure 3.110 et Figure 3.111 respectivement. La Figure 3.112 montre un exemple d'un arrachement de matière en sortie et en avalant de fortes dimensions suite à une déviation de l'outil en sortie de matière.

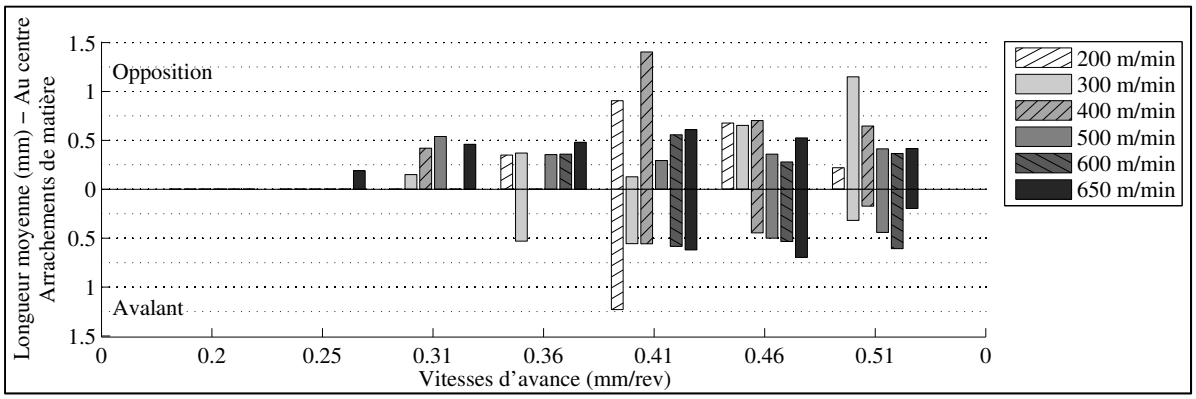



Figure 3.108 LM d'ARM du pli supérieur au centre, OP20P1 -45° CR20 X

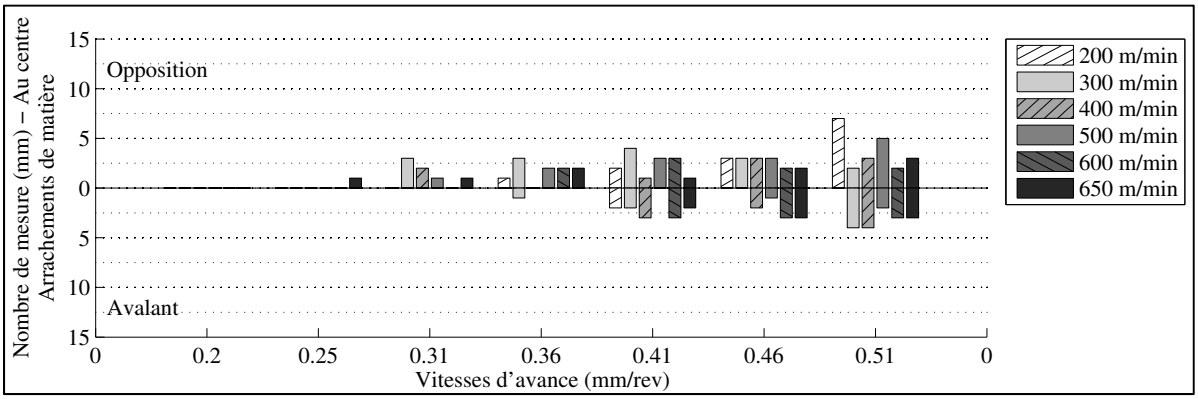



Figure 3.109 NM d'ARM du pli supérieur au centre, OP20P1 -45° CR20 X

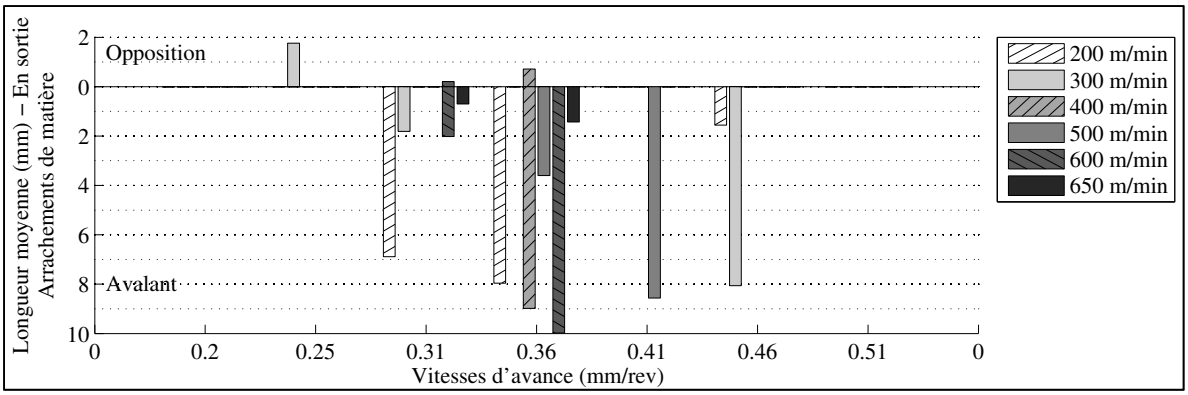



Figure 3.110 LM d'ARM du pli supérieur en sortie, OP20P1 -45° CR20 X

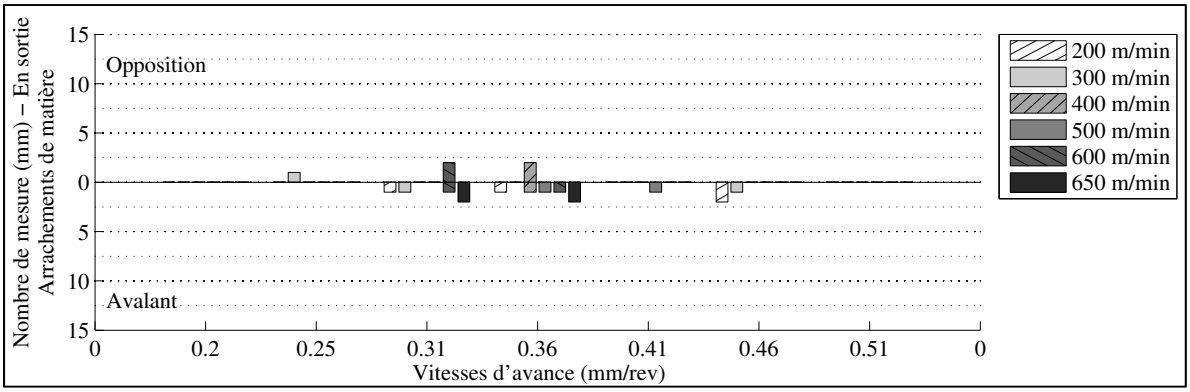



Figure 3.111 NM d'ARM du pli supérieur en sortie, OP20P1 -45° CR20 X

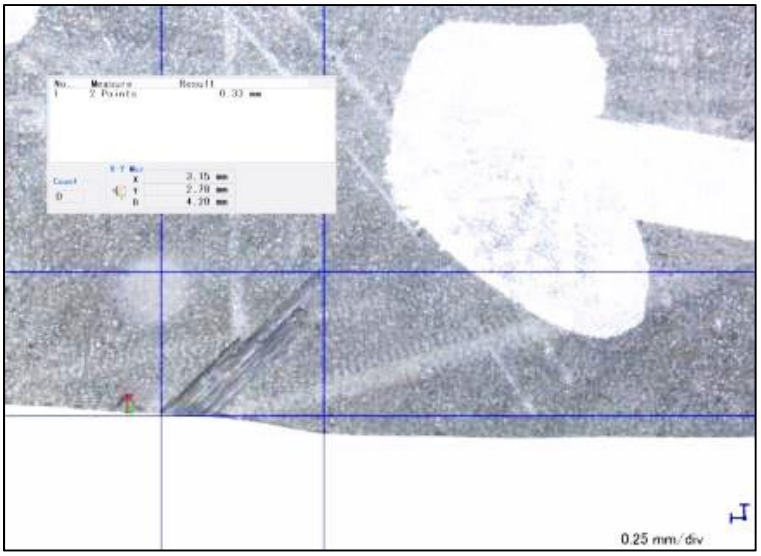



Figure 3.112 Arrachement de matière (ARM) en avalant et en sortie à 0.46 mm/rev et 200 m/min, OP20P1 -45° CR20 X

#### 3.3.2.1 Conclusion

Au pli inférieur, la délamination est observée en sortie sur trois échantillons. Au centre, des FNC normales aux plis sont observées en avalant à 0.41 et 0.51 mm/rev pour 600 m/min. Aucune FNC n'est observée à une vitesse inférieure à 0.36 mm/rev et aux vitesses de 200 et 400 m/min. Au centre, la longueur moyenne (LM) de l'ARM est de 0.50 mm en opposition et de 0.53 mm en avalant. Au centre, l'ARM est présente à partir de 0.25 mm/rev en opposition et de 0.36 mm/rev en avalant. Au centre, l'ARM est plus présente en opposition qu'en avalant ce qui se rapproche des observations de délamination de surface de Hintze et coll. pour une orientation de plis de -45°. En sortie et en avalant, il y a plusieurs cas d'ARM de grandes dimensions tels qu'illustrés à la Figure 3.112. Ces ARM sont observés à la suite d'une déviation de l'outil lors de son dégagement partiel en sortie de matière. Lors du dégagement partiel de l'outil, les efforts de coupe varient rapidement et des vibrations sont présentes en sortie (Zaghbani et al., 2012b). La délamination la plus faible est observée à 0.20 et 0.25 mm/rev et une vitesse inférieure à 650 m/min.

Les FNC sont très peu présentes à cette opération dont l'orientation du pli de surface est de -45°. À l'inverse, elles sont fortement présentes à l'opération précédente l'OP10P1 45° CR10 Y dont l'orientation du pli de surface est de 45°. L'occurrence de FNC est importante autant en opposition qu'en avalant lors de rainurages selon les observations de Hintze et coll. pour une orientation du pli de surface de 45°. Au centre et en opposition, la longueur moyenne de l'ARM est plus importante pour un pli de surface à -45° de l'OP20P1 CR20 X que pour un pli de surface à 45° de l'OP10P1 CR10 Y. L'ARM en opposition pour le pli orienté à -45° rappelle les observations de propagation de la délamination de surface de Hintze et coll. La vitesse d'avance semble influencer l'ARM au centre des échantillons à l'exception d'en opposition pour un pli de surface de 45° à l'OP10P1.

### 3.3.3 Délaminations de l'opération OP10P2 -45° sur centre d'usinage

L'inspection de la première opération de la plaque P2 détourée dans un centre d'usinage est effectuée avec un microscope muni d'une lentille à 20 agrandissements. L'objectif est de caractériser la délamination pour :

- une orientation du pli de surface à -45° par rapport à la direction de rainurage;
- 6 vitesses de coupe et 7 vitesses d'avance;
- un centre d'usinage numérique.

Le stratifié fabriqué par AFP et cuit en autoclave est d'une même fabrication que le stratifié P1 et P4 des opérations robotisées. Cette opération est rainurée avec un outil PCD neuf. La délamination de surface des 42 conditions de rainurage est observée.
Pour le pli inférieur en sortie et en avalant, un cas d'ARM et deux cas de FNC normales aux plis sont observés au Tableau 3.11 et à la Figure 3.113. À la même position en sortie et en avalant, de longues FNC normales à la surface rainurée et de longs ARM sont aussi observés au pli supérieur pour les conditions de coupe présentées à la Figure 3.113.

Tableau 3.11 LM de délamination du pli inférieur, OP10P2 -45°

| | Mode de coupe | Position de l'outil | NM | LM (mm) | Vc (m/min) | Va (mm/rev) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| FNC normales aux plis | Avalant | Sortie | 1 | 0.16 | 650 | 0.36 |
| | | | 7 | 0.22 | 650 | 0.46 |
| ARM | Avalant | Sortie | 1 | 0.87 | 650 | 0.46 |

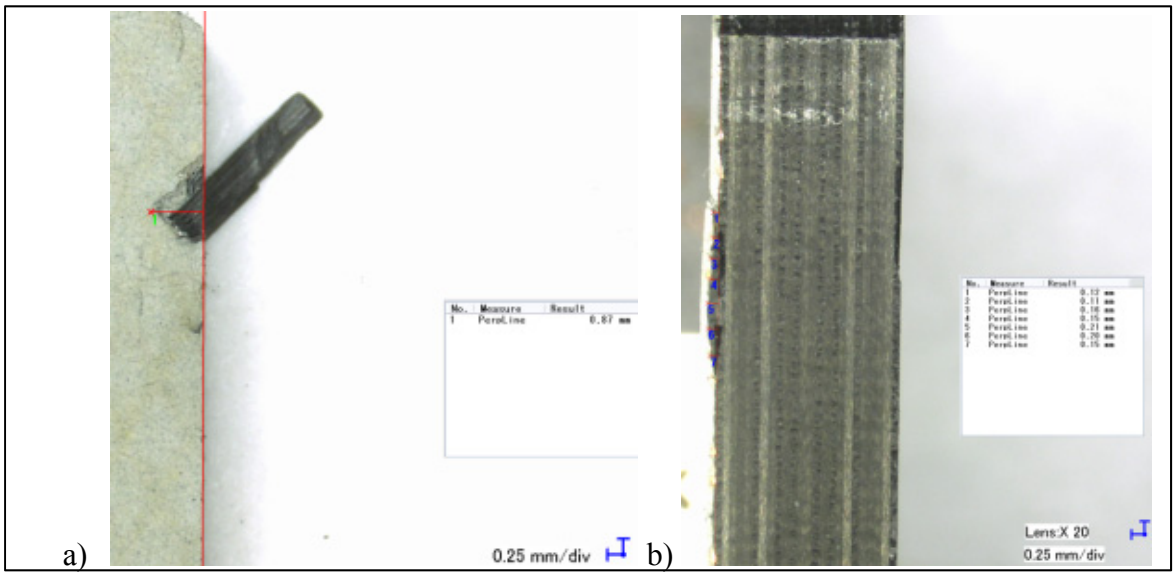



Figure 3.113 Délamination en sortie du pli inférieur de l'OP10P2 -45°
a) ARM à 650 m/min et 0.46 mm/rev
b) FNC normales au pli inférieur à 650 m/min et 0.36 mm/rev

Pour le pli supérieur, le Tableau 3.12 présente la longueur moyenne de FNC et la longueur moyenne d'ARM en entrée. Au centre, peu de FNC sont observées pour une orientation de pli à -45° tel que les résultats du rainurage robotisé OP20P1 dont le pli de surface est aussi à -45°.

Tableau 3.12 LM de délamination du pli supérieur, OP10P2 -45°

| | Mode de coupe | Position de l'outil | NM | LM (mm) | Vc (m/min) | Va (mm/rev) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| FNC normales au pli supérieur | Opposition | Centre | 3 | 0.06 | 400 | 0.36 |
| | | | 1 | 0.07 | 500 | 0.46 |
| | | | 2 | 0.06 | 650 | 0.46 |
| | Avalant | Sortie | 1 | 0.15 | 600 | 0.41 |
| FNC normales à la surface rainurée | Opposition | Sortie | 1 | 2.38 | 200 | 0.51 |
| | | | 1 | 1.64 | 500 | 0.51 |
| | | Entrée | 1 | 2.39 | 650 | 0.51 |
| | Avalant | Sortie | 1 | 2.84 | 300 | 0.30 |
| | | | 1 | 3.43 | 300 | 0.41 |
| | | | 1 | 2.22 | 650 | 0.25 |
| | | | 1 | 2.50 | 650 | 0.36 |
| | | | 1 | 2.04 | 650 | 0.46 |
| ARM | Opposition | Entrée | 4 | 0.10 | 200 | 0.30 |
| | | | 3 | 0.19 | 300 | 0.20 |
| | | | 4 | 1.40 | 650 | 0.51 |
| | Avalant | Entrée | 4 | 0.12 | 300 | 0.36 |

Au centre, la longueur moyenne et le nombre de mesures (NM) d'ARM sont présentés aux Figure 3.114 et Figure 3.115 respectivement. En entrée et au centre, la presque totalité de FNC et d'ARM est observée en opposition ce qui rejoint les observations expérimentales de Hintze et coll. pour une orientation du pli de surface à -45°. Au centre et en opposition, la longueur moyenne d'ARM semble être influencée par la vitesse d'avance à la Figure 3.114.

En sortie, la longueur moyenne et le nombre de mesures (NM) d'ARM sont présentés aux Figure 3.116 et Figure 3.117 respectivement. En sortie, il y a plusieurs très longs ARM

observés à des vitesses de coupe supérieures à 300 m/min et il y a aussi quelques courts ARM à des vitesses de coupe et d'avance plus basses.

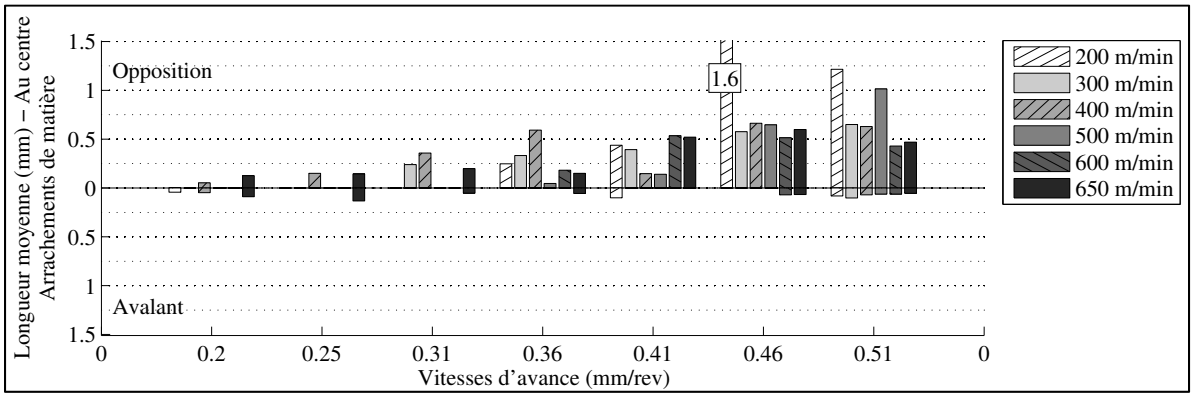



Figure 3.114 LM d'ARM du pli supérieur au centre de l'OP10P2 -45°

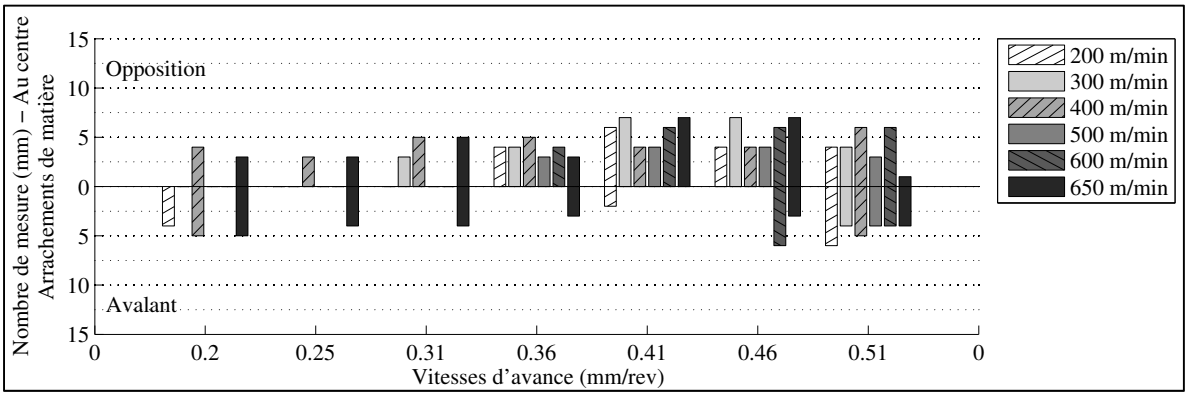



Figure 3.115 NM d'ARM du pli supérieur au centre de l'OP10P2 -45°

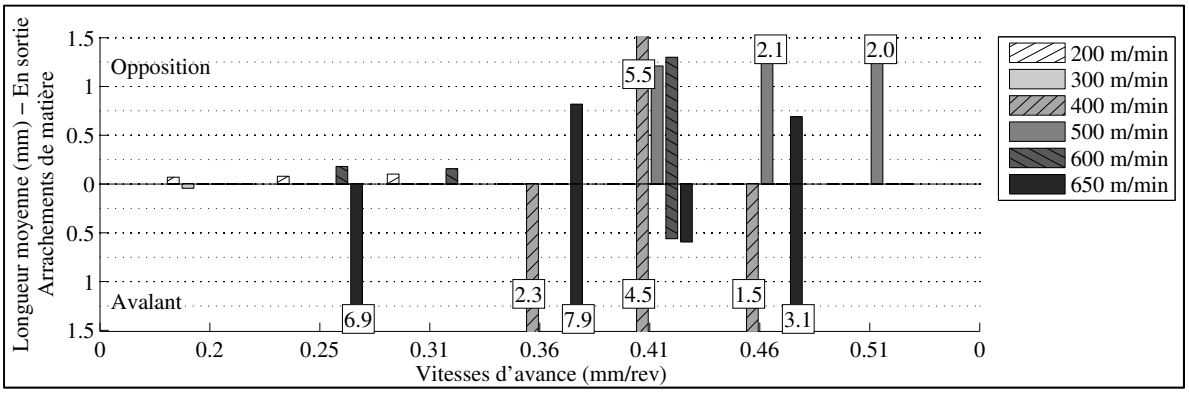



Figure 3.116 LM d'ARM du pli supérieur en sortie de l'OP10P2 -45°

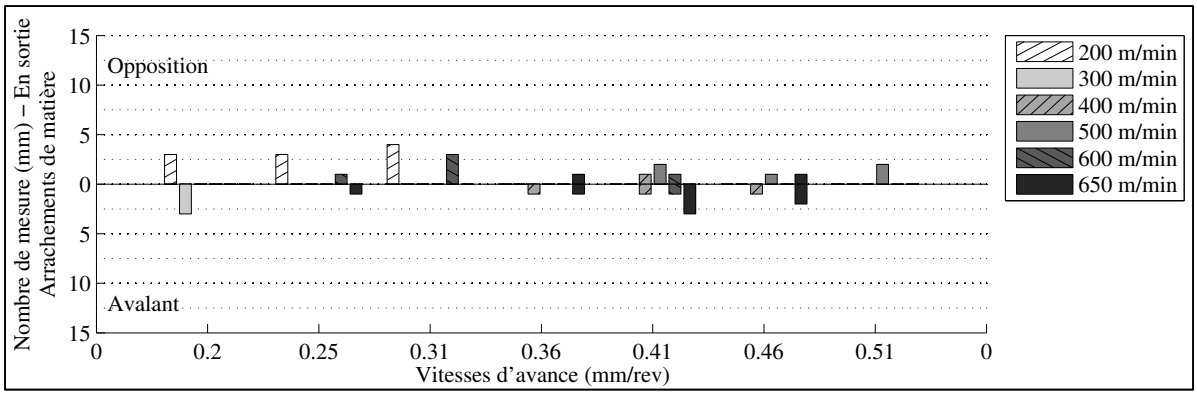



Figure 3.117 NM d'ARM du pli supérieur en sortie de l'OP10P2 -45°

#### 3.3.3.1 Conclusion

Au pli inférieur, la délamination est observée en sortie sur trois échantillons. La majorité des FNC et des ARM observés en entrée et au centre sont en opposition et la majorité de ceux observés en sortie sont en avalant et plus longues. Au centre, les FNC et les ARM sont plus importants en opposition qu'en avalant et rejoignent les résultats de rainurage de Hintze et coll. pour une orientation du pli de surface à -45°. L'ARM au centre et en avalant est plus présent à l'opération robotisée OP20P1 -45° CR20 X à partir de 0.41 mm/rev et lors de cette opération à partir de 0.51 mm/rev. Au centre, la LM de l'ARM est de 0.45 mm en opposition et de 0.07 mm en avalant. La LM de l'ARM est semblable à celle de l'OP20P1 -45° CR20 X en opposition et largement inférieure à celle de l'OP20P1 -45° CR20 X en avalant. Au centre, la faible présence d'ARM en avalant sur centre d'usinage est près des résultats de Hintze et coll. pour un pli de surface à -45°. Au centre et en opposition, l'occurrence d'ARM semble être influencée par la vitesse d'avance et aucune délamination n'est observée aux vitesses de 0.20 et 0.25 mm/rev pour une vitesse inférieure de 400 m/min.

### 3.3.4 Délaminations de l'opération OP20P2 45° sur centre d'usinage

L'inspection de la deuxième opération sur la plaque P2 détourée avec un centre d'usinage numérique est effectuée avec un microscope muni d'une lentille à 20 agrandissements. L'objectif est de caractériser la délamination pour :

- une orientation du pli de surface de 45° par rapport direction de rainurage;
- 6 vitesses de coupe et 7 vitesses d'avance;
- un centre d'usinage numérique.

Le stratifié fabriqué par AFP et cuit en autoclave est le même que celui de l'OP10P2 et d'une même fabrication que le stratifié P1 et P4 des opérations robotisées. Cette opération est rainurée avec l'outil PCD ayant servi à rainurer l'OP10P2. La délamination de surface des 42 conditions de rainurage est observée. Pour le pli inférieur, aucune délamination n'est observée. En avalant, les FNC sont présentées au Tableau 3.13 pour des vitesses supérieures à 200 m/min et à 0.25 mm/rev. Au centre et en sortie, les FNC normales aux plis de surface sont présentes en avalant pour une vitesse d'avance supérieure à 0.20 mm/rev aux Figure 3.118 à Figure 3.121. Au centre, les FNC normales à la surface de coupe sont présentes en avalant et leur longueur moyenne augmente à partir de 0.41 mm/rev aux Figure 3.122 et Figure 3.123. L'ARM est observé pour une vitesse supérieure à 0.31 mm/rev au Tableau 3.14 et aux Figure 3.124 et Figure 3.125.

Tableau 3.13 LM de FNC du pli supérieur, OP20P2 45°

| | Mode de coupe | Position de l'outil | NM | LM (mm) | Vc (m/min) | Va (mm/rev) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| FNC normales aux plis | Avalant | Entrée | 4 | 0.18 | 300 | 0.41 |
| | | | 1 | 0.18 | 400 | 0.46 |
| | | | 5 | 0.05 | 650 | 0.36 |
| FNC normales à la surface rainurée | Avalant | Entrée | 4 | 0.67 | 300 | 0.41 |
| | | | 1 | 0.66 | 400 | 0.46 |
| | | | 2 | 1.70 | 500 | 0.30 |
| | | | 2 | 0.68 | 500 | 0.46 |
| | | Sortie | 2 | 1.13 | 300 | 0.30 |
| | | | 3 | 0.17 | 300 | 0.36 |
| | | | 3 | 0.18 | 400 | 0.46 |
| | | | 3 | 0.36 | 500 | 0.46 |
| | | | 4 | 0.70 | 650 | 0.30 |
| | | | 3 | 1.81 | 650 | 0.46 |

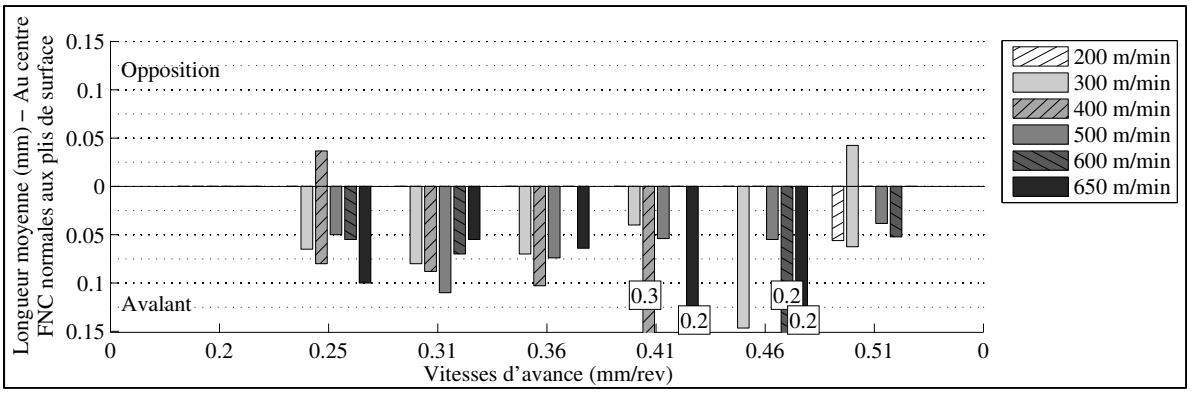



Figure 3.118 LM de FNC normales au pli supérieur au centre, OP20P2 45°

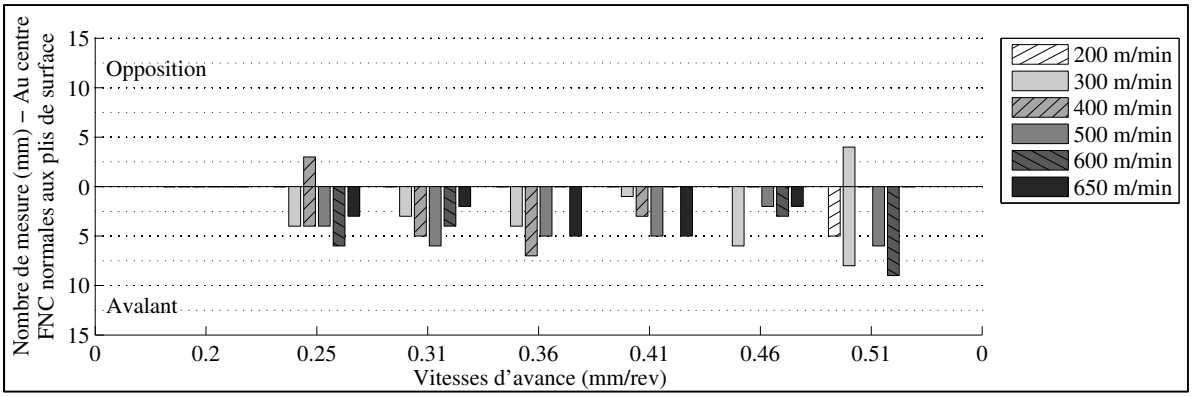



Figure 3.119 NM de FNC normales au pli supérieur au centre, OP20P2 45°

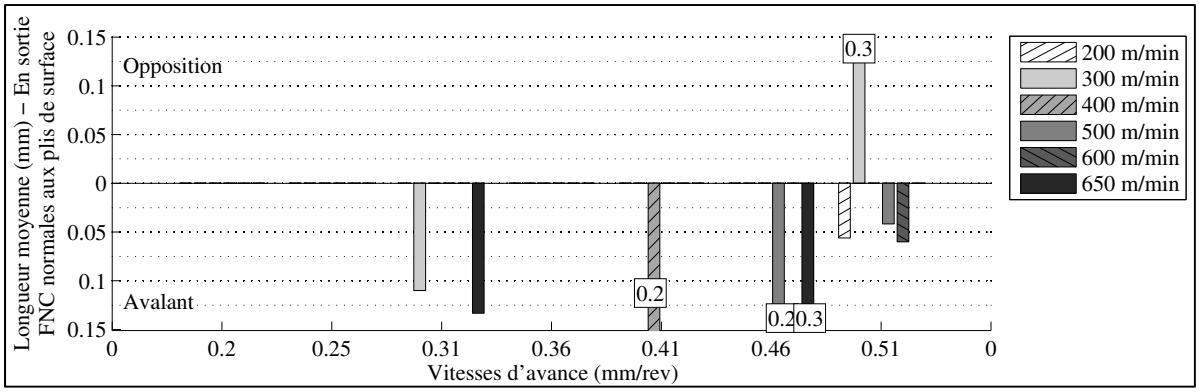



Figure 3.120 LM de FNC normales au pli supérieur en sortie, OP20P2 45°

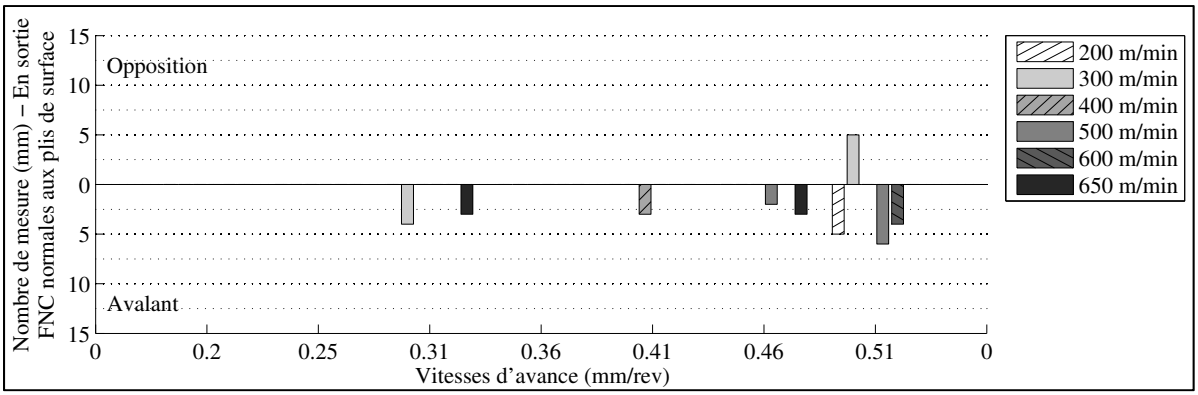



Figure 3.121 NM de FNC normales au pli supérieur en sortie, OP20P2 45°

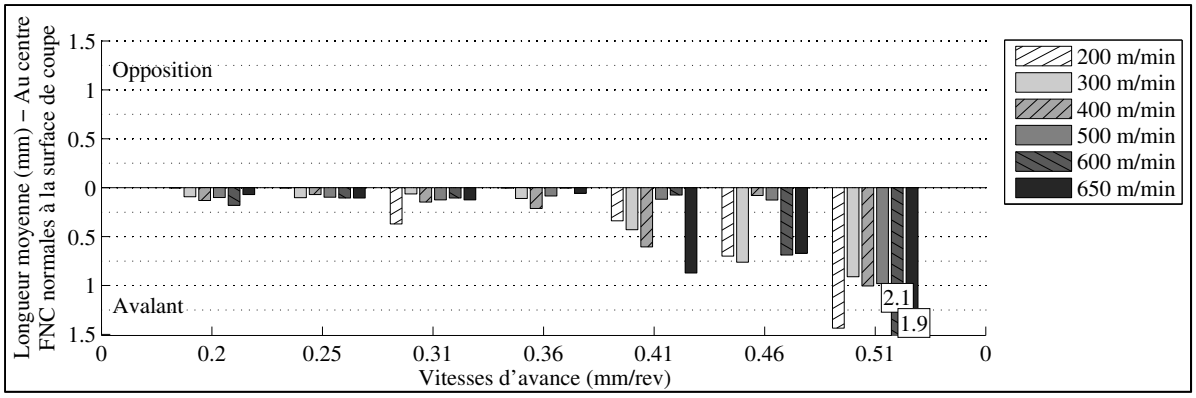



Figure 3.122 LM de FNC normales à la surface rainurée au centre, OP20P2 45°

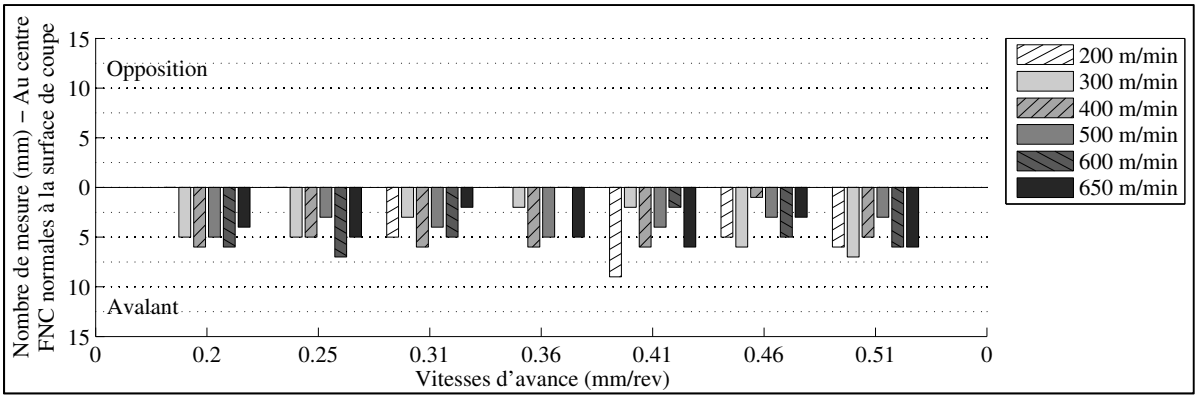



Figure 3.123 NM de FNC normales à la surface rainurée au centre, OP20P2 45°

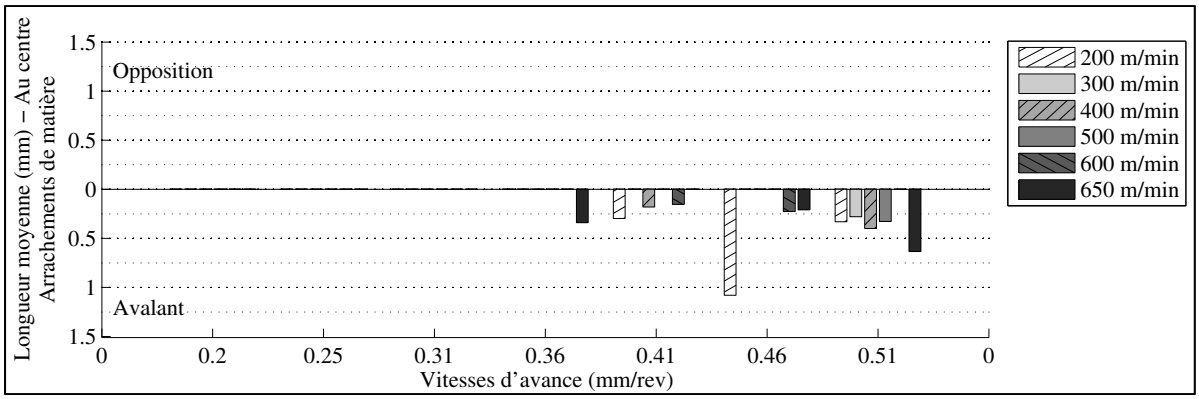



Figure 3.124 LM d'ARM normaux à la surface rainurée au centre, OP20P2 45°

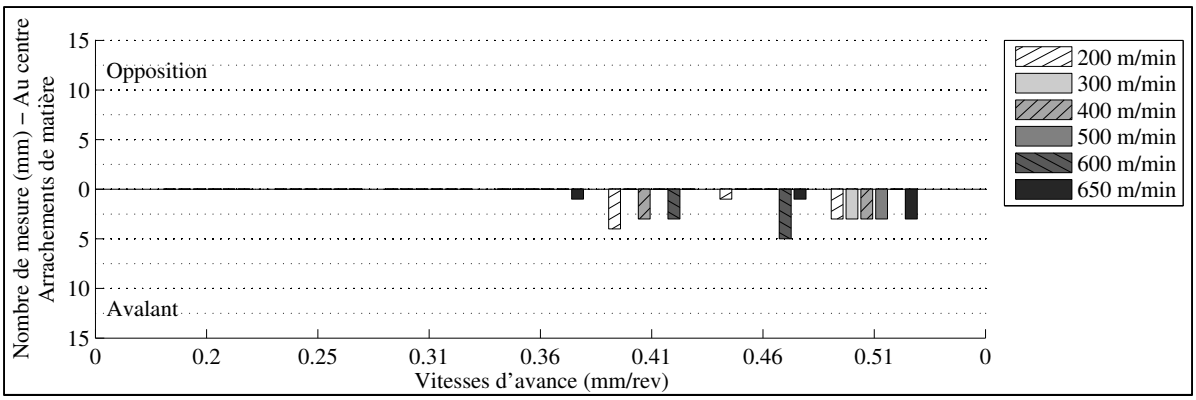



Figure 3.125 NM d'ARM normaux à la surface rainurée au centre, OP20P2 45°

Tableau 3.14 LM d'ARM en entrée et en sortie du pli supérieur, OP20P2 45°

| Mode de coupe | Position de l'outil | NM | LM (mm) | Vc (m/min) | Va (mm/rev) |
|---|---|---|---|---|---|
| Avalant | Entrée | 3 | 0.17 | 200 | 0.36 |
| | | 1 | 0.36 | 300 | 0.41 |
| | | 2 | 0.93 | 400 | 0.46 |
| | | 1 | 0.71 | 500 | 0.46 |
| | | 3 | 0.15 | 600 | 0.36 |
| | Sortie | 3 | 0.42 | 400 | 0.46 |
| | | 3 | 0.43 | 500 | 0.46 |
| | | 1 | 0.41 | 650 | 0.30 |
| | | 2 | 0.23 | 650 | 0.46 |

#### 3.3.4.1 Conclusion

Au pli inférieur, aucune délamination n'est observée. Des FNC normales aux plis sont observées seulement en opposition à 300 m/min et 0.51 mm/rev et à 400 et 0.25 mm/rev. En avalant, il n'y a pas de FNC normales aux plis à 0.20 mm/rev et la longueur moyenne est de 0.10 mm. Au centre, la LM des FNC est de 0.12 mm pour une vitesse de 0.20 à 0.36 mm/rev et est de 0.76 mm pour une vitesse supérieure à 0.41 mm/rev. L'ARM est présent en avalant à partir de 0.36 mm/rev. Il y a beaucoup plus de FNC que d'ARM ce qui est aussi observé pour les opérations précédentes avec un pli de surface à 45°. Cependant, la quasi-absence de FNC en opposition contraste avec les résultats de l'opération robotisée OP10P1 45° CR10 Y et ceux de Hintze et coll. pour un pli de surface à 45°. Au centre et en opposition l'ARM est de faible dimension à l'OP10P1 45° CR10 Y se rapprochant de l'absence de l'ARM observée pour cette opération. Toutefois, au centre et en avalant l'ARM de l'OP10P1 45° reste largement plus important en nombre et en dimension qu'à la présente opération.

### 3.3.5 Délaminations de l'opération OP10P4 45° CR10 Y

L'inspection de la première opération sur la plaque P4 est effectuée avec un microscope muni d'une lentille de 20 agrandissements. L'objectif est de caractériser la délamination de surface pour :

- une configuration du robot éloignée CR10;
- une orientation du pli de surface de 45° par rapport à la direction de rainurage;
- 6 vitesses de coupe et 7 vitesses d'avance;
- une direction de rainurage Y dans la cellule robotisée.

La plaque P4 est fabriquée par AFP et cuite en autoclave. Le stratifié est le même que l'OP20P4 et de même fabrication que le stratifié P1 et P2. Ce stratifié comporte 24 plis aux vitesses d'avance de 0.20 et 0.25 mm/rev et 20 plis aux autres vitesses d'avance. Les 42 conditions de rainurage sont observées. Aucune délamination n'est observée au pli inférieur.

Quatre essais présentent des fibres non coupées (FNC) en opposition au pli supérieur à une vitesse supérieure à 0.31 mm/rev. En avalant, les FNC normales aux plis sont plus présentes à partir de 0.25 mm/rev aux Figure 3.126 à Figure 3.131 et d'une longueur moyenne de 0.05 mm. La quasi-absence de FNC en opposition est semblable aux résultats de FNC de l'OP20P2 45° sur centre d'usinage et opposée aux résultats de la première opération robotisée OP10P1 45° Y.

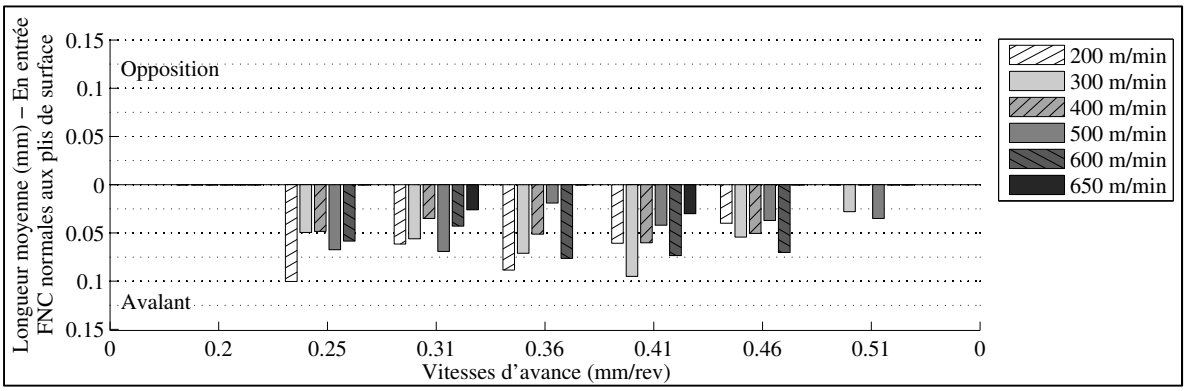



Figure 3.126 LM de FNC normales au pli supérieur en entrée, OP10P4 45° CR10 Y

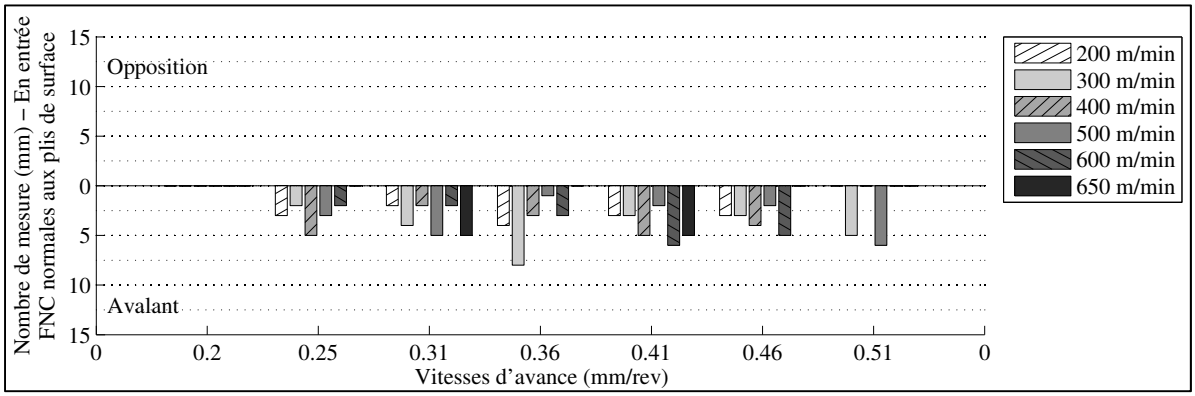



Figure 3.127 NM de FNC normales au pli supérieur en entrée, OP10P4 45° CR10 Y

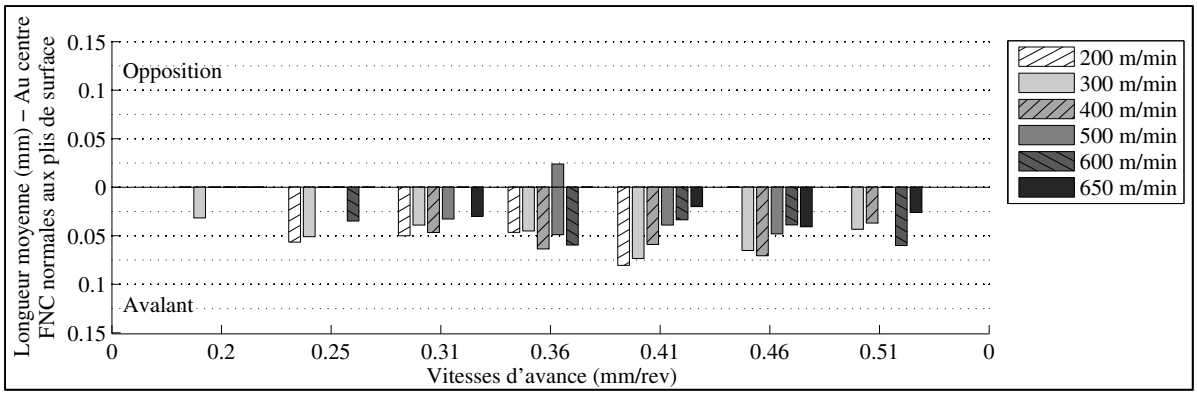



Figure 3.128 LM de FNC normales au pli supérieur au centre, OP10P4 45° CR10 Y

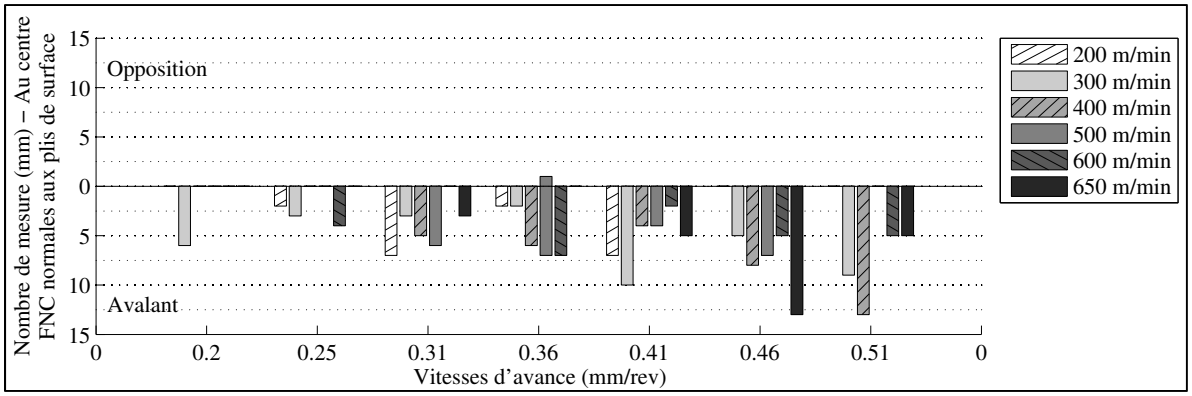



Figure 3.129 NM de FNC normales au pli supérieur au centre, OP10P4 45° CR10 Y

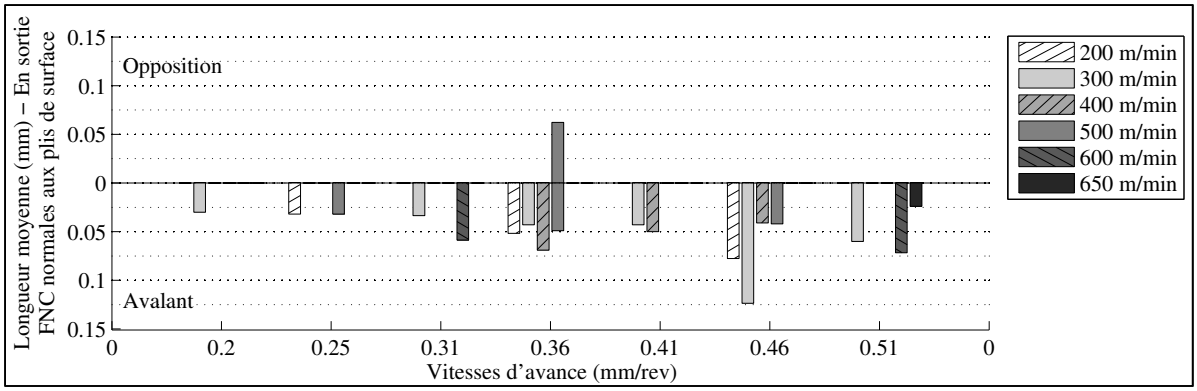



Figure 3.130 LM de FNC normales au pli supérieur en sortie, OP10P4 45° CR10 Y

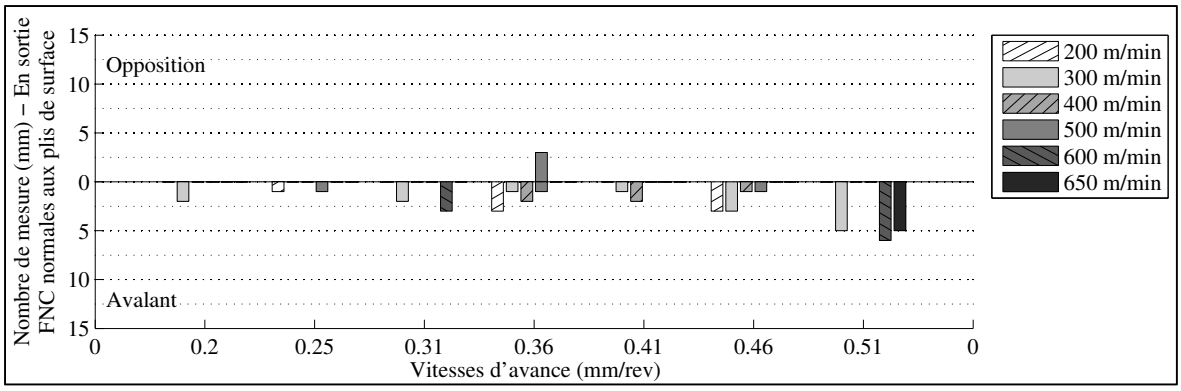



Figure 3.131 NM de FNC normales au pli supérieur en sortie, OP10P4 45° CR10 Y

En avalant, la longueur moyenne des FNC normales à la surface de coupe est de 0.14 mm aux Figure 3.132 à Figure 3.137. Au centre et en avalant, la LM des FNC normales à la surface rainurée est de 0.11 mm. La quasi-absence de FNC en opposition contraste avec les résultats de la première opération de rainurage OP10P1 45° CR10 Y et ressemble à l'OP20P2 45° sur centre d'usinage. La faible longueur moyenne de FNC en avalant ressemble aussi aux résultats de l'OP20P2 45° sur centre d'usinage pour une vitesse inférieure à 0.41 mm/rev.

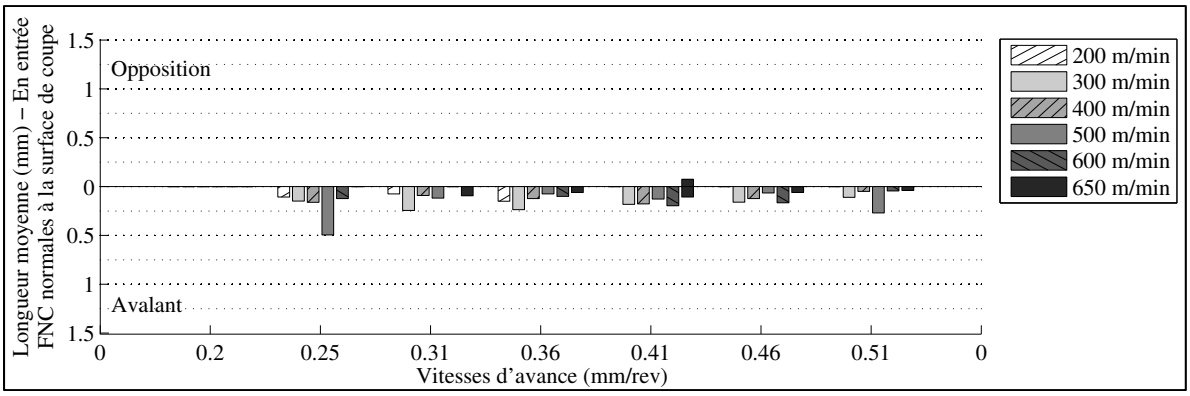



Figure 3.132 LM de FNC normales à la surface rainurée en entrée, OP10P4 45° CR10 Y

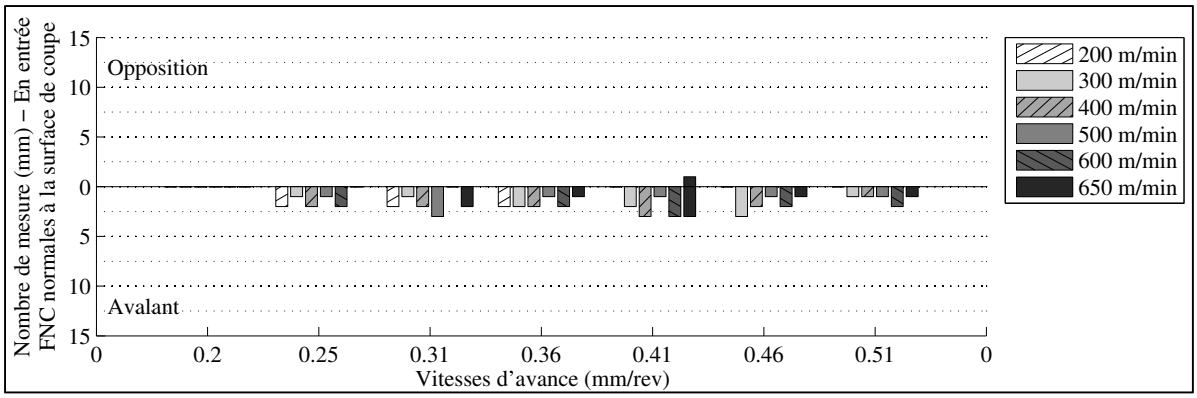



Figure 3.133 NM de FNC normales à la surface rainurée en entrée, OP10P4 45° CR10 Y

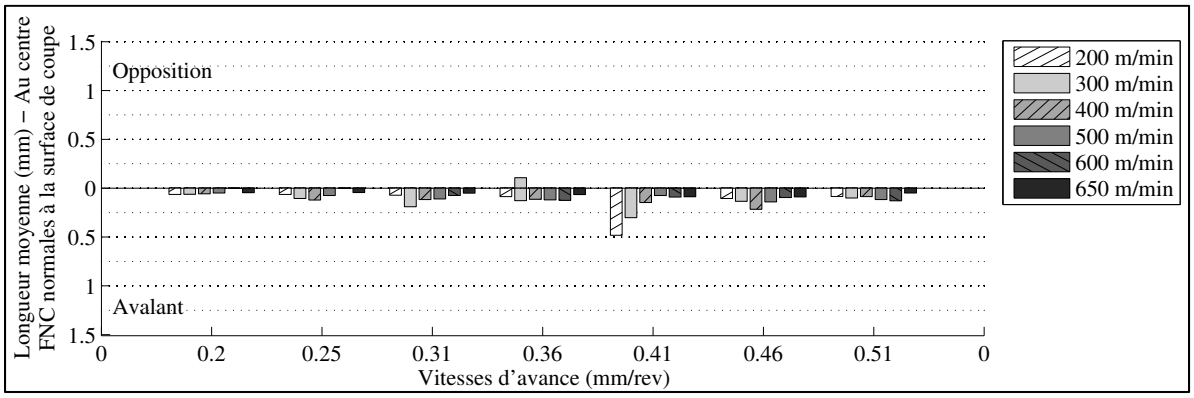



Figure 3.134 LM de FNC normales à la surface rainurée au centre, OP10P4 45° CR10 Y

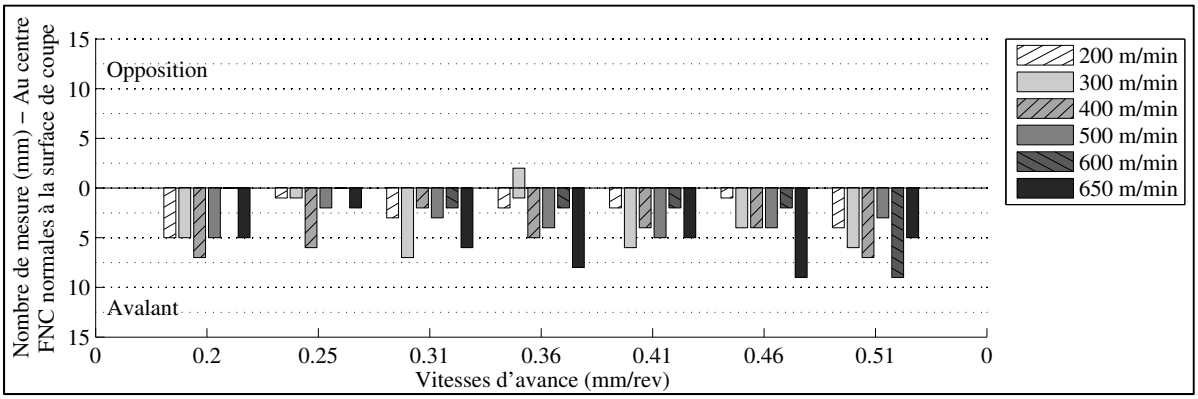



Figure 3.135 NM de FNC normales à la surface rainurée au centre, OP10P4 45° CR10 Y

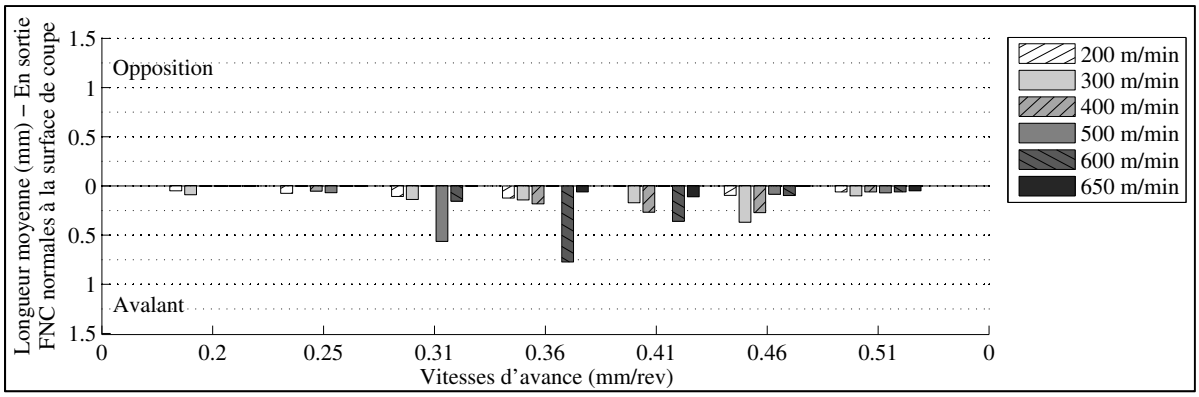



Figure 3.136 LM de FNC normales à la surface rainurée en sortie, OP10P4 45° CR10 Y

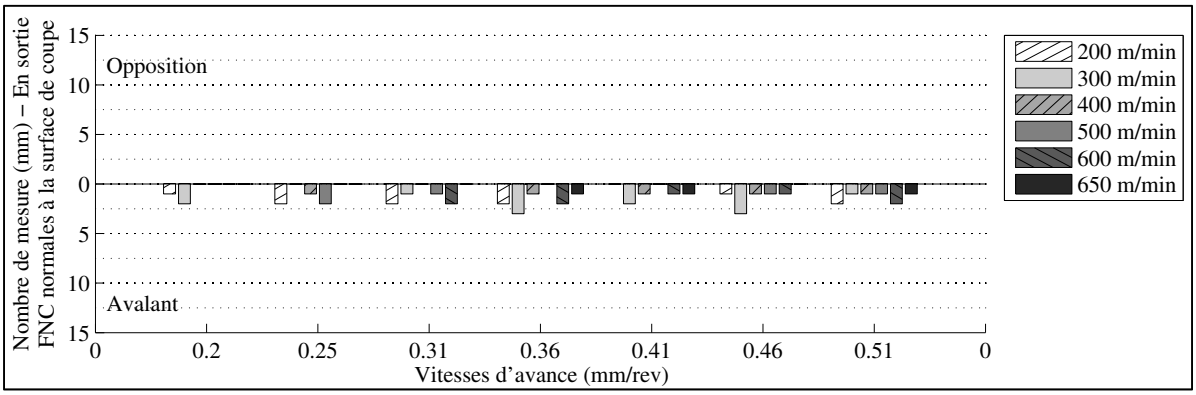



Figure 3.137 NM de FNC normales à la surface rainurée en sortie, OP10P4 45° CR10 Y

Quatre cas d'ARM en entrée et en sortie sont observés en opposition à une vitesse supérieure à 0.25 mm/rev. Le peu d'ARM en opposition est semblable aux résultats de l'opération sur centre d'usinage OP20P2 45° et est à l'opposé des résultats de la première opération robotisée OP10P1 45° CR10 Y. En avalant, l'ARM est plus présent à partir d'une vitesse de 0.25 mm/rev aux Figure 3.138 à Figure 3.143. Au centre et en avalant, la LM de l'ARM est de 0.47 mm. L'ARM de cette opération en avalant est plus important que l'ARM observé de l'OP20P2 45° sur centre d'usinage surtout pour les vitesses d'avance de 0.25 à 0.36 mm/rev. L'ARM en avalant est surtout causé par la propagation de la délamination des FNC au-delà de la surface rainurée telle qu'illustrée à la Figure 3.144 pour les vitesses de 200 m/min et 0.41 mm/rev.

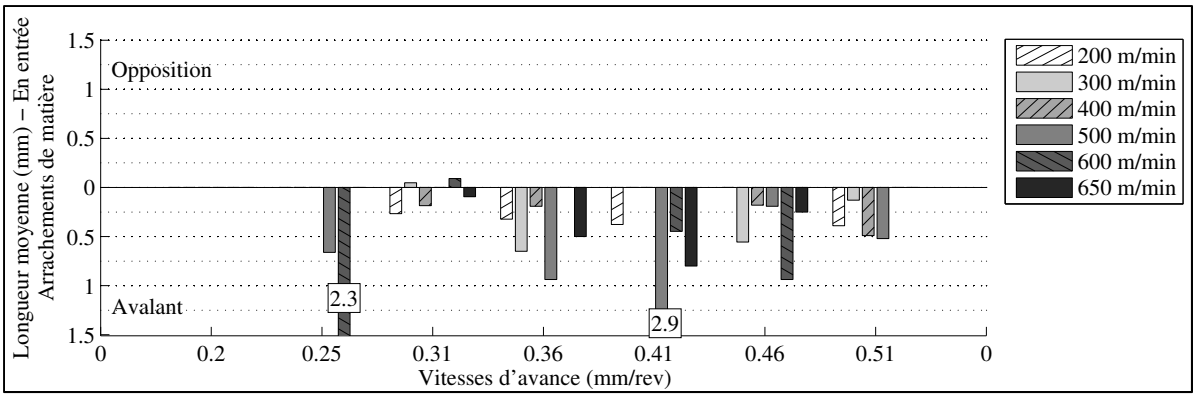



Figure 3.138 LM d'ARM normales à la surface rainurée en entrée, OP10P4 45° CR10 Y

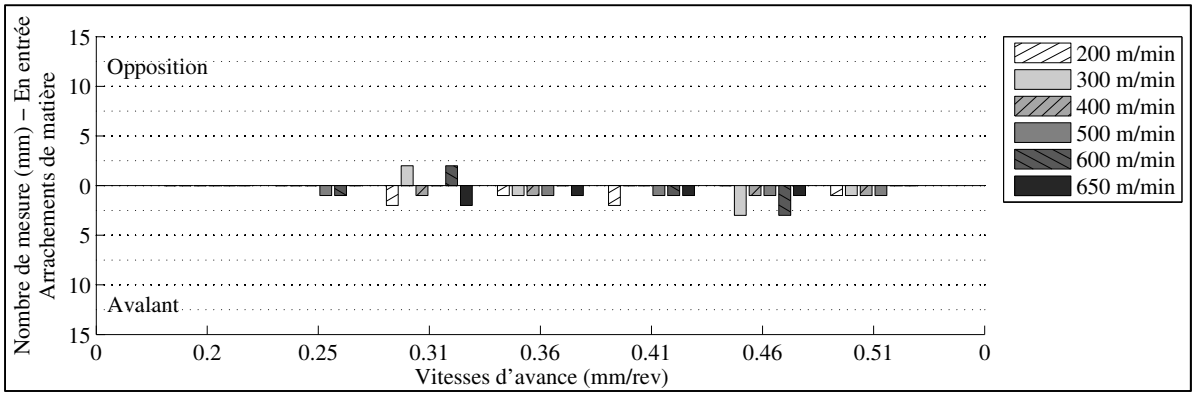



Figure 3.139 NM d'ARM normales à la surface rainurée en entrée, OP10P4 45° CR10 Y

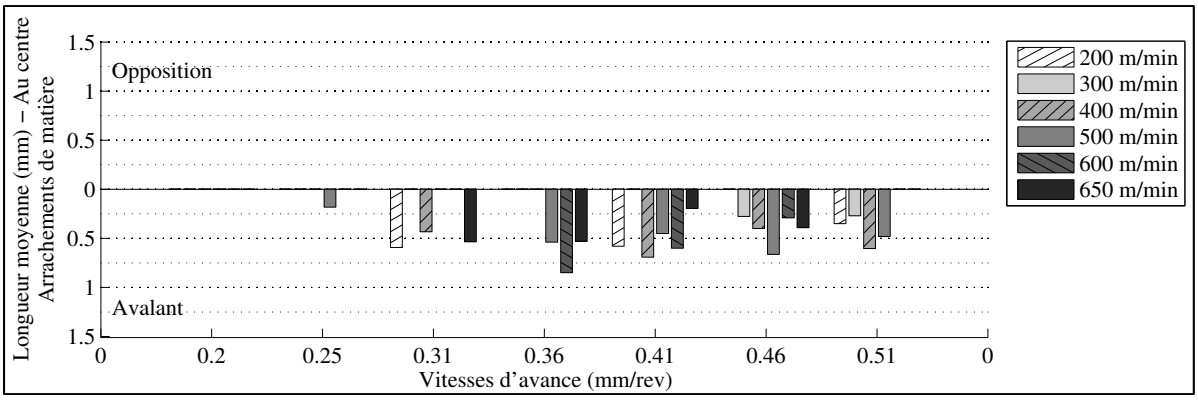



Figure 3.140 LM d'ARM normales à la surface rainurée au centre, OP10P4 45° CR10 Y

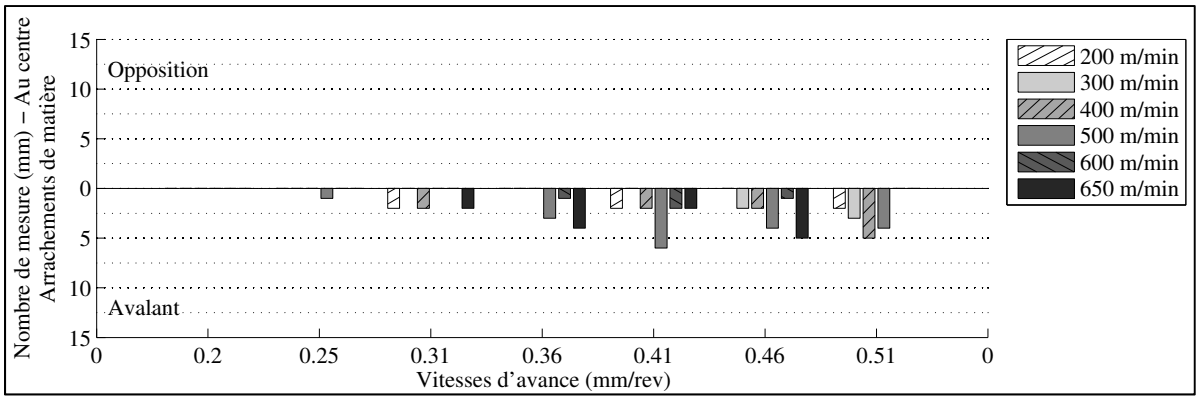



Figure 3.141 NM d'ARM normales à la surface rainurée au centre, OP10P4 45° CR10 Y

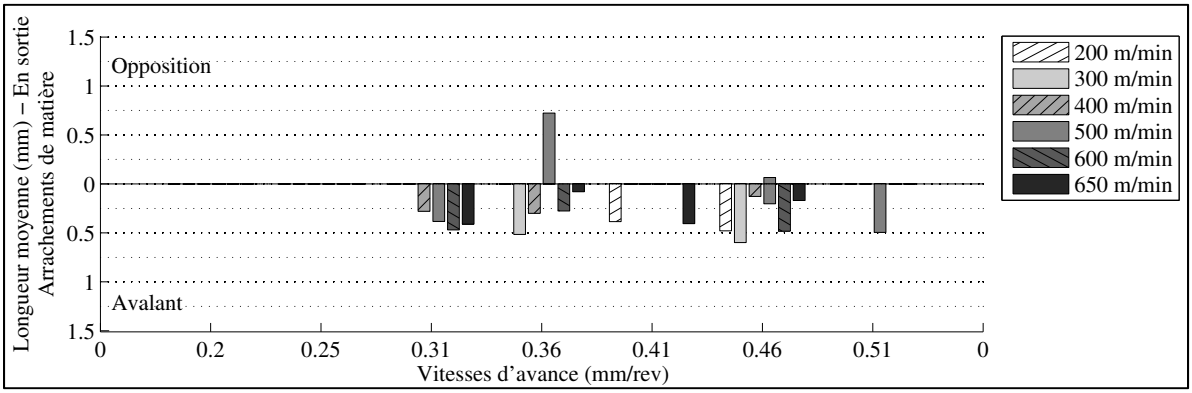



Figure 3.142 LM d'ARM normales à la surface rainurée en sortie, OP10P4 45° CR10 Y

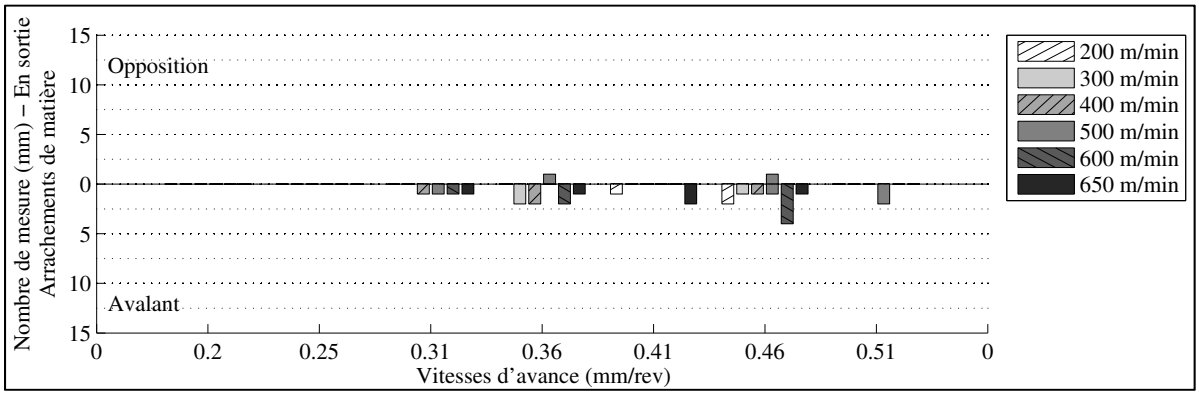



Figure 3.143 NM d'ARM normales à la surface rainurée en sortie, OP10P4 45° CR10 Y

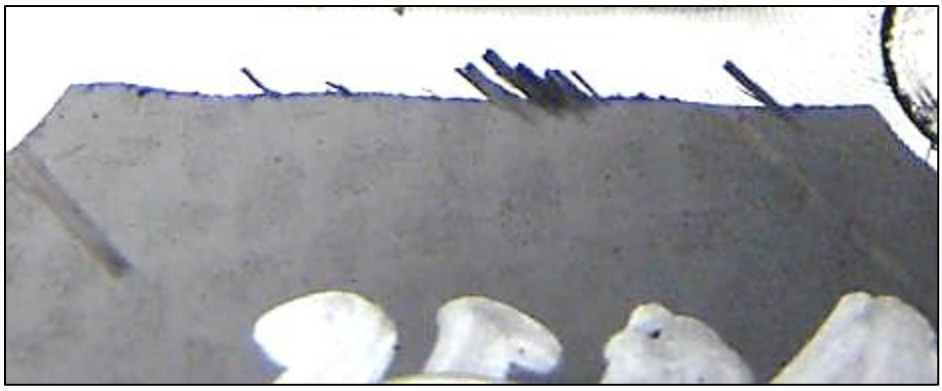


Figure 3.144 FNC délaminées au-delà de la surface rainurée
en avalant pour 200 m/min et 0.41 mm/rev, OP10P4 45° CR10 Y

#### 3.3.5.1 Conclusion

Aucune délamination n'est observée au pli inférieur. Les FNC et l'ARM sont presque absents en opposition au pli supérieur ce qui est similaire aux résultats de l'OP20P2 45° sur centre d'usinage. À l'inverse, la première opération robotisée OP10P1 45° CR10 Y présente des FNC et de l'ARM en opposition. En avalant et au centre, la LM des FNC normales aux plis est de 0.05 mm et la LM des FNC normales à la surface rainurée est de 0.11 mm. En avalant, les FNC sont plus importantes à partir de 0.25 mm/rev et elles sont comparables aux résultats de l'opération OP20P2 45° pour une vitesse inférieure à 0.41 mm/rev. En avalant et au centre, la longueur moyenne des FNC est moins importante pour cette opération que pour la première opération robotisée OP10P1 45° CR10 Y. Au centre, la LM de l'ARM est de 0.47 mm en avalant et nulle en opposition. La présence et la LM de l'ARM sont moins importantes qu'à l'OP10P1 45° CR10 Y. En avalant, l'ARM de cette opération est plus important que l'ARM observé à l'OP20P2 45° sur centre d'usinage surtout pour les vitesses d'avance de 0.25 à 0.36 mm/rev. Les ARM en avalant sont créés par la délamination des FNC au-delà de la surface rainurée. La délamination la plus faible observée en avalant est à 0.20 mm/rev et à 200 m/min.

### 3.3.6 Délaminations de l'opération OP20P4 -45° CR20 X

L'inspection de la deuxième opération sur la plaque P4 est effectuée avec un microscope muni d'une lentille à 20 agrandissements. L'objectif est de caractériser la délamination pour :

- une configuration du robot rapprochée CR20;
- une orientation de plis de surface de -45° par rapport à la direction de rainurage;
- 6 vitesses de coupe et 7 vitesses d'avance;
- une direction de rainurage X dans la cellule robotisée.

La plaque P4 est fabriquée par AFP et cuite en autoclave. Le stratifié est le même que l'OP10P4 et de même fabrication que le stratifié P1 et P2. Ce stratifié comporte un empilement de 24 plis à la vitesse de coupe de 200 m/min et de 20 plis aux autres vitesses de coupe. Les 42 conditions de rainurage sont observées. Quelques cas de FNC sont observés en entrée et en sortie au pli inférieur pour des vitesses supérieures à 400 m/min et 0.36 mm/rev au Tableau 3.15.

Tableau 3.15 LM de délamination du pli inférieur, OP20P4 -45° CR20 X

| | Mode de coupe | Position de l'outil | NM | LM (mm) | Vc (m/min) | Va (mm/rev) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| FNC normales aux plis | Opposition | Entrée | 1 | 0.04 | 500 | 0.51 |
| | | | 5 | 0.04 | 500 | 0.51 |
| FNC normales à la surface rainurée | Avalant | Sortie | 5 | 0.15 | 500 | 0.41 |
| | | | 4 | 0.05 | 600 | 0.46 |
| | | | 8 | 0.07 | 650 | 0.46 |

Au pli supérieur, la majorité des FNC sont en opposition pour soit une vitesse de coupe supérieure à 400 m/min ou une vitesse d'avance supérieure à 0.25 mm/rev au

Tableau 3.16. En avalant et en sortie, les FNC sont soient pour une vitesse supérieure à 600 m/min ou 0.36 mm/rev. Au centre peu de FNC sont observées tel que pour la première opération robotisée OP20P1 -45° CR20 X et l'opération sur centre d'usinage OP10P2 -45°.

En entrée et au centre, l'ARM est plus important pour une vitesse supérieure à 0.25 mm/rev et sa longueur moyenne est plus longue en opposition qu'en avalant aux Figure 3.145 à Figure 3.148. Au centre, la LM de l'ARM est de 0.36 mm en opposition et de 0.09 mm en avalant. Au centre et en opposition, la longueur moyenne de l'ARM est inférieure à celle obtenue pour l'opération sur centre d'usinage OP10P2 -45° et l'opération robotisée OP20P1 -45° CR20 X. En avalant, la longueur moyenne de l'ARM est beaucoup moins élevée que celle de l'opération robotisée OP20P1 -45° CR20 X et semblable à celle de l'OP10P2 -45° sur centre d'usinage. L'ARM en avalant est plus présent que celui de l'opération sur centre d'usinage OP10P2 -45° pour une vitesse inférieure à 0.51 mm/rev. En sortie, l'ARM est plus présent à partir de 0.25 mm/rev en opposition et 0.20 mm/rev en avalant aux Figure 3.149 et Figure 3.150. L'ARM en sortie est plus importante que les opérations précédentes dont l'orientation du pli de surface est de -45°.

Tableau 3.16 LM de FNC du pli supérieur, OP20P4 -45° CR20 X

| | Mode de coupe | Position de l'outil | NM | LM (mm) | Vc (m/min) | Va (mm/rev) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| FNC normales aux plis | Opposition | Entrée | 2 | 0.03 | 200 | 0.51 |
| | | | 2 | 0.09 | 500 | 0.30 |
| | | | 1 | 0.14 | 500 | 0.46 |
| | | Centre | 3 | 0.02 | 200 | 0.51 |
| | | | 5 | 0.07 | 400 | 0.46 |
| | | | 5 | 0.11 | 500 | 0.46 |
| | | Sortie | 4 | 0.04 | 300 | 0.46 |
| | | | 2 | 0.08 | 650 | 0.51 |
| | Avalant | Sortie | 3 | 0.04 | 200 | 0.41 |
| | | | 3 | 0.07 | 650 | 0.25 |
| | | | 2 | 2.60 | 650 | 0.30 |
| FNC normales à la surface rainurée | Opposition | Entrée | 1 | 0.09 | 200 | 0.30 |
| | | | 4 | 0.15 | 200 | 0.51 |
| | | Centre | 11 | 0.71 | 200 | 0.51 |
| | | | 1 | 0.40 | 400 | 0.46 |
| | | Sortie | 2 | 0.09 | 200 | 0.51 |

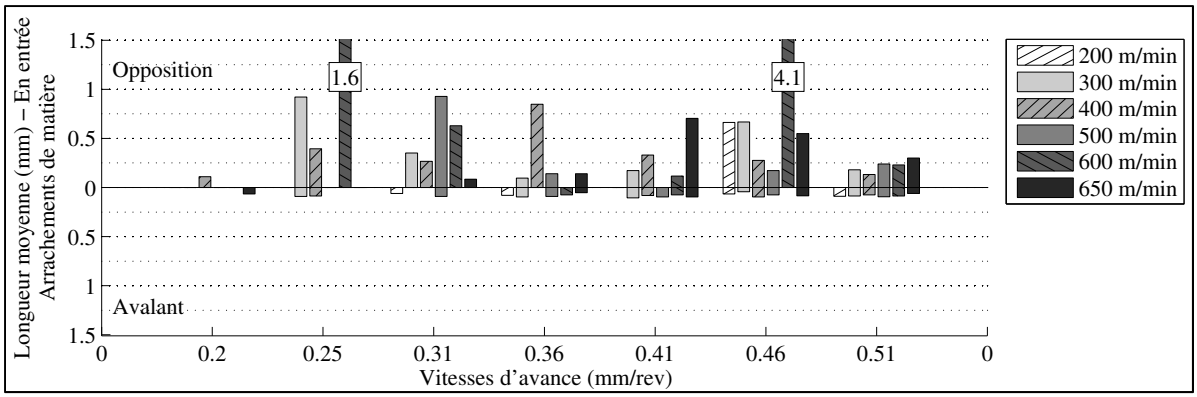



Figure 3.145 LM d'ARM normales à la surface rainurée en entrée, OP20P4 -45° CR20 X

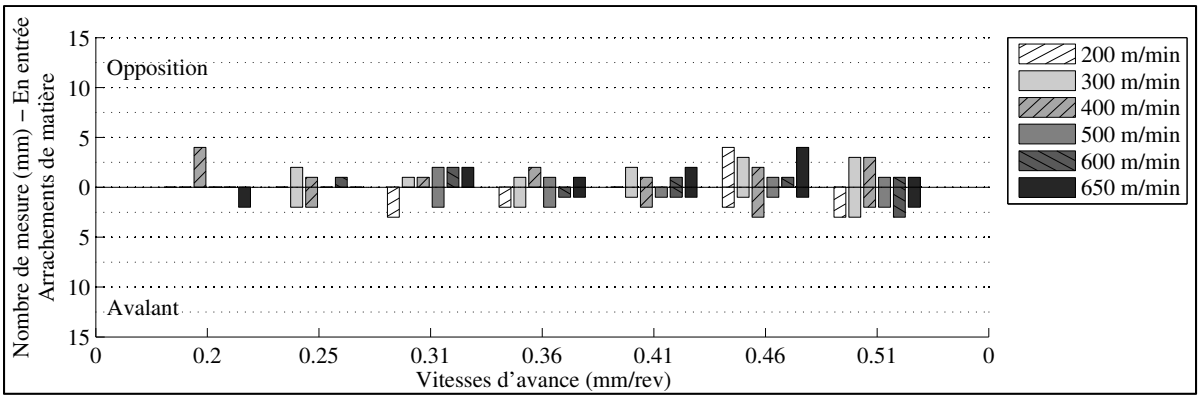



Figure 3.146 NM d'ARM normales à la surface rainurée en entrée, OP20P4 -45° CR20 X

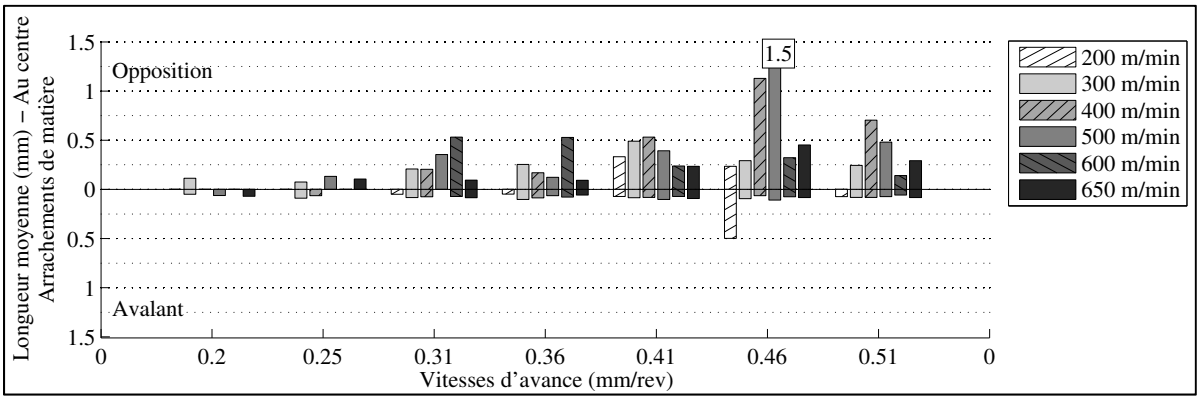



Figure 3.147 LM d'ARM normales à la surface rainurée au centre, OP20P4 -45° CR20 X

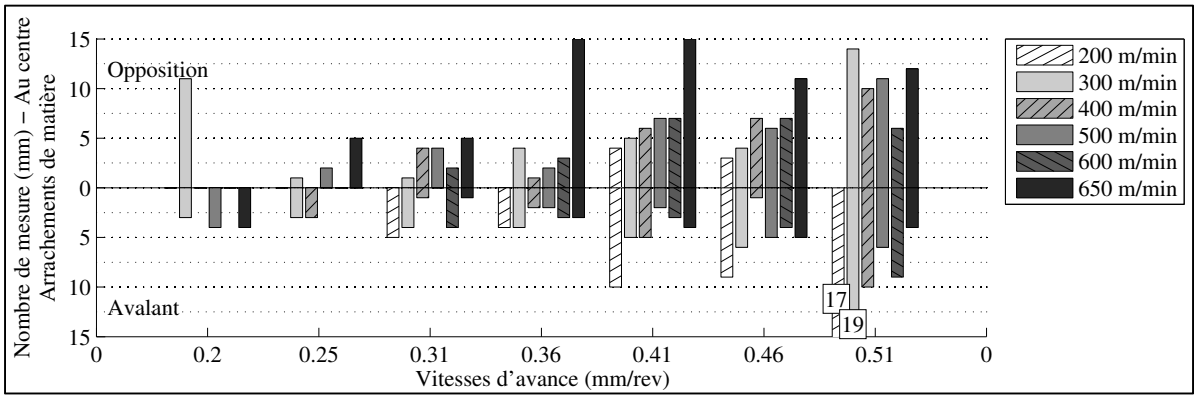



Figure 3.148 NM d'ARM normales à la surface rainurée au centre, OP20P4 -45° CR20 X

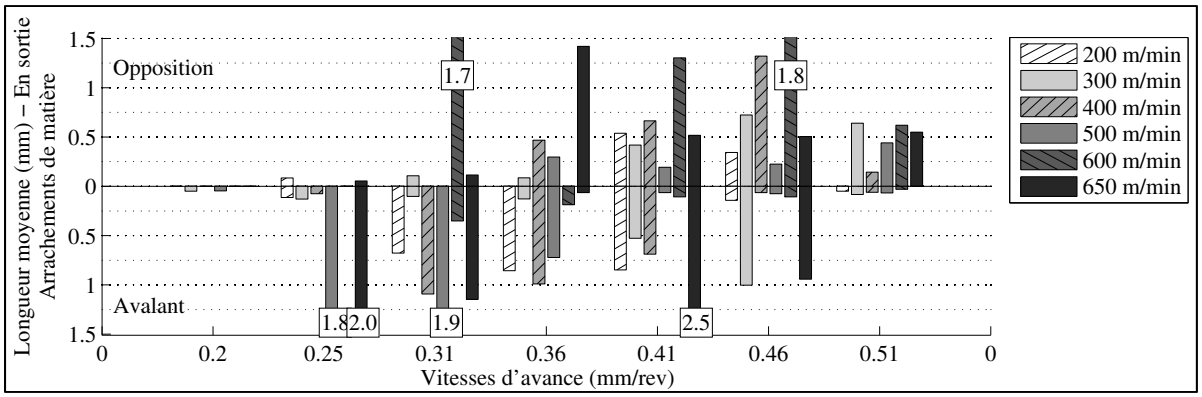



Figure 3.149 LM d'ARM normales à la surface rainurée en sortie, OP20P4 -45° CR20 X

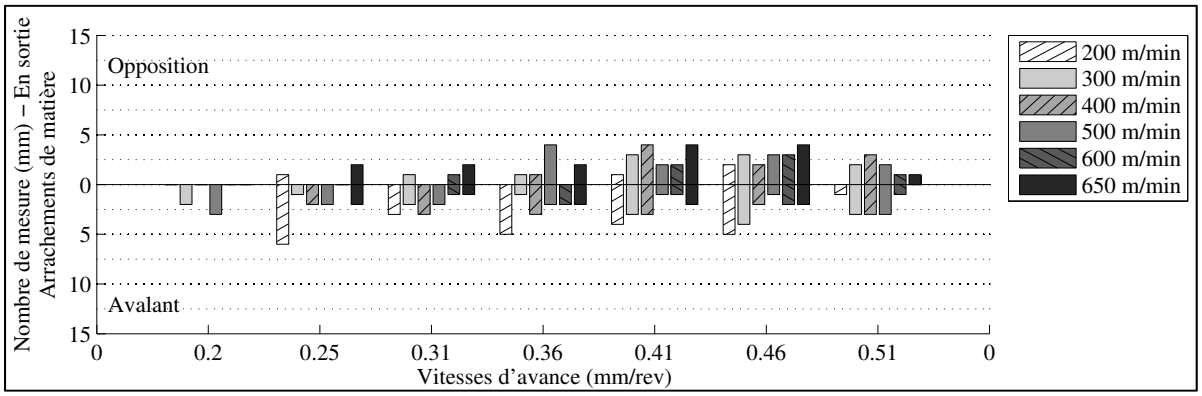



Figure 3.150 LM d'ARM normales à la surface rainurée en sortie, OP20P4 -45° CR20 X

### 3.3.6.1 Conclusion

Des FNC sont observés en entrée et en sortie au pli inférieur sur cinq échantillons pour des vitesses supérieures à 400 m/min et 0.36 mm/rev. Au pli supérieur, la majorité des FNC sont situées en entrée ou en sortie et en opposition à une vitesse de coupe supérieure à 400 m/min ou une vitesse d'avance supérieure à 0.25 mm/rev. Au centre très peu de FNC sont observées tel qu'observé lors de l'opération robotisée OP20P1 -45° CR20 X et l'opération sur centre d'usinage OP10P2 -45°. L'ARM est plus important pour une vitesse supérieure à 0.25 mm/rev et sa longueur moyenne est de 0.36 mm en opposition et de 0.09 mm en avalant. Au centre et en opposition, la longueur moyenne de l'ARM est inférieure à celle obtenue

pour l'opération sur centre d'usinage OP10P2 -45° et l'opération robotisée OP20P1 -45° CR20 X. En avalant, la longueur moyenne de l'ARM est beaucoup moins élevée que celle de l'opération robotisée OP20P1 -45° CR20 X et semblable à celle de l'OP10P2 -45° sur centre d'usinage. L'ARM en avalant est plus présent que celui de l'opération sur centre d'usinage OP10P2 -45° pour une vitesse inférieure à 0.51 mm/rev. L'ARM en sortie est plus importante que les opérations précédentes dont l'orientation du pli de surface est de -45°. Un ARM plus important en opposition qu'en avalant ressemble aux résultats de propagation de la délamination de Hintze et coll. pour un pli orienté à -45°. La délamination la plus faible est observée à 200 m/min et de 0.20 à 0.25 mm/rev.

### 3.3.7 Délaminations de l'opération OP30P3 45° CR20 X

L'inspection de cette première opération sur la plaque P3 est effectuée avec un microscope muni d'une lentille à 20 agrandissements. L'objectif est de caractériser la délamination pour :

- une configuration du robot rapprochée CR20;
- une orientation de plis de surface de 45° par rapport à la direction de rainurage;
- 4 vitesses de coupe et 3 vitesses d'avance;
- une direction de rainurage X dans la cellule robotisée.

Un second objectif est de déterminer l'influence de l'orientation du pli de surface de 45° et de moins 45° sur la délamination de surface lors de rainurage. La plaque P3 est fabriquée par pose à la main des plis et cuite sous presse et vacuum. Le stratifié est le même que l'OP30P3 -45° et de même fabrication que le stratifié P5 et P6. Ce stratifié comporte 24 plis. Un outil PCD neuf est utilisé pour cette opération. Toutes les conditions de coupe rainurées sont observées. Aucune délamination de surface n'est observée au pli inférieur. Au pli supérieur, les FNC sont fortement présentes à une vitesse de coupe de 300 m/min aux Figure 3.151 à Figure 3.162. Les FNC sont aussi présentes à 150 m/min et à 200 m/min avec une longueur moyenne moindre pour une vitesse supérieure à 0.15 mm/rev. À 400 m/min les FNC sont surtout présentes en avalant à 0.20 mm/rev. Au centre, la LM des FNC normales aux plis est

de 0.05 mm en opposition et de 0.06 mm en avalant. Au centre, la LM des FNC normales à la surface rainurée est de 0.27 mm en opposition et de 0.14 mm en avalant. L'arrachement de matière est présent surtout en opposition à 300 m/min et 0.25 mm/rev et en avalant à 200 m/min et 0.15 mm/rev au Tableau 3.17. La LM de l'ARM au centre en opposition est de 0.10 mm et en avalant de 0.06 mm.

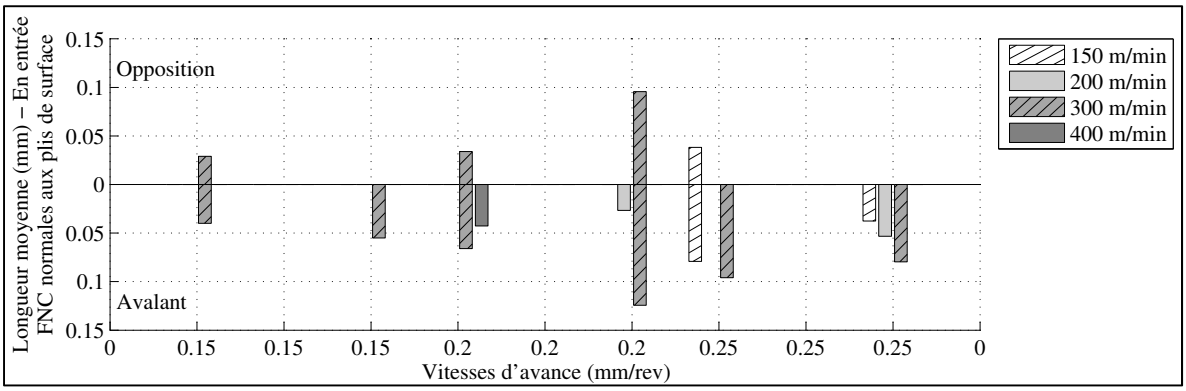



Figure 3.151 LM de FNC normales au pli supérieur en entrée, OP30P3 45° CR20 X

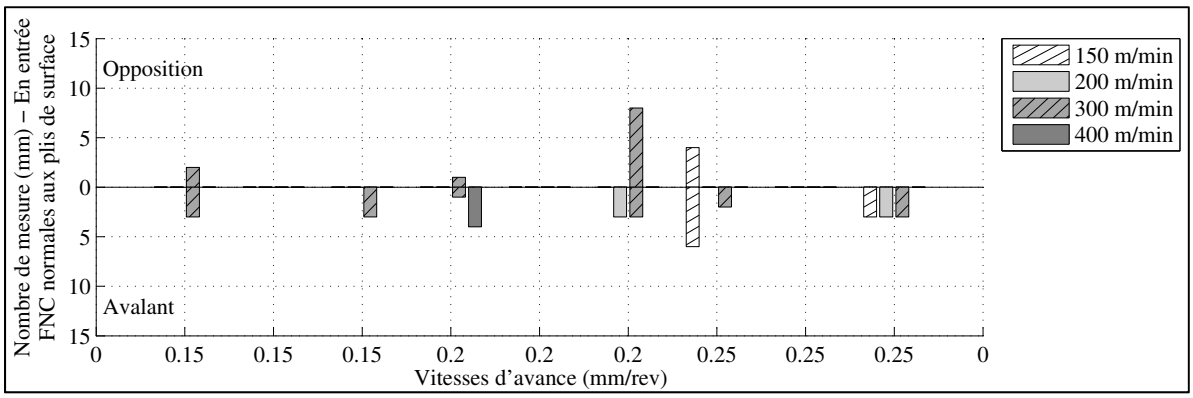



Figure 3.152 NM de FNC normales au pli supérieur en entrée, OP30P3 45° CR20 X

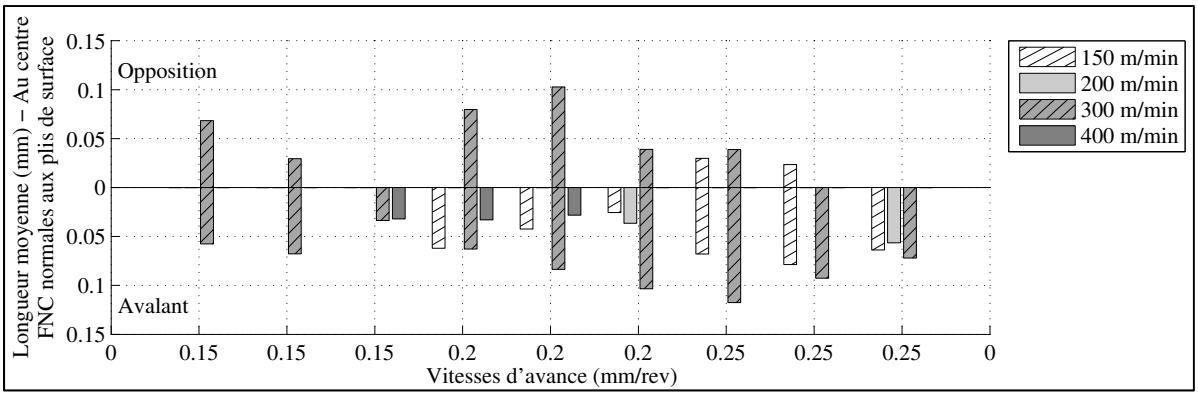



Figure 3.153 LM de FNC normales au pli supérieur au centre, OP30P3 45° CR20 X

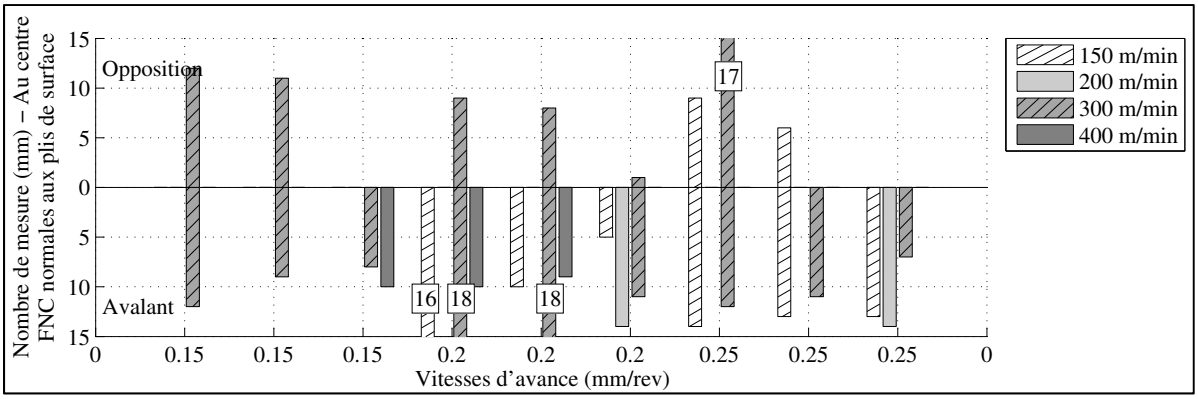



Figure 3.154 NM de FNC normales au pli supérieur au centre, OP30P3 45° CR20 X

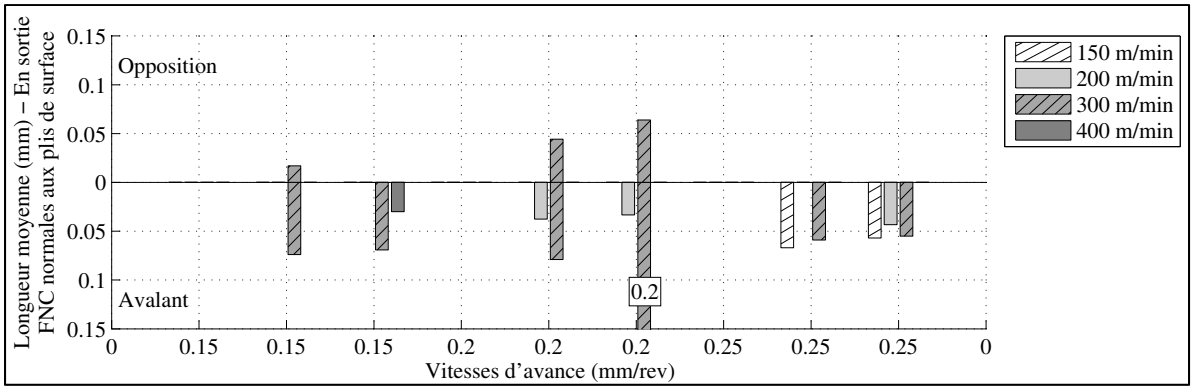



Figure 3.155 LM de FNC normales au pli supérieur en sortie, OP30P3 45° CR20 X

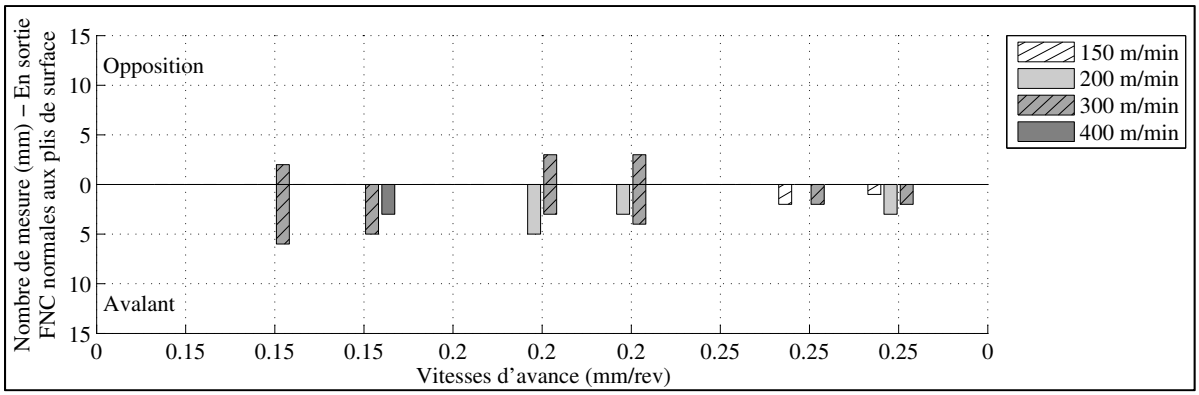



Figure 3.156 NM de FNC normales au pli supérieur en sortie, OP30P3 45° CR20 X

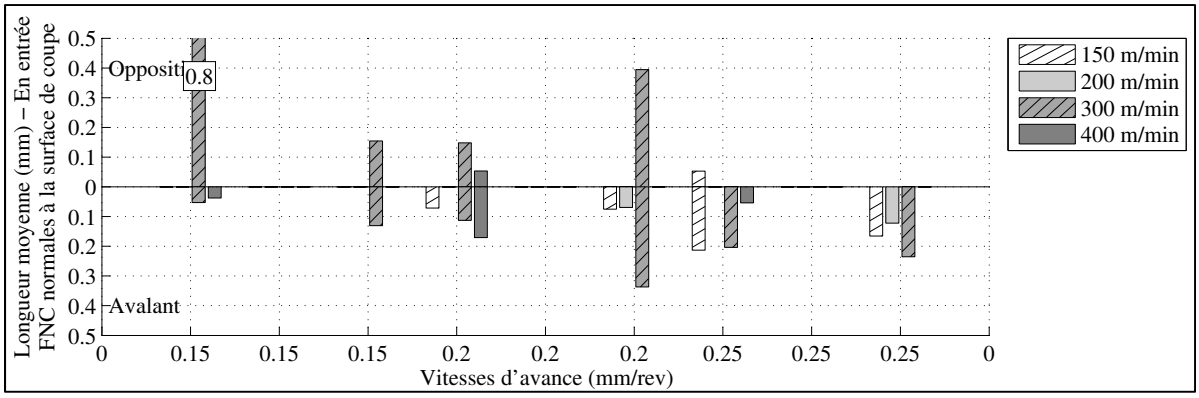



Figure 3.157 LM de FNC normales à la surface rainurée en entrée, OP30P3 45° CR20 X

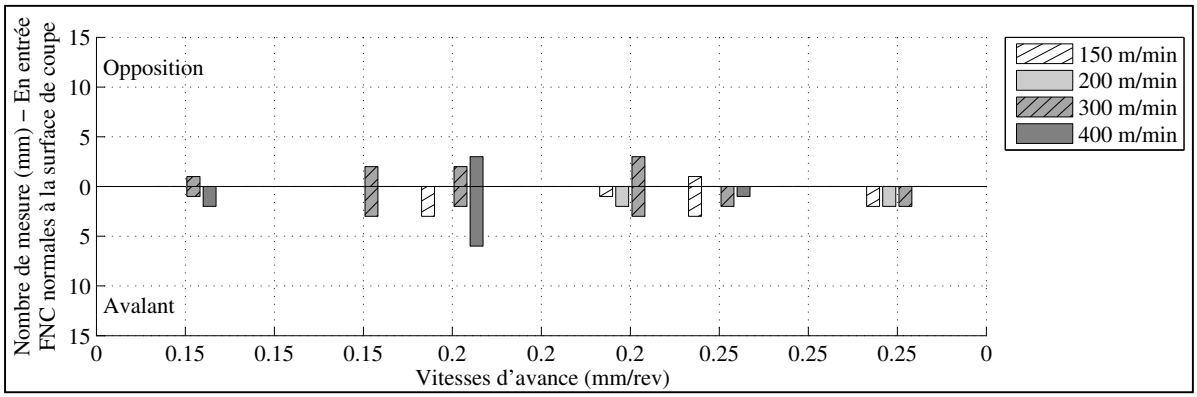



Figure 3.158 NM de FNC normales à la surface rainurée en entrée, OP30P3 45° CR20 X

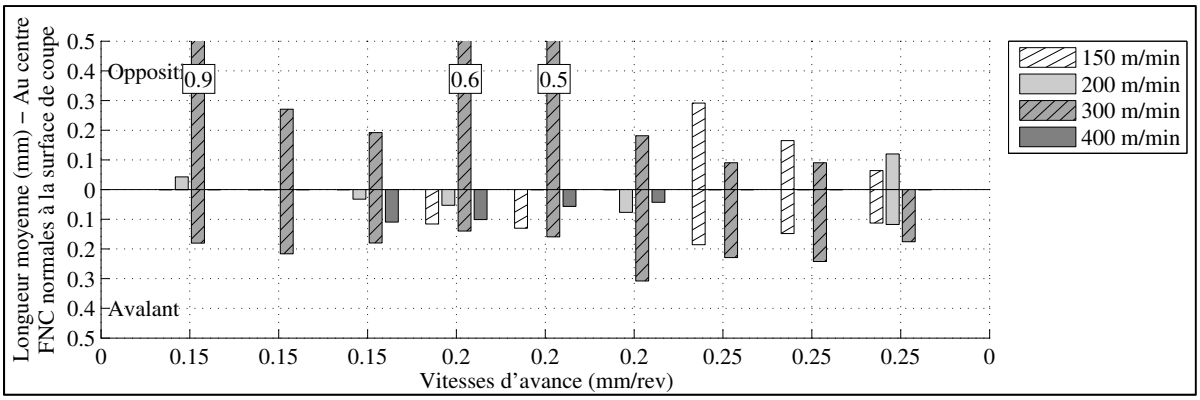



Figure 3.159 LM de FNC normales à la surface rainurée au centre, OP30P3 45° CR20 X

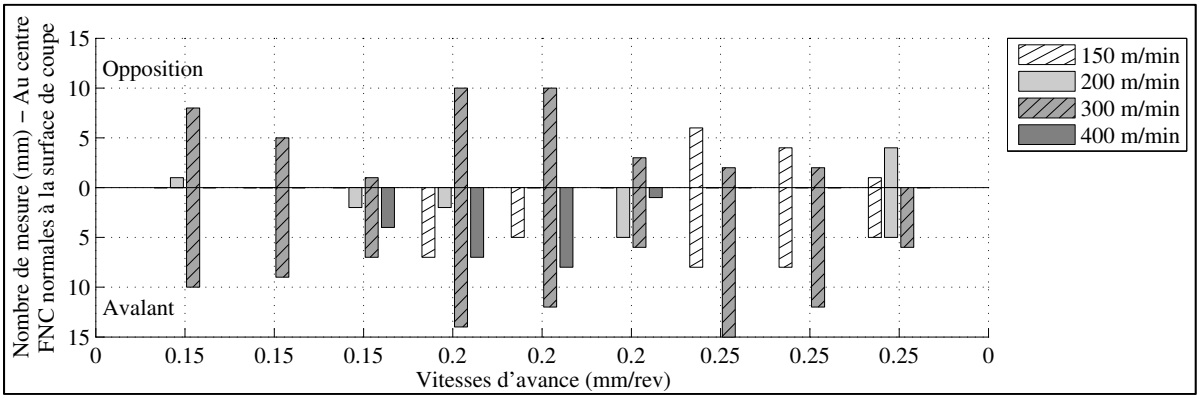



Figure 3.160 NM de FNC normales à la surface rainurée au centre, OP30P3 45° CR20 X

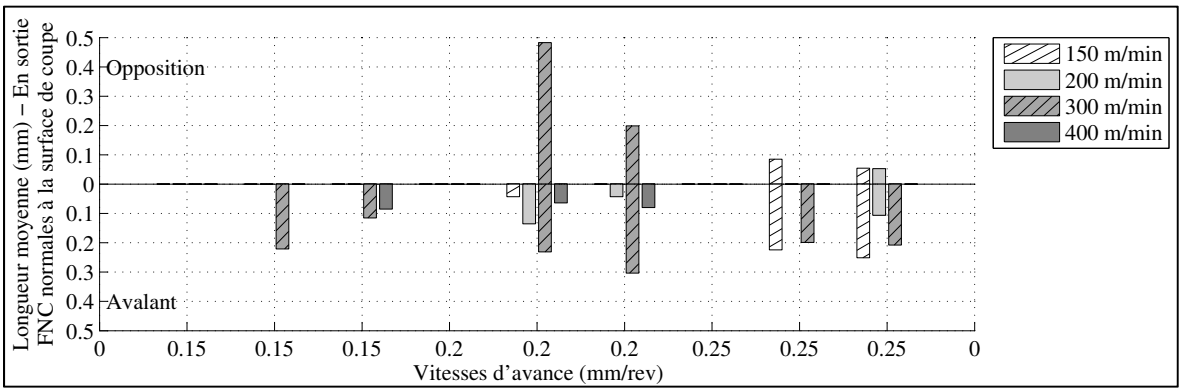



Figure 3.161 LM de FNC normales à la surface rainurée en sortie, OP30P3 45° CR20 X

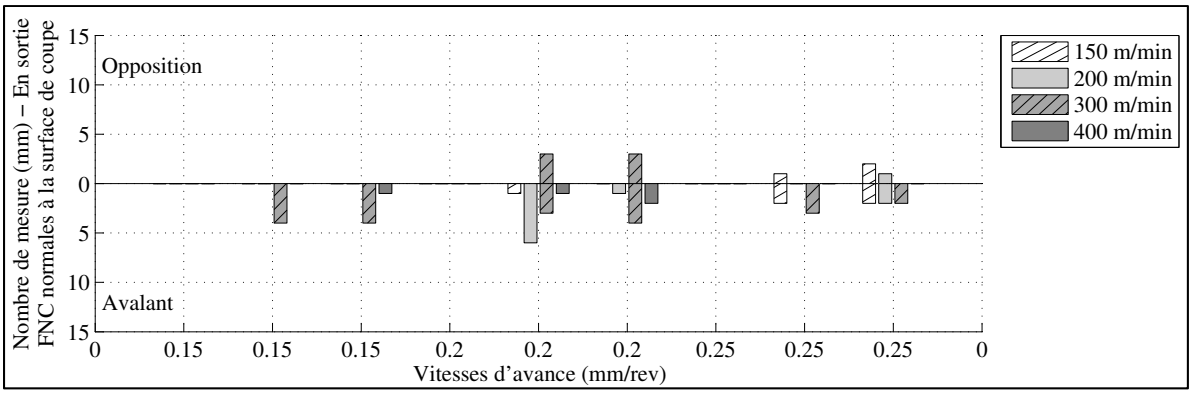



Figure 3.162 NM de FNC normales à la surface rainurée en sortie, OP30P3 45° CR20 X

Tableau 3.17 LM d'ARM du pli supérieur orienté à 45° de l'OP30P3

| Mode de coupe | Position de l'outil | NM | LM (mm) | Vc (m/min) | Va (mm/rev) |
|---|---|---|---|---|---|
| Opposition | Entrée | 1 | 0.09 | 300 | 0.25 |
| | | 3 | 0.13 | 300 | 0.25 |
| | Centre | 2 | 0.13 | 200 | 0.25 |
| | | 8 | 0.08 | 300 | 0.25 |
| | | 8 | 0.10 | 300 | 0.25 |
| | | 2 | 0.06 | 400 | 0.15 |
| | | 3 | 0.12 | 400 | 0.20 |
| | Sortie | 1 | 0.16 | 150 | 0.15 |
| | | 2 | 0.10 | 300 | 0.25 |
| | | 1 | 0.71 | 400 | 0.15 |
| Avalant | Entrée | 2 | 0.17 | 150 | 0.15 |
| | | 1 | 0.10 | 200 | 0.15 |
| | Centre | 5 | 0.05 | 200 | 0.15 |
| | | 3 | 0.06 | 200 | 0.15 |
| | | 3 | 0.08 | 200 | 0.20 |
| | Sortie | 2 | 0.05 | 200 | 0.15 |
| | | 1 | 0.04 | 200 | 0.15 |
| | | 1 | 0.11 | 200 | 0.20 |

#### 3.3.7.1 Conclusion

Aucune délamination n'est observée au pli inférieur. Les FNC sont fortement présentes à une vitesse de 300 m/min. Les FNC sont aussi présentes à 150 et 200 m/min pour une vitesse supérieure à 0.15 mm/rev et sont aussi présentes à 400 m/min en avalant pour 0.20 mm/rev. Au centre, la LM des FNC normales aux plis est de 0.05 mm en opposition et de 0.06 mm en avalant. Au centre, la LM des FNC normales à la surface rainurée est de 0.27 mm en opposition et de 0.14 mm en avalant. La LM et la présence des FNC sont moins importantes qu'à l'OP10P1 45° CR10 Y et sont plus importantes qu'aux opérations l'OP20P2 45° et l'OP10P4 45° CR10 Y pour les mêmes vitesses. L'ARM est présent surtout en opposition à 300 m/min et 0.25 mm/rev et en avalant à 200 m/min et 0.15 mm/rev. La LM de l'ARM au centre en opposition est de 0.10 mm et en avalant de 0.06 mm. L'opération robotisée OP10P1 45° CR10 Y a présentée des ARM pour des vitesses de 300 et 400 m/min à 0.25 mm/rev. Les opérations sur centre d'usinage OP20P2 45° et l'OP10P4 45° CR10 Y n'ont pas présentées d'ARM pour les vitesses de cette opération. Les échantillons les moins délaminés sont à 150 m/min pour 0.15 mm/rev et sont à 400 m/min pour 0.25 mm/rev. La présence de délamination de surface en opposition et en avalant est aussi observée par Hintze et coll. pour un pli orienté à 45°.

### 3.3.8 Délaminations de l'opération OP30P3 -45° CR20 X

L'inspection de la deuxième opération sur la plaque P3 est effectuée avec un microscope muni d'une lentille à 20 agrandissements. Cette opération est composée des mêmes facteurs que l'OP30P3 45 à l'exception de l'orientation du pli de surface à -45°. L'objectif est de caractériser la délamination pour :

- une configuration du robot rapprochée CR20;
- une orientation de plis de surface de -45° par rapport à la direction de rainurage;
- 4 vitesses de coupe et 3 d'avance;
- une direction de rainurage X dans la cellule robotisée.

Un second objectif est de déterminer l'influence de l'orientation du pli de surface à 45° et à moins 45° sur la délamination de surface lors de rainurage robotisé. La plaque P3 est fabriquée par pose à la main des plis et cuite sous presse et vacuum. Le stratifié est le même que l'OP30P3 45° et de même fabrication que le stratifié P5 et P6. Ce stratifié comporte 24 plis. L'outil ayant rainuré la première opération sur la plaque P3 est utilisé à cette opération. Toutes les conditions de coupe rainurées sont observées. Aucune délamination n'est observée du pli inférieur. Au pli supérieur et au centre, une seule mesure de FNC normales à la surface rainurée est observée en opposition de 0.06 mm à 150 m/min et 0.20 mm/rev. En entrée et au centre, l'ARM est légèrement plus important à une vitesse d'avance supérieur à 0.15 mm/rev au Figure 3.163 à Figure 3.168.

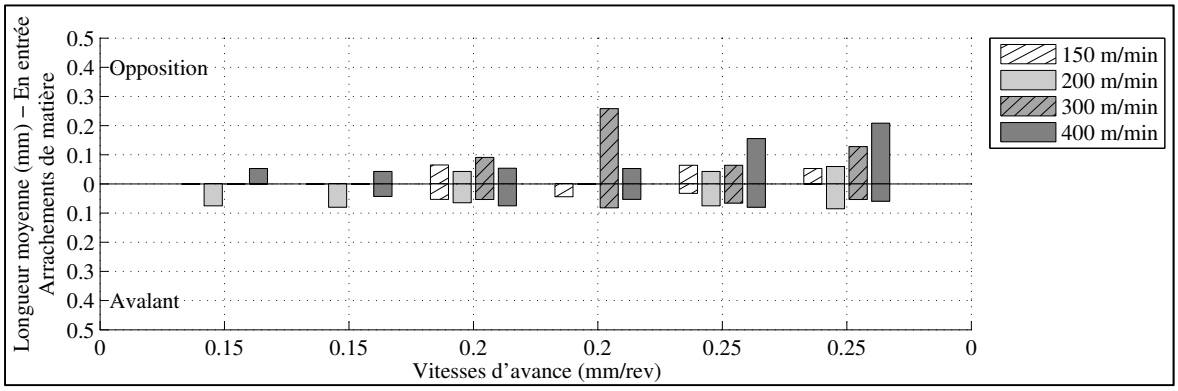



Figure 3.163 LM d'ARM normal à la surface rainurée en entrée de l'OP30P3 -45° CR20 X

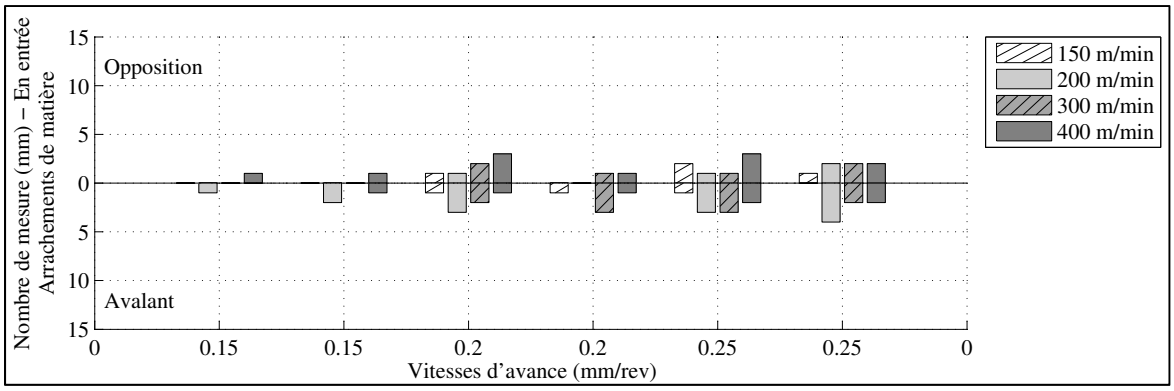



Figure 3.164 NM d'ARM normal à la surface rainurée en entrée de l'OP30P3 -45° CR20 X

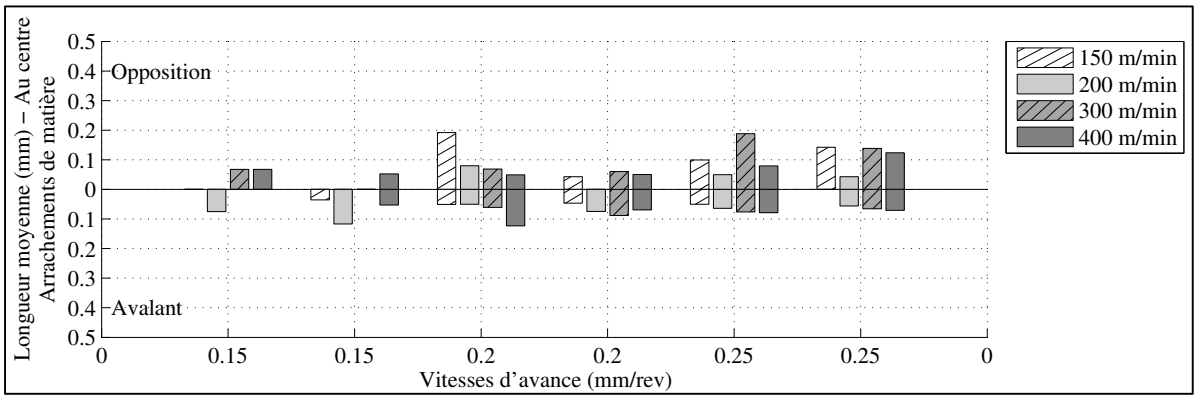



Figure 3.165 LM d'ARM normal à la surface rainurée au centre de l'OP30P3 -45° CR20 X

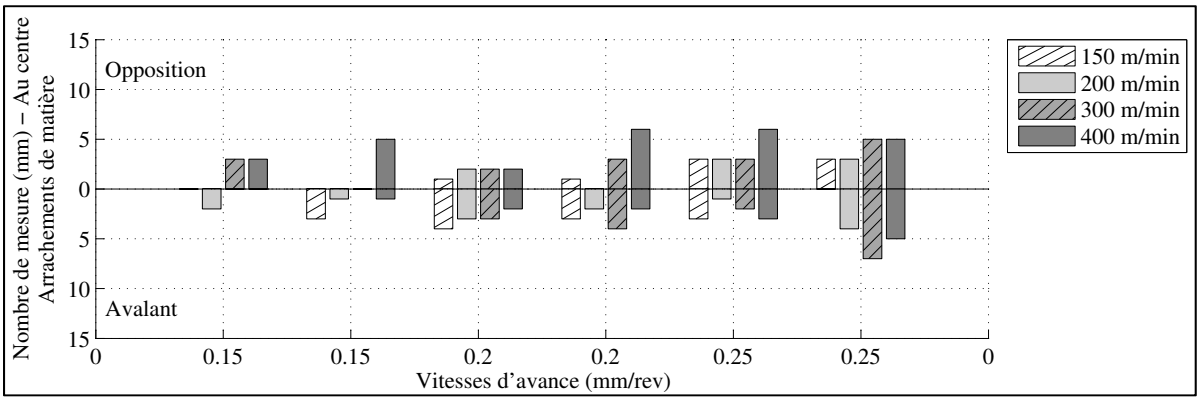



Figure 3.166 NM d'ARM normal à la surface rainurée au centre de l'OP30P3 -45° CR20 X

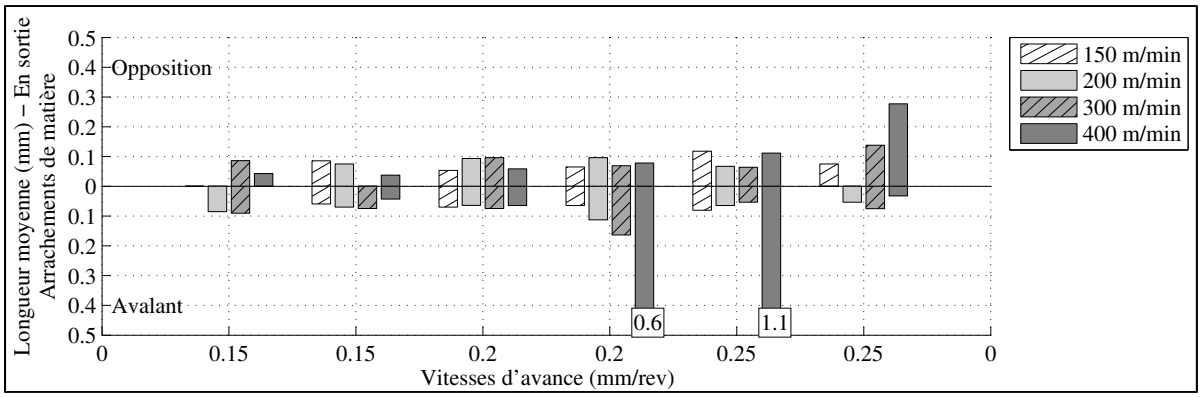



Figure 3.167 LM d'ARM normal à la surface rainurée en sortie de l'OP30P3 -45° CR20 X

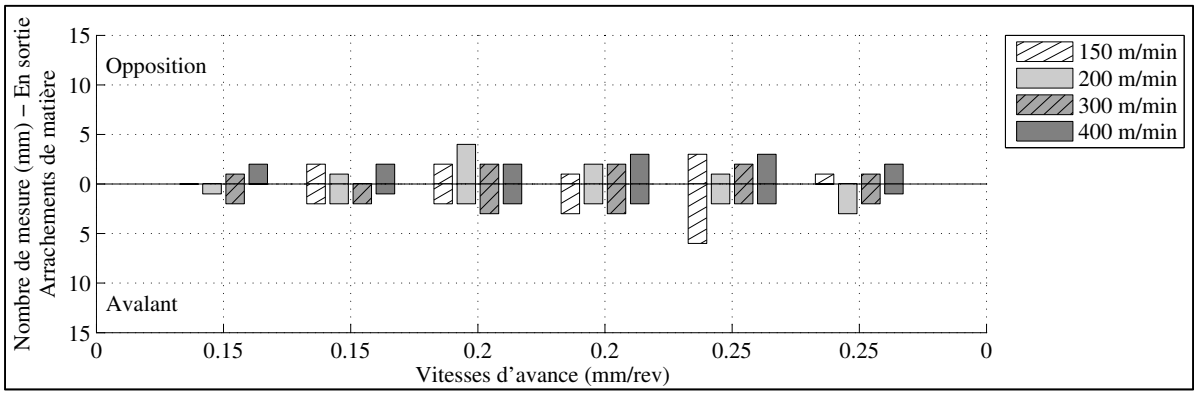



Figure 3.168 NM d'ARM normal à la surface rainurée en sortie de l'OP30P3 -45° CR20 X

### 3.3.8.1 Conclusion

Aucune délamination n'est observée du pli inférieur. Au pli supérieur et au centre, une seule mesure de FNC normales à la surface rainurée est observée en opposition de 0.06 mm à 150 m/min et 0.20 mm/rev. Au centre, aucune FNC pour un pli de surface orienté à -45° n'est observée pour les opérations précédentes robotisées et sur centre d'usinage à ces vitesses. En entrée et au centre, l'ARM est plus important à une vitesse d'avance supérieure à 0.15 mm/rev. Au centre, l'ARM est d'une longueur moyenne de 0.09 mm en opposition et de 0.07 mm en avalant. Une longueur moyenne d'ARM semblable et une présence moins élevée sont observées à l'OP10P2 -45° et l'OP20P4 -45° CR20 X pour les mêmes vitesses. La délamination la plus faible est observée à 150 m/min et 0.15 mm/rev.

### 3.3.9 Délaminations de l'opération OP50P5 45° CR10 Y

L'inspection de la première opération de rainurage robotisée de la plaque P5 est effectuée avec un microscope muni d'une lentille à 20 agrandissements. L'objectif est de caractériser la délamination pour :

- une configuration du robot éloignée CR10;
- une orientation de plis de surface de 45° par rapport à la direction de rainurage;
- 3 vitesses de coupe et d'avance;
- une direction de rainurage Y dans la cellule robotisée.

La plaque P5 est fabriquée par pose à la main des plis et cuite sous presse et vacuum. Le stratifié est le même que les autres opérations OP50P5 et de même fabrication que le stratifié P3 et P6. Ce stratifié comporte 24 plis. L'outil ayant rainuré les deux opérations sur la plaque P4 est utilisé à cette opération. Toutes les conditions de coupe rainurées sont observées. Aucune délamination n'est observée du pli inférieur. Les photos telles qu'à la Figure 3.169 des échantillons rainurés présentent des FNC sur toute la longueur des échantillons et pour toutes les conditions de coupe de cette opération dont le pli de surface est de 45°. La longueur de fibres non coupées était suffisante pour gêner le passage du rubis lors de l'inspection dimensionnelle sur CMM alors les fibres ont été altérées avant l'inspection de la délamination au microscope. Les FNC observées au microscope sont présentées au Tableau 3.18 en majorité pour des vitesses de 150 m/min et 0.15 mm/rev.

Figure 3.169 FNC d'échantillons rainurés de l'OP50P5 45° CR10 Y
(rainures horizontales dans la vue)

Même si les FNC sont complètement altérées pour une arête rainurée, il est possible de mesurer l'ARM résultant de l'altération des FNC au microscope. La longueur moyenne de l'ARM en opposition est de 0.11 mm aux Figure 3.170 à Figure 3.175. En avalant, la longueur moyenne de l'ARM est de 0.14 mm en sortie et au centre. Les très longs arrachements de matière observés en avalant et en entrée ont été causés lors de l'opération d'alésage des trous de dégagement sur centre d'usinage avant le rainurage robotisé.

Tableau 3.18 LM de FNC du pli supérieur de l'OP50P5 45° CR10 Y

| | Mode de coupe | Position de l'outil | NM | LM (mm) | Vc (m/min) | Va (mm/rev) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| FNC normales aux plis | Opposition | Centre | 11 | 0.24 | 150 | 0.15 |
| | | Sortie | 6 | 0.30 | 150 | 0.15 |
| | Avalant | Entrée | 3 | 0.08 | 150 | 0.15 |
| | | | 1 | 0.06 | 150 | 0.15 |
| | | Centre | 19 | 0.06 | 150 | 0.15 |
| | | | 8 | 0.05 | 150 | 0.15 |
| | | Sortie | 3 | 0.07 | 150 | 0.15 |
| | | | 2 | 0.08 | 150 | 0.15 |
| | | | 3 | 0.05 | 200 | 0.25 |
| FNC normales à la surface rainurée | Opposition | Entrée | 1 | 0.32 | 200 | 0.25 |
| | | Centre | 5 | 1.17 | 150 | 0.15 |
| | | | 1 | 0.14 | 150 | 0.20 |
| | | Sortie | 2 | 0.96 | 150 | 0.15 |
| | Avalant | Entrée | 2 | 0.19 | 150 | 0.15 |
| | | | 2 | 0.11 | 150 | 0.15 |
| | | | 1 | 0.10 | 300 | 0.15 |
| | | Centre | 7 | 0.11 | 150 | 0.15 |
| | | | 5 | 0.10 | 150 | 0.15 |
| | | Sortie | 2 | 0.13 | 150 | 0.15 |
| | | | 3 | 0.15 | 150 | 0.15 |
| | | | 1 | 0.30 | 200 | 0.25 |

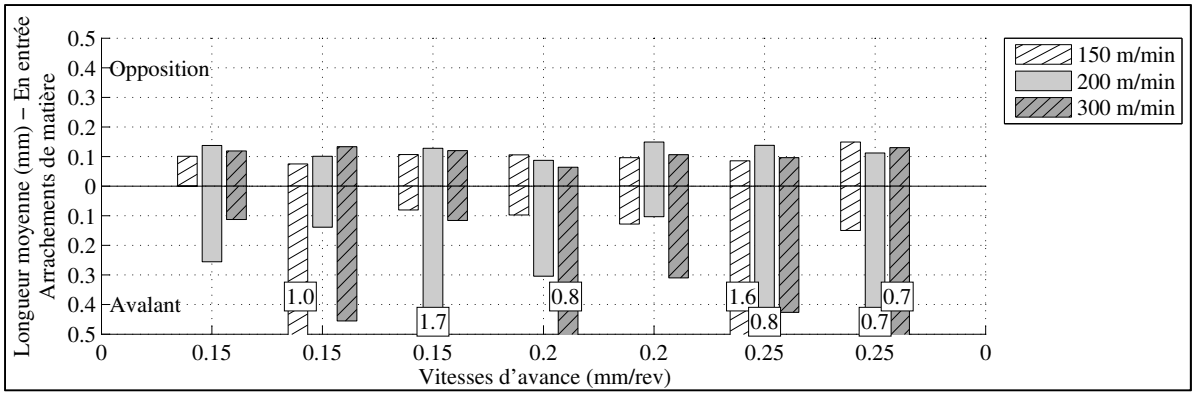



Figure 3.170 LM de l'ARM du pli supérieur en entrée de l'OP50P5 45° CR10 Y

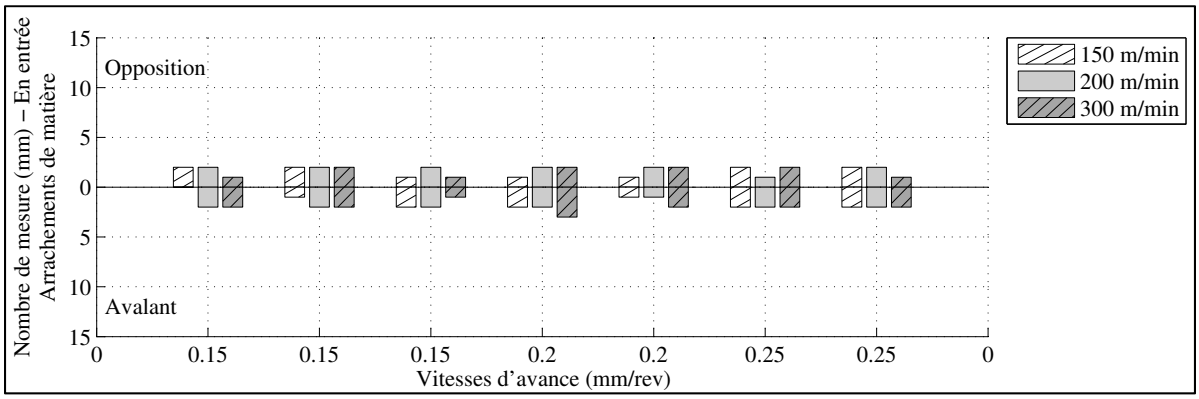



Figure 3.171 NM de l'ARM du pli supérieur en entrée de l'OP50P5 45° CR10 Y

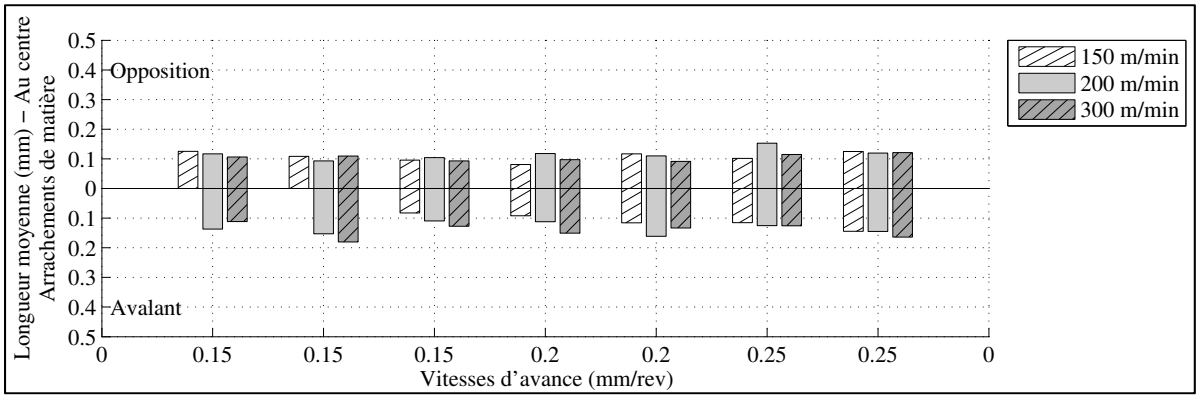



Figure 3.172 LM de l'ARM du pli supérieur au centre de l'OP50P5 45° CR10 Y

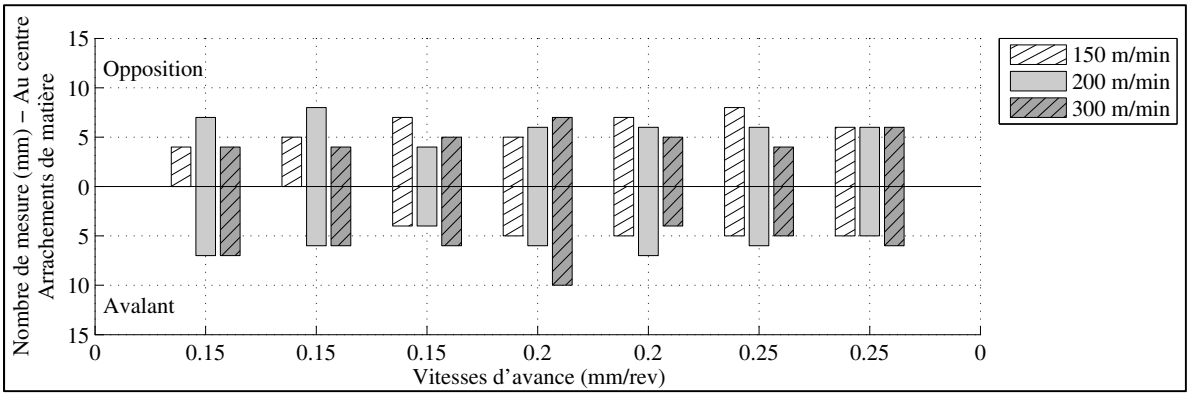



Figure 3.173 NM de l'ARM du pli supérieur au centre de l'OP50P5 45° CR10 Y

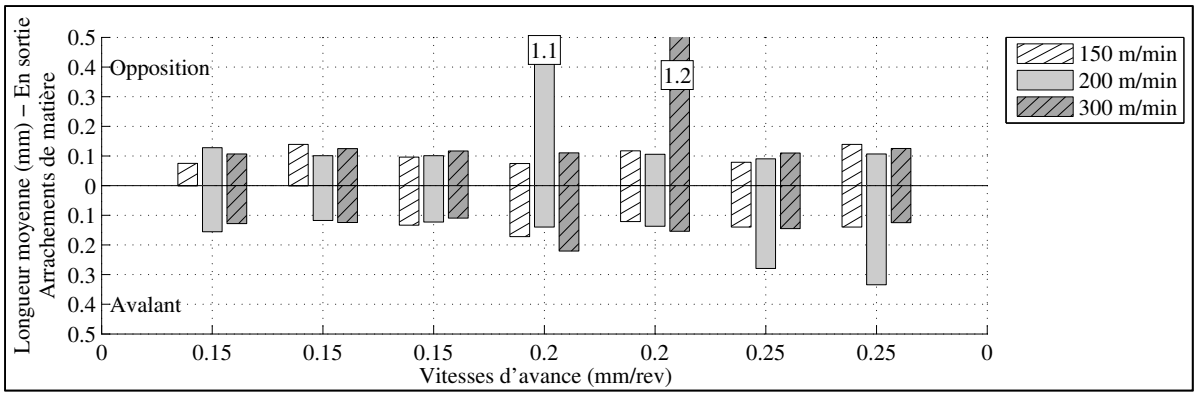



Figure 3.174 LM de l'ARM du pli supérieur en sortie de l'OP50P5 45° CR10 Y

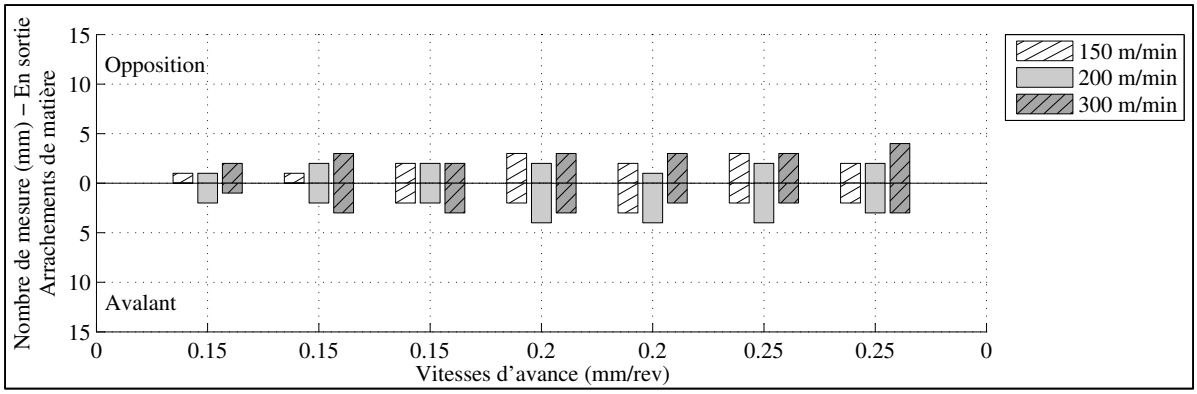



Figure 3.175 NM de l'ARM du pli supérieur en sortie de l'OP50P5 45° CR10 Y

#### 3.3.9.1 Conclusion

Aucune délamination n'est observée du pli inférieur. Les photos d'échantillons rainurés présentent des FNC sur toute la longueur des échantillons et pour toutes les conditions de coupe de cette opération dont le pli de surface est de 45°. Cependant, ces FNC ont été en bonne partie altérées avant leur mesure au microscope. Il est donc difficile de comparer leur longueur moyenne avec les autres opérations de rainurage. Toutefois, les FNC avant altération sont plus présentes qu'à l'opération précédente OP30P3 45° CR20 X pour les mêmes vitesses. La présence de FNC en opposition et en avalant est comparable aux observations de Hintze et coll. pour un pli orienté à 45°. L'ARM est présent pour toutes les conditions de coupe d'une longueur moyenne de 0.11 mm en opposition. En avalant au centre et en sortie, la longueur moyenne de l'ARM est de 0.14 mm. Ainsi, la présence de

l'ARM est plus importante pour cette opération que lors de l'OP30P3 45° CR20 X. Pour un pli de surface à 45° les opérations précédentes n'ont pas présenté autant d'ARM. La forte présence d'ARM à tous les échantillons est causée par l'altération des FNC qui étaient présentes à tous les échantillons sur les photos prises dans la cellule robotisée.

### 3.3.10 Délaminations de l'opération OP50P5 -45° CR10 X

L'inspection de la deuxième opération sur la plaque P5 est effectuée avec un microscope muni d'une lentille à 20 agrandissements. L'objectif est de caractériser la délamination pour :

- une configuration du robot éloignée CR10;
- une orientation de plis de surface de -45° par rapport à la direction de rainurage;
- 3 vitesses de coupe et d'avance;
- une direction de rainurage X dans la cellule robotisée.

La plaque P5 est fabriquée par pose à la main des plis et cuite sous presse et vacuum. Le stratifié est le même que les autres opérations OP50P5 et de même fabrication que le stratifié P3 et P6. Ce stratifié comporte 24 plis. L'outil ayant rainuré deux opérations sur la plaque P4 et une sur la plaque P5 est utilisé à cette opération. Toutes les conditions de coupe rainurées sont observées. Aucune délamination n'est observée au pli inférieur et aucune FNC n'est observée au pli supérieur. Les opérations précédentes de rainurage avec un pli de surface à -45° ont aussi présenté soit très peu ou aucune FNC pour ces vitesses de coupe et d'avance. Les très longs arrachements de matière observés en opposition et en entrée à la Figure 3.176 ont été causés lors de l'opération d'alésage des trous de dégagement sur centre d'usinage avant le rainurage robotisé. En avalant, la longueur moyenne de l'ARM est de 0.08 mm au centre et en entrée au Figure 3.176 à Figure 3.179. En opposition, la LM de l'ARM est de 0.07 mm au centre. En sortie, la longueur moyenne de l'ARM est de 0.13 mm aux Figure 3.180 et Figure 3.181.

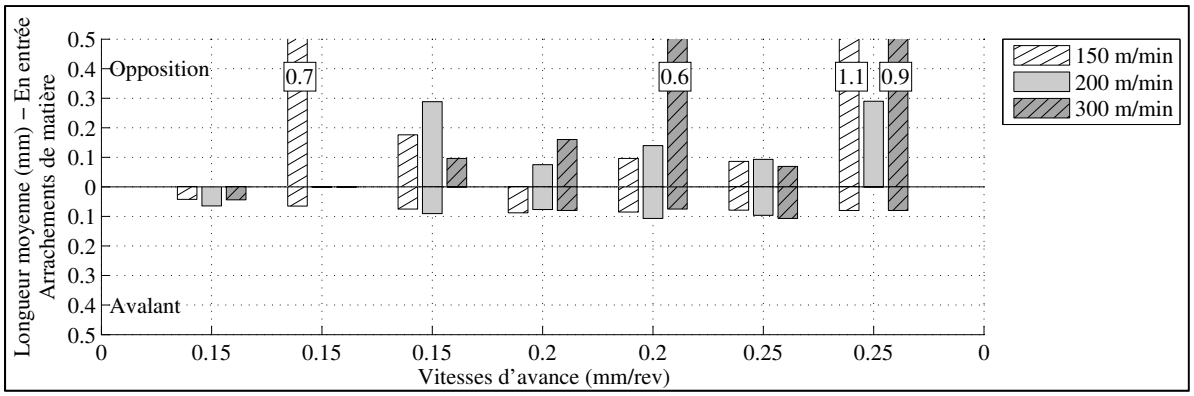



Figure 3.176 LM de l'ARM du pli supérieur en entrée de l'OP50P5 -45° CR10 X

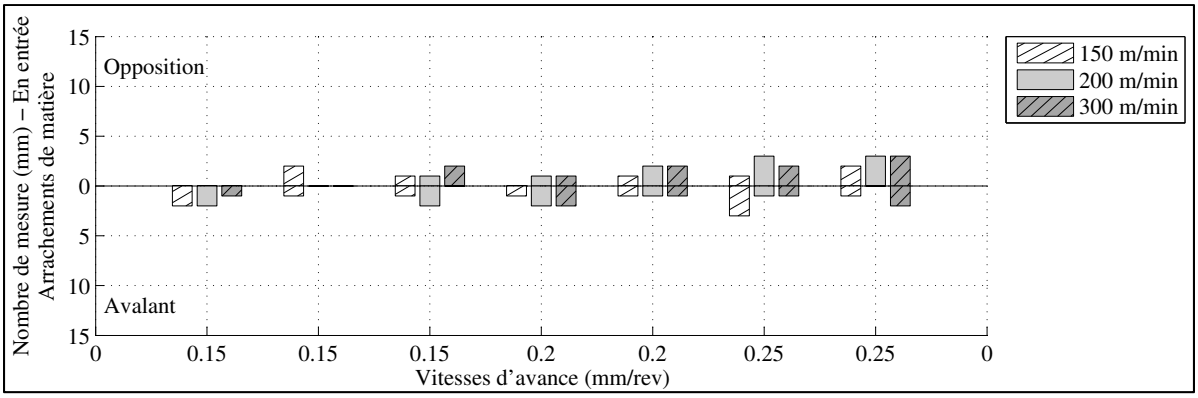



Figure 3.177 NM de l'ARM du pli supérieur en entrée de l'OP50P5 -45° CR10 X

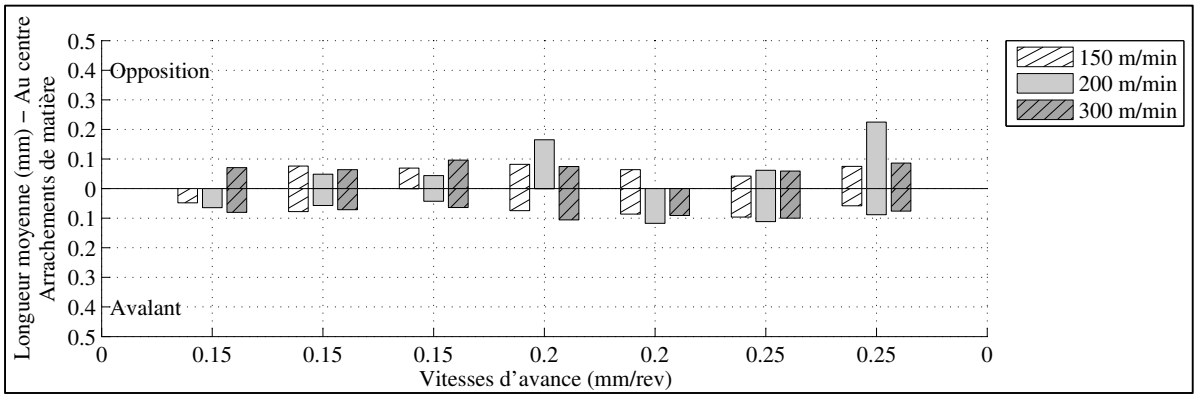



Figure 3.178 LM de l'ARM du pli supérieur au centre de l'OP50P5 -45° CR10 X

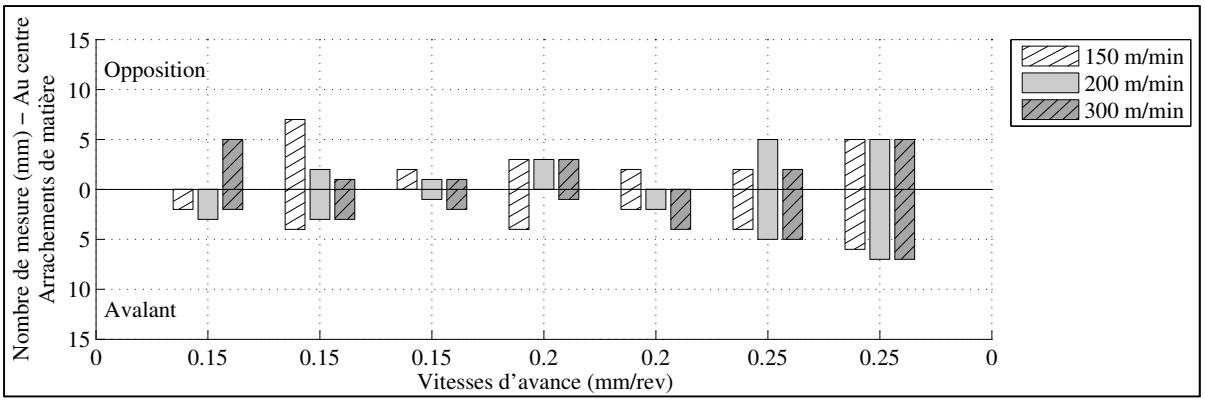



Figure 3.179 NM de l'ARM du pli supérieur au centre de l'OP50P5 -45° CR10 X

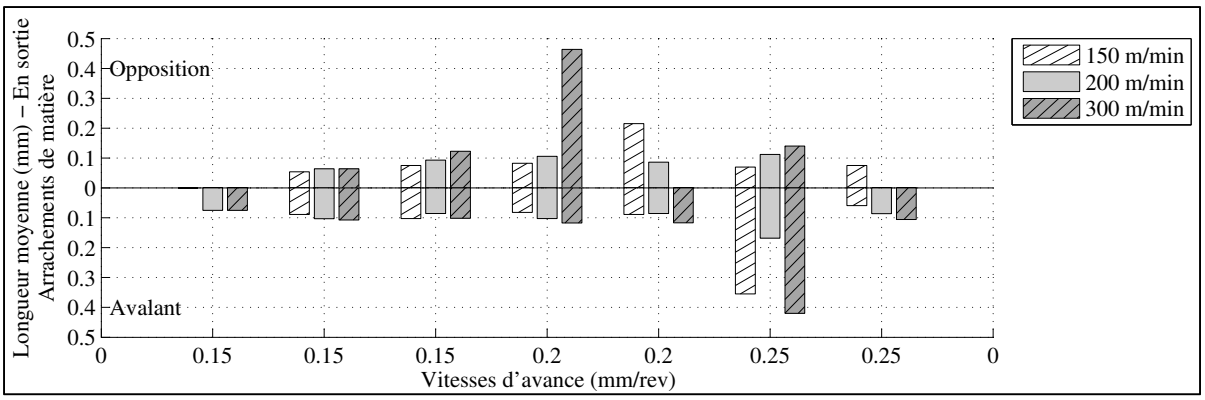



Figure 3.180 LM de l'ARM du pli supérieur en sortie de l'OP50P5 -45° CR10 X

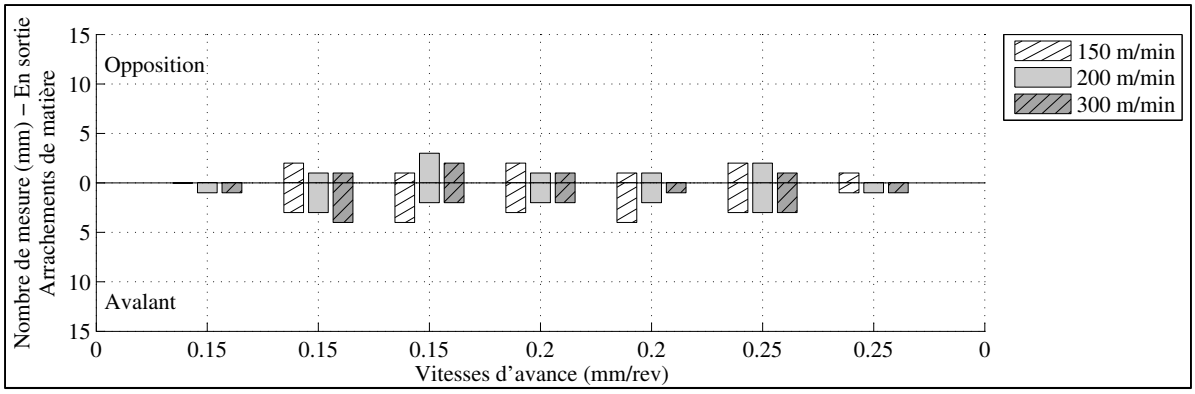



Figure 3.181 NM de l'ARM du pli supérieur en sortie de l'OP50P5 -45° CR10 X

#### 3.3.10.1 Conclusion

Aucune délamination n'est observée au pli inférieur et aucune FNC n'est observée au pli supérieur. Les opérations précédentes de rainurage avec un pli de surface à -45° ont aussi présenté très peu ou aucune FNC pour ces vitesses de coupe et d'avance. Au centre, l'ARM est présente pour toutes les conditions de coupe et sa LM est de 0.07 mm en opposition et de 0.08 mm en avalant. L'ARM est plus présent qu'aux opérations précédentes dont le pli de surface est à -45°. Cependant, la longueur moyenne de l'ARM est équivalente pour les mêmes vitesses. L'ARM est aussi présent qu'à l'OP50P5 45° CR10 Y précédente et d'une longueur moyenne inférieure.

### 3.3.11 Délaminations de l'opération OP50P5 -45° CR20 X

L'inspection de la troisième opération de la plaque P5 est effectuée avec un microscope muni d'une lentille à 20 agrandissements. L'objectif est de caractériser la délamination pour :

- une configuration du robot rapprochée CR20;
- une orientation de plis de surface de -45° par rapport à la direction de rainurage;
- 3 vitesses de coupe et d'avance;
- une direction de rainurage X dans la cellule robotisée.

La plaque P5 est fabriquée par pose à la main des plis et cuite sous presse et vacuum. Le stratifié est le même que les autres opérations OP50P5 et de même fabrication que le stratifié P3 et P6. Ce stratifié comporte 24 plis. L'outil ayant rainuré deux opérations sur la plaque P4 et deux sur la plaque P5 est utilisé à cette opération. Toutes les conditions de coupe rainurées sont observées. Aucune délamination du pli de CFRP inférieur et aucune FNC du pli supérieur n'est observée. Les opérations précédentes de rainurage avec un pli de surface à -45° ont aussi présenté soit très peu ou aucune FNC pour ces vitesses de coupe et d'avance. Les très longs arrachements de matière observés en opposition et en entrée à la Figure 3.182 ont été causés lors de l'opération d'alésage des trous de dégagement sur centre d'usinage

avant le rainurage robotisé. En avalant et en entrée, la LM de l'ARM est de 0.09 mm/rev. Au centre, la LM de l'ARM est de 0.07 mm en opposition et 0.08 mm en avalant aux Figure 3.184 et Figure 3.185. En sortie, la LM de l'ARM est de 0.06 mm en opposition et de 0.10 mm en avalant.

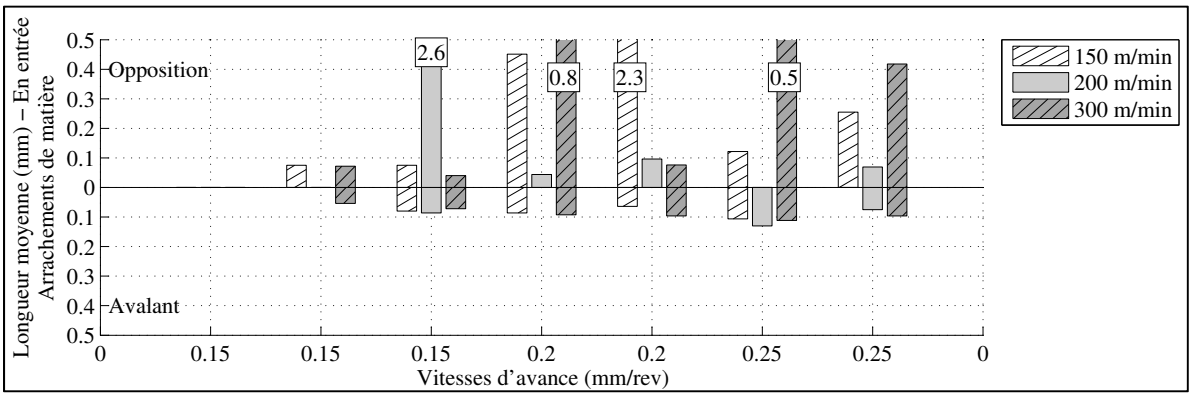



Figure 3.182 LM de l'ARM du pli supérieur en entrée de l'OP50P5 -45° CR20 X

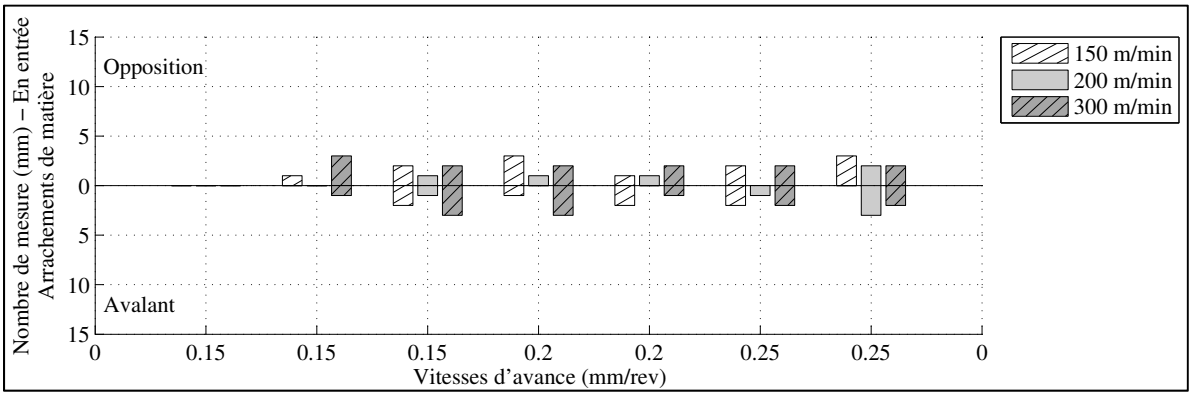



Figure 3.183 NM de l'ARM du pli supérieur en entrée de l'OP50P5 -45° CR20 X

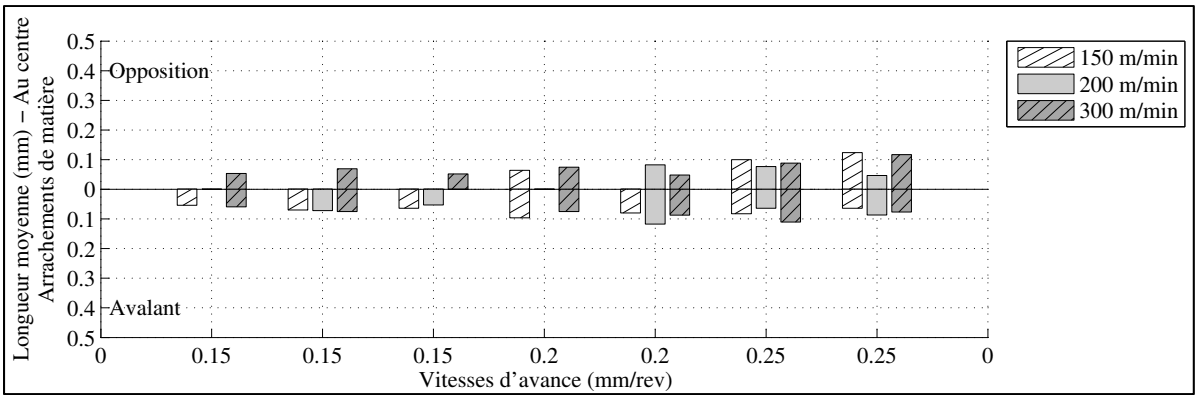



Figure 3.184 LM de l'ARM du pli supérieur au centre de l'OP50P5 -45° CR20 X

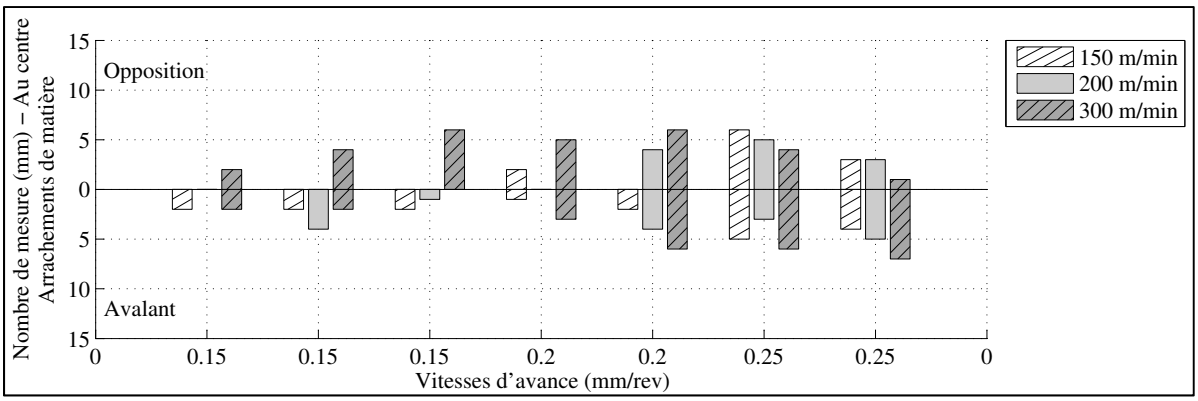



Figure 3.185 NM de l'ARM du pli supérieur au centre de l'OP50P5 -45° CR20 X

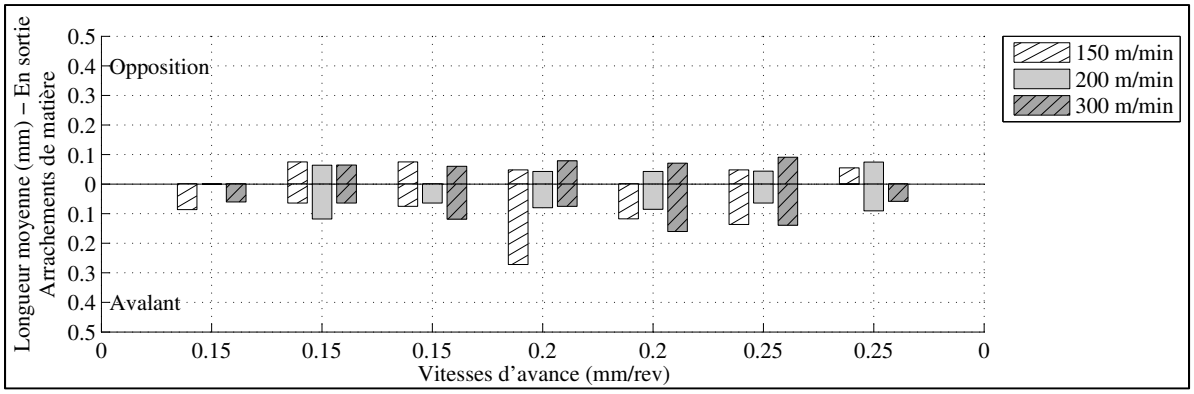



Figure 3.186 LM de l'ARM du pli supérieur en sortie de l'OP50P5 -45° CR20 X

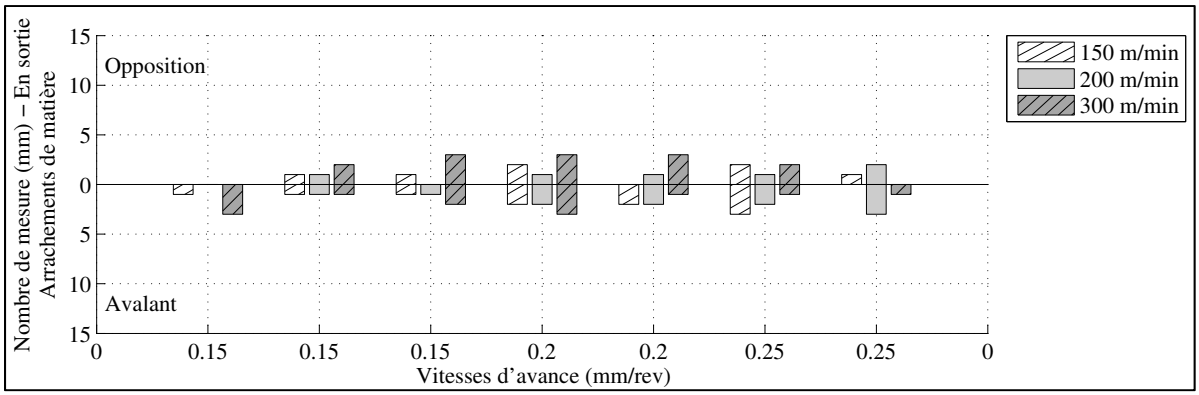



Figure 3.187 NM de l'ARM du pli supérieur en sortie de l'OP50P5 -45° CR20 X

#### 3.3.11.1 Conclusion

Aucune délamination du pli inférieur et aucune FNC du pli supérieur ne sont observées. Les opérations précédentes de rainurage avec un pli de surface à -45° ont aussi présenté très peu ou aucune FNC pour ces vitesses de coupe et d'avance. La LM de l'ARM au centre est de 0.07 mm en opposition et 0.08 mm en avalant. La présence et la longueur moyenne de l'ARM semblent équivalentes à l'OP50P5 -45° CR10 X et inférieures à l'OP50P5 45° CR10 Y. Cependant, l'ARM est plus présent qu'aux autres opérations précédentes pour les mêmes vitesses et un pli de surface à -45°.

### 3.3.12 Délaminations de l'opération OP50P5 45° CR20 Y

L'inspection de la quatrième opération sur la plaque P5 est effectuée avec un microscope muni d'une lentille à 20 agrandissements. L'objectif est de caractériser la délamination pour :

- une configuration du robot rapprochée CR20;
- une orientation de plis de surface de 45° par rapport à la direction de rainurage;
- 3 vitesses de coupe et d'avance;
- une direction de rainurage Y dans la cellule robotisée.

La plaque P5 est fabriquée par pose à la main des plis et cuite sous presse et vacuum. Le stratifié est le même que les autres opérations OP50P5 et de même fabrication que le stratifié

P3 et P6. Ce stratifié comporte 24 plis. L'outil ayant rainuré deux opérations sur la plaque P4 et trois sur la plaque P5 est utilisé à cette opération. Toutes les conditions de coupe rainurées sont observées. Aucune délamination au pli inférieur n'est observée. Les photos prises avant l'inspection sur CMM des échantillons rainurés présentent des FNC sur toute la longueur des échantillons et pour toutes les conditions de coupe de cette opération dont le pli de surface est de 45°. La longueur de fibres non coupées était suffisante pour gêner le passage du rubis lors de l'inspection dimensionnelle sur CMM alors les fibres ont été altérées avant l'inspection de la délamination au microscope. Il y a plus de FNC mesurées suite à leur altération sur CMM que lors de l'opération précédente OP50P5 45° CR10 Y. À 300 m/min en avalant, les FNC ne sont pas altérées et elles sont fortement présentes aux Figure 3.188 à Figure 3.199. Au centre et en avalant, la LM des FNC normales aux plis est de 0.06 mm et la LM des FNC normales à la surface rainurée est de 0.21 mm. L'altération des FNC après l'opération de rainurage a générée l'ARM mesuré au microscope. À 300 m/min en avalant, l'ARM est moins présent qu'aux autres vitesses dont les FNC ont été plus altérées. La longueur moyenne de l'ARM est de 0.13 mm en opposition et 0.14 mm en avalant aux Figure 3.200 à Figure 3.205. Les très longs arrachements de matière observés en entrée et en sortie ont été causés lors de l'opération d'alésage des trous de dégagement sur centre d'usinage avant le rainurage robotisé.

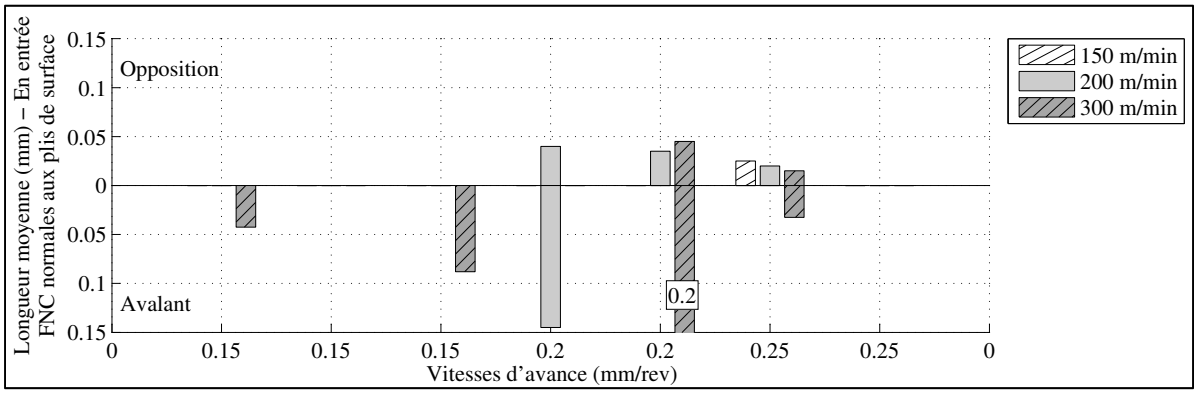



Figure 3.188 LM de FNC normales au pli supérieur en entrée de l'OP50P5 45° CR20 Y

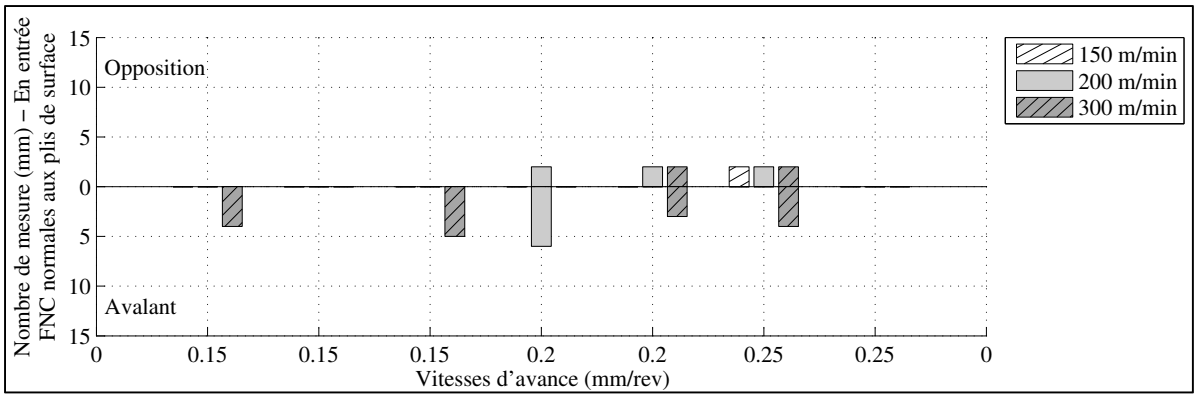



Figure 3.189 NM de FNC normales au pli supérieur en entrée de l'OP50P5 45° CR20 Y

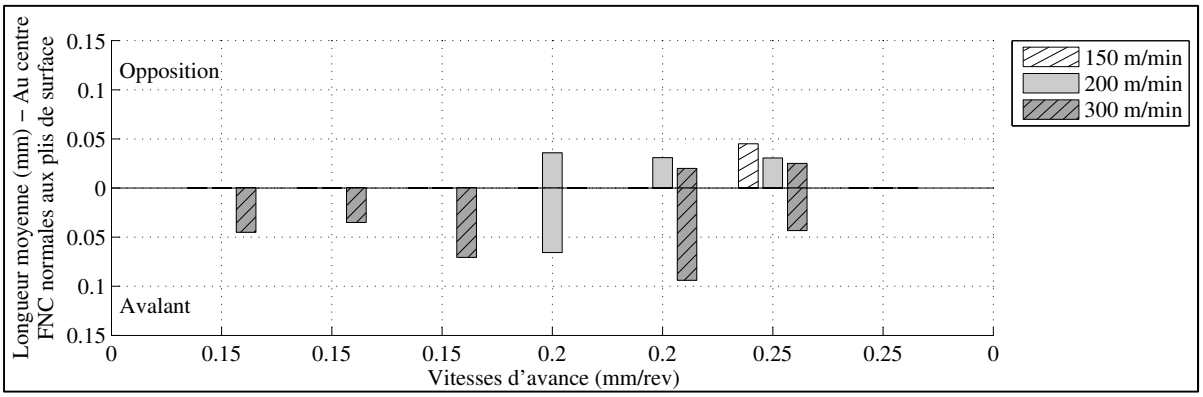



Figure 3.190 LM de FNC normales au pli supérieur au centre de l'OP50P5 45° CR20 Y

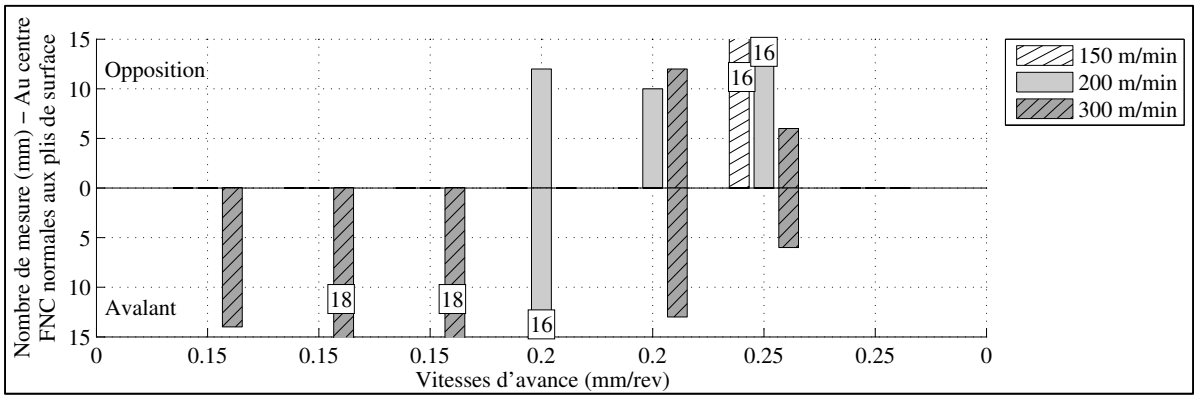



Figure 3.191 NM de FNC normales au pli supérieur au centre de l'OP50P5 45° CR20 Y

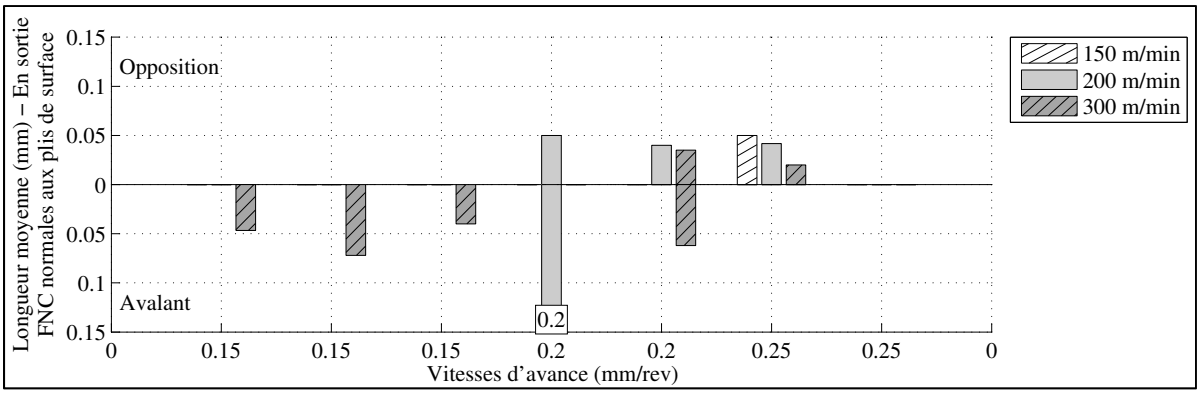



Figure 3.192 LM de FNC normales au pli supérieur en sortie de l'OP50P5 45° CR20 Y

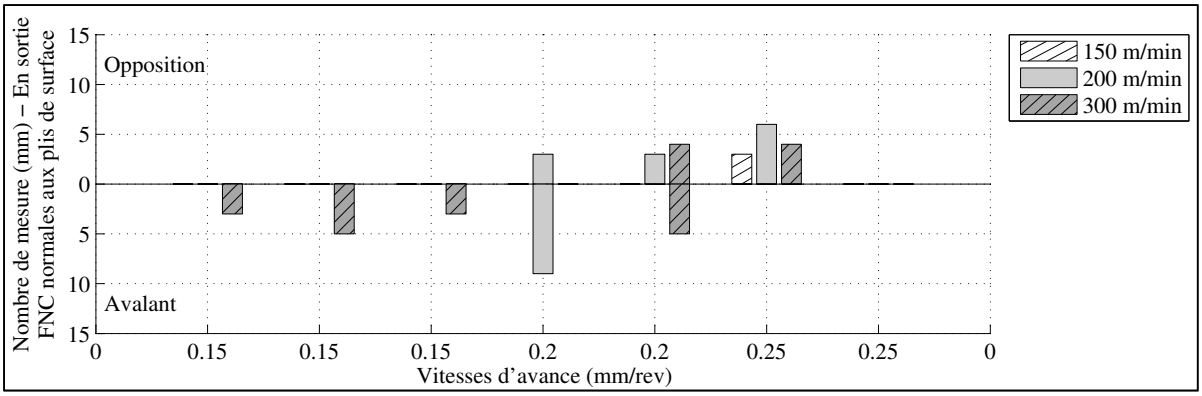



Figure 3.193 NM de FNC normales au pli supérieur en sortie de l'OP50P5 45° CR20 Y

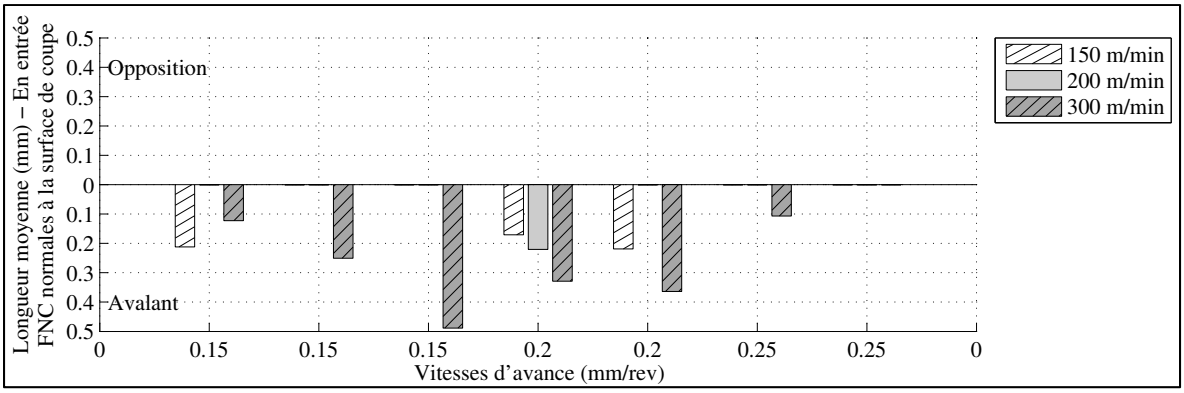



Figure 3.194 LM de FNC normales à la surface rainurée en entrée de l'OP50P5 45° CR20 Y

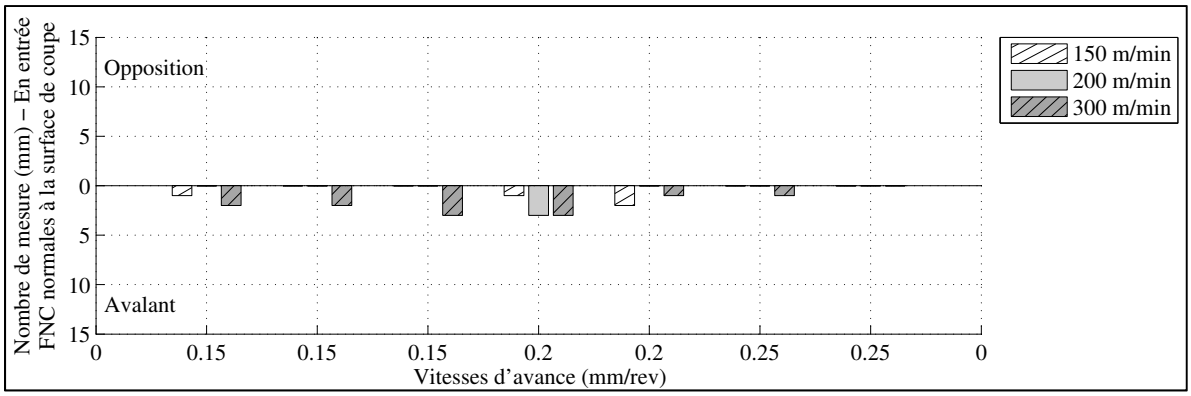



Figure 3.195 NM de FNC normales à la surface rainurée en entrée de l'OP50P5 45° CR20 Y

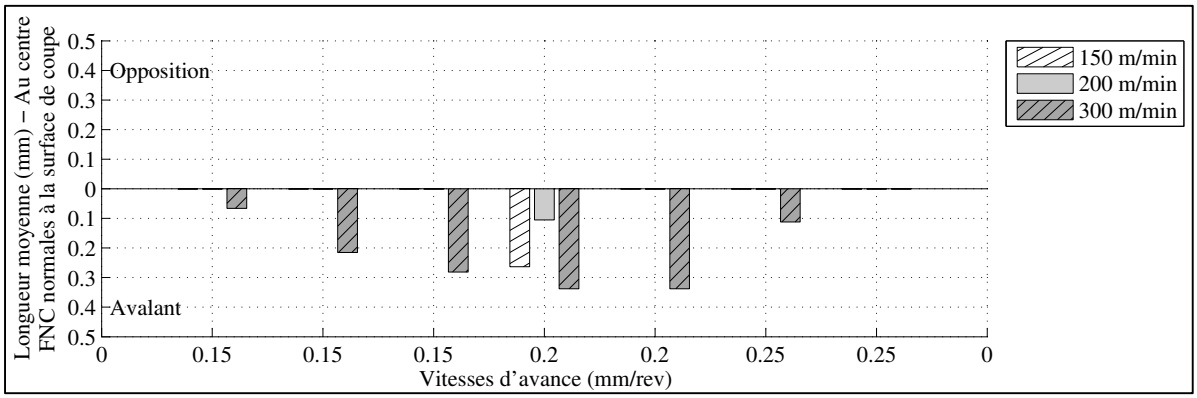



Figure 3.196 LM de FNC normales à la surface rainurée au centre de l'OP50P5 45° CR20 Y

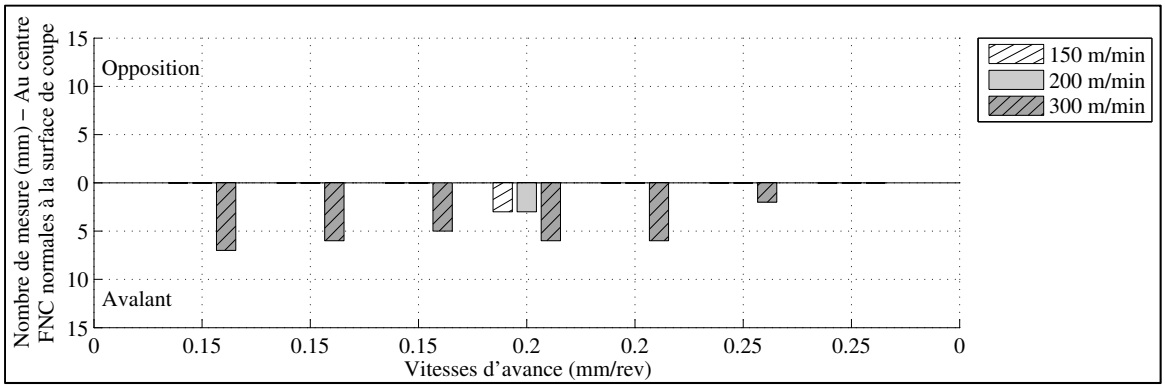



Figure 3.197 NM de FNC normales à la surface rainurée au centre de l'OP50P5 45° CR20 Y

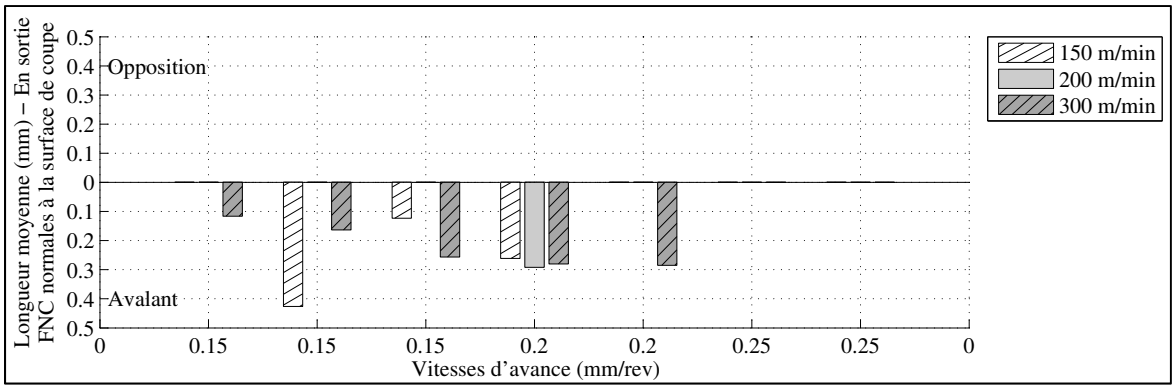



Figure 3.198 LM de FNC normales à la surface rainurée en sortie de l'OP50P5 45° CR20 Y

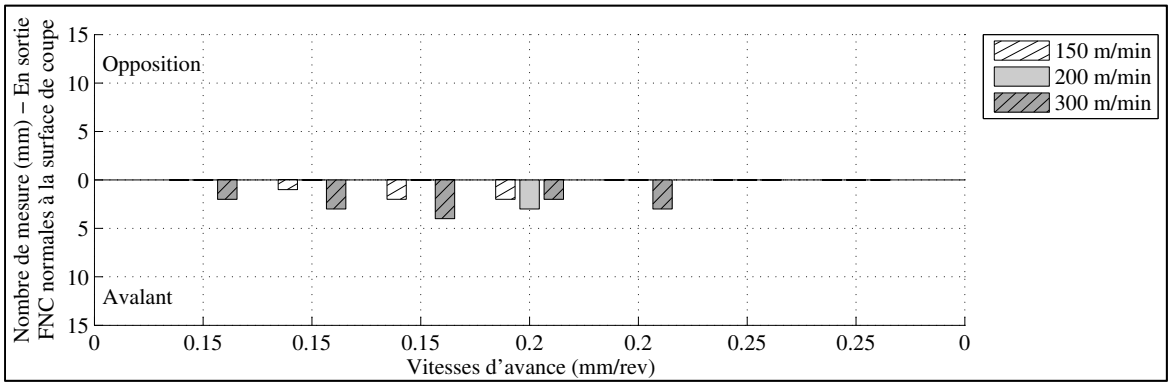



Figure 3.199 NM de FNC normales à la surface rainurée en sortie de l'OP50P5 45° CR20 Y

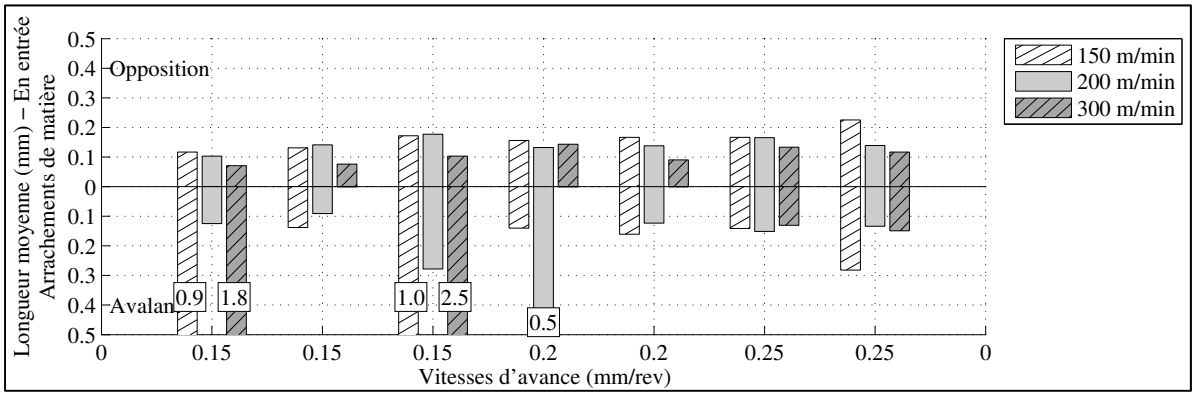



Figure 3.200 LM de l'ARM en entrée de l'OP50P5 45° CR20 Y

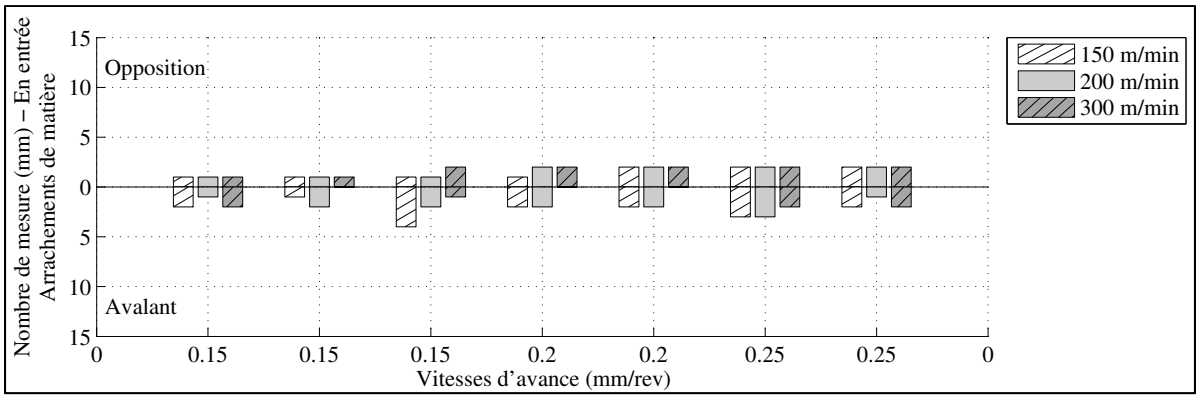



Figure 3.201 NM de l'ARM en entrée de l'OP50P5 45° CR20 Y

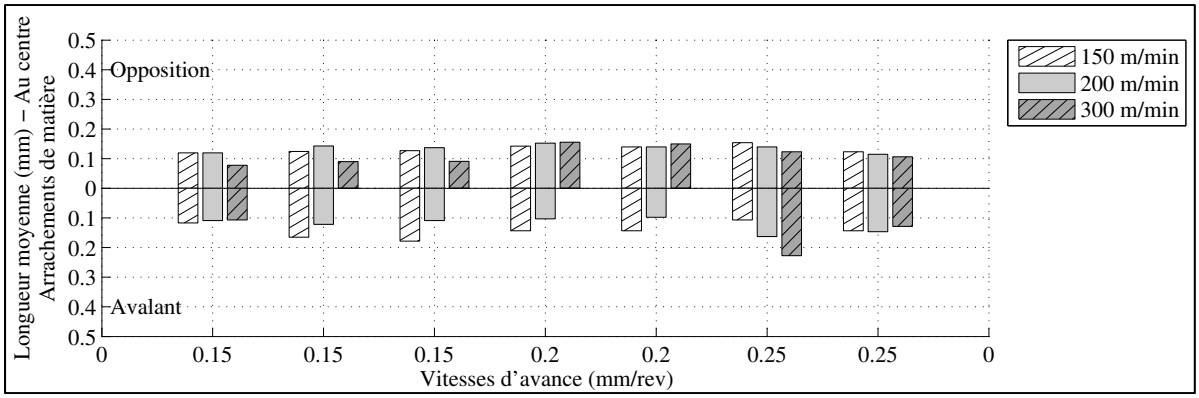



Figure 3.202 LM de l'ARM au centre de l'OP50P5 45° CR20 Y

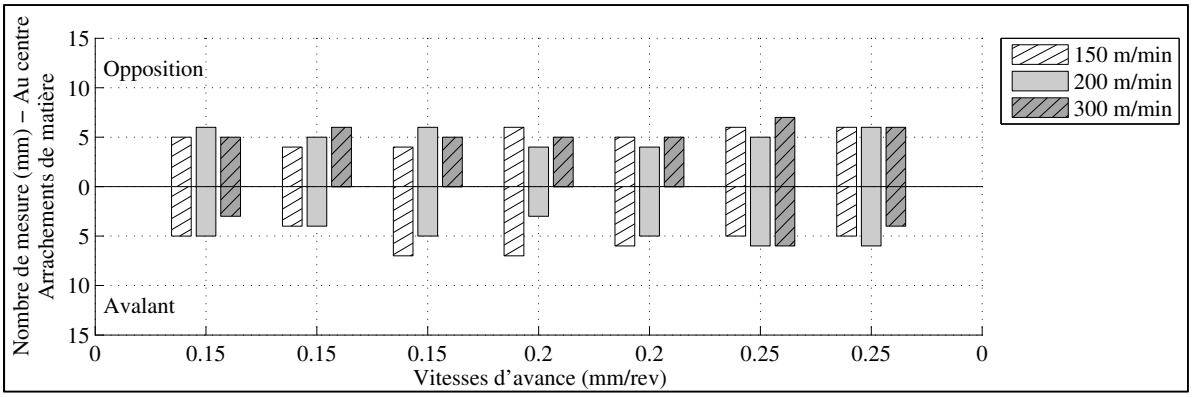



Figure 3.203 NM de l'ARM au centre de l'OP50P5 45° CR20 Y

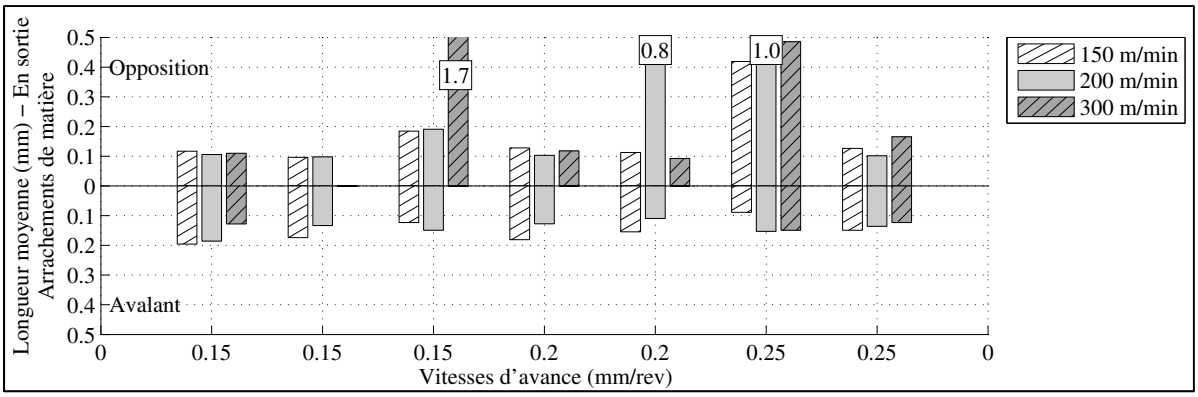



Figure 3.204 LM de l'ARM en sortie de l'OP50P5 45° CR20 Y

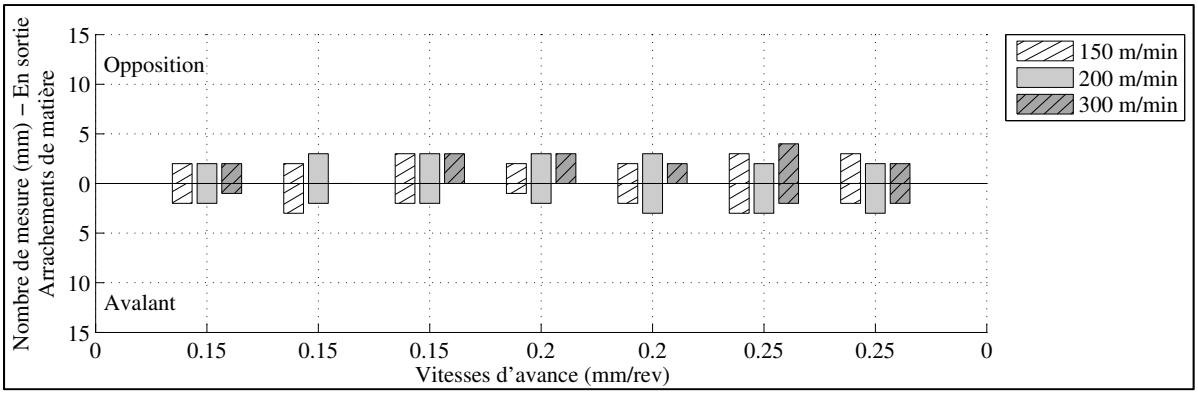



Figure 3.205 NM de l'ARM en sortie de l'OP50P5 45° CR20 Y

#### 3.3.12.1 Conclusion

Aucune délamination au pli inférieur n'est observée. Les photos d'échantillons rainurés présentent des FNC sur toute la longueur des échantillons et pour toutes les conditions de coupe. Cependant, ces FNC ont été altérées avant leur mesure au microscope tel qu'à l'opération précédente OP50P5 45° CR10 Y. Il est donc difficile de comparer leur longueur moyenne avec les autres opérations de rainurage. Toutefois, la présence de FNC avant altération est semblable à l'opération OP50P5 45° CR10 Y et plus importante qu'à l'opération OP30P3 45° CR20 X. La présence de FNC en avalant et en opposition est comparable aux observations de Hintze et coll. pour un pli orienté à 45°. L'ARM est présent pour toutes les vitesses à l'exception de 300 m/min et 0.20 mm/rev, en avalant, où les FNC n'ont pas été altérées. La longueur moyenne de l'ARM est de 0.13 mm en opposition et

0.14 mm en avalant. La présence et la longueur moyenne de l'ARM sont plus importantes qu'à l'opération OP30P3 45° CR20 X et sont semblables à la première opération OP50P5 45° CR10 Y pour les mêmes vitesses. La LM de l'ARM causée par l'altération des FNC est plus importante qu'aux deux opérations précédentes de cette plaque dont le pli de surface est de -45°.

### 3.3.13 Délaminations de l'opération OP50P6 -45° CR10 Y

L'inspection de la première opération de rainurage robotisée de la plaque P6 est effectuée avec un microscope muni d'une lentille à 20 agrandissements. L'objectif est de caractériser la délamination pour :

- une configuration du robot éloignée CR10;
- une orientation de plis de surface de -45° par rapport à la direction de rainurage;
- 3 vitesses de coupe et d'avance;
- une direction de rainurage Y dans la cellule robotisée.

La plaque P6 est fabriquée par pose à la main des plis et cuite sous presse et vacuum. Le stratifié est le même que les autres opérations OP50P6 et de même fabrication que le stratifié P3 et P5. Ce stratifié comporte 24 plis. L'outil ayant rainuré les deux opérations sur la plaque P3 est utilisé à cette opération. Toutes les conditions de coupe rainurées sont observées.

Aucune délamination au pli inférieur n'est observée et aucune FNC au pli supérieur n'est aussi observée. Aucun arrachement de matière n'est observé en opposition à 0.15 mm/rev aux Figure 3.206 à Figure 3.211. La longueur moyenne de l'ARM est de 0.06 mm/rev en opposition et de 0.07 mm en avalant. L'ARM d'une forte longueur en sortie et en avalant est causée avant rainurage lors de l'opération d'alésage des trous de dégagement sur centre d'usinage.

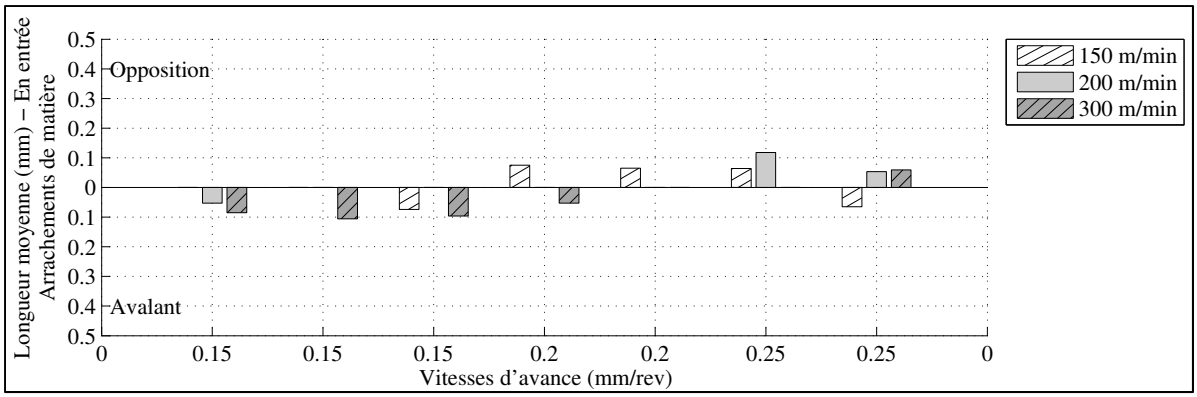



Figure 3.206 LM de l'ARM en entrée de l'OP50P6 -45° CR10 Y

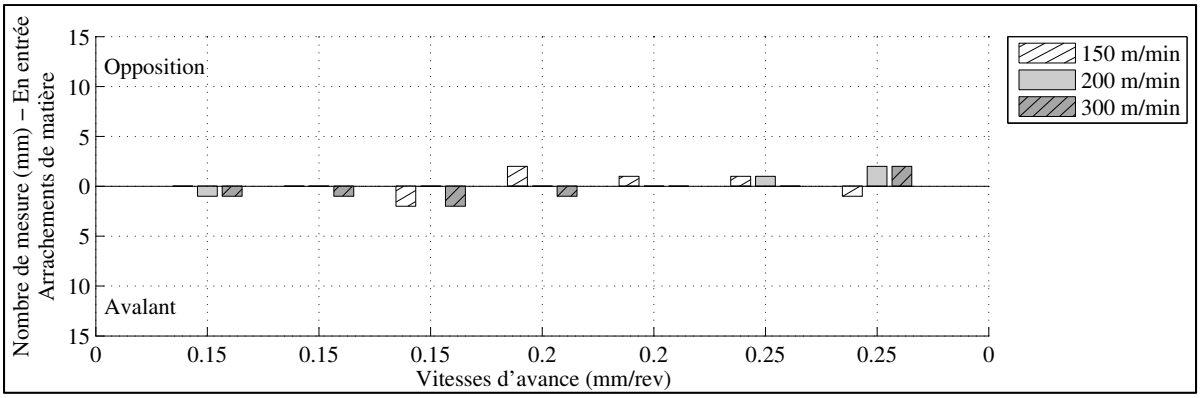



Figure 3.207 NM de l'ARM en entrée de l'OP50P6 -45° CR10 Y

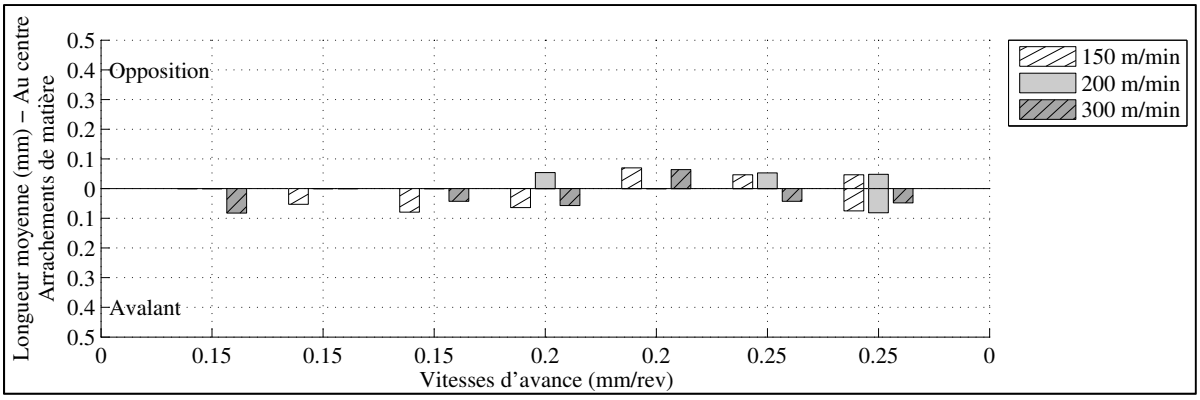



Figure 3.208 LM de l'ARM au centre de l'OP50P6 -45° CR10 Y

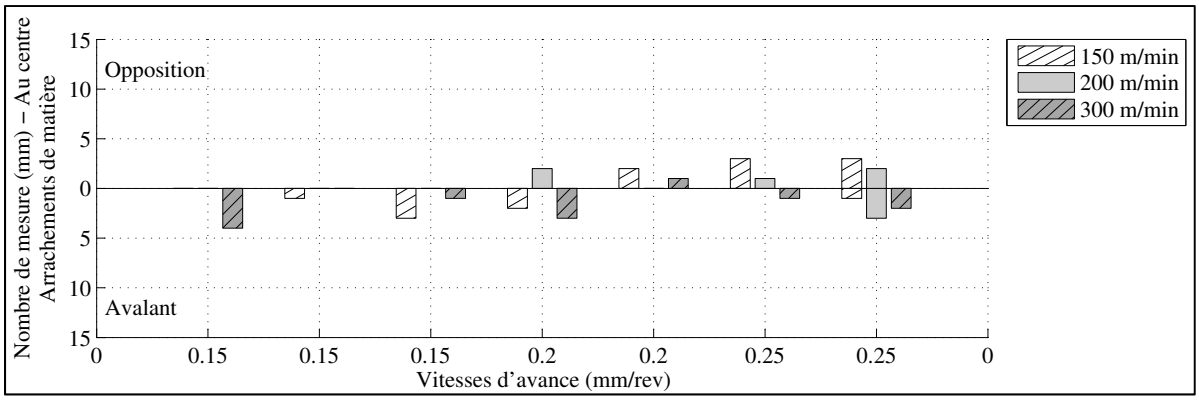



Figure 3.209 NM de l'ARM au centre de l'OP50P6 -45° CR10 Y

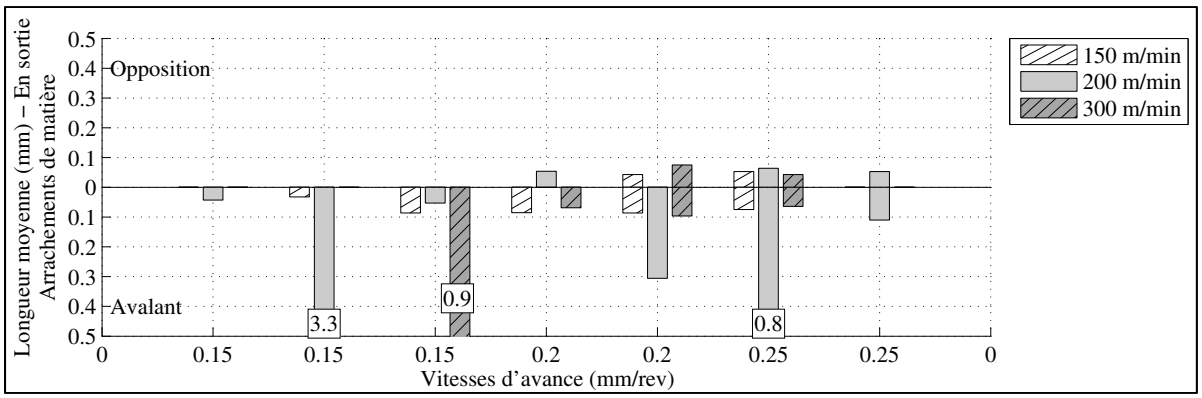



Figure 3.210 LM de l'ARM en sortie de l'OP50P6 -45° CR10 Y

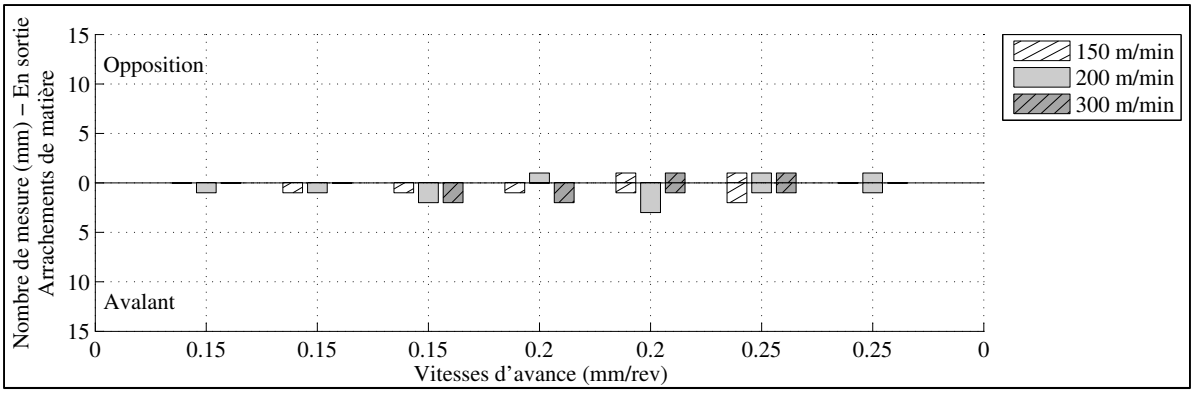



Figure 3.211 NM de l'ARM en sortie de l'OP50P6 -45° CR10 Y

#### 3.3.13.1 Conclusion

Aucune délamination au pli inférieur n'est observée et aucune FNC au pli supérieur n'est aussi observée. Les opérations précédentes de rainurage avec un pli de surface à -45° n'ont aussi présenté aucune FNC pour ces vitesses de coupe et d'avance. Un seul échantillon présente des FNC en opposition de 0.06 mm à 150 m/min et 0.20 mm/rev lors de l'OP30P3 -45° CR20 X précédente. Aucun arrachement de matière n'est observé en opposition à 0.15 mm/rev. Au centre, la longueur moyenne de l'ARM est de 0.05 mm/rev en opposition et de 0.06 mm en avalant. La présence et la longueur moyenne de l'ARM sont inférieures aux opérations OP30P3 -45° CR20 X, OP20P4 -45° CR20 X et aux 4 opérations OP50P5 pour les présentes vitesses. La présence et la LM de l'ARM sont supérieures aux opérations OP20P1 -45° CR20 X et OP10P2 -45° pour les présentes vitesses.

### 3.3.14 Délaminations de l'opération OP50P6 45° CR10 X

L'inspection de la deuxième opération de rainurage robotisée de la plaque P6 est effectuée avec un microscope muni d'une lentille à 20 agrandissements. L'objectif est de caractériser la délamination pour :

- une configuration du robot éloignée CR10;
- une orientation de plis de surface de 45° par rapport à la direction de rainurage;
- 3 vitesses de coupe et d'avance;
- une direction de rainurage X dans la cellule robotisée.

La plaque P6 est fabriquée par pose à la main des plis et cuite sous presse et vacuum. Le stratifié est le même que les autres opérations OP50P6 et de même fabrication que le stratifié P3 et P5. Ce stratifié comporte 24 plis. L'outil ayant rainuré les deux opérations sur la plaque P3 et une première de la plaque P6 est utilisé à cette opération. Toutes les conditions de coupe rainurées sont observées.

Aucune délamination au pli inférieur n'est observée. Au pli supérieur, les photos telles qu'à la Figure 3.212 des échantillons rainurés présentes des FNC sur toute la longueur des échantillons et d'une longueur plus importante en opposition qu'en avalant. La longueur de fibres non coupées en opposition était suffisante pour gêner le passage du rubis lors de l'inspection dimensionnelle sur CMM alors les fibres ont été altérées avant l'inspection de la délamination au microscope. Les FNC en opposition sont altérées et quasi-absentes à la suite de leurs mesures aux Figure 3.213 à Figure 3.224. Au centre et en avalant, la LM des FNC normales aux plis est de 0.07 mm et la LM des FNC normales à la surface rainurée est de 0.23 mm.

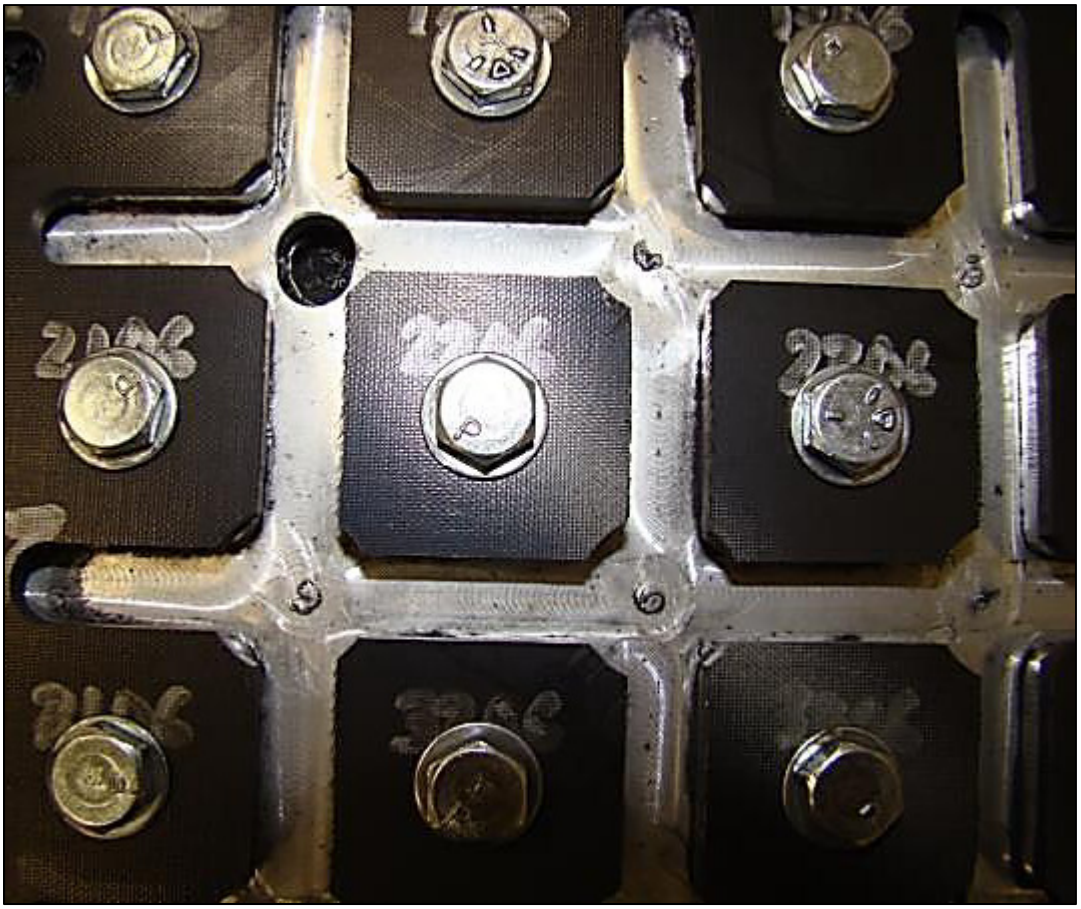


Figure 3.212 FNC de l'OP50P5 45° CR10 X d'une longueur plus importante en opposition (Rainures verticales rainurées du haut vers le bas)

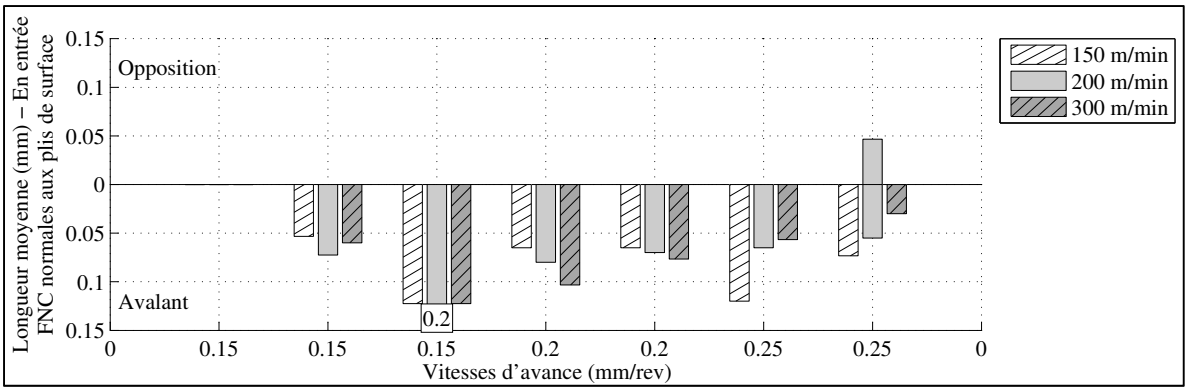



Figure 3.213 LM de FNC normales au pli supérieur en entrée de l'OP50P6 45° CR10 X

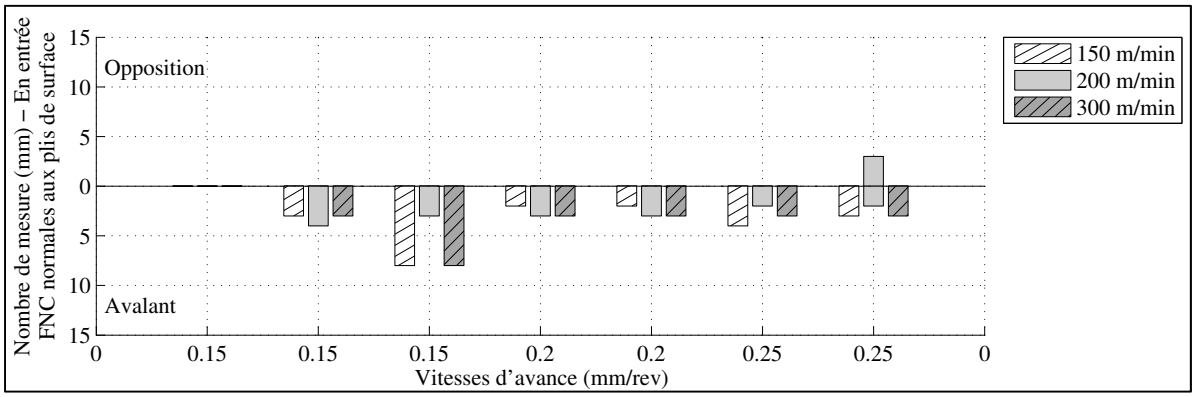



Figure 3.214 NM de FNC normales au pli supérieur en entrée de l'OP50P6 45° CR10 X

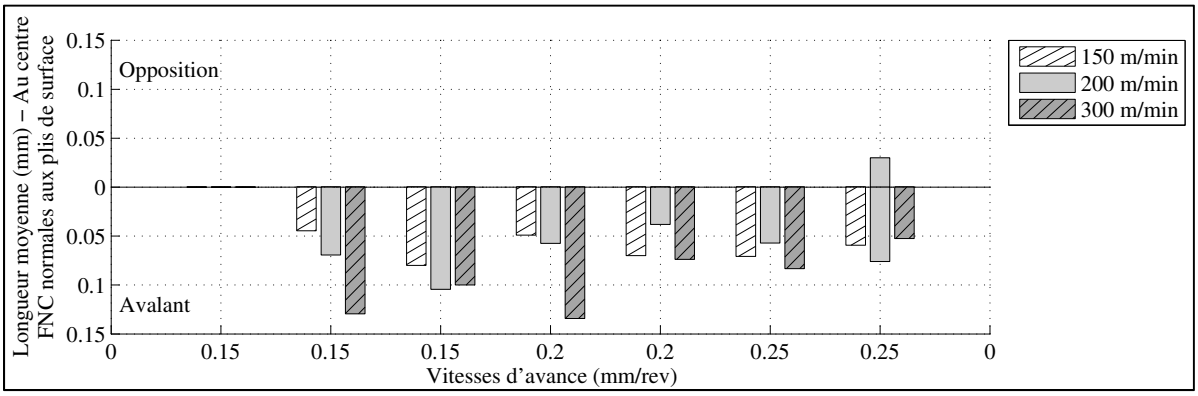



Figure 3.215 LM de FNC normales au pli supérieur au centre de l'OP50P6 45° CR10 X

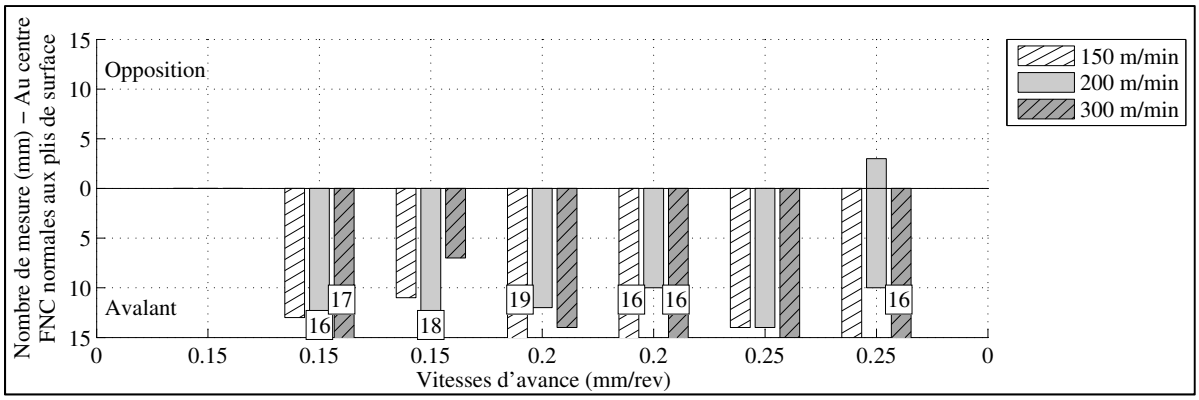



Figure 3.216 NM de FNC normales au pli supérieur au centre de l'OP50P6 45° CR10 X

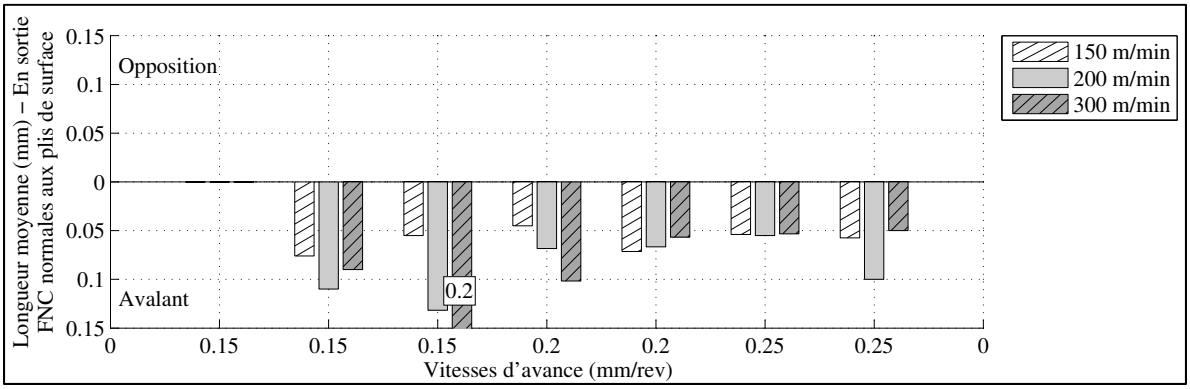



Figure 3.217 LM de FNC normales au pli supérieur en sortie de l'OP50P6 45° CR10 X

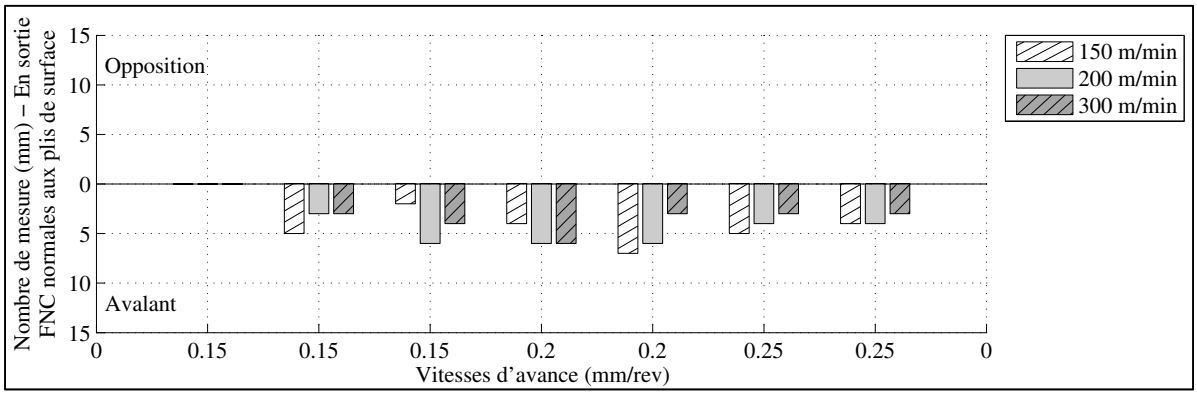



Figure 3.218 NM de FNC normales au pli supérieur en sortie de l'OP50P6 45° CR10 X

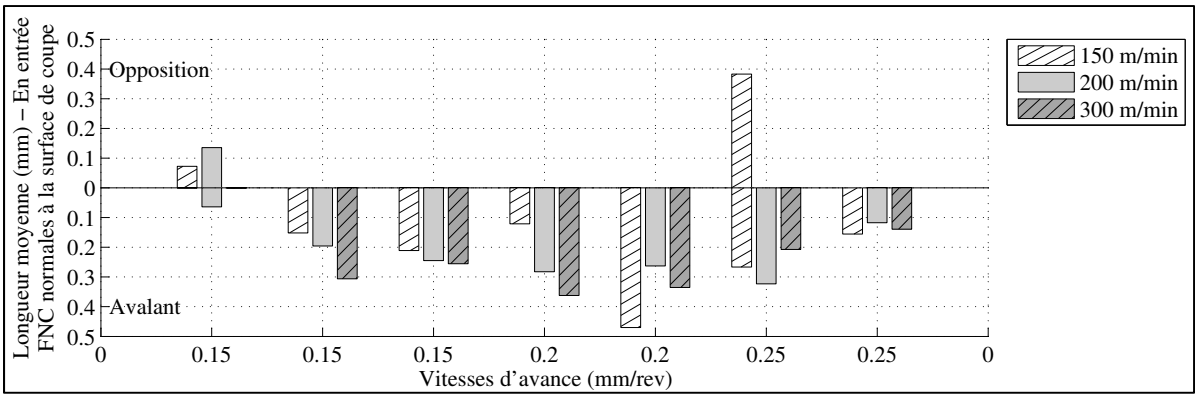



Figure 3.219 LM de FNC normales à la surface rainurée en entrée de l'OP50P6 45° CR10 X

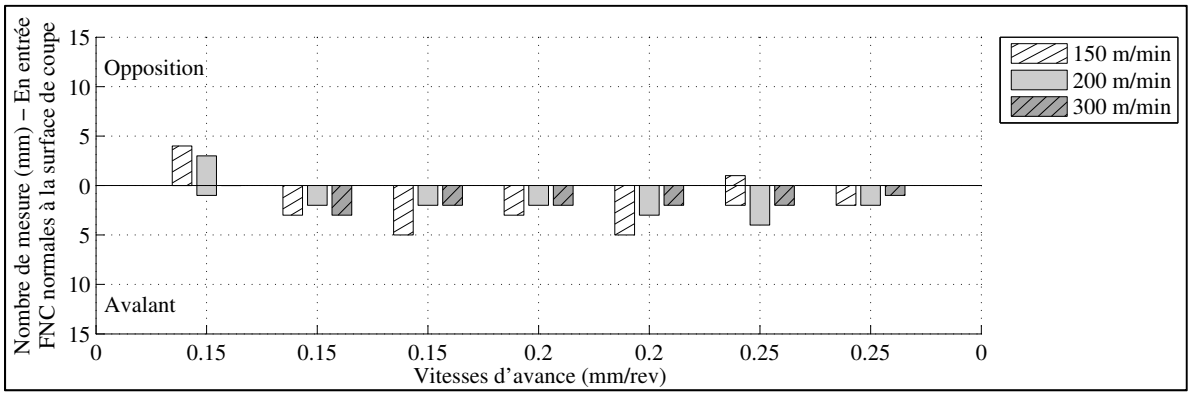



Figure 3.220 NM de FNC normales à la surface rainurée en entrée de l'OP50P6 45° CR10 X

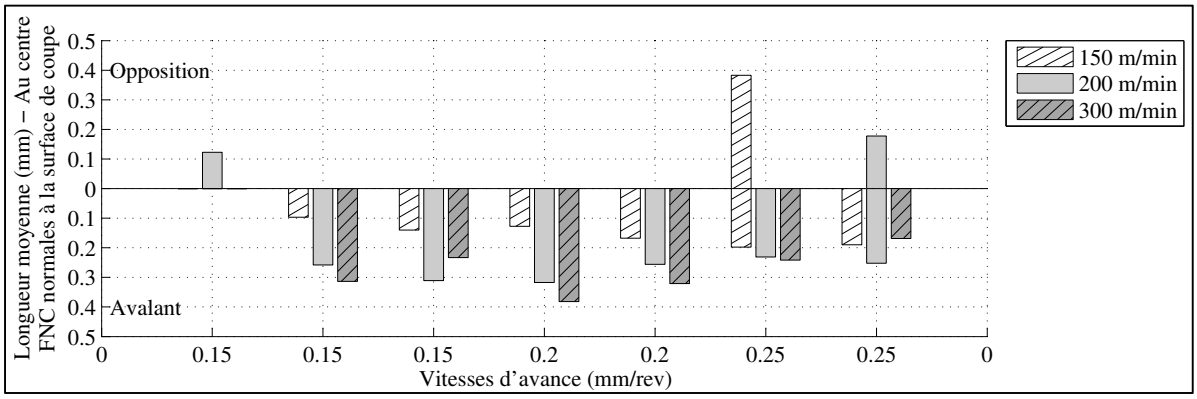



Figure 3.221 LM de FNC normales à la surface rainurée au centre de l'OP50P6 45° CR10 X

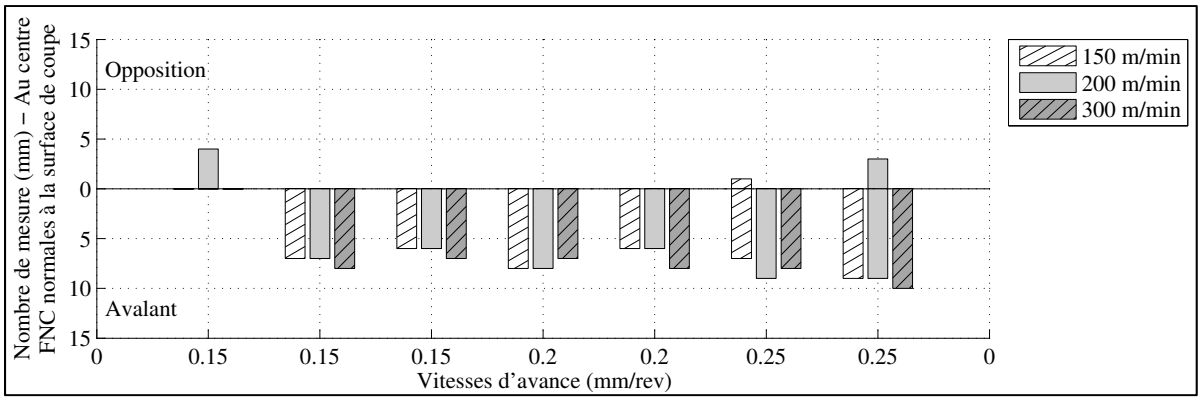



Figure 3.222 NM de FNC normales à la surface rainurée au centre de l'OP50P6 45° CR10 X

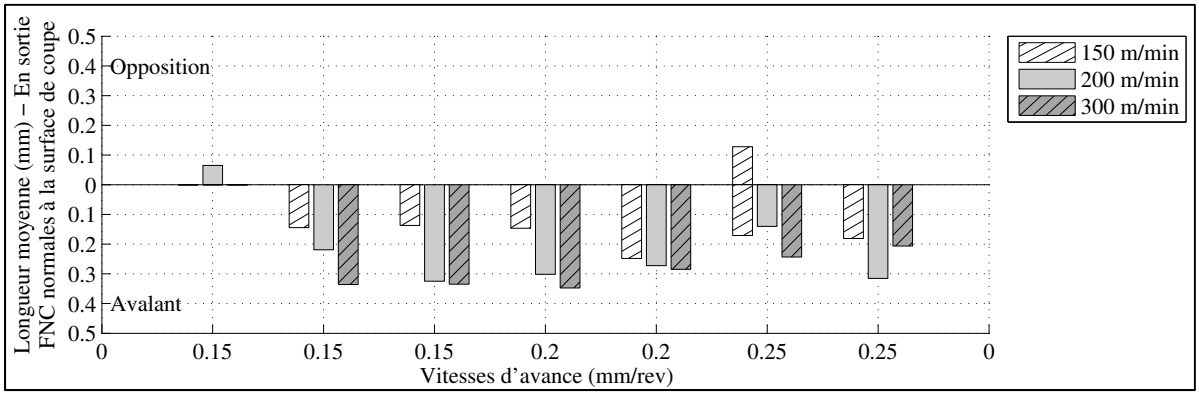



Figure 3.223 LM de FNC normales à la surface rainurée en sortie de l'OP50P6 45° CR10 X

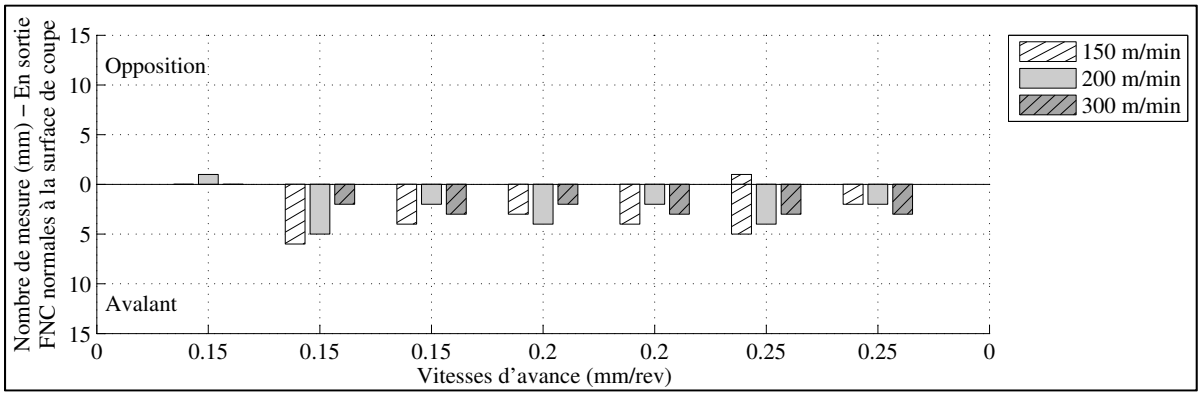



Figure 3.224 NM de FNC normales à la surface rainurée en sortie de l'OP50P6 45° CR10 X

À l'inverse des FNC, les ARM sont présents surtout en opposition aux Figure 3.225 à Figure 3.230. Ces ARM en opposition semblent être causés par l'altération des FNC lors de l'inspection sur CMM pour permettre le passage du palpeur. Ainsi, les FNC se sont transformées en ARM et cela expliquerait la forte présence d'ARM en opposition pour un pli de surface orienté à 45°. La longueur moyenne de l'ARM mesuré au centre est de 0.07 mm en opposition.

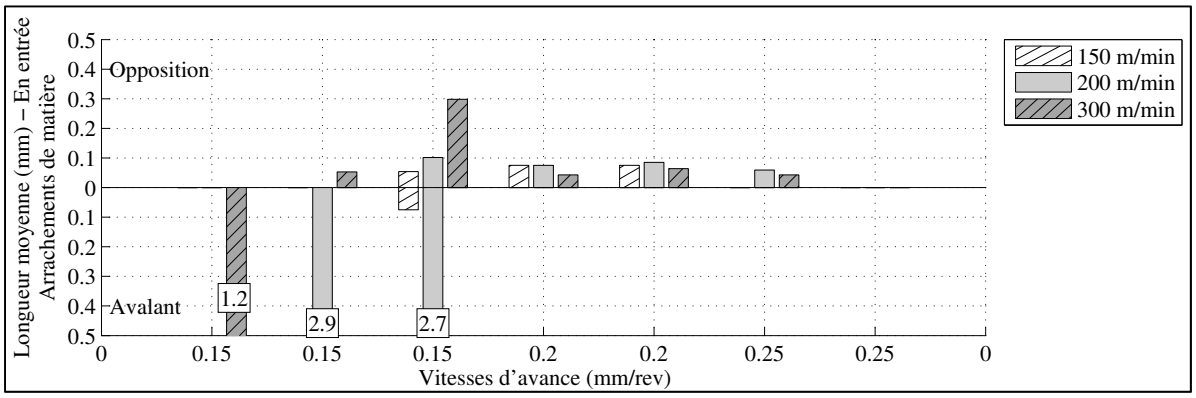



Figure 3.225 LM de l'ARM en entrée de l'OP50P6 45° CR10 X

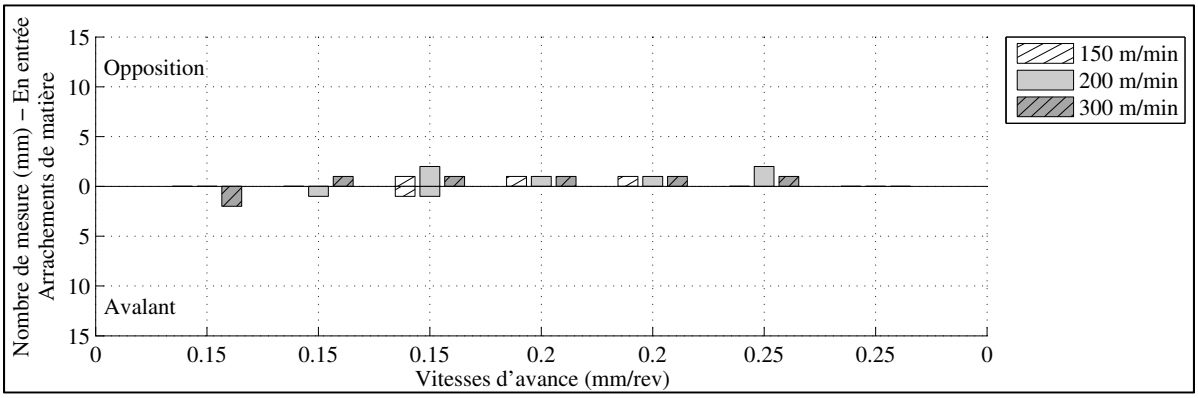



Figure 3.226 NM de l'ARM en entrée de l'OP50P6 45° CR10 X

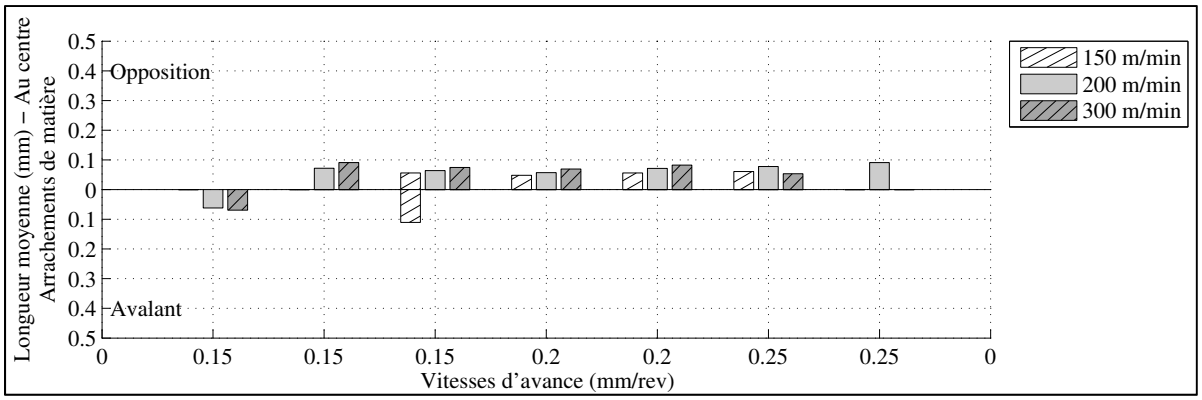



Figure 3.227 LM de l'ARM au centre de l'OP50P6 45° CR10 X

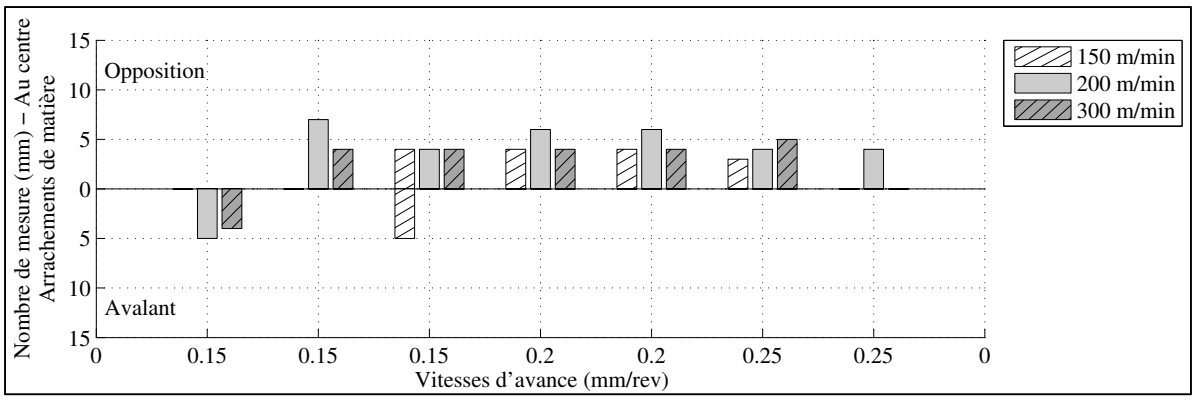



Figure 3.228 NM de l'ARM au centre de l'OP50P6 45° CR10 X

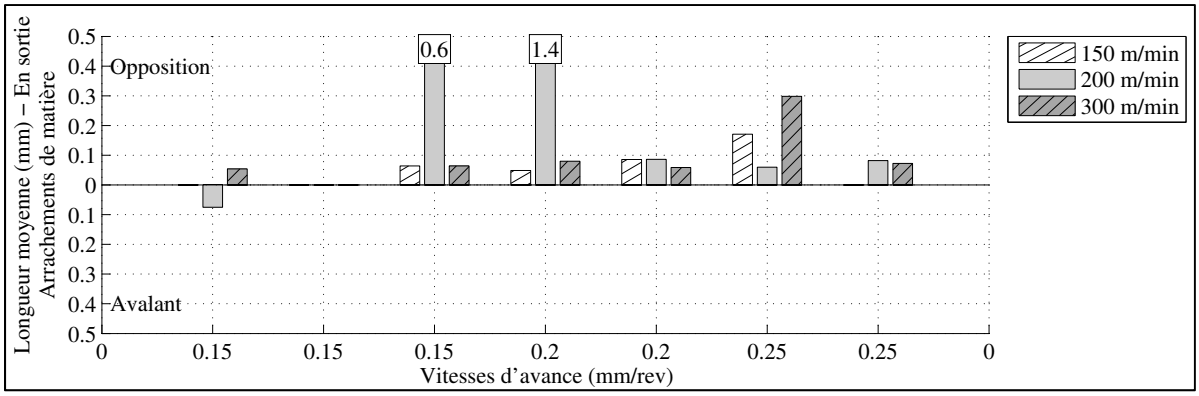



Figure 3.229 LM de l'ARM en sortie de l'OP50P6 45° CR10 X

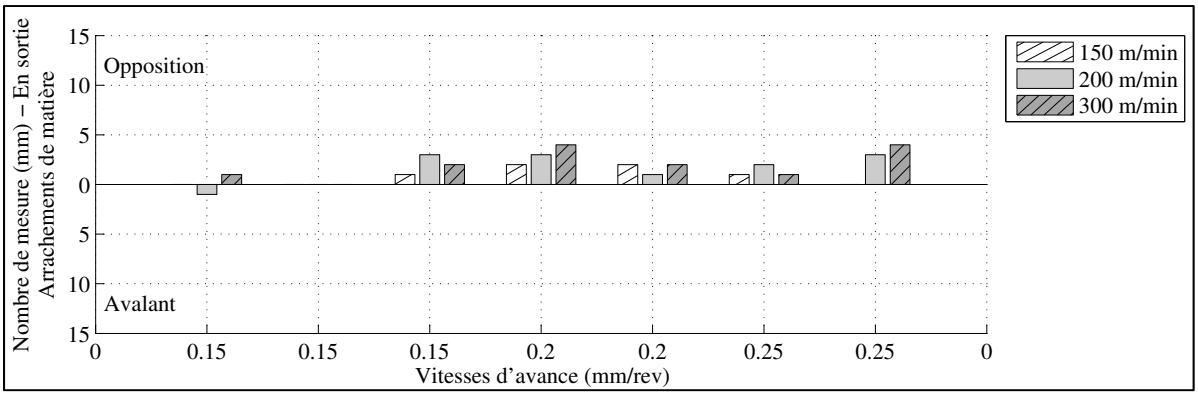



Figure 3.230 NM de l'ARM en sortie de l'OP50P6 45° CR10 X

### 3.3.14.1 Conclusion

Aucune délamination au pli inférieur n'est observée. Au pli supérieur, les photos des échantillons rainurés présentent des FNC sur toute la longueur des échantillons et d'une longueur plus importante en opposition qu'en avalant. En opposition, les FNC ont été altérées avant l'inspection de la délamination au microscope donc il est difficile de comparer leur longueur moyenne avec les autres opérations. Cependant, la présence des FNC avant altération est forte et semblable à celle des opérations OP50P5 45° CR10 Y et OP50P5 45° CR20 Y. Au centre et en avalant, la LM des FNC normales aux plis est de 0.07 mm et la LM des FNC normales à la surface rainurée est de 0.23 mm. Les FNC en avalant sont moins altérées et plus présentes qu'aux opérations précédentes OP50P5 45° CR10 Y et OP50P5 45° CR20 Y et d'une LM semblable. Les ARM en opposition semblent être causés par l'altération des FNC lors de l'inspection sur CMM pour permettre le passage du palpeur et cela expliquerait la forte présence d'ARM en opposition pour un pli de surface orienté à 45°. Au centre et en opposition, la longueur moyenne de l'ARM est de 0.07 mm et elle est inférieure à celle des opérations précédentes OP50P5 45° CR10 Y et OP50P5 45° CR20 Y.

### 3.3.15 Délaminations de l'opération OP50P6 45° CR20 X

L'inspection de la troisième opération de rainurage robotisée de la plaque P6 est effectuée avec un microscope muni d'une lentille à 20 agrandissements. L'objectif est de caractériser la délamination pour :

- une configuration du robot rapprochée CR20;
- une orientation de plis de surface de 45° par rapport à la direction de rainurage;
- 3 vitesses de coupe et d'avance;
- une direction de rainurage X dans la cellule robotisée.

La plaque P6 est fabriquée par pose à la main des plis et cuite sous presse et vacuum. Le stratifié est le même que les autres opérations OP50P6 et de même fabrication que le stratifié P3 et P5. Ce stratifié comporte 24 plis. L'outil ayant rainuré les deux opérations sur la plaque P3 et deux sur la plaque P6 est utilisé à cette opération. Toutes les conditions de coupe rainurées sont observées. Aucune délamination n'est observée au pli inférieur de CFRP. Les photos des échantillons prises dans la cellule robotisée révèlent des FNC en opposition plus longue qu'en avalant à la première vitesse de 0.15 mm/rev pour les 3 vitesses de coupe. Les images de mesures au microscope confirment que les FNC en opposition pour la première vitesse d'avance de 0.15 mm/rev ont été altérées. D'ailleurs le Tableau 3.19, présente des FNC normales aux plis seulement en avalant et pour la première vitesse de 0.15 mm/rev et les Figure 3.231 à Figure 3.236 ne présentent pas de FNC en opposition à la première vitesse de 0.15 mm/rev. L'altération des FNC en opposition à 0.15 mm/rev a générée de l'ARM qui est présenté au

Tableau 3.20. Aux autres vitesses d'avance les FNC normales à la surface rainurée sont présentes en avalant à une longueur moyenne de 0.12 mm. Au centre, tous les ARM sont créés par l'altération des FNC à la première vitesse de 0.15 mm/rev à l'exception de deux mesures de 0.05 mm à 200 m/min.

Tableau 3.19 LM de FNC normales au pli supérieur de l'OP50P6 45° CR20 X

| Mode de coupe | Position de l'outil | NM | LM (mm) | Vc (m/min) | Va (mm/rev) |
|---|---|---|---|---|---|
| Avalant | Entrée | 1 | 0.10 | 150 | 0.15 |
| | | 3 | 0.13 | 150 | 0.15 |
| | | 2 | 0.08 | 200 | 0.15 |
| | | 4 | 0.04 | 300 | 0.15 |
| | Centre | 16 | 0.07 | 150 | 0.15 |
| | | 12 | 0.07 | 150 | 0.15 |
| | | 12 | 0.09 | 150 | 0.15 |
| | | 15 | 0.06 | 200 | 0.15 |
| | | 3 | 0.01 | 300 | 0.15 |
| | Sortie | 2 | 0.06 | 150 | 0.15 |
| | | 4 | 0.06 | 150 | 0.15 |
| | | 3 | 0.06 | 150 | 0.15 |
| | | 2 | 0.07 | 200 | 0.15 |

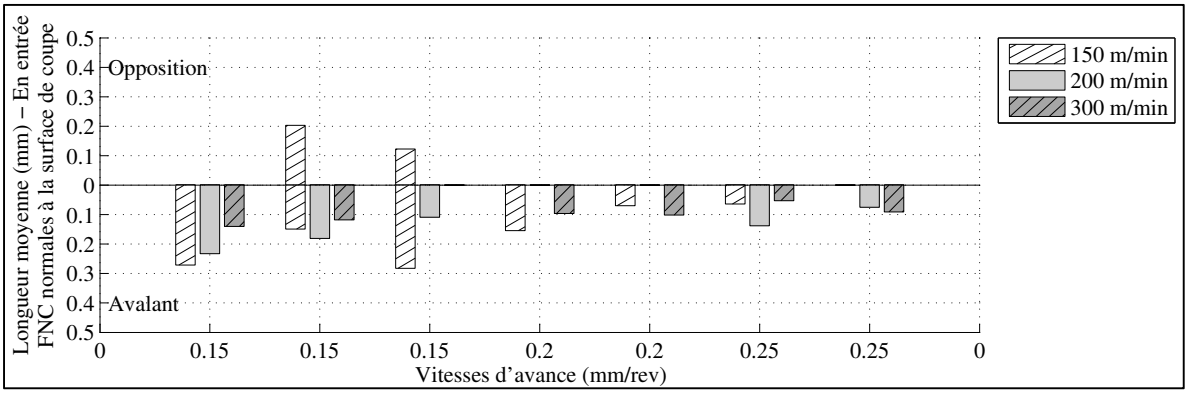



Figure 3.231 LM de FNC normales à la surface rainurée en entrée de l'OP50P6 45° CR20 X

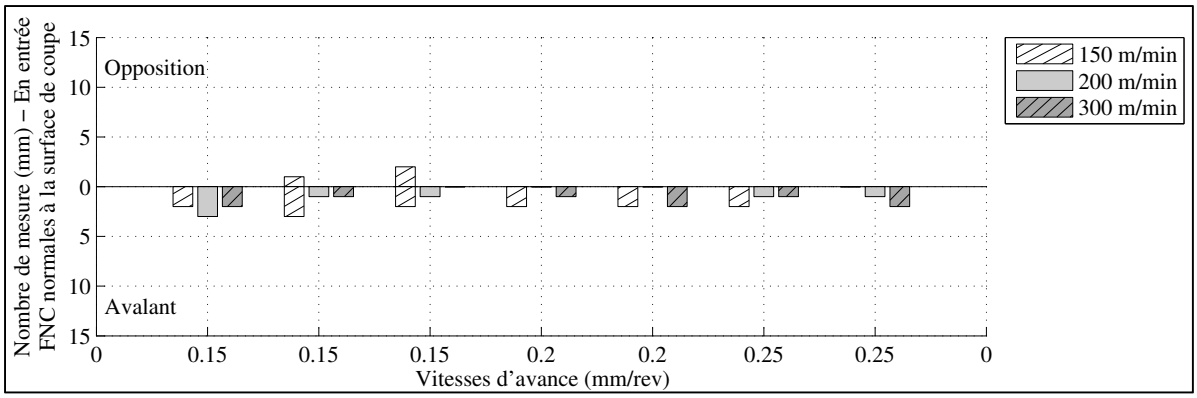



Figure 3.232 NM de FNC normales à la surface rainurée en entrée de l'OP50P6 45° CR20 X

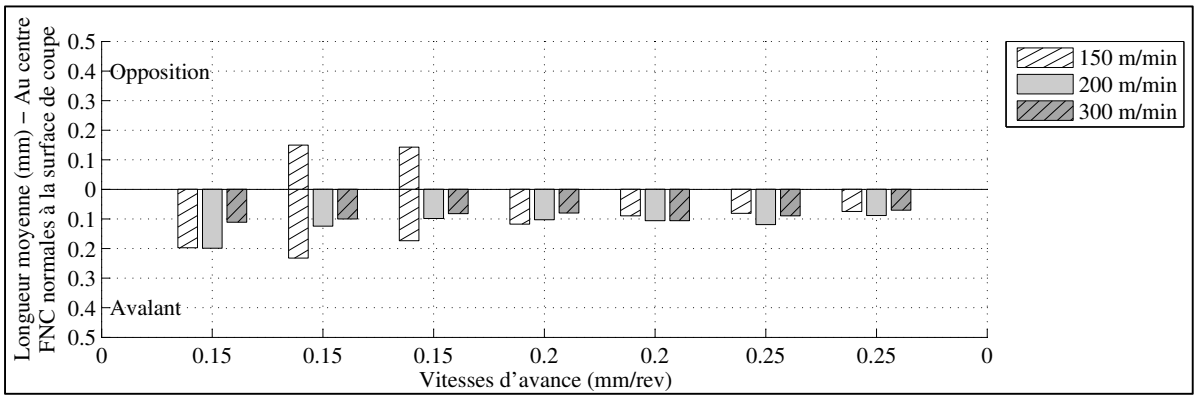



Figure 3.233 LM de FNC normales à la surface rainurée au centre de l'OP50P6 45° CR20 X

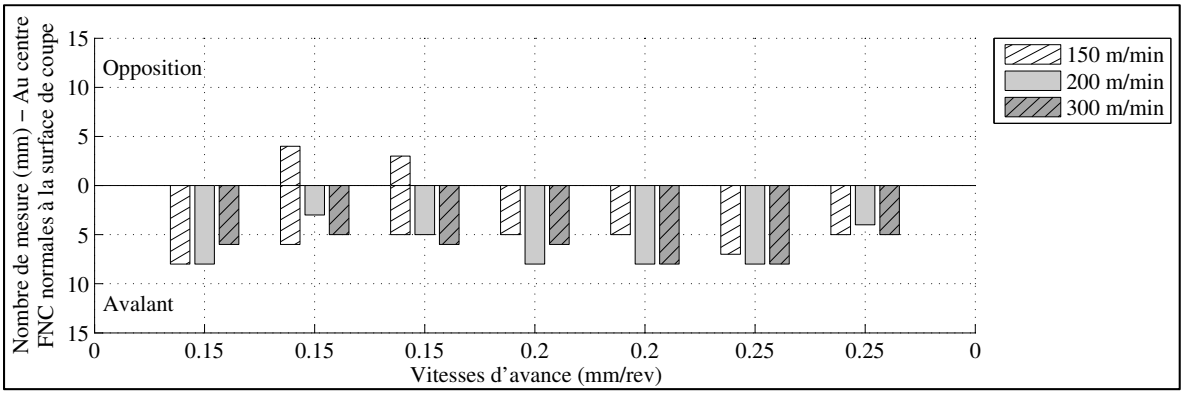



Figure 3.234 NM de FNC normales à la surface rainurée au centre de l'OP50P6 45° CR20 X

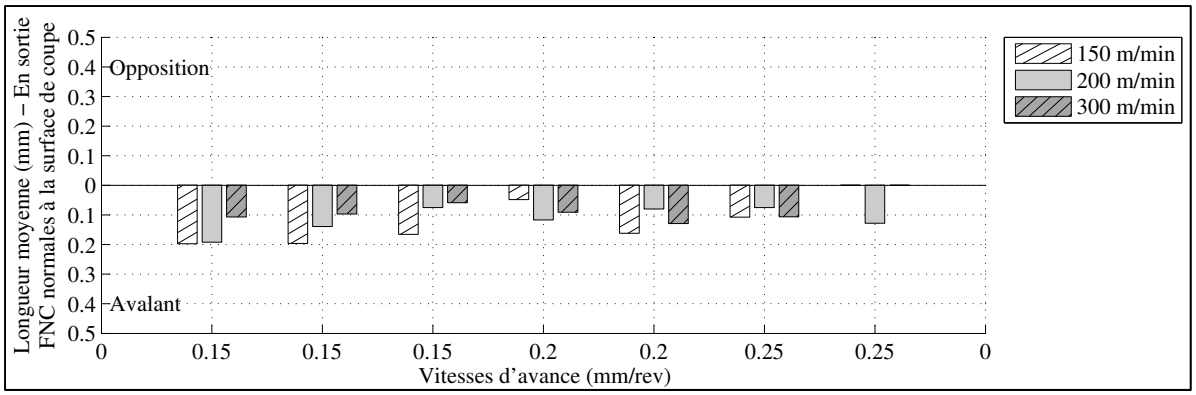



Figure 3.235 LM de FNC normales à la surface rainurée en sortie de l'OP50P6 45° CR20 X

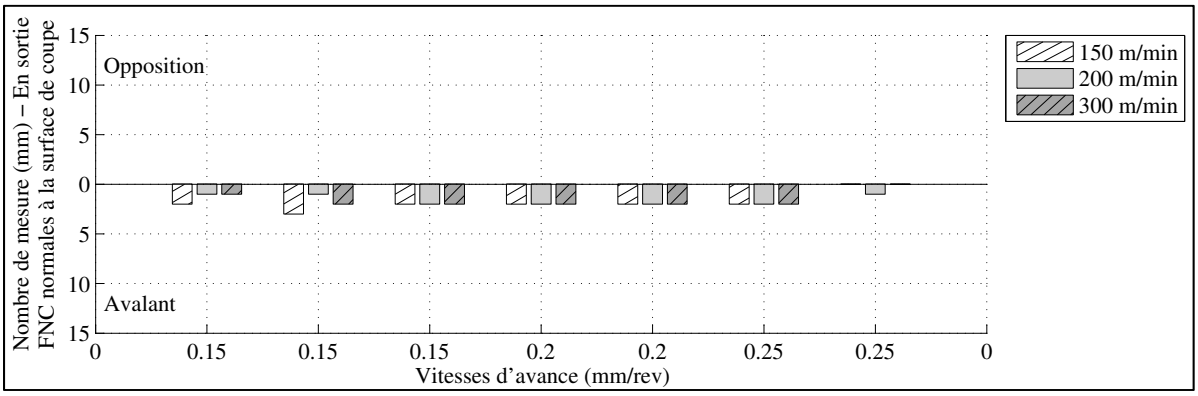



Figure 3.236 NM de FNC normales à la surface rainurée en sortie de l'OP50P6 45° CR20 X

Tableau 3.20 LM de l'ARM du pli supérieur de l'OP50P6 45° CR20 X

| Mode de coupe | Position de l'outil | NM | LM (mm) | Vc (m/min) | Va (mm/rev) |
|---|---|---|---|---|---|
| Opposition | Entrée | 2 | 0.09 | 150 | 0.15 |
| | | 3 | 0.08 | 200 | 0.25 |
| | | 2 | 0.10 | 300 | 0.15 |
| | | 2 | 0.07 | 300 | 0.20 |
| | Centre | 6 | 0.09 | 150 | 0.15 |
| | | 6 | 0.10 | 200 | 0.15 |
| | | 1 | 0.05 | 200 | 0.15 |
| | | 1 | 0.05 | 200 | 0.20 |
| | | 3 | 0.08 | 300 | 0.15 |
| | Sortie | 1 | 0.10 | 150 | 0.15 |
| | | 2 | 1.19 | 150 | 0.15 |
| | | 1 | 1.98 | 150 | 0.20 |
| | | 1 | 0.08 | 200 | 0.15 |
| | | 1 | 0.06 | 200 | 0.15 |
| | | 1 | 0.08 | 300 | 0.15 |
| | | 1 | 0.08 | 300 | 0.15 |
| Avalant | Entrée | 2 | 0.81 | 300 | 0.15 |
| | | 1 | 1.24 | 300 | 0.20 |
| | Sortie | 1 | 0.72 | 300 | 0.25 |

#### 3.3.15.1 Conclusion

Aucune délamination n'est observée au pli inférieur de CFRP. Les photos des échantillons prises dans la cellule robotisée et les images du microscope confirment l'altération des FNC en opposition pour la première vitesse d'avance de 0.15 mm/rev pour l'ensemble des vitesses

de coupe. Aucune FNC en opposition n'est mesurée au premier échantillon rainuré à 0.15 mm/rev. L'altération des FNC en opposition à la première vitesse de 0.15 mm/rev a généré de l'ARM d'une longueur moyenne de 0.08 mm. Aux autres vitesses d'avance les FNC normales à la surface rainurée sont présentes en avalant à une longueur moyenne de 0.12 mm. Les FNC sont moins présentes en opposition et tout aussi présentes en avalant aux opérations précédentes OP50P6 45° CR10 X, OP50P5 45° CR20 Y, OP50P5 45° CR10 Y. Les FNC sont moins présentes en opposition et plus présentes en avalant à l'opération précédente OP30P3 45° CR20 X. Au centre, tous les ARM sont créés par l'altération des FNC à la première vitesse de 0.15 mm/rev à l'exception de deux mesures de 0.05 mm à 200 m/min. L'ARM est aussi très peu présent à l'OP30P3 45° CR20 X précédente et toutes les autres opérations dont le pli de surface est à 45° sans prendre en compte l'ARM causé par l'altération de FNC. Au centre et en opposition, la délamination la plus faible est observée à 0.20 et 0.25 mm/rev pour l'ensemble des vitesses de coupe.

### 3.3.16 Délaminations de l'opération OP50P6 -45° CR20 Y

L'inspection de la quatrième opération de rainurage robotisée de la plaque P6 est effectuée avec un microscope muni d'une lentille à 20 agrandissements. L'objectif est de caractériser la délamination pour :

- une configuration du robot rapprochée CR20;
- une orientation de plis de surface de -45° par rapport à la direction de rainurage;
- 3 vitesses de coupe et d'avance;
- une direction de rainurage Y dans la cellule robotisée.

La plaque P6 est fabriquée par pose à la main des plis et cuite sous presse et vacuum. Le stratifié est le même que les autres opérations OP50P6 et de même fabrication que le stratifié P3 et P5. Ce stratifié comporte 24 plis. L'outil ayant rainuré les deux opérations sur la plaque P3 et trois sur la plaque P6 est utilisé à cette opération.

Toutes les conditions de coupe rainurées sont observées. Aucune délamination n'est observée au pli inférieur de CFRP et aucune FNC n'est observée au pli supérieur. Très peu ou aucune FNC n'est observée des opérations précédentes avec un pli de surface à -45°. Les Figure 3.237 à Figure 3.242 présentent l'ARM présent surtout en avalant. Au centre, la LM de l'ARM est de 0.07 mm en opposition et en avalant. Les quelques longs ARM aux extrémités ont été créés lors de l'opération d'alésage des trous de dégagement avant l'opération de rainurage.

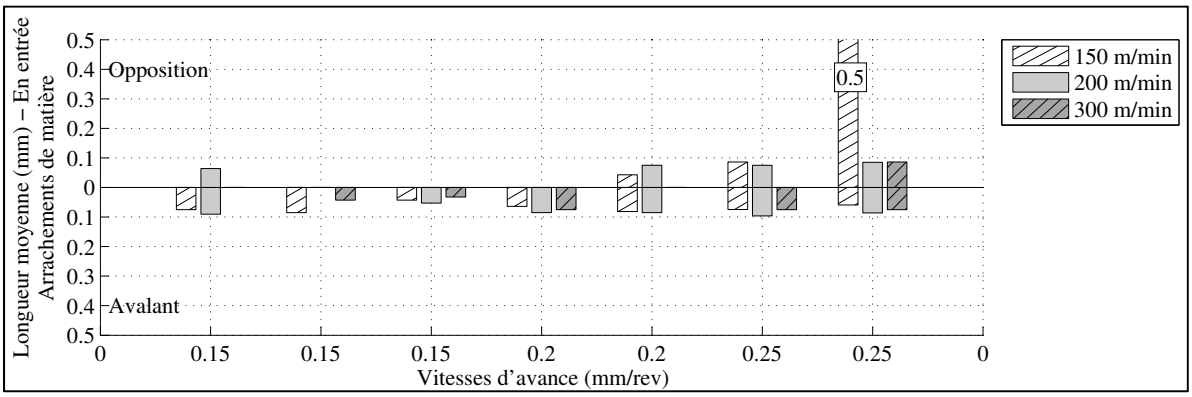



Figure 3.237 LM de l'ARM du pli supérieur en entrée de l'OP50P5 -45° CR20 Y

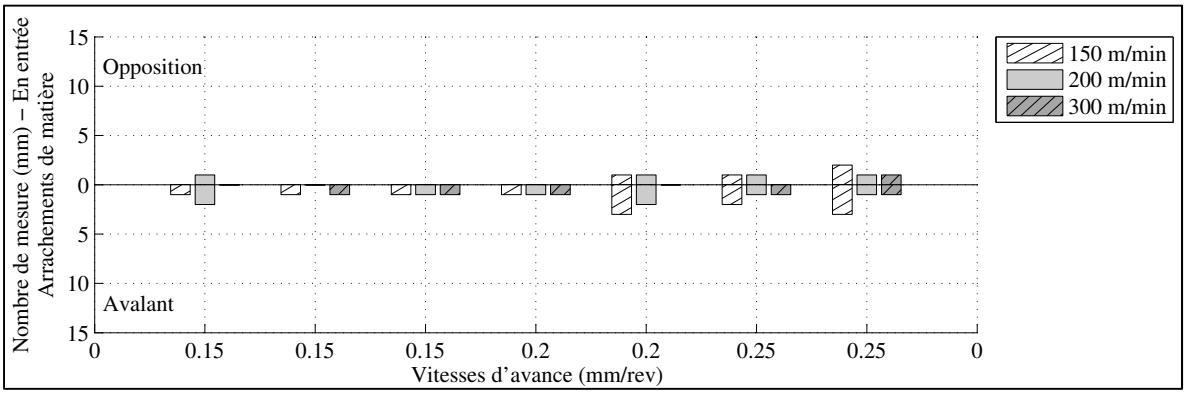



Figure 3.238 NM de l'ARM du pli supérieur en entrée de l'OP50P5 -45° CR20 Y

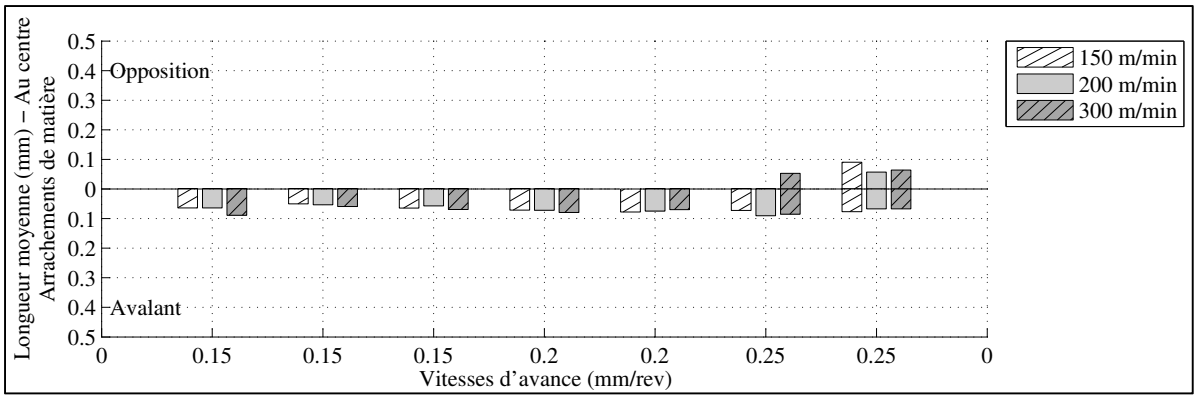



Figure 3.239 LM de l'ARM du pli supérieur au centre de l'OP50P5 -45° CR20 Y

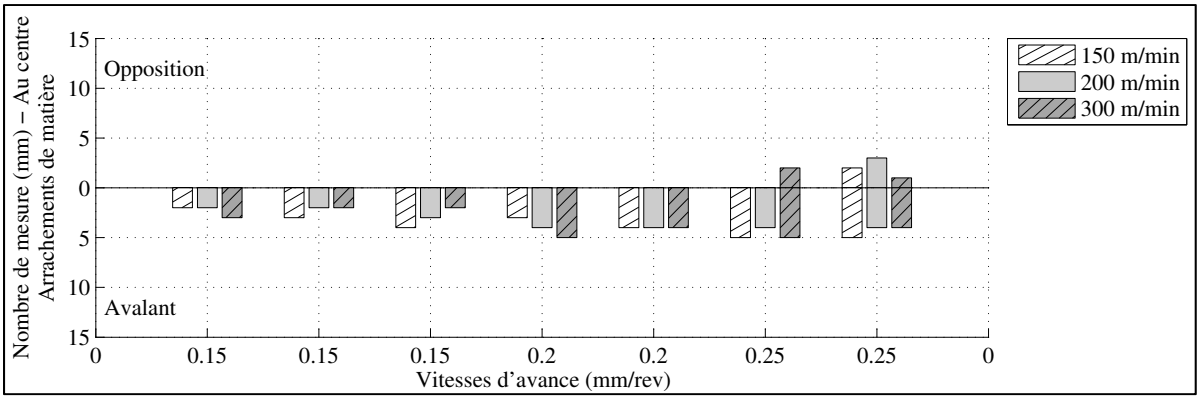



Figure 3.240 NM de l'ARM du pli supérieur au centre de l'OP50P5 -45° CR20 Y

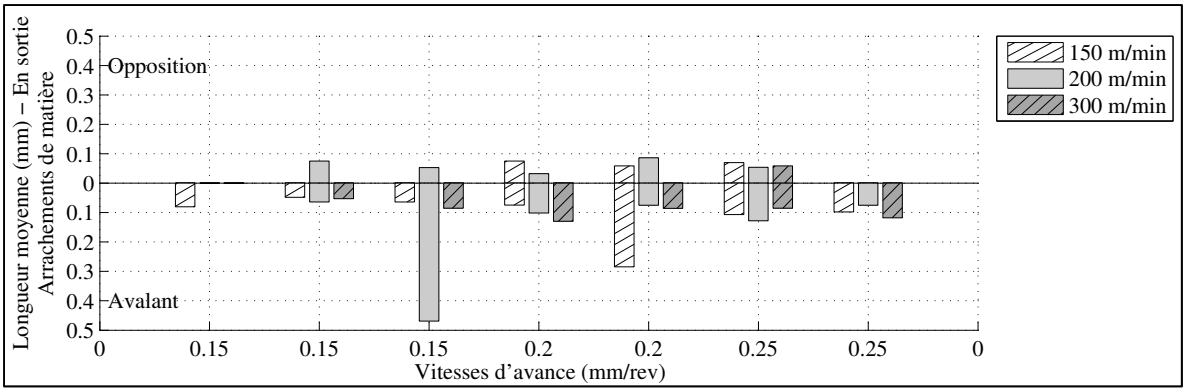



Figure 3.241 LM de l'ARM du pli supérieur en sortie de l'OP50P5 -45° CR20 Y

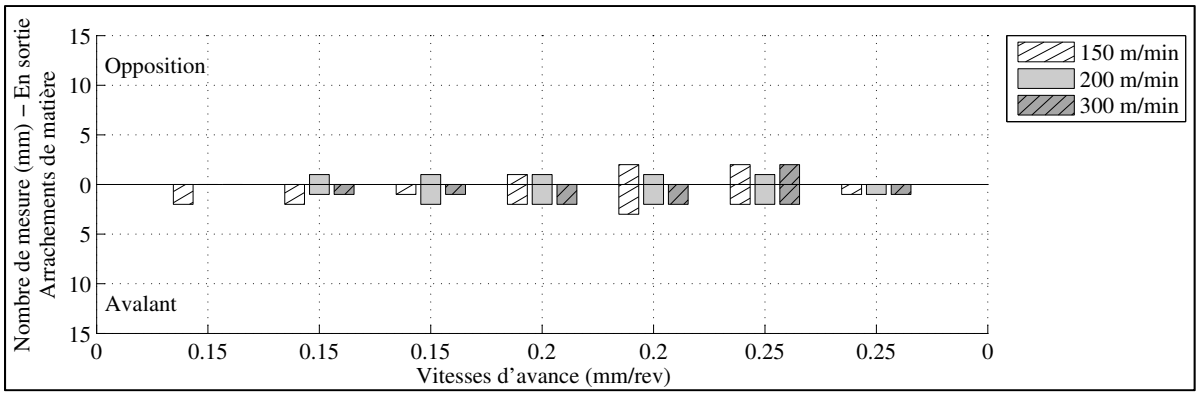



Figure 3.242 NM de l'ARM du pli supérieur en sortie de l'OP50P5 -45° CR20 Y

### 3.3.16.1 Conclusion

Aucune délamination n'est observée au pli inférieur de CFRP et aucune FNC n'est observée au pli supérieur. Très peu ou aucune FNC n'est observée des opérations précédentes avec un pli de surface à -45°. Les ARM sont surtout présent en avalant et sont d'une longueur moyenne de 0.07 mm. La longueur moyenne d'ARM est semblable à celle des opérations dont le pli de surface est de -45° et où de l'ARM a été observé. L'ARM est moins présent en opposition qu'aux opérations précédentes avec un pli de surface à -45° à l'exception des opérations OP20P1 -45° CR20 X et OP10P2 -45° qui n'ont pas présenté d'ARM aux présentes vitesses. L'ARM est plus présent en avalant qu'aux opérations OP50P6 -45° CR10 Y et OP20P4 -45° CR20 X et tout aussi présent en avalant qu'aux opérations OP50P5 -45° CR10 X, OP50P5 -45° CR20 X et OP30P3 -45° CR20 X pour les mêmes vitesses.

### 3.3.18 Conclusion générale

Au pli inférieur, seuls quelques échantillons sont délaminés en entrée ou en sortie à des vitesses supérieures à 0.30 mm/rev et 400 m/min des plaques P1, P2 et P4 dont le pli de surface est à -45°. Une très faible occurrence de délamination du pli inférieur supporté par le gabarit a aussi été observée à la suite d'expérimentations du rainurage de stratifié (Bérubé, 2012; Hintze, Hartmann et Schutte, 2011).

Il y a plusieurs cas d'ARM et de FNC de grandes dimensions en sortie et en entrée. Ces délaminations sont observées à la suite de la déviation de l'outil lors de son dégagement partiel en sortie de matière. Lors du dégagement partiel de l'outil, les efforts de coupe varient rapidement et des vibrations sont présentes (Zaghbani et al., 2012b). Une variation rapide d'efforts de coupe entraîne une déviation de la trajectoire sur un robot sériel lors de l'entrée en matière et de la sortie de matière (Dumas et al., 2011c). Ces variations rapides d'efforts de coupe, de vibrations et de l'angle de coupe des fibres du pli de surface risquent d'augmenter l'occurrence et la propagation de la délamination de surface en sortie. Pour les plaques P3 à P6, les arrachements de matière de grandes dimensions en entrée ou en sortie sont aussi créés lors de l'alésage de trous de dégagement sur centre d'usinage avant les opérations de rainurage.

Les fibres non coupées (FNC) sont rarement ou non présentes avec un pli de surface à -45° lors des opérations de rainurage. Cependant, les arrachements de matière (ARM) sont présents avec un pli de surface à -45°. Les fibres non coupées (FNC) sont très présentes avec un pli de surface à 45° et des ARM sont aussi présents en avalant. L'orientation des fibres du pli de surface par rapport à la direction de rainurage influence significativement le type de délamination de surface généré lors de ces opérations de rainurage. Plusieurs études expérimentales ont démontré que l'orientation du pli unidirectionnel en surface par rapport à la direction d'avance de l'outil influence fortement l'angle de coupe des fibres, le mécanisme de rupture des fibres et la délamination (Hagino et Inoue, 2013; Hintze, Hartmann et Schutte,

2011; Iliescu, 2008; Koplev, Lystrup et Vorm, 1983; Pecat, Rentsch et Brinksmeier, 2012; Pwu et Hocheng, 1998; Ramulu, 1997; Wang, Ramulu et Arola, 1995a; 1995b; Wang et Zhang, 2003).

Pour un pli de surface à 45°, il y a une plus grande présence des FNC en avalant qu'en opposition et la longueur moyenne est égale pour chaque mode de coupe. En avalant, les FNC sont fortement présentes à toutes les opérations dont le pli de surface est de 45°. Les travaux de Hintze et coll. montrent aussi des FNC en opposition et en avalant pour un pli de surface orienté à 45°. Les ARM présents en avalant pour un pli de surface à 45° sont des fibres non coupées délaminées au-delà de la surface rainurée lors du rainurage et parfois ce sont des FNC altérées après rainurage causant des ARM. L'opération OP10P1 45° CR10 Y présente la délamination la plus élevée en opposition et en avalant pour un pli de surface à 45° et des vitesses de 0.20 à 0.51 mm/rev et de 200 à 650 m/min. L'opération OP20P2 45° et l'OP10P4 45° CR10 Y présentent une délamination quasi absente en opposition pour un pli de surface à 45° et les mêmes vitesses. Il n'y a pas de différence significative entre les FNC de l'OP20P2 45° sur centre d'usinage et celles de l'OP10P4 45° CR10 Y sur robot pour un pli de surface à 45°.

Selon les photos des échantillons avant altération des FNC, les FNC sont peu présentes en opposition pour l'OP30P3 45° CR20 X aux vitesses de 0.15 à 0.25 mm/rev et de 150 à 400 m/min. Cependant, les FNC sont présentes à presque tous les échantillons en opposition et en avalant des opérations OP50P6 45° CR10 X, OP50P5 45° CR10 Y et OP50P5 45° CR20 Y dont les vitesses sont de 0.15 à 0.30 mm/rev et de 150 à 300 m/min. Finalement, les FNC sont quasi absentes en opposition à l'OP50P6 45° CR20 X aux mêmes vitesses. Pour les plaques P3, P5 et P6, les FNC en opposition sont moins présentes pour une configuration du robot CR20 et une direction de rainurage X.

Pour un pli de surface à -45°, l'OP20P1 -45° CR20 X présente le plus important ARM qui est plus présent en opposition qu'en avalant et d'une longueur moyenne égale à 0.50 mm pour

chaque mode de coupe. L'arrachement de matière ou la propagation de la délamination est présent surtout en opposition lors de rainurage sur centre d'usinage selon Hintze et coll. pour un pli orienté à -45°. L'ARM est plus présent et d'une longueur moyenne de 0.45 mm en opposition et de 0.07 mm en avalant pour l'OP10P2 -45° sur centre d'usinage. La présence de l'ARM est égale à chaque mode de coupe et la longueur moyenne de 0.36 mm en opposition et de 0.09 mm en avalant pour l'OP20P4 -45° CR20 X. Il n'y a pas une différence significative de présence d'ARM et de sa dimension entre l'OP20P4 -45° CR20 X robotisée et l'OP10P2 -45° sur centre d'usinage.

L'ARM au centre est plus présent en avalant qu'en opposition et d'une longueur moyenne de 0.07 mm pour les opérations des plaques P3, P5 et P6 avec un pli de surface à -45°. Les opérations de la plaque P5, l'OP50P5 -45° CR10 X et l'OP50P5 -45° CR20X présentent la plus forte présence d'ARM pour les vitesses de 0.15 à 0.25 mm/rev et 150 à 300 m/min. L'OP30P3 -45° CR20 X ne présente aucun ARM en opposition à 0.15 mm/rev et est d'une longueur moyenne de 0.08 mm pour chaque mode de coupe. Les opérations OP50P6 -45° CR10 Y et OP50P6 -45° CR20 Y ne présentent aucun ARM à 0.15 mm/rev en opposition et la plus faible présence d'ARM aux vitesses de 0.20 et 0.25 mm/rev pour une longueur moyenne de 0.06 mm pour chaque mode de coupe. La plus faible présence d'ARM en opposition est à la vitesse d'avance expérimentée la plus faible de 0.15 mm/rev.

# CHAPITRE 4

# ANALYSE DE RÉSULTATS ET DISCUSSION

## 4.1 Identification de l'influence des facteurs sur les efforts de coupe moyens

Les efforts de coupe moyens de chaque opération sont comparés entre eux en fonction de la vitesse d'avance et de coupe dans la première section. Ces comparaisons permettent d'observer les différences d'influence des vitesses sur les efforts moyens pour chaque opération et de comparer l'amplitude des efforts moyens entre l'avance et normale. La deuxième section présente une analyse de variance qui indique l'influence de la configuration du robot et de la direction de rainurage robotisé sur les efforts normaux moyens des opérations des plaques P5 et P6.

### 4.1.1 L'influence de la vitesse d'avance et de coupe sur les efforts de coupe moyens

La vitesse d'avance influence les efforts d'avance moyens à la Figure 4.1 pour les opérations de plaque P1, P2, P3 et P4. La vitesse de coupe n'influence pas les efforts d'avance moyens à la Figure 4.2 pour les opérations des plaques P1, P2, P3 et P4. La pente négative de la force d'avance moyenne de l'OP20P4 -45° CR20 X est attribuable au fait que le stratifié comporte 4 plis de plus à 200 m/min qu'aux autres vitesses de coupe. Les efforts d'avance moyens des opérations de la plaque P1 sont les plus élevés en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Les efforts normaux moyens sont plus élevés que les efforts d'avance moyens des opérations de P1 en fonction de la vitesse de coupe. La vitesse d'avance a une faible influence sur les efforts normaux moyens à la Figure 4.3 pour les opérations de plaque P1, P2 et P4. La vitesse d'avance a une influence plus forte sur les efforts normaux moyens des opérations des plaques P3, P5 et P6 que sur ceux des plaques P1, P2 et P4. Cette différence d'influence de la vitesse d'avance sur l'effort normal moyen semble s'expliquer par la différence du procédé de fabrication entre le groupe de plaques P1, P2 et P4 et le groupe de plaques P3, P5 et P6. La vitesse de coupe a une faible influence sur les efforts normaux moyens à la Figure 4.4 pour les opérations de plaque P1, P2 et P4.

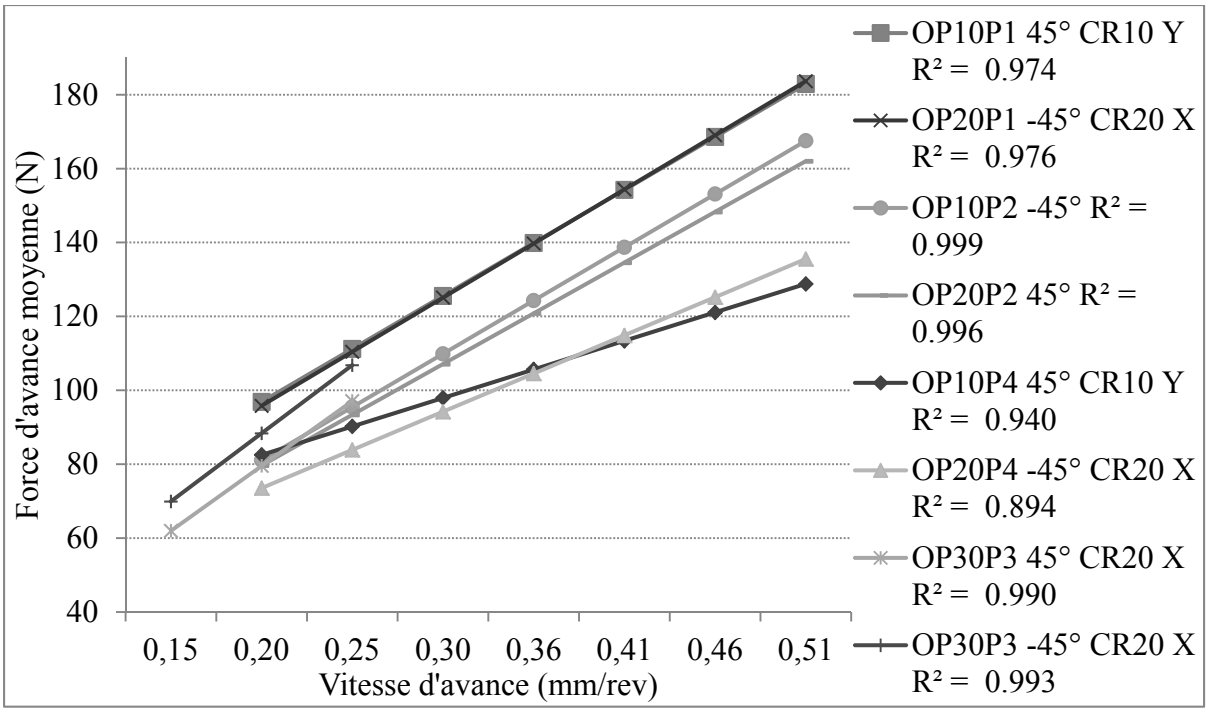



Figure 4.1 Efforts d'avance moyens en fonction de la vitesse d'avance pour les opérations des plaques P1, P2(centre d'usinage), P3 et P4

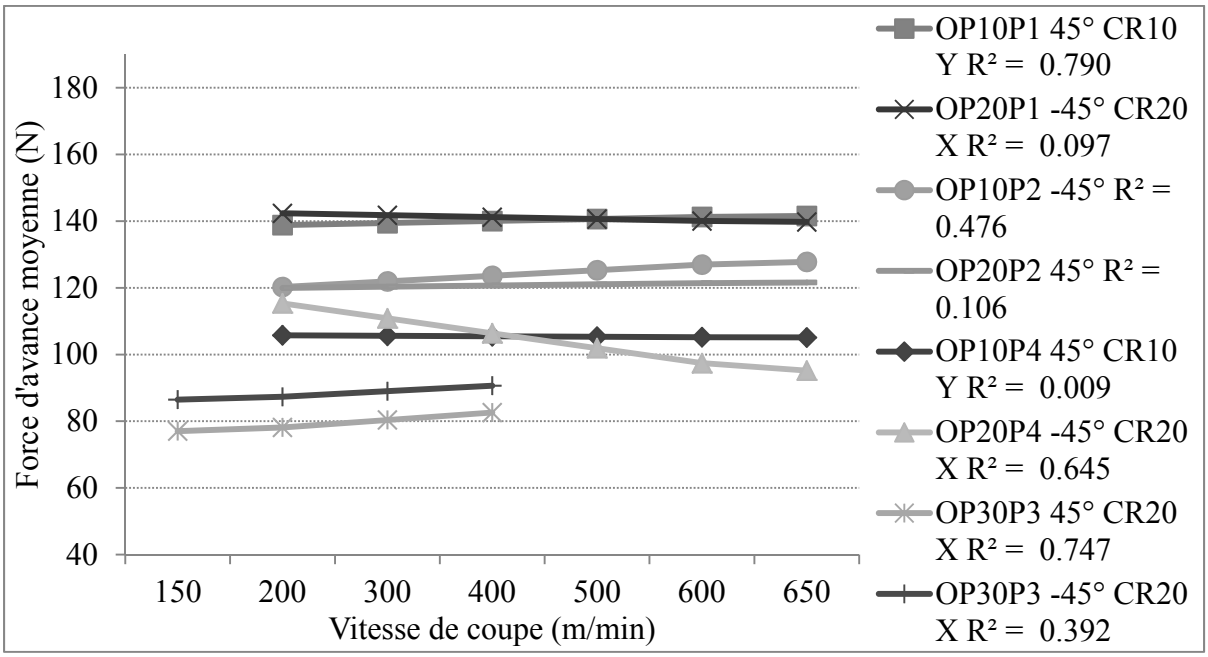



Figure 4.2 Efforts d'avance moyens en fonction de la vitesse de coupe pour les opérations des plaques P1, P2(centre d'usinage), P3 et P4

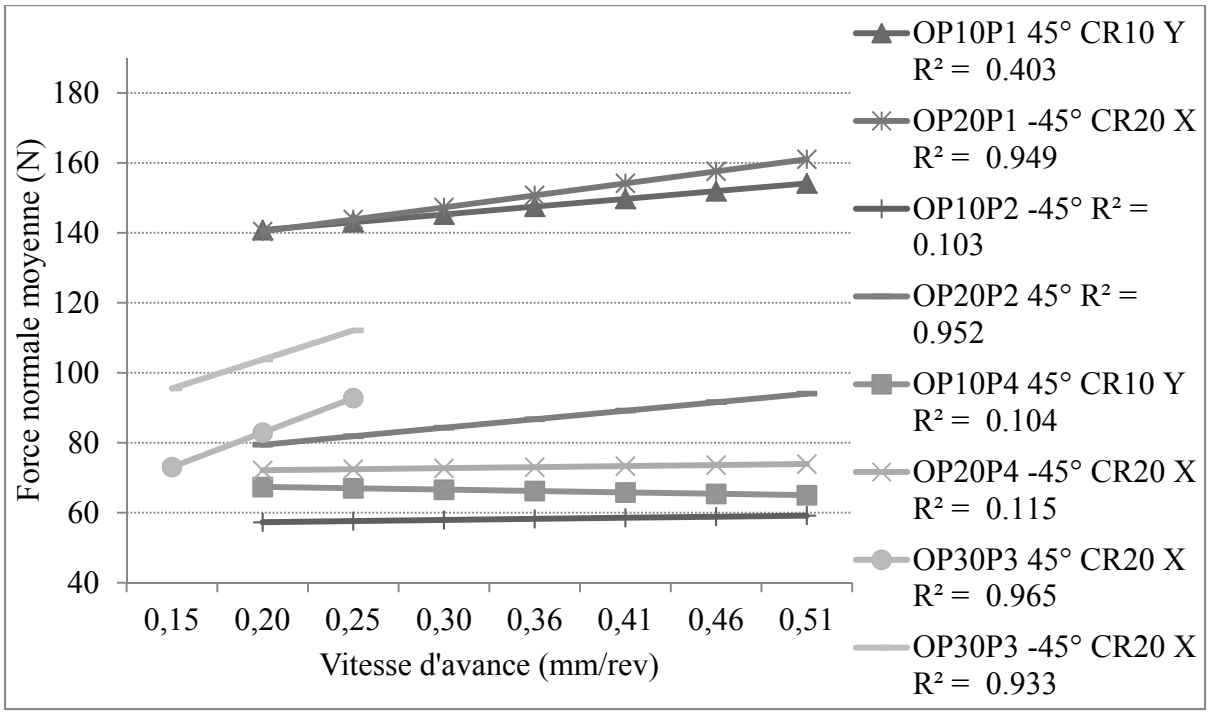



Figure 4.3 Efforts normaux moyens en fonction de la vitesse d'avance pour les opérations des plaques P1, P2 (centre d'usinage), P3 et P4

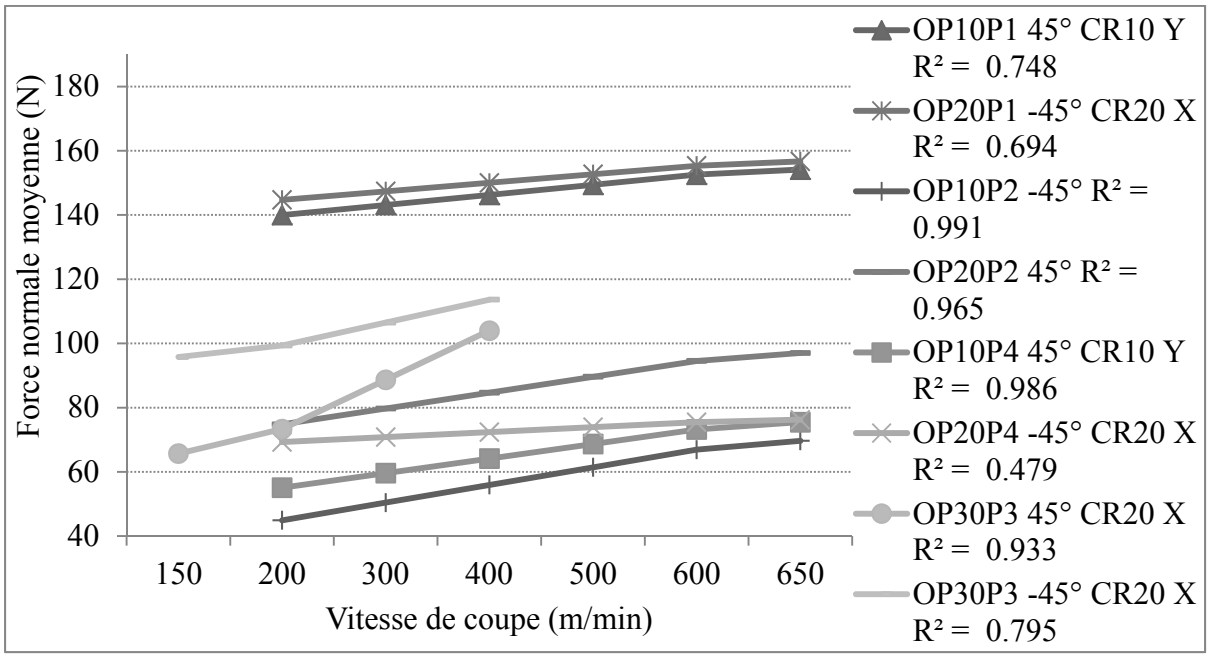



Figure 4.4 Efforts normaux moyens en fonction de la vitesse de coupe pour les opérations des plaques P1, P2 (centre d'usinage), P3 et P4

La vitesse d'avance influence les efforts d'avance moyens à la Figure 4.5 pour les opérations des plaques P3, P5 et P6. La vitesse de coupe n'influence pas les efforts d'avance moyens à la Figure 4.6 pour les opérations des plaques P3, P5 et P6. La vitesse d'avance influence les efforts normaux moyens à la Figure 4.7 pour les opérations des plaques P3, P5 et P6. L'influence de la vitesse de coupe sur les efforts normaux moyens est plus faible pour les opérations OP50P6 -45° CR10 Y et OP50P6 45° CR20 X de la plaque P6. La vitesse de coupe influence les efforts normaux moyens à la Figure 4.8 des opérations des plaques P3, P5 et P6. Les efforts normaux moyens sont supérieurs aux efforts d'avance moyens pour les opérations des plaques P3, P5 et P6 en fonction de la vitesse d'avance et de coupe. Il est possible que le mode de fabrication des plaques P3, P5 et P6 explique le fait que l'effort moyen normal soit plus élevé que l'effort moyen d'avance. Cependant, il est aussi possible que ce soit causé par un problème lors de l'acquisition des efforts de coupe. Les efforts moyens d'avance des plaques P5 et P6 présentent des tendances très similaires en fonction des vitesses. Cette grande répétitivité des efforts de coupe indique une usure d'outil et un stratifié similaires entre les plaques P5 et P6.

Les coefficients de détermination des équations de régression linéaire sont élevés pour les efforts d'avance moyens en fonction de la vitesse d'avance pour chaque opération à la Figure 4.9. Sauf une exception, les coefficients de détermination des équations de régression linéaire sont élevés pour les efforts normaux moyens en fonction de la vitesse de coupe pour chaque opération à la Figure 4.10. Les coefficients de détermination des équations de régression linéaire sont faibles pour les efforts d'avance moyens en fonction de la vitesse de coupe pour chaque opération.

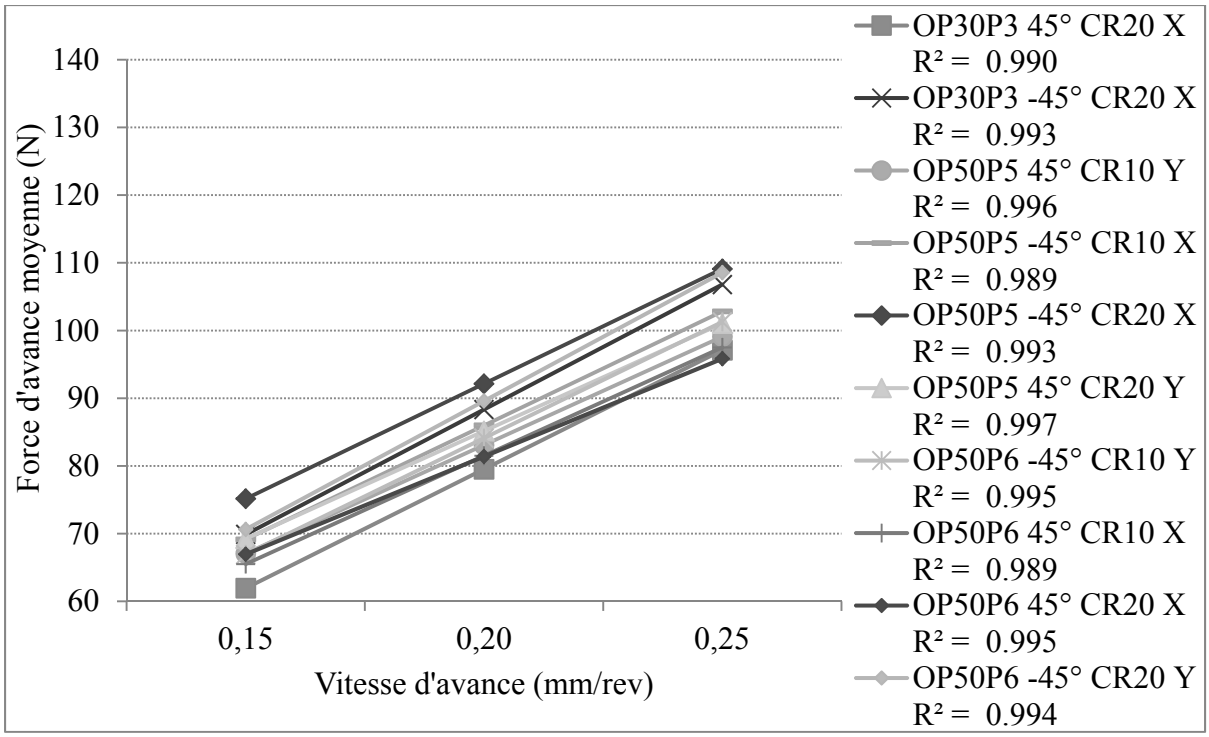



Figure 4.5 Efforts d'avance moyens en fonction de la vitesse d'avance pour les opérations des plaques P3, P5 et P6

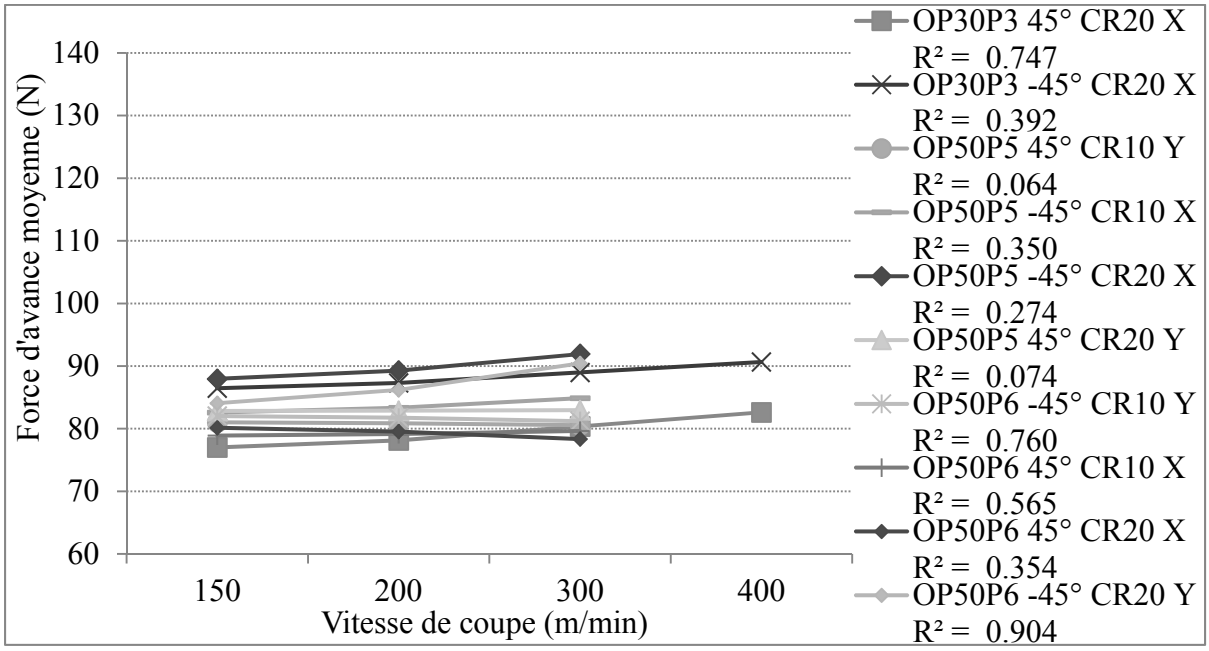



Figure 4.6 Efforts d'avance moyens en fonction de la vitesse de coupe pour les opérations des plaques P3, P5 et P6

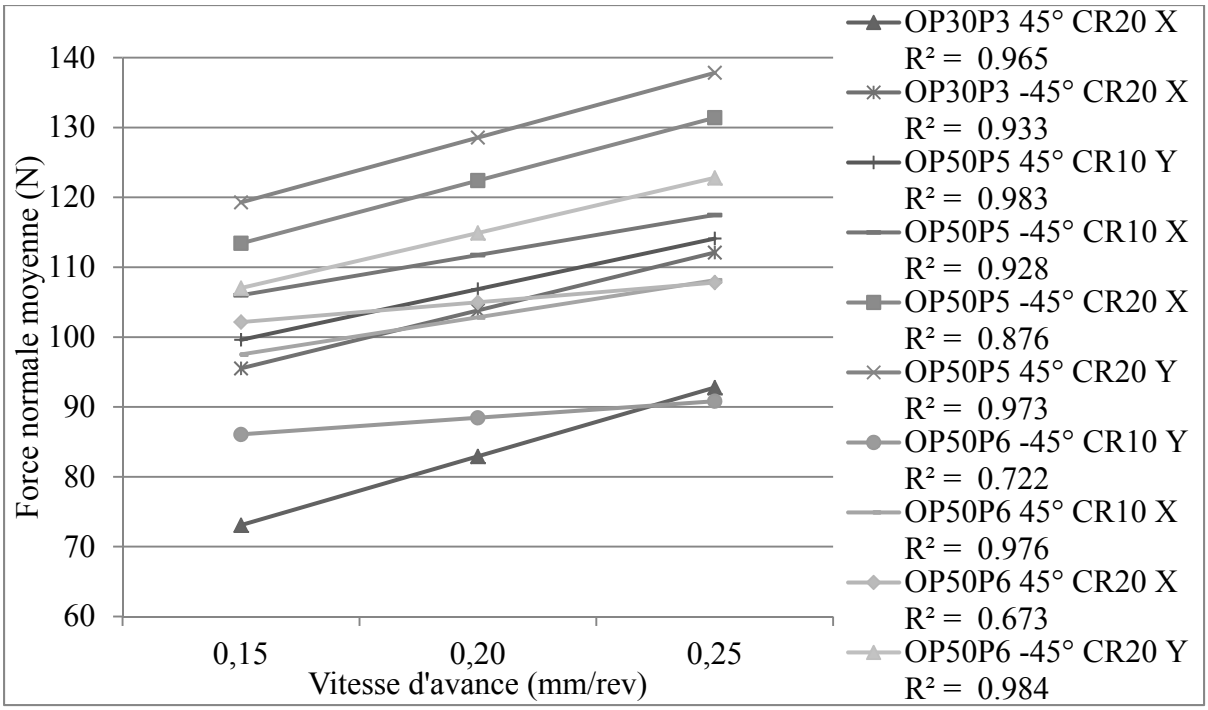



Figure 4.7 Efforts normaux moyens en fonction de la vitesse d'avance pour les opérations des plaques P3, P5 et P6

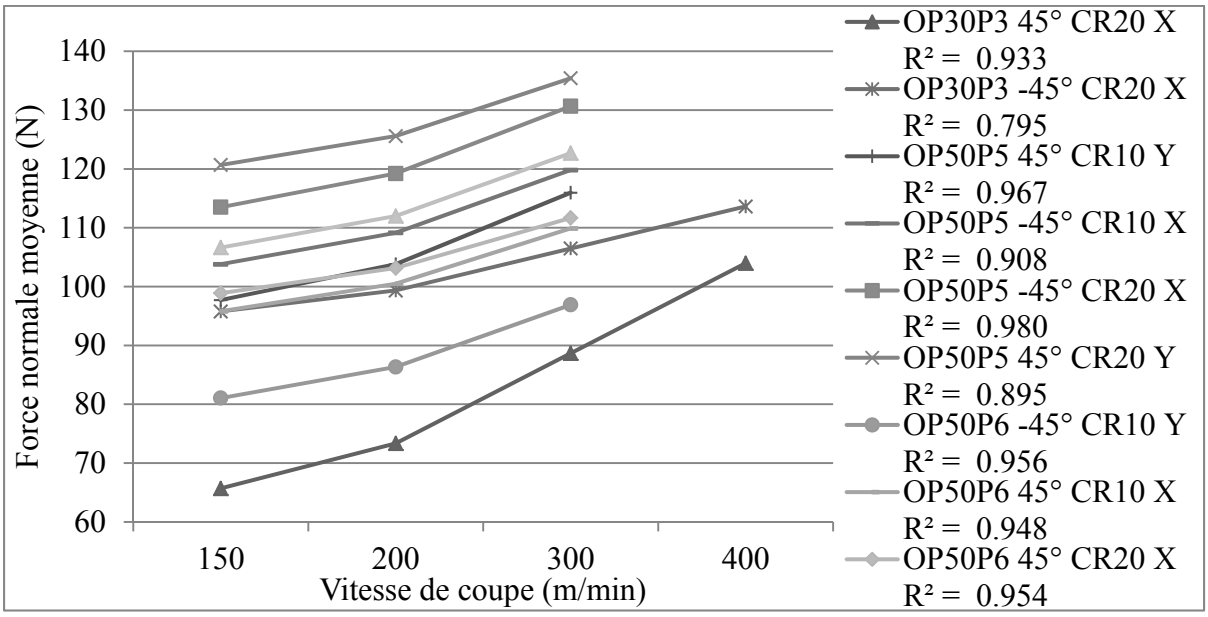



Figure 4.8 Efforts normaux moyens en fonction de la vitesse de coupe pour les opérations des plaques P3, P5 et P6

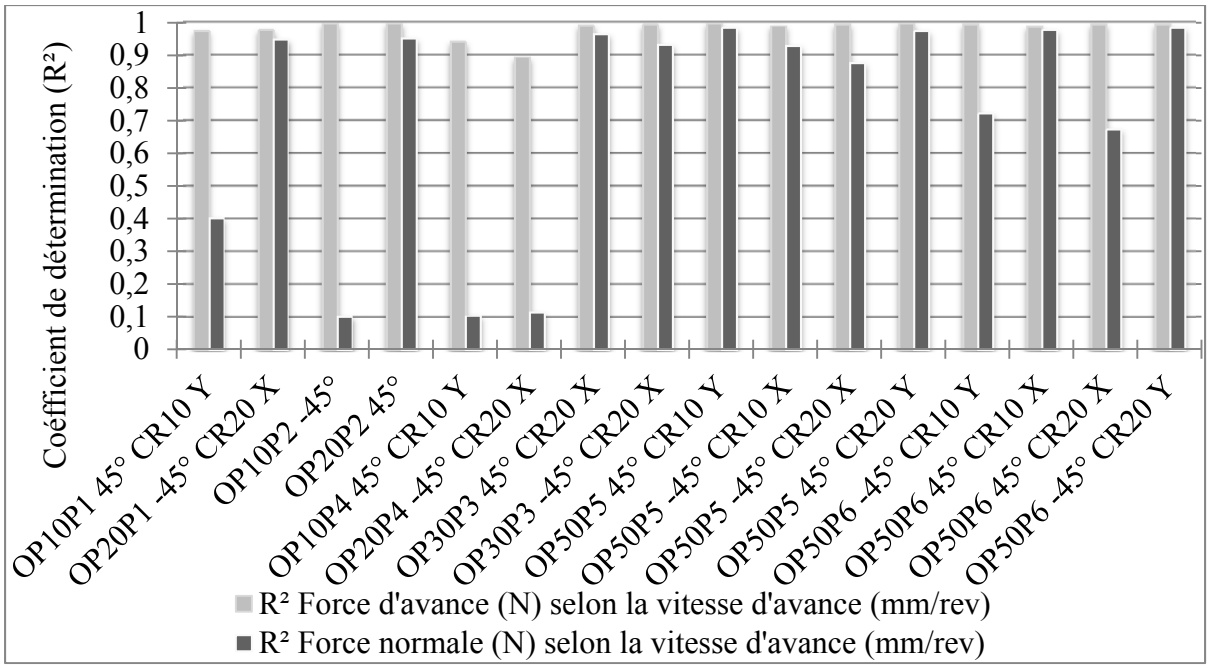



Figure 4.9 Coefficient de détermination (R²) des équations de régression linéaire des forces moyennes en fonction de la vitesse d'avance pour chaque opération

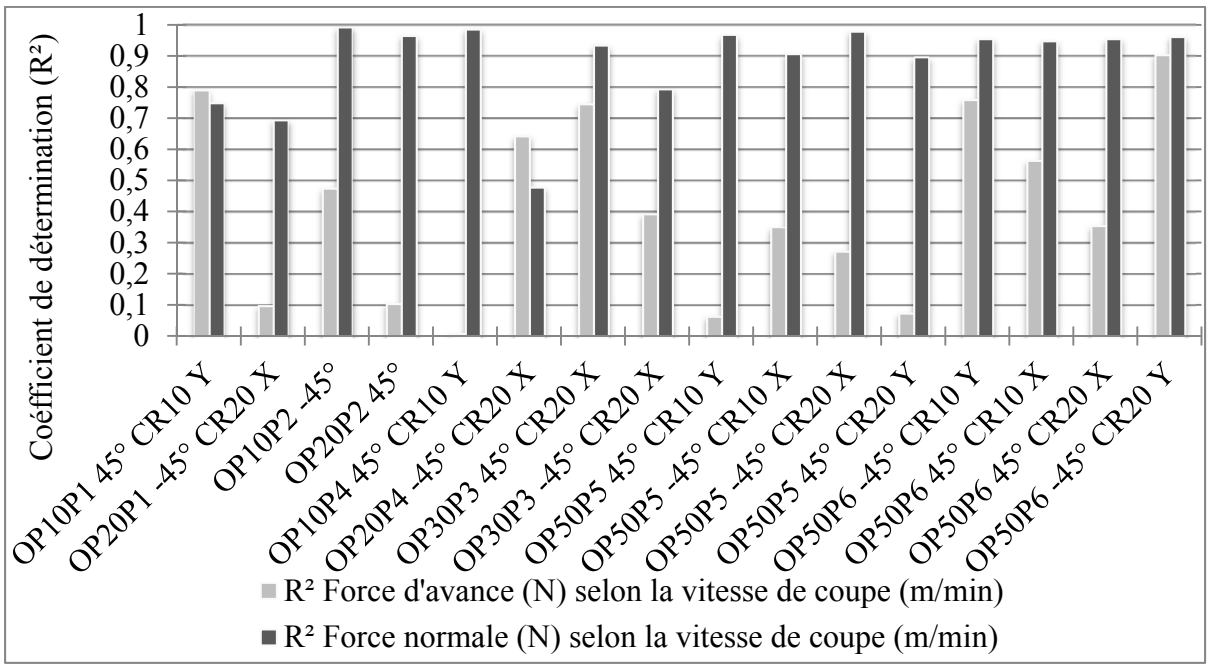



Figure 4.10 Coefficient de détermination (R²) des équations de régression linéaire des forces moyennes en fonction de la vitesse de coupe pour chaque opération

### 4.1.2 Influence de la configuration du robot et de la direction de rainurage robotisée sur les efforts normaux moyens des opérations des plaques P5 et P6

Les efforts d'avance moyens respectent suffisamment la loi normale pour une analyse de variance et cette analyse présente une influence significative de la vitesse d'avance (Va) sur l'effort d'avance moyen. Les efforts normaux moyens respectent la loi normale sans valeur aberrante en fonction des vitesses. Une analyse de variance des efforts normaux moyens des opérations des plaques P5 et P6 est réalisée pour déterminer si l'influence des vitesses d'avance (Va) et de coupe (Vc), de la configuration du robot (CR) et de la direction de rainurage dans la cellule robotisée (Dir) est significative à un niveau de confiance de 95 %. La vitesse d'avance et de coupe et la configuration du robot ont une influence significative sur les efforts normaux moyens à un niveau de confiance de 95 %, Tableau 4.1 et Figure 4.11. L'interaction entre la configuration du robot et la direction de rainurage a aussi une influence significative sur les efforts normaux moyens à la Figure 4.12.

Tableau 4.1 Analyse de variance des efforts normaux moyens des opérations des plaques P5 et P6

| *Source* | *Somme des carrés* | *Ddl* | *Carré moyen* | *F* | *Probabilité* |
|---|---|---|---|---|---|
| EFFETS PRINCIPAUX | | | | | |
| A:Va | 4523.58 | 2 | 2261.79 | 33.00 | 0.0000 |
| B:Vc | 7445.54 | 2 | 3722.77 | 54.32 | 0.0000 |
| C:CR | 9456.28 | 1 | 9456.28 | 137.97 | 0.0000 |
| D:Dir | 25.463 | 1 | 25.463 | 0.37 | 0.5431 |
| INTERACTIONS | | | | | |
| AB | 66.4378 | 4 | 16.6095 | 0.24 | 0.9139 |
| AC | 131.685 | 2 | 65.8427 | 0.96 | 0.3850 |
| AD | 28.1033 | 2 | 14.0516 | 0.21 | 0.8149 |
| BC | 6.82358 | 2 | 3.41179 | 0.05 | 0.9515 |
| BD | 11.4034 | 2 | 5.70172 | 0.08 | 0.9202 |
| CD | 3100.9 | 1 | 3100.9 | 45.24 | 0.0000 |
| RÉSIDU | 10 143.5 | 148 | 68.537 | | |
| TOTAL (CORRIGE) | 34 892.8 | 167 | | | |
| Tous les F sont basés sur l'erreur résiduelle quadratique moyenne. | | | | | |

La représentation graphique de l'analyse de variance à la Figure 4.11 présente les facteurs sur l'axe vertical de gauche et leur valeur de probabilité respective sur l'axe vertical de droite au même niveau. À la Figure 4.11, il y a 4 facteurs donc il y a 4 niveaux. La distance horizontale entre deux valeurs d'un facteur sur un même niveau indique la différence d'influence sur la réponse entre ces deux valeurs. Les résidus sont représentés sur l'abscisse à la largeur de leur dispersion. Pour observer une différence significative d'influence entre deux valeurs d'un facteur, il faut que la distance entre ces deux valeurs soit plus grande que la largeur des résidus. Ainsi, il est possible de visualiser les différences d'influences sur la réponse entre chaque valeur d'un facteur.

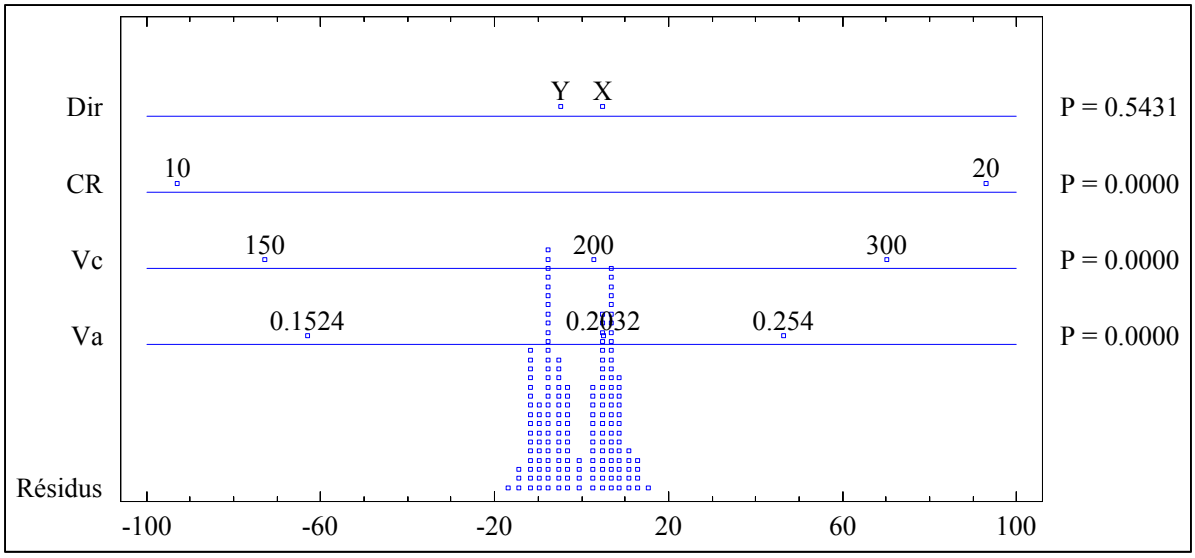



Figure 4.11 Analyse de variance des efforts normaux moyens des opérations des plaques P5 et P6

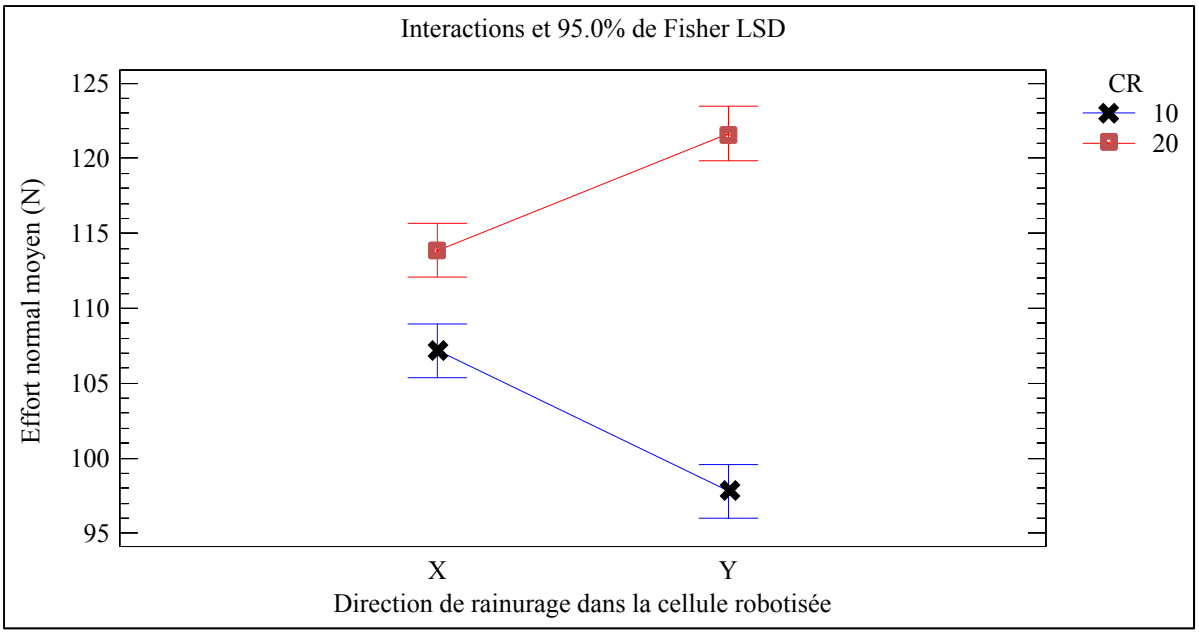



Figure 4.12 Interaction entre la configuration du robot et la direction de rainurage sur les efforts normaux moyens des opérations des plaques P5 et P6

### 4.1.3 Conclusion

La vitesse d'avance influence les efforts d'avance moyens et a une faible influence sur les efforts normaux moyens. La vitesse de coupe n'influence pas les efforts d'avance moyens. La vitesse de coupe a une faible influence sur les efforts normaux moyens. Les opérations de la première plaque P1 présentent les efforts d'avance et normaux les plus élevés de toutes les opérations pour les mêmes vitesses. Les efforts élevés des opérations de la plaque P1 sont probablement attribuable à l'usure de l'outil. L'outil utilisé à la plaque P1 est le seul outil à être usagé avant les opérations de rainurage. L'usure mesurée de la surface d'attaque de l'outil de la plaque P1 après rainurage robotisé est de 110 µm qui est 4 fois supérieur à l'usure moyenne mesurée des autres outils après le rainurage des autres plaques. Les efforts normaux moyens sont plus élevés que les efforts d'avance moyens des opérations des plaques P1, P3, P5 et P6. À l'inverse, les efforts d'avance moyens sont plus élevés que les efforts normaux moyens des opérations des plaques P2 et P4. Lors du rainurage d'un matériau isotrope, les efforts d'avance sont normalement supérieurs aux efforts normaux

moyens, (Zaghbani et al., 2012a). La forte usure de l'outil utilisé à la plaque P1 ou un problème d'acquisition des efforts de coupe explique peut-être les efforts normaux moyens plus élevés que les efforts d'avance moyens aux opérations de la plaque P1. La différence du procédé de fabrication entre le groupe de plaques P1, P2 et P4 et le groupe de plaques P3, P5 et P6 explique peut-être des efforts normaux moyens plus élevés que les efforts d'avance moyens.

Une analyse de variance indique une influence significative de la vitesse d'avance et de coupe et de la configuration du robot sur les efforts normaux moyens des opérations des plaques P5 et P6 à un niveau de confiance de 95 %. Cette analyse de variance indique aussi que l'interaction entre la configuration du robot et la direction de rainurage a une influence significative sur les efforts normaux moyens. Ainsi, il y a une plus grande différence d'efforts normaux moyens entre les configurations du robot pour une direction de rainurage Y que pour une direction de rainurage X.

La conclusion de deux modèles de régression suivie d'une analyse de variance est présentée à la section suivante pour déterminer l'influence de la vitesse d'avance, de coupe et de la configuration du robot sur les efforts moyens des opérations OP10P1 45° CR10 Y et OP20P1 -45° CR20 X, (Slamani, Gauthier et Chatelain, 2014b).

#### 4.1.3.1 Conclusion de l'article publié dans le journal « Measurement » concernant les efforts de coupe des opérations OP10P1 et OP20P1, (Slamani, Gauthier et Chatelain, 2014b)

Les vitesses de coupe et d'avance servent de variables indépendantes pour les modèles de régressions développés dans cette section. Deux modèles de régression pour la prédiction des efforts normaux moyens avec un coefficient de détermination significatif sont présentés pour l'OP10P1 et l'OP20P1. Deux autres modèles de régression, incluant la configuration du robot, pour la prédiction des efforts d'avance moyens avec un coefficient de détermination significatif sont présentés pour l'OP10P1 et l'OP20P1. Les valeurs du coefficient de

détermination pour les forces normales sont de 93 % et 98 % pour l'OP10P1 et l'OP20P1 respectivement. Les valeurs du coefficient de détermination pour les forces d'avance sont de 86 % et 91 % pour l'OP10P1 et l'OP20P1 respectivement. L'effort normal moyen à une amplitude supérieure à la force d'avance moyenne à l'inverse de ce qui est normalement observé lors du rainurage d'un matériau isotrope sur machine-outil, (Zaghbani et al., 2012a). La vitesse de coupe n'est pas suffisamment significative pour être retenue dans les modèles de régression pour les efforts de coupe de l'OP10P1. Cependant, les vitesses de coupe et d'avance sont significatives pour les modèles de régression de l'OP20P1. Le processus pas-à-pas descendant d'élimination des termes a démontré que la vitesse d'avance a la plus grande influence sur les efforts de coupe pour tous les modèles de régression.

La vitesse d'avance et le second niveau d'interaction entre les vitesses de coupe et d'avance sont suffisants dans le modèle de régression pour prédire l'effort normal moyen sans la présence de la configuration du robot. Cependant, la configuration du robot est suffisamment significative pour être retenue dans les modèles de régression des efforts d'avance moyens. L'ajout de la configuration du robot comme variable indépendante dans les modèles de régression de la force d'avance a grandement amélioré leur coefficient de détermination. Le coefficient de détermination a augmenté de 77 % à 86 % pour l'OP10P1 et de 58 % à 91 % pour l'OP20P1.

## 4.2 Identification de l'influence des conditions de coupe sur les critères de rugosité Ra et Rt

Les critères de rugosité Ra et Rt des OP10P1, OP20P1 et OP10P2 présentés à la section précédente 3.2.2 possèdent une grande dispersion pour un pli orienté à -45°. Les critères de rugosité Ra et Rt des opérations OP10P1 et OP20P2 présentés à la section précédente 3.2.3 possèdent aussi une grande dispersion pour un pli orienté à -45° et une dispersion moindre pour un pli à 45°. La cause de dispersion n'a pas été identifiée lors des prises de mesures et celle des données aberrantes peut être due à l'accumulation de fragments de fibres de carbone sur la pointe du profilomètre lors des mesures.

Pour déterminer l'influence des conditions de coupe sur un critère de rugosité, une analyse ANOVA est effectuée pour chaque orientation de pli mesurée puisque l'orientation du pli influence fortement le mécanisme de rupture et les critères de rugosité Ra et Rt.

### 4.2.1 Influence de conditions de coupe sur la rugosité Ra et Rt pour un pli orienté à -45° des opérations OP10P1 CR10 robotisées et OP10P2 sur centre d'usinage

Une analyse de variance pour chaque critère de rugosité Ra et Rt est réalisée pour déterminer si l'influence de la vitesse d'avance, de la vitesse de coupe et du type de machine est significative à un niveau de confiance de 95 %. Les résultats de l'analyse pour le critère de rugosité Ra sont présentés au Tableau 4.2 et à la Figure 4.13. Trois données aberrantes sont exclues de l'analyse.

Tableau 4.2 Analyse de variance pour Ra mesuré sur un pli orienté à -45° de l'OP10P1 CR10 et l'OP10P2 sur centre d'usinage

| *Source* | *Somme des carrés* | *Ddl* | *Carré moyen* | *F* | *Probabilité* |
|---|---|---|---|---|---|
| COVARIABLES | | | | | |
| select(Rt,Orient. Pli=-45) | 7.41507 | 1 | 7.41507 | 25.75 | 0.0000 |
| EFFETS PRINCIPAUX | | | | | |
| A:Va | 9.23507 | 4 | 2.30877 | 8.02 | 0.0001 |
| B:Vc | 4.8253 | 2 | 2.41265 | 8.38 | 0.0011 |
| C:OP | 0.00937775 | 1 | 0.00937775 | 0.03 | 0.8579 |
| INTERACTIONS | | | | | |
| AB | 3.47237 | 8 | 0.434046 | 1.51 | 0.1914 |
| AC | 0.131047 | 4 | 0.0327617 | 0.11 | 0.9768 |
| BC | 1.38619 | 2 | 0.693097 | 2.41 | 0.1053 |
| RÉSIDU | 9.792 | 34 | 0.288 | | |
| TOTAL (CORRIGE) | 53.4264 | 56 | | | |
| Tous les F sont basés sur l'erreur résiduelle quadratique moyenne. | | | | | |

On observe que la vitesse d'avance (A :Va) et la vitesse de coupe (B :Vc) ont une influence significative sur Ra pour un pli orienté à -45°. Cependant à la Figure 4.13, la différence significative n'est qu'entre un groupe de vitesses d'avance de 0.25 à 0.40 mm/rev et la vitesse d'avance de 0.45 mm/rev isolée à droite. L'observation est semblable pour les vitesses de coupe dont la différence significative est entre 200 m/min et le groupe de 400 à 650 m/min. Les influences significatives des facteurs ne sont présentes qu'entre ces groupes de facteurs.

Les représentations graphiques des analyses de variance aux Figure 4.13 et Figure 4.15 présentent les facteurs sur l'axe vertical de gauche et leur valeur de probabilité respective sur l'axe vertical de droite au même niveau. À la Figure 4.13, il y a 4 facteurs donc il y a 4 niveaux. La distance horizontale entre deux valeurs d'un facteur sur un même niveau indique la différence d'influence sur la réponse entre ces deux valeurs. Les résidus sont représentés sur l'abscisse à la largeur de leur dispersion. Pour observer une différence significative d'influence entre deux valeurs d'un facteur, il faut que la distance entre ces deux valeurs soit plus grande que la largeur des résidus. Ainsi, il est possible de visualiser les différences d'influences sur la réponse entre chaque valeur d'un facteur.

La  présente une évolution semblable du critère Ra en fonction de la vitesse d'avance pour chaque opération et un pli orienté à -45°. On remarque aussi la démarcation du critère Ra pour la vitesse d'avance de 0.45 mm/rev par rapport aux autres vitesses. Les résultats de l'analyse pour le critère de rugosité Rt sont présentés au Tableau 4.3 et à la Figure 4.15. Cinq données aberrantes sont exclues de l'analyse.

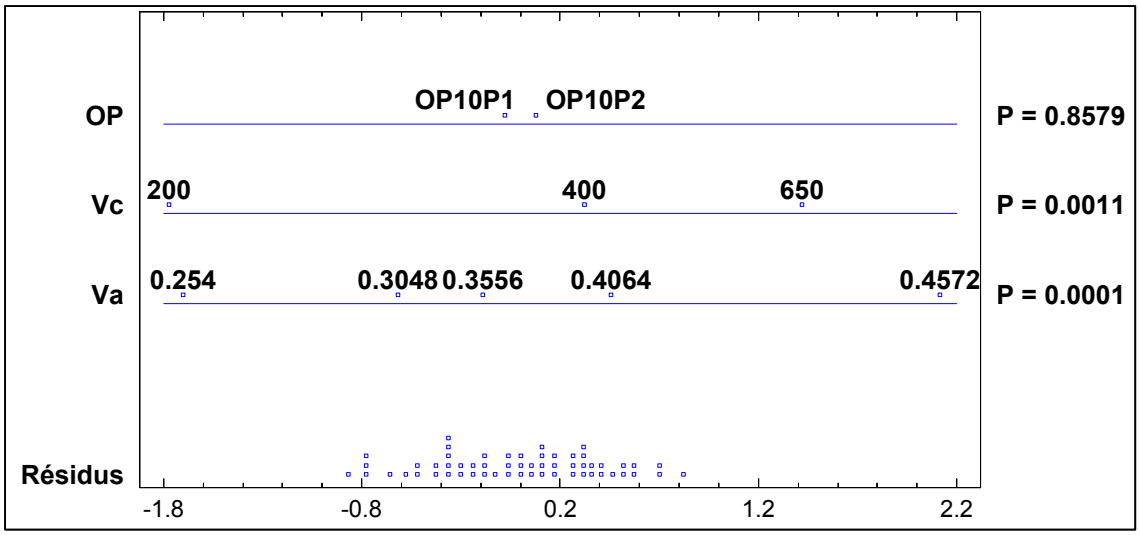



Figure 4.13 ANOVA graphique pour Ra et une orientation du pli à -45°, OP10P1 CR10 et OP10P2 sur centre d'usinage

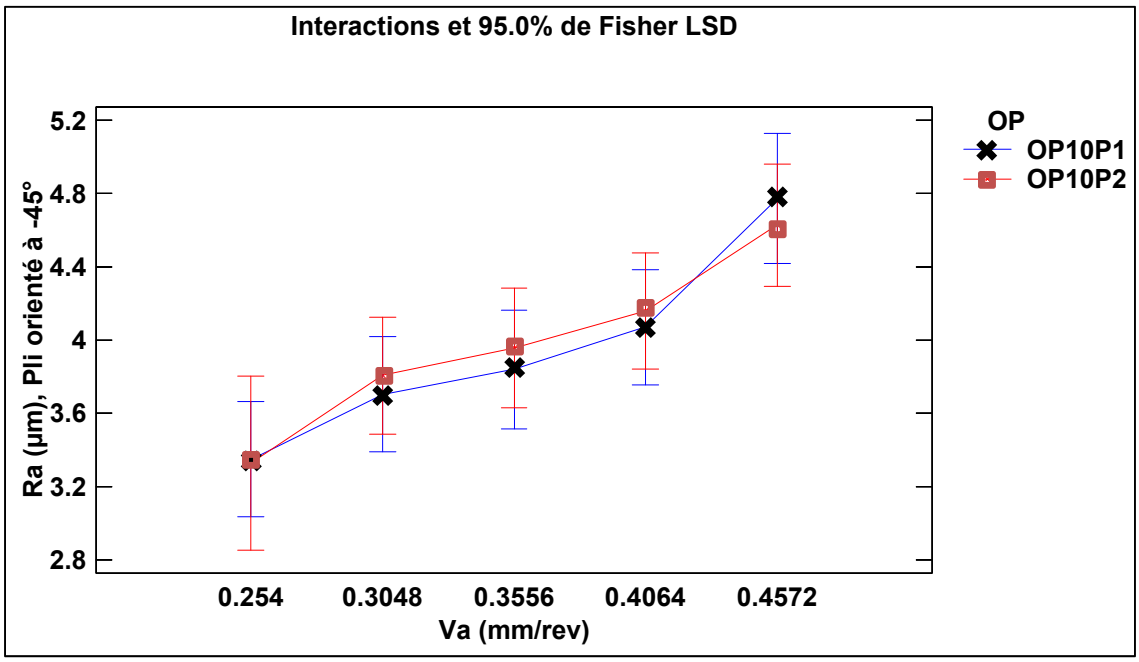



Figure 4.14 Interaction entre la vitesse d'avance (Va) et les opérations pour des valeurs moyennes de Ra et un pli orienté à -45°

Tableau 4.3 Analyse de variance pour Rt mesuré sur un pli orienté à -45° de l'OP10P1 CR10 et l'OP10P2 sur centre d'usinage

| *Source* | *Somme des carrés* | *Ddl* | *Carré moyen* | *F* | *Probabilité* |
|---|---|---|---|---|---|
| COVARIABLES | | | | | |
| select(Ra,Orient. Pli=-45) | 322.951 | 1 | 322.951 | 24.10 | 0.0000 |
| EFFETS PRINCIPAUX | | | | | |
| A:Va | 80.3342 | 4 | 20.0835 | 1.50 | 0.2260 |
| B:Vc | 21.7591 | 2 | 10.8796 | 0.81 | 0.4530 |
| C:OP | 5.90929 | 1 | 5.90929 | 0.44 | 0.5114 |
| INTERACTIONS | | | | | |
| AB | 80.0034 | 8 | 10.0004 | 0.75 | 0.6510 |
| AC | 41.5925 | 4 | 10.3981 | 0.78 | 0.5491 |
| BC | 5.15658 | 2 | 2.57829 | 0.19 | 0.8259 |
| RÉSIDU | 428.889 | 32 | 13.4028 | | |
| TOTAL (CORRIGE) | 1252.15 | 54 | | | |
| Tous les F sont basés sur l'erreur résiduelle quadratique moyenne | | | | | |

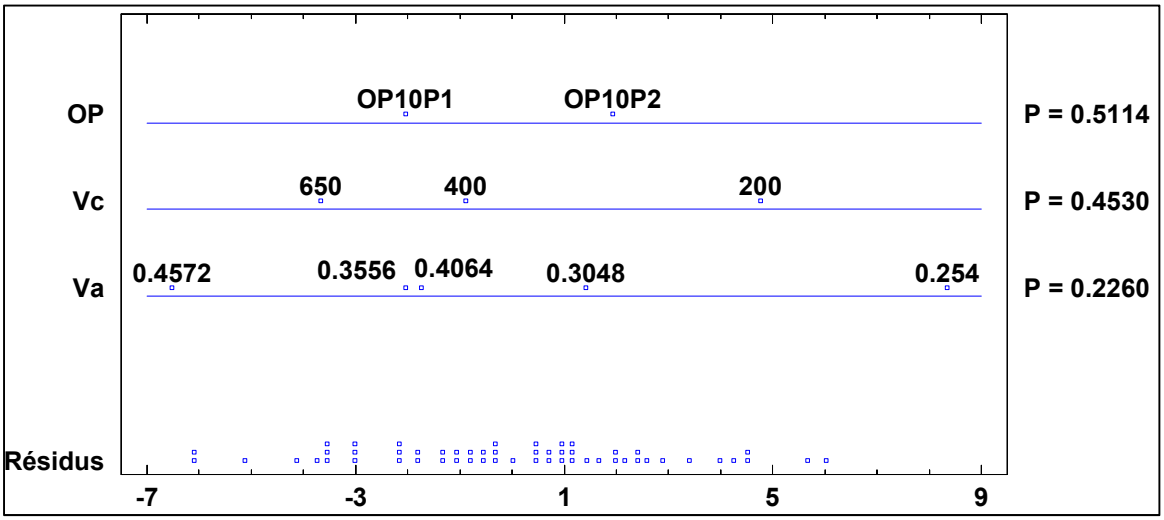



Figure 4.15 ANOVA graphique pour Rt et une orientation du pli à -45°, OP10P1 CR10 et OP10P2 sur centre d'usinage

On observe à la Figure 4.15 une seule différence significative entre les vitesses d'avance opposées de 0.25 et 0.45 mm/rev. La figure suivante présente les moyennes de Rt en fonction de la vitesse d'avance pour chaque opération de rainurage pour un pli orienté à -45°. Il n'y a pas de différence significative entre le rainurage robotisé de l'OP10P1 et le rainurage du centre d'usinage de l'OP10P2 pour les critères de rugosité Ra et Rt mesurés sur un pli orienté à -45°.

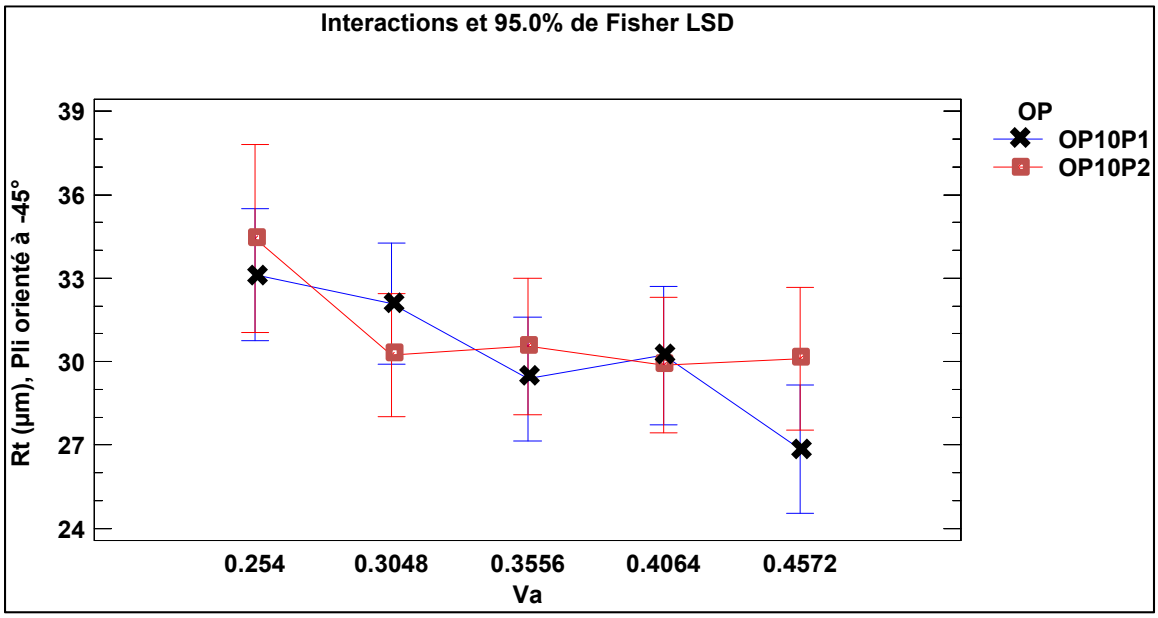



Figure 4.16 Interaction entre la vitesse d'avance (Va) et les opérations pour des valeurs moyennes de Rt et un pli orienté à -45°.

### 4.2.2 Influence des conditions de coupe sur Ra et Rt pour un pli orienté à 45° de l'opération OP10P1 CR10 robotisée et OP10P2 sur centre d'usinage

Une analyse de variance pour chaque critère de rugosité Ra et Rt est réalisée pour déterminer si l'influence de la vitesse d'avance, de la vitesse de coupe et du type de machine est significative à un niveau de confiance de 95 % pour un pli orienté à 45°. Les résultats de l'analyse pour le critère de rugosité Ra sont présentés au Tableau 4.4 et à la Figure 4.17. Deux données aberrantes sont exclues de l'analyse.

Tableau 4.4 Analyse de variance pour Ra mesuré sur un pli orienté à 45° de l'OP10P1 CR10 et l'OP10P2 sur centre d'usinage

| *Source* | *Somme des carrés* | *Ddl* | *Carré moyen* | *F* | *Probabilité* |
|---|---|---|---|---|---|
| COVARIABLES | | | | | |
| select(Rt,Orient. Pli=45) | 0.0971531 | 1 | 0.0971531 | 18.09 | 0.0001 |
| EFFETS PRINCIPAUX | | | | | |
| A:Va | 0.136445 | 4 | 0.0341112 | 6.35 | 0.0006 |
| B:Vc | 0.128036 | 2 | 0.0640179 | 11.92 | 0.0001 |
| C:OP | 0.190289 | 1 | 0.190289 | 35.44 | 0.0000 |
| INTERACTIONS | | | | | |
| AB | 0.03243 | 8 | 0.00405375 | 0.76 | 0.6436 |
| AC | 0.200176 | 4 | 0.0500441 | 9.32 | 0.0000 |
| BC | 0.0968177 | 2 | 0.0484089 | 9.02 | 0.0007 |
| RÉSIDU | 0.187922 | 35 | 0.0053692 | | |
| TOTAL (CORRIGE) | 2.61053 | 57 | | | |
| Tous les F sont basés sur l'erreur résiduelle quadratique moyenne | | | | | |

Les représentations graphiques des analyses de variance aux Figure 4.17 et Figure 4.20 présentent les facteurs sur l'axe vertical de gauche et leur valeur de probabilité respective sur l'axe vertical de droite au même niveau. À la Figure 4.17, il y a 3 facteurs donc il y a 3 niveaux. La distance horizontale entre deux valeurs d'un facteur sur un même niveau indique la différence d'influence sur la réponse entre ces deux valeurs. Les résidus sont représentés sur l'abscisse à la largeur de leur dispersion. Pour observer une différence significative d'influence entre deux valeurs d'un facteur, il faut que la distance entre ces deux valeurs soit plus grande que la largeur des résidus. Ainsi, il est possible de visualiser les différences d'influences sur la réponse entre chaque valeur d'un facteur.

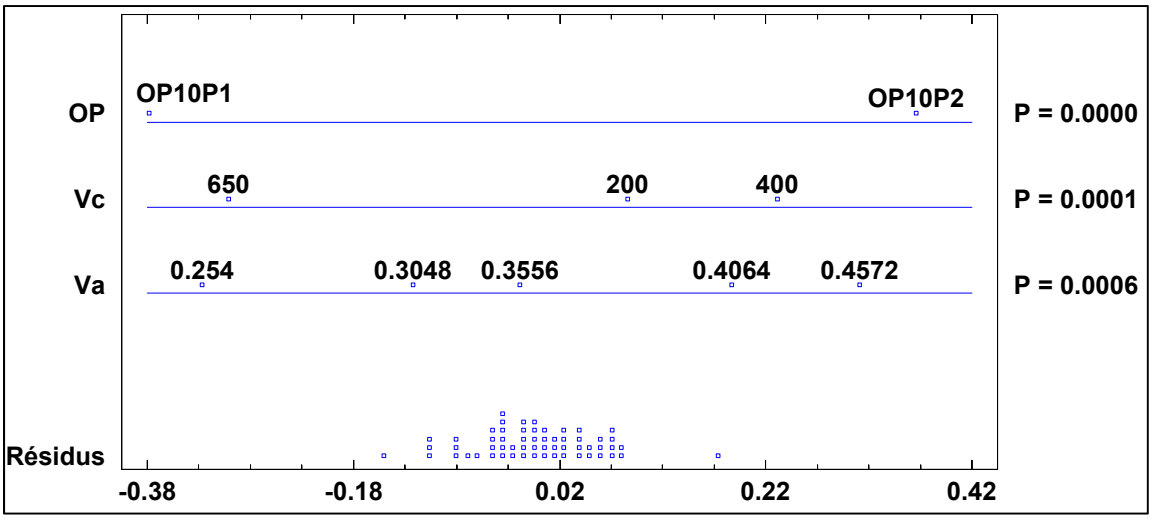



Figure 4.17 ANOVA graphique pour Ra et une orientation du pli à 45°, OP10P1 CR10 et OP10P2 sur centre d'usinage

On observe une différence significative entre les résultats de chaque opération de rainurage à la Figure 4.17. On observe aussi que la rugosité moyenne est influencée par la vitesse de coupe et la vitesse d'avance étant donnée leur valeur de probabilité inférieure à 0.05. Les différences significatives entre les opérations sont détaillées en fonction de la vitesse d'avance pour la rugosité moyenne à la Figure 4.18. La différence est plus marquante pour les vitesses d'avance de 0.40 et 0.45 mm/rev. La Figure 4.19 présente les différences significatives entre les opérations pour les vitesses de coupe de 200 et 400 m/min pour la rugosité moyenne Ra.

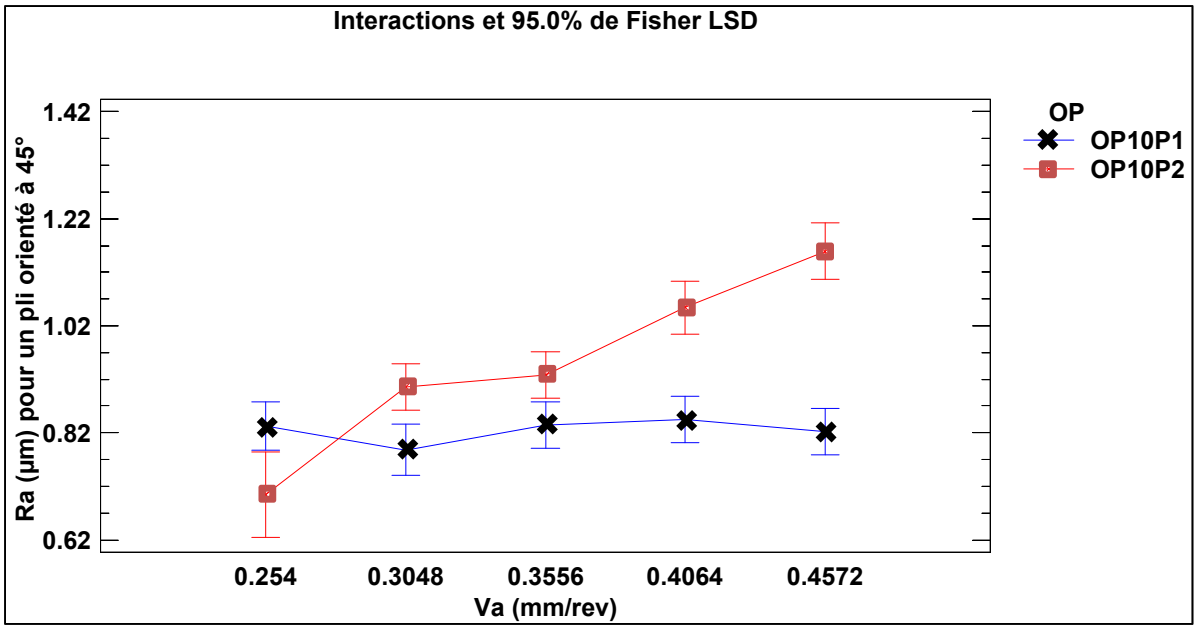



Figure 4.18 Interaction entre la vitesse d'avance (Va) et les opérations pour des valeurs moyennes de Ra et un pli orienté à 45°

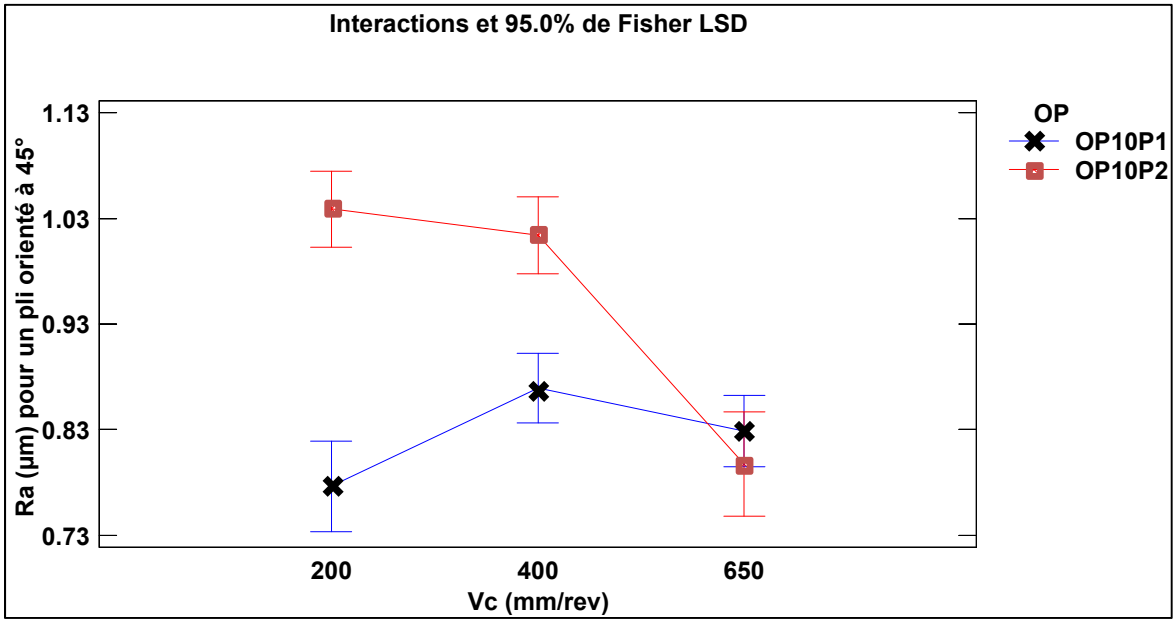



Figure 4.19 Interaction entre la vitesse de coupe (Vc) et les opérations pour des valeurs moyennes de Ra et un pli orienté à 45°

Les résultats de l'analyse ne permettent pas d'observer une influence significative des conditions de coupe sur le critère de rugosité Rt pour un pli orienté à 45° au Tableau 4.5 et à la Figure 4.20. Trois données aberrantes sont exclues de l'analyse. Il n'y a pas de différence significative entre les deux opérations de rainurage en fonction de la vitesse de coupe pour la valeur moyenne du critère Rt à un niveau de confiance de 95 % à la Figure 4.21. Les résultats sont dispersés et étendus donc ils ne permettent pas d'observer des différences significatives.

Tableau 4.5 Analyse de variance pour Rt mesuré sur un pli orienté à 45° de l'OP10P1 CR10 et l'OP10P2 sur centre d'usinage

| *Source* | *Somme des carrés* | *Ddl* | *Carré moyen* | *F* | *Probabilité* |
|---|---|---|---|---|---|
| COVARIABLES | | | | | |
| select(Ra,Orient. Pli=45) | 9.67528 | 1 | 9.67528 | 31.70 | 0.0000 |
| EFFETS PRINCIPAUX | | | | | |
| A:Va | 0.554773 | 4 | 0.138693 | 0.45 | 0.7684 |
| B:Vc | 1.06139 | 2 | 0.530695 | 1.74 | 0.1910 |
| C:OP | 0.745262 | 1 | 0.745262 | 2.44 | 0.1274 |
| INTERACTIONS | | | | | |
| AB | 4.15016 | 8 | 0.51877 | 1.70 | 0.1343 |
| AC | 0.671986 | 4 | 0.167997 | 0.55 | 0.6999 |
| BC | 0.017478 | 2 | 0.00873899 | 0.03 | 0.9718 |
| RÉSIDU | 10.3758 | 34 | 0.305169 | | |
| TOTAL (CORRIGE) | 83.7248 | 56 | | | |
| Tous les F sont basés sur l'erreur résiduelle quadratique moyenne | | | | | |

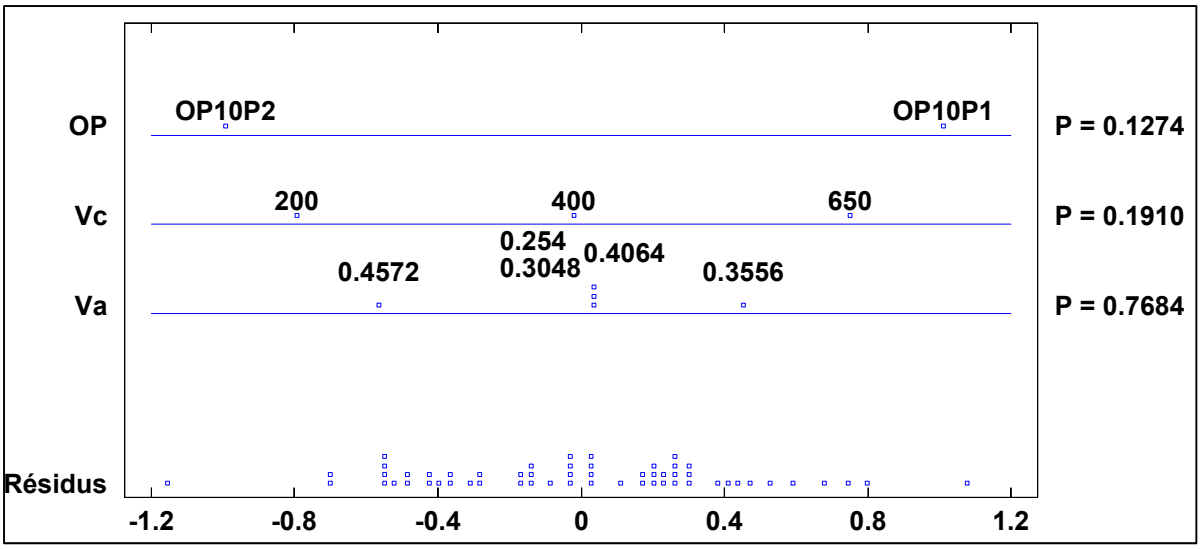



Figure 4.20 ANOVA graphique pour Rt mesuré sur un pli orienté à 45° de l'OP10P1 CR10 et l'OP10P2 sur centre d'usinage

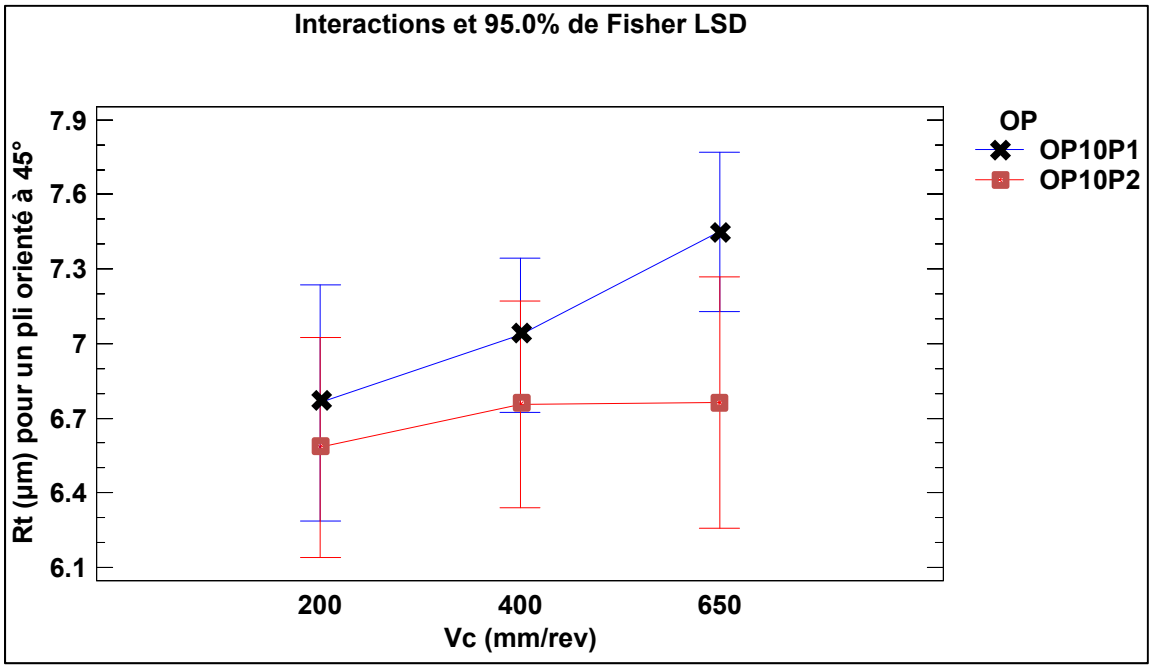



Figure 4.21 Interaction entre la vitesse de coupe (Vc) et les opérations pour des valeurs moyennes de Rt mesurées sur un pli orienté à 45°

### 4.2.3 Conclusion

Deux analyses de variance pour chaque critère de rugosité Ra et Rt sont pratiquées pour un pli orienté à -45° des opérations de rainurage OP10P1, OP20P1 et OP10P2. Ces analyses présentent une influence significative des vitesses d'avance et de coupe sur la rugosité moyenne Ra. Dans la seconde analyse, la vitesse de coupe a une influence significative seulement sur la rugosité moyenne entre 200 m/min et le groupe de 400 et 650 m/min. La configuration du robot et le type de machine-outil n'influencent pas significativement le critère Ra pour un pli orienté à -45°. Une première analyse présente une influence significative de la vitesse d'avance sur le critère de rugosité Rt et la seconde présente une différence significative seulement entre les vitesses d'avance de 0.25 et 0.45 mm/rev. La vitesse de coupe, la configuration du robot et le type de machine-outil n'influencent pas significativement le critère Rt pour un pli orienté à -45°. Une analyse de variance pour chaque critère de rugosité Ra et Rt est pratiquée pour un pli orienté à 45° des opérations de rainurage OP10P1 et OP10P2. Le type de machine, les vitesses d'avance et de coupe ainsi que leur interaction ont une influence significative sur le critère Ra. On observe une différence significative du critère moyen Ra entre les machines pour une vitesse d'avance supérieure à 0.25 mm/rev et une vitesse de coupe inférieure à 650 m/min. L'analyse pour le critère Rt d'un pli orienté à 45° ne permet pas l'observation d'influence significative des facteurs puisque la dispersion et l'étendue des résultats sont grandes.

La rugosité moyenne Ra est un bon critère pour caractériser la qualité de rainurage d'un pli orienté à -45° en fonction des conditions de coupe pour le rainurage robotisé et sur centre d'usinage. Pour un pli orienté à 45°, Ra est un bon critère pour caractériser la qualité de rainurage sur centre d'usinage en fonction des conditions de coupe. L'analyse pour un pli orienté à 45° montre aussi qu'il est un critère moins influencé par les conditions de coupe pour le rainurage robotisé aux Figure 4.18 et Figure 4.19. On observe qu'il est difficile de caractériser la qualité de rainurage en fonction des conditions de coupe avec le critère de rugosité Rt étant données la grande dispersion et étendue de ses résultats.

## 4.3 Identification de l'influence des conditions de coupe sur la délamination de surface

Le type de délamination de surface est fortement influencé par l'orientation du pli de surface par rapport à la direction de rainurage. Les échantillons rainurés avec un pli de surface orienté à 45° présentent des fibres non coupées (FNC) qui sont facilement altérables donc difficiles à représenter et à mesurer pour une analyse statistique de l'influence des facteurs. Plusieurs données aberrantes en fonction de la vitesse d'avance et de coupe doivent être supprimées pour obtenir une normalité. La majorité des résultats de longueur moyenne de FNC ne permettent pas d'obtenir une normalité respectable ou une différence significative de l'influence des facteurs. Seule l'analyse de variances de la longueur moyenne des FNC en avalant au centre de l'OP10P4 45° CR10 Y présente une influence significative de la vitesse d'avance et de coupe. Le rainurage avec un pli de surface orienté à -45° génère de l'arrachement de matière (ARM) difficile à altérer et plus facile à mesurer au microscope. Une analyse de variances de la longueur moyenne de l'ARM en opposition au centre présente une influence significative de la vitesse d'avance pour les opérations des plaques P1, P2 et P4 dont le pli de surface est orienté à -45°. Une seconde analyse de la longueur moyenne de l'ARM en avalant au centre présente aussi une influence significative de la vitesse d'avance pour les opérations des plaques P3, P5 et P6 dont le pli de surface est orienté à -45°.

### 4.3.1 Comparaison de la présence et de la longueur moyenne de la délamination de surface entre les opérations

Le pourcentage des échantillons rainurés présentant des fibres non coupées au centre pour un pli de surface de 45° est représenté à la Figure 4.22. La présence de FNC est faible en opposition pour les plaques P2, P3 et P4 dont l'outil était initialement neuf avant rainurage. L'outil utilisé à la plaque P1 et mesuré après rainurage était 4 fois plus usé à la surface d'attaque que ceux des plaques P5 et P6. Toutefois, la présence de FNC en opposition est largement plus élevée pour les plaques P3, P5 et P6 que les plaques P2 et P4 pour une faible

différence d'usure d'outil. Il est possible que le mode de fabrication des stratifiés influence la présence de FNC en opposition entre les plaques P1, P2, P4 et les plaques P3, P5 et P6. La longueur moyenne des fibres non coupées n'est pas comparable entre les opérations à cause de l'altération des FNC avant leurs mesures au microscope.

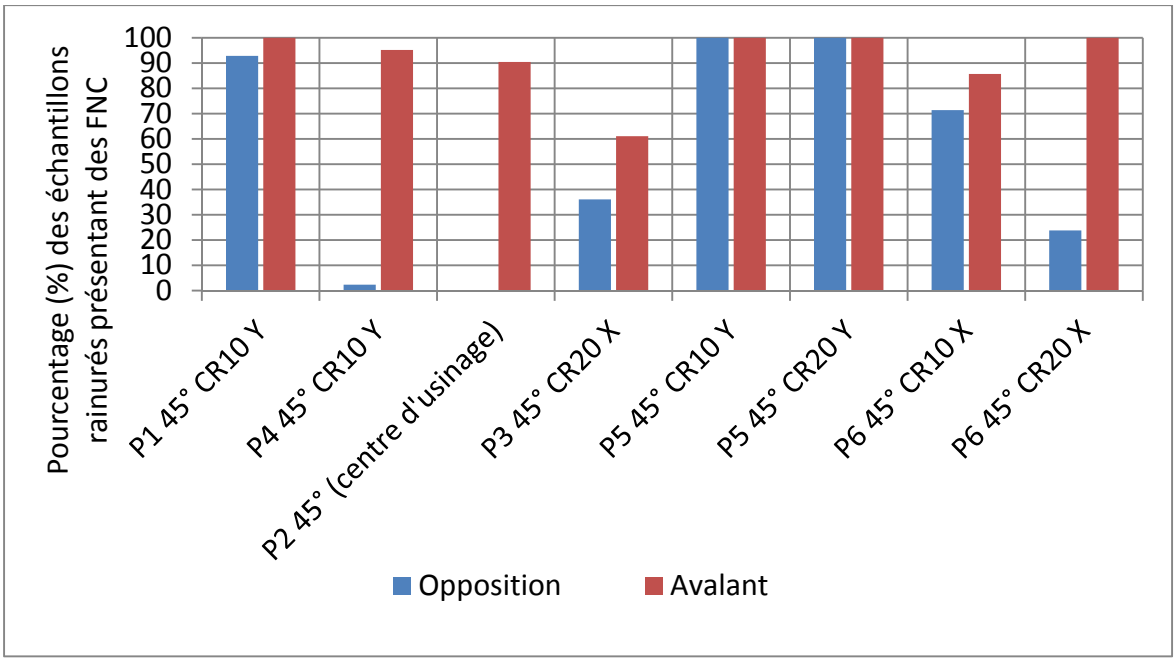



Figure 4.22 Pourcentage (%) des échantillons rainurés présentant des FNC pour un pli orienté à 45°

Le pourcentage des échantillons rainurés présentant de l'ARM au centre pour un pli de surface de —45° est représenté à la Figure 4.23. La présence et la longueur moyenne de l'ARM sont similaires en opposition entre P1, P2 et P4 pour les mêmes vitesses dont une vitesse d'avance maximale de 0.51 mm/rev aux Figure 4.23 et Figure 4.24. La LM de l'ARM en avalant entre P2 et P4 est similaire pour un outil initialement neuf. Les LM de l'ARM des plaques P3, P5 et P6 sont similaires pour les mêmes vitesses possiblement à cause des faibles vitesses d'avance expérimentées. La LM de l'ARM la plus élevée est présente à la plaque P1 dont l'outil est aussi le plus usé. Cependant, la longueur moyenne de l'ARM reste largement sous la tolérance de l'industriel de 3.81 mm.

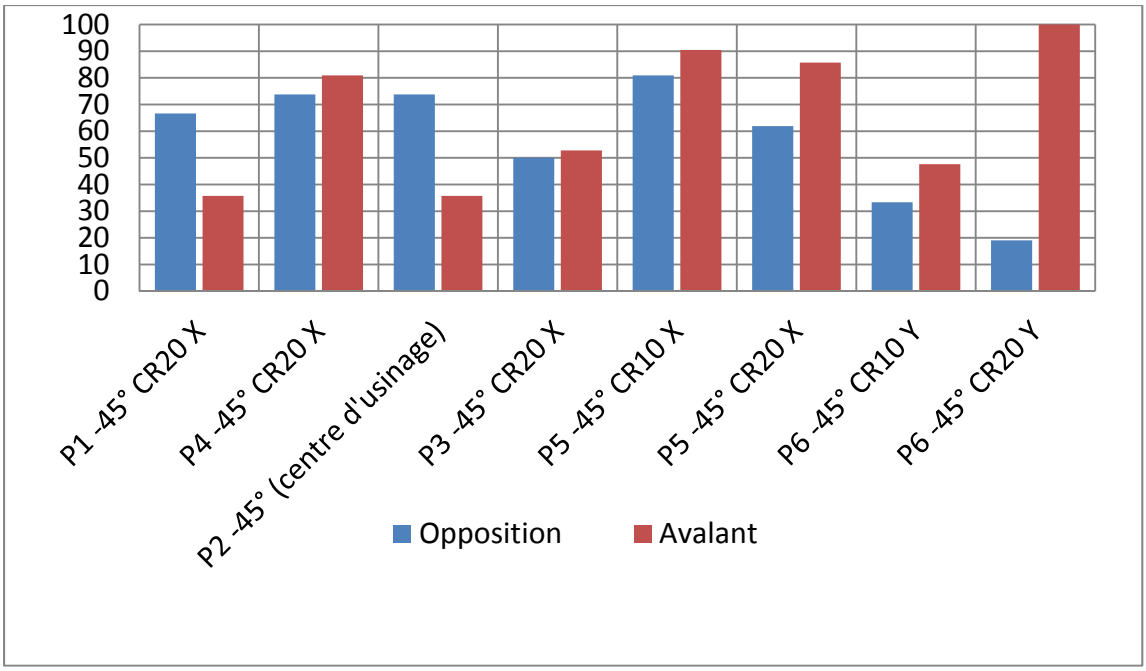



Figure 4.23 Pourcentage (%) des échantillons rainurés présentant des ARM pour un pli de surface orienté à —45°

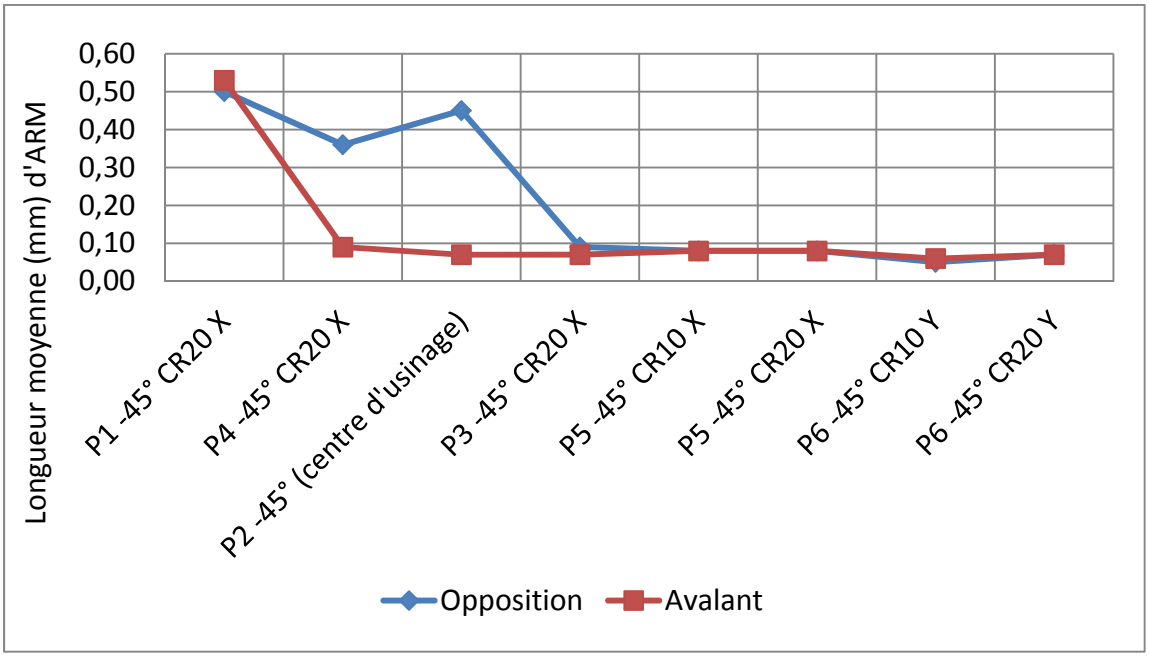



Figure 4.24 Longueur moyenne (mm) d'ARM au centre par mode de coupe en fonction des opérations

### 4.3.2 Influence de la vitesse d'avance et de coupe sur la longueur moyenne des FNC en avalant de l'OP10P4 45° CR10 Y

Une analyse de variance pour la longueur moyenne des fibres non coupées (FNC) est réalisée pour déterminer si l'influence de la vitesse d'avance et de coupe est significative à un niveau de confiance de 95 % pour l'OP10P4 45° CR10 Y. Les FNC normales à la surface rainurée sont observées et mesurées au centre et en avalant. Il y a 7 données aberrantes de supprimées et la normalité des données est atteinte avec un niveau de confiance de 95 %. Au Tableau 4.6 et à la Figure 4.25, il y a une plus grande différence entre l'influence des vitesses d'avance qu'entre l'influence des vitesses de coupe sur la longueur moyenne de FNC en avalant.

Tableau 4.6 Analyse de variance pour la longueur moyenne de FNC du pli supérieur en avalant de l'OP10P4 45° CR10 Y

| Source | Somme des carrés | Ddl | Carré moyen | F | Probabilité |
|---|---|---|---|---|---|
| EFFETS PRINCIPAUX | | | | | |
| A:Vit. avance | 0.0112101 | 6 | 0.00186834 | 5.01 | 0.0020 |
| B:Vit. coupe | 0.00834095 | 5 | 0.00166819 | 4.48 | 0.0054 |
| RÉSIDU | 0.0085717 | 23 | 0.000372683 | | |
| TOTAL (CORRIGE) | 0.0285172 | 34 | | | |
| Tous les F sont basés sur l'erreur résiduelle quadratique moyenne | | | | | |

La représentation graphique de l'analyse de variance à la Figure 4.25 présente les facteurs sur l'axe vertical de gauche et leur valeur de probabilité respective sur l'axe vertical de droite au même niveau. À la Figure 4.25, il y a 2 facteurs donc il y a 2 niveaux. La distance horizontale entre deux valeurs d'un facteur sur un même niveau indique la différence d'influence sur la réponse entre ces deux valeurs. Les résidus sont représentés sur l'abscisse à la largeur de leur dispersion. Pour observer une différence significative d'influence entre deux valeurs d'un facteur, il faut que la distance entre ces deux valeurs soit plus grande que

la largeur des résidus. Ainsi, il est possible de visualiser les différences d'influences sur la réponse entre chaque valeur d'un facteur.

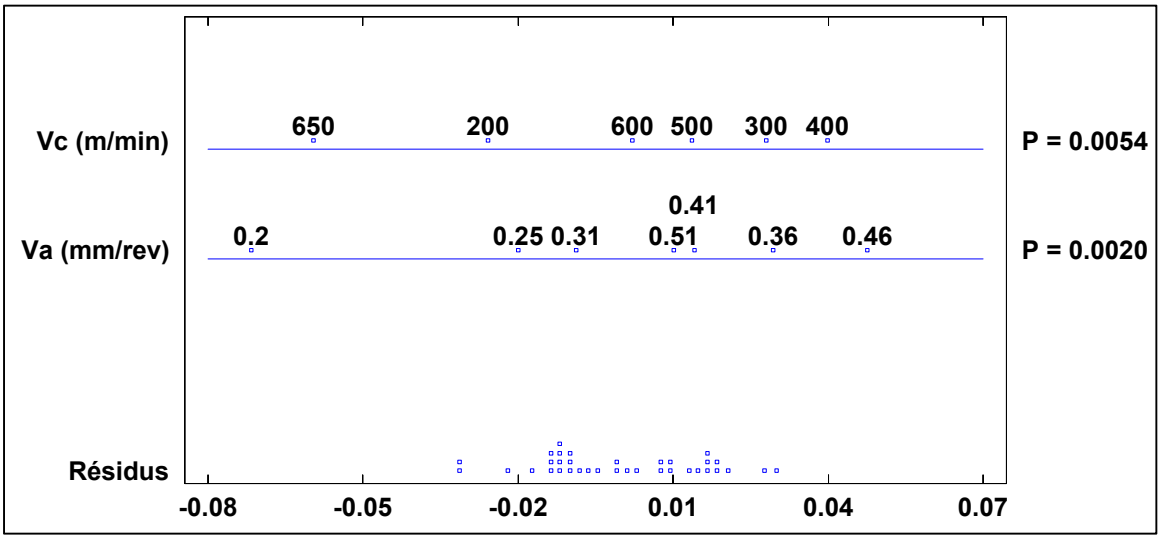



Figure 4.25 ANOVA graphique pour la longueur moyenne des FNC en avalant au centre et au pli supérieur de l'OP10P4 45° CR10 Y

À la Figure 4.26, il y a une différence significative d'influence entre 0.20 mm/rev et les autres vitesses d'avance. Il y a aussi une différence significative d'influence entre les vitesses de 0.25 à 0.31 mm/rev et 0.46 mm/rev. L'influence de la vitesse d'avance sur la délamination de surface en opposition et en avalant est aussi observée lors des expérimentations de (Davim et Reis, 2005). Cependant, ils n'avaient pas observé une influence de la vitesse de coupe sur la délamination de surface. À la Figure 4.27, il y a une différence significative entre le groupe de vitesses de 200 et 650 m/min et les autres vitesses de coupe. Cette différence d'influence de la vitesse de coupe ne permet pas de déterminer une vitesse de coupe visant à minimiser la dimension de la délamination de surface en avalant.

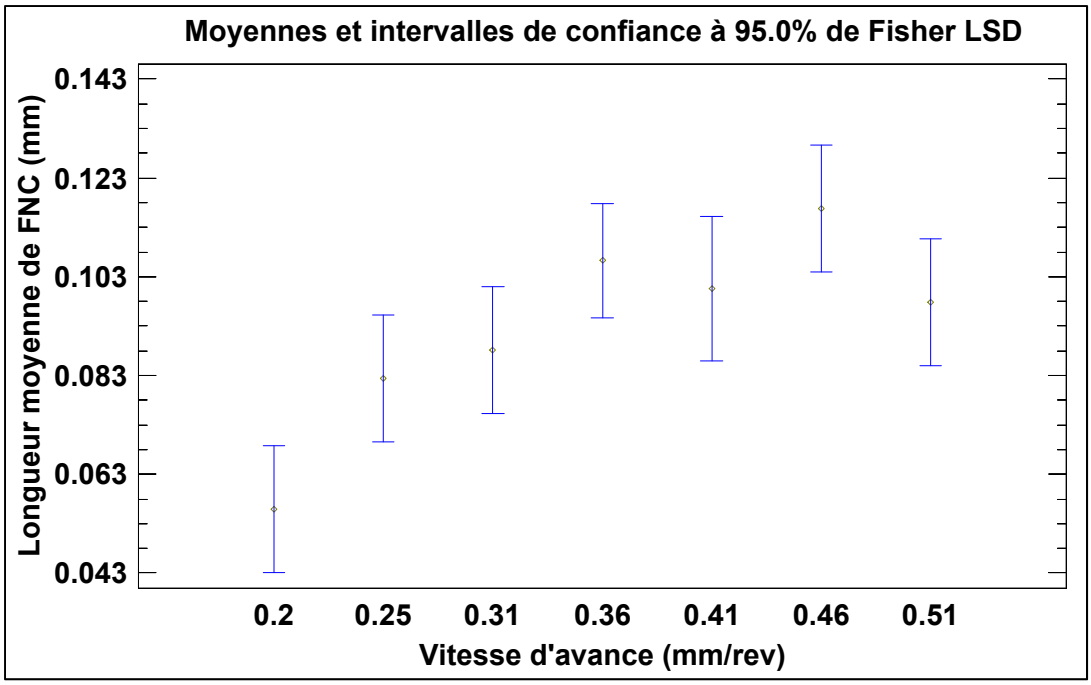



Figure 4.26 Moyennes et intervalles de confiance de la longueur moyenne de FNC en avalant de l'OP10P4 45° CR10 Y en fonction de la vitesse d'avance

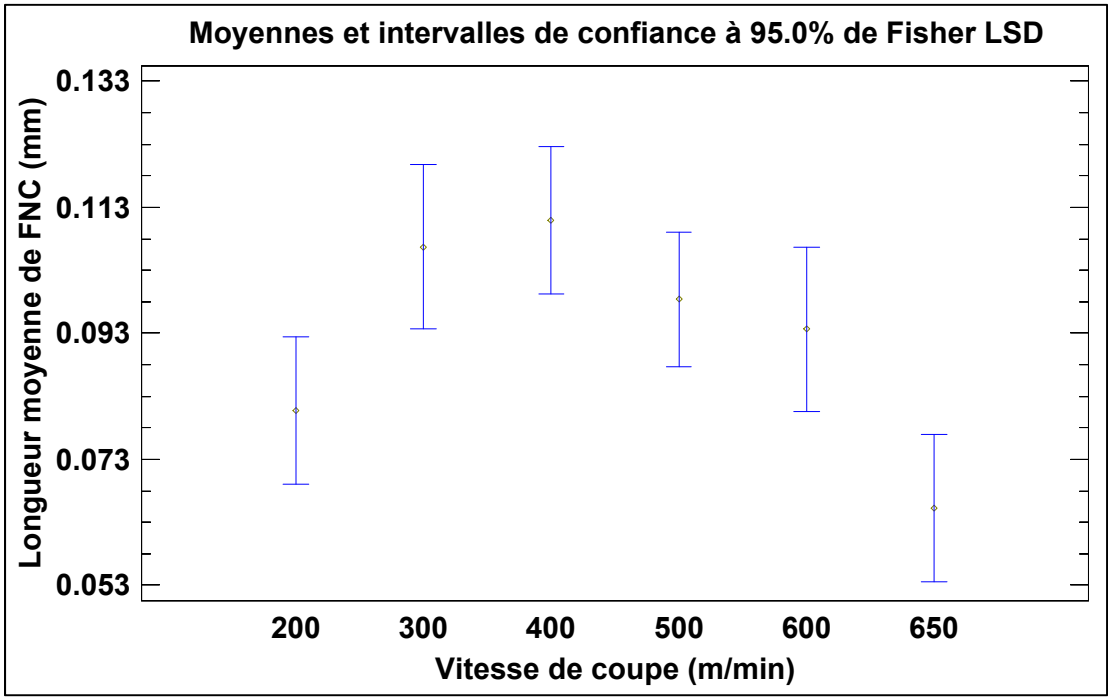



Figure 4.27 Moyennes et intervalles de confiance de la longueur moyenne de FNC en avalant de l'OP10P4 45° CR10 Y en fonction de la vitesse de coupe

### 4.3.3 Influence de la vitesse d'avance sur la longueur moyenne de l'ARM en opposition de l'OP20P1 -45° CR20 X, l'OP20P4 -45° CR20 X et l'OP10P2 -45°

Une analyse de variance pour la longueur moyenne de l'arrachement de matière (ARM) en opposition est réalisée pour déterminer si l'influence de la vitesse d'avance est significative à un niveau de confiance de 95 %. Les ARM sont observées et mesurées au centre et en opposition des plaques P1, P2 et P4 pour un pli de surface orienté à -45°. Les ARM mesurés de ces plaques sont retenus pour cette analyse puisqu'ils sont présent en opposition pour un pli de surface de -45° et qu'il est possible d'observer une progression de leur longueur moyenne en fonction de 7 vitesses d'avance expérimentées. Il y a 9 données aberrantes de supprimées et la normalité des données est atteinte avec un niveau de confiance de 95%. Au Tableau 4.7 et à la Figure 4.28, il y a une différence significative de l'influence des vitesses d'avance sur la longueur moyenne de l'ARM en opposition. À la Figure 4.29, il y a une différence significative d'influence entre trois groupes de vitesses d'avance de 0.20 à 0.25 mm/rev, de 0.30 à 0.41 mm/rev et de 0.46 à 0.51 mm/rev. L'influence de la vitesse d'avance sur la délamination de surface en opposition et en avalant est aussi observée lors des expérimentations de (Davim et Reis, 2005). Il n'y a pas d'influence significative de la vitesse de coupe sur la longueur moyenne de l'ARM en opposition. Il n'y a pas de différence significative entre la longueur moyenne de l'ARM des opérations OP20P1 -45° CR20 X, OP20P4 -45° CR20 X et OP10P2 -45° sur centre d'usinage.

La représentation graphique de l'analyse de variance à la Figure 4.28 présente les facteurs sur l'axe vertical de gauche et leur valeur de probabilité respective sur l'axe vertical de droite au même niveau. La distance horizontale entre deux valeurs d'un facteur sur un même niveau indique la différence d'influence sur la réponse entre ces deux valeurs. Les résidus sont représentés sur l'abscisse à la largeur de leur dispersion. Pour observer une différence significative d'influence entre deux valeurs d'un facteur, il faut que la distance entre ces deux valeurs soit plus grande que la largeur des résidus. Ainsi, il est possible de visualiser les différences d'influences sur la réponse entre chaque valeur d'un facteur.

Tableau 4.7 Analyse de variance pour la longueur moyenne d'ARM du pli supérieur en opposition des plaques P1, P2 et P4 pour un pli de surface orienté à -45°

| Source | Somme des carrés | Ddl | Carré moyen | F | Probabilité |
|---|---|---|---|---|---|
| EFFETS PRINCIPAUX | | | | | |
| A:Vit. avance | 0.919797 | 6 | 0.153299 | 6.90 | 0.0000 |
| B:Vit. coupe | 0.12204 | 5 | 0.0244081 | 1.10 | 0.3699 |
| C:No Plaque | 0.104717 | 2 | 0.0523583 | 2.36 | 0.1027 |
| RÉSIDU | 1.48951 | 67 | 0.0222315 | | |
| TOTAL (CORRIGE) | 2.76533 | 80 | | | |
| Tous les F sont basés sur l'erreur résiduelle quadratique moyenne | | | | | |

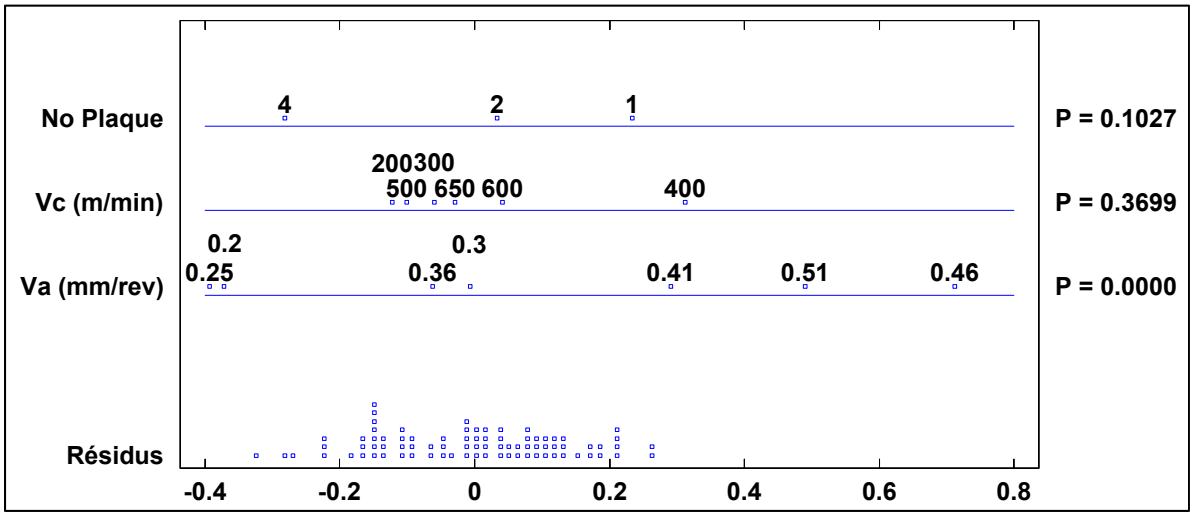



Figure 4.28 ANOVA graphique pour la longueur moyenne d'ARM en opposition au centre et au pli supérieur des plaques P1, P2 et P4 pour un pli de surface orienté à -45°

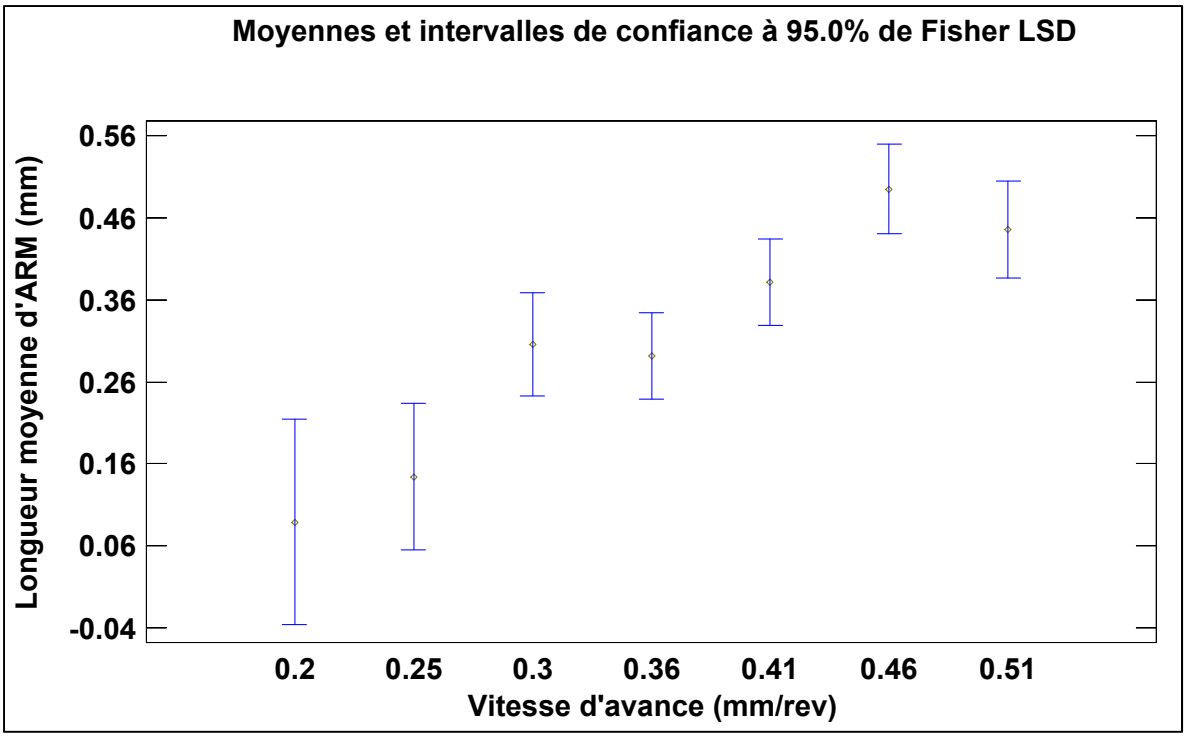



Figure 4.29 Moyennes et intervalles de confiance de la longueur moyenne d'ARM en opposition des plaques P1, P2 et P4 pour un pli orienté à -45° en fonction de la vitesse d'avance

### 4.3.4 Influence de la vitesse d'avance sur la longueur moyenne de l'ARM des plaques P3, P5 et P6 avec un pli de surface orienté à -45°

Une analyse de variance pour la longueur moyenne de l'arrachement de matière (ARM) est réalisée pour déterminer si l'influence de la vitesse d'avance est significative à un niveau de confiance de 95 %. La longueur moyenne de l'ARM est mesurée au centre des échantillons des opérations OP30P3 -45° CR20 X, OP50P5 -45° CR10 X, OP50P5 -45° CR20 X, OP50P6 -45° CR10 Y et OP50P6 -45° CR20 Y. Il y a onze données aberrantes de supprimées et la normalité des données est atteinte avec un niveau de confiance de 95%. Au Tableau 4.8 et à la Figure 4.30, il y a une différence significative entre l'influence de la vitesse 0.15 mm/rev et les vitesses 0.20 à 0.25 mm/rev. Il y a aussi une différence significative entre l'influence de la plaque P5 et les plaques P3 et P6 sur la longueur moyenne de l'ARM. Les opérations de rainurage de la plaque P5 montrent la plus grande

présence et longueur moyenne de délamination de surface du pli supérieur pour les vitesses de 0.15 à 0.25 mm/rev et 150 à 300 m/min. L'influence de la vitesse d'avance sur la délamination de surface en opposition et en avalant est aussi observée lors des expérimentations de (Davim et Reis, 2005). Il n'y a pas d'influence significative de la vitesse de coupe et de la configuration du robot sur la longueur moyenne de l'ARM.

La représentation graphique de l'analyse de variance à la Figure 4.30 présente les facteurs sur l'axe vertical de gauche et leur valeur de probabilité respective sur l'axe vertical de droite au même niveau. La distance horizontale entre deux valeurs d'un facteur sur un même niveau indique la différence d'influence sur la réponse entre ces deux valeurs. Les résidus sont représentés sur l'abscisse à la largeur de leur dispersion. Pour observer une différence significative d'influence entre deux valeurs d'un facteur, il faut que la distance entre ces deux valeurs soit plus grande que la largeur des résidus. Ainsi, il est possible de visualiser les différences d'influences sur la réponse entre chaque valeur d'un facteur.

Tableau 4.8 Analyse de variance pour la longueur moyenne d'ARM du pli supérieur des plaques P3, P5 et P6 pour un pli de surface orienté à -45°

| Source | Somme des carrés | Ddl | Carré moyen | F | Probabilité |
|---|---|---|---|---|---|
| EFFETS PRINCIPAUX | | | | | |
| A:Vit. avance | 0.00343478 | 2 | 0.00171739 | 6.86 | 0.0015 |
| B:Vit. coupe | 0.00166365 | 3 | 0.000554549 | 2.21 | 0.0896 |
| C:Conf. robot | 0.000485186 | 1 | 0.000485186 | 1.94 | 0.1664 |
| D:No Plaque | 0.00372089 | 2 | 0.00186044 | 7.43 | 0.0009 |
| RÉSIDU | 0.031547 | 126 | 0.000250373 | | |
| TOTAL (CORRIGE) | 0.0392168 | 134 | | | |
| Tous les F sont basés sur l'erreur résiduelle quadratique moyenne | | | | | |

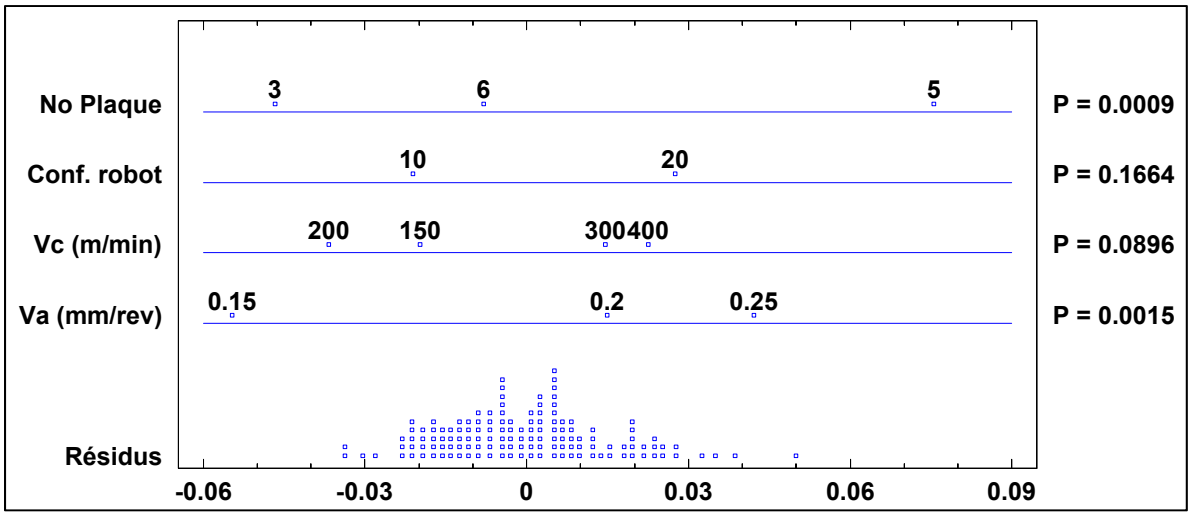



Figure 4.30 ANOVA graphique pour la longueur moyenne d'ARM au centre et au pli supérieur des plaques P3, P5 et P6 pour un pli de surface orienté à -45°

### 4.3.5 Conclusion

Les trois analyses de variance sur la longueur moyenne de la délamination de surface sont possibles à la suite de l'élimination de plusieurs données aberrantes en fonction de la vitesse d'avance et de coupe pour obtenir une normalité. Les trois analyses permettent d'observer une différence significative entre l'influence des vitesses d'avance sur la longueur moyenne de la délamination de surface. Ces trois analyses permettent aussi d'observer qu'il n'y a pas d'influence significative de la vitesse de coupe sur la longueur moyenne de délamination. L'influence de la vitesse d'avance sur la délamination de surface en opposition et en avalant est aussi observée lors des expérimentations de (Davim et Reis, 2005). L'analyse de variance sur la longueur moyenne d'ARM en opposition des opérations avec un pli de surface à -45° des plaques P1, P2 et P4 ne présente pas une différence significative entre les opérations robotisées et l'opération sur centre d'usinage. L'analyse de variance sur la longueur moyenne d'ARM pour un pli de surface à -45° des plaques P3, P5 et P6 ne présente pas de différence significative de l'influence des configurations du robot.

# CONCLUSION

Les efforts de coupe, la rugosité et la délamination de surface sont les réponses acquises et analysées pour caractériser la qualité de rainurage robotisé. La vitesse d'avance influence les efforts d'avance moyens et a une faible influence sur les efforts normaux moyens. La vitesse de coupe a une faible influence sur les efforts normaux moyens. Les opérations de la plaque P1 donnent les efforts de coupe et les délaminations de surface les plus élevés qui sont probablement causés par l'usure de cet outil. L'outil utilisé à la plaque P1 est le seul outil à être usagé avant les opérations de rainurage. L'usure mesurée de la surface d'attaque de l'outil de la plaque P1 après rainurage robotisé est de 110 µm qui est 4 fois supérieur à l'usure moyenne mesurée des autres outils après le rainurage des autres plaques.

Les résultats des critères Ra et Rt de rugosité sont plus élevés pour un pli orienté à -45° qu'à 45°. La vitesse d'avance influence les critères Ra et Rt pour un pli rainuré à -45° et le critère Ra pour un pli rainuré à 45°. La vitesse de coupe a une faible influence sur le critère Ra pour un pli rainuré à -45° et 45°. La configuration du robot et le type de machine-outil n'influencent pas significativement le critère Ra et Rt pour un pli orienté à -45°. Le type de machine, les vitesses d'avance et de coupe ainsi que leurs interactions ont une influence significative sur le critère Ra pour un pli rainuré à 45°.

Au pli inférieur, seuls quelques échantillons sont délaminés en entrée ou en sortie à des vitesses élevées. Au pli supérieur, les fibres non coupées (FNC) sont rarement présentes et les arrachements de matière (ARM) sont présents avec un pli de surface à -45°. Les fibres non coupées (FNC) sont très présentes avec un pli de surface à 45° et des ARM sont aussi présents en avalant. Pour un pli de surface à 45°, il y a une plus grande présence des FNC en avalant qu'en opposition à toutes les opérations et la longueur moyenne est égale pour chaque mode de coupe. L'opération de la plaque P2 sur centre d'usinage et l'opération robotisée de la plaque P4 présentent une délamination quasi absente en opposition pour un pli de surface à 45°. Il n'y a pas de différence significative entre les FNC de la plaque P2 et P4

pour un pli de surface à 45°. Selon les photos des échantillons avant l'altération des FNC, elles sont aussi moins présentes en opposition pour les opérations des plaques P3, P5 et P6 pour une configuration du robot CR20 et une direction de rainurage X. Il n'y a pas une différence significative de présence d'ARM et de sa dimension entre l'opération robotisée de la plaque P4 et l'opération de la plaque P2 sur centre d'usinage pour un pli de surface orienté à -45°.

La plus faible présence d'arrachement de matière en opposition est à la vitesse d'avance expérimentée la plus faible pour toutes les opérations de rainurage avec un pli de surface à -45°. La vitesse de coupe, la configuration du robot et l'orientation de rainurage n'influencent pas significativement la présence de délamination de surface. L'orientation des fibres du pli supérieur par rapport à la direction de rainurage influence significativement le type de délamination de surface. La longueur moyenne de l'arrachement de matière est influencée significativement par la vitesse d'avance. La tolérance maximale de la longueur moyenne d'arrachement de matière de l'industriel de 3.81 mm est respectée par tous arrachement de matière mesurés au centre de l'ensemble des échantillons rainurés sur une distance de 1 pouce. La tolérance est aussi respectée pour les échantillons rainurés sur une distance de 2.75 pouce de la plaque P3. Toutes les conditions de coupe expérimentées sont applicables. Cependant, il serait plus conservateur d'utiliser une vitesse d'avance inférieure à 0.30 mm/rev et une vitesse de coupe inférieure à 500 m/min pour limiter la délamination de surface, les efforts de coupe et la rugosité.

Une forte déviation de trajectoire est observée lors du rainurage robotisé causer par les efforts de coupe et la faible rigidité du robot. La faible précision de trajectoire du rainurage robotisé par rapport à la forte précision du rainurage sur centre d'usinage est la seule différence observée entre les deux types de machine sur la qualité de détourage. La rigidité et la masse sont différentes entre les deux types de machine et elles sont plus complexes à déterminer pour le robot en fonction de sa configuration et de la position de l'outil.

# RECOMMANDATIONS

Il serait intéressant de contrôler la dimension du rayon de bec, la présence de délamination de surface et les efforts de coupe en fonction du nombre de mètres rainuré pour un outil PCD à angle d'hélice nul. L'usure du rayon de bec influence la délamination de surface pour un outil PCD à angle d'hélice nul selon (Hintze, Hartmann et Schutte, 2011). Il serait aussi intéressant de contrôler la température de la surface rainurée, la trajectoire des copeaux et la température des copeaux en fonction des conditions de coupe avec le même modèle d'outil. Ces essais permettraient de contrôler l'usure du rayon de bec de l'outil, la déviation de la trajectoire, l'erreur dimensionnelle, la présence de délamination de surface et les efforts de coupe en fonction des conditions de coupe et d'une évolution de la configuration du robot sur une longue distance. Les singularités d'axes du robot, les discontinuités de trajectoire devraient être évitées durant les essais. Des essais de rainurage plus long doivent être faits pour vérifier la tolérance de la délamination de l'industriel sur une distance de 1 pied.

Des essais de rainurage robotisé de CFRP dont la trajectoire est circulaire ou courbe permettraient de contrôler la présence de fibres non coupées et d'arrachement de matière en fonction de l'évolution de l'angle de coupe de la fibre des plis de surface. Ces essais permettraient aussi de contrôler la déviation de trajectoire dans le plan, l'erreur dimensionnelle et les efforts de coupe en fonction, des vitesses d'avance et de coupe et de la configuration du robot. Lorsque l'angle de coupe de la fibre diminue avec l'avance de l'outil après le premier contact à 180°, cela crée une propagation de la délamination existante en dehors de l'intervalle critique de l'angle de coupe (Hintze, Hartmann et Schutte, 2011).

Développer un processus d'acquisition des déformations statiques des axes et implémenter un modèle de rigidité et d'effort de coupe permettraient la compensation de la déviation de trajectoire causée par les efforts de coupe. Ces modèles permettraient la simulation et l'optimisation de la rigidité du robot en fonction des efforts de coupe générés lors du rainurage robotisé d'une tâche.

**ANNEXE I**

**SPÉCIFICATIONS DE LA TABLE DYNAMOMÉTRIQUE KISTLER 9255B**

# Dynamomètre multi-composantes

## –20 ... 40 kN, Plaque supérieur 260x260 mm

**Type 9255B**

Dynamomètre à cristal de quartz à 3 composantes pour mesurer des trois composantes orthogonales d'une force. Le dynamomètre possède une grande rigidité et par conséquent une fréquence propre élevée. Sa très haute résolution permet de mesurer les moindres variations de larges forces.

- Grande plage de mesure
- Conçu pour des forces de toute intensité
- Construction de dimensions réduits

### Description

Le dynamomètre se compose de quatre capteurs de force à 3 composantes montés sous précontrainte élevée entre une plaque de base et une plaque supérieure. Les capteurs de force comprennent chacun trois paires de plaquettes en cristal de quartz; l'une est sensible à la pression selon l'axe z alors que les deux autres sont sensibles au cisaillement selon l'axe x resp. y. Les composantes de la force sont mesurées pratiquement sans déformation.

Les sorties des quatre capteurs de force incorporés sont branchées à l'intérieur du dynamomètre de façon à rendre possible des mesures de forces et moments à plusieures composantes. Les huit signaux de sortie sont disponibles sur la prise femelle à bride et à 9 pôles. Les quatre capteurs sont montés avec isolement par rapport à la masse. Ainsi les problèmes de circuits de retour par la terre sont largement éliminés.

Le dynamomètre est résistant à la rouille et protégé contre la pénétration de projections d'eau et d'agents refrigérants. Ensemble avec le câble type 1687B5/1689B5 et type 1677A5/1679A5 il correspond à la classe de protection IP67.

### Exemples d'application

- Mesures dynamiques et quasistatiques des trois composantes orthogonales d'une force.
- Mesures des forces de coupe lors du fraisage et rectifiage sur grandes machines et dans centres d'usinage.
- Mesures sur étampes et presses.
- Mesures sur modèles dans canaux aérodynamiques.
- Mesures des forces de support sur fondements de machines.
- Mesures sur propulsions à réaction.

### Données techniques

| | | | |
|---|---|---|---|
| Gamme | $F_x$, $F_y$ | kN | –20 ... 20 [1] |
| | $F_z$ | kN | –10 ... 40 [1] |
| Gamme partielle étalonnée | $F_x$, $F_y$ | kN | 0 ... 2 |
| | $F_z$ | kN | 0 ... 4 |
| Surcharge | $F_x$, $F_y$ | kN | –24/24 |
| | $F_z$ | kN | –12/48 |
| Seuil de réponse | | N | <0,01 |
| Sensibilité | $F_x$, $F_y$ | pC/N | ≈–8 |
| | $F_z$ | pC/N | ≈–3,7 |
| Linéarité, toutes les gammes | | %FSO | ≤±1 |
| Hystérésis, toutes les gammes | | %FSO | ≤0,5 |
| Cross talk | | % | ≤±2 |
| Rigidité | $c_x$, $c_y$ | kN/µm | >2 |
| | $c_z$ | kN/µm | >3 |
| Fréquence propre | $f_x$ (x, y, z) | kHz | ≈3 |
| Fréquence propre | $f_x$ (x, y) | kHz | ≈1,7 |
| (installé sur brides) | $f_x$ (z) | kHz | ≈2 |
| Fréquence propre (installé sur | $f_x$ (x, y) | kHz | ≈2 |
| brides et à travers la plaque supérieure) $f_x$ (z) | | kHz | ≈3,3 |
| Gamme de température d'utilisation | | °C | 0 ... 70 |
| Coefficient de température de la sensibilité | | %/°C | –0,02 |
| Capacité (de canal) | | pF | ≈500 |
| Résistance d'isolement (20 °C) | | Ω | >$10^{11}$ |
| Isolé à la masse | | Ω | >$10^{8}$ |
| Classe de protection EN60529 | | – | IP67 [2] |
| Poids | | kg | 52 |

[1] Point d'application de la force au-dedans et max. 100 mm au-dessus de la plaque supérieure.

[2] Avec câble de connexion types 1687B5, 1689B5, 1677A5, 1679A5

1 N (Newton) = 1 kg · m · s–2 = 0,1019... kp = 0,2248... lbf; 1 inch = 25,4 mm; 1 kg = 2,2046... lb; 1 N·m = 0,73756... lbft



Cette information correspond à l'état actuel de nos connaissances. Kistler se réserve le droit de procéder à des modifications techniques. Toute responsabilité quant à des dommages consécutifs à l'utilisation de produits de Kistler est exclue.

©2009, Groupe Kistler, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Suisse
Tél. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com

9255B_000-148f-12.09

KISTLER
mesurer. analyser. innover.

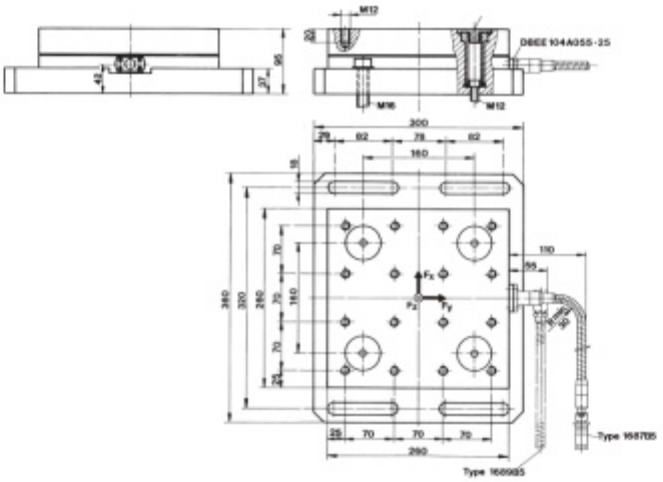



Fig. 1: Dimensions de dynamomètre de type 9255B

**Montage**

Le dynamomètre peut être fixé au moyen de vis ou de brides sur toute surface plane rectifiée comme p.ex. sur un plateau de machine-outil.

Pour obtenir un couplage encore meilleur du système de mesure avec la surface de montage, le dynamomètre peut, si nécessaire, être vissé à travers les quatre alésages dans la plaque supérieure. Ceci permet d'atteindre une fréquence de résonance plus élevée du système de mesure.

Toutes les inégalités ou irrégularités de la surface de montage peuvent avoir pour conséquence des tensions internes engendrant ainsi des sollicitations supplémentaires sur les divers éléments de mesure ainsi qu'un accroissement du cross talk.

La plaque supérieure possède seize taraudages borgnes M12 pour la fixation de la pièce à usiner. Les faces d'appui des pièces introduisant l'effort doivent également être planes afin de garantir une liaison mécanique parfaite avec la plaque supérieure.

**Traitement du signal de mesure**

Le système de mesure complet doit également comprendre un amplificateur de charge (par exemple type 5070A...). Le signal de mesure y est converti dans chaque canal en une tension électrique. La valeur mesurée est exactement proportionnelle à la force appliquée.

**Accessoires optionnels**

**Pour mesurer de forces à 3 composantes**

| $F_x$, $F_y$, $F_z$ | Type |
|---|---|
| • Câble de connexion, longueur l = 5 m | 1687B5 |
| (3 fils) | 1689B5 |
| • Câble de rallonge, longueur l = 5 m | 1688B5 |
| (3 fils) | |

**Pour mesurer de forces et moments à 6 composantes**

| $F_x$, $F_y$, $F_z$ / $M_x$, $M_y$, $M_z$ | Type |
|---|---|
| • Câble de connexion, longueur l = 5 m | 1677A5 |
| (8 fils) | 1679A5 |
| • Câble de rallonge, longueur l = 5 m | 1678A5 |
| (8 fils) | |

| Désignationd de commande | Type |
|---|---|
| • Dynamomètre multi-composantes | 9255B |

9255B_000-148f-12.09

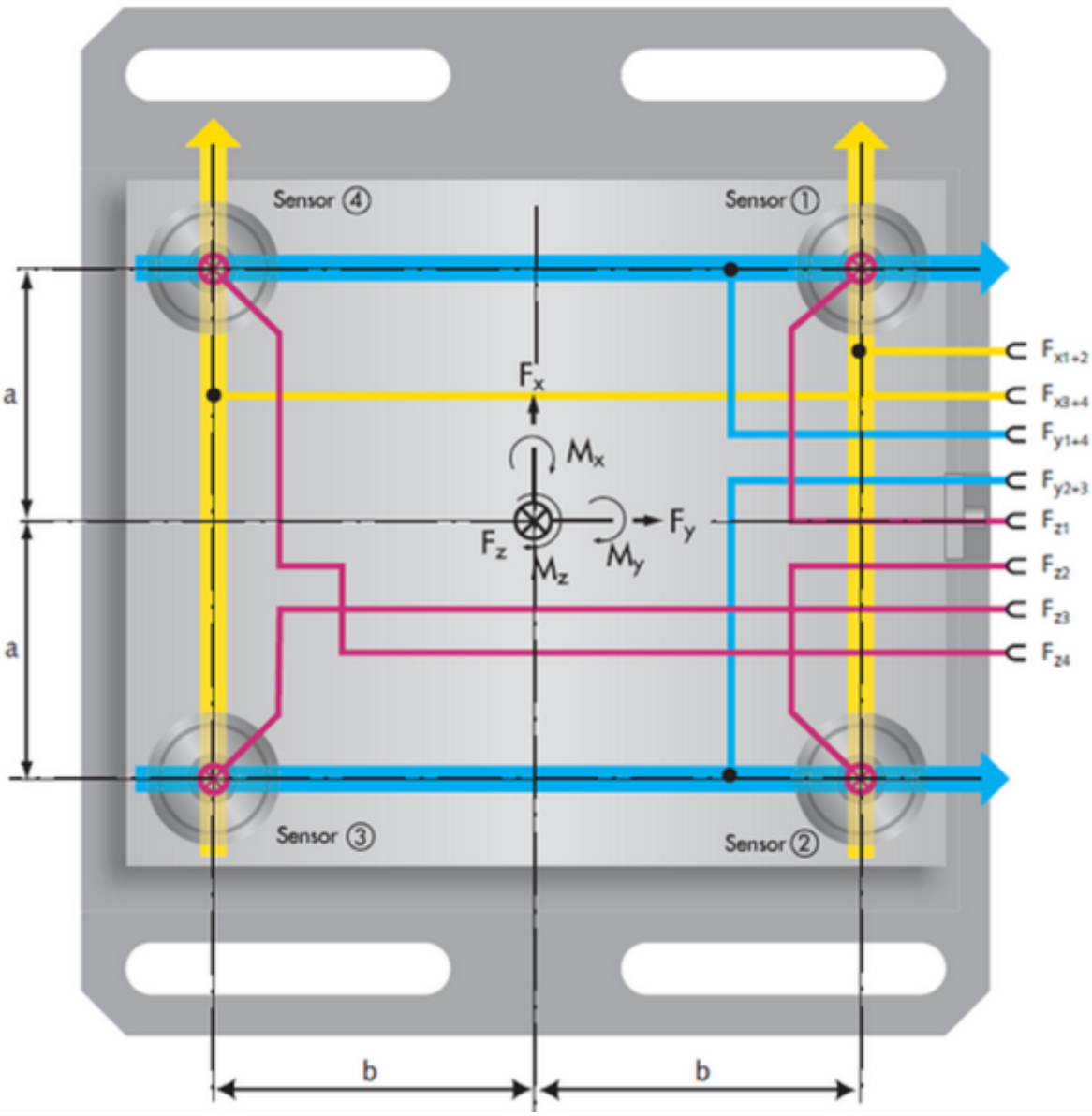


Cette information correspond à l'état actuel de nos connaissances. Kistler se réserve le droit de procéder à des modifications techniques. Toute responsabilité quant à des dommages consécutifs à l'utilisation de produits de Kistler est exclue.

©2009, Groupe Kistler, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Suisse
Tél. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com

**Multicomponent Force and Torque measurement**

Each stationary 3-component dynamometer (with the exception of the MiniDyn Type 9256C) supplies 8 output signals at the connector. These signals are either added together in a suitable cable to represent the force components $F_x$, $F_y$ und $F_z$, or processed individually in an 8-channel charge amplifier – which also allows the torques to be calculated. This calculation can be performed directly in a suitable amplifier, or after data acquisition using software.




http://www.kistler.com/nl/en/applications/cuttingforce/knowhow

# ANNEXE II

# SPÉCIFICATIONS DU ROBOT KUKA KR 500-2 MT

## 1.2 Ensemble mécanique du robot

Le robot est formé d'une embase fixe sur laquelle tourne, autour d'un axe vertical, le "bâti de rotation" qui supporte l'épaule, le bras et le poignet (fig. 1-1).

La bride de fixation du poignet (fig. 1-2) permet de monter les outils (par ex. les préhenseurs).

La figure 1-3 représente les mouvements possibles des axes du robot.

La charge utile et le poids mort des composants articulés sont compensés statiquement dans la mesure du possible par un système d'équilibrage fermé en soi. Ce système assiste l'axe 2.

La mesure de la position pour les axes majeurs et les axes mineurs (A 1 à A 3 ou A 4 à A 6) se fera par un système de mesure cycliquement absolu de la position avec un résolveur pour chaque axe.

L'entraînement se fera par des servomoteurs AC commandés par transistors et à faible inertie. Le frein et le résolveur sont intégrés d'une façon peu encombrante dans les unités actionneurs.

L'enveloppe d'évolution du robot est limitée dans tous les axes par des fins de course logiciels. L'enveloppe d'évolution des axes 1, 2, 3 et 5 est limitée mécaniquement par des butées avec fonction tampon.

Des butées mécaniques pour une limitation de l'enveloppe d'évolution en fonction du cas d'application sont disponibles comme accessoire "Limitation de l'enveloppe d'évolution" pour les axes 1 à 3.

En cas de sollicitations thermiques ou mécaniques plus importantes, le poignet en ligne du type "F" est disponible. Ce poignet est caractérisé par une meilleure étanchéité et des pièces résistant à la corrosion. Pour conserver la fiabilité, il faut par contre respecter les intervalles de maintenance plus courts.

Dans un environnement de salle blanche, on travaille avec les variantes KR 500-2 CR avec PL 500 I CR. D'importantes modifications ont permis de réduire sensiblement l'émission de particules par rapport à la version standard. En outre, le robot est équipé de pièces résistant à la corrosion.

| Robot | KR 500-2 MT | KR 500 L480-2 MT |
|---|---|---|
| Poignet | Poignet en ligne 500 I | Poignet en ligne 500 I |
| Charge nominale admissible [kg] | 500 | 480 |
| Charge supplémentaire [kg] | bras 50, épaule 100, bâti de rotation 400 | |
| Charge suppl. maxi bras/épaule ensemble [kg] | 100 | |
| Forces du processus horizontales/verticales | 8 000 N [1] | |
| Charge totale max. [kg] | 1000 | 980 |
| Longueur du bras [mm] | 1025 | 1525 |

[1] Des forces plus élevées dépendant de la position sont possibles sur demande.

### Caractéristiques des axes

Les caractéristiques des axes sont données sur les pages suivantes. La figure 1-3 fournit une représentation des axes ainsi que des mouvements que ceux-ci sont en mesure d'effectuer. Les axes majeurs sont les axes 1 à 3 et les axes du poignet sont les axes mineurs 4 à 6.

Toutes les informations de la colonne "Plage de mouvements" se rapportent à la position zéro électrique et à l'affichage au KCP de l'axe en question du robot.

**Répétabilité** ±0,08 mm

**Système d'entraînement** électromécanique avec servomoteurs AC commandés par transistors

**Poids**

| | |
|---|---|
| KR 360-2 | 2350 kg |
| KR 360 L280-2 | 2375 kg |
| KR 360 L240-2 | 2385 kg |
| KR 360 450-2 PA | 2350 kg |
| KR 360 L340-2 PA | 2375 kg |
| KR 360 L280-2 PA | 2385 kg |
| KR 360 L150-2 P | 2050 kg |
| KR 500-2 | 2350 kg |
| KR 500-2 CR | 2350 kg |
| KR 500 L420-2 | 2375 kg |
| KR 500 L340-2 | 2385 kg |
| KR 500 570-2 PA | 2350 kg |
| KR 500 L480-2 PA | 2375 kg |
| KR 500 L420-2 PA | 2385 kg |
| KR 500-2 MT | 2400 kg |
| KR 500 L480-2 MT | 2425 kg |

**Centre de gravité de la charge P** voir fig. 3-2 à 3-14

Pour toutes charges nominales, l'écart horizontal (Lz) du centre de gravité de la charge P à la surface de la bride s'élève à 300 mm et l'écart vertical (Lxy) de l'axe de rotation 6 est de 350 mm (resp. écart nominal).

**Enveloppe de travail (volume de travail)**

La forme et les dimensions de l'enveloppe de travail sont données dans les figures 3-17 à 3-20.

**Volume de travail**

Le point de référence est ce faisant le point d'intersection des axes 4 et 5.

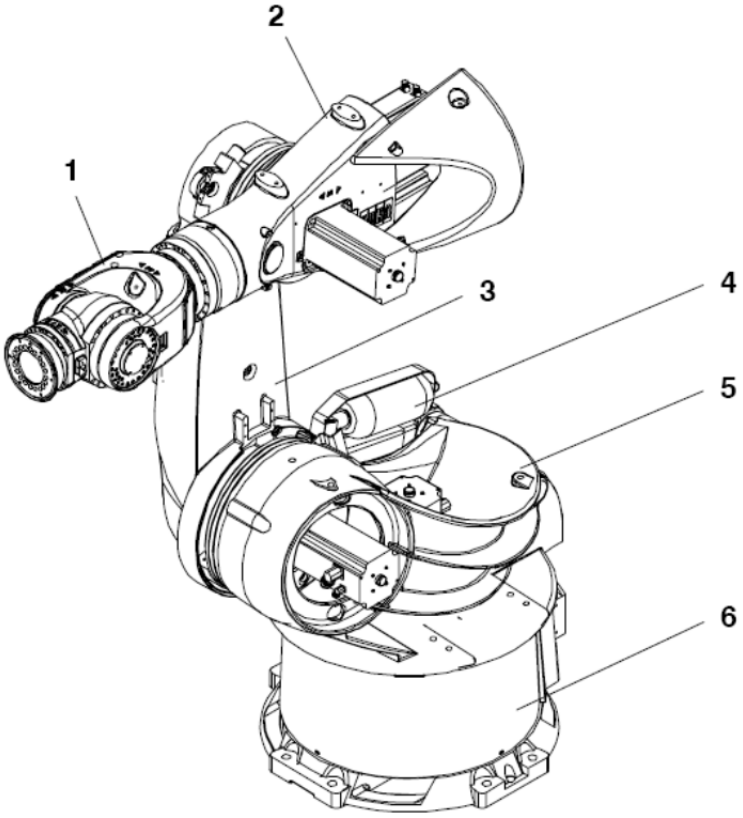
Volume de travail pour les robots montés au sol:

| | |
|---|---|
| KR 360-2, KR 500-2, KR 500-2 CR | env. 68 $m^3$ |
| KR 360 L280-2, KR 500 L420-2 | env. 91 $m^3$ |
| KR 360 L240-2, KR 500 L340-2 | env. 118 $m^3$ |
| KR 360-2, KR 500 570-2 PA | env. 68 $m^3$ |
| KR 360 L340-2 PA, KR 500 L480-2 PA | env. 91 $m^3$ |
| KR 360 L280-2 PA, KR 500 L420-2 PA | env. 118 $m^3$ |
| KR 360 L150-2 P | env. 133 $m^3$ |
| KR 500-2 MT | env. 68 $m^3$ |

**KR 500-2 MT, KR 500 L480-2 MT**

- **Poignet en ligne, charge nominale admissible de 500 kg**

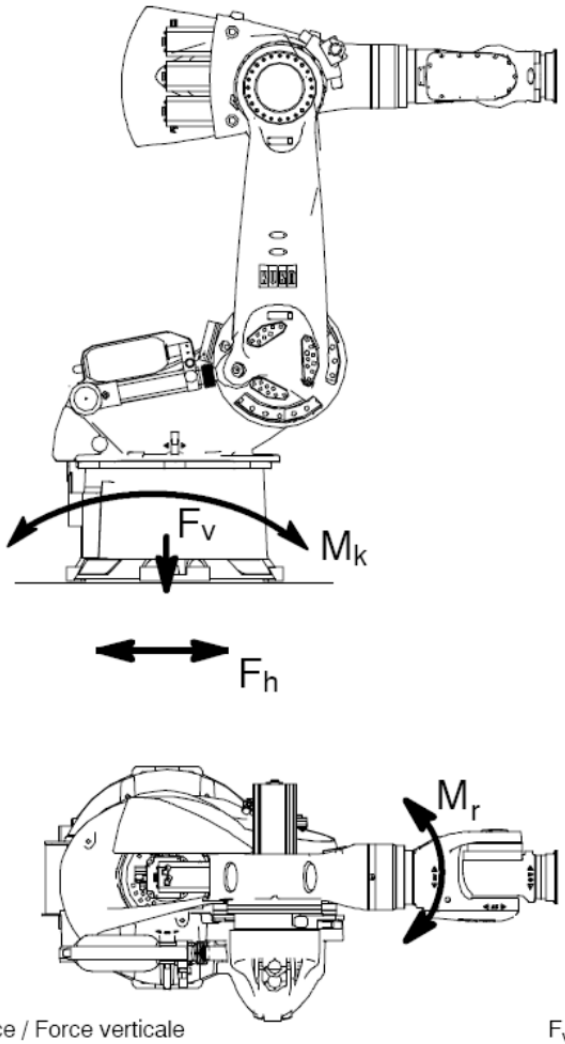
| Axe | Plage de mouvements Limitation logicielle | Vitesse |
|---|---|---|
| 1 | ±185° | 41 °/s |
| 2 | +20° à -130° | 41 °/s |
| 3 | +150° à -94° | 41 °/s |
| 4 | ±350° | 76 °/s |
| 5 | ±118° | 76 °/s |
| 6 | ±350° | 120 °/s |




1 Zentralhand
2 Arm
3 Schwinge
4 Gewichtsausgleichssystem
5 Karussell
6 Grundgestell

1 In-line wrist
2 Arm
3 Link arm
4 Counterbalancing system
5 Rotating column
6 Base frame

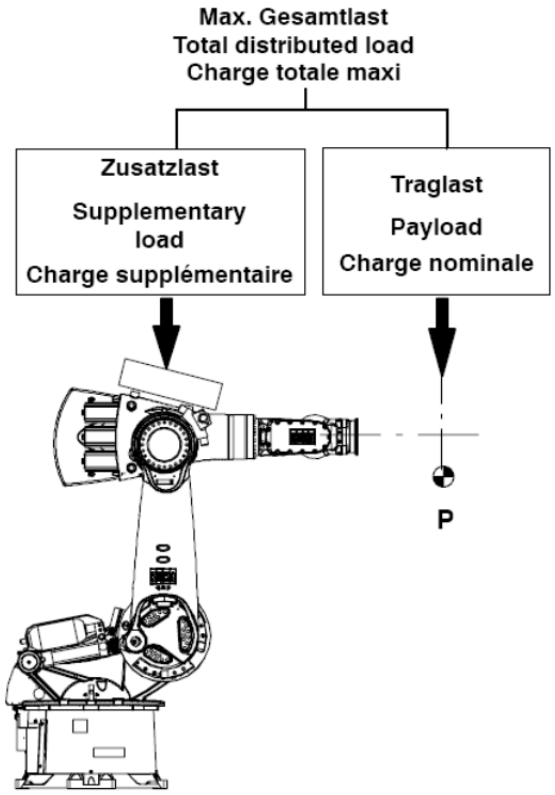
1 Poignet en ligne
2 Bras
3 Epaule
4 Système d'équilibrage
5 Bâti de rotation
6 Embase



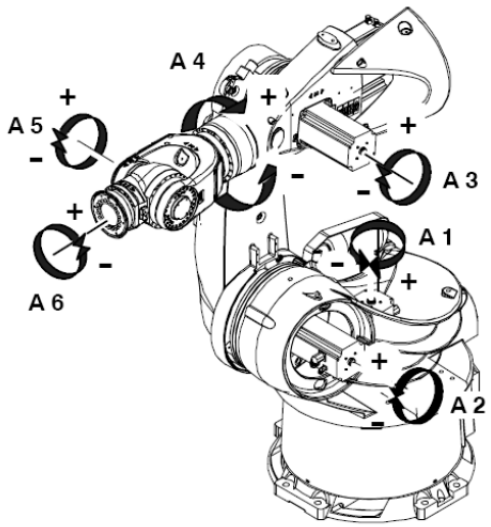

| | | | |
|---|---|---|---|
| $F_v$ | = | Vertikale Kraft / Vertical force / Force verticale | $F_{vmax}$ = 40 500 N |
| $F_h$ | = | Horizontale Kraft / Horizontal force / Force horizontale | $F_{hmax}$ = 23 500 N |
| $M_k$ | = | Kippmoment (auf Anschraubebene) / Tilting moment (at mounting level) / Moment de basculement (à niveau de montage) | $M_{kmax}$ = 84 500 Nm |
| $M_r$ | = | Drehmoment um Achse 1 / Turning moment about axis 1 / Moment de rotation autour de l'axe 1 | $M_{rmax}$ = 45 500 Nm |

| Gesamtmasse<br>Total mass<br>Masse totale | = | Roboter<br>robot<br>robot | + | Gesamtlast<br>total load<br>charge totale | für Typ<br>for type<br>pour type |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 2350 kg | + | 860 kg | KR 360-2 |
| | | 2375 kg | + | 780 kg | KR 360 L280-2 |
| | | 2385 kg | + | 740 kg | KR 360 L240-2 |
| | | 2350 kg | + | 1000 kg | KR 500-2 |
| | | 2375 kg | + | 920 kg | KR 500 L420-2 |
| | | 2385 kg | + | 840 kg | KR 500 L340-2 |
| | | 2350 kg | + | 950 kg | KR 360 450-2 PA |
| | | 2375 kg | + | 840 kg | KR 360 L340-2 PA |
| | | 2385 kg | + | 780 kg | KR 360 L280-2 PA |
| | | 2350 kg | + | 1070 kg | KR 500 570-2 PA |
| | | 2375 kg | + | 980 kg | KR 500 L480-2 PA |
| | | 2385 kg | + | 920 kg | KR 500 L420-2 PA |
| | | 2400 kg | + | 1000 kg | KR 500-2 MT |
| | | 2425 kg | + | 980 kg | KR 500 L480-2 MT |
| | | 2050 kg | + | 200 kg | KR 360 L150-2 P |

**1-6 Hauptbelastungen des Bodens durch Roboter und Gesamtlast**
**Principal loads acting on floor due to robot and total load**
**Sollicitations principales au niveau du sol dues au robot et à la charge totale**




**3-1** Lastverteilung
Distribution of the total load
Distribution de la charge



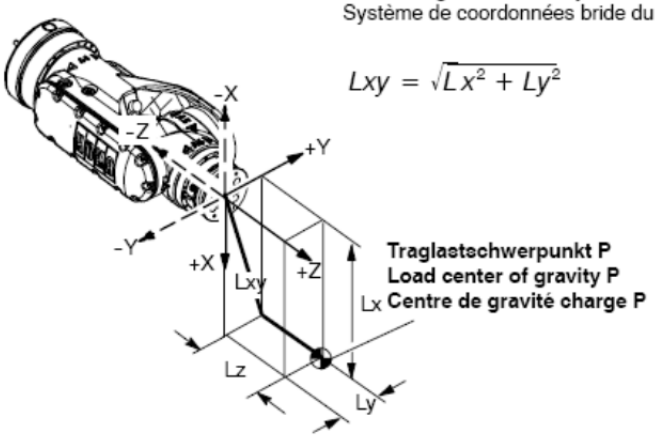

**1-3** Drehachsen und Drehsinn beim Verfahren des Roboters

Rotational axes and directions of rotation in motion of the robot

Axes de rotation du robot et sens de rotation lors du déplacement des axes

Roboterflansch-Koordinatensystem
Robot flange coordinate system
Système de coordonnées bride du robot

$$Lxy = \sqrt{Lx^2 + Ly^2}$$




Zulässige Massenträgheit im Auslegungspunkt (Lxy = 350 mm, Lz = 300 mm) 250 kgm².

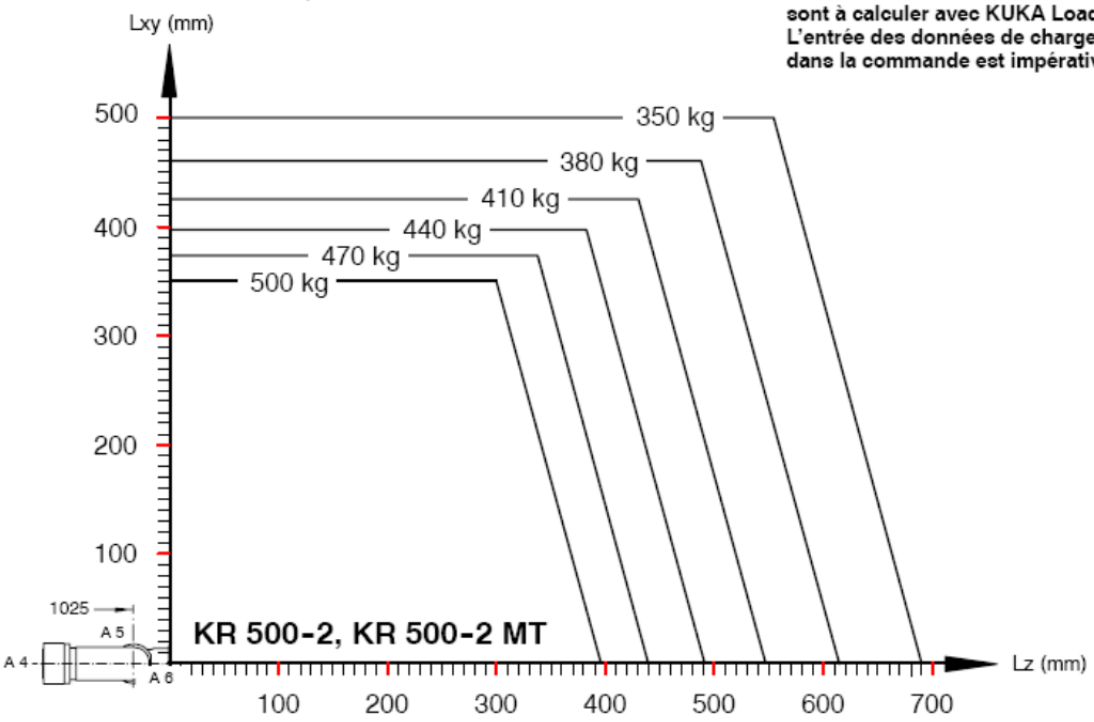
**ACHTUNG: Die Massenträgheiten müssen mit KUKA Load berechnet werden. Die Eingabe der Lastdaten in die Steuerung ist zwingend erforderlich!**

Permissible mass inertia at the design point (Lxy = 350 mm, Lz = 300 mm) 250 kgm².

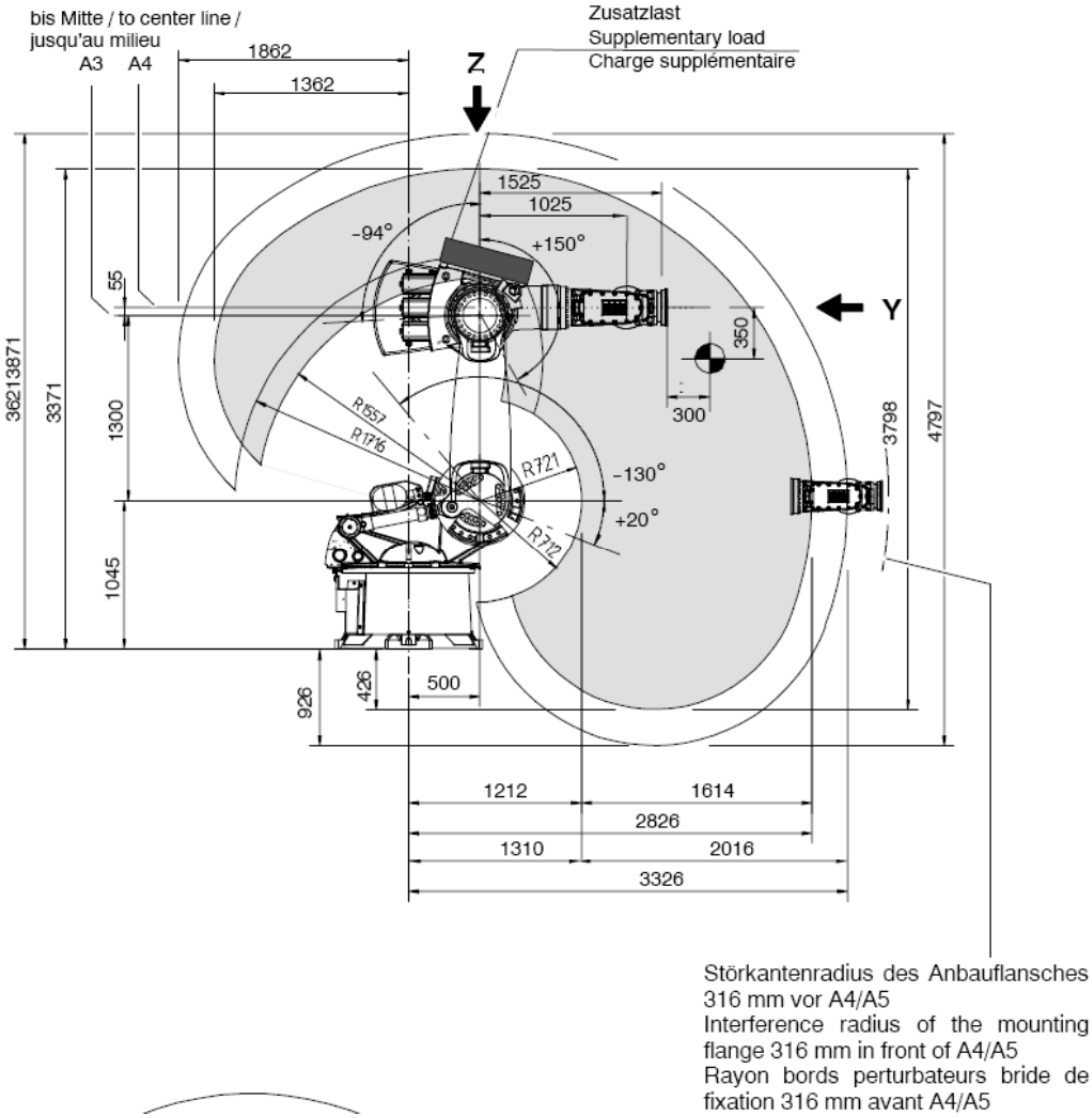
**IMPORTANT: The mass inertia must be calculated using KUKA Load. It is imperative for the load data to be entered in the controller!**

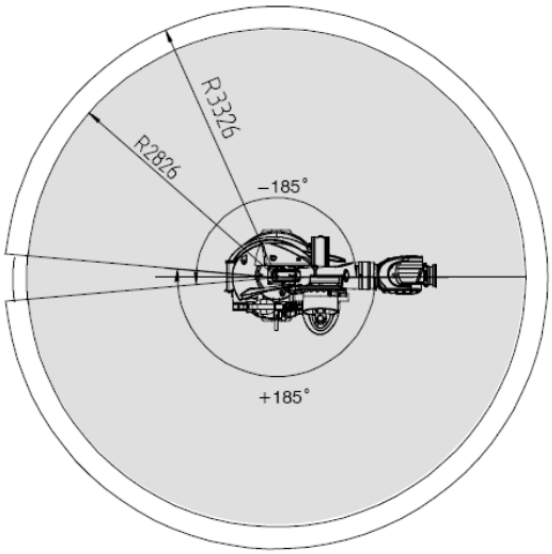
Inertie de masse autorisée au point de conception (Lxy = 350 mm, Lz = 300 mm) 250 kgm².

**ATTENTION: Les inerties de masse sont à calculer avec KUKA Load. L'entrée des données de charge dans la commande est impérative!**




**3-6** **Traglastschwerpunkt P und Belastungskurven für KR 500-2, KR 500-2 MT**
**Load center of gravity P and loading curves for KR 500-2, KR 500-2 MT**
**Centre de gravité de la charge P et courbes de charge pour KR 500-2, KR 500-2 MT**


bis Mitte / to center line /
jusqu'au milieu
A3
A4
1862
1362
Z
Zusatzlast
Supplementary load
Charge supplémentaire
1525
1025
-94°
+150°
55
Y
350
300
3621
3871
3371
1300
R557
R1716
R721
-130°
+20°
R712
3798
4797
1045
926
426
500
1212
1614
2826
1310
2016
3326
Störkantenradius des Anbauflansches
316 mm vor A4/A5
Interference radius of the mounting
flange 316 mm in front of A4/A5
Rayon bords perturbateurs bride de
fixation 316 mm avant A4/A5




Rayon bords perturbateurs bride de fixation 316 mm avant A4/A5

**HINWEIS:** Der Zusatzlast-Schwerpunkt muss so nahe wie möglich an der Drehachse 3 und an der Linie a in Bild 3-23 liegen.
Bezugspunkt für den Arbeitsbereich ist der Schnittpunkt der Drehachsen 4 und 5.
Ansicht Z siehe Bild 3-23.

**NOTE:** The center of gravity of the supplementary load must be located as close as possible to rotational axis 3 and to line "a" in Fig. 3-23. The reference point for the working envelope is the intersection of axes 4 and 5.
View Z see Figure 3-23.

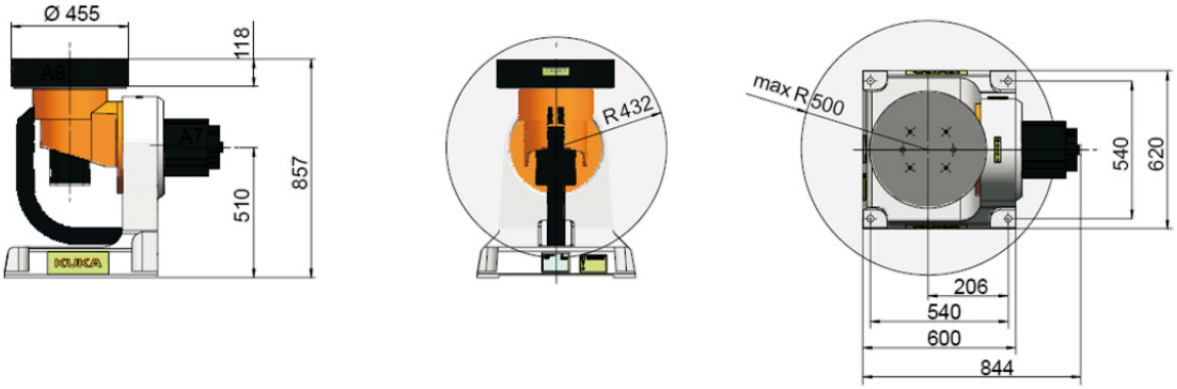
**REMARQUE:** Le centre de gravité de la charge utile supplémentaire doit être aussi proche que possible de l'axe de rotation 3 et de la ligne "a" de la figure 3-23. Le point de référence de l'enveloppe d'évolution est le point d'intersection des axes 4 et 5.
Vue Z voir figure 3-23.

**3-21** **Hauptabmessungen und Arbeitsbereich (softwarebezogen)**
**KR 500-2 MT und KR 500 L480-2 MT**
**Principal dimensions and working envelope (software values) for**
**KR 500-2 MT und KR 500 L480-2 MT**
**Dimensions principales et enveloppe d'évolution (se rapportant au logiciel) pour**
**KR 500-2 MT und KR 500 L480-2 MT**

# ANNEXE III

## SPÉCIFICATIONS DU POSITIONNEUR 2 AXES KUKA DKP-400

Dimensions : mm




| Type | | DKP-400 |
|---|---|---|
| | | |
| Position de montage | | Sol |
| Charge nominale | | 400 kg |
| Moment d'inertie de masse admissible | | 64 kgm² |
| Couple résistant admissible | Axe de basculement | 1.900 Nm |
| | Axe de rotation | 750 Nm |
| Moment de basculement admissible | Axe de basculement | 7.000 Nm |
| | Axe de rotation | 3.550 Nm |
| Plage de rotation | Axe de basculement | ±90° |
| | Axe de rotation | ±190° |
| Vitesse de rotation | Axe de basculement | 92,4°/s |
| | Axe de rotation | 126,6°/s |
| Temps d'accélération min. | Axe de basculement | 0,6 s |
| | Axe de rotation | 0,4 s |

**ANNEXE IV**

**SPÉCIFICATIONS DE LA BROCHE HSD MECHATRONIC ES789**

## FROM 12,5 - 18 KW

### ES789 - H6161H0538A

**TECHNICAL SPECIFICATIONS**

Power S1/S6 15,0Kw/18,0Kw
Tool Blocking Automatic with pneumatic piston
Nose Long Nose
Ratered Voltage 380V
Encoder HSD 400 Imp.
Poles 4
Bearings lubrification Long Life lubricated
Max Rpm 24000,00
Spindle Body Alluminium Alloy
Cooling Liquid

http://www.hsdusa.com/viewdoc.asp?co_id=560

## ANNEXE V

## ARTICLES EN COURS DE PUBLICATION PRÉSENTANT LES RÉSULTATS DE CE MÉMOIRE

Cette annexe présente deux articles en cours de publication présentant les résultats de ce mémoire (Slamani, Gauthier et Chatelain, 2014a; 2014b).

### Article 1

# Analysis of trajectory deviation during high speed robotic trimming of carbon-fibre reinforced polymers

Mohamed Slamani, Sébastien Gauthier, Jean-François Chatelain

Mechanical Engineering Department, École de technologie supérieure (ÉTS), 1100 Notre-Dame Street West, Montréal, QC H3C 1K3, Canada

Journal of Robotics and Computer Integrated Manufacturing

**ABSTRACT**

Although carbon-fibre reinforced polymers (CFRPs) are used extensively in the aerospace industry, trimming of CFRPs in high speed robotic end milling has however not yet received its due attention within the research community. For such an application, the robot should be very stiff for the machining operation to be generated. If the robot is not sufficiently stiff, deviations in shape and position of the workpieces will occur.

In this paper, a methodology has been developed and implemented for quantifying the relative contributions of cutting parameters (feed, speed) and robot configuration to workpiece accuracy during robotic trimming of CFRP laminates. Trajectory deviation and part accuracy are evaluated with respect to robot configurations and cutting conditions using data from two sources. The first set of data is obtained through the laser interferometer measurement system, while the second set of data is obtained from measurements carried out on the trimmed specimens using the coordinate measuring machine (CMM). Results from the

laser interferometer system show that the observed errors are consistent with gear transmission errors. This is revealed by periodic shapes along the measured path. It was observed also that joint 1 has an important influence on the robot accuracy. The less is joint 1 displaced, the better the performance of the robot.
Machining results show that a lack of stiffness in the robot causes large deviations in shape and position, and further, that these deviations are affected by the cutting force and the machining parameters. Results show also that the robot configuration which is optimally suited to perform the task is reached by using a relatively folded configuration and a minimal displacement of the joint 1. Furthermore, the optimum cutting conditions leading to a minimum trajectory deviation are achieved at a low feed rate (0.2 mm/rev) and a moderate cutting speed (400 m/min).

Keywords: Composite, CFRP, trimming, dimensional error, profile error, robotic machining.

**Introduction**

The demand for aircraft components with high mechanical and physical properties such as high strength, high stiffness, low weight, durability, and extreme corrosion resistance has increased the popularity of Carbon Fibre Reinforced Polymers (CFRPs). CFRP parts are usually produced by moulding or near net shape processing. In some applications, however, trimming, milling, and drilling are still required to bring CFRP parts to their final shapes and sizes. Koplev [1, 2] was one of the first researchers to study CFRP orthogonal cutting in a CNC machine tool. He found that chip formation was strongly affected by fibre orientation, and occurred during a series of successive ruptures. He also concluded that surface quality and the delamination factor were strongly influenced by cutting forces and tool geometry. Boudelier et al [3] proposed a methodology to optimize process parameters for trimming applications. Their methodology has been then applied in composite trimming process with diamond abrasive cutter. They found that grit size and feed per revolution are key factors to assure required surface roughness and improve productivity, respectively.

Industrial robots thanks to their adaptability, programmability, high dexterity and good manoeuvrability, offer cutting-edge and low cost solutions compared to machine tools to bring moulded CFRP parts to their final shapes and sizes. They have indeed already been introduced to many industrial applications, including welding, painting and assembly, and have produced excellent results. They are relatively cheaper in terms of cost as compared to the machine tool, are flexible, and have a large working envelope. However, due to their serial structure, such robots are susceptible to errors of many sources. The most essential source of these errors are related to geometrical errors, servo errors as well as to the end-effector deflections caused by the cutting forces and torques [4-7]

Without contact, the static accuracy of an industrial robot is mostly affected by geometric errors caused by mechanical-geometrical imperfections, such as link parameter errors and non-geometric errors due to gravity, joint compliance, gear errors and backlash [8]. According to Shiakolas et al. [9], the most significant effects on robot accuracy can be attributed to robot links and the joint zero offset. Unfortunately, static accuracy does not consider the real mode of operation of the robot. The industrial robot consists of several links, each of which is connected to one servo system. Furthermore, servo vibration and dynamic errors also affect the dynamic performance of the robot, especially at high TCP speeds [10], and thermal expansion can affect repeatability and accuracy considerably [11], albeit only when long periods of time are considered (e.g., several hours of operation after a cold start). Furthermore, gravitational loading causes structural deformation and compliance errors, which can occur not only as a result of the robot manipulating a heavy object, but also due to the links supporting their own weight [12]. We know that in many automated manufacturing systems, higher speed is a key to productivity enhancement. High accuracy trajectory performance is also a requirement in many industrial robot operations, and should be provided by the servo mechanism. Many investigation directions have been proposed to increase the dynamic accuracy of industrial robots, such as motion control and trajectory planning, for example. Unfortunately, there is a huge gap between the sophisticated control algorithms developed in robotics research and the simple control techniques used in industrial robotic applications. A major problem with the servo systems of industrial robots

consists of trajectory deviation and contour error. When the robot speed is relatively low, the trajectory deviation and contour error caused by the servo system are usually acceptable. However, once high speed and high accuracy are demanded, as in water jet cutting, laser cutting, gluing, dispensing and high speed trimming, for example, trajectory deviation and contour errors will have a significant effect [13].

Many research studies have been done in recent years, and have shown that industrial robots achieve remarkable success in many machining applications such as polishing [14], grinding [15–17] and debarring [18]. However, there have been few studies on applications in the cutting process [19, 20, 21]. During machining, a heavy cut would generally produce more inaccurate components than would a light cut. Furthermore, during robotic machining of Carbon Fibre Reinforced Polymer, the anisotropic and highly abrasive nature of CFRPs combined with the higher cutting forces and the lower stiffness of the robot, lead to high levels of vibrations. This in turn results in numerous machining problems, such as rapid tool wear, fibre pull-out, fibre fracture, delamination, trajectory deviation, poor quality, and in some cases, rejection of machined parts.

The objective of this study is to identify, understand, optimize and control the machining errors that can deteriorate parts accuracy during high speed robotic trimming of CFRPs.

In this work, machining errors are described in terms of size and form errors of the machined part. The paper does not however cover surface quality and delamination. This article is organized as follows. First, the details of the experimental procedure are given in Section 2, followed by the analysis of the laser interferometer and machining error results in Section 3. Finally, conclusions are drawn.

**Methodology**

Tests were performed on a six-axis KUKA KR 500-2 MT industrial robot mounted on a 13-foot linear rail and manipulating a heavy spindle HSD Mechatronic ES 789 delivering spindle speeds of up to 26000 rpm. The robot was programmed using the CAD/CAM Robot-master software and could handle a payload of 500 kg.

Because the quality of the machined parts is strongly affected by the straightness errors along the linear path during trimming tests, the robot was first tested for dynamic straightness accuracy and repeatability using a laser interferometer measurement system.

The laser interferometer measurement instrument is a standard tool for accuracy assessment and the calibration of machine tools and coordinate measuring machines (CMMs); however, its use in industrial serial robots remains very limited. In this test, we explore the use of a laser interferometer system to measure and quantify trajectory deviation for two particular perpendicular paths, at a specified speed, without cutting. Subsequently, the degree of influence of error source on the path accuracy and repeatability for this specific case is evaluated and discussed.

The instrument used in this study is the latest model of Renishaw's laser interferometer system. The system is composed of an XL-80 laser unit, an XC-80 environmental compensation unit with external sensors, and measurement optics. The XL-80 laser unit and relevant optics installed in a setup for measuring straightness error along a horizontal linear path is shown in Figure 1. The XC-80 compensation system very accurately measures air temperature, air pressure, and relative humidity, and compensates the wavelength of the laser beam accordingly. As a result, within a range of 1 m, the laser interferometer system has an accuracy of ±0.5 μm and a resolution of 1 nm. The XL-80 laser unit, in combination with different optic kits arranged in different setups, allows measurements of five motion errors along a linear path a linear positional error (along the linear path), two straightness errors, and two angular errors (about two orthogonal axes normal to the linear path).

Because the compliance error is highly depend on the manipulator configuration during trimming [21], two configurations (placements) are tested in this study. The two placements are obtained by moving the robot base on the linear axis while maintaining the same trimming position in the two-axis positioning table. A first placement noted operation OP1 with a relatively stretched configuration is defined in Table 1, and shown in Figure 2. The trimming direction in the OP1 is parallel to the linear axis and Y-axis of the cell. A second placement noted operation OP2 with a relatively folded configuration is defined in Table 1, and shown in Figure 3. The trimming direction of OP2 is perpendicular to the linear axis and

parallel to the X-axis of the cell. For a given position, the distance between the robot base and the tool is 2669 mm for OP1 and 1816 mm for OP2.

The laminates for the machining tests were prepared in a controlled aeronautical environment using pre-impregnated technology. The stacks were autoclave-cured, and the plies were oriented such as to ensure that the laminate had quasi-isotropic properties. The 24-ply laminate was 3.68 mm thick, with a fibre volume fraction of 64%. Table 2 presents the lay-up of the laminate with the orientation of the plies.

Before starting the first trimming test, the laminates were pre-drilled for tightening on a machining fixture, as shown in Figures 4 to 6. The pre-drilling was necessary for screwing the laminate to the fixture, to facilitate the smooth entry of the cutter in the laminate and to avoid the transient vibrations and reached a constant feed when detouring each slot using different cutting conditions, as detailed by Chatelain and Zaghbani [22]. The aluminum back plating system (#2 in Fig. 6), which uses 49 screws and a torque wrench to secure the laminate (#1), was designed to trim 84 slots on two placements of the robot (OP1 and OP2) and under different cutting conditions. 42 slot along the Y-axis of the cell (Fig. 5b) during the OP1 operation (presented by the red color in Fig. 7) and 42 slot along the X-axis of the cell (Fig. 5c) during the OP2 operation (presented by the blue color in Fig. 7).

As shown in Figures 4a, 4b and 7, different combinations of cutting parameters were tested for the OP1 and OP2 operations, respectively. The subassembly (laminate and back plate) was tightened to a three-axis Kistler 9255B (#3) type dynamometer table. The assembly was subsequently installed on the two-axis positioning table KUKA DKP-400 (Fig. 8), situated in the working space of the robot. The positioning table and the linear axis supporting the robot were static during the trimming tests. As shown in Figure 4, the feed rate ( $f_i$) starts at 0.2032 mm/rev to 0.5080 mm/rev, and the cutting speed ( $VC_i$) at 200 m/min to 650 m/min (spindle speed between 6684 rpm and 21722 rpm). The cutting depth is supposed to be constant along the cut (remove all the thickness (3.68 mm) in one pass). Because the slot trimming is horizontal in the OP1 operation (Fig.5b), the feed rate changes its value for each horizontal slot, i.e. 7 times along each line (from $f_1$ to $f_7$ ) and the cutting speed changes its values from one line to the next (from $VC_1$ to $VC_6$ ) (presented by the red color in Fig. 7). Conversely, the

trimming in the OP2 operation is vertical (Fig. 5c), the feed rate changes its value for each vertical slot, i.e. 7 times along each column (from $f_1$ to $f_7$ ), and the cutting speed changes its values from one column to the next (from $VC_1$ to $VC_6$ ) (presented by the blue color in Fig. 7).

The tool used to trim the coupons was a 3/8 inch diameter Onsrud PCD end mill with two straight flutes, having a 20° rake angle, a 10° relief angle and a 5 μm cutting edge radius. The cutter was inspected prior to the machining operation.

## Results and discussion

### 3.1 Laser interferometer results

The quality of trimmed parts is directly related to the path accuracy of the robot. The most important error sources which affect the path accuracy of the robot are straightness errors. To quantify the relative contributions of straightness errors on the path accuracy, the straightness error was measured dynamically using a laser interferometer system. The straightness error can be defined as a departure from a straight line motion. The position and orientation of the reference line for straightness measurement is setup-dependent. For this reason, we use a least squares fit to remove the slope and offset from the data prior to estimating the straightness errors. In this test, the robot was programmed to move along a linear path in X- and Y-directions at a feed rate of 1360 mm/min for a distance of 1 m. The data collected were plotted in Figures 9 and 10. For the path parallel to the X-axis of the cell, the vertical straightness and horizontal straightness were plotted in Fig. 9. The maximum vertical straightness error (deviation in the z-direction, Fig. 9a) was around 0.9 mm; the maximum horizontal straightness error (deviation in the y-direction, Fig. 9b) was much better, at only 0.25 mm. For the path parallel to the Y-axis of the cell, as shown in Figure 10, the maximum vertical straightness error (deviation in the z-direction, Fig. 10a) was 0.6 mm; the maximum horizontal straightness error (deviation in the x-direction, Fig. 10b) was 0.45 mm. It is interesting to note that the horizontal straightness error for the path parallel to the X-axis of the cell is much better than the horizontal straightness error for the path parallel to the Y-axis of the cell. This is explained by the fact that joint 1 is more involved when moving along the

path parallel to the Y-axis of the cell. This means that joint1has an important influence on the robot accuracy. The less is joint 1 displaced, the better the performance of the robot. That is the reason why it is relevant to minimize the displacement of the joint 1 in order to optimize the robot configuration and optimize the tool trajectories. Results also show that the tested robot exhibits a good dynamic repeatability. It can also be visually noticed from Figures 9 and 10 that the measured straightness errors display a periodic shape due to gear transmission errors. According to Slamani and Bonev [23], the low frequency components in a gear transmission system (smooth variations) are mostly subject to eccentricity (run-out), undulation in the bearings guideways, and misalignment of the gears (orientation error). The high frequency components (sharp variations) are mainly subject to tooth-to-tooth contact and errors caused by the ball bearings.

### 3.2 Machining results

The machinability of CFRPs in high speed robotic end milling was evaluated via parameters such as dimensional error and trajectory deviation. The rough part presented in Figures 4 and 5a was used to trim 84 slots on two placements of the robot and at different cutting conditions. During trimming, the cutting tool removes the 3.68 mm thick and the webs between the 0.750 inch diameter holes for each slot in one pass (Figs. 4 and 5). The full immersion of the tool provides cuts on both sides, i.e., up-cut milling on one side and down-cut milling on the other. Furthermore, the cutting forces were measured with a 3-axis dynamometer table and the data were then recorded for further analysis and evaluation. The knowledge of the normal cutting forces components during robotic trimming processes is of great importance, it's considered as the most important indicator of machining state and profile quality. Figures 11 to 14 express the evolution of normal cutting forces versus feed rates and cutting speed for the OP1 and OP2 operations respectively. According to Figures 11 and 13, it can be seen that the cutting force increases as the feed rate increases. This is explained by the fact that when the feed rate increases the laminate resists the rupture more and requires larger efforts. Hence the cutting force increases as the feed rate increases. On the other hand, Figures 12 and 14 show that there is no much effect of cutting speed on

normal cutting force. After finishing trimming the 84 slots, each slot is then inspected with a Mitutoyo CRYSTA coordinate measuring machine (Fig.15). The finished part is presented in Figures 5c and 15. The results of the inspection are presented in Figures 16 and 17.

Figures 16 and 17 show the trajectory deviations at different cutting speeds and feed rates for up-cut milling, for operation OP1 and OP2, respectively. The order of the specimens in Figures 16 and 17 is represented as a function of the feed rate and cutting speed, as in Figure 4. To visually quantify the trajectory deviations, each division of the main scale in Figures 16 and 17 is equal to 0.2 mm.

As shown in Figures 16 and 17, the trajectory deviations for the OP1 and OP2 configurations are not similar, and are strongly affected by the cutting conditions. This is shown by different wavy paths that are clearly visible for each cutting condition. At high cutting conditions, dynamic errors become a significant source of errors, which affect the path accuracy. This is manifested through high amplitude vibrations along the measured path, which strongly affect the accuracy of the trimmed part. This behaviour is explained by the variations of the cutting force during machining and the poor rigidity resulting from flexibility in the joints, which induces vibrations in the end-effector. It is important to note that the dynamic performance of an industrial robot is even less homogeneous than its static performance. Obviously, the less the main joints (especially joint 1) are displaced, the better the dynamic performance of the robot [10].

Figures 18 to 21 show the profile deviation as a function of the cutting speed and feed rate for the OP1 and OP2 configurations, respectively. The results show that the profile deviations for the OP2 are much better than for OP1. They vary from 0.3 mm to 1.15 mm and from 0.2 mm to 0.6 mm for the OP1 and OP2, configuration respectively. They also show that generally, the profile deviations for the OP1 configuration slightly increases with an increase in the feed rate and cutting speed. Conversely, for the OP2 configuration, the results show that overall; the profile deviations increase with an increase in the feed rate and slightly decrease with an increase in cutting speed. On the other hand, it is important to mention that the slope of the profile deviations varies significantly as a function of the cutting speed and the feed rates. The worst case was observed in Figure 21 when the slope

changes in the clockwise direction, from negative (at a 200 m/min cutting speed) to positive (at a 650 m/min cutting speed).

Figures 22 to 25 present the dimensional errors as a function of the cutting speed and feed rate for the OP1 and OP2 configurations, respectively. Contrary to the profile deviations, the results show that the dimensional errors for the OP1 and OP2 are almost similar, ranging from 0 mm to 0.26 mm. Results show also that, overall, the dimensional errors for the OP1 and OP2 configurations increase with an increase in the feed rate and decrease with an increase in cutting speed.

Finally, the optimal configuration providing the best part accuracy is the OP2 configuration, when trimming along the Y-axis of the cell. The optimum cutting conditions related to this optimal configuration are achieved at a low feed rate (0.2 mm/rev) and a moderate cutting speed (400 m/min).

**Conclusions**

In this paper, an experimental approach is presented to assess and quantify the relative contributions of machining errors during robotic trimming of CFRP laminates. The laser interferometer system was first used to measure trajectory deviation due to the geometric and controller effects without machining. The contribution of machining errors was identified through the trimming of many specimens under different cutting conditions (different cutting speeds and feed rates) and robot configurations. The accuracy of the specimens in terms of size and form errors was then measured using a coordinate measuring machine. Furthermore, the influence of cutting conditions on the cutting force is analyzed.

The following observations were made:

Presented results confirmed feed rate as a factor with strongest influence on the normal cutting force, in a way that increasing in feed rate results in increasing of cutting force and deterioration of profile accuracy. The cutting speed has no much effect on the normal cutting force. Results show also that high speed robotic trimming process produces significant profile deviations. The dimensional errors were found to be slightly affected by the machining parameters, and overall, they increase with an increase in the feed rate and

decrease with an increase in the cutting speed. The joint one has an important influence on the robot accuracy. The optimal configuration is achieved by minimizing the displacement of this joint. From the machining results, it can be asserted that medium cutting speed and low feed are the optimal cutting condition for robotic trimming of CFRP laminate.

**Acknowledgment**

This work was funded by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and the Consortium for Research and Innovation in Aerospace in Québec (CRIAQ) and its partners, MITACS, Bombardier Aerospace, Avior Integrated Products, Delastek and Av&R Vision & Robotics. We are grateful to CTA for providing facilities to carry out this work. Thanks are also due to Mr. Serge St-Martin and Mr. Sebastian Tremblay for their excellent technical assistance.

**References**

[1] A. Koplev, Cutting of CFRP with single edge tools, Proceedings of the third international conference on composite materials; 1980, Paris 2: 1597–605.

[2] A. Koplev, A. Lystrup, Vorm T, The cutting process, chips and cutting forces in machining CFRP, Composites; 1983, 14:371–376.

[3] A. Boudelier, M. Ritou, S. Garnier, B. Furet, Optimization of process parameters in CFRP machining with diamond abrasive cutters, Advanced Materials Research; 223 (2011), 774-783

[4] C. Dumas, S. Caro, M. Cherif, S. Garnier, B. Furet, A Methodology for joint stiffness identification of serial robots, The 2010 IEEElRSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, Taiwan (2010), 464-469.

[5] C. Dumas, S. Caro, M. Cherif, S. Garnier, B. Furet, Joint stiffness identification of industrial serial robots, Robotica, 30 (2012), 649–659.

[6] C. Dumas, S. Caro, S. Garnier, B. Furet, Joint stiffness identification of six-revolute industrial serial robots, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 27 (2011), 881–888

[7] Y. Wu, A. Klimchik, A. Pashkevich, S. Carob, B. Furet, Optimality criteria for measurement poses selection in calibration of robot stiffness parameters, Proceedings of the ASME 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis ESDA, Nantes, France, (2012), 1-10.

[8] D.E. Whitney, C.A. Lozinski, J.M. Rourke, Industrial robot forward calibration method and results, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control; 108(1) (1986), 1–8.

[9] P.S. Shiakolas, K.L. Conrad, T.C. Yih, On the accuracy, repeatability, and degree of influence of kinematics parameters for industrial robots, International Journal of Modelling and Simulation, 22( 3) (2002) 245–254.

[10] M. Slamani, A. Nubiola, I.A. Bonev, Effect of servo systems on the contouring errors in industrial robots, Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 36(1) (2012), 83–96.

[11] M. Slamani, A. Nubiola, I.A. Bonev, Assessment of the positioning performance of an industrial robot, Industrial Robot: An International Journal, 39(1) (2012) 57–68.

[12] R.P. Judd, A.B. Knasinski, A technique to calibrate industrial robots with experimental verification, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 6(1) (1990) 20–30.

[13] R. Brogardh , Robot control overview: An industrial perspective, Modeling, Identification and Control, 30(3) (2009) 167–180.

[14] F.Y. Lin, T.S. Lu, Development of a robot system for complex surface polishing based on CL data, Int J Adv Manuf Technol, 26(2005) 1132–1137.

[15] L. Liu, B.J. Ulrich, J. Elbestawi, Robotic grinding force regulation: design, implementation and benefits, Proc. IEEE International conference on robotics and automation. Cincinnati, USA, (1990) pp. 258–265.

[16] H. Dai, K.M. Yuen, J. Elbestavi, Parametric modelling and control of the robotic grinding process, Int J Adv Manuf Technol, 8(3) (1993) 182–192.

[17] X. Rena, B. Kuhlenkottera, H. Muller, Simulation and verification of belt grinding with industrial robots, Int J Mach Tool Manuf, 46(2006) 708–716.

[18] H. Huang, Z.M. Gong, X.Q. Chen, L. Zhou, Robotic grinding and polishing for turbine-vane overhaul, J Mater Process Technol, 127(2002) 140–145.

[19] K. Shirase, N. Tanabe, M. Hirao, T. Yasui, Articulated robot application in end milling of sculptured surface, JSME Int. J., Series C, 39(2) (1996) 308–316.

[20] Y. Yamane, R.S. Yin, M. Miyake, N. Narutaki, Measuring and cutting a propeller for ship by an articulated robot, J. JSPE, 57 (8) (1991) 1387–1392.

[21] C.Dumas, A. Boudelier, S. Caro, S. Garnier, M. Ritou, B. Furet, Development of a robotic cell for trimming of composite parts, Mechanics & Industry 12(2011), 487-494.

[22] J.-F. Chatelain, I. Zaghbani, Effect of Tool Geometry. Special Features on Cutting Forces of Multilayered CFRP Laminates, Proc. of the 4th Int. Conference on Manufacturing

Engineering, Quality and Production Systems, MEQAPS`11, Barcelona, Spain, (2011), pp. 85-90.

[23] M. Slamani, I.A. Bonev, Characterization and experimental evaluation of gear transmission errors in an industrial robot, Industrial Robot: An International Journal, 40(5) (2013) 441–449.

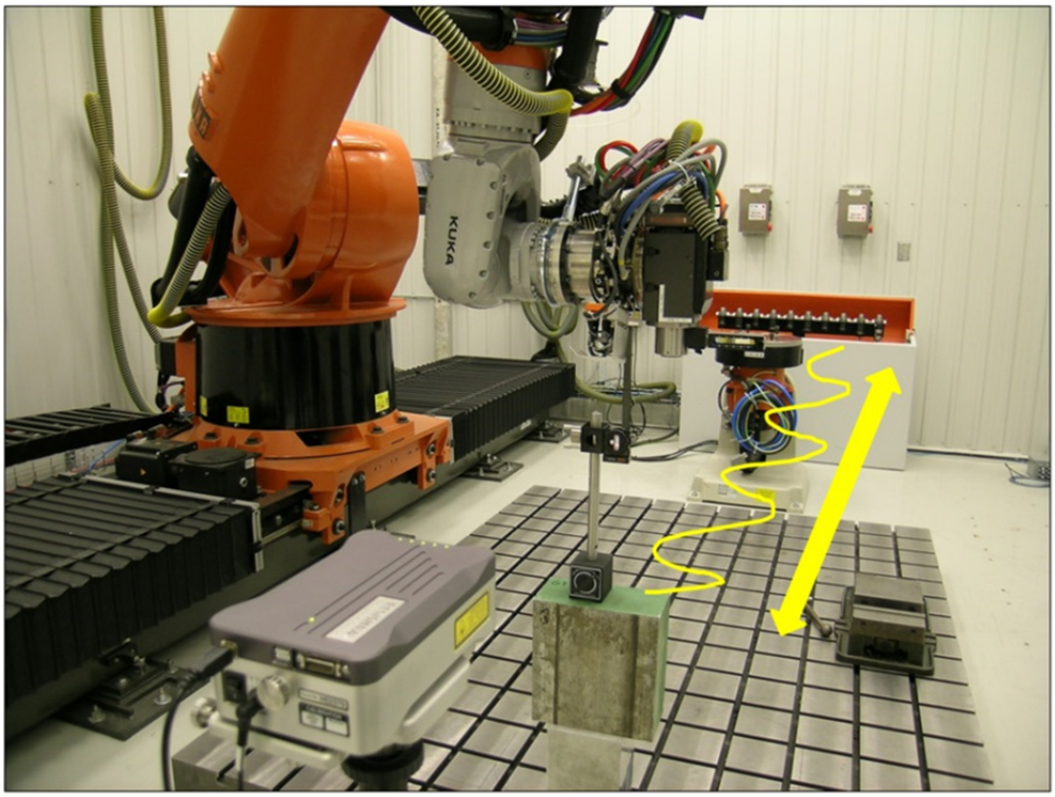



Fig.1 Laser interferometer setup

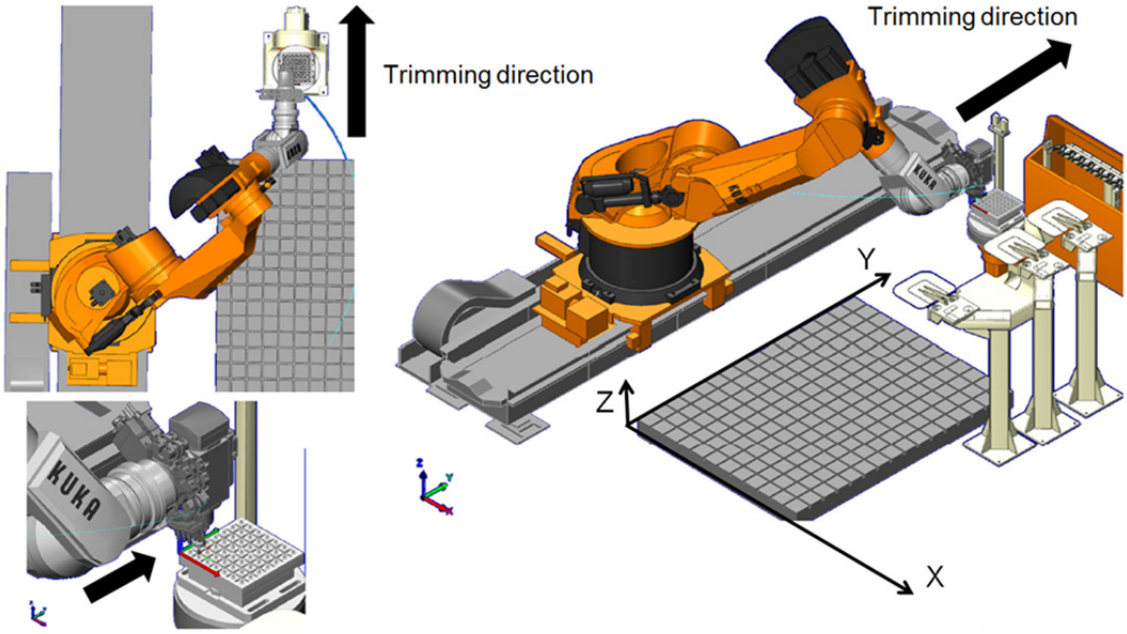



Fig.2 Robot configuration during the operation (OP1)

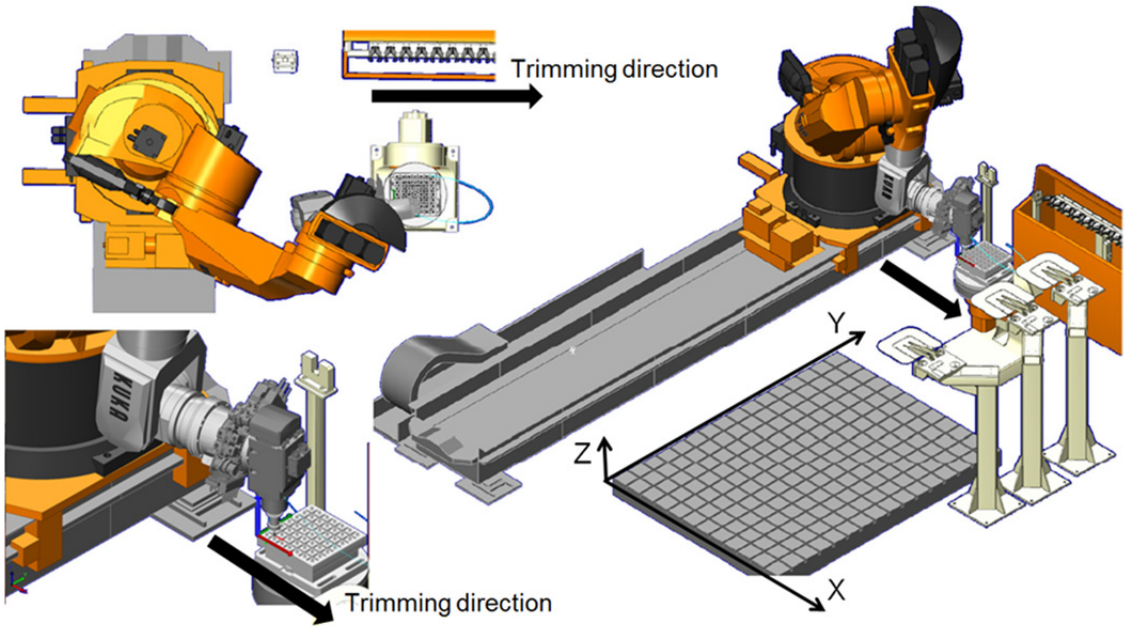



Fig.3 Robot configuration during the operation OP2

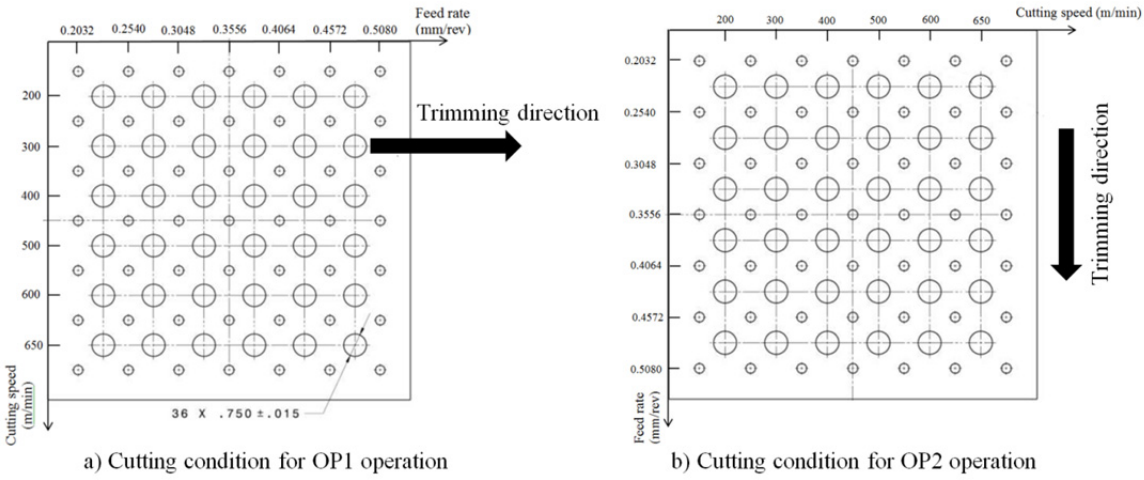



Fig.4 Rough part before machining for OP1 and OP2 operations

a) Rough part before trimming of the 48 slots

b) Semi-Finished part after trimming of the 42 slots in OP1 operation

c) Finished part after trimming of the 84 slots in OP1 and OP2 operations

Fig.5 State of the part before and after trimming

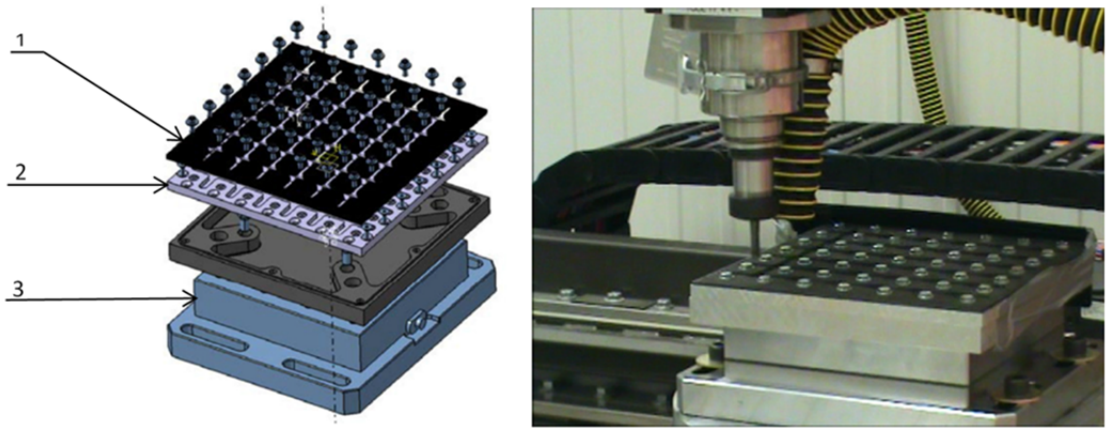



Fig.6 Experimental setup for trimming of CFRP

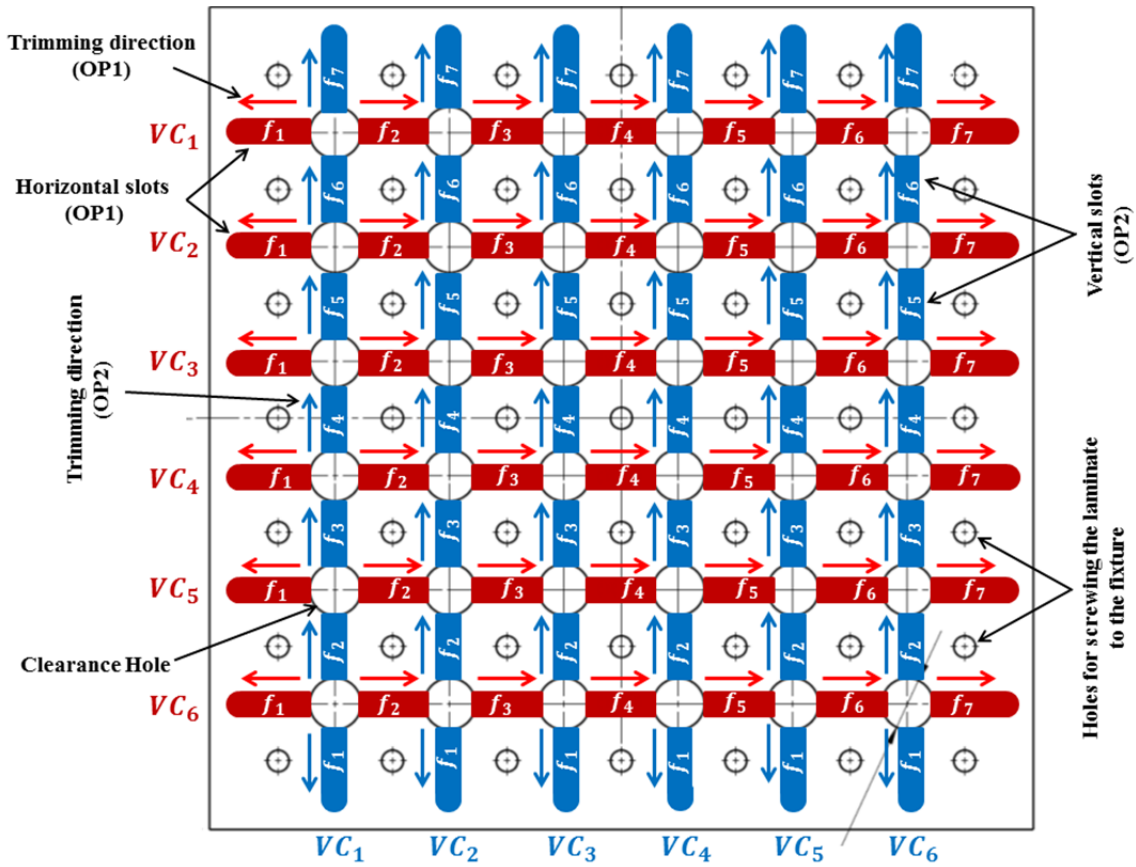


Fig.7 Description of the trimming test

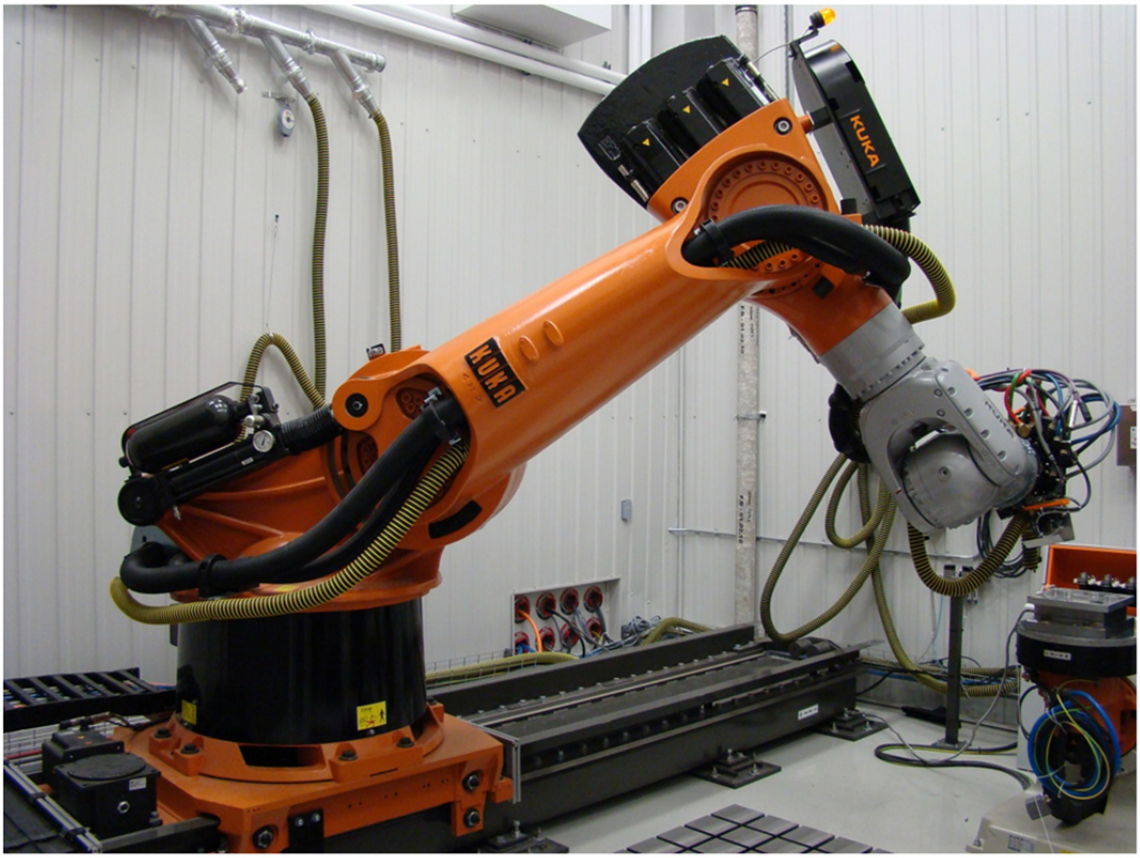
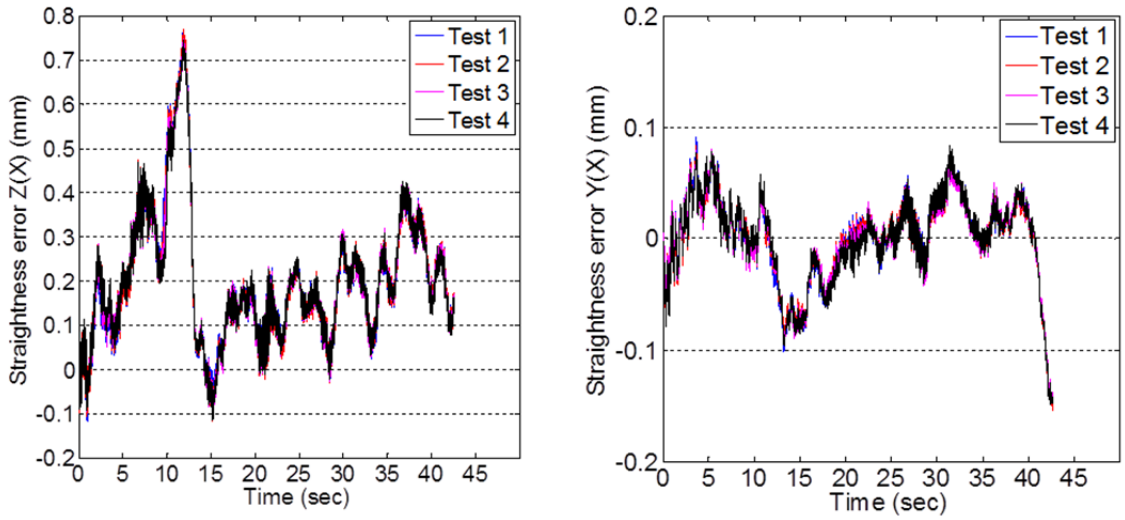
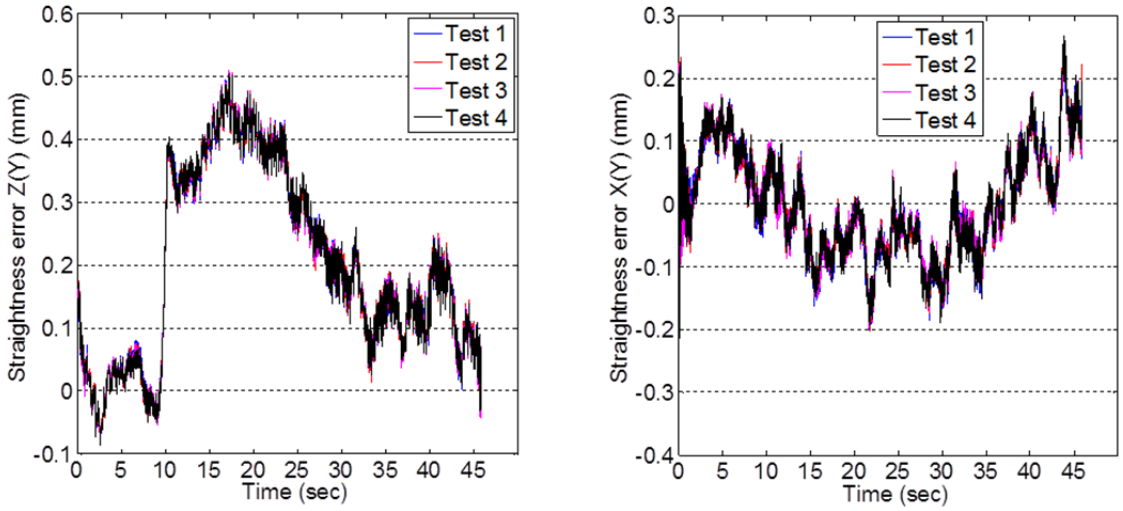



Fig.8 Photo of the six-axis KUKA KR 500-2 MT industrial robot




a) Results of $\delta_z(x)$ b) Results of $\delta_y(x)$

Fig. 9 Straightness motion errors for a path parallel to X cell




a) Results of $\delta_z(y)$ b) Results of $\delta_x(y)$

Fig.10 Straightness motion errors for a path parallel to Y cell

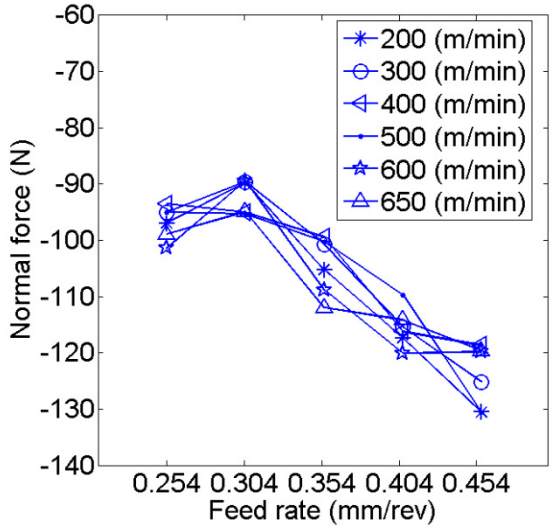



Fig.11 Normal force as function of feed rate for the OP1 operation

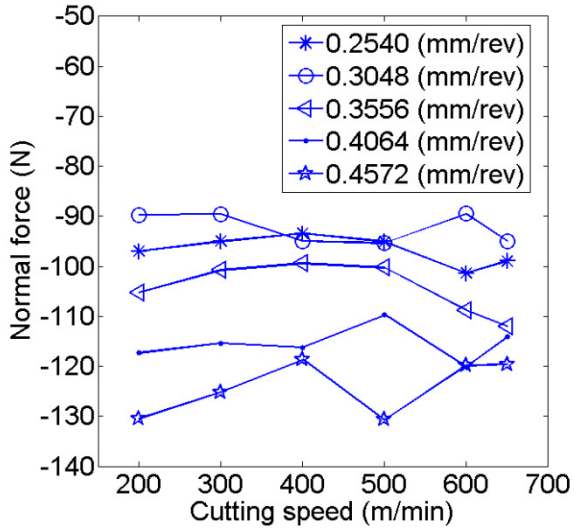



Fig.12 Normal force as function of cutting speed for the OP1 operation

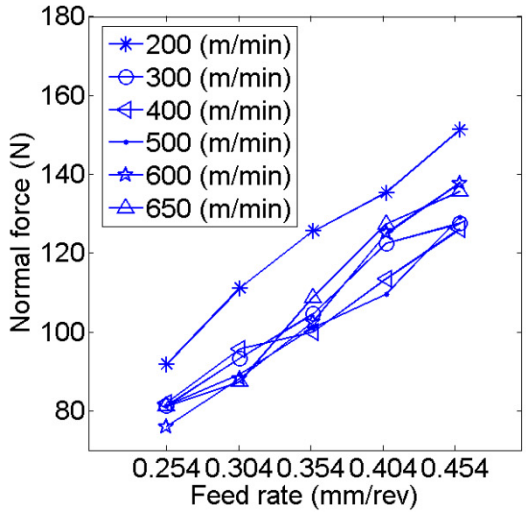



Fig.13 Normal force as function of feed rate for the OP2 operation

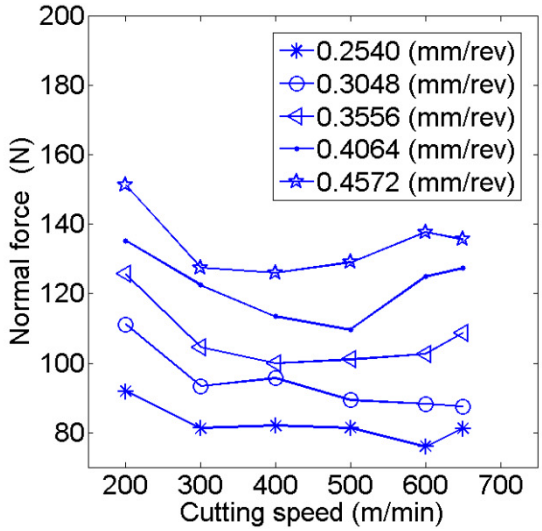



Fig.14 Normal force as function of cutting speed for the OP2 operation

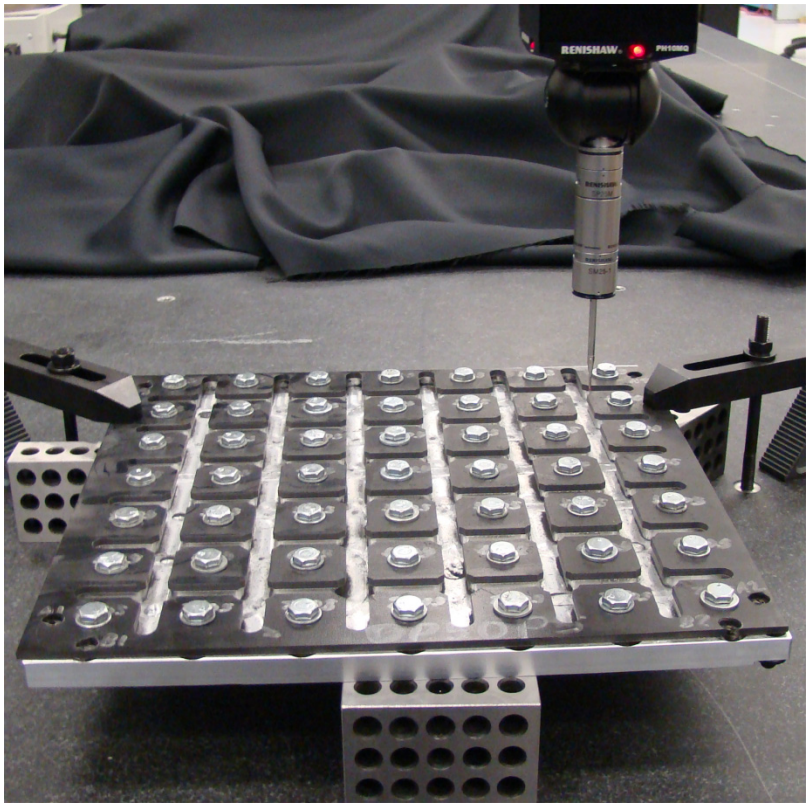



Fig.15 Inspection of the trimmed specimens

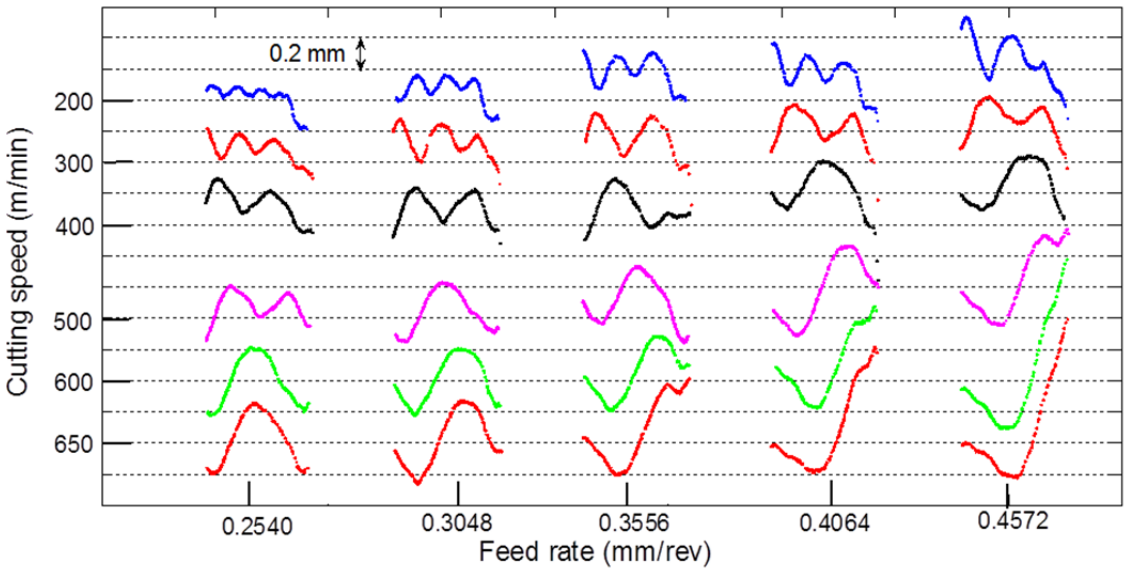



Fig.16 Comparison of trajectory deviations for OP1 operation

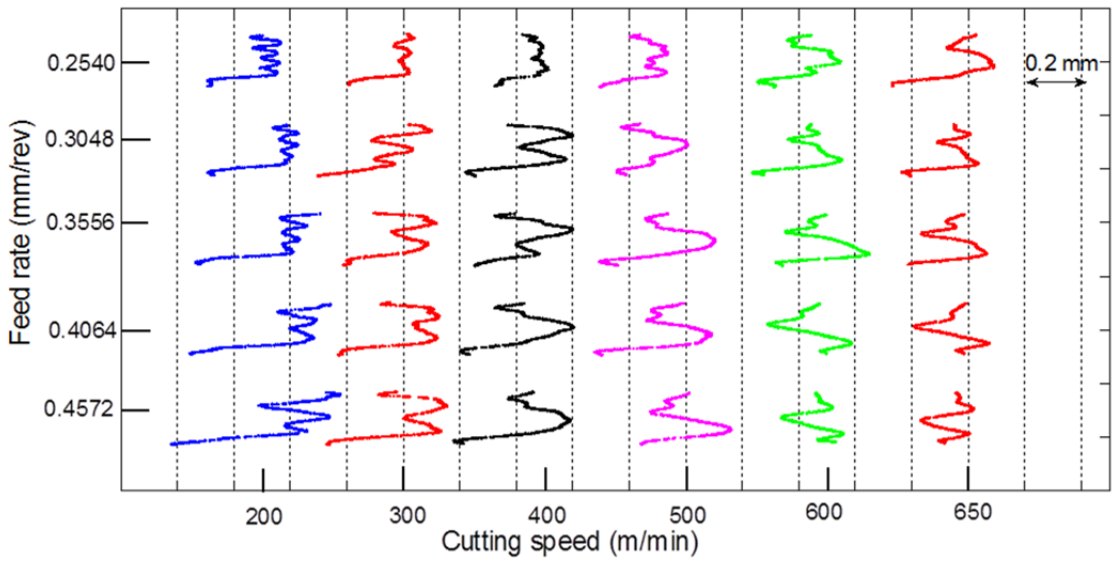



Fig.17 Comparison of trajectory deviations for OP2 operation

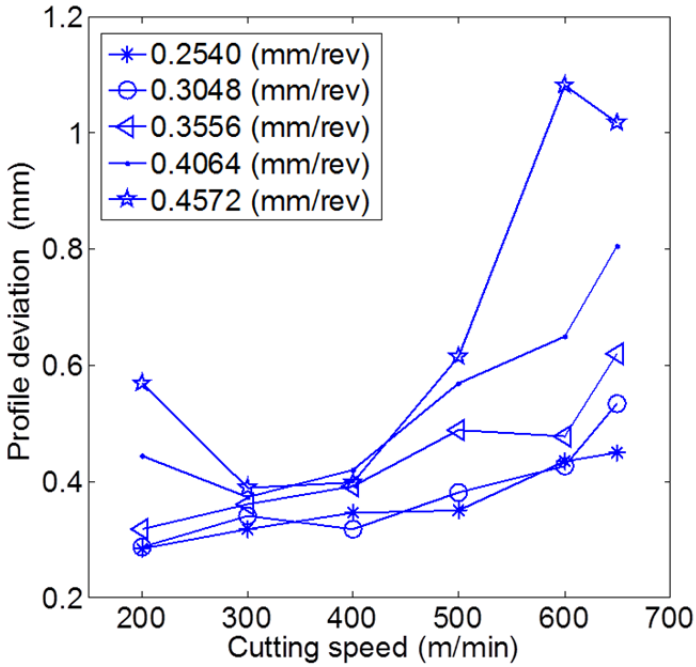



Fig.18 Profile error as a function of the cutting speed for OP1

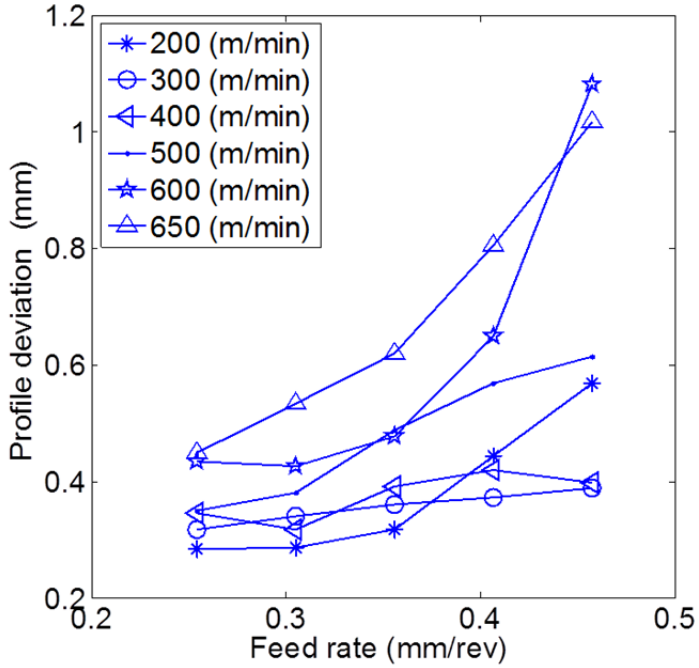



Fig.19 Profile error as a function of the feed rate for OP1

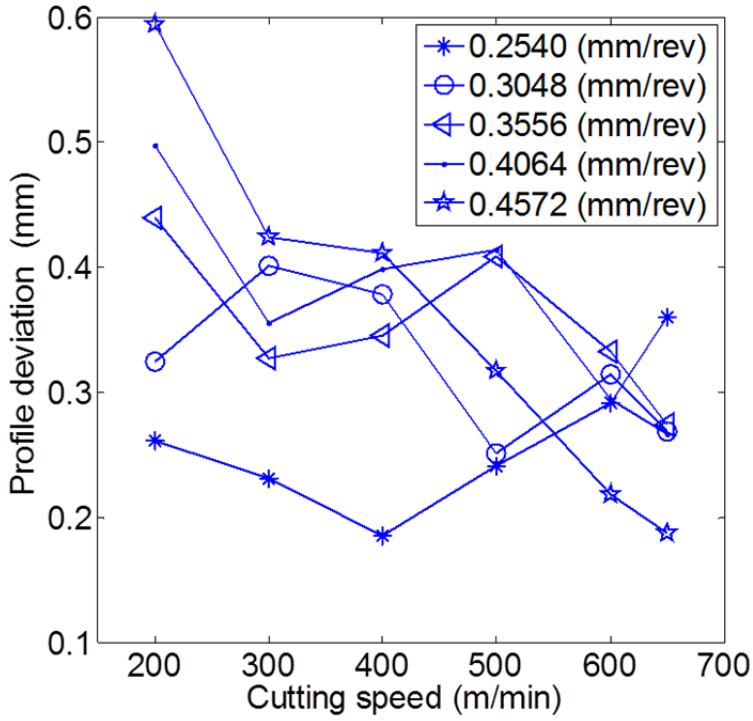



Fig.20 Profile error as a function of the cutting speed for OP2

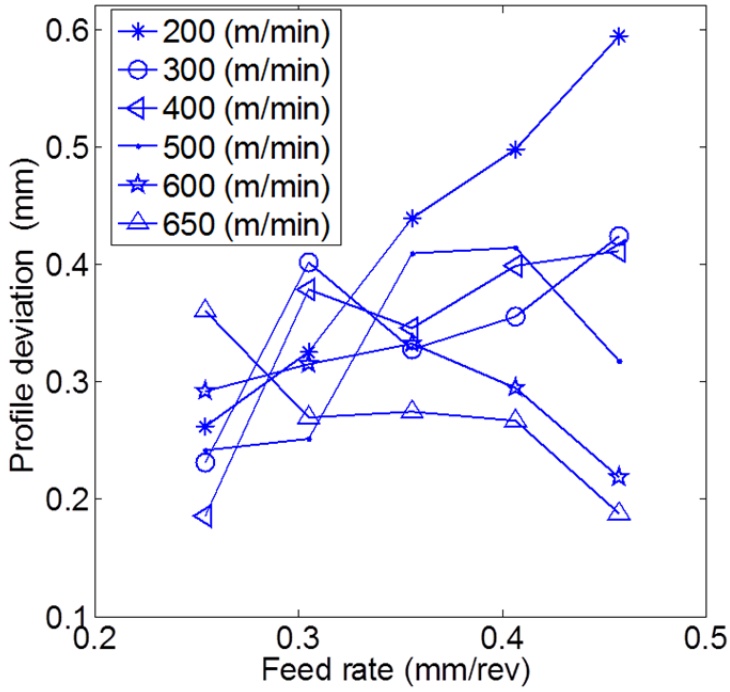



Fig. 21 Profile error as a function of the feed rate for OP2

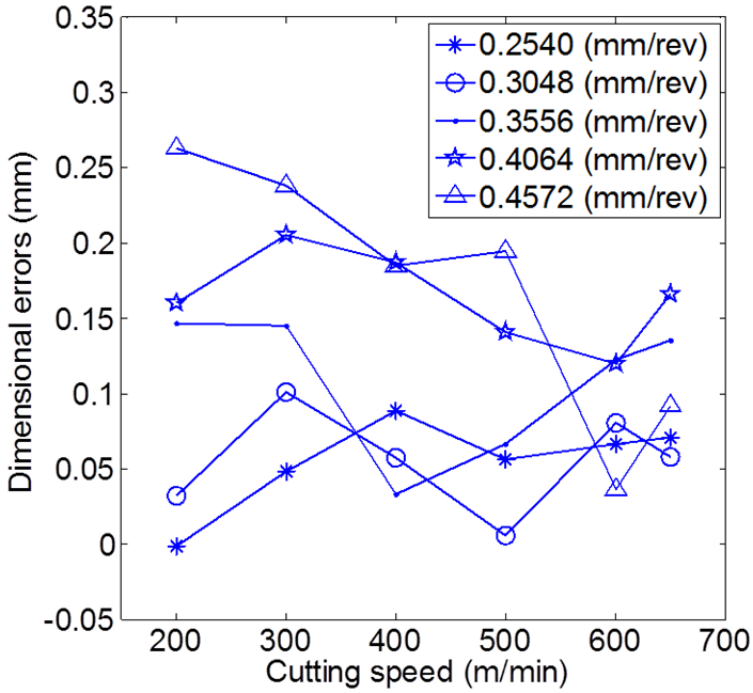


Fig.22 Dimensional error as function of the cutting speed for OP1

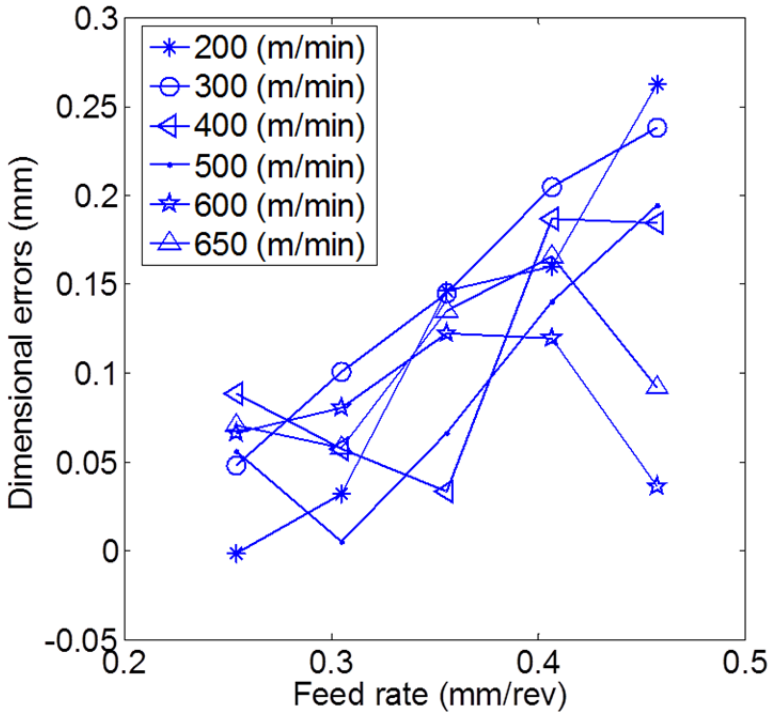



Fig. 23 Dimensional error as a function of the feed rate for OP1

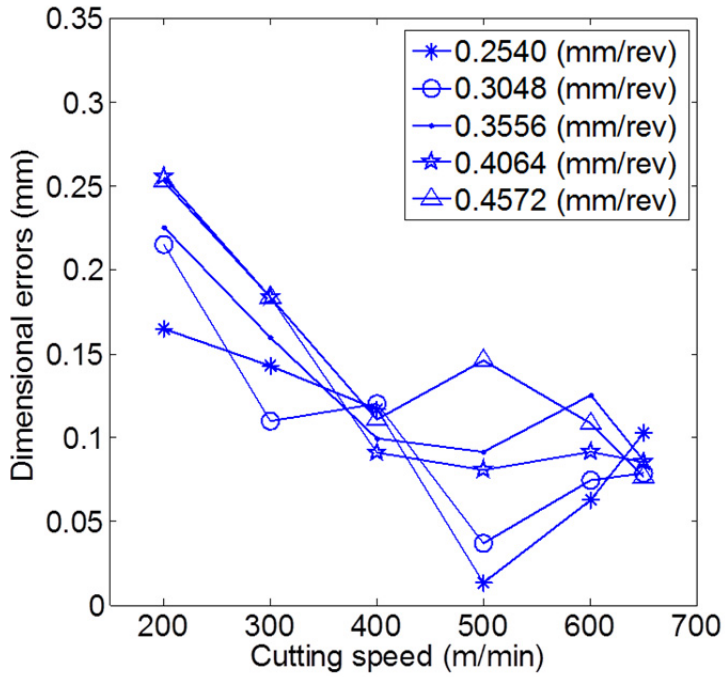



Fig.24 Dimensional error as function of the cutting speed for OP2

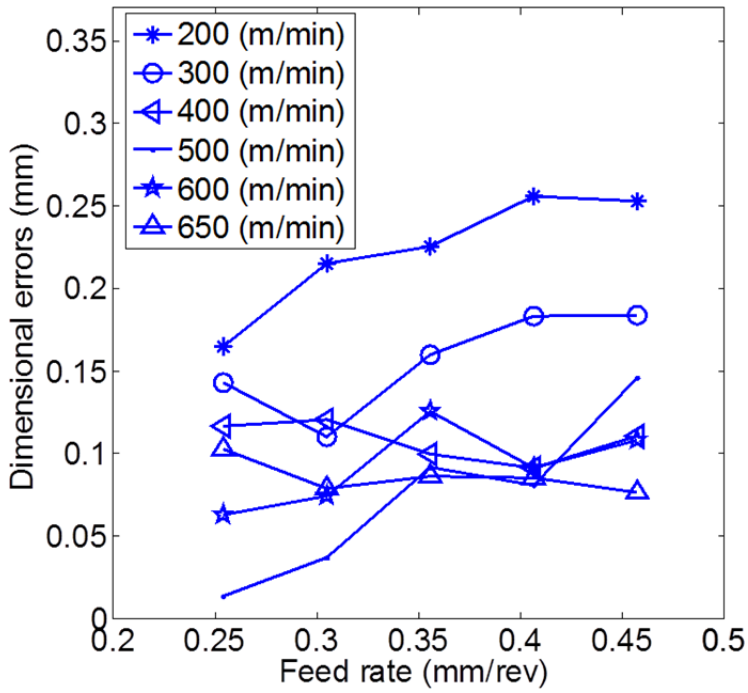


Fig.25 Dimensional errors as a function of the feed rate for OP2

Table.1 Joint angles at the starting position for OP1 and OP2

| Axis notation | Linear axis | Joint 1 | Joint 2 | Joint 3 | Joint 4 | Joint 5 | Joint 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| OP1 | -500 mm | -39.04° | -29.44° | 81.74° | 57.64° | -67.45° | -165.93° |
| OP2 | -3050 mm | 26.66° | -42.30° | 143.67° | 37.51° | -99.09° | -127.78° |

Table.2 Ply orientation lay-up of the trimmed CFRP laminate

| Ply# | Fibre angle | Ply# | Fibre angle |
|---|---|---|---|
| 1 | -45 | 13 | 45 |
| 2 | 90 | 14 | -45 |
| 3 | 45 | 45 | 0 |
| 4 | 0 | 16 | -45 |
| 5 | 45 | 17 | 45 |
| 6 | -45 | 18 | 90 |
| 7 | 90 | 19 | -45 |
| 8 | 45 | 20 | 45 |
| 9 | -45 | 21 | 0 |
| 10 | 0 | 22 | 45 |
| 11 | -45 | 23 | 90 |
| 12 | 45 | 24 | -45 |

**Article 2**

# Statistical modeling and analysis of cutting force components during high speed robotic trimming of Carbon-fibre reinforced polymers

Mohamed Slamani, Sébastien Gauthier, Jean-François Chatelain

Mechanical Engineering Department, École de technologie supérieure (ÉTS), 1100 Notre-Dame Street West, Montréal, QC H3C 1K3, Canada

Journal of Measurement

**ABSTRACT**

In this study, the combined effects of machining parameters on cutting force components during high speed robotic trimming of CFRPs were experimentally investigated. A statistical technique based on the evaluation of the rank and the condition number of the observation matrix followed by the backward elimination approach was used for selecting the most important variables of the models. The developed models were then used to predict the cutting force components for different values of cutting speed, feed and robot configuration. Outcomes from the models were analysed and compared. A very good agreement with experimental data was achieved. Furthermore, results show that the amplitude for the normal force is higher than that for the feed force. The feed rate exhibits greater influence on cutting force components as compared to the cutting speed and robot configuration. The two-level interaction effect of the feed, cutting speed and robot configuration are also found significant.

Keywords: CFRP, trimming, cutting force, robotic machining, statistic, composite

## Introduction

The demand for aircraft components with high mechanical and physical properties such as high strength, high stiffness, low weight, durability, and extreme corrosion resistance has increased the popularity of Carbon Fibre Reinforced Polymers (CFRPs). Carbon Fibre Reinforced Polymer parts are usually produced by moulding or near net shape processing. In

some applications, however, trimming, milling, and drilling are still required to bring CFRP parts to their final shapes and sizes.

Compared to machine tool, the industrial robot, thanks to its adaptability, programmability, high dexterity and good manoeuvrability, offers cutting-edge and low cost solutions to bring the moulded CFRP parts to their final shapes and sizes. It has indeed already been introduced to many industrial applications, including welding, painting and assembly, and has produced excellent results. It is relatively cheaper in terms of cost as compared to the machine tool, is flexible, and has a large working envelope. However, due to their serial structure, such robots are susceptible to errors of many sources.

Many research studies have been done in recent years, and have shown that industrial robots achieve remarkable success in many machining applications, such as polishing [1], grinding [2–4] and debarring [5]. However, there have been few studies on applications in the cutting process [6, 7]. During machining, a heavy cut generally produces a high cutting force and more inaccurate components than does a light cut. Furthermore, during robotic machining of Carbon Fibre Reinforced Polymer, the anisotropic nature of CFRPs, combined with the higher cutting forces and the lower stiffness of the robot, leads to high levels of vibrations. This in turn leads to numerous machining problems, such as rapid tool wear, fibre pull-out, fibre fracture, delamination, trajectory deviation, poor quality, and in some cases, rejection of machined parts.

To address the above issues related to CFRP machining problems, many interesting studies have been carried out. Koplev [8, 9] was one of the first researchers to study CFRP orthogonal cutting. He found that chip formation is strongly affected by fibre orientation, and occurs during a series of successive ruptures. He also concluded that surface quality and the delamination factor are strongly influenced by cutting forces and tool geometry. Cutting forces represent an important factor in machinability evaluation, and their size will directly influence the quality of machined parts. They are related to many factors, such as cutting parameters, workpiece materials and tools. The development of process control schemes for avoiding delamination by controlling and regulating the cutting process parameters require an accurate prediction of the cutting forces [10]. Haiyan et al. [11] used an analytical cutting

force model based on mechanistic modeling techniques to simulate cutting forces in the helical milling of CFRP. In addition, the cutting force coefficients were corrected according to the experimental data, and the established model was tested through cutting experiments. They found that the resultant radial and axial cutting forces decrease with an increase in the cutting speed and increase with an increase in the feed rate per tooth and axial feed rate. Kalla et al. [10] developed a methodology that combines the mechanistic modeling techniques from metal machining and neural network approximation in order to obtain a predictive cutting force model for helical end milling of carbon fibre reinforced polymers (CFRP). They concluded that the mechanistic modeling approaches from metal cutting are valid for machining FRPs. Furthermore, model predictions were compared with experimental data and were found to be in good agreement in cutting unidirectional laminate, but in lesser agreement in the case of a multidirectional laminate. More recently, Karpat and Polat [12] proposed a mechanistic model for the milling of multidirectional CFRP laminates using double helix milling tools. In the model, cutting and edge coefficients are calculated based on the laminate fibre direction. Issues related to surface quality and tool wear were also investigated. Zaghbani et al. [13] presented a comprehensive analysis of the instantaneous cutting forces at play during the trimming process of unidirectional laminates. They developed an empirical model for cutting forces, using a high mechanistic order model. They found that for machined laminates, the fibre orientation does not significantly influence the profile of the tangential and radial forces; however, it influences their amplitude.

Carbon-fibre reinforced polymers (CFRPs) are considered as difficult-to-machine materials, and the effect of the cutting speed, feed rate and robot configuration on the cutting force components must be selected carefully during the robotic machining of CFRPs materials, in order to prevent costly damages to parts. The present paper therefore intends mainly to present a comprehensive analysis of the cutting force components involved during the robotic trimming process of carbon-fibre reinforced polymers, followed by the development of statistical models for predicting the cutting force components. This article is organized as follows. First, the methodology and the details of the experimental procedure are given in Section 2, followed by the statistical approach used for selecting the best regression model in

Section 3. Section 4 describes the experiments we ran, and analyzes their results and the development of the prediction models. Finally, conclusions are drawn.

**Methodology**

Tests were performed on a six-axis KUKA KR 500-2 MT industrial robot mounted on a 13 foot linear rail and manipulated with a heavy spindle HSD Mechatronic ES 789 delivering spindle speeds up to 26000 rpm (Fig. 1). The robot was programmed using the CAD/CAM Robot-master software, and could handle a 500 kg payload.

Machining tests were performed in two placements. The placements were obtained by moving the robot base on the linear axis while maintaining the same trimming position in the two-axis positioning table. A first placement noted operation OP1 is defined in Table 1 and shown in Figure 2. The direction of trimming in the OP1 is parallel to the linear axis and Y axis of the cell. A second placement noted operation OP2 is defined in Table 1, and is shown in Figure 3. The trimming direction of OP2 is perpendicular to the linear axis and parallel to the X axis of the cell. For a given position, the distance between the robot base and the tool is 2669 mm for OP1 and 1816 mm for OP2.

The laminates for the machining tests were prepared in a controlled aeronautical environment using pre-impregnated technology. The stacks were autoclave-cured, and the plies were oriented such as to ensure that the laminate had quasi-isotropic properties. The 24-ply laminate was 3.68 mm thick, with a fibre volume fraction of 64%. Table 2 details the lay-up of the laminate with the orientation of the plies.

Before starting the first trimming test, the laminates were pre-drilled for tightening on a machining fixture, as shown in Figures 4 and 5. The pre-drilling was necessary both for screwing the laminate to the fixture and in order to facilitate the smooth entry of the cutter in the laminate when detouring each coupon using different cutting conditions, as detailed by Chatelain and Zaghbani [14]. The aluminum back plating system (#2) using 49 screws and a torque wrench to secure the laminate (#1) was designed to cut squared test coupons for which each side was machined under specific cutting conditions (Fig. 5). As shown in Figs. 4a and 4b, different combinations of cutting parameters were tested for both operations OP1 and OP2 respectively. The subassembly (laminate and back plate) was tightened to a three-axis

Kistler 9255B (#3) type dynamometer table. The assembly was subsequently installed on the two-axis positioning table KUKA DKP-400 (Fig. 1), situated in the working space of the robot. The positioning table and the linear axis supporting the robot were static during the trimming tests. As shown in Fig. 4, the feed rate starts at 0.2032 mm/rev to 0.5080 mm/rev, and the cutting speed at 200 m/min to 650 m/min (spindle speed between 6684 rpm to 21722 rpm). Because the trimming is horizontal in the OP1 operation, the feed rate changes its value 7 times along each line and the cutting speed changes its values from one line to another (Fig. 4a). Conversely, the trimming in the OP2 operation is vertical, the feed rate changes its value 7 times along each column, and the cutting speed changes its values from one column to another (Fig. 4b).

The tool used to trim the coupons was a 3/8 inch diameter Onsrud PCD end mill with two straight flutes, having a 20° rake angle, a 10° relief angle, and a 5 μm cutting edge radius. The cutter was inspected prior to the machining operation.

**Regression model and variables selection approach**

The first proposed model for the cutting force prediction is a full cubic model with only two independent variables, i.e., cutting speed and feed rate, while the second is an extended model which includes the robot configuration as the third independent variable.

Let k denote the maximum number of independent variables (including appropriate interaction terms). Then, the maximum model is given by:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i,1} + \ldots + \beta_k x_{i,k} + \varepsilon_i \tag{1}$$

Where $x_{i,1}, \ldots, x_{i,k}$ are the predictor variables, and $\varepsilon_i$ are independent, normally distributed random error terms with zero mean and common variance.

To write down the least squares estimator for the multiple linear regression model of Eq. (1), it should be fitting to use a matrix notation. The above equation in matrix form becomes:

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & \ldots & x_{1,k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n,1} & \ldots & x_{n,k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{Y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \tag{3}$$

This linear system of n equations with $(k+1)$ unknowns can be estimated using a least squares method. In least squares estimation, the sum of the squares of the residual vector elements is minimised. The minimisation is equivalent to:

$$\widehat{\boldsymbol{\beta}} = (\boldsymbol{X}'\boldsymbol{X})^{-1}\boldsymbol{X}'\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{X}^{+}\boldsymbol{Y} \tag{4}$$

provided the inverse of $(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}$ exists. The matrix $\boldsymbol{X}^{+} = (\boldsymbol{X}'\boldsymbol{X})^{-1}\boldsymbol{X}'$ is the Moore-Penrose pseudoinverse of $\boldsymbol{X}$ (sometimes just called the pseudoinverse).

Redundancies exist amongst the coefficients of the model (3), and as a result, the $\mathbf{X}$ matrix is ill-conditioned (very high condition number). It was therefore necessary to remove redundant coefficients from the analysis in order to lower the condition number and obtain more reliable estimates of the unknowns. Using an analysis of singular values, the columns of weakly contributing coefficients or redundant ones were removed. Furthermore, to improve the conditioning of matrix $\boldsymbol{X}$, it was preferable to normalize the variables $x_i$ by subtracting from these values their average $\overline{x}_i$ and dividing the result by its standard deviation s.

$$x_{nr,i} = \frac{(x_i - \overline{x})}{s} \tag{5}$$

There are many different methods for selecting the best regression model. The method for selecting variables used in this study is based on evaluation of the rank and the condition number of the matrix X followed by the backward elimination approach. After achieving a full rank model, the backward elimination approach starts with a set containing all of the selected variables (full rank model), and then an F-test for significance is performed on each regression coefficient at a specified alpha level. The variable with the smallest F-statistic is deleted (if the F is not higher than the chosen cut-off level ($F_{\propto;1,n-k-1}$)) [15]. The procedure ends when no more variables can be removed from the model at a 5% significance level. Finally, the adequacy of the selected model is tested by using the ANOVA technique at a 95% confidence level, followed by the calculation of the coefficient of determination. The selection approach is summarized in the flowchart shown in Figure 6.

**Results and discussion**

To obtain cutting force models, specimens were trimmed under different cutting conditions, and the cutting forces were measured in the x, y, and z directions with a 3-axis dynamometer table. The cutting force data were then recorded for modeling and further analysis and evaluation.

Figure 7 presents the instantaneous cutting forces for four revolutions of the tool when machining a unidirectional CFRP laminate during operation OP1 at a ply orientation of +45°, with a cutting speed of 200 m/min and a feed of 0.2540 mm/rev. Figure 7 shows that the normal cutting force has an amplitude higher than the feed cutting force. This observation is consistent with the previously published study of Zaghbani et al. [13], and is different from what is generally observed for isotropic materials, where the highest force level is obtained in the feed direction. Figure 8 presents the instantaneous cutting forces for four revolutions of the tool during operation OP2 at a ply orientation of -45° with the same cutting condition as in Fig. 7.

A closer look at Figs. 7b and 8b reveals that the feed cutting force shapes during operations OP1 and OP2 are similar in pattern; however, the amplitudes are different. On the other hand, Figs. 7c, 7d, 8c and 8d show that the shapes and amplitudes of the normal forces during operations OP1 and OP2 are similar. A same conclusion was observed for the vertical forces results (Figs. 7e, 7f, 8e and 8f).

**Statistical analysis**

We begin with the first model (full cubic model), which contains only two independent variables (cutting speed and feed rate) and their interactions. Tables 3–6 show the statistical results of the last step of the backward elimination test for the normal force and the feed force model for the OP1 and OP2 operations, respectively. This analysis was carried out for a 5% significance level, i.e., for a 95% confidence level. The last but one column of the tables shows the factor contribution (percentage) on the total variation, indicating the degree of influence on the result.

Starting with the normal cutting force for operation OP1, the backward elimination process summarized in Table 3 shows that six variables are significant; since the lowest F-value

($F = 9.093$) is greater than $F_{0.05,1,22} = 4.30$ at a significance level of 5%, we cannot reduce the model any further. Table 3 also shows that the feed rate $f$, the quadratic and the cubic term of the feed rate $f^2$ and $f^3$, the two-level interaction effect of the quadratic term of the feed rate and the linear term of the cutting speed ($f^2 \times V_c$), the two-level interaction effect of the quadratic terms of the feed rate and the cutting speed ($f^2 \times V_c^2$) and the two-level interaction effect of the cubic terms of the feed rate and the cutting speed ($f^3 \times V_c^3$) all have a significant effect on the normal force for operation OP1. However, the effects of the linear, quadratic and the cubic terms of the feed rates $f, f^2$ and $f^3$ constitute the most significant factor with contributions of 22.5756%, 21.8162% and 18.7217%, respectively. The marginal contribution of the cutting speed is found insignificant, and as a result, its presence in the regression equation is deemed unnecessary.

The summary of the backward elimination test for the feed force for the OP1 operation is indicated in Table 4. This table shows that a model of four terms is sufficient to represent the feed force because the lowest F-value ($\mathrm{F} = 18.88$) is greater than $\mathrm{F}_{0.05,1,24} = 4.26$ at a significance level of 5%. It can be noted that the two-level interaction effect of the linear terms of the feed rate and the cutting speed ($f \times V_c$) affects the feed force considerably; its contribution is 36.7655%. The linear and quadratic terms of the feed rates f and $f^2$ and the two-level interaction effect of the quadratic term of the feed rate and the linear term of the cutting speed ($f^2 \times V_c$) are significant. Respectively, their contributions are 18.0323%, 20.8092%, and 24.3930%. Conversely, the backward elimination test shows that the contribution of the cutting speed is not significant.

Regarding operation OP2, the analysis of influence on the normal force and the feed force are summarized in Tables 5 and 6. The backward elimination process shows that a model with seven terms is sufficient to represent the normal force and the feed force for the OP2 operation.

As opposed to the OP1 operation, the results in Table 5 show that both the feed rate and the cutting speed are significant. Furthermore, the linear term of the feed rate remains the most significant variable, with a contribution of 32.1571%. The next largest factor influencing the normal force is the two-level interaction of the linear terms of the feed rate and the cutting

speed ($f \times V_c$), with a 18.4463% contribution. The cubic term of the feed rate $f^3$, the cubic term of the cutting speed $V_c^3$, the two-level interaction effect of the quadratic terms of the feed rate and the cutting speed ($f^2 \times V_c^2$) and the two-level interaction effect of the cubic terms of the feed rate and the cutting speed ($f^3 \times V_c^3$) are also significant.

Similarly to the normal force results, the backward elimination process of the feed force summarized in Table 6 shows that both the feed rate and the cutting speed are significant. The quadratic term of the feed rate is found to be the most significant variable, with a contribution of 18.4039%. Similarly, the interactions ($f^2 \times V_c^2$), ($f^3 \times V_c^3$), ($f \times V_c^2$) and ($f \times V_c^3$) are all significant. Respectively, their contributions are 13.2985%, 8.6865%, 14.7912%, and 13.0110%.

**Regression equations and model adequacy checking**

After the backward elimination test, the estimated model for the normal force ($F_n$) for the operation OP1 is reduced to:

$$F_n = -641.857 + 4816.158f - 13579.746f^2 + 11783.44f^3 + 0.826f^2 \times V_c - 16.397 \times 10^{-4} f^2 \times V_c^2 + 2.44 \times 10^{-6} f^3 \times V_c^3 \quad (6)$$

The adequacy of the model was tested using the ANOVA technique at a 95% confidence level [15]. Table 7 shows the ANOVA analysis for the proposed model. It can be seen that the model presented in Eq. (6) is adequate, since $F = \frac{710.633}{13.147} = 54.053$ is greater than $F_{0.05,6,23} = 2.53$ at a significance level of 5%.

As shown in Figs. 9 and 10, a very good fit was obtained. Furthermore, the coefficient of determination is $R^2 = 0.93$.

The feed force model ($F_f$) for the OP1 operation is given by Eq. (7).

$$F_f = -137.373 + 628.748f - 0.526f \times V_c - 1018.318f^2 + 1.1f^2 \times V_c \quad (7)$$

From the ANOVA test presented in Table 8, we can conclude that this model is adequate since $F = 21.405$ is greater than $F_{0.05,4,25} = 2.76$ at a significance level of 5%.

Figure 11 shows a comparison between the measured and predicted feed force at different cutting speeds and feed rates. The residual is also plotted in Figure 12. The coefficient of determination in this case is $R^2 = 0.77$.

A statistical analysis shows that the estimated model for the normal cutting force for the OP2 operation is:

$$F_n = -90.277 + 919.473f + 0.496V_c - 3.182f \times V_c - 594.113f^3 - 2.188 \times 10^{-7}V_c^3 + 0.0094f^2 \times V_c^2 - 1.061 \times 10^{-5}f^3 \times V_c^3 \quad (8)$$

The summary of the ANOVA test is presented in Table 9.

Table 9 shows that the model is adequate since F $= 178.932$ is greater than $F_{0.05,7,22} = 2.46$ at a significance level of 5%.

As shown in Figs. 13 and 14, an excellent fit was obtained and the coefficient of determination is $R^2 = 0.98$.

The estimated model for the feed cutting force for the OP2 operation is:

$$F_f = -261.839 + 804.108f + 0.5136V_c - 1184.499f^2 + 0.01196f^2 \times V_c^2 - 1.281 \times 10^{-5}f^3 \times V_c^3 - 0.0081f \times V_c^2 + 4.646 \times 10^{-6}f \times V_c^3 \quad (9)$$

Despite the small F-value (F= 4.28), Table 10 shows that overall, the model is adequate, since F= 4.28, which is greater than $F_{0.05,7,22} = 2.46$ at a significance level of 5%.

Figure 15 shows a comparison between the measured and predicted feed force at different cutting speeds and feed rates. The residual is also plotted in Figure 16. The coefficient of determination is very small, $R^2 = 0.58$.

**Extended feed force model**

In many cases, when the fit of a model is not adequate, it is common practice to modify the model by adding factors that improve the fit. A well-fitting regression model results in predicted values close to the observed data values. Results in the preceding section show that the cubic model, which includes only the two independent variables (cutting speed and feed rate) and their interactions, is insufficient for properly predicting the feed force for both the OP1 and OP2 operations. The coefficients of determination were only 0.77 and 0.58, respectively. The feed force regression model can be improved by adding the robot

configuration ($C$) as a predictor variable. As shown in Fig. 4a, the trimming in the OP1 operation is horizontal and the cutting speed changes its value from one line to the next. Similarly, the robot changes its configuration from one line to the next. To facilitate the statistical analysis, the new predictor variable (robot configuration ($C$)) takes the values, one for the first line, two for the second line, and so on, up to six for the last line.

The summary of the backward elimination test for the extended feed force model for the OP1 operation is indicated in Table 11.

Table 11 shows that the lowest F-value ($F = 4.868$) is greater than $F_{0.05,1,19} = 4.38$ at a significance level of 5%, so we cannot reduce the model any further. Thus, the extended feed force model is given by:

$$F_f = -137.201 + 1485.538f - 9.154f \times V_c + 837.580f \times C - 1355.533f^2 - 1.180C^3 - 183.492f^2 \times C^2 + 3.168V_c \times f^2 + 136.382C^2 \times f^3 + 6.623 \times 10^{-6} f \times V_c^3 \quad (10)$$

The ANOVA table shows that the extended model is adequate since $\mathrm{F} = 12.118$ is greater than $F_{0.05,9,20} = 2.39$ at a significance level of 5% (Table 12).

The extended feed force model is used to predict the feed force at different feed rate, cutting speed and robot configurations. The predicted values are then compared with the corresponding experimental values. This is depicted in Fig. 17. A good fit was observed. The residual between the measured and the predicted feed force is plotted in Fig. 18. Furthermore, the coefficient of determination is lifted from $R^2 = 0.77$ to $R^2 = 0.86$.

The summary of the backward elimination process for the extended feed force model for the OP2 operation presented in Table 13 shows that the lowest F-value ($F = 5.67$) is greater than $F_{0.05,1,15} = 4.54$, and as such, no more variables can be removed from the model at a significance level of 5%. Thus, the extended feed force model is given by:

$$F_f = -189.911 + 6.391f \times V_c - 575.871f \times C - 1683.448f^2 + 1.677 \times 10^{-6} V_c^3 + 2.216C^3 - 323.664f^2 \times C^2 + 4.698V_c \times f^2 - 3.518 \times 10^{-5} f^3 \times V_c^3 + 440.743C^2 \times f^3 - 4.457 \times 10^{-7} C \times V_c^3 - 6.583 \times 10^{-6} f \times V_c^3 + 9.335 \times 10^{-4} f^2 \times V_c^2 \times C^2 - 1.75 \times 10^{-7} f^3 \times V_c^3 \times C^3 \quad (11)$$

As shown in Table 14, the extended model is adequate since $F = 12.277$ is greater than $F_{0.05,13,16} = 2.40$ at a significance level of 5%.

As shown in Fig. 19, the results predicted by equation (11) show a very good agreement with experimental results for a wide range of operating conditions. The difference between the predicted and experimental values is also presented in Fig. 20. It is clear that the predicted results are very close to the experimental ones. Furthermore, the statistical analysis shows that the coefficient of determination is lifted from $R^2 = 0.58$ to $R^2 = 0.91$.

A comparison of the coefficients of determination shows that the extended model has a better performance versus the simple model in predicting the feed force. This means that the robot configuration and its interaction with the feed rate and the cutting speed have a high impact on the feed force, and their presence in the regression model is deemed necessary

**Conclusion**

The cutting force is considered as the most important indicator of machining state and quality. In the present work, an attempt has been made to investigate the effect of cutting parameters on cutting force components during the high speed robotic trimming of carbon fibre reinforced polymers and to subsequently develop a predictive regression model.

In the light of the experimental results presented, the following conclusions can be drawn:

The normal cutting force has an amplitude higher than the feed cutting force, which is different from what is generally observed for isotropic materials, where the highest force level is obtained in the feed direction. For the OP1 operation, the backward elimination process shows that the marginal contribution of the cutting speed is found insignificant; therefore, its presence in the regression equation is deemed unnecessary. Conversely to the OP1 operation, the results of the OP2 operation show that both the feed rate and the cutting speed are significant. The two-level interaction effects of the three cutting conditions are significant. Overall, the backward elimination process shows that the feed rate is the cutting parameter, which has a greater influence on cutting force components. Normal force results show that the presence of the feed rate and the two-level interactions of the feed rate and the cutting speed in the model are sufficient to predict the normal force. The presence of the

robot configuration in the regression equation is not very important. Feed force results show that the marginal contribution of the robot configuration is significant and its presence in the regression equation is deemed necessary.

After the robot configuration is added as an independent variable in the feed force model, the results show that the extended model is significantly improved and its prediction capacity exceeds that of the simple model. The coefficient of determination of the extended model is lifted from 77% to 86% for the OP1 operation and from 58% to 91% for the OP2 operation.
The models developed for cutting force components using regression modeling are highly adequate as their coefficient of determination values are close to 1, and hence all the models can be used for the reliable prediction of the cutting force during robotic trimming of CFRP. Furthermore, the $R^2$ values for the normal force are 93% and 98% for the OP1 and OP2 operations, respectively. The $R^2$ values for the feed force are 86% and 91% for the OP1 and OP2 operations, respectively.

**Acknowledgment**

This work was funded by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and the Consortium for Research and Innovation in Aerospace in Québec (CRIAQ) and its partners, MITACS, Bombardier Aerospace, Avior Integrated Products, Delastek and Av&R Vision & Robotics. We are grateful to CTA for providing facilities to carry out this work. Thanks are also due to Mr. Serge St-Martin and Mr. Sebastian Tremblay for their excellent technical assistance.

**References**

[1] F.Y. Lin, T.S. Lu, Development of a robot system for complex surface polishing based on CL data, Int J Adv Manuf Technol, 26(2005) 1132–1137.

[2] L. Liu, B.J. Ulrich, J Elbestawi, Robotic grinding force regulation: design, implementation and benefits, Proc. IEEE International conference on robotics and automation, Cincinnati, USA, (1990) 258–265.

[3] H. Dai, K.M. Yuen, J Elbestavi, Parametric modelling and control of the robotic grinding process, Int J Adv Manuf Technol, 8(3) (1993) 182–192.

[4] X. Rena, B. Kuhlenkottera, H. Muller, Simulation and verification of belt grinding with industrial robots, Int J Mach Tool Manuf, 46(2006) 708–716.

[5] H. Huang, Z.M. Gong, X.Q. Chen, L. Zhou, Robotic grinding and polishing for turbine-vane overhaul, J Mater Process Technol, 127(2002) 140–145.

[6] K. Shirase, N. Tanabe, M. Hirao, T. Yasui, Articulated robot application in end milling of sculptured surface, JSME Int. J., Series C, 39(2) (1996) 308–316.

[7] Y. Yamane, R.S. Yin, M. Miyake, N. Narutaki, Measuring and cutting a propeller for ship by an articulated robot, J. JSPE, 57 (8) (1991) 1387–1392.

[8] A. Koplev, Cutting of CFRP with single edge tools, Proceedings of the third international conference on composite materials, Paris 2: (1980) 1597–605.

[9] A. Koplev, A. Lystrup, T. Vorm, The cutting process, chips and cutting forces in machining CFRP, Composites 14(1983) 371–376.

[10] D. Kalla, J. Sheikh-Ahmad, J. Twomey, Prediction of cutting forces in helical end milling Fiber reinforced polymers. Int. J. Mach. Tools Manuf, 50(2010) 882–891.

[11] W. Haiyan, Q. Xuda, L. Hao, R. Chengzu, Analysis of cutting forces in helical milling of carbon fiber-reinforced plastics, Proc. Inst. Mech. Eng. Part B-J. Eng. Manuf, (2012) doi: 10.1177/0954405412464328.

[12] Y. Karpat, N. Polat, Mechanistic force modeling for milling of carbon fiber reinforced polymers with double helix tools, CIRP Ann-Manuf. Technol, 62(1) (2013) 95–98.

[13] I. Zaghbani, J.F. Chatelain, S. Berube, et al, Analysis and modelling of cutting forces during the trimming of unidirectional CFRP composite laminates, Int. J. Machining and Machinability of Materials (IJMMM), 12(4) (2012) 337–357.

[14] J.F Chatelain, I. Zaghbani, Effect of tool geometry special features on cutting forces of multilayered CFRP laminates", Proc. of the 4th Int. Conference on Manufacturing Engineering, Quality and Production Systems, MEQAPS`11, Barcelona, Spain, (2011) 85–90.

[15] M. L. Berenson, D. M. Levine, and M. Goldstein, Intermediate statistical methods and applications: a computer package approach, New Jersey: Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, 1983.

**Figures Captions**

Fig. 1 Photo of the six-axis KUKA KR 500-2 MT industrial robot
Fig. 2 Robot configuration during OP1 operation
Fig. 3 Robot configuration during OP2 operation
Fig. 4 Rough part before machining for operations OP1 and OP2

Fig. 5 Experimental set-up for dry trimming of CFRP
Fig. 6 Flowchart for the method used for variables selection
Fig. 7 Instantaneous cutting forces during operation OP1
Fig. 8 Instantaneous cutting forces during operation OP2
Fig. 9 Normal force for OP1 operation
Fig. 10 Residual between measured and predicted normal force (OP1)
Fig. 11 Feed force for OP1 operation
Fig. 12 Residual between measured and predicted feed force (OP1)
Fig. 13 Normal force for OP2 operation
Fig.14 Residual between measured and predicted normal force(OP2)
Fig. 15 Feed force for OP2 operation
Fig.16 Residual between measured and predicted feed force (OP2)
Fig. 17 Feed force for OP1 operation
Fig. 18 Residual between measured and predicted feed force (OP1)
Fig. 19 Feed force for OP2 operation
Fig. 20 Residual between measured and predicted feed force (OP2)

**Table Captions**

Table 1 Joint angles at the starting position of the robot
Table 2 Ply orientation lay-up of the trimmed CFRP laminate
Table 3 Backward elimination test for the normal force (OP1)
Table 4 Backward elimination test for the feed force (OP1)
Table 5 Backward elimination test for the normal force (OP2)
Table 6 Backward elimination test for the feed force (OP2)
Table 7 ANOVA table for the normal force for operation OP1
Table 8 ANOVA table for the feed force for operation OP1
Table 9 ANOVA table for the normal force for operation OP2
Table 10 ANOVA table for the feed force for operation OP2
Table 11 Backward test for the extended feed force model (OP1)

Table 12 ANOVA table for the extended feed force model (OP1)
Table 13 Backward test for the extended feed force model (OP2)
Table 14 ANOVA table for the extended feed force model (OP2)

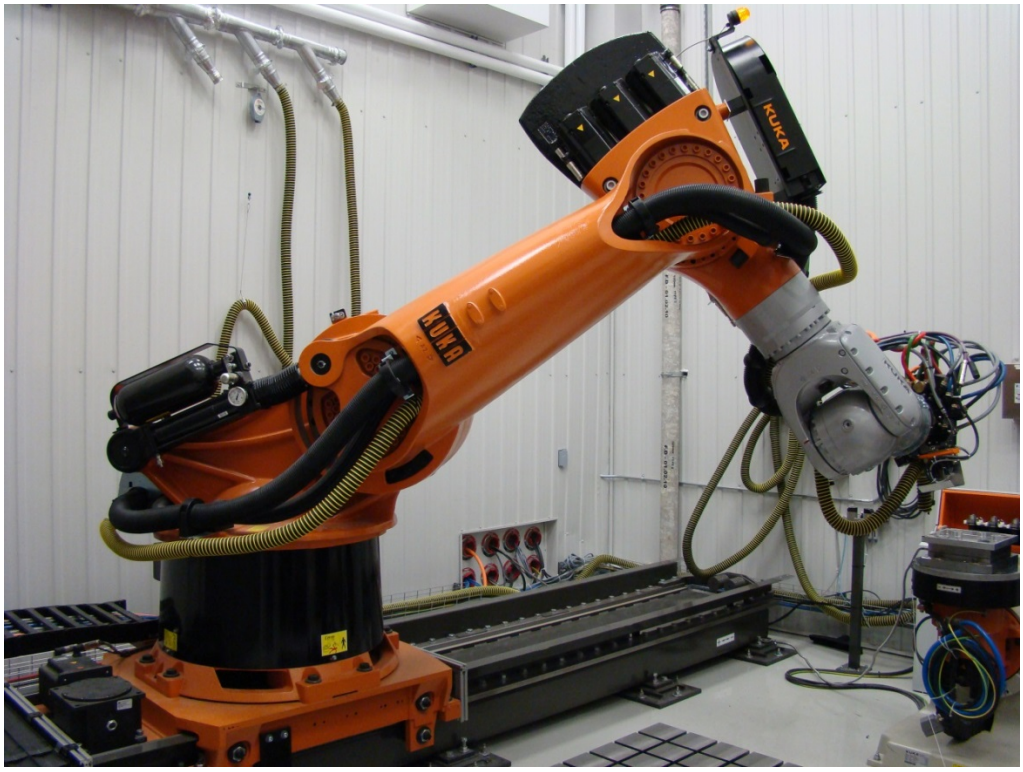



Fig. 1 Photo of the six-axis KUKA KR 500-2 MT industrial robot

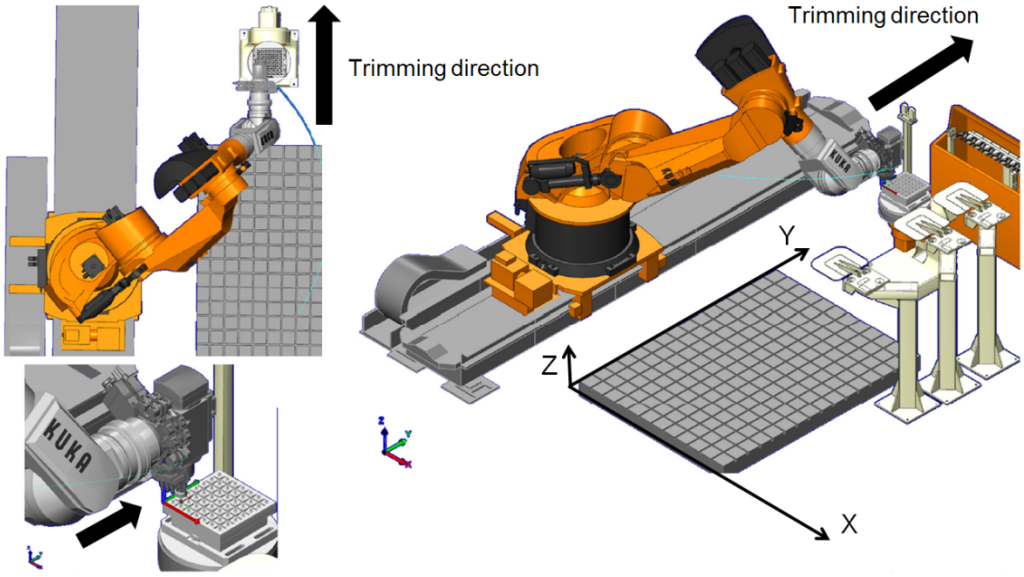



Fig. 2 Robot configuration during OP1 operation

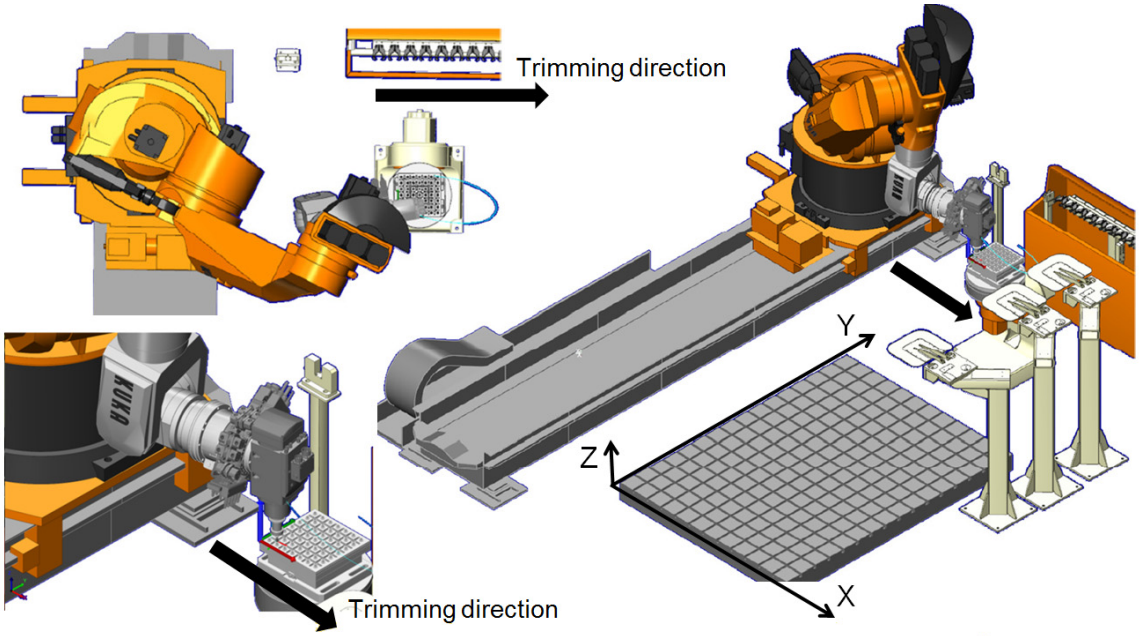



Fig. 3 Robot configuration during OP2 operation

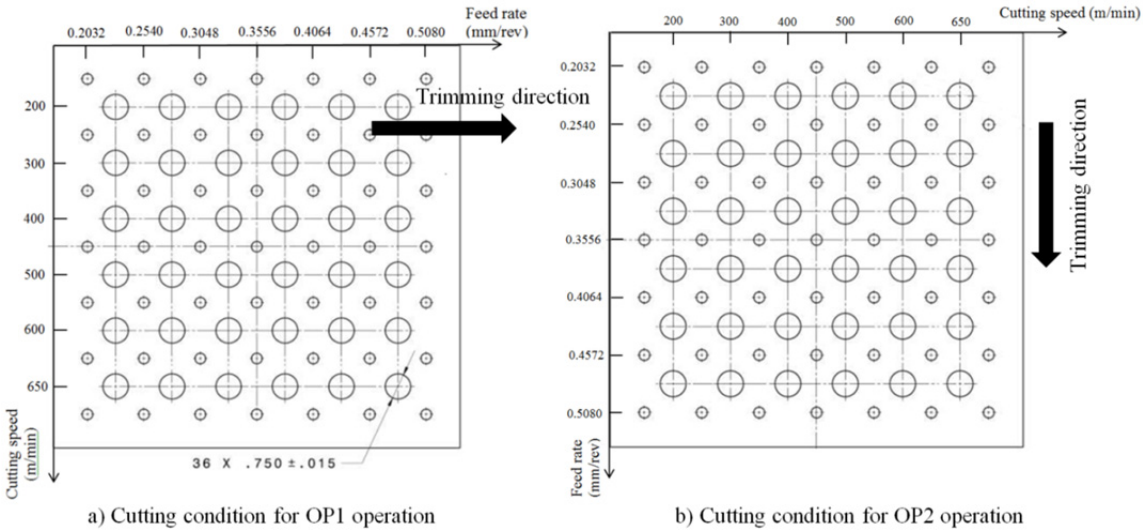



Fig. 4 Rough part before machining for operations OP1 and OP2

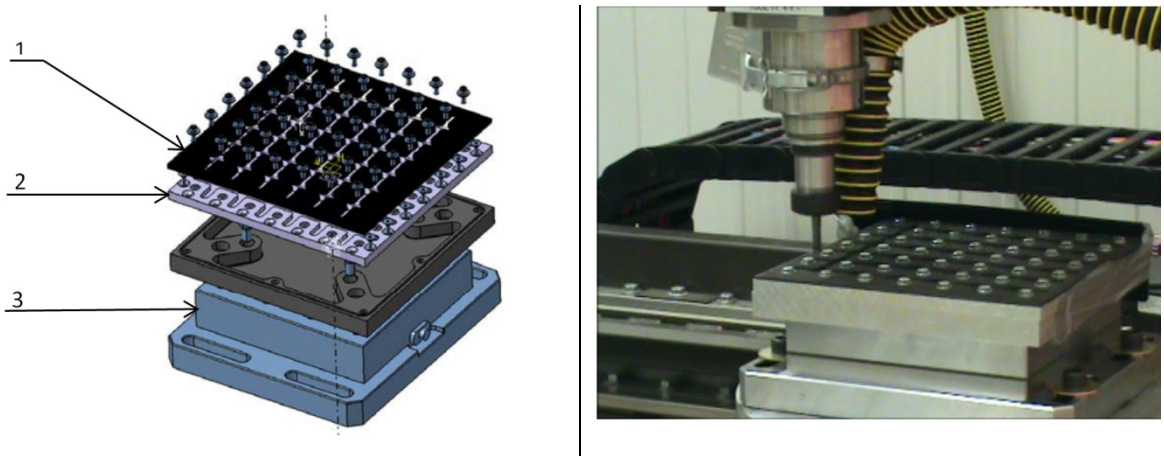



Fig. 5 Experimental set-up for dry trimming of CFRP

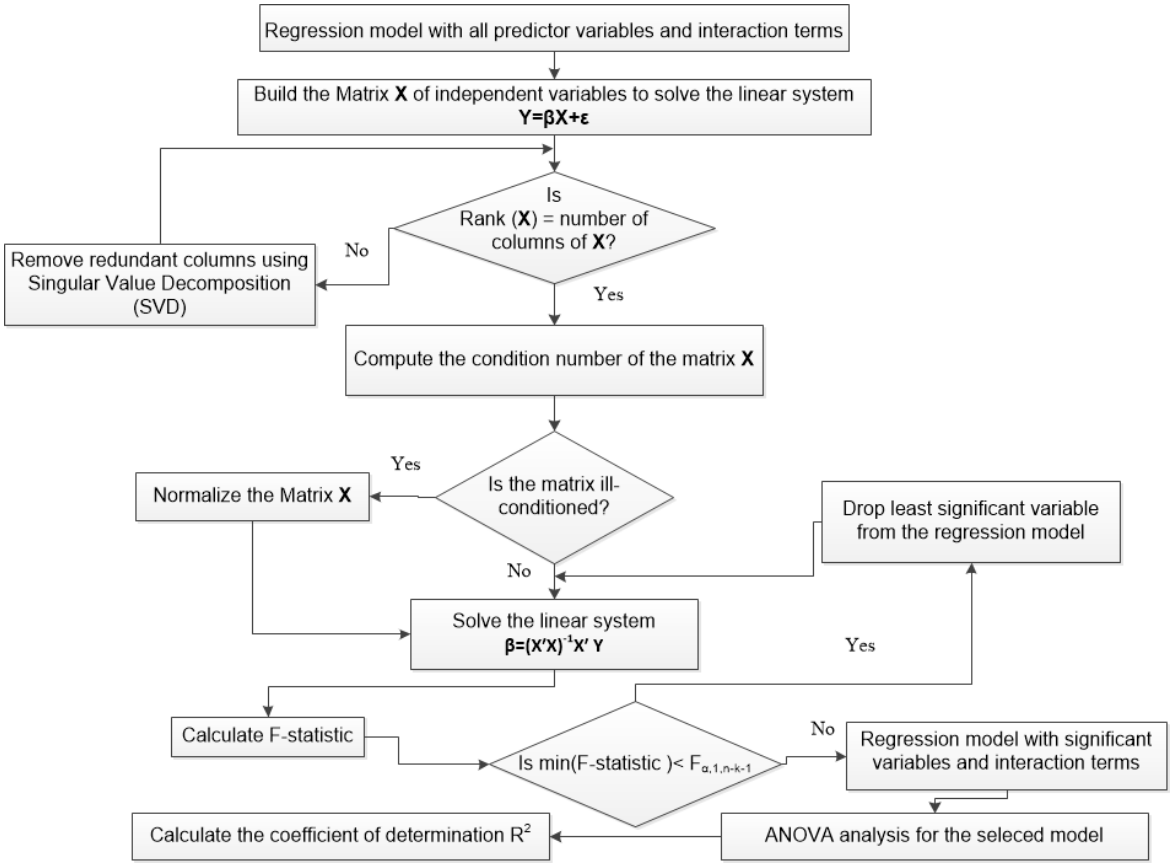



Fig. 6 Flowchart for the method used for variables selection

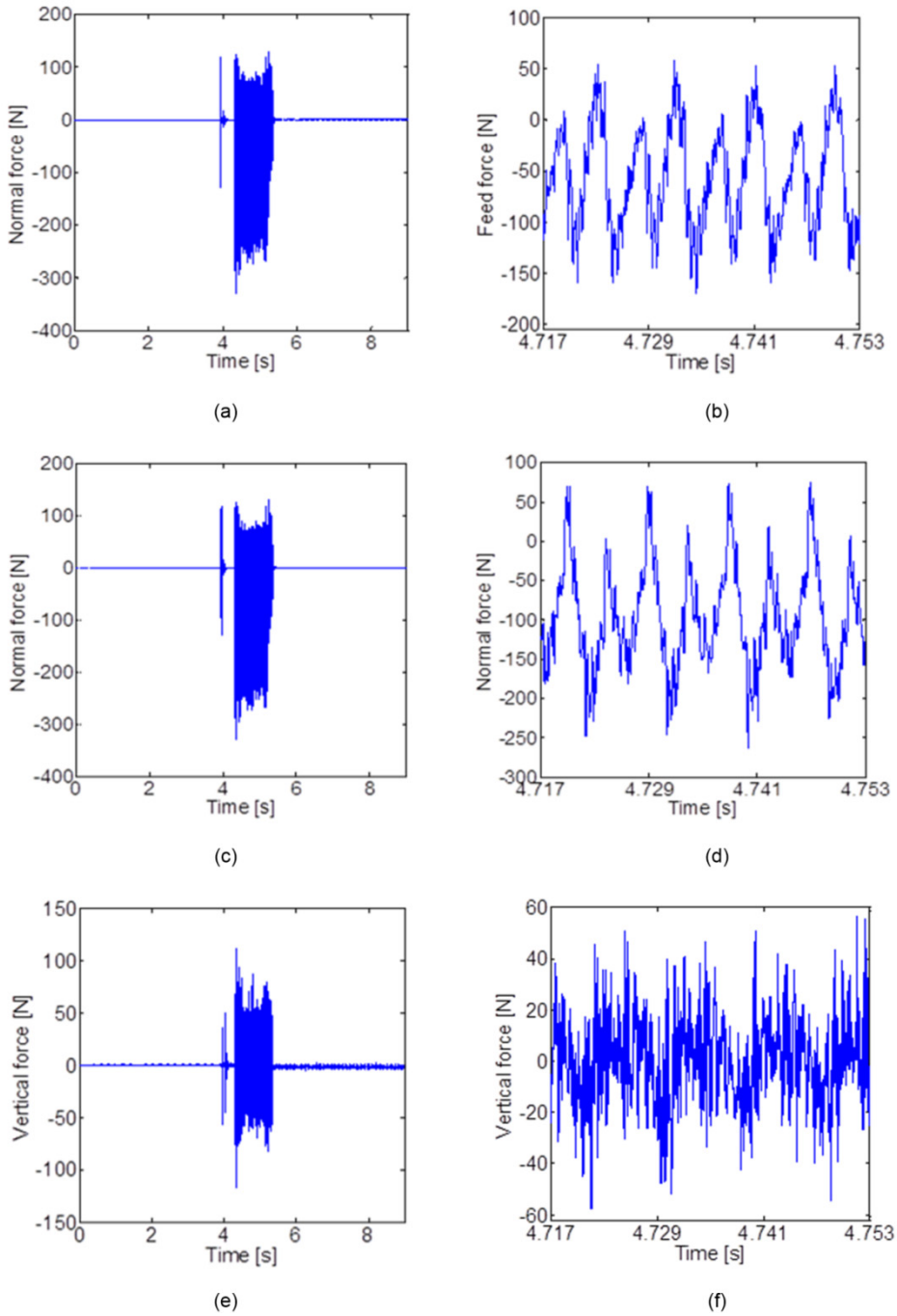



Fig. 7 Instantaneous cutting forces during operation OP1

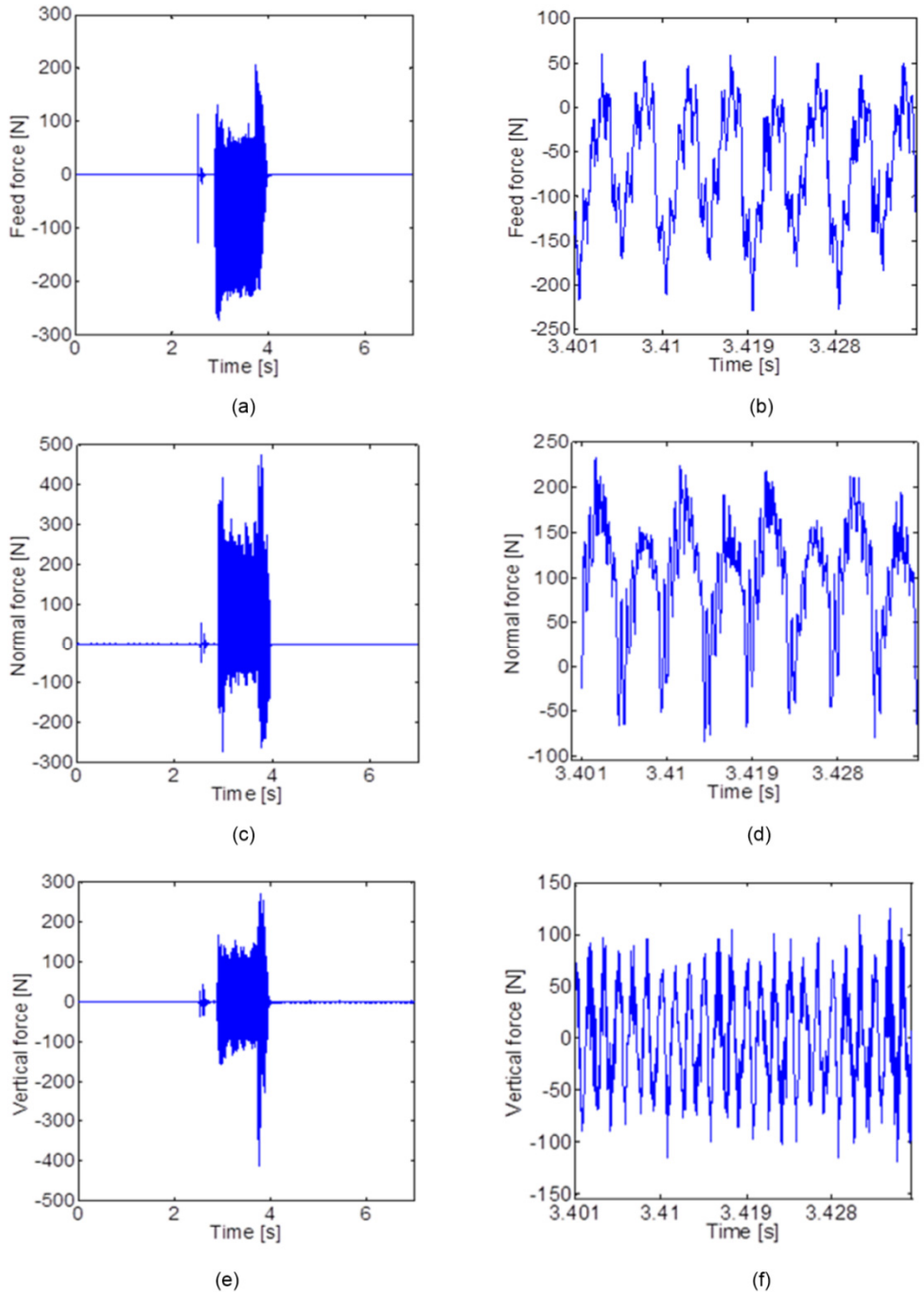



Fig. 8 Instantaneous cutting forces during operation OP2

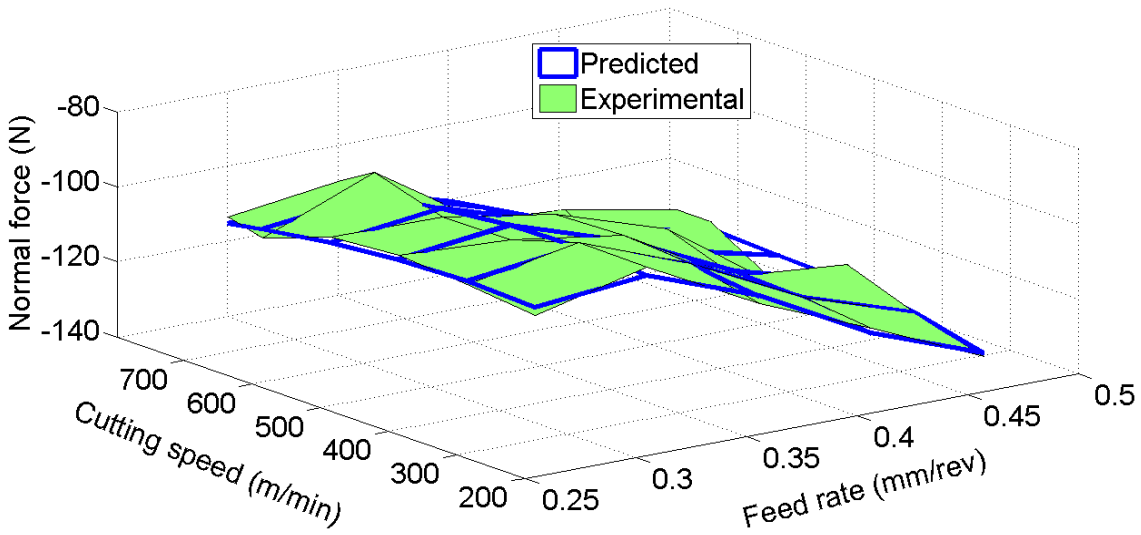



Fig. 9. Normal force for OP1 operation

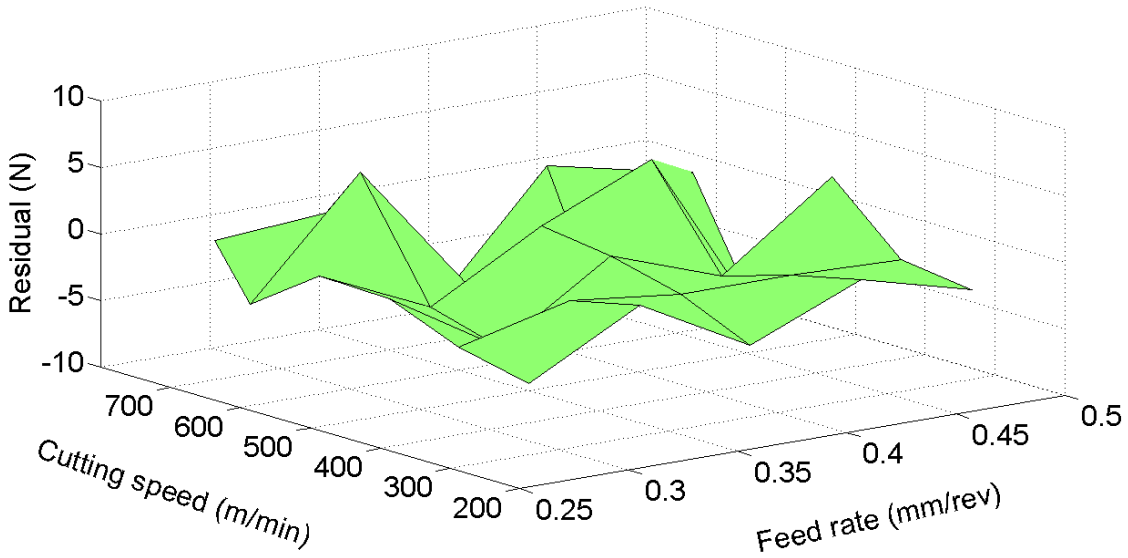



Fig. 10. Residual between measured and predicted normal force (OP1)

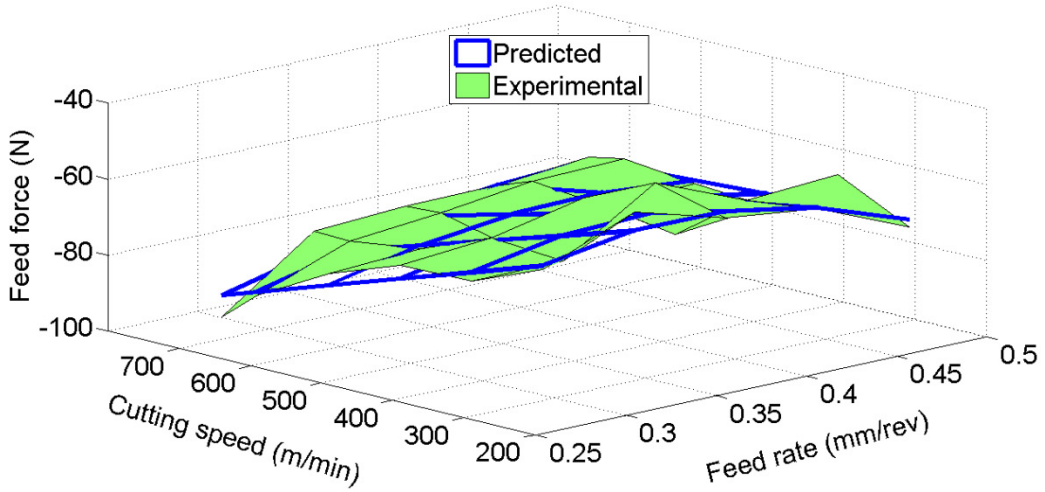



Fig. 11. Feed force for OP1 operation

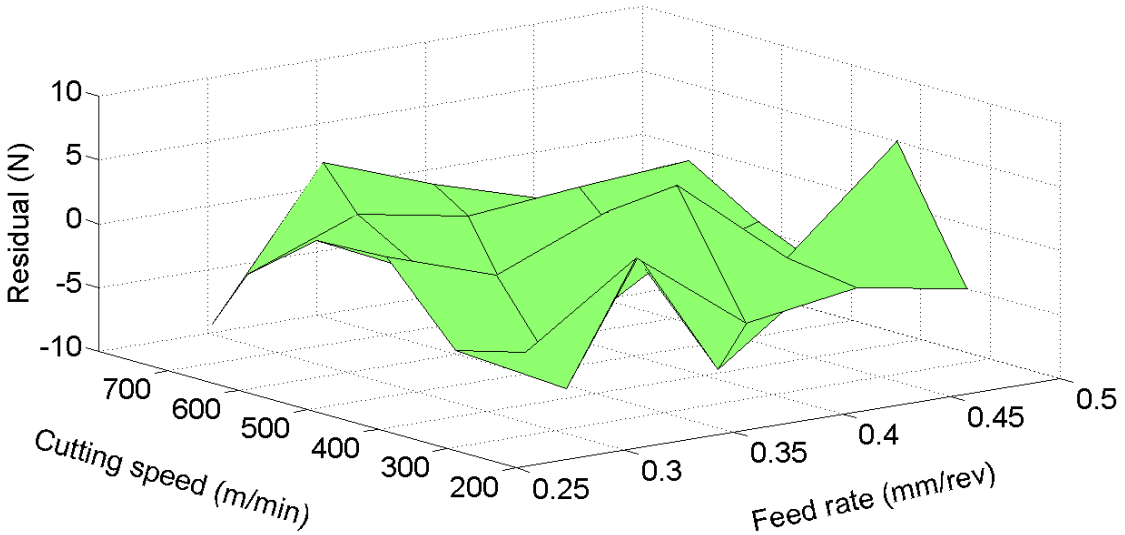



Fig. 12. Residual between measured and predicted feed force (OP1)

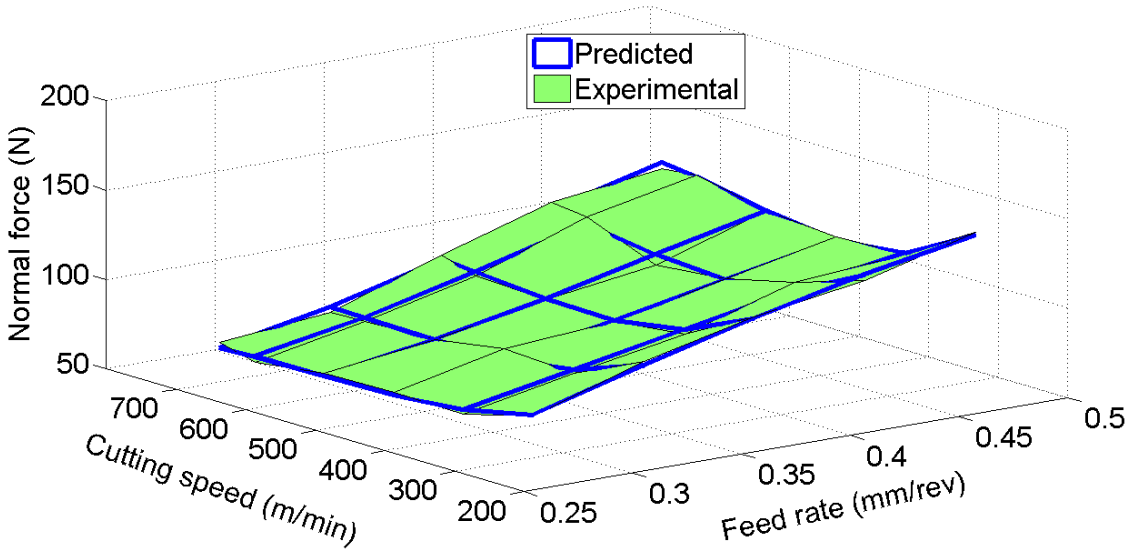



Fig. 13. Normal force for OP2 operation

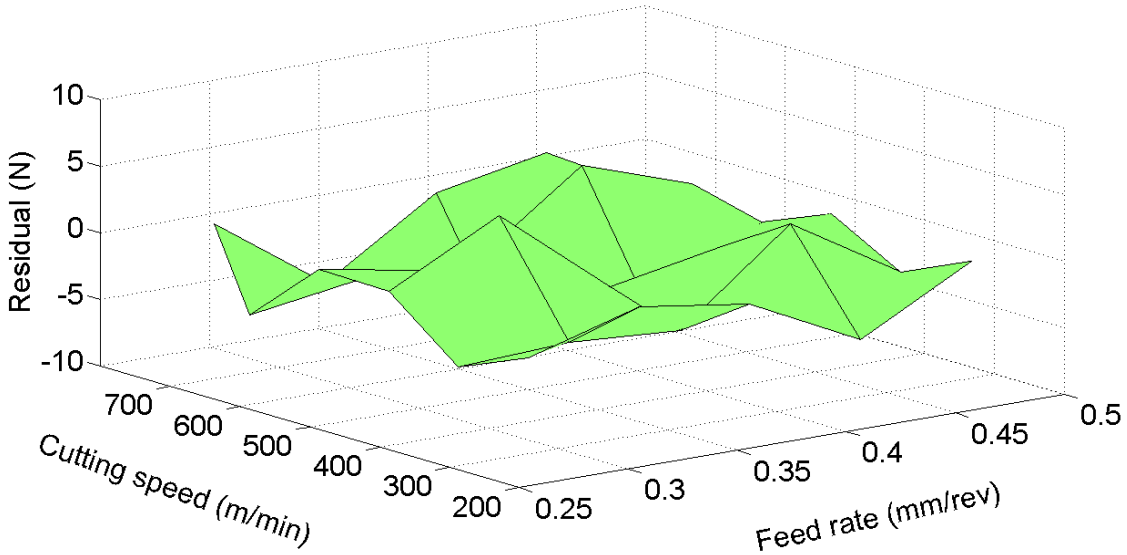



Fig. 14. Residual between measured and predicted normal force(OP2)

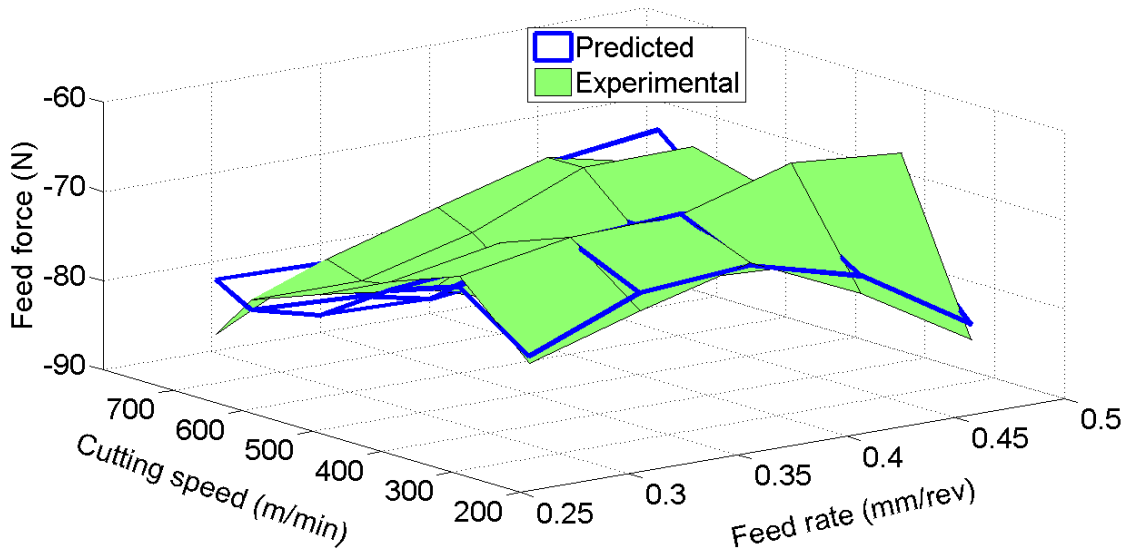



Fig. 15. Feed force for OP2 operation

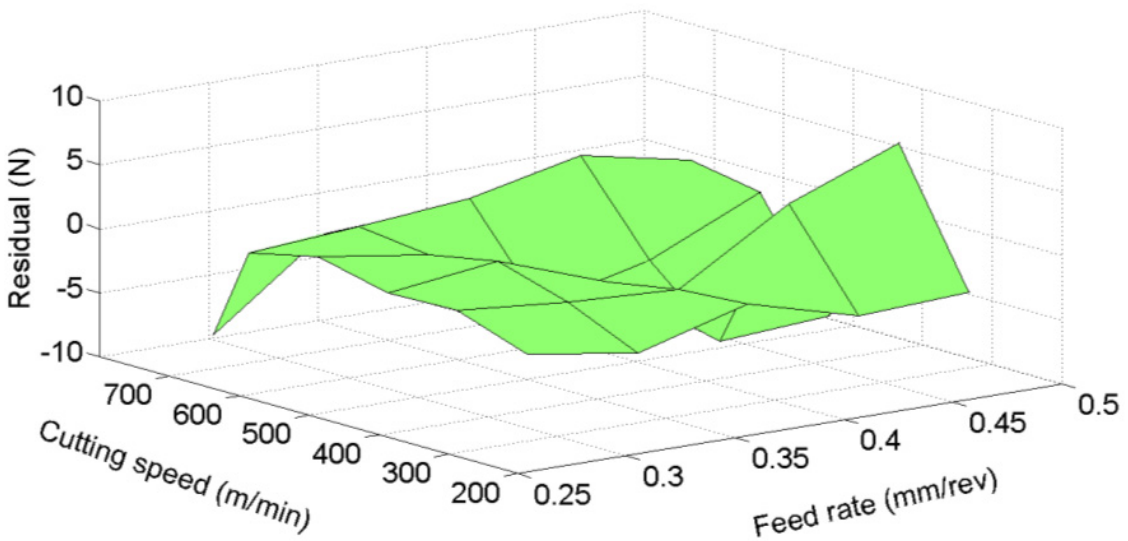



Fig. 16. Residual between measured and predicted feed force (OP2)

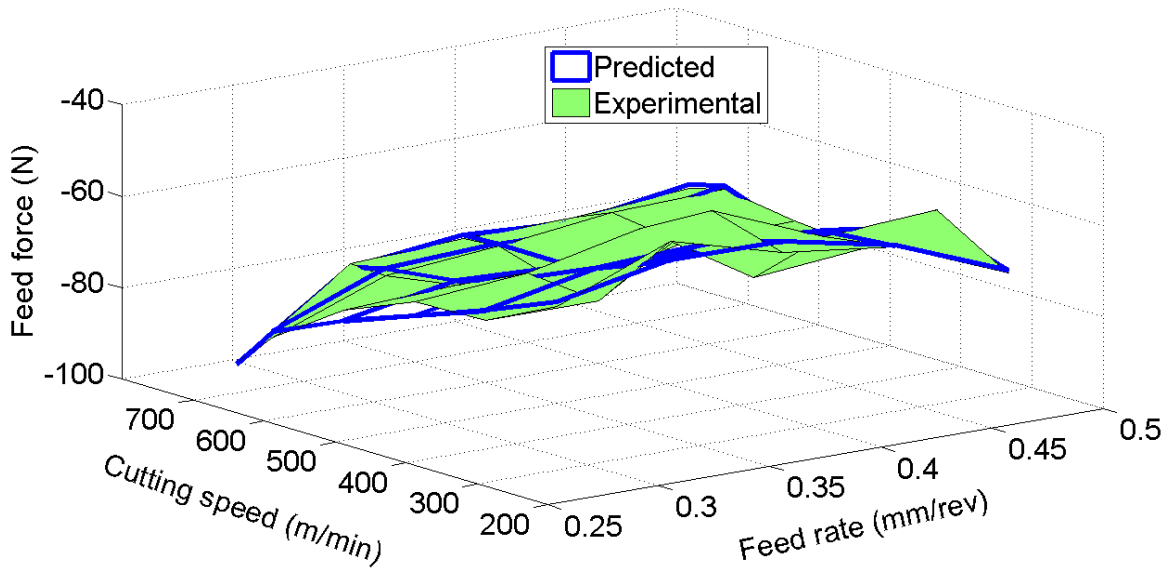



Fig. 17. Feed force for OP1 operation

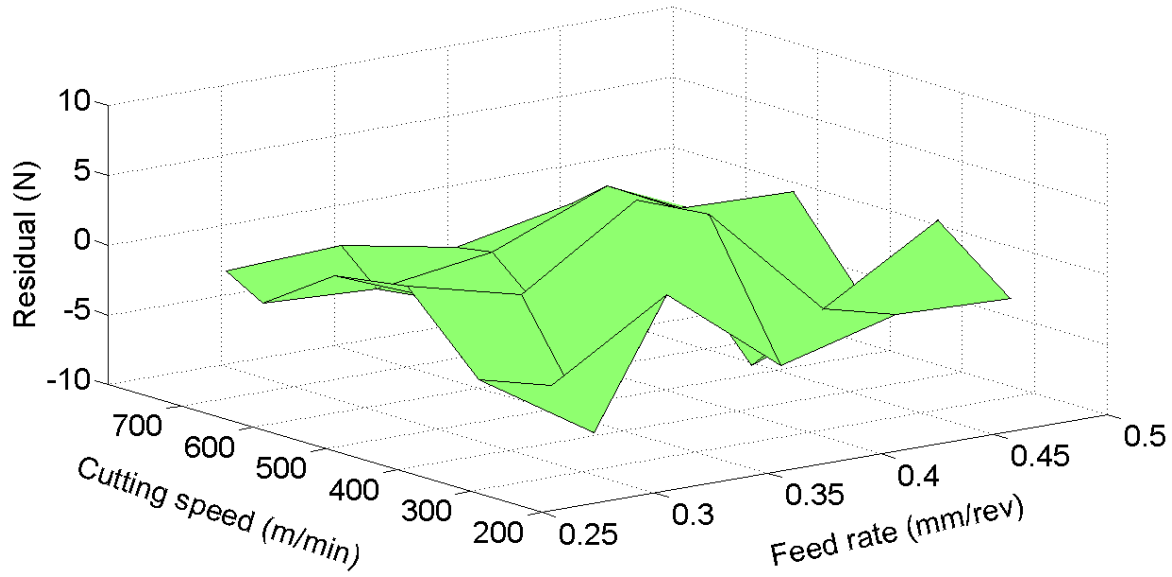



Fig. 18. Residual between measured and predicted feed force (OP1)

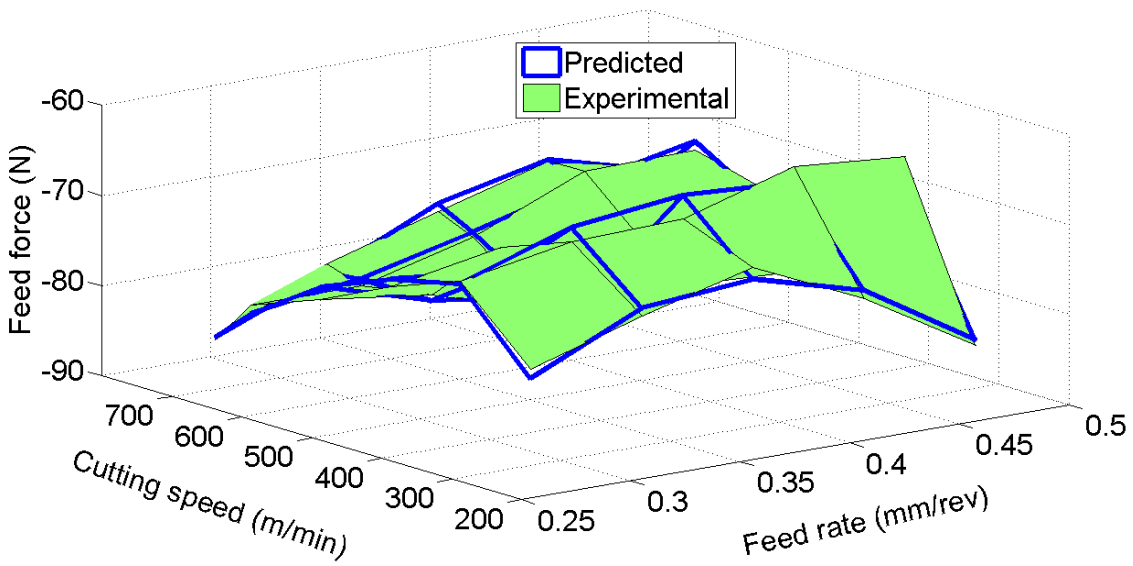



Fig. 19. Feed force for OP2 operation

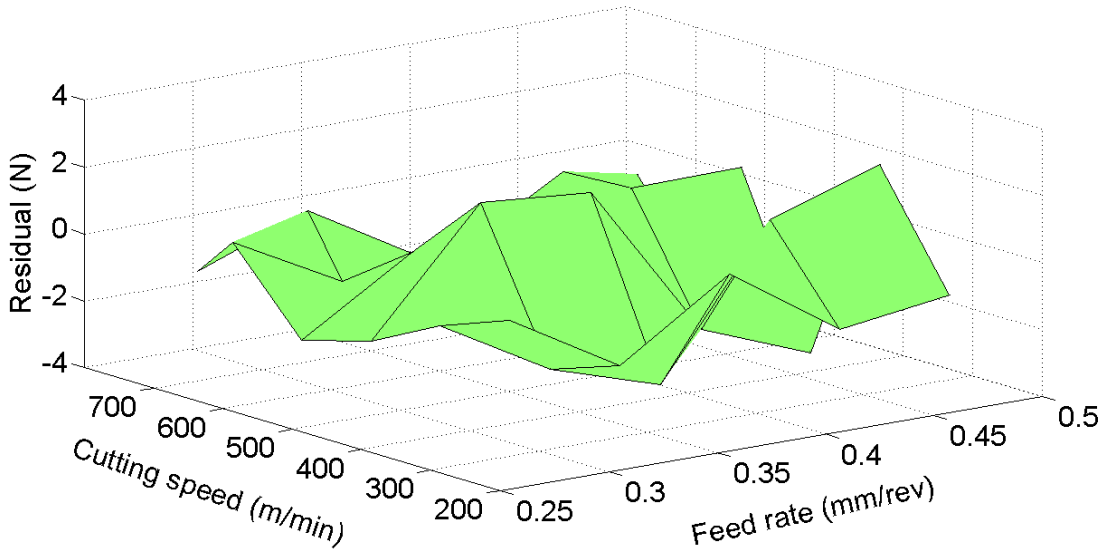



Fig. 20. Residual between measured and predicted feed force (OP2)

**Tables**

Table 1: Joint angles at the starting position of the robot

| Axis notation | Linear axis | Joint 1 | Joint 2 | Joint 3 | Joint 4 | Joint 5 | Joint 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| OP1 | -500 mm | -39.04° | -29.44° | 81.74° | 57.64° | -67.45° | -165.93° |
| OP2 | -3050 mm | 26.66° | -42.30° | 143.67° | 37.51° | -99.09° | -127.78° |

Table 2: Ply orientation lay-up of the trimmed CFRP laminate

| Ply# | Fibre angle | Ply# | Fibre angle |
|---|---|---|---|
| 1 | -45 | 13 | 45 |
| 2 | 90 | 14 | -45 |
| 3 | 45 | 45 | 0 |
| 4 | 0 | 16 | -45 |
| 5 | 45 | 17 | 45 |
| 6 | -45 | 18 | 90 |
| 7 | 90 | 19 | -45 |
| 8 | 45 | 20 | 45 |
| 9 | -45 | 21 | 0 |
| 10 | 0 | 22 | 45 |
| 11 | -45 | 23 | 90 |
| 12 | 45 | 24 | -45 |

Table: 3 Backward elimination test for the normal force (OP1)

| Significant variables | Coefficients | Standard error | F-value | Marginal Contribution | Percentage; Cont. % |
|---|---|---|---|---|---|
| Intercept | -641.857 | 125.939 | | | |
| $f$ | 4816.158 | 1108.084 | 18.891 | 248.358 | 22.5756 |
| $f^2$ | -13579.746 | 3178.294 | 18.255 | 240.003 | 21.8162 |
| $f^3$ | 11783.44 | 2977.087 | 15.666 | 205.960 | 18.7217 |
| $f^2 \times V_c$ | 0.826 | 0.261 | 10.031 | 131.875 | 11.9874 |
| $f^2 \times V_c^2$ | $-16.397 \times 10^{-4}$ | $4.785 \times 10^{-4}$ | 11.742 | 154.377 | 14.0328 |
| $f^3 \times V_c^3$ | $2.44 \times 10^{-6}$ | $8.1 \times 10^{-7}$ | 9.093 | 119.541 | 10.8663 |

Table 4: Backward elimination test for the feed force (OP1)

| Significant variables | Coefficients | Standard error | F-value | Marginal Contribution | Percentage; Cont. % |
|---|---|---|---|---|---|
| Intercept | -137.373 | 24.1357 | | | |
| $f$ | 628.748 | 144.7110 | 18.88 | 405.0779 | 18.0323 |
| $f \times V_c$ | -0.526 | 0.0848 | 38.49 | 825.9003 | 36.7655 |
| $f^2$ | -1018.318 | 218.1755 | 21.78 | 467.4590 | 20.8092 |
| $f^2 \times V_c$ | 1.100 | 0.2177 | 25.54 | 547.9654 | 24.3930 |

Table 5: Backward elimination test for the normal force (OP2)

| Significant variables | Coefficients | Standard error | F-value | Marginal Contri-bution | Percenta-ge; Cont. % |
|---|---|---|---|---|---|
| Intercept | -90.277 | 32.4406 | | | |
| $f$ | 919.473 | 138.1557 | 44.2935 | 432.4242 | 32.1571 |
| $V_c$ | 0.496 | 0.1228 | 16.3557 | 159.6759 | 11.8743 |
| $f \times V_c$ | -3.182 | 0.6314 | 25.4081 | 248.0515 | 18.4463 |
| $f^3$ | -594.113 | 169.9662 | 12.2184 | 119.2842 | 8.8705 |
| $V_c^3$ | $-2.188 \times 10^{-7}$ | $7.968 \times 10^{-8}$ | 7.5378 | 73.5888 | 5.4724 |
| $f^2 \times V_c^2$ | 0.0094 | 0.0021 | 19.6493 | 191.8301 | 14.2654 |
| $f^3 \times V_c^3$ | $-1.061 \times 10^{-5}$ | $3.0287 \times 10^{-6}$ | 12.2782 | 119.8681 | 8.9140 |

Table 6: Backward elimination test for the feed force (OP2)

| Significant variables | Coefficients | Standard error | F-value | Marginal Contri-bution | Percentage ; Cont. % |
|---|---|---|---|---|---|
| Intercept | -261,839 | 49.5181 | | | |
| $f$ | 804,108 | 205.2811 | 15.3437 | 232.4715 | 16.6759 |
| $V_c$ | 0,5136 | 0.1377 | 13.9241 | 210.9633 | 15.1330 |
| $f^2$ | -1184,499 | 287.8453 | 16.9337 | 256.5607 | 18.4039 |
| $f^2 \times V_c^2$ | 0,01196 | 0.0034 | 12.2361 | 185.3884 | 13.2985 |
| $f^3 \times V_c^3$ | $-1.281 \times 10^{-5}$ | $4.532 \times 10^{-6}$ | 7.9926 | 121.0954 | 8.6865 |
| $f \times V_c^2$ | -0,0081 | 0.0022 | 13.6096 | 206.1985 | 14.7912 |
| $f \times V_c^3$ | $4.646 \times 10^{-6}$ | $1.343 \times 10^{-6}$ | 11.9716 | 181.3812 | 13.0110 |

Table 7: ANOVA table for the normal force for operation OP1

| Effect | Sum of squares | D.F. | Mean squares | F-level |
|---|---|---|---|---|
| Regression ($SS$R) | 4263.796 | 6 | 710.633 | 54.053 |
| Residual ($SSE$) | 302.378 | 23 | 13.147 | |
| Total ($TSS$) | 4566,174 | 29 | | |

Table 8: ANOVA table for the feed force for operation OP1

| Effect | Sum of squares | D.F. | Mean squares | F-level |
|---|---|---|---|---|
| Regression ($SS$R) | 1837.233 | 4 | 459.308 | 21.405 |
| Residual ($SSE$) | 536.448 | 25 | 21.458 | |
| Total ($TSS$) | 2373.682 | 29 | | |

Table 9: ANOVA table for the normal force for operation OP2

| Effect | Sum of squares | D.F. | Mean squares | F-level |
|---|---|---|---|---|
| Regression ($SS$R) | 12228.421 | 7 | 1746.917 | 178,932 |
| Residual ($SSE$) | 214.779 | 22 | 9.763 | |
| Total ($TSS$) | 12443.201 | 29 | | |

Table 10: ANOVA table for the feed force for operation OP2

| Effect | Sum of squares | D.F. | Mean squares | F-level |
|---|---|---|---|---|
| Regression ($SS$R) | 453.908 | 7 | 64.844 | 4.28 |
| Residual ($SSE$) | 333.320 | 22 | 15.151 | |
| Total ($TSS$) | 787.229 | 29 | | |

Table 11: Backward test for the extended feed force model (OP1)

| Significant variables | Coefficients | Standard error | F-value | Marginal Contribution | Percentage; Cont. % |
|---|---|---|---|---|---|
| Intercept | -137.201 | 34,067 | | | |
| $f$ | 1485.538 | 379.822 | 15.297 | 281.328 | 18.226 |
| $f \times V_c$ | -9.154 | 3.1351 | 8.525 | 156.778 | 10.157 |
| $f \times C$ | 837.580 | 305.102 | 7.536 | 138.601 | 8.979 |
| $f^2$ | -1355.533 | 342.107 | 15.70 | 288.734 | 18.706 |
| $C^3$ | -1.180 | 0.420 | 7.899 | 145.273 | 9.412 |
| $f^2 \times C^2$ | -183.492 | 70.902 | 6.697 | 123.176 | 7.980 |
| $V_c \times f^2$ | 3.168 | 1.0276 | 9.506 | 174.834 | 11.327 |
| $C^2 \times f^3$ | 136.382 | 61.809 | 4.868 | 89.538 | 5.801 |
| $f \times V_c^3$ | $6.623 \times 10^{-6}$ | $2.356 \times 10^{-6}$ | 7.899 | 145.278 | 9.412 |

Table 12: ANOVA table for the extended feed force model (OP1)

| Effect | Sum of squares | D.F. | Mean squares | F-level |
|---|---|---|---|---|
| Regression ($SS$R) | 2005.863 | 9 | 222.874 | 12.118 |
| Residual ($SSE$) | 367.819 | 20 | 18.391 | |
| Total ($TSS$) | 2373.682 | 29 | | |

Table. 13. Backward test for the extended feed force model (OP2)

| Significant variables | Coefficients | Standard error | F-value | Marginal Contri-bution | Percentage ; Cont. % |
|---|---|---|---|---|---|
| Intercept | -189.911 | 22.639 | | | |
| $f \times V_c$ | 6.391 | 1.359 | 22.115 | 99.155 | 9.309 |
| $f \times C$ | -575.871 | 157.3239 | 13.399 | 60.073 | 5.640 |
| $f^2$ | -1683.448 | 349.6579 | 23.180 | 103.930 | 9.757 |
| $V_c^3$ | $1.677\times10^{-6}$ | $5.118\times 10^{-7}$ | 10.735 | 48.132 | 4.519 |
| $C^3$ | 2.216 | 0.789 | 7.887 | 35.362 | 3.320 |
| $f^2 \times C^2$ | -323.664 | 82.371 | 15.440 | 69.224 | 6.499 |
| $V_c \times f^2$ | 4.698 | 1.461 | 10.343 | 46.371 | 4.354 |
| $f^3 \times V_c^3$ | $-3.518\times 10^{-5}$ | $9.441\times 10^{-6}$ | 13.890 | 62.274 | 5.847 |
| $C^2 \times f^3$ | 440.743 | 140.422 | 9.851 | 44.169 | 4.147 |
| $C \times V_c^3$ | $-4.457\times10^{-7}$ | $1.305\times 10^{-7}$ | 11.654 | 52.251 | 4.906 |
| $f \times V_c^3$ | $-6.583\times 10^{-6}$ | $2.765\times 10^{-6}$ | 5.670 | 25.423 | 2.387 |
| $f^2 \times V_c^2 \times C^2$ | $9.335\times 10^{-4}$ | $13.156\times 10^{-5}$ | 50.354 | 225.763 | 21.196 |
| $f^3 \times V_c^3 \times C^3$ | $-1.750\times10^{-7}$ | $2.668\times10^{-8}$ | 43.046 | 192.994 | 18.119 |

Table 14: ANOVA table for the extended feed force model (OP2)

| Effect | Sum of squares | D.F. | Mean squares | F-level |
|---|---|---|---|---|
| Regression ($SS$R) | 715.493 | 13 | 55.038 | 12.277 |
| Residual ($SSE$) | 71.736 | 16 | 4.483 | |
| Total ($TSS$) | 787.229 | 29 | | |

## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES


Abele, E., M. Weigold et S. Rothenbucher. 2007. « Modeling and identification of an industrial robot for machining applications ». *CIRP Annals - Manufacturing Technology,* vol. 56, n° 1, p. 387-390.

ASME. 2009. *Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay)*. Standard, B46.1: ASME, 120 p. < http://www.asme.org/products/codes---standards/surface-texture-(surface-roughness--waviness--and- >.

Bérubé, Sébastien. 2012. « Usinage en détourage de laminés composites carbone/époxy ». Montréal, École de technologie supérieure, Université du Québec, 177 p.

Claudiu, Bisu, Cherif Mehdi, Gerard Alain et K'nevez Jean-Yves. 2012. « Dynamic behavior analysis for a six axis industrial machining robot ». *Advanced Materials Research,* vol. 423, p. 65-76.

Conkur, E. Sahin, et Rob Buckingham. 1997. « Clarifying the definition of redundancy as used in robotics ». *Robotica,* vol. 15, n° Pt 5, p. 583-586.

Davim, J. Paulo, et Pedro Reis. 2005. « Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments ». *Journal of Materials Processing Technology,* vol. 160, n° 2, p. 160-167.

Dumas, C., A. Boudelier, S. Caro, S. Garnier, M. Ritou et B. Furet. 2011a. « Development of a robotic cell for trimming of composite parts ». *Mecanique & Industries,* vol. 12, n° 6, p. 487-94.

Dumas, C., S. Caro, M. Cherif, S. Garnier et B. Furet. 2011b. « Joint Stiffness Identification of Industrial Serial Robots ». *Robotica*, p. 1-20.

Dumas, C., Stéphane Caro, Sébastien Garnier et Benoît Furet. 2011c. « Développement de méthodes robotisées pour le parachèvement de pièces métalliques et composites ». Nantes, Université de Nantes, Faculté des sciences et des techniques, 177 p. < http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00712458 >.

Dumas, Claire, Stephane Caro, Sebastien Garnier et Benoit Furet. 2011d. « Joint stiffness identification of six-revolute industrial serial robots ». In. (Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX5 1GB, United Kingdom), 4 Vol. 27, p. 881-888. Coll. « Robotics and Computer-Integrated Manufacturing »: Elsevier Ltd. < http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2011.02.003 >.

Dumas, Claire, Stéphane Caro, Sébastien Garnier et Benoît Furet. 2012. « Workpiece placement optimization of a machining robot ». *Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes*.

Hagino, Masahiro, et Takashi Inoue. 2013. « Effect of carbon fiber orientation and helix angle on CFRP cutting characteristics by end-milling ». *International Journal of Automation Technology,* vol. 7, n° 3, p. 292-299.

Hamedanianpour, Hossein, et Jean-Francois Chatelain. 2013. « Effect of tool wear on quality of carbon fiber reinforced polymer laminate during edge trimming ». In *2nd International Conference on Intelligent Materials, Applied Mechanics and Design Science, IMAMD 2013, April 13, 2013 - April 14, 2013*. (Guangzhou, China) Vol. 327, p. 34-39. Coll. « Applied Mechanics and Materials »: Trans Tech Publications Ltd. < http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.325-326.34 >.

Hintze, W., D. Hartmann et C. Schutte. 2011. « Occurrence and propagation of delamination during the machining of carbon fibre reinforced plastics (CFRPs) - an experimental study ». *Composites Science and Technology,* vol. 71, n° 15, p. 1719-26.

Iliescu, D., D. Gehin, I. Iordanoff, F. Girot et M. E. Gutierrez. 2010. « A discrete element method for the simulation of CFRP cutting ». *Composites Science and Technology,* vol. 70, n° 1, p. 73-80.

Iliescu, Daniel. 2008. « Approches experimentale et numerique de l'usinage a sec des composites carbone/epoxy ». Arts et Métiers ParisTech. < http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00005136 >.

Inoue, Takashi, et Masahiro Hagino. 2013. « Cutting characteristics of CFRP materials with carbon fiber distribution ». *International Journal of Automation Technology,* vol. 7, n° 3, p. 285-291.

Kaneeda, Toshiaki. 1991. « CFRP cutting mechanism (3rd report). Effects of tool edge roundness and relief angle on cutting phenomena ». *Seimitsu Kogaku Kaishi/Journal of the Japan Society for Precision Engineering,* vol. 57, n° 3, p. 491-496.

Karpat, Yiğit, Onur Bahtiyar et Burak Değer. 2012. « Mechanistic force modeling for milling of unidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates ». *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* vol. 56, n° 0, p. 79-93.

Koplev, A., Aa Lystrup et T. Vorm. 1983. « CUTTING PROCESS, CHIPS, AND CUTTING FORCES IN MACHINING CFRP ». *Composites,* vol. 14, n° 4, p. 371-376.

Olabi, Adel 2011. « Amélioration de la précision des robots industriels pour des applications d'usinage à grande vitesse ». Paris, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. < http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00649019 >.

Pecat, Oliver, Rudiger Rentsch et Ekkard Brinksmeier. 2012. « Influence of milling process parameters on the surface integrity of CFRP ». In *5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012, HPC 2012, June 4, 2012 - June 7, 2012*. (Zurich, Switzerland), 1 Vol. 1, p. 466-470. Coll. « Procedia CIRP »: Elsevier. < http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.083 >.

Pwu, H. Y., et H. Hocheng. 1998. « Chip formation model of cutting fiber-reinforced plastics perpendicular to fiber axis ». *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME,* vol. 120, n° 1, p. 192-196.

Ramulu, M. 1997. « Machining and surface integrity of fibre-reinforced plastic composites ». *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences,* vol. 22, n° pt 3, p. 449-472.

Santiuste, C., H. Miguelez et X. Soldani. 2011. « Out-of-plane failure mechanisms in LFRP composite cutting ». *Composite Structures,* vol. 93, n° 11, p. 2706-13.

Santiuste, C., A. Olmedo, X. Soldani et H. Miguelez. 2012. « Delamination prediction in orthogonal machining of carbon long fiber-reinforced polymer composites ». *Journal of Reinforced Plastics and Composites,* vol. 31, n° 13, p. 875-885.

Slamani, Mohamed, Sebastien Gauthier et Jean-François Chatelain. 2014a. « Analysis of trajectory deviation during high speed robotic trimming of carbon-fibre reinforced polymers ». *Journal of Robotics and Computer Integrated Manufacturing*.

Slamani, Mohamed, Sebastien Gauthier et Jean-François Chatelain. 2014b. « Statistical modeling and analysis of cutting force components during high speed robotic trimming of Carbon-fibre reinforced polymers ». *Journal of Measurement*.

Wang, D. H., M. Ramulu et D. Arola. 1995a. « Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: unidirectional laminate ». *International Journal of Machine Tools & Manufacture,* vol. 35, n° 12, p. 1623-1623.

Wang, D. H., M. Ramulu et D. Arola. 1995b. « Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part II: multi-directional laminate ». *International Journal of Machine Tools & Manufacture,* vol. 35, n° 12, p. 1639-1639.

Wang, D. H., C. W. Wern, M. Ramulu et E. Rogers. 1995. « Cutting edge wear of tungsten carbide tool in continuous and interrupted cutting of a polymer composite ». *Materials and Manufacturing Processes,* vol. 10, n° 3, p. 493-508.

Wang, X. M., et L. C. Zhang. 2003. « An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics ». *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* vol. 43, n° 10, p. 1015-1022.

Zaghbani, Imed, Jean-Francois Chatelain, Sebastien Berube, Victor Songmene et Justin Lance. 2012a. « Analysis and modelling of cutting forces during the trimming of unidirectional CFRP composite laminates ». *International Journal of Machining and Machinability of Materials,* vol. 12, n° 4, p. 337-357.

Zaghbani, Imed, Jean-Francois Chatelain, Victor Songmene, Sebastien Berube et Abdelatif Atarsia. 2012b. « A comprehensive analysis of cutting forces during routing of multilayer carbon fiber-reinforced polymer laminates ». *Journal of Composite Materials,* vol. 46, n° 16, p. 1955-1971.

Zhang, Hui, Jianjun Wang, George Zhang, Zhongxue Gau, Zengxi Pan, Hongliang Cui et Zhenqi Zhu. 2005. « Machining with flexible manipulator: Toward improving robotic machining performance ». In *Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM 2005, July 24, 2005 - July 28, 2005*. (Monterey, CA, United states) Vol. 2, p. 1127-1132. Coll. « IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM »: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.