



UNIVERSITÉ FRANÇOIS RABELAIS DE TOURS

École Doctorale EMSTU

LABORATOIRE DE MECANIQUE ET RHEOLOGIE

THÈSE présenté par :

Hicham CHIBANE

soutenue le : 05 avril 2013

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'Université François - Rabelais de Tours**

Discipline/ Spécialité : Mécanique

Contribution à l'optimisation multi-objectif des paramètres de coupe en usinage et apport de l'analyse vibratoire
Application aux matériaux métalliques et composites.

THÈSE DIRIGÉE PAR :

LEROY René Maître de Conférences, HDR, Université François - Rabelais de Tours
ET CO-DIRIGÉE PAR :

SERRA Roger Maître de conférences, ENI du Val de Loire

RAPPORTEURS :

PARIS Henri Professeur, Université Joseph Fourier Grenoble
DESSEIN Gilles Professeur, ENI de Tarbes

JURY :

BELAIDI Idir	Maître de Conférences, HDR, Université M'hamed Bougara de Boumerdès
DESSEIN Gilles	Professeur, ENI de Tarbes
LEROY René	Maître de conférences, HDR, Université François - Rabelais de Tours
PARIS Henri	Professeur, Université Joseph Fourier Grenoble
RICHARD Caroline	Professeur, Université François - Rabelais de Tours
SERRA Roger	Maître de conférences, ENI du Val de Loire

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein du Laboratoire de Mécanique et Rhéologie (LMR) de l'université François Rabelais de Tours et de l'École d'Ingénieurs de Val de Loire (ENIVL) à Blois et en collaboration avec le Centre d'Etude et de Recherche sur les Outils Coupants (CEROC) à Fondettes. Je tiens à exprimer toute ma gratitude à monsieur René LEROY, mon directeur de thèse, pour sa disponibilité, ses nombreux encouragements, sa patience durant ma présence au LMR et au CEROC et pour toute la confiance qu'il m'a accordée durant la thèse. Ces compétences et ces conseils m'ont été d'une aide précieuse pour achever ce travail. Je le remercie pour sa grande disponibilité et ces conseils pertinents qui ont contribué à ma formation scientifique. Je tiens ensuite à exprimer ma reconnaissance à monsieur Roger SERRA, Maître de Conférences à l'ENIVL, pour son encadrement au sein du laboratoire LMR. Il m'a témoigné sa passion de recherche et m'a encouragé à avancer durant toute ma thèse. Sur le plan expérimental, un grand merci est adressé à monsieur Antoine MORANDEAU pour tous les essais que nous avons réalisés ensemble et que j'ai pu exploiter pour réussir ma thèse.

Mes plus vifs remerciements sont également adressés à messieurs Henri PARIS Professeur de l'Université Joseph Fourier de Grenoble, et Gilles DESSEIN, Professeur de ENI de Tarbes, pour leur lecture et leur lourde tâche de rapporteurs. Je remercie aussi monsieur BELAIDI Idir, Maître de Conférences, HDR, Université M'hamed Bougara de Boumerdès pour sa lecture attentive et d'avoir fait l'honneur de se déplacer à mon jury en tant d'examinateur. J'adresse mes remerciements les plus respectueux à madame Caroline RICHARD, qui ma fait l'honneur de présider mon jury de thèse. Je remercie aussi tous mes collègues du LMR, CEROC, ENIVL et précisément le professeur Nourredine AIT HOCINE, Abdelkibir BENELFELLAH, Ajit BHUDDI, et Guillaume GAUTIER pour tout moment que nous avons traversés ensemble pendant ces années de thèse. À ces remerciements, je souhaite adresser mes reconnaissances à mes amis de Blois, mon cousin Slimane CHIBANE, Hakim ALILI et leurs familles. Ces remerciements ne seraient pas complets sans une pensée pour mes amis de longue date, Tahar KADI, Belaid SACI, Yacine RAZOUALI, Halim DJLIDI, Salim DELLYS, Foudhil CHIBANE, Rachid ZAHAR, Fahmi CHEMMOU, Said ZIRMI, et beaucoup d'autres. Merci de m'avoir aidé et encouragé quand j'en avais besoin.

Mes grandes pensées sont à toute la famille, mon épouse Samira pour son précieux soutien moral et pour sa patience durant ses années de thèse et pour ses encouragements, mes enfants Asma et Ilyes, mes frères Abdelouahab, Aissam, Azdine, Abdelhak et mes soeurs Lila, Sonia et Hassina et à mon oncle dhada El Hocine. C'est grâce à leurs encouragements que j'ai pu franchir les obstacles les plus difficiles. Ils me donnent toujours un appui sûr par leur soutien et leur encouragement.

Je dédie ce travail pour mes parents Ramdane et Rachida, mon épouse Samira pour leur amour et soutien durant toutes ces années et à la mémoire de mes grands-parents.

REMERCIEMENTS

Résumé

Les procédés de fabrication de pièces mécaniques par enlèvement de matière (tournage, fraisage, perçage, ...) connaissent une utilisation massive dans l'industrie aéronautique et l'automobile. Les pièces obtenues par ces procédés doivent satisfaire à des propriétés géométriques, métallurgiques et à des caractéristiques de qualité. Pour répondre à ces exigences, plusieurs essais expérimentaux basés sur le choix des conditions de coupe sont souvent nécessaires avant d'aboutir à une pièce satisfaisante. Actuellement, ces méthodes empiriques basées sur l'expérience des fabricants et des utilisateurs des outils coupants sont souvent très longues et coûteuses, donnent une large plage de choix des paramètres en fonction de leurs besoins. Toutefois, le coût très élevé d'un essai limite fondamentalement le nombre d'expériences, avoir une pièce respectant les caractéristiques souhaitées avec un coût acceptable devient une tâche difficile. L'importance d'encadrer les conditions de coupe par certaines limites est liée au type de matériau à usiner, puisqu'il détermine le comportement de la coupe. Il est donc d'un grand intérêt de connaître l'interaction entre l'outil et la matière. Cela permettrait d'identifier les conditions acceptables de coupe pour une matière déterminée. Un problème fondamental dans l'usinage d'un matériau composite est la méconnaissance de la plage des conditions de coupe optimales. Ce problème est dû d'une part, à l'hétérogénéité du matériau, et d'autre part à la présence de défauts liés à la structure de ce matériau comme le délaminage, l'écaillage et la présence de fibres non coupées. L'objectif de la thèse est de fournir des outils permettant de choisir les conditions de coupe de façon intelligente à partir d'un nombre suffisant d'expériences tout en prenant en compte des intérêts parfois contradictoires comme l'état de surface des pièces usinées, l'usure de l'outil de coupe et la productivité. Pour atteindre cet objectif, une combinaison de plusieurs méthodes : statistiques, analytiques, et expérimentales a été mise en oeuvre. Une première application de ces méthodes sur un matériau en acier 100Cr6 a été entreprise. Des modèles empiriques ont été établis à partir de la régression linéaire et des plans d'expériences réalisés, les optimisations mono-objectif et multi-objectif ont été utilisées pour le choix de conditions de coupe. Deux applications sur un matériau composite carbone/époxy T800S/M21 sont illustrées : la première avec un outil de coupe de type PCD et la deuxième avec une plaquette de coupe Penta amovible à 3 revêtements différents (DLCép1, NanoC, MicroC). Dans cette partie, des modèles empiriques et des optimisations multi-objectifs ont été établis par la méthode de surface de réponse. Les niveaux de vibration de la plaque composite et les défauts enregistrés au cours d'usinage ont été analysés pour déterminer les conditions de coupe optimales.

Mots clés : Usinage, conditions de coupe, optimisation multi-objectif, surface de réponse, plan d'expérience, matériau composite, acier100Cr6, vibration, délaminage.

RÉSUMÉ

Abstract

Manufacturing processes of mechanical parts by removal of material (turning, milling, drilling ...) have extensive use in aeronautic and automobile industry. The components obtained using these methods must satisfy geometric properties, metallurgical and quality characteristics. To meet these requirements, several experimental tests based on the selection of cutting conditions are often necessary before manufacturing. Currently, these empirical methods based on the experience of manufacturers and users of cutting tools (charts, diagrams with experimental findings, ...) are often very lengthy and costly. However, the high cost of a trial limits the number of experiments, so to have a deserted component with an acceptable cost is a difficult task. The importance of cutting conditions monitored by limitations is related to the type of material to be machined, since it determines the behavior of the machining. It is therefore of great interest to know the interaction between the tool and the material. This would identify the acceptable cutting conditions in a particular material. A fundamental problem in the machining of composite material is the ignorance of the range of optimum cutting conditions. This problem is partly due to the heterogeneity of the material, and due to the presence of defects in the structure of this material such as delamination, chipping and the presence of uncut fiber. The objective of this thesis is to provide certain criteria for selecting cutting conditions intelligently from a sufficient number of experiments taking into account deferent objectives such as the surface of the work-pieces, the wear of the cutting tool and productivity. To achieve this goal, a combination of several methods : statistical, analytical, and experimental has been implemented. The first application of these methods on steel 100Cr6 is illustrated. Empirical models were derived from linear regression and design of experiments. Single and multi objective optimization coupled with the method of weighted sum were used for the selection of cutting conditions. Two applications of a composite carbon / epoxy T800S/M21 are shown : one with a Poly-Crystalline Diamond cutting tool type and the second with a cutting removable Penta with three different coating (DL-Cép1, NanoC, MicroC). In this section, empirical models and multi-objective optimization have been developed by the method of response surfaces. Vibration levels of the composite plate and defects recorded during machining were used to determine the optimum cutting conditions.

Keywords : Machining, cutting conditions, multi-objective optimization, response surface methodology, design of experiment, composite material, steel 100Cr6, vibration, delamination.

ABSTRACT

Table des matières

Introduction générale	21
1 Généralités sur l'usinage	25
1.1 Introduction	26
1.2 Tournage	26
1.2.1 Les paramètres de coupe en tournage	27
1.2.2 Les outils de coupe en tournage	28
1.2.3 Efforts et puissance de coupe	30
1.3 Fraisage	31
1.3.1 Généralités	31
1.3.2 Paramètres de coupe	32
1.3.3 Influence du sens de rotation	33
1.4 Intégrité de surface	35
1.4.1 Efforts de coupe	35
1.4.2 État de surface	37
1.5 Cas particulier de l'usinage des matériaux composites	42
1.5.1 Usinage des composites	43
1.5.2 Défauts d'usinage des matériaux composites	44
1.6 Vibration en usinage	45
2 Méthodes de modélisation et d'optimisation	49
2.1 Introduction	51
2.2 Rappel historique	53
2.3 Démarche méthodologique d'un plan d'expérience	53
2.4 Régression linéaire multiple	54
2.4.1 Modélisation	55
2.4.2 Les hypothèses de la régression multiple	56
2.4.3 Différents types de modèles de régression	56
2.5 Technique de criblage	57

TABLE DES MATIÈRES

2.5.1	Plan factoriel complet	58
2.5.2	Variables codifiées	58
2.5.3	Matrice d'expériences	58
2.5.4	Construction de la matrice du modèle	59
2.5.5	Calcul des effets des facteurs et leurs interactions	59
2.6	Analyse des résultats	60
2.6.1	Analyse de la variance	60
2.6.2	Test de Fisher-Snedecor	62
2.6.3	Probabilité	63
2.7	La Méthodologie de Surface de Réponse (MSR)	64
2.7.1	Plans Composite Centraux	64
2.7.2	Construction de la méthodologie de surface de réponse	65
2.7.3	Validation du modèle	66
2.8	Application des plans d'expérience pour l'étude des procédés de coupe	69
2.9	Optimisation	71
2.9.1	Introduction	71
2.9.2	Optimisation multi-objectif	71
2.9.3	Surface de réponse	73
2.9.4	Algorithmes génétiques	74
2.10	Optimisation du processus d'usinage	76
3	Application sur un acier 100Cr6	79
3.1	Introduction	80
3.1.1	Environnement expérimental	82
3.1.2	Réponses du système (facteurs de sortie)	84
3.2	Résultats expérimentaux	86
3.3	Modèles de régression linéaire	88
3.4	Modèles avec les facteurs influents et interactions (stepwise)	89
3.4.1	Modèle de rugosité de surface Ra	89
3.4.2	Modèle du temps d'usinage Tu	91
3.4.3	Modèle de la puissance de coupe Pu	92
3.4.4	Modèle d'effort de coupe Fz	95
3.4.5	Modèle de vibration Az	97
3.5	Réduction du nombre d'expériences	99
3.6	Optimisation des paramètres de coupe	102
3.7	Optimisation mono-objectif	102
3.8	Optimisation multi-objectif	103
3.9	Optimisation multi-objectif combinée avec la somme pondérée	107

TABLE DES MATIÈRES

3.10 Conclusion	108
4 Application sur le matériau composite : carbon/époxy T800S/M21	111
4.1 Application sur le matériau composite : carbon/époxy T800S/M21 avec un insert PCD	112
4.1.1 Partie expérimentale	112
4.1.2 Résultats et discussion	116
4.1.3 Analyse des défauts d'usinage des composites	118
4.2 Essais de validation	120
4.2.1 Intégration de la productivité dans le choix de paramètres	120
4.2.2 Conclusion	122
4.3 Application sur le matériau composite : carbon/époxy T800S/M21 avec plaquette carbure de type Penta	123
4.3.1 Partie expérimentale	123
4.3.2 Application sur une plaquette de revêtement DLC et d'angle d'attaque $K_r=60^\circ$	132
4.3.3 Optimisation par surface de réponse	144
4.3.4 Comparaison des deux géométries 19 et 60°	146
4.3.5 Influence du revêtement	149
4.3.6 Conclusion	149
Conclusion générale	151
5 Annexes	155
5.1 Plans d'expérience	155
5.2 Outils de coupe	157
5.3 Application sur une plaquette de revêtement DLC et d'angle d'attaque $K_r=19^\circ$	159
Bibliographie	165
Travaux de recherche et publications	173

TABLE DES MATIÈRES

Liste des tableaux

3.1	Résultats expérimentaux	87
3.2	Modèles de régression	88
3.3	Analyse de la variance du modèle Ra	90
3.4	Analyse de la variance du modèle Tu	92
3.5	Analyse de la variance du modèle Pu	94
3.6	Analyse de la variance du modèle Fz	96
3.7	Analyse de la variance du modèle Az	98
3.8	Modèles de régression du plan factoriel complet à trois niveaux 3^3 (27 essais)	100
3.9	Modèles de régression du plan faces centrées (15 essais)	100
3.10	Modèles de régression du plan de Box et Behnken (13 essais)	100
3.11	Modèles de régression du plan de Taguchi (9 essais)	101
3.12	Modèles de régression du plan complet à deux niveaux 2^3 (8 essais)	101
3.13	Optimisation mono-objectif	102
3.14	Optimisation multi-objectif	103
3.15	Exemple d'optimisation multi-objectif avec pondérations Ra et Q	108
4.1	Paramètres d'usinage	113
4.2	Table de mesures et observations	115
4.3	Analyse de la Variance	116
4.4	Paramètres du model	117
4.5	Testes de validation	120
4.6	Liste détaillée des équipements de mesures utilisés (f_a =fréquence d'acquisition)	124
4.7	Paramètres de coupe et variables codées	125
4.8	Paramètres d'outils de coupe	127
4.9	Valeurs de la longueur de délaminage L_d en fonction des conditions de coupe	131
4.10	Table des essais	132
4.11	Analyse de la variance du modèles $Arms$	135
4.12	Effet des facteurs du modèle $Arms$	135

LISTE DES TABLEAUX

4.13	Analyse de la variance du modèle L_d	136
4.14	Effet des facteurs du modèle L_d	136
4.15	Analyse de la variance du modèle T	139
4.16	Effet des facteurs du modèle T	140
4.17	Analyse de la variance du modèle d'efforts de coupe F	141
4.18	Effet des facteurs du modèle d'efforts de coupe F	142
4.19	Analyse de la variance du modèle Vb	143
4.20	Effet des facteurs du modèle Vb	143
5.1	Dimensions de la plaquette PDKT 09 05 DE ER611	158
5.2	Table des essais	160
5.3	Analyse de la variance du modèle $Arms$	160
5.4	Effet des facteurs du modèle $Arms$	160
5.5	Analyse de la variance du modèle T	161
5.6	Effet des facteurs du modèle T	161
5.7	Analyse de la variance du modèle Vb	162
5.8	Effet des facteurs du modèle Vb	162
5.9	Analyse de la variance du modèle F	163
5.10	Effet des facteurs du modèle F	163

Table des figures

1	Procédures de choix de conditions de coupe utilisées	22
2	Diagramme Ishikawa [Vasques (2008)]	23
1.1	Coupe en tournage	27
1.2	Outil de tournage	28
1.3	Rayon de bec	29
1.4	Angle de coupe	30
1.5	Directions d'efforts de coupe en tournage et fraisage	31
1.6	Paramètres de coupe en fraisage	32
1.7	Épaisseur de coupe max	33
1.8	Sens de rotation	34
1.9	Les différents niveaux d'étude de la coupe [Cherif (2003)]	36
1.10	Décomposition d'une surface mesurée [Limido (2008)]	37
1.11	Rugosité moyenne arithmétique Ra	38
1.12	Rugosité théorique	39
1.13	Phénomènes d'usure (usinage des métaux ferreux) [Carrilero (2003)]	40
1.14	Schéma de la caractérisation de l'usure d'un outil [Norme NFE 66 505]	41
1.15	Manifestation de l'usure [Paquet (2000)]	42
1.16	Evolution de la proportion de composites dans les avions commerciaux (document Airbus).	43
1.17	Stratifié composite [Mbeilissouck (2008)]	44
1.18	Défaut de délaminage	45
1.19	Lobes de stabilité [Serra (2009)]	46
1.20	Procédé de tournage	47
2.1	Représentation de la loi de Fisher-Snedecor [Goupy (2005)]	63
2.2	Exemple de courbe de résidu	68
2.3	Méthodes d'optimisation	72
2.4	Identification des solutions optimales au sens de Pareto optimal	73
2.5	Schéma d'algorithme génétique d'optimisation	75

TABLE DES FIGURES

3.1	Plan d'expérience	81
3.2	Paramètres entrée/sorties	81
3.3	Démarche suivie	82
3.4	Machine utilisée (Tour SOMAB 500)	83
3.5	Plaquette utilisée (CNMG M5)	83
3.6	Décomposition de l'effort de coupe (coupe orthogonale) [Altintas (2000)] . .	84
3.7	Schéma des sources vibratoires en usinage par tournage [Segreti (2002)] . .	85
3.8	Rugosité de surface Ra : comparaison expérimentale / modèle	89
3.9	Coefficients normalisés	90
3.10	Analyse des résidus	90
3.11	Temps d'usinage Tu comparaison expérimentale / modèle	91
3.12	Coefficients normalisés	93
3.13	Analyse des résidus	93
3.14	Puissance de coupe Pu comparaison expérimentale / modèle	93
3.15	Coefficients normalisés	95
3.16	Analyse des résidus	95
3.17	Effort de coupe Fz comparaison expérimentale / modèle	95
3.18	Coefficients normalisés	97
3.19	Analyse des résidus	97
3.20	Vibration Az comparaison expérimentale / modèle	98
3.21	Coefficients normalisés	99
3.22	Analyse des résidus	99
3.23	Front Pareto des fonctions Ra , Tu et Q	104
3.24	Front Pareto des fonctions Pu , Tu , Fz et Ra	105
3.25	Front Pareto des fonctions Ra , Tu et Q	106
3.26	Front Pareto 3D des fonctions Ra , Pu , Tu , Fz et Q	107
4.1	Outil de coupe	112
4.2	Mesure de vibrations	112
4.3	Plan d'expérience	113
4.4	Procédure expérimentale	114
4.5	Comparaison des niveaux de vibration entre essai avec et sans défauts . . .	115
4.6	Surface de réponse et graphe du contour $Arms$	117
4.7	Sélection des conditions de coupe	118
4.8	Observation of machining defects : (a) test 2, (b) test 19, (c) test 8, (d) test 15.	119
4.9	Corrélation entre la vibration $Arms$ et les défauts constatés	119
4.10	Essais de validation : (a) essai 1, (b) essai 2, (c) essai 3 and (d) essai 4. . .	121

TABLE DES FIGURES

4.11	Sélection de paramètres de coupe pour $Q > 50 \text{ cm}^3/\text{min}$	121
4.12	Sélection de paramètres de coupe pour $Q > 90 \text{ cm}^3/\text{min}$	122
4.13	Dispositif expérimental	123
4.14	Plan d'expérience composite centré utilisé	125
4.15	Outils de coupe utilisés	126
4.16	Directions de coupe	127
4.17	Vue de coté et de dessus de la fraise pour un angle de rotation de la fraise de 300°	128
4.18	Comparaison entre les rugosités de surface $Kr = 19^\circ$ et $Kr = 60^\circ$	129
4.19	Mesure de température de la pièce (T°)	129
4.20	Mesure du rayon d'arête suivant la méthode de [Sheikh-Ahmad (2009)]	130
4.21	Observation du délaminage en fonction des conditions de coupe	131
4.22	Vues de face et profil de la pièce usinée $Kr = 19^\circ$ et $Kr = 60^\circ$ ($Vc = 450 \text{ m/min}$ et $h = 0,2 \text{ mm}$)	133
4.23	Seuils de vibration en fonction des conditions de coupe	134
4.24	Comparaison entre les signaux de vibration enregistrés sans délaminage (essai 2) et avec délaminage (essai 9)	134
4.25	Analyse des résidus des modèles $Arms$ et L_d	137
4.26	Graphes des effets des modèles $Arms$ et L_d	137
4.27	Courbes iso-valeurs des modèles $Arms$ et L_d	138
4.28	Surfaces de réponse des modèles $Arms$ et L_d	138
4.29	(a) Surface de réponse T (b) Courbes iso-valeurs T	140
4.30	(a) Surface de réponse F (b) Courbes iso-valeurs F	142
4.31	(a) Surface de réponse T (b) Courbes iso-valeurs T	144
4.32	Optimisation par surface de réponse	145
4.33	Optimisation par surface de réponse	146
4.34	Observation des délaminages en entrée matière pour la condition centrale $Vc=450 \text{ m/min}$ pour les géométries $Kr=19^\circ$ et $Kr=60^\circ$	147
4.35	Vues en coupe de la section copeau d'un outil $Kr = 19^\circ$ et $Kr = 60^\circ$ [Morandeau (2012)]	148
4.36	Composante F_{cz} de l'effort résultant de coupe pour la géométrie $Kr=19^\circ$ (a) et $Kr=60^\circ$ (b)	148
5.1	Plan factoriel complet 3^3 27 essais	155
5.2	Plan faces centrées 15 essais	155
5.3	Plan de Box et Behnken 13 essais	156
5.4	Plan de Taguchi 2^3 9 essais	156
5.5	Plan factoriel 2^3 8 essais	156
5.6	Outils de coupe $DCLN2525M12$	157

TABLE DES FIGURES

5.7	Plan de la plaquette CNMG 120408-M5 [Safety (2011)]	157
5.8	Outils de coupe 19 et 60° [Safety (2011)]	158
5.9	Plan de la plaquette PDKT 09 05 DE ER611 [Safety (2011)]	158
5.10	Outils de coupe Flash-SAF [Safety (2011)]	159
5.11	Plan de la plaquette PCD [Safety (2011)]	159
5.12	(a) Surface de réponse $Arms$ (b) Courbes iso-valeurs $Arms$	161
5.13	(a) Surface de réponse T (b) Courbes iso-valeurs T	162
5.14	(a) Surface de réponse Vb (b) Courbes iso-valeurs Vb	163
5.15	(a) Surface de réponse F (b) Courbes iso-valeurs F	164

NOTATIONS

Variable	Nom	Unité
Vc	Vitesse de coupe	$m \min^{-1}$
N	Vitesse de rotation	$tr \min^{-1}$
d	Diamètre de la pièce	mm
f	Avance	mm
Vf	Vitesse d'avance	$mm \min^{-1}$
ap	Profondeur de passe	mm
Kr	Angle d'attaque	deg
λ	Angle d'inclinaison d'arête	deg
r_ε	Rayon du bec de l'outil	mm
ε_r	Angle de pointe de l'outil	deg
γ	Angle de coupe	deg
α	Angle de dépouille	deg
Pu	Puissance de coupe	kW
Kc	Effort spécifique de coupe	$N \ mm^{-2}$
Fc	Effort de coupe tangentiel	N
Ff	Effort d'avance	N
Fa	Effort de radial ou de pénétration	N
Q	Débit de copeaux	$cm^3 \ min^{-1}$
a_p	Engagement axial	mm
a_e	Engagement radial	mm
h	Épaisseur maximale du copeau	mm
f_z	Avance par dent	$mm \ dent^{-1}$
$Ra.$	Rugosité arithmétique du profil	um
Rp	Rugosité pic maximal observé	um
Rt	Rugosité totale	um
Rq	Rugosité écart moyen quadratique	um
Tu	Temps d'usinage	s
A	Accélération	$m \ s^{-2}$
Er	Rayon d'arête	um
VB	Usure en dépouille	um
Lc	Longueur d'usinage	mm
h	Épaisseur copeaux	mm
Ld	Longueur de delaminage	mm

NOTATIONS

Introduction générale

Les procédés de fabrication de pièces mécaniques par enlèvement de matière (tournage, fraisage, perçage, ...) connaissent une utilisation massive dans l'industrie. Ils sont fréquemment utilisés dans de nombreux secteurs d'activité comme l'aéronautique et l'automobile. Les pièces obtenues par ces procédés doivent satisfaire à des propriétés géométriques, métallurgiques et à des caractéristiques de qualité. Pour répondre à ces exigences, plusieurs essais expérimentaux basés sur le choix des conditions de coupe sont souvent nécessaires avant d'aboutir à une pièce satisfaisante. Actuellement, l'utilisation de ces méthodes empiriques basées sur l'expérience des fabricants et des utilisateurs des outils coupants (abaques, diagrammes par constat expérimental, ...) est coûteuse et donne une large plage de choix des paramètres en fonction de leurs besoins. Toutefois, le coût très élevé d'un essai limite fondamentalement le nombre d'expériences, tel que pour avoir une pièce respectant les caractéristiques souhaitées et avec un coût acceptable devient une tâche difficile. L'importance d'encadrer les conditions de coupe par certaines limites est liée au type de matériau à usiner, puisqu'il détermine le comportement de la coupe. Il est donc d'un grand intérêt de connaître l'interaction entre l'outil et la matière pour établir une base de données. Cela permettra d'identifier les conditions acceptables de coupe dans une matière déterminée. Un problème fondamental dans l'usinage d'un matériau composite est la méconnaissance de la plage des conditions de coupe optimales. Ce problème est dû en particulier d'une part, à l'hétérogénéité du matériau, et d'autre part à la présence de défauts liés à la structure de ce matériau comme le délaminage, l'écaillage et la présence de fibres non coupées. L'objectif de la thèse est de fournir des outils permettant de choisir les conditions de coupe de façon intelligente à partir d'un nombre suffisant d'expériences tout en prenant en compte des intérêts parfois contradictoires, comme l'état de surface des pièces usinées, l'usure de l'outil de coupe et la productivité. Pour atteindre cet objectif, une combinaison de plusieurs méthodes : statistiques, analytiques, et expérimentales a été mise en oeuvre (figure 1).

Pour optimiser l'organisation des expériences et exploiter efficacement les résultats obtenus, on peut avoir intérêt à utiliser des méthodes tels que les plans d'expérience. Le principe général des plans d'expérience consiste à n'étudier que certains points du domaine expérimental, tout en appréhendant le phénomène physique étudié sur l'ensemble du domaine considéré. Un plan d'expérience peut être défini comme une organisation raisonnée d'essais. Une difficulté importante de la méthodologie réside alors dans la manière de choisir les points d'études de façon optimale. L'utilisation de cette méthode aide à l'amélioration de la qualité des produits et des procédés tout en réduisant les temps et les coûts de développement.

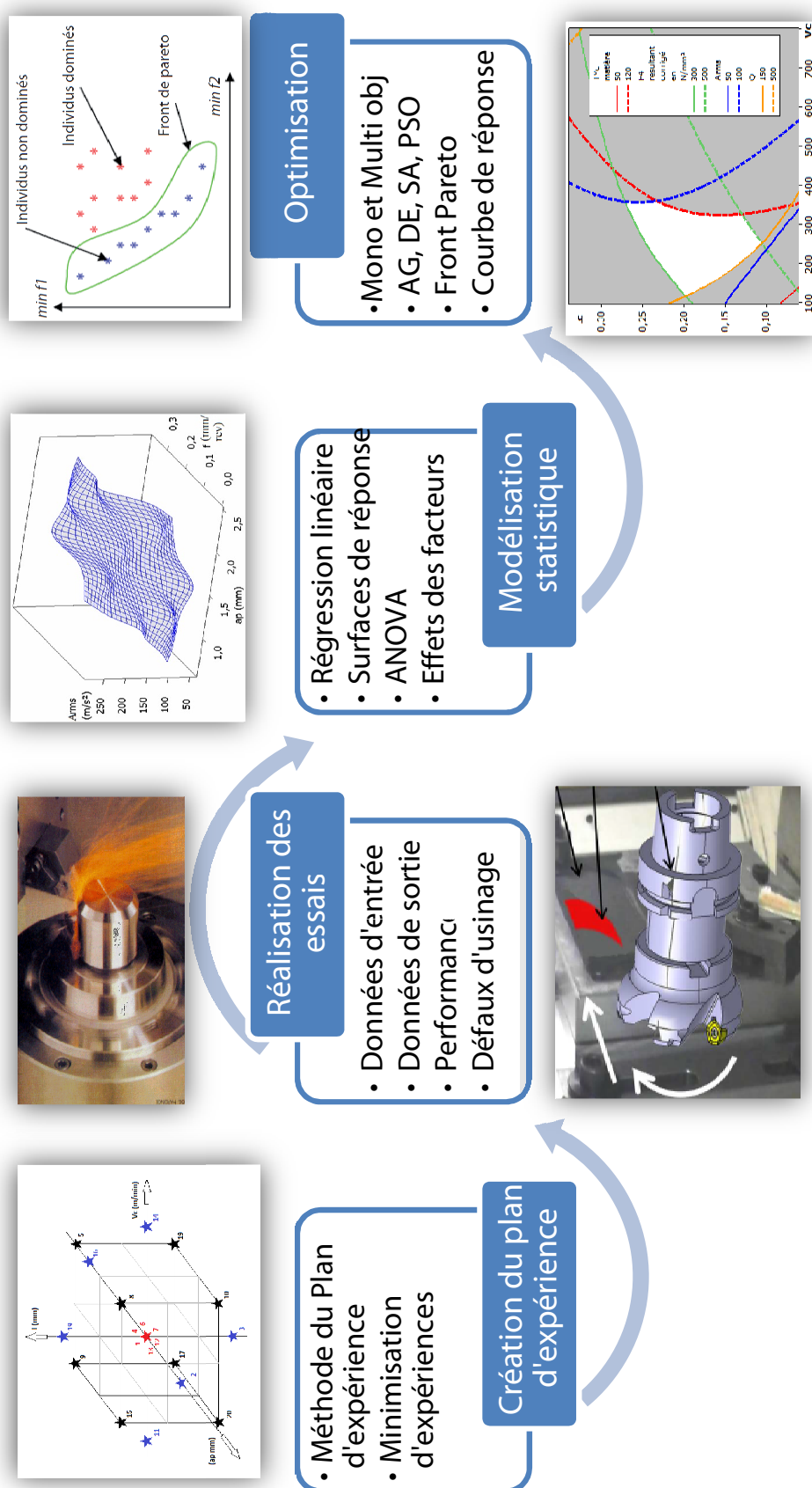


FIGURE 1 – Procédures de choix de conditions de coupe utilisées

La méthode des plans d'expérience permet en effet d'obtenir un maximum d'informations à un coût minimal. Les méthodes de régression linéaire et surface de réponse nous ont permis d'obtenir une modélisation mathématique des paramètres de coupe. Pour chacun des modèles, des tests statistiques ont été appliqués pour sélectionner les paramètres les plus significatifs. Puis, l'analyse de variance (ANOVA) a été utilisée pour vérifier la validité des modèles.

Optimiser le procédé d'usinage revient à résoudre un problème d'optimisation. On rencontre deux types de problèmes. Le premier est mono-objectif, où l'on cherche une seule solution optimale. Le deuxième est un problème d'optimisation multi-objectif, dans lequel on recherche un ensemble de solutions optimales, connu sous le nom d'ensemble optimal. Dans la partie optimisation, plusieurs méthodes d'optimisation comme les algorithmes génétiques et les surfaces de réponse ont été utilisées en fonction des besoins et des objectifs recherchés.

Plusieurs paramètres peuvent avoir des effets sur le processus d'usinage. Le diagramme d'ISHIKAWA (ou diagramme cause/effet) illustré par la figure 2 est un excellent outil, simple et rapide permettant d'identifier ces paramètres qui affectent la qualité du procédé d'usinage. Parmi ces causes, on peut citer : les outils, le matériau, l'environnement, l'opérateur, le produit, etc.

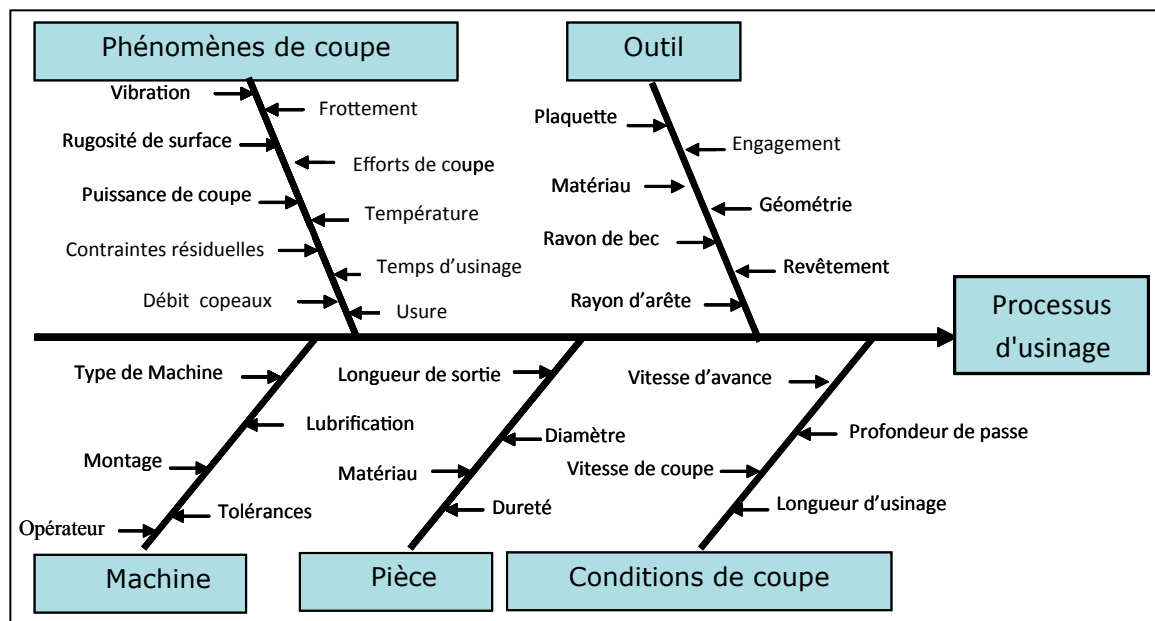


FIGURE 2 – Diagramme Ishikawa [Vasques (2008)]

L'organisation de la thèse se décline en quatre chapitres :

- Le premier chapitre rappelle les notions d'usinage en tournage et fraisage en mettant l'accent sur les paramètres de coupe d'entrées/sorties utilisés dans notre présente étude.

- Dans le deuxième chapitre, nous présentons un état de l'art sur les méthodes de modélisation et d'optimisation existantes : plans d'expérience, régression linéaire, Optimisation mono et multi-objectif. Nous présentons ainsi les méthodes d'optimisation proposées.
- Dans le troisième chapitre, une application sur acier 100Cr6 est illustrée. Des modèles empiriques ont été établis à partir de la régression linéaire et des plans d'expérience utilisés, l'optimisation mono et multi-objectif accouplées avec la méthode de la somme pondérée a été utilisée pour le choix de conditions de coupe.
- Le quatrième chapitre présente deux applications sur un matériau composite carbone/époxy T800S/M21. La première a comme objectif de trouver une nouvelle méthode pour qualifier l'usinabilité de ce matériau avec un outil de coupe du type PCD (Polycrystalline Diamond). La deuxième a comme objectif de qualifier l'usinabilité de ce matériau avec une plaquette de coupe Penta (5 arêtes de coupe) de trois revêtements différents (DSPN, DB3, DB6). Dans ce chapitre, nous avons utilisé les niveaux de vibration de la plaque composite et les défauts enregistrés au cours d'usinage pour déterminer les conditions de coupe optimales.

Chapitre 1

Généralités sur l'usinage

1.1 Introduction

Le challenge actuel des industriels est de plus en plus basé sur le gain du temps et la diminution des coûts de fabrication tout en respectant l'environnement. Parmi ces industries, L'usinage occupe une place très importante dans la famille de techniques de fabrication de pièces mécaniques. Le principe de l'usinage est d'enlever de la matière de manière à donner à la pièce brute la forme voulue, à l'aide d'une machine-outil. Par cette technique, on obtient des pièces d'une grande précision.

Lors de l'usinage d'une pièce, l'enlèvement de matière est réalisé par la conjugaison de deux mouvements relatifs entre la pièce et l'outil : le mouvement de coupe (vitesse de coupe) et le mouvement d'avance (vitesse d'avance). Il existe deux manières de générer la surface recherchée : par travail de forme ou par travail d'enveloppe. Dans le cas du travail de forme, c'est la forme de l'arête tranchante de l'outil qui conditionne la surface obtenue. Dans le cas du travail d'enveloppe, c'est la conjonction des mouvements de coupe et d'avance qui définit la surface finale. De nos jours, des machines-outils à commande numérique, c'est-à-dire asservies par un système informatique, permettent d'automatiser partiellement ou totalement la procédure.

Lors de la coupe, la matière en interférence avec la trajectoire de l'outil est détachée par déformation plastique du reste de la pièce et se transforme en copeaux. Les caractéristiques de la surface dépendent du couple outil-matière, c'est-à-dire des paramètres mis en jeu pendant la coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance, profondeur de passe, ...). En usinage, il existe plusieurs configurations utilisables selon le procédé de coupe (le tournage, le fraisage, le perçage, ...). Dans le contexte de notre étude, nous nous intéresserons plus précisément au deux premières technique les plus utilisées à savoir :

- Le Tournage, application sur un acier 100Cr6 ;
- Le Fraisage, application sur un matériau composite carbone/époxy. T800S/M21

1.2 Tournage

La technique du tournage consiste à faire tourner la pièce à usiner autour d'un axe défini. Cet axe est celui de la broche du tour. La pièce à usiner est solidaire de cette broche par un mandrin ou un autre principe de serrage. Le but du tournage est de réaliser des formes de révolution telles que cylindres, cônes, tores et autres formes de révolution complexes.

Au cours du tournage on trouve :

- une pièce mobile ;
- un outil à dent unique ;
- une coupe continue.

La figure 1.1(a) montre les différents paramètres de coupe au cours d'une opération d'usinage, la pièce est solidaire d'une broche tournante et l'outil se déplace dans un plan. La génératrice de la pièce est donnée par la trajectoire de l'outil dans son plan d'évolution.

1.2. TOURNAGE

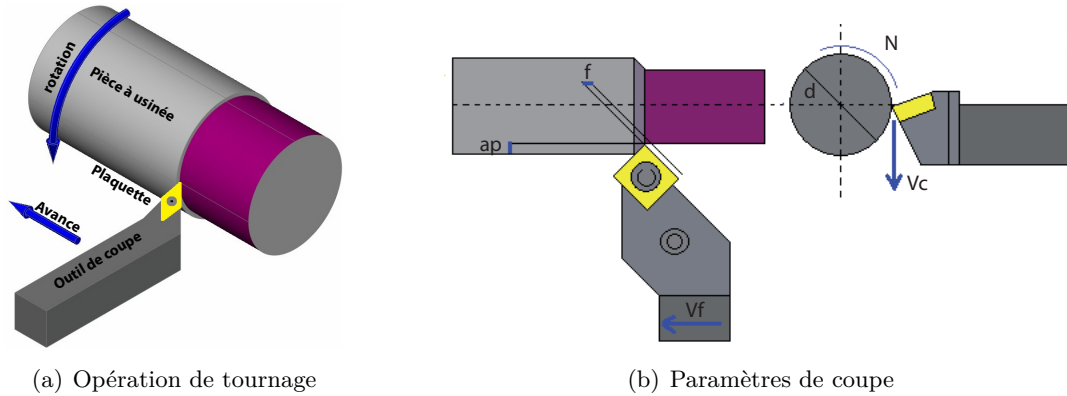


FIGURE 1.1 – Coupe en tournage

1.2.1 Les paramètres de coupe en tournage

Les paramètres caractéristiques d'une opération de tournage sont (exemple du chariotage d'un cylindre de diamètre d) :

1.2.1.1 Vitesse de coupe

Le choix de la vitesse de coupe (V_c) dépend de la nature de l'opération effectuée et du couple outil-matière (caractéristiques physiques et mécaniques du matériau usiné et du matériau usinant). En pratique, la vitesse de coupe est réglée par la vitesse de rotation de la pièce (notée N et exprimée en $\text{tour} \times \text{mn}^{-1}$). Cette vitesse dépend de la vitesse de coupe et du diamètre de la pièce à usiner. La relation reliant la vitesse de coupe et la vitesse de rotation est donnée par l'équation (1.1).

$$N = \frac{100 \times V_c}{\pi \times d} \quad (1.1)$$

avec :

- V_c vitesse de coupe $\text{m} \times \text{mn}^{-1}$;
- d diamètre de la pièce exprimée en mm .

1.2.1.2 L'avance par tour

L'avance correspond au déplacement de l'outil en fonction de la rotation de la pièce pendant la formation de copeau. L'avance est notée f et est exprimée en mm par tour. Comme pour la vitesse de coupe, en pratique, l'avance s'exprime en vitesse d'avance V_f . Cette dernière représente la vitesse à laquelle l'outil se déplace par rapport au bâti de la machine selon les axes longitudinal et transversal et en fonction du nombre de tours effectués par la pièce. Elle est donnée par l'équation (1.2).

$$V_f = f \times N \quad (1.2)$$

1.2. TOURNAGE

avec : V_f vitesse d'avance exprimée en $mm \times min^{-1}$.

1.2.1.3 La profondeur de passe

La profondeur de passe représente la différence des rayons avant et après usinage (profondeur de la matière à enlever). Elle est notée a_p et exprimée en mm . En coupe orthogonale, ce paramètre disparaît car il est confondu avec l'avance.

1.2.2 Les outils de coupe en tournage

Le choix des paramètres présenté ci-dessus dépend directement de l'outil de coupe (nuances, géométrie...), du matériau à usiner, de la nature de l'opération à réaliser et du produit final (état de surface, contraintes internes, changement de phase...). Dans ce qui suit, nous ne présenterons que les paramètres d'outils de coupe essentiels à cette étude. Pour les décrire, il est nécessaire de donner les différents angles caractéristiques de l'outil. Ces derniers sont définis par les plans de référence dans le système de l'outil en main sur un outil de chariotage (figure 1.2).

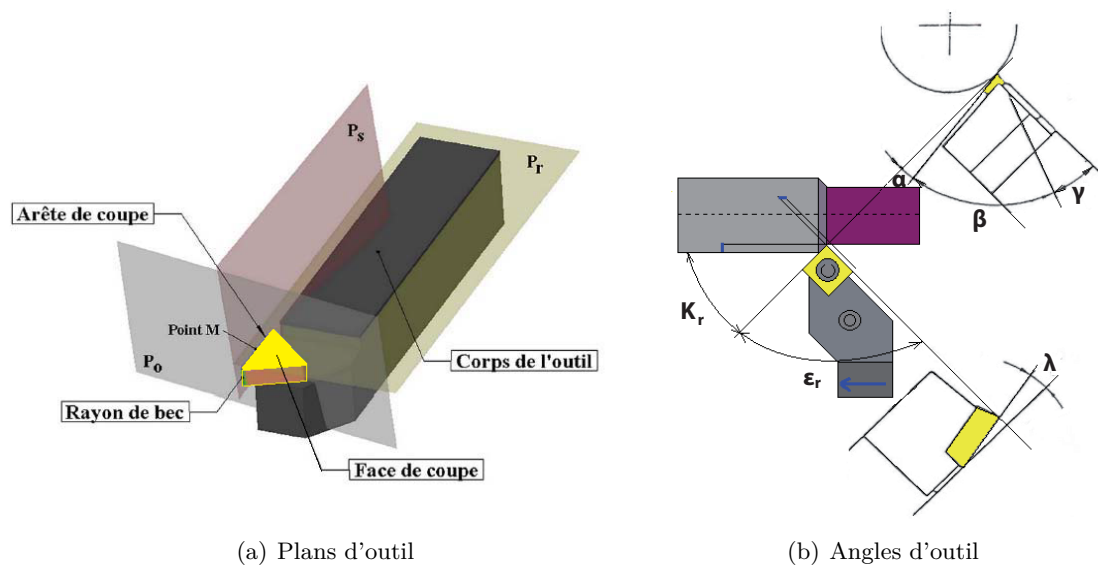


FIGURE 1.2 – Outil de tournage

1.2.2.1 Angles de direction et d'inclinaison d'arête

L'angle d'attaque (Kr) est l'angle projeté dans le plan de référence de l'outil (Pr), entre l'arête de coupe et la direction d'avance (figure 1.2(a) et figure 1.2(b)). Selon le type d'usinage et l'outil de coupe, un angle d'attaque est imposé. Cet angle a une influence sur la direction des efforts de coupe, la largeur de copeau et l'usure de l'outil. L'angle d'inclinaison d'arête (λ) est l'angle formé entre l'arête de coupe et le plan de référence Pr dans le plan Ps .

1.2.2.2 Caractéristiques géométriques de la pointe d'outil

La pointe de l'outil est la zone de contact de ce dernier avec la matière. Elle est la zone la plus sollicitée mécaniquement et thermiquement. A cet effet, il est important de bien choisir les caractéristiques géométriques de cette pointe de l'outil. Ces dernières sont définies principalement par le rayon du bec de l'outil (r_ϵ), l'angle de pointe (ϵ_r), l'arrondi d'arête (rb) l'angle de coupe (γ) et l'angle de dépouille (α) .

1.2.2.3 Rayon de bec et angle de taillant

La figure 1.3, représente un schéma d'une pointe d'outil. Le rayon de bec (ϵ_r) est essentiel dans le choix d'un outil de coupe, car il conditionne la rugosité de la surface à usiner et détermine la résistance du bec de l'outil (plus le rayon de bec est élevé, plus l'outil résiste aux efforts de coupe dans les limites admises par la géométrie), alors que l'angle de taillant (β) est l'angle reliant la face de coupe à la face de dépouille.

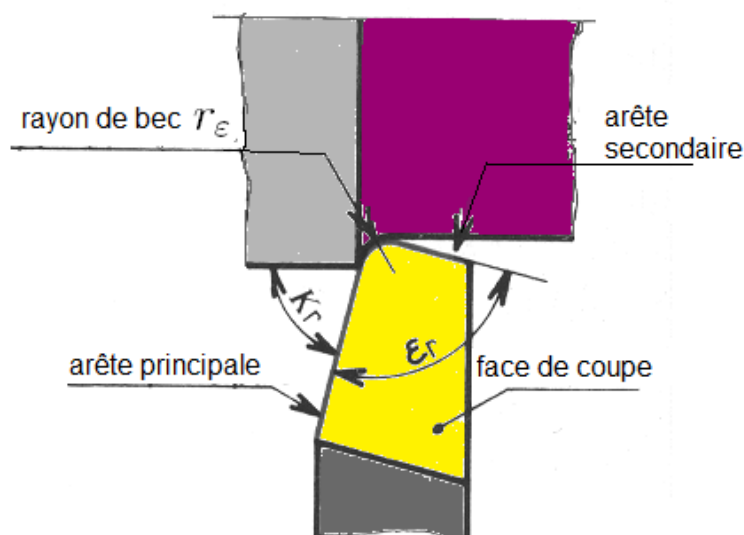


FIGURE 1.3 – Rayon de bec

1.2.2.4 Angle de coupe et l'angle de dépouille

L'angle de coupe (γ) et l'angle de dépouille (α) sont liés à la géométrie de l'outil qui à son tour dépend fortement de la nature du couple outil-matière et des conditions de coupe. L'angle de coupe c'est l'angle qui se trouve entre la face de coupe et le plan de référence Pr dans le plan Pf . Il est déterminant dans la formation du copeau. Selon le matériau à usiner, il peut passer d'une valeur positive à une valeur très négative (figure 1.4). Dans l'usinage des aciers durs, et pour rendre l'outil plus résistant mécaniquement et thermiquement, l'angle de coupe doit être très faible voir négatif (jusqu'à -20 degrés).

1.2. TOURNAGE

L'angle de dépouille quant à lui est l'angle formé entre la face de dépouille de l'outil et le plan Ps perpendiculaire au plan de référence Pr . Il intervient aussi dans le frottement entre la pièce et l'outil.

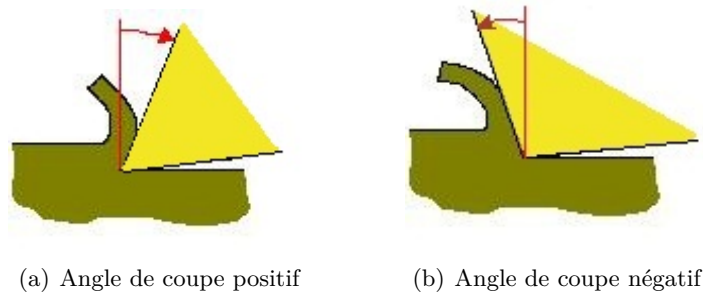


FIGURE 1.4 – Angle de coupe

1.2.3 Efforts et puissance de coupe

La puissance de coupe est un paramètre important surtout pour les opérations d'ébauche car elle permet :

- de choisir ou d'investir dans une machine de puissance adaptée à l'opération à réaliser ;
- de rechercher les conditions de coupe permettant d'utiliser au mieux la puissance de la machine pour assurer le meilleur débit de copeaux en tenant compte des capacités de l'outil utilisé.

La puissance nécessaire à la coupe Pu (kW) peut être estimée par la formule suivante :

$$Pu = \frac{Kc \times a_p \times f \times Vc}{60000} \quad (1.3)$$

avec :

- a_p profondeur de passe au rayon (mm) ;
- f avance par tour (mm) ;
- Vc vitesse de coupe (m/min) ;
- Kc effort spécifique de coup ($N\ mm^{-2}$) ;

L'effort spécifique de coupe Kc est fonction principalement :

- du matériau usiné ;
- de l'avance ;
- de la géométrie de coupe ;
- de l'usure de l'outil (augmentation de 30 à 40 %).

L'action de l'outil sur la pièce peut être décomposée en trois efforts simples :

- l'effort de coupe tangentiel Fc ,
- l'effort d'avance Ff ,
- l'effort de radial ou de pénétration Fa .

$$Fc = Kc \times a_p \times f \quad (1.4)$$

1.3. FRAISAGE

D'une manière générale : $Ff \approx (0,5 \text{ à } 0,66) Fc$ et $Fa \approx 0,3 Fc$

La figure 1.5 montre les différents efforts exercés par la pièce sur l'outil au cours des opérations de tournage et de fraisage.

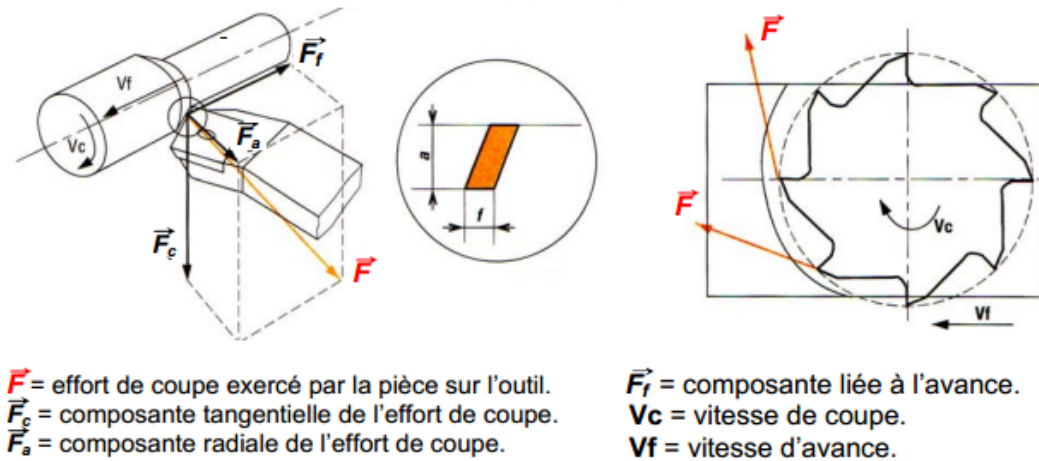


FIGURE 1.5 – Directions d'efforts de coupe en tournage et fraisage

En tournage, le débit de copeaux Q ($cm^3 min^{-1}$) est calculé par la relation suivante :

$$Q = ap \times f \times vc \quad (1.5)$$

1.3 Fraisage

1.3.1 Généralités

Le fraisage est l'un des procédés de mise en forme le plus répandu dans l'industrie. Il permet de réaliser une variété importante de formes. C'est une opération de mise en forme par enlèvement de matière réalisée à l'aide d'un outil coupant appelé fraise. Celui-ci comporte plusieurs arêtes tranchantes disposées autour de son axe de rotation, il est animé d'un mouvement de rotation et d'avance. Cette opération est réalisée sur une machine appelée fraiseuse.

Compte tenu du choix de méthodes qui s'offrent en fraisage, il est important, au préalable, d'établir une distinction entre les différentes directions d'avance par rapport à l'axe de rotation de l'outil (voir figure 1.6)

Le surfacage est une opération de coupe combinée avec plusieurs arêtes, essentiellement celles situées à la périphérie et, dans une certaine mesure, seulement dans la partie centrale de l'outil. La fraise au contact de la pièce tourne perpendiculairement à la direction de l'avance radiale.

Le fraisage trois tailles utilise les arêtes de coupe situées à la périphérie de l'outil. La fraise tourne ici autour d'un axe parallèle à l'avance tangentielle. Ces deux méthodes

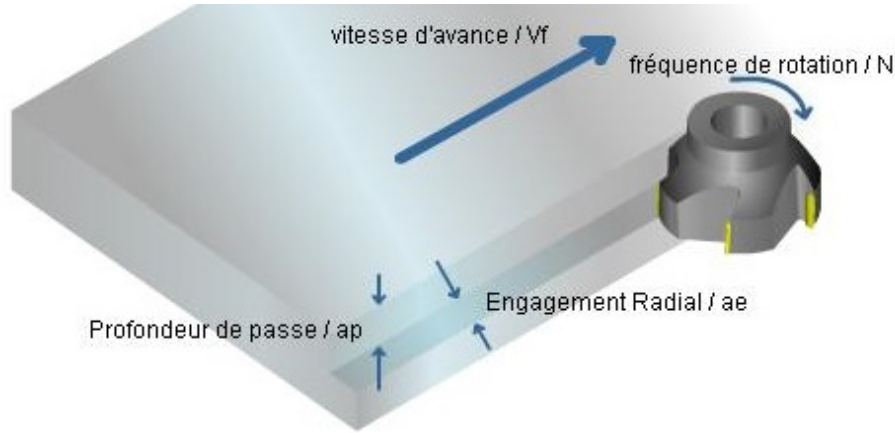


FIGURE 1.6 – Paramètres de coupe en fraisage

peuvent également être différenciées par la profondeur de coupe adoptée. En surfacage, la profondeur de coupe dans la direction axiale est déterminée par la profondeur de pénétration des arêtes périphériques. Les arêtes centrales de l'outil génèrent pour leur part la surface finale de la pièce.

1.3.2 Paramètres de coupe

Une opération de fraisage est caractérisée par les paramètres suivants (voir figure 1.6) :

- a_p : L'engagement axial de l'outil, aussi appelé profondeur de passe axiale en mm ;
- a_e : L'engagement radial de l'outil en mm ;
- N : La vitesse de rotation en tr min^{-1} ;
- V_c : La vitesse de coupe en m min^{-1} ;
- f_z : L'avance par dent en mm dent^{-1} ;
- V_f : La vitesse d'avance en mm min^{-1} ;
- Q : Le débit de coupe en $\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$.

$$N = \frac{1000 \times v_c}{\pi \times d} \quad (1.6)$$

$$V_c = \frac{\pi \times d \times N}{1000} \quad (1.7)$$

$$Q = \frac{a_e \times a_p \times v_f}{1000} \quad (1.8)$$

Il est important de tenir compte de l'épaisseur maximale du copeau (h_{max}). En effet elle peut être inférieure à l'avance par dent (f_z) et conduire à une épaisseur de copeau trop faible (copeau minimal) qui se traduit.

$$h_{max} = 2 \times f_z \times \sqrt{\frac{a_e}{d} \times \left(1 - \frac{a_e}{d}\right)} \quad (1.9)$$

1.3. FRAISAGE

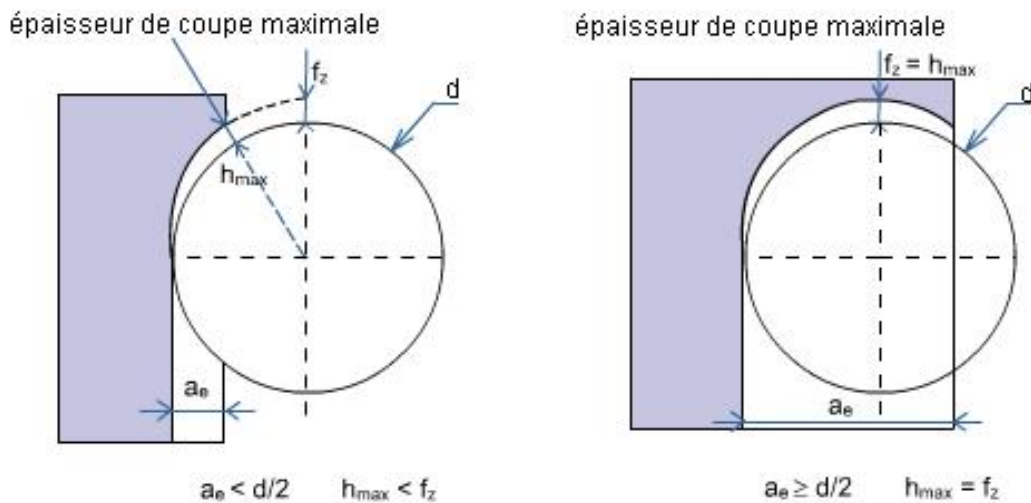


FIGURE 1.7 – Épaisseur de coupe max

Remarque : l'épaisseur du copeau minimal acceptable ne peut être définie de façon générale. Elle est fonction du matériau usiné, du type de fraise, de la qualité de l'affûtage, de la géométrie de l'outil.

1.3.3 Influence du sens de rotation

Le mode de travail de la fraise est prépondérant sur la qualité de l'usinage. On distingue deux modes :

- Le fraisage en avalant : Chaque dent attaque par une épaisseur maximale de copeau. Les efforts de coupe générés ont tendance à " éloigner " la fraise de la matière usinée. Ce mode de travail permet d'éviter le retour de copeau sur la surface précédemment usinée.
- Le fraisage en opposition : Chaque dent attaque par une épaisseur de copeau nulle. Les efforts de coupe générés ont tendance à tirer la pièce du montage. Ce mode de travail peut conduire au retour du copeau précédemment formé sur la surface déjà usinée.

Le sens en avalant a été choisi pour en usinage du composite carbone / époxy (chapitre 4).

1.3. FRAISAGE

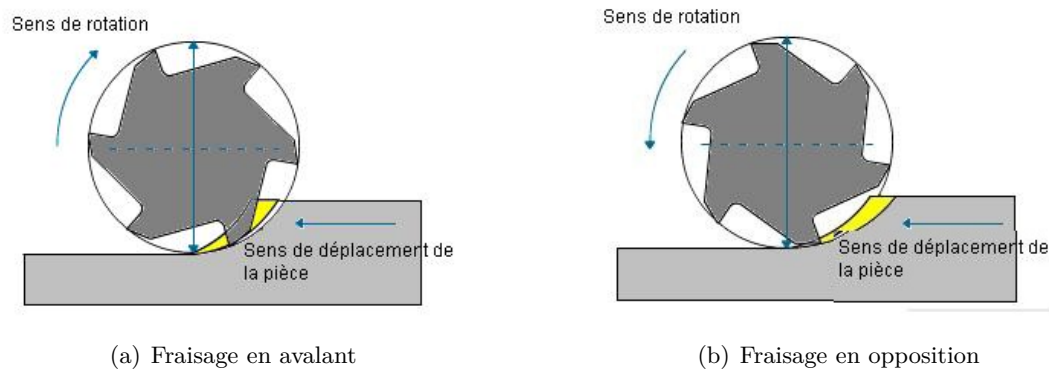


FIGURE 1.8 – Sens de rotation

1.4 Intégrité de surface

Les critères pouvant permettre d'évaluer l'intégrité de surface dans une opération d'usinage sont nombreux et dépendent non seulement du type d'opération, mais aussi de l'objectif de l'opérateur. Cette notion d'intégrité de surface reste néanmoins toujours liée à la production au moindre coût. Les principaux paramètres pris en compte lors de la caractérisation sont :

- l'état de surface obtenu sur la pièce (la rugosité de surface) ;
- les efforts de coupe et la puissance consommée par la coupe ;
- la durée de vie des outils, éventuellement l'évolution de leurs usures au cours du temps ;
- les vibrations de l'outil ;
- la productivité (le débit et le volume du copeau) ;
- le fractionnement du copeau (la forme du copeau) ;
- l'absence de défaut de surface (le délaminage dans le cas d'un matériau composite).

1.4.1 Efforts de coupe

Ce chapitre a pour objectif de faire un bilan des différents points de vue existant à l'heure actuelle quant à la modélisation des efforts. L'échelle d'étude envisagée, les diverses méthodes de modélisation ou encore l'identification des coefficients de lois de coupe sont les trois points présentés dans cette partie

1.4.1.1 Les différentes échelles d'étude [WAGNER (2011)]

Le processus de coupe peut être modélisé sous différents points de vue selon l'échelle spatiale utilisée pour le décrire. La figure 1.9 issue des travaux de [Cherif (2003)], et inspirée de ceux de A. Marty, montre la possibilité de distinguer trois points de vue d'étude des efforts. A chacun de ces points de vue sont associées différentes modélisations des efforts de coupe utilisant des théories et des procédures expérimentales particulières.

Point de vue microscopique

L'échelle microscopique est un point de vue se situant au niveau métallurgique. Elle autorise l'étude de la formation du copeau en s'appuyant sur l'analyse micro-structurale et mécanique des différentes zones du copeau, mais également de la santé matière. Elle s'appuie sur l'observation des transformations de phase subies par le matériau, de l'adoucissement thermique ou des textures. Elle permet l'étude des contraintes résiduelles et des dislocations des grains. Il semble cependant difficile d'en extraire des efforts de coupe. En extrapolant, l'énergie de coupe serait la somme des énergies nécessaires à briser chaque joint de grain. Cette échelle considère l'interface outil-copeau d'un point de vue tribologique. Elle peut toutefois être utilisée dans la vérification des grandeurs physiques telles que les déformations, l'adoucissement thermique ou l'intégrité de surface. Pour l'acier, plusieurs études microscopiques ont été menées par [Poulachon (2002)].

1.4. INTÉGRITÉ DE SURFACE

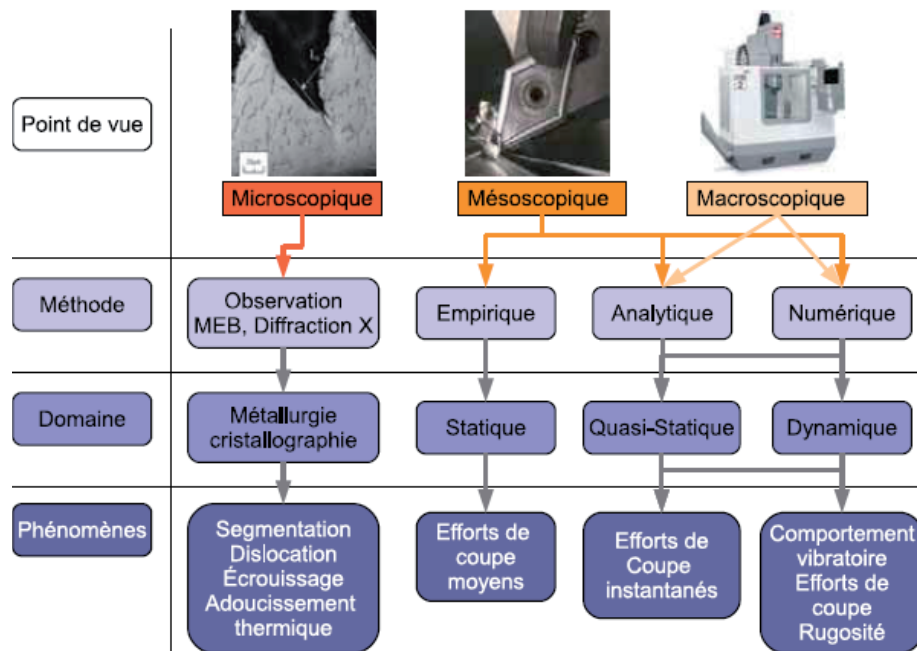


FIGURE 1.9 – Les différents niveaux d'étude de la coupe [Cherif (2003)]

Pour les matériaux composites, plusieurs articles traitent de l'aspect métallurgique de l'usinage, mais seulement au bénéfice du Ti64 ([Lopez-De-Lacalle 00], [Che-Haron 05], [Hou 97]).

Point de vue mésoscopique

Le point de vue mésoscopique traite de l'interaction entre l'outil et la pièce sans pour autant considérer l'aspect métallurgique de la coupe présenté précédemment. L'intérêt de ce niveau d'investigation est d'obtenir un modèle plus proche de la réalité et ceci passe par un nombre d'informations à insérer plus élevé. Les phénomènes de formation du copeau ne sont plus les seuls à être considérés. D'autres aspects comme la thermique ou la thermomécanique sont alors traités. Ces modélisations relient les déformations, les vitesses de déformation et les températures aux contraintes apparaissant lors d'un usinage. Ce dernier point semble essentiel dans la mesure où les phénomènes thermiques et dynamiques ont un rôle prépondérant dans le comportement des matériaux usinés. Plusieurs modélisations analytiques basées sur la coupe orthogonale ou sur la coupe oblique ont été développées [Merchant (1944), Oxley (1989), Becze et Elbestawi (2002)] et plus récemment les modèles éléments finis ont fait leur apparition.

Point de vue macroscopique

La modélisation ne s'attache plus à définir les phénomènes à l'interface outil-pièce, mais définit la réponse globale du système (Pièce-Outil-Machine) et nous permet d'en-

visager ses déformations lorsqu'il est soumis aux efforts de coupe. Ce point de vue est, par exemple, utilisé lors de l'acquisition des efforts de coupe où les efforts agissent sur le système outil-platine. La mesure est faite en considérant le système complet et les phénomènes à l'interface outil-copeau ne sont jamais considérés. Dans le cadre du tournage, cette approche peut être utilisée dans l'analyse des phénomènes vibratoires [Bisu et al. (2007)]. Cette approche globale de la réponse d'un système à des conditions données peut s'avérer intéressante dans la modélisation du comportement d'un système en milieu industriel.

Nous avons vu les différentes méthodes utilisables à l'échelle mésoscopique. La méthode empirique est simple d'utilisation, mais nécessite un grand nombre d'essais. La solution pour réduire ce nombre d'essais est d'utiliser des plans d'expérience adaptés à notre cas d'étude.

1.4.2 État de surface

1.4.2.1 Définition

L'état de surface d'une pièce correspond à des irrégularités de surface. Les mesures de rugosité permettent de quantifier l'état géométrique de surface de cette pièce. Les mesures de rugosité peuvent s'effectuer à l'aide d'un rugosimètre 2D ou 3D. Les résultats de mesures sont alors un profil (mesure 2D) ou une surface re construite à partir de plusieurs profils (mesure 3D, exemple figure 1.10). Le relief d'une surface mesuré en 2D peut-être représenté sous la forme d'une fonction $z(x) = h$ où x est la position du point courant sur la longueur d'évaluation de la surface et h la mesure de la hauteur du défaut à cette position.

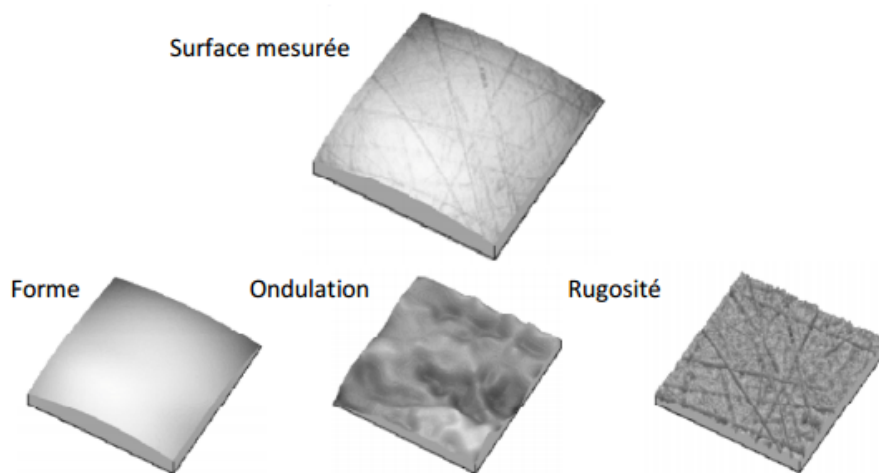


FIGURE 1.10 – Décomposition d'une surface mesurée [Limido (2008)]

Des méthodes distinctes sont utilisées en fonction du type d'irrégularité à isoler. Ainsi, un filtrage par approximation polynomiale permet de supprimer les défauts du premier ordre. Le profil filtré peut être alors séparé en deux profils à l'aide d'un filtre gaussien : ondulation d'une part, rugosité d'autre part. Toutes ces étapes sont normalisées [ISO 4288 96]. Ainsi, la fréquence de coupure du filtre est normalisée en fonction de la rugosité

arithmétique du profil (Ra).

Il existe de nombreux indicateurs mais la pratique montre qu'un nombre restreint (Ra , $Rt...$) d'entre eux est utilisé. Le paramètre de rugosité le plus fréquemment utilisé est (Ra). Il correspond à la rugosité arithmétique et représente la moyenne arithmétique des pics et des creux par rapport à la ligne moyenne, mesurée sur une longueur d'évaluation l . Son expression est la suivante :

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx$$

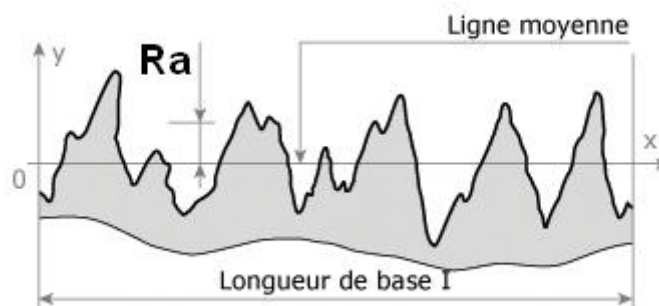


FIGURE 1.11 – Rugosité moyenne arithmétique Ra

D'autres paramètres classiques sont définis comme suit : Rp : la hauteur maximale du pic le plus élevé observé par rapport à la ligne moyenne sur la longueur analysée Rt : rugosité totale, la hauteur entre le pic le plus élevé et la vallée la plus profonde sur la longueur analysée Rq : écart moyen quadratique

1.4.2.2 Rugosité des surfaces en usinage

Les procédés courants d'usinage permettent d'obtenir un Ra compris entre 1,6 et 6,3 mm . En tournage et en fraisage, un certain nombre de facteurs agissent particulièrement sur la rugosité. L'état de surface en tournage de finition dépend principalement de l'avance f et du rayon de bec r_ϵ . Le choix de l'outil et des conditions de coupe doit tenir compte de ces influences. La rugosité théorique peut être déterminée à partir du profil géométrique idéal :

Si le rayon de plaquette est grand par rapport à l'avance, la hauteur maximale du profil (Rt) est donnée par :

$$Rt = 125 \cdot \frac{f^2}{r_\epsilon} \quad (1.10)$$

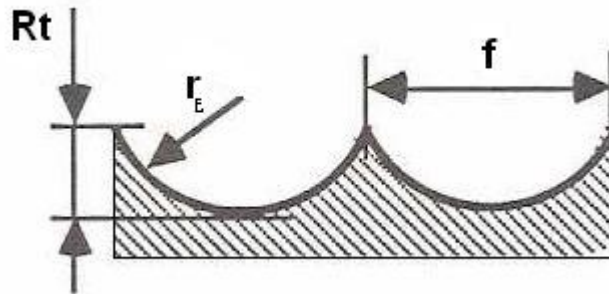


FIGURE 1.12 – Rugosité théorique

La rugosité de surface est codifiée par les normes : ISO 468-1982, ISO 4287/1,2-1984, ISO 4287-1997, et ANSI/ASME B46.1-1985. Cette normalisation porte sur des profils dans un espace à deux dimensions. Les paramètres de la rugosité définissent seulement les caractéristiques micro-géométriques de la surface. Une valeur déterminée de chaque paramètre peut correspondre à plusieurs surfaces obtenues par différentes techniques d'élaboration. Évidemment les propriétés mécaniques de chacune de ces surfaces peuvent être différentes, c'est pourquoi pour caractériser une surface, il faut souvent préciser plusieurs paramètres accompagnés du mode d'élaboration de cette surface [Selaimia (2008)].

Plusieurs facteurs affectent la qualité et l'intégrité de la surface en tournage. Ces derniers peuvent être classés en facteurs concernant le matériau de la pièce à usiner (dureté, propriétés métallurgiques...), facteurs liés à l'outil de coupe (composition chimique du matériau, géométrie...) et les paramètres de coupe. La qualité de la surface est influencée par la dureté et les propriétés du matériau usiné. Il est prouvé que la rugosité de la surface diminue avec l'augmentation de la dureté de la pièce, pour le matériau polyéthylène elle est très inférieure à celle des matériaux coupants, ce qui n'influe donc guère sur la durée de vie de l'outil de coupe. La géométrie de l'outil de coupe présente un impact important sur la contrainte résiduelle et risque de provoquer des vibrations. Une arête arrondie favorise l'apparition des contraintes compressives. D'autre part le rayon du bec de l'outil a un effet considérable sur l'intégrité de la surface en diminuant la hauteur des stries. En effet la rugosité est inversement proportionnelle au rayon. Les paramètres de coupe ont des effets considérables sur la qualité de surface obtenue en tournage. L'augmentation de la vitesse de coupe et la diminution de l'avance permettant la diminution de la rugosité et améliorent la qualité de la surface. Du point de vue théorique, la profondeur de passe a moins d'importance que l'avance. Pour un outil correctement affûté, la rugosité est directement liée à la valeur de l'avance par tour [Selaimia (2008)].

1.4.2.3 Phénomènes d'usure

L'usure de l'outil de coupe est un phénomène qui a été étudié depuis longtemps et plusieurs recherches y sont consacrées pour connaître d'une part, le mécanisme de la formation de l'usure et d'autre part son évaluation en fonction des paramètres de coupe. Après une

période de coupe, l'usure de l'outil se manifeste sur deux régions différentes : sur la face en dépouille en dessous de l'arête de coupe et parallèlement à celle-ci où elle s'appelle usure en dépouille. Sur la face de coupe, l'usure apparaît sous forme d'une cavité caractéristique dénommée cratère qui commence à une certaine distance de l'arête de coupe. La qualité des surfaces obtenues est directement liée au degré d'usure de l'outil. Il est donc important de bien caractériser ce phénomène afin de le rendre observable. L'usure provient des sollicitations mécaniques et thermiques engendrées par les mouvements relatifs entre la pièce, l'outil et le copeau. Cette sollicitation provoque un transfert de métal entre les surfaces en contact (érosion ou abrasion mécanique et diffusion physico-chimique) comme le montre la figure 1.13.

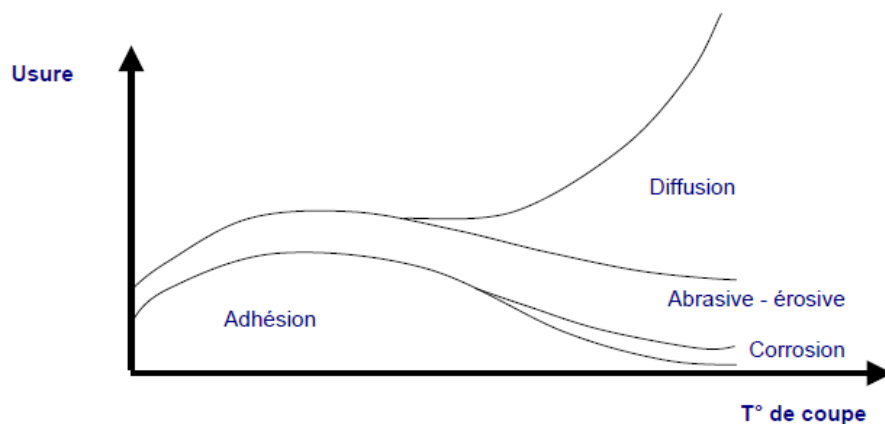


FIGURE 1.13 – Phénomènes d'usure (usinage des métaux ferreux) [Carrilero (2003)]

Usure par effet mécanique

- Usure adhésive : Les pressions de contact sont donc très grandes et risquent d'avoir des conséquences importantes.
- Usure abrasive (à sec) : les particules de métal se glissent entre l'outil et la pièce.
- Usure érosive : même phénomène que précédemment, en présence d'un lubrifiant.

Usure par effet physico-chimique

- Usure corrosive : au contact de l'air, d'un lubrifiant, à haute température. Transfert des particules de l'outil vers le copeau.
- Usure par diffusion : apparaît pour des vitesses élevées.

L'ensemble des processus décrits précédemment, en se combinant les uns aux autres, conduit à une détérioration par usure des outils. Dans ce paragraphe, nous décrivons les conséquences de ces usures. Ces dernières sont mesurables (figure 1.14).

Indices :

- K_M : distance du centre du cratère / pointe initiale de l'outil
- K_T : profondeur d'un cratère

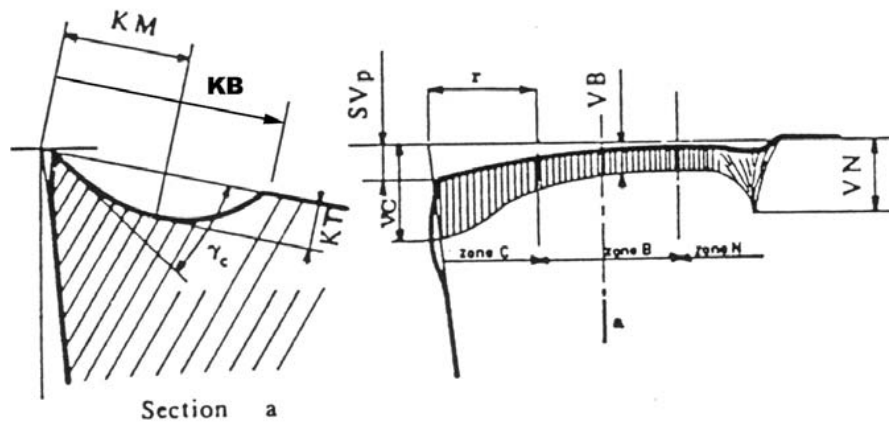


FIGURE 1.14 – Schéma de la caractérisation de l'usure d'un outil [Norme NFE 66 505]

- K_B : largeur du cratère
- γ_c : angle de caractérisation
- V_B : hauteur de l'usure en dépouille
- V_N : profondeur d'entaille par rapport à l'arête de coupe initiale
- V_{BC} : profondeur entre l'arête initiale et la zone usée
- S_V : profondeur entre l'arête initiale et la pointe de l'outil usé

La figure 1.15 récapitule l'ensemble des usures existant en usinage avec leurs allures, effets, causes et les solutions pour les éviter.

1.5. CAS PARTICULIER DE L'USINAGE DES MATÉRIAUX COMPOSITES





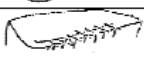


Nom	Allure	Effets	Cause	Remède
Usure en dépouille V_b		L'usure en dépouille est la plus importante. Elle influence directement la cote fabriquée, et l'état de surface.	V_c trop important.	Réduire V_c ou changer de nuance de plaquette. Revêtement Al_2O_3 (Pour les matériaux réfractaires avec des plaquettes céramiques, il faut au contraire augmenter V_c)
Usure en cratère		Elle entraîne une fragilité de l'arête. Lorsque l'usure a progressé jusqu'à l'arête secondaire, l'état de surface devient médiocre.	Usure par diffusion due à une température trop importante sur la face de coupe.	Choisir une plaquette avec un γ positif. Prendre une plaquette revêtue. Réduire V_c puis V_f .
Déformation plastique (fluage)		L'arête de coupe s'est déformée entraînant une dépression de l'arête et un renflement sur la face de dépouille.	Efforts de coupe trop importants. Température de coupe trop importante	Lubrifier. Réduire V_f Réduire V_c
Ecaillage		Petite fracture entraînant un état de surface médiocre et une usure en dépouille excessive.	Nuance trop fragile Géométrie trop fragile Arête rapportée	Prendre une nuance tenace. Augmenter β et le chanfrein de bec. Réduire l'avance au début de la coupe.
Usure en peigne		Des fissures perpendiculaires à l'arête entraînent son effritement.	Elle est due à des fluctuations thermiques lors de l'usinage : Arrosage intermittent Usinage intermittent.	Sélectionner une nuance tenace offrant une bonne résistance aux chocs thermiques. Pratiquer un arrosage abondant ou usiner à sec.
Arête rapportée		Un copeau se dépose sur la plaquette, entraînant un état de surface médiocre.	V_c trop faible Géométrie mal adaptée au matériau	Augmenter V_c . Revoir les catalogues (cas de l'inox, de certains aluminium)
Rupture		Risque d'endommager la pièce, le porte outil.	Nuance trop fragile. Charge excessive sur la plaquette. Choc lors de l'usinage (plan de joint).	Prendre une nuance tenace. Réduire V_f et a . Dans ce cas : augmenter la profondeur de passe pour absorber le choc.

FIGURE 1.15 – Manifestation de l'usure [Paquet (2000)]

1.5 Cas particulier de l'usinage des matériaux composites

L'utilisation de pièces en matériaux composites, en particulier dans l'aéronautique est de plus en plus importante. Longtemps, les matériaux composites ont été utilisés en faibles quantités dans les avions de ligne (de l'ordre de 10% de la masse structurale), et toujours sur des pièces non vitales. Cependant l'A380 d'Airbus en contient 258%, le Dreamliner (787) de Boeing en contient 50%, et l'A350-XWB devrait à son tour dépasser ce chiffre (figure 1.16). En outre, tous ces appareils utilisent dorénavant les composites sur des structures vitales [Gendre (2011)].

Les matériaux composites permettent d'atteindre des très hauts niveaux de performances. En effet, ils possèdent une structure géométrique spécialement conçue pour leur conférer des propriétés que leurs constituants élémentaires ne possèdent pas individuellement, et leur permettre de remplir de nombreuses fonctions techniques.

Cet intérêt s'explique principalement par la faible masse volumique des composites

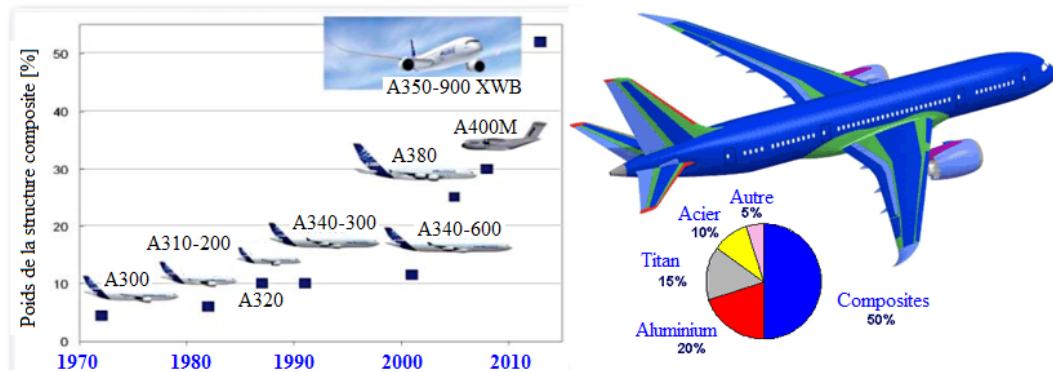


FIGURE 1.16 – Evolution de la proportion de composites dans les avions commerciaux (document Airbus).

qui, par ailleurs, possèdent des propriétés physico-chimiques intéressantes (mécaniques, mais également thermiques, chimiques...); cela permet un allègement considérable des structures qui entraîne, dans le cas du transport aérien, une réduction de la consommation de carburant et des émissions de polluants. Le secteur aéronautique n'est d'ailleurs pas le seul à s'intéresser de près à ces matériaux : l'industrie nautique, ferroviaire, spatiale, le bâtiment, les sports et loisirs fourmillent eux aussi de nouvelles applications [Gendre (2011)].

Les structures composites stratifiées sont constituées de couches successives de renforts imprégnés de résines. Les couches sont également nommées plis. Les structures stratifiées réalisées à partir de matériaux composites sont constituées d'empilements de nappes uni-directionnelles ou bi-directionnelles. Ces nappes sont formées de renforts en fibres longues liées par de la résine. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La résine assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. Les pièces structurelles sont réalisées par empilement de nappes en optimisant les directions des renforts en fonction des charges qu'elles doivent subir. Une structure stratifiée est schématisée par un empilement de mono-couches homogènes dans l'épaisseur et d'interfaces inter-laminaires.

1.5.1 Usinage des composites

L'utilisation à grande échelle des matériaux composites constitue une priorité dans le domaine aéronautique. Ce matériau bien que robuste et léger est usiné difficilement du fait de la génération au cours de l'usinage des endommagements tels que : le délaminage des couches composites, arrachement de fibres, séparation de couches et l'échauffement de la matrice composite ou encore de l'écaillage dans certains cas. L'usinage des matériaux composites dépend de l'étude de la qualification des défauts introduits par la coupe et des conditions de coupe utilisées. Le choix des conditions d'usinage ainsi que des outils, évitant l'apparition de ces défauts, joue un rôle déterminant dans sa tenue mécanique et sa durée de vie [Chungchen (1997), Durao (2010), Davim (2003), Sheikh-Ahmad (2009)].

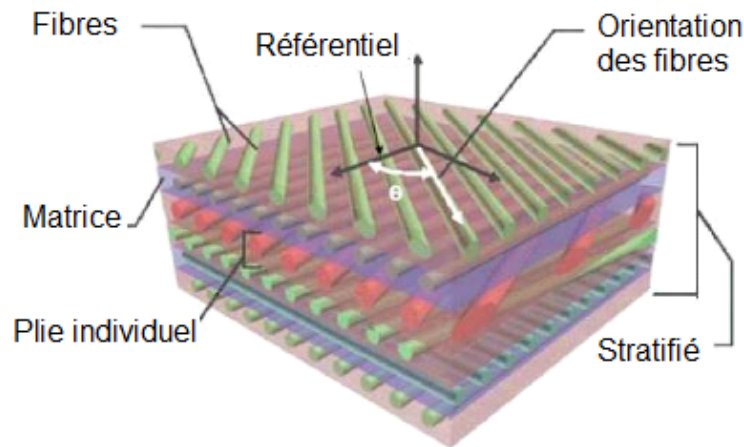


FIGURE 1.17 – Stratifié composite [Mbeilissouck (2008)]

Le mécanisme de coupe des matériaux composites a été largement étudié dans par [Koplev et al. (1983)], et [Ramulu (1997)]. Ces deux auteurs mettent en évidence que l'orientation des plis par rapport à l'arête de coupe a une grande influence sur la génération de défauts dans le composite.

Usiner signifie couper des fibres, ce qui diminue la résistance mécanique du matériau (Ghidossi (2004)). Les études relatives à l'usinage des composites polymères ont été proposées par de nombreux auteurs [Lachaud (2001), Zitoune (2005), Teti (2002) et Hocheng (1993)]. Auteurs ont souligné que l'hétérogénéité du matériau de coupe et le mauvais choix de conditions de coupe pourraient non seulement générer l'usure prématurée de l'outil de coupe [Iliescu (2008)], mais aussi de graves dommages sur la pièce [Khashaba (2004)]. Les défauts les plus courants rencontrés lors de l'usinage des composites sont : le délaminage et échauffement de la résine du composite. Afin de comprendre l'apparition des défauts, certains auteurs ont lié la coupe conditions à des dommages-intérêts [Marques (2009)]. Dans le travail de [Rawat (2009)], les cartes d'usinabilité ont été introduites dans le forage, cette méthode induit plusieurs mesures de qualité d'usinage telles que le délaminage, la circularité des trous et la qualité de surface. [Ramulu (1997)], (Arola et Ramalu (1997)), et (Guegan (1992))] à mentionner que la rugosité de surface est très sensible dans les matériaux composites, et l'erreur de mesure pourrait être induite par l'orientation différente des fibres.

1.5.2 Défauts d'usinage des matériaux composites

Usiner un matériau composite peut entraîner un risque d'endommagement au voisinage de la zone usinée. Il est donc important d'étudier la nature des défauts introduits par la coupe et d'appliquer des techniques d'usinage adaptées aux constituants du composite et élaborer des méthodes de contrôle spécifiques. La réalisation de pièces dans ces types de matériaux nécessite souvent, après la mise en forme globale, des opérations d'usinage à l'outil coupant.

1.6. VIBRATION EN USINAGE

Le caractère anisotrope et hautement abrasif des renforts associé à l'hétérogénéité des structures composites rendent leur usinabilité délicate. Les problèmes majeurs rencontrés lors de l'usinage d'un matériau composite fibres longues sont le délaminage, l'arrachement des fibres, la dégradation thermique et mécanique de la résine. Ces problèmes s'accroissent lors de l'usinage d'un empilement multi-matériaux (érosion endommagement de la partie composite par les copeaux métalliques).

1.5.2.1 Délaminage

Lors de sollicitations du composite en usinage, des micro-fissures peuvent apparaître dans les interfaces entre les plis. À des niveaux de chargement plus élevés, les fissures microscopiques peuvent croître et se rejoindre jusqu'à former des dégradations plus étendues sur les plis. Ces dernières commencent donc à se décoller les uns des autres : c'est le délaminage. Le délaminage peut s'étendre sur des surfaces considérables (figure 1.18). Il provoque alors la destruction du stratifié car les efforts ne peuvent alors plus se répartir entre les plis, et l'ensemble n'a alors plus aucune cohésion.

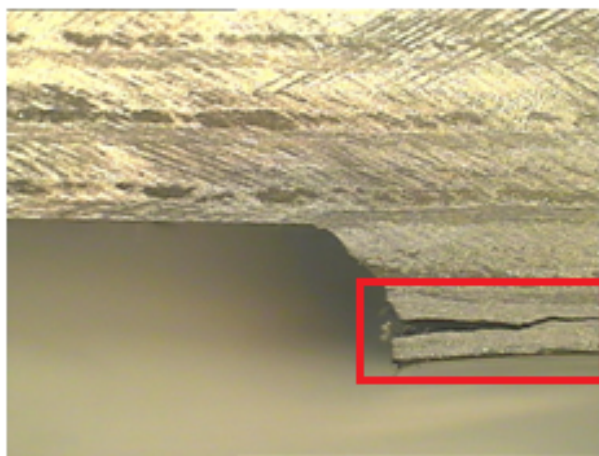


FIGURE 1.18 – Défaut de délaminage

1.5.2.2 Dégradation thermique

Lors d'opérations d'usinage sans lubrification de matériaux composites dont la matrice est en résine thermo-durcissable (ex : époxy), les paramètres de coupe ainsi que la forme de l'outil influencent directement l'apparition d'une dégradation thermique localisée de la pièce usinée [Guegan (1992)].

1.6 Vibration en usinage

Plusieurs recherches sont faites sur les vibrations régénératives en usinage de 1946 par Arnold. Par la suite Tobias Tobias (1965), Tlustý et Polatek 1963 Tlustý (1963),

1.6. VIBRATION EN USINAGE

ont considéré les vibrations dues à l'interaction dynamique entre l'outil et la pièce usinée et l'influence de la passe précédente. Cette notion de régénération a été utilisée pour schématiser le processus à l'aide de la théorie analytique des boucles fermées. Ainsi [Merritt (1965)], propose un critère de stabilité graphique. Il apparaît alors la notion de lobes de stabilité (figure . Ils permettent de visualiser de manière graphique les zones où l'usinage est stable en fonction des paramètres utilisés : profondeur de passe, vitesse de rotation.

La figure 1.19) montre un cas de lobe de stabilité obtenu en tournage d'un acier 42CD4.

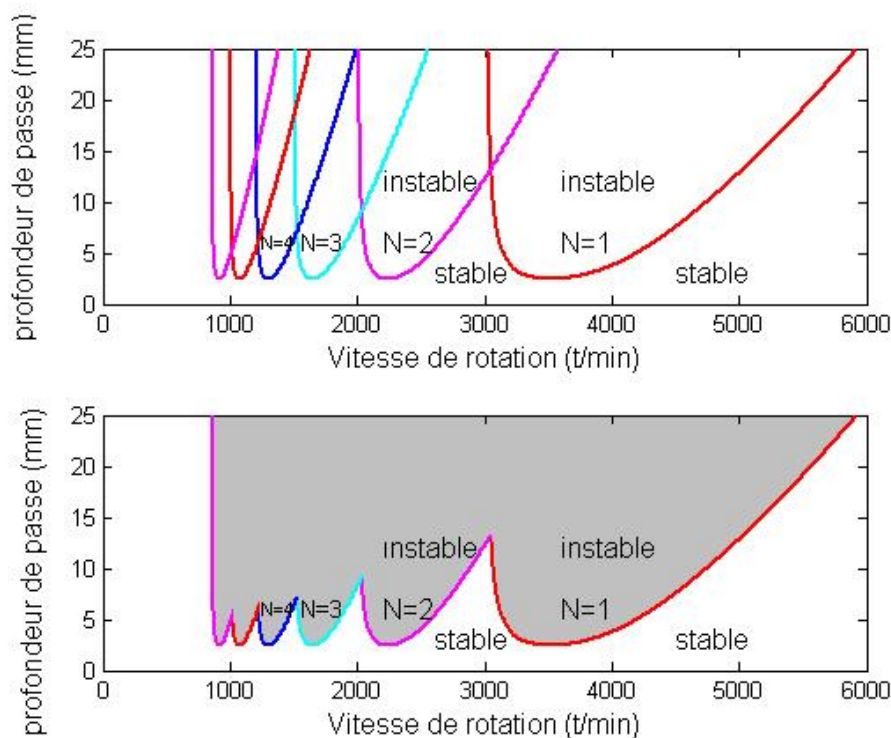


FIGURE 1.19 – Lobes de stabilité [Serra (2009)]

Les paramètres du système de vibration de l'outil de coupe ont été choisis comme suite :

- masse du système $m = 1\text{ kg}$;
- coefficient d'amortissement $\zeta = 0,03$;
- fréquence propre de l'outil , $\omega_0 = 100\text{ Hz}$;
- effort spécifique de coupe à $K_c = 1000\text{ N/mm}^2$.

Dans un premier temps, les études menées sur le sujet concernaient la coupe ininterrompue. Le système outil broche et pièce est modélisé par un système masse ressort.

L'approche analytique va être détaillée dans ce paragraphe pour le tournage orthogonal. Dans ce cas, le système est supposé n'admettre qu'un degré de liberté. Depuis les premières études sur le sujet, cette approche a été abordée et détaillée par nombre de personnes telles

que [Altintas2000, Altintas2006, Segreti2002] .

Dans cet exemple, l'outil est considéré rigide et la pièce flexible La pièce est modélisée comme un système dynamique linéaire à un degré de liberté dans la direction de l'avance comme le montre le schéma (figure 1.20)

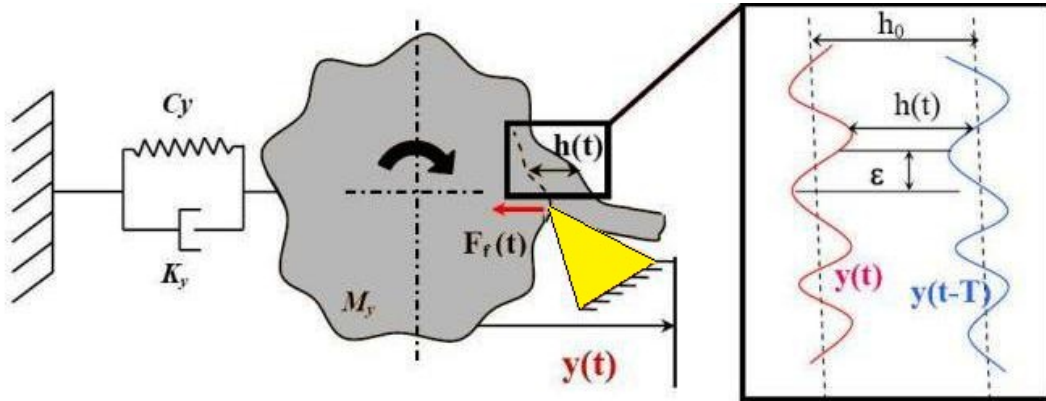


FIGURE 1.20 – Procédé de tournage

- $F_f(t)$: effort d'avance
- h_0 : épaisseur du copeau non déformé
- $h(t)$: épaisseur de copeau instantanée
- $y(t)$: vibration relative outil/pièce
- ϵ : décalage de phase des vibrations d'un tour à un autre, $0 < \epsilon < 2\pi$
- n : nombre d'ondulations entières entre chaque tour
- N : vitesse de rotation de la pièce

Sur ce schéma, $F_f(t)$ présente l'effort d'avance de l'outil dans la matière. Dans le cas d'un système à une dimension, seul l'effort colinéaire au degré de liberté est considéré, car c'est lui qui génère l'énergie reçue par le système et donc provoque les vibrations auto entretenues cf. Cet effort dépend de l'épaisseur de copeau réelle $h(t)$ à l'instant t , qui est elle-même fonction de l'épaisseur de copeau non déformé h_0 , de la vibration relative entre l'outil et la pièce à l'instant t $y(t)$ et de cette vibration au tour précédent $y(t-T)$.

Les vibrations auto entretenues apparaissent dès que l'épaisseur de copeau instantanée $h(t)$ varie au court du temps. Ce phénomène se produit lorsqu'il y a un déphasage entre deux tours consécutifs de l'outil.

1.6. VIBRATION EN USINAGE

Chapitre 2

Méthodes de modélisation et d'optimisation

NOTATIONS

β	Vecteur des coefficients théoriques
$\hat{\beta}$	Vecteur des coefficients estimés dans la modélisation
β_i	Effets moyens relatifs aux facteurs x_i
β_{ij}	Effets moyens relatifs aux facteurs x_i et x_j
Δ	
ε	Vecteur des erreurs de modélisation
σ	Ecart type
σ_y	Erreur expérimentale relative à la réponse y
σ^2	Variance expérimentale
CM_a	Carré moyen factoriel
CMR, CMr	Carrés moyens dus à la régression
e	Vecteur des erreurs de mesure (partie non explicative du modèle)
e_i	Valeur de l'erreur de mesure i
E_{Ai}	Effet principal du facteur A au niveau i
$Esp(x)$	Espérance du facteur x
I_{AiBj}	Interaction entre les facteurs A et b aux niveaux i et j
k	Nombre de facteurs
N	Nombre d'expériences (pour un plan donné)
p	Nombre de coefficients du modèle postulé
SCE	Somme des carrés des écarts
x_i	Valeur du facteur i
x	Vecteur des valeurs des facteurs
X	Matrice du modèle ou matrice des effets
X_N	Matrice des expériences
$X^t X$	Matrice d'information ou matrice de Fisher
y_i	Valeur de la réponse expérimentale i
y	Vecteur des réponses expérimentales, mesurées
\bar{y}	Moyenne arithmétique des réponses mesurées y
\hat{y}	Vecteur des réponses estimées
ANOVA	Analyse de la variance
GA	Genetic Algorithm
DE	Differential Evolution
ASA	Adaptive Simulated Annealing
PSO	Particle Swarm Optimization

2.1 Introduction

Le premier chapitre de cette thèse a permis de présenter des généralités sur l'usinage. Des notions sur le tournage et fraisage sur lesquels porte ce travail de recherche. L'objectif exposé dans ces travaux réside dans l'optimisation et le choix de paramètres de coupe lors de l'usinage d'un Acier 100Cr6 (Chapitre III) et d'un matériau composite (chapitre IV). Ce travail nous a amené à modéliser plusieurs phénomènes qui apparaissent lors de l'usinage de ses matériaux, notamment (l'état de surface, efforts de coupe, vibration,...). Pour effectuer cette modélisation, nous avons opté pour une méthode empirique, celle des plans d'expérience. Le second chapitre présente une étude détaillée de cette méthode.

Lors d'études expérimentales multi-paramétriques comme l'usinage, le nombre de variables peut être élevé. Les stratégies couramment employées pour mener à bien ces expérimentations sont souvent coûteuses, et elles peuvent conduire à un nombre de résultats difficile à exploiter. Pour optimiser l'organisation des expériences et exploiter efficacement les résultats obtenus, on peut avoir intérêt à utiliser des méthodes telles que les plans d'expérience. Le principe général des plans d'expérience consiste à n'étudier que certains points du domaine expérimental, tout en appréhendant le phénomène physique étudié sur l'ensemble du domaine considéré. En s'inspirant de la norme ISO 3534-3 [Norme-iso3534-3 (1999)], un plan d'expérience peut être défini comme une organisation raisonnée d'essais [Louvet (2005)]. Une difficulté importante de la méthodologie réside alors dans la manière de choisir les points d'études de façon optimale. D'une part, l'utilisation de cette méthode aide à l'amélioration de la qualité des produits et des procédés, et d'autre part à la réduction des temps et coûts de développement. La méthode des plans d'expérience permet en effet d'obtenir un maximum d'informations à un coût minimal. En résumé, les avantages les plus reconnus des plans d'expérience sont :

- l'apport économique, car seules les expériences indispensables sont réalisées,
- l'exactitude : pour un effort expérimental donné, la plus grande exactitude possible sera atteinte,
- les interactions existant entre les différents paramètres étudiés sont identifiées et mieux comprises.

D'une manière générale, un plan d'expérience consiste à mettre en évidence et à quantifier l'influence existant entre deux types de variables :

- le facteur : une variable, ou un état, qui agit sur le système étudié,
- la réponse : une grandeur mesurée, afin de connaître les effets des facteurs sur le système.

Les plans d'expérience visent à établir des relations liant la réponse tant avec les facteurs, qu'avec les facteurs entres eux (interactions). Cette technique des plans d'expérience, employée dans des domaines aussi divers que la fabrication, la chimie, l'électronique,... permet d'obtenir une modélisation expérimentale des phénomènes physiques. Il y a une différence entre la modélisation de l'expérimentation et la modélisation du phénomène physique. Modéliser l'expérimentation, c'est être capable de prévoir la réponse du phénomène physique uniquement en fonction des paramètres étudiés lors de l'expérimentation et variant dans le domaine d'étude choisi. Cela signifie qu'en général :

- la réponse du modèle de l'expérimentation ne pourra théoriquement pas être extra-

- polée à des valeurs de paramètres situées en dehors du domaine d'étude,
- les valeurs quantitatives des réponses seront liées à des configurations particulières de l'expérimentation, et ne seront pas non plus forcément extrapolables à d'autres conditions de fonctionnement (par exemple dans le cas d'usinage, un changement de machine ou du matériau).

Cette étape relative à la modélisation de l'expérimentation apparaît néanmoins très importante car elle permet tout de même d'appréhender localement le phénomène physique par la connaissance de la surface de réponse générée dans le domaine expérimental considéré. Les contextes d'application de la méthode peuvent aller du traitement et de la résolution des problèmes de qualité à l'optimisation d'un produit ou d'un processus destiné à fabriquer un produit (cas d'usinage). En outre, les plans d'expérience peuvent être vus comme un ensemble de méthodes, d'outils qui peuvent être choisis en fonction des objectifs de l'étude à effectuer. Les principales méthodes des plans d'expérience, liées à des utilisations et besoins différents sont :

- la méthode comparative (en anglais : comparative design) : Elle permet de trouver la relation cause/effet entre plusieurs facteurs de l'étude, et de déterminer le facteur important a priori. La question est de savoir si le facteur a un rôle "significatif" dans l'obtention de la réponse, s'il engendre ou pas un changement important de la réponse en fonction de ses différents niveaux.
- la modélisation par régression (regression modeling). Elle est faite pour estimer les paramètres d'un modèle précis, en mesurant la dépendance de la ou des réponse(s) à l'égard des entrées du processus.
- la technique de criblage (screening design). Elle est mise à profit pour explorer un domaine expérimental inconnu. Les plans sont alors conçus de manière à isoler les facteurs influents et examiner les effets principaux des facteurs. La technique de criblage se nomme également technique principale d'effets.
- la Méthode de la Surface de Réponse (MSR) (Response Surface Methodology, RSM). Elle a comme rôle d'élaborer des modèles descriptifs ou prévisionnels des phénomènes étudiés. Son utilisation est intéressante dès lors qu'il faut effectuer des optimisations, mettre au point des formulations permettant d'estimer les interactions entre facteurs ainsi que les effets quadratiques. La MSR permet, grâce à l'idée que l'on peut se faire de la forme de la surface de réponse, de comprendre l'influence des paramètres sur les procès étudiés.

Pour résumer, les plans d'expérience correspondent à une suite d'essais organisés à l'avance de manière à déterminer, en un minimum d'essais et avec un maximum de précision, l'influence de multiples paramètres sur une ou plusieurs réponses. Les plans d'expérience permettent de répondre à deux familles de questions :

1. Comment estimer et comparer les effets des paramètres de réglage d'un processus ?
2. Comment affiner les paramètres de réglage d'un processus pour atteindre un optimum ?

Les travaux de cette thèse s'inscrivent pleinement dans ce double contexte, avec pour objet d'optimiser les condition de coupe en usinage. Pour illustrer ces différentes questions au travers du sujet qui nous intéresse, prenons quelques exemples.

2.2. RAPPEL HISTORIQUE

- Comment estimer et comparer les effets des paramètres de coupe tels que la vitesse de coupe, la vitesse d'avance, la profondeur de passe, ... sur la rugosité de surface
- Comment régler les paramètres de coupe pour atteindre un optimum en rugosité, en puissance, en efforts de coupe ?

Les travaux présentés dans ce rapport ont été réalisés en respectant au mieux la méthodologie des plans d'expérience, et en particulier ses différentes étapes et objectifs :

- Définition du problème,
- Application de la modélisation par régression linéaire multiple,
- Application de la méthodologie de surface de réponse,
- Optimisation.

2.2 Rappel historique

Le point de départ des principes modernes de l'expérimentation est souvent fixé aux travaux du statisticien Ronald A (1919), suivi par Fisher (1890-1962) du Centre de recherche agronomique par de la Rothamsted Experimental Station dans le cadre d'études agronomiques. Les travaux de Fisher font apparaître les notions de répétition, de répartition au hasard ou randomisation, de constitution de blocs, d'expériences factorielles, d'effets principaux et d'interactions, (Fisher, 1925, 1926). En 1931, Fisher est rejoint par Frank Yates (1902-1993). De leur collaboration résultent de nouveaux développements théoriques tels que les expériences factorielles fractionnaires, les notions d'expériences en blocs aléatoires incomplets (Yates, 1935, 1936, 1937). Deux autres noms peuvent être cités : [Cochran (1962), Cochran (1977) et David (1977)]. On doit notamment à ces deux chercheurs des contributions importantes concernant les expériences croisées et portant aussi sur les expériences factorielles fractionnaires. À partir des années 1935-1940, les notions d'expérimentation interviennent également dans le secteur industriel. Des concepts nouveaux apparaissent alors, tels que les plans de Placket et Burman (1946), la notion de surface de réponse (1952), les plans optimaux (1959) et les plans Taguchi (1959, 1960, 1987) [Dagnelie (2000)]. Depuis, les plans d'expérience ont pris un essor considérable avec le développement de l'informatique et la puissance de calcul.

2.3 Démarche méthodologique d'un plan d'expérience

Toute expérience doit être l'objet d'une planification précise qui se concrétise sous la forme d'un plan d'expérience ou protocole expérimental. La démarche méthodologique d'un plan d'expérience peut être décomposée en différentes étapes [Louvet (2005), PILLET (1992)] :

1. Définition des objectifs et des réponses :
En tenant compte des objectifs à atteindre, il est d'abord nécessaire de faire la liste des réponses expérimentales qui peuvent être étudiées.
2. Choix des facteurs et du domaine expérimental :
C'est de loin l'étape la plus importante dans la conduite d'un PE. Il faut :
 - Sélectionner les paramètres, choisir les modalités et les interactions à étudier.

2.4. RÉGRESSION LINÉAIRE MULTIPLE

- Recenser les paramètres pouvant influencer la réponse.
 - Identifier les interactions susceptibles d'être recherchées.
 - Dissocier les facteurs principaux des facteurs bruits.
 - Fixer le domaine d'étude pour chacun des facteurs.
3. Proposition d'un modèle :
- Le plan le plus adapté à la situation sera retenu. Le plan doit présenter les propriétés suivantes :
- Bien représenter la réponse expérimentale étudiée dans le domaine expérimental d'intérêt.
 - Aboutir pour la valeur de la réponse étudiée à une estimation de qualité acceptable.
4. Estimation des coefficients du modèle :
- La valeur de la réponse expérimentale doit pouvoir être estimée avec une qualité acceptable en n'importe quel point du domaine expérimental d'intérêt.
5. Validation du modèle :
- Deux possibilités existent :
- Soit le modèle est validé, ce qui signifie qu'il représente suffisamment bien le phénomène étudié dans le domaine expérimental et dans ce cas, les objectifs sont atteints : nous pouvons utiliser ce modèle pour faire de la prévision en n'importe quel point du domaine expérimental.
 - Soit le modèle n'est pas validé et alors son utilisation n'est pas possible. Il faut donc s'acheminer vers la proposition d'un modèle différent.
6. Mise en œuvre et suivi :
- Le calcul de la réponse est possible en tout point du domaine expérimental.
 - A partir du modèle calculé, nous pouvons prédire les résultats correspondant à la configuration optimale du produit ou du processus.

2.4 Régression linéaire multiple

En l'absence de modèle analytique éprouvé, la prédiction du comportement des systèmes complexes nécessite une étude multi-paramétrique expérimentale. Les problèmes expérimentaux peuvent être synthétisés comme suite :

- en entrée, des facteurs susceptibles d'influer sur les réponses, jouant le rôle de causes potentielles ;
- en sortie, un certain nombre de réponses assimilables à des conséquences.

L'approche des plans d'expérience présente souvent un intérêt majeur dans l'étude d'un système complexe à plusieurs paramètres tels que l'opération d'usinage. Le but consiste à modéliser le comportement des procédés et/ou des produits afin de mieux prévoir et accroître leurs performances. La modélisation expérimentale doit permettre de définir les conditions d'utilisation optimale et de déterminer les facteurs à contrôler ou à piloter afin de maîtriser le procédé. Lors de la mise au point d'un procédé de fabrication, l'optimisation du fonctionnement d'un système complexe nécessite la construction d'un modèle expérimental.

2.4.1 Modélisation

L'objectif est la mise en forme d'un modèle, le plus souvent polynomial, décrivant les variations de la fonction réponse y prenant les valeurs y_1, y_2, \dots, y_N relativement aux valeurs de k facteurs x_1, x_2, \dots, x_k :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$$

avec :

- N : le nombre d'expériences ;
- k : le nombre de facteurs ;
- y : le vecteur colonne des réponses expérimentales y_i $y^t = [y_1, y_2, \dots, y_N]$.

La méthode de la régression multi-linéaire est l'outil statistique le plus habituellement mis en oeuvre pour l'étude de données multi-dimensionnelles. Une variable quantitative y dite à expliquer est mise en relation avec k variables quantitatives x_1, x_2, \dots, x_k dites explicatives.

X : la matrice $N \times p$, appelée matrice du modèle ou matrice des effets

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1,p-1} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2,p-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{N1} & x_{N2} & \cdots & x_{N,p-1} \end{bmatrix}$$

p : le nombre de coefficients du modèle postulé ; β : le vecteur colonne des paramètres à estimer β_i , $[\beta^t = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N]$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix}$$

e : le vecteur colonne des erreurs expérimentales aléatoires e_i , $[e^t = [e_1, e_2, \dots, e_N]$

$$e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_N \end{bmatrix}$$

Le modèle matriciel, s'écrit sous la forme classique suivante :

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdots \\ y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1,p-1} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2,p-1} \\ 1 & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{N1} & x_{N2} & \cdots & x_{N,p-1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_N \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Les réponses calculées par les modèles utilisés ne sont généralement pas exactement égales aux réponses mesurées expérimentalement. Pour chaque expérience existe alors un écart dit de modélisation. Le vecteur ε représentera ces écarts.

$$y = X \cdot \beta + \varepsilon \quad (2.2)$$

2.4. RÉGRESSION LINÉAIRE MULTIPLE

Mathématiquement, le vecteur ε des résidus se définit comme suit :

$$\varepsilon = y - \hat{y}$$

L'objectif est donc le calcul du vecteur $\hat{\beta}$, valeur estimée du vecteur β .

2.4.2 Les hypothèses de la régression multiple

Le calcul des coefficients des facteurs n'est possible qu'à la condition de faire les hypothèses suivantes :

- la réponse est la somme d'une quantité non aléatoire et d'une quantité aléatoire.
- les paramètres inconnus $\beta_0, \dots, \beta_{p-1}$ sont supposés constants.
- les écarts dits de modélisation (ε) sont purement aléatoires et ne contiennent pas d'erreurs systématiques.
- les écarts ne sont pas corrélés entre eux.
- les écarts sont normalement distribués.
- les écarts (ou résidus) ont une moyenne nulle : $\text{Esp}(\varepsilon_i)=0$, où Esp représente l'espérance ou la fonction moyenne arithmétique.
- les écarts sont issus d'une seule et même population et sont identiquement distribués. Ceci peut se traduire par l'équation : $\text{Var}(\varepsilon) = \sigma^2 I$, où Var représente la fonction variance, σ l'écart type et I la matrice identité. La variance d'une variable est une mesure de la dispersion de ses valeurs autour de sa valeur moyenne.
- la distribution des écarts ne dépend pas des niveaux des facteurs.

2.4.3 Différents types de modèles de régression

Il convient que la forme générale du modèle empirique soit adaptée aux objectifs de l'étude. Trois types de modèle sont envisageables Louvet (2005) :

Modèle additif sans couplage (ou des facteurs principaux)

Lorsque l'objectif consiste à hiérarchiser les effets moyens des facteurs à partir d'une étude de criblage, la forme générale suivante, appelée modèle additif sans couplage, peut être adoptée :

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j \cdot x_j + \varepsilon \quad (2.3)$$

Le coefficient β_0 représente la moyenne arithmétique des réponses mesurées y à partir des N expériences du plan :

$$\beta_0 = \bar{y} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N y_i \quad (2.4)$$

Modèle additif avec couplage (ou avec interactions)

Lorsque l'on veut préciser l'effet moyen des facteurs par des interactions d'ordre un (interaction entre deux facteurs), la forme générale suivante, appelée modèle additif avec couplage, est envisageable :

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \varepsilon \quad (2.5)$$

Les termes β_i et β_{ij} symbolisent respectivement les effets moyens des facteurs x_i et les interactions d'ordre un entre les effets des facteurs x_i et x_j .

Modèle polynomial(ou du second ordre avec interactions)

Lorsqu'un optimum doit être trouvé, la forme générale suivante, qui présente des termes du second degré, pourra être retenue :

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} \cdot x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \varepsilon \quad (2.6)$$

A chacune des formes générales précédentes est associée une équation permettant d'estimer le nombre d'inconnues, noté p :

- Pour un modèle additif sans couplage (2.11), le nombre d'inconnues à estimer est défini à partir de la relation suivante :

$$p = 1 + \sum_{i=1}^k (m_i - 1)$$

avec m_i : nombre de modalités du facteur x_i .

- Pour un modèle additif avec couplage (2.4), le nombre d'inconnues à estimer est défini à partir de la relation suivante :

$$p = 1 + \sum_{i=1}^k (m_i - 1) + \sum_{i \neq j} (m_i - 1)(m_j - 1)$$

- Pour un modèle polynomial du second degré (2.6), le nombre d'inconnues est donné par :

$$p = \frac{(k+1)(k+2)}{2}$$

2.5 Technique de criblage

La technique de criblage (screening design) permet d'étudier les facteurs les plus influents affectant une variable de réponse.

Cette technique permet de répondre aux questions suivantes :

- Quel est l'effet d'un facteur sur la réponse observée ?
- Comment comparer les effets de plusieurs facteurs ?
- Les effets d'un facteur sont-ils indépendants des autres facteurs ?

De façon plus générale, des tests statistiques qui permettent de classer les facteurs entre eux, relativement à leur influence propre, sont effectués. Cela permet ainsi de rejeter ou non l'hypothèse selon laquelle le facteur n'induit pas de variation sur réponse étudiée.

2.5.1 Plan factoriel complet

L'étude d'un plan d'expérience complet consiste à étudier toutes les combinaisons possibles des facteurs pris en considération dans l'expérience. On note ce plan X^k , ce qui signifie que cette expérimentation concerne un système comportant k facteurs à X niveaux. Le principal inconvénient d'une telle méthode réside dans le nombre d'expériences nécessaires lorsque k devient important. Cependant, son grand avantage est qu'aucun facteur n'introduit de biais (ou erreur systématique selon la norme ISO/DIS 3534-2 Norme-iso3534-3 (1999)) dans le calcul des effets des autres facteurs (effets indépendants) [Soulier (1994)].

Pour étudier une réponse y en fonction de k facteurs, les expériences correspondant à toutes les combinaisons possibles de facteurs, sont réalisées. Si chaque facteur A_i possède Nn_i niveaux, alors le nombre d'essais N à accomplir est donné par :

$$N = \prod_{i=1}^k Nn_i \quad (2.7)$$

Par exemple, pour trois facteurs à trois niveaux, le nombre de combinaisons possibles entraîne $3^3 = 27$ configurations. Dans le cas d'un plan comportant des facteurs ayant des niveaux différents, le calcul du nombre d'expériences du plan complet est effectué de manière similaire. Par exemple, pour un plan complet de 3 facteurs à 2 niveaux et 2 facteurs à 4 niveaux, $2^3 \times 4^2 = 128$ expériences sont nécessaires.

2.5.2 Variables codifiées

Il est nécessaire de transformer les variables afin de comparer les influences des facteurs entre elles .

Si l'on veut mesurer l'influence d'un facteur A, en introduisant dans le modèle linéaire la variable x prenant la valeur du facteur, l'influence estimée correspondante dépend fortement des unités utilisées, et ne peut donc pas être comparée à l'influence d'un autre facteur. La solution est alors d'adimensionner les valeurs prises par les facteurs quantitatifs en utilisant les variables centrées réduites [Goupy (1999)]. Toutes les variables x varient alors dans un intervalle compris entre -1 et +1.

2.5.3 Matrice d'expériences

La matrice des expériences (XN) est une entité mathématique présentée sous forme de tableau comportant autant de colonnes que de facteurs (k), et autant de lignes que de combinaisons (N) de niveaux ou de modalités retenus dans le plan d'expérience. La

matrice s'exprime sous forme codée (au moyen des nombres -1 et +1). Ainsi, pour le plan factoriel complet 2^2 , la matrice des expériences s'écrit :

$$X_N = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ +1 & -1 \\ -1 & +1 \\ +1 & +1 \end{bmatrix}$$

2.5.4 Construction de la matrice du modèle

La matrice X des effets, servant au calcul des coefficients du modèle, s'obtient en ajoutant à gauche de la matrice des expériences une colonne ne contenant que des 1. Fisher et Yates ont montré qu'une matrice orthogonale, telle que la matrice X , conduit à l'indépendance des estimations des coefficients du modèle [Soulier (1994)].

Selon la norme ISO 3534-3 [Norme-iso3534-3 (1999)], un arrangement orthogonal est un ensemble de combinaisons de traitements tel que pour chaque paire de facteurs, chaque combinaison de traitements survient un même nombre de fois pour tous les niveaux possibles des facteurs. Un dispositif expérimental orthogonal est facile à construire, à partir de simples règles de permutation circulaire, car il offre une incertitude minimale pour l'estimation des inconnues d'un problème, en particulier parce que les combinaisons retenues dans sa structure sont parfaitement équilibrées. Toutes les modalités apparaissent un même nombre de fois pour chacun des facteurs.

2.5.5 Calcul des effets des facteurs et leurs interactions

Effet d'un facteur

Les facteurs qui pourraient avoir une influence sur la réponse choisie doivent être recherchés. La connaissance de leurs effets permet alors d'écrire la relation liant la réponse y aux valeurs des facteurs x [PILLET (1992)].

L'effet principal du facteur A au niveau i , noté E_{Ai} , est calculé de la manière suivante :

$$E_{Ai} = \text{Moyenne des réponses lorsque } A \text{ est au niveau } i - \text{Moyenne générale}$$

L'effet moyen d'un facteur est défini comme étant la moitié de l'effet global.

On distingue :

- L'effet global : $y_2 - y_1$,
- L'effet moyen : $(y_2 - y_1)/2$.

Interaction des facteurs

Lorsque l'effet d'un facteur A dépend de la valeur prise par un autre facteur B , cela se traduit par une interaction entre les deux facteurs AB . On appelle interaction d'ordre n une interaction entre n facteurs. L'interaction est recherchée à partir des résultats moyens des essais réalisés lorsque le facteur A se trouve au niveau i et le facteur B au niveau j .

Dans tous ces essais, l'effet E_{Ai} joue sur la réponse, de même que l'effet E_{Bj} . Si M est la moyenne générale des essais, il est possible d'écrire :

$$I_{AiBj} = \text{Moyenne des réponses lorsque } (A = i, B = j) - M - E_{Ai} - E_{Bj}$$

La présence d'une interaction apparaît sur le graphe des interactions lorsque les deux droites ne sont pas parallèles

Degrés de libertés d'un modèle

Le nombre de degrés de liberté (*ddl*) d'un modèle correspond au nombre de variables indépendantes qui le composent. Ainsi, le nombre de degrés de liberté d'un modèle à k variables est de $k + 1$ (k *ddl* associés aux variables plus un *ddl* associé à la constante β_0 du modèle qui est la moyenne arithmétique des réponses). La régression linéaire n'est possible que si le nombre de *ddl* du modèle est inférieur ou égal au nombre d'essais.

2.6 Analyse des résultats

2.6.1 Analyse de la variance

Les valeurs des réponses doivent être analysées afin de mesurer l'influence des facteurs et des interactions sur la variation constatée de la réponse. La principale méthode statistique répondant à cet objectif est l'analyse de la variance. L'analyse de la variance (en anglais : Analysis Of Variance, ANOVA) nous permet de déterminer à partir de quel seuil un effet peut-être considéré comme significatif. Pour ce faire, il faut comparer la variation d'un facteur pris en compte dans le modèle avec la variance résiduelle. Lorsque le facteur n'est pas pris en compte dans le modèle, l'effet du facteur est alors contenu dans la variance résiduelle. La variation de la variance résiduelle permet de déterminer si globalement le facteur a une influence significative sur la réponse, c'est-à-dire si au moins une des variables associées à chacun des niveaux des facteurs a un effet non nul. La contribution de la variable x_i à la variation de y se détermine de différentes manières :

2.6.1.1 Analyse de la variance du modèle

La variance est une mesure de dispersion qui est la somme des carrés des écarts (SCE) des observations par rapport à leur moyenne, divisée par un nombre égal au nombre d'observations moins un (nombre de degrés de liberté *ddl* i). La variance de l'échantillon est un estimateur sans biais de la variance de la population (NF ISO 3534-1) [Norme-iso3534-3 (1999)].

« D'une façon générale, en matière de régression, le principe de l'analyse de la variance est de subdiviser la variation totale en une composante factorielle relative à l'équation de régression ou au modèle utilisé, et en une composante résiduelle, la première devant être testée par rapport à la deuxième » [Droesbeke (1997)].

Supposons que nous disposions de N observations désignées par y_{ijk} ($i = 1, \dots, p$; $j = 1, \dots, q$; $k = 1, \dots, n$). Les deux premiers indices concernent les deux facteurs contrôlés

2.6. ANALYSE DES RÉSULTATS

(avec respectivement p et q modalités, et donc un nombre total d'objets égal à $p \times q$). Le troisième indice concerne les répétitions (n répétitions de chacun des $p \times q$ objets). Dans ces conditions, nous pouvons calculer $p \times q$ moyennes y_{ij} relatives aux différents objets, p moyennes $y_{i..}$ relatives aux différentes modalités du premier facteur, q moyennes $y_{.j.}$ relatives aux différentes modalités du deuxième facteur, et une moyenne générale $y_{...}$.

Les étapes d'analyse sont les suivantes :

Le modèle observé

$$y_{ijk} - \bar{y}_{...} = (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...}) + (\bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...}) + (\bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...}) + (\bar{y}_{ijk} - \bar{y}_{ij.}) \quad (2.8)$$

Cette relation indique que les écarts entre les observations individuelles et la moyenne générale peuvent être considérés comme constitués d'une part d'une composante relative aux différences entre les moyennes observées pour les différentes modalités et la moyenne générale, et d'autre part d'une composante relative aux écarts entre les observations initiales et observées pour les différentes modalités.

Les nombres de degrés de liberté

Le nombre de degrés de liberté associé à un facteur x_i est le nombre de niveaux Nn_i qu'il prend lors de la réalisation du plan, minoré de 1. Les nombres de degrés de liberté sont additifs :

$$Nni - 1 = pqn - 1 = (p - 1) + (q - 1) + (p - 1)(q - 1) + pq(n - 1)$$

L'équation de l'analyse de la variance

En élevant au carré les deux membres de la relation (2.8) et en sommant pour toutes les observations, on obtient l'équation de l'analyse de la variance :

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{...})^2 &= qn \sum_{i=1}^p (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...})^2 + pn \sum_{j=1}^q (\bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...})^2 + \\ &+ n \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q (\bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...})^2 + \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^n (\bar{y}_{ijk} - \bar{y}_{ij.})^2 \end{aligned} \quad (2.9)$$

En utilisant l'indice a pour le premier facteur et l'indice b pour le deuxième facteur, l'équation (2.9) s'écrit :

$$SCE_t = SCE_a + SCE_b + SCE_{ab} + SCE_r$$

Avec :

- SCE_t : la somme des carrés des écarts totale
- SCE_a : la somme des carrés des écarts factorielles a
- SCE_b : la somme des carrés des écarts factorielles b
- SCE_{ab} : la somme des carrés des écarts de l'interaction $a \times b$
- SCE_r : la somme des carrés des écarts des écarts résiduels

2.6. ANALYSE DES RÉSULTATS

Enfin, en divisant les sommes des carrés des écarts par leurs nombres de degrés de liberté, on définit les carrés moyens, à savoir :

- Le carré moyen total : $CM_t = \frac{SCE_t}{(pqn-1)}$
- Le carré moyen factoriel : $CM_a = \frac{SCE_a}{(p-1)}$
- Le carré moyen relatif à l'interaction : $CM_{ab} = \frac{SCE_{ab}}{(p-1)(q-1)}$
- Le carré moyen résiduel : $CM_r = \frac{SCE_r}{pq(n-1)}$

Ces quantités sont des mesures, respectivement, de la dispersion de l'ensemble des observations (variation totale), de l'importance des différences existant entre les moyennes relatives aux différentes modalités (variation factorielle), et de l'importance des variations apparaissant à l'intérieur des différentes modalités (variation résiduelle).

2.6.1.2 Analyse des la variance résiduelle

La variance résiduelle est liée aux écarts entre les réponses mesurées et les réponses estimées. Elle permet de juger de la qualité du modèle linéaire indépendamment du nombre d'essais réalisés. L'analyse de la variance permet de déterminer l'aptitude du modèle à décrire les variations de la réponse en comparant les variations expliquées et celles non expliquées par le modèle :

- La variation expliquée de la réponse correspond à la variance induite par les facteurs et les interactions.
- La variation inexpliquée de la réponse correspond à la variation résiduelle. La variance résiduelle σ^2 peut être décomposée en deux sources de variabilité :
 1. la variabilité intrinsèque du système étudié,
 2. la variabilité due à des facteurs aléatoires non contrôlés au cours des essais.

La norme ISO 5725 Soulier (1994) définit deux estimateurs de la variance σ^2 :

1. l'erreur de répétabilité : c'est la dispersion des résultats obtenus avec la même méthode de mesure, le même observateur, les mêmes instruments de mesure, le même lieu, les mêmes conditions d'utilisation, en effectuant les répétitions sur une courte période de temps,
2. l'erreur de reproductibilité : c'est la dispersion des résultats observée en faisant varier à chaque répétition les méthodes de mesure, les observateurs, les instruments de mesure, les conditions d'utilisation, dans différents lieux et en échelonnant les mesures dans le temps, les répétitions.

2.6.2 Test de Fisher-Snedecor

Le test Fisher-Snedecor est un test qui permet de comparer les variances de deux échantillons statistiques. Cette loi a été tabulée par M. Snedecor qui lui a donné le nom de loi de Fisher-Snedecor en l'honneur du statisticien Fisher. Pour conclure que l'effet d'un facteur a, par exemple, est significatif, nous cherchons à montrer que CM_a est supérieure à CM_r .

L'hypothèse H_0 , appelée hypothèse nulle, consiste à vérifier l'absence d'influence du facteur étudié.

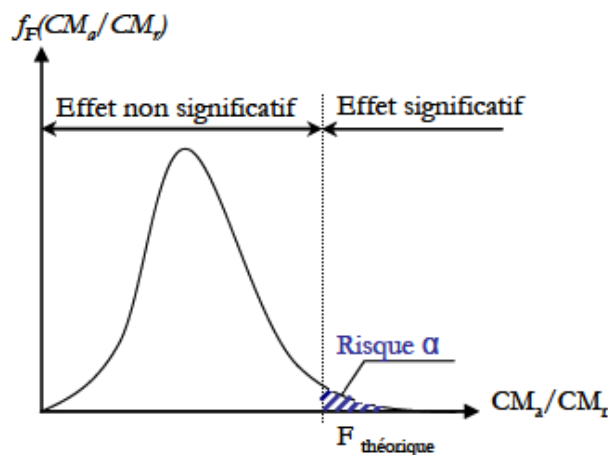


FIGURE 2.1 – Représentation de la loi de Fisher-Snedecor [Goupy (2005)]

La figure 2.1 nous montre que dans le cadre de l'hypothèse nulle (où le facteur n'est pas influent), le rapport peut être égal à l'infini. Cependant, la probabilité est très faible. Pour conclure sur un effet, il faut donc prendre le risque de conclure que cet effet est significatif alors que nous sommes dans le cadre de l'hypothèse nulle. Nous le noterons risque α . Il est généralement fixé à 5%. En fonction du risque α , la loi de Fisher-Snedecor détermine un seuil de refus de l'hypothèse nulle que l'on appellera $F_{théorique}$.

Ce test consiste donc à comparer le rapport entre CM_a et CM_r noté (F_{obs}) avec la valeur $F_{théorique}$ que nous trouvons dans le tableau lié à la loi de Fisher-Snedecor, en fonction :

- de ddl_a et ddl_r degrés de liberté du facteur étudié et de la résiduelle
- du risque α que l'on choisit.

2.6.3 Probabilité

La Probabilité ou « p-valeur » est la probabilité d'obtenir la même valeur (ou une valeur encore plus extrême) du test si l'hypothèse nulle était vraie. Si cette valeur p est inférieure à la valeur du seuil préalablement défini (traditionnellement 5%), on rejette l'hypothèse nulle [Wasserman (2004)]. En d'autres termes, la valeur p est la probabilité de commettre une erreur de première espèce, c'est-à-dire de rejeter à tort l'hypothèse nulle et donc d'obtenir un faux positif.

Elle peut être utilisée comme repère de la confiance qu'on peut avoir dans un résultat particulier. Beaucoup de chercheurs utilisent une « p-valeur » de moins de 0.05 comme limite de significativité statistique, ce qui revient à dire que le résultat observé dans une étude peut se produire par hasard moins d'une fois en vingt études différentes. La « valeur p » peut seulement prendre des valeurs comprises entre 0 et 1. Si elle est inférieure à 0.05, on conclut que l'effet est significatif et si elle est inférieure à 0.01, il est possible de conclure que le facteur est hautement significatif.

2.7. LA MÉTHODOLOGIE DE SURFACE DE RÉPONSE (MSR)

Les résultats de l'analyse de la variance des PE sont généralement présentés sous la forme du tableau suivant :

Source	$ddl.$	SCE	CM	F_{obs}	$F_{théo}$	p-valeur
a	$p - 1$	SCE_a	CM_a	CM_a/CM_r	$F_{(p-1;pq(n-1))}$	$F_{ddl_a,ddl_r,1-\alpha}$
b	$q - 1$	SCE_b	CM_b	CM_b/CM_r	$F_{(q-1;pq(n-1))}$	$F_{ddl_b,ddl_r,1-\alpha}$
\vdots						
\vdots						
ab	$((p - 1) \times (q - 1))$	SCE_{ab}	CM_{ab}	CM_{ab}/CM_r	$F_{(p-1)(q-1);pq(n-1)}$	$F_{ddl_{ab},ddl_r,1-\alpha}$
\vdots						
\vdots						
Erreur	$pq(n - 1)$	SCE_r	CM_r			
Totale	$pqn - 1$	SCE_t				

2.7 La Méthodologie de Surface de Réponse (MSR)

la méthodologie de surface de réponse (MSR) (en anglais : Response Surface Methodology) est une combinaison des techniques statistiques et mathématiques utiles pour le développement, l'amélioration et l'optimisation des processus [Box et al. (1978), Goupy (1999)]. elle est largement utilisée dans le monde industriel, particulièrement lorsque plusieurs variables d'entrée influencent les résultats (les variables de sortie). La méthodologie de surface de réponse est connue sous d'autres noms, par exemple « modèle de régression polynomiale » ou « modèle polynomial ». Dans la suite de cette section, on présente la construction du modèle, puis ses méthodes de validation. Dans cette méthodologie, les modélisations de la fonction réponse peuvent également servir de base à la recherche de conditions optimales. On parle alors d'optimisation indirecte. L'optimisation d'une réponse ou la recherche d'un compromis entre plusieurs réponses consiste à définir un réglage des facteurs permettant de satisfaire au mieux les exigences énoncées en termes de réponse. La modélisation d'une surface de réponse s'appuie sur l'analyse de la variation des résultats d'essais obtenus suite à un plan d'expérience.

2.7.1 Plans Composite Centraux

Les plans composites centraux sont un bon complément des plans orthogonaux, de par leurs propriétés statistiques, mais aussi parce qu'ils sont meilleurs que les plans orthogonaux pour certains problèmes. Ils sont développés, en particulier, dans la méthodologie

2.7. LA MÉTHODOLOGIE DE SURFACE DE RÉPONSE (MSR)

de surface de réponse, et ils permettent l'étude d'un modèle quadratique, dans la plupart des cas des phénomènes non linéaires. Tous les facteurs pour lesquels on souhaite tester l'influence quadratique auront 5 niveaux. Les plans composites centraux sont constitués de trois parties, ce qui permet une démarche séquentielle :

le plan d'expérience est constitué de trois parties :

1. Le point au centre du domaine expérimental, usuellement noté par 0 répété plusieurs (n_0) fois pour estimer la variance de répétabilité.
2. Un plan orthogonal en n_f essais, qui est le plus souvent un plan factoriel ou un plan de Box-Hunter, et qui combine des facteurs à 2 niveaux usuellement notés +1 et -1.
3. Les points en étoile n_δ essais. Ces points représentent 2 essais par facteur, usuellement notés $+\delta$ et $-\delta$.

Selon [Goupy (2005)], pour respecter le critère de presque orthogonalité, la valeur de δ doit vérifier par l'équation Eq.2.10 ci-dessous :

$$\delta = \sqrt[4]{\frac{n_f(\sqrt{n} - \sqrt{n_f})^2}{4}} \quad (2.10)$$

où $n = n_0 + n_\delta + n_f$.

Le domaine de variation des facteurs est ramené à $[-\delta ; +\delta]$. Ainsi, un facteur variant dans l'intervalle $[\text{Min} ; \text{Max}]$ sera découpé en 5 niveaux : $-\delta$, -1, 0, +1, $+\delta$ calculés selon le tableau :

Niveau	Valeurs réelles
$-\delta$	Min
-1	$\frac{Min+Max}{2} - \frac{1}{\delta}(Max - \frac{Min+Max}{2})$
0	$\frac{Min+Max}{2}$
+1	$\frac{Min+Max}{2} + \frac{1}{\delta}(Max - \frac{Min+Max}{2})$
$+\delta$	Max

2.7.2 Construction de la méthodologie de surface de réponse

La méthodologie de surface de réponse consiste à représenter une réponse y comme la somme d'un métamodèle polynomial de faible degré (ordre un ou deux) et d'un terme d'erreur ε ayant une distribution normale avec une moyenne nulle $E(\varepsilon) = 0$.

Avec la condition liée aux degrés de liberté $N=p$ (N le nombre d'expériences et p le nombre de coefficients du modèle), et pour les situations les plus courantes $N>p$, les modèles utilisés ne passent pas exactement par les points d'expériences. Les coefficients des polynômes modélisateurs sont alors calculés par l'équation 2.11 :

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\beta + \varepsilon \quad (2.11)$$

L'estimation $\hat{\beta}$ du vecteur β doit être réalisée de telle façon que l'erreur de modélisation soit minimale. Le critère des moindres carrés traduit cette exigence par un objectif équivalent : Minimisation des carrés des écarts ou encore, en supposant la normalité de la valeur d'erreur ε ($N(0, \sigma^2)$).

$$\|\varepsilon\|^2 = \|y - X\hat{\beta}\|^2 \quad (2.12)$$

minimal tel que :

$$\frac{\partial \varepsilon^t \varepsilon}{\partial \hat{\beta}} = 0 \quad (2.13)$$

L'expression à minimiser sur β s'écrit :

$$\|y - X\hat{\beta}\|^2 = (y - X\hat{\beta})^t (y - X\hat{\beta}) = y^t y - 2\beta^t X^t y + \beta^t X^t X \hat{\beta} \quad (2.14)$$

Par dérivation matricielle de la dernière équation, on obtient les "équations normales" dont la solution correspond bien à un minimum :

$$X^t y - X^t X \hat{\beta} = 0 \quad (2.15)$$

Nous faisons l'hypothèse supplémentaire que la matrice $X^t X$ est inversible. Alors, l'estimation des paramètres β est donnée par :

$$\hat{\beta} = (X^t X)^{-1} X^t y \quad (2.16)$$

Les valeurs ajustées (ou estimées, prédites) de y ont pour expression :

$$\hat{y} = X\hat{\beta} = X(X^t X)^{-1} X^t y \quad (2.17)$$

On note ε le vecteur des résidus :

$$\varepsilon = y - \hat{y} = y - X\hat{\beta} = (1 - X(X^t X)^{-1} X^t) y \quad (2.18)$$

2.7.3 Validation du modèle

Les valeurs expérimentales introduites dans le modèle présentent des erreurs expérimentales (grandeurs aléatoires) qui se transmettent aux coefficients β du modèle $\hat{\beta} = (X^t X)^{-1} X^t y$, puis aux valeurs calculées (\hat{y}). Des tests statistiques permettent d'évaluer la qualité du modèle et la significativité des coefficients.

2.7.3.1 Écarts du résidu

On distingue trois types d'écarts différents :

1. L'écart entre une réponse mesurée et la moyenne des réponses mesurées au même point expérimental (avec $y_{x,1}$ et $y_{x,2}$ deux réponses mesurées dont la moyenne est \bar{y}_x). Il s'agit donc de l'erreur expérimentale, notée σ_y .

$$\sigma_{y,1} = y_{i,1} - \bar{y}_i, \text{ et } \sigma_{y,2} = y_{i,2} - \bar{y}_i \quad (2.19)$$

2. L'écart entre la moyenne des réponses et la réponse prédite. Cette différence caractérise le manque d'ajustement. Elle est notée Δ_i :

$$\Delta_i = y_{i,1} - \hat{y}_i \quad (2.20)$$

3. L'écart entre chacune des réponses mesurées et prédites. Il s'agit donc de la somme des deux écarts précédents : liés au manque d'ajustement et à l'erreur expérimentale. Cet écart est le résidu et il a été noté ε_i

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{yi} + \Delta_i \quad (2.21)$$

2.7.3.2 Analyse de variance

Posons :

- SCT : la Somme des Carrés Totaux ; $SCT = SCE + SCR$ et $SCR = \hat{y}^t \hat{y}$
- SCE : la Somme des Carrés des Ecarts ; $SCE = (y - X\hat{\beta})^t (y - X\hat{\beta})$
- SCR : la Somme des Carrés due à la Régression ; $SCR = \hat{y}^t \hat{y}$

Nous déduisons les carrés moyens en divisant les sommes de carrés ainsi définies par les degrés de liberté correspondants.

- Les carrés moyens CMR dus à la régression sont : $CMR = \frac{SCR}{p}$
- les carrés moyens CME associés aux écarts valent : $CME = \frac{SCE}{N-p}$

CME est une estimation non biaisée de la variance expérimentale σ^2

Le nombre de degrés de liberté total est $(N - p) + p = N$, qui correspond au nombre d'expériences.

On effectue alors le test de Fisher-Snedecor. F_{obs} est une valeur observée d'une variable F de Fisher-Snedecor, à p et $(N - p)$ degrés de liberté. On calcule le ratio : $F_{obs} = \frac{CMR}{CME}$

On utilise ensuite le tableau d'analyse de la variance pour réunir ces informations :

Source de variation	<i>d.d.l.</i>	SCE	CM	F_{obs}	$F_{théo}$
Régression (modèle)	p	SCR	CMR	CMR/CME	$F(p; N - p)$
Résidus	$N - p$	SCE	CME		
Total	N	SCT			

2.7.3.3 Coefficients de détermination (R^2 , R^2 ajusté)

Le coefficient de détermination R^2 est à la fois la fraction des variations de la réponse expliquée par le modèle seul et un indice de la qualité de la régression, il est calculé par l'équation 2.22 :

$$R^2 = \frac{\hat{y}^t \cdot \hat{y} - \bar{y}^t \cdot \bar{y}}{y^t \cdot y - \bar{y}^t \cdot \bar{y}} \quad (2.22)$$

Le coefficient R^2 peut s'interpréter comme le quotient de la variance expliquée par la variance des réponses mesurées. D'après la formule, ce rapport R^2 varie entre 0 et 1. Une valeur proche de 1 correspond à un modèle prédictif.

Le coefficient de détermination ajusté R_a^2 est défini de façon analogue, comme étant la fraction des variations de la réponse expliquée par le modèle seul, relativement aux degrés de liberté correspondants :

$$R_a^2 = \frac{\varepsilon^t \cdot \varepsilon / ddl_r}{y^t \cdot y - \bar{y}^t \cdot \bar{y} / ddl_m} \quad (2.23)$$

2.7.3.4 Analyse des résidus

La représentation graphique des résidus permet de constater visuellement s'il reste encore de l'information à extraire de l'ensemble des résidus. On observe si les résidus sont distribués aléatoirement ou non.

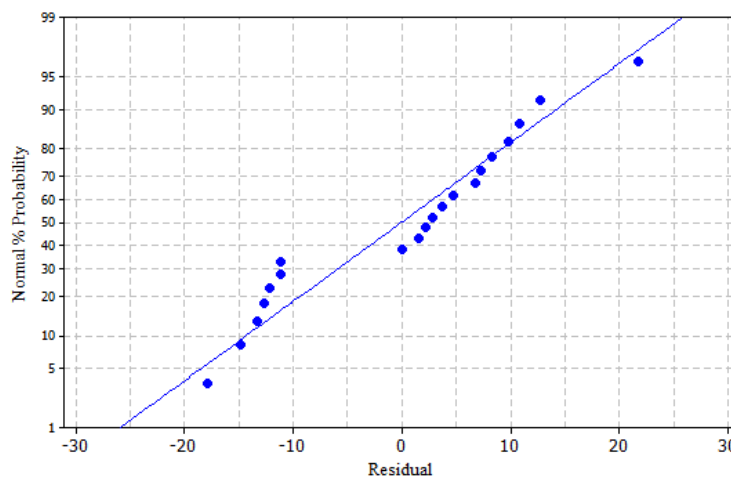


FIGURE 2.2 – Exemple de courbe de résidu

2.8 Application des plans d'expérience pour l'étude des procédés de coupe

Plusieurs auteurs ont déjà utilisé des plans d'expérience pour solutionner des problèmes d'usinage, notamment pour étudier l'influence des conditions de coupe sur la surface des pièces usinées ou sur la durée de vie des outils de coupe. Ainsi, plusieurs facteurs pouvant influencer les performances de l'usinage sont pris en compte dans une stratégie globale se servant des plans d'expérience. L'application des plans d'expérience pour l'étude des procédés de coupe remonte à très loin : [Wu (1964)] a présenté une étude de la durée de vie des outils de coupe basée sur des surfaces de réponse des plans d'expérience. Il a utilisé cette technique pour mener une étude d'optimisation des conditions de coupe en se servant d'un plan composite pour étudier la durée de l'outil sous l'influence de trois variables indépendantes, l'avance, la vitesse de coupe et la profondeur de coupe axiale. Les tests sont conduits en usinage par tournage, le matériau est un acier au carbone SAE 1 0 18, le matériau de l'outil de coupe est du 162P4 78B, tous les tests sont réalisés sans lubrification. [Kline et al. (1982)] ont étudié le fraisage en bout par le biais des plans d'expérience, ils se sont intéressés à l'impact des efforts de coupe qui se résument en la déflexion de l'outil par rapport à la pièce à usiner sur les écarts dimensionnels de la surface finie. Les équations de prédiction sont en fonction des conditions de coupe, des propriétés de l'outil et du matériau à usiner. L'usinage est fait pour l'aluminium 7075 sur une fraiseuse horizontale. [Chua (1991)] se sont consacrés, quant à eux, à l'optimisation des conditions de coupe en utilisant des modèles mathématiques de durée de vie d'outil, des forces de coupe et de puissance consommée. Les modèles sont développés seulement en termes de facteurs jugés influents qui se résument en la vitesse de coupe, l'avance par dent et la profondeur de coupe axiale. L'expérimentation est conduite avec un plan complet en tournage pendant l'opération d'ébauche de la matière T4 (C0.45%, Si 0.25 %, Mn0.70%) avec un outil au carbure Sandvik 425 P25 TiN revêtu. [Astakhnov et al. (1997)] se sont penchés sur l'analyse et la méthodologie d'application des plans d'expérience dans le domaine de l'usinage des métaux. [Alauddin et El-Baradie (2000)] se sont intéressés, à travers les plans d'expérience, au développement d'un modèle de durée de vie de l'outil en fraisage en bout de l'acier (190 HB) en usinage sans lubrification à grande vitesse. Le modèle développé est fonction de la vitesse de coupe, de l'avance par dent et de la profondeur de coupe axiale. [Kuang-Hua et Hung-Yen (1997)] ont développé un modèle de précision dimensionnelle par la méthode de surface de réponse pour l'usinage en fraisage périphérique sans lubrification d'un alliage d'aluminium, sous l'influence de la dureté Brinell du matériau à usiner, de la vitesse de coupe, de l'avance par dent, de la profondeur de coupe axiale et de la profondeur de coupe radiale. [Darwish et El-Tamimi (1997)] ont présenté une étude concernant le développement d'un modèle de surface de réponse de la rugosité pour le tournage du super alliage au nickel 718 (300 BHN), utilisant différentes matières d'outil : CBN (nitrure de bore cubique), carbure et céramique sous les conditions d'usinage à sec avec un rayon d'outil à bout sphérique constant. Le modèle est développé en termes de vitesse de coupe, d'avance par dent et de profondeur de coupe axiale. Ils ont étudié ces variables à travers les plans d'expérience utilisant la méthodologie de surface de réponse. Un modèle de rugosité de surface correspondant à chaque type d'outil est présenté. [Songmene et al. (1998)] se sont servis de ce dernier modèle pour étudier l'influence de l'avance, de la vitesse de

2.8. APPLICATION DES PLANS D'EXPÉRIENCE POUR L'ÉTUDE DES PROCÉDÉS DE COUPE

coupe et de la profondeur de coupe axiale sur la rugosité des pièces en composite d'aluminium GrA-Ni, usinées en tournage. Le matériau d'outil utilisé est le diamant poly-cristalin (PCD). [Choudhury et El-Baradie (1999)] ont utilisé cette technique pour étudier l'effet de l'avance, de la vitesse de coupe et de la profondeur de coupe axiale sur la durée de vie de l'outil, la rugosité de surface et les efforts de coupe, pendant l'usinage en tournage de l'inconel 718. Pour [Davim (2001)], l'objectif d'une de ses recherches est l'établissement d'une corrélation entre la vitesse de coupe, l'avance par dent et la profondeur de coupe axiale avec l'évaluation de la rugosité Ra et Rt. Il présente une étude sur l'influence des conditions de coupe sur la rugosité de surface en tournage, le matériau usiné est l'acier 9SMnPb28k (DIN), sa technique se base sur le plan d'expérience de Taguchi.

2.9 Optimisation

2.9.1 Introduction

La résolution de problèmes d'optimisation est devenue un sujet central dans l'étude de la plupart des processus, le nombre de problèmes d'aide à la décision pouvant être formalisé sous la forme d'un problème d'optimisation étant en forte croissance.

Ce chapitre présente un état de l'art des méthodes d'optimisation aussi bien pour les problèmes mono-objectifs que pour les problèmes multi-objectifs. Un intérêt particulier est apporté à quelques méthodes d'optimisation mentionnées en rouge dans la figure 2.3 qui constituent la partie principale de ce travail de thèse.

L'optimisation consiste à trouver le maximum ou le minimum d'une fonction, c'est-à-dire la valeur de x qui produit la plus grande (ou la plus petite) valeur de $y = f(x)$. Ici, $y = f(x)$ est appelée fonction objectif. Cette fonction peut être contrainte, c'est-à-dire sujette à une autre fonction qui limite ses arguments.

Pour explorer les différentes méthodes d'optimisation, nous considérons le cas d'une optimisation mono-objectif. Nous distinguons trois familles de méthodes d'optimisation mono-objectif :

- Les méthodes déterministes,
- Les méthodes probabilistes,
- Les méthodes non déterministes.

La notion de surface de Pareto est exploitée dans la partie suivante. Elle a pour but de définir le domaine de variation de deux indicateurs d'usinage en présentant des fronts de Pareto.

Les modèles empiriques obtenus par la méthode des plans d'expériences seront utilisés dans l'optimisation mono et multi-objectif du processus d'usinage. Le but est de chercher un compromis entre plusieurs réponses ou mesures constatées au cours d'usinage. Dans notre cas, ces objectifs s'appliquent sur l'état de surface, la productivité, les efforts de coupe et les vibrations. Les algorithmes génétiques seront l'outil efficace pour la recherche d'un compromis. Ensuite, les solutions optimales multi-objectif de Pareto sont générées pour être utilisées dans l'optimisation du procédé d'usinage et ceci en utilisant des algorithmes génétiques ou les surfaces de réponse.

2.9.2 Optimisation multi-objectif

L'optimisation multi-objectif cherche à optimiser plusieurs composants d'un vecteur de fonctions coût. Contrairement à l'optimisation uni-objectif, la solution d'un problème multi-objectif (PMO) n'est pas une solution unique, mais un ensemble de solutions, connu comme l'ensemble des solutions Pareto optimales (*PO*). Toute solution de cet ensemble est optimale dans le sens qu'aucune amélioration ne peut être faite sur un composant du vecteur sans dégradation d'au moins un autre composant du vecteur. Le premier but dans la résolution d'un problème multi-objectif est d'obtenir l'ensemble des solutions Pareto optimales ou bien échantillonner des solutions diversifiées dans l'ensemble *PO*. La détermination de l'ensemble *PO* est la première phase dans la résolution pratique de *PMO*, qui peut être suivie dans un deuxième temps du choix d'une solution à partir de cet ensemble

suivant des préférences choisies par le décideur. Le choix d'une solution par rapport à une autre nécessite la connaissance du problème et de nombreux facteurs liés au problème.

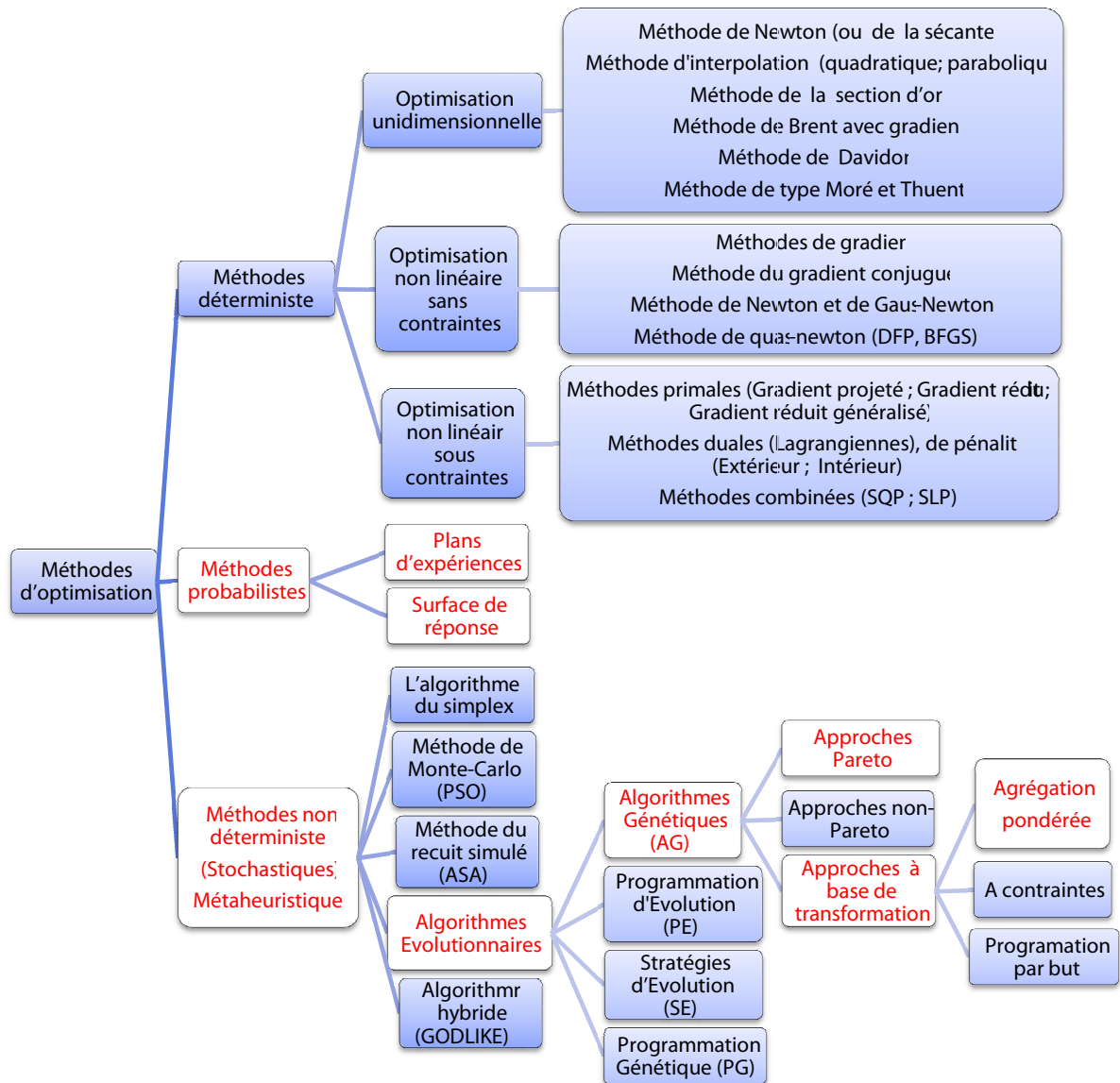


FIGURE 2.3 – Méthodes d'optimisation

2.9.2.1 Définitions

Généralement, un problème d'optimisation multi-objectif s'écrit sous la forme suivante :

Minimiser :

$$f(x); f \in R; \text{ avec } f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)]$$

Telle que les contraintes :

$$h_j(x) \leq 0; j = 1, \dots, m; x \in S \subset R^n \quad (2.24)$$

soient satisfaites.

Le vecteur $x \in R^n$ a pour composantes (x_1, x_2, \dots, x_n) qui sont les inconnues du problème, et S : représente l'ensemble des solutions de x dans R^n . La fonction $f(x)$ est appelée fonction objectif (ou fonction économique) et l'ensemble des conditions $h_j(x) \leq 0$ ($j = 1, \dots, m$) sont les contraintes du problème.

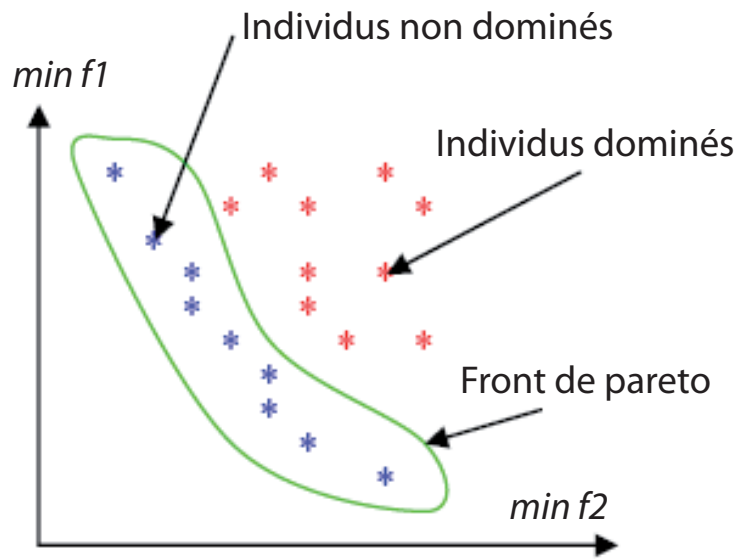


FIGURE 2.4 – Identification des solutions optimales au sens de Pareto optimal

La figure 2.4, présente le cas d'optimisation multi-objectif de deux fonctions f_1 et f_2 dans le but de leurs minimisations : le front de Pareto est l'ensemble des points non dominés qui constituent les solutions optimales au sens de Pareto optimal.

2.9.3 Surface de réponse

Les courbes d'iso-réponse sont créées en ajustant une fonction de surface de réponse en 3D à un nuage de points en 3D ; les courbes d'iso-réponse obtenues sont ensuite projetées sur le plan X-Y. Comme pour les surfaces de réponse, les courbes d'iso-réponse nous permettent d'examiner la relation entre trois variables dans un tracé. Un tracé de courbes d'iso-réponses superposées va projeter plusieurs tracés de courbes d'iso-réponse en 3D sur un même plan X-Y. Ce type de tracé est important dans les paramétrages industriels pour visualiser les résultats d'une expérience avec plusieurs réponses.

Dans notre étude, un problème courant qui se pose lors de l'usinage consiste à identifier un ensemble de conditions de coupe, qui va permettre d'obtenir la pièce usinée désirable en termes d'intégrité de surface. Dans la mesure où chaque réponse du processus est

importante, il est nécessaire d'optimiser toutes ces réponses simultanément, et non une à une. Par exemple, on souhaite maximiser la productivité tout en minimisant la rugosité de surface. Il va donc falloir trouver les paramètres de coupe qui permettent d'obtenir le meilleur compromis. On peut traiter ce type de problème à l'aide des Courbes d'Iso-réponse Superposées. Sur le graphe d'optimisation, une zone de couleurs différentes correspond à la région qui satisfait aux critères des deux réponses.

2.9.4 Algorithmes génétiques

L'algorithme génétique (AG) est une recherche non traditionnelle et une méthode d'optimisation, qui est devenue populaire en ingénierie d'optimisation. Il imite les principes de la génétique et du principe darwinien de la sélection naturelle (c'est-à-dire la survie du plus apte) comme le montre la figure 2.5. L'algorithme génétique simple (AGS) appelé aussi mono-objectif, convient pour les problèmes d'optimisation avec une seule fonction objective. Dans ce cas d'étude, il est question de trouver le meilleur modèle, qui correspond généralement au minimum global (ou maximum). La plupart des problèmes réels impliquent à la fois l'optimisation multi-objective de plusieurs fonctions (un vecteur). Ces problèmes du point de vue conception sont différents de ceux optimisant une seule fonction objective. Dans le cas d'optimisation multi-objectif des fonctions, il n'existe pas une solution qui soit la meilleure (optimum global) à l'égard de tous les objectifs. Au lieu de cela, il pourrait exister un ensemble de solutions optimales qui sont toutes aussi bonnes. Ces solutions sont connues sous le nom de solutions optimales (non-dominées) de Pareto.

Un ensemble de Pareto, par exemple, pour un problème de fonctions à deux objectifs, est décrit par un ensemble de points de telle sorte qu'en se déplaçant d'un point à un autre, on améliore une fonction objectif, tandis que l'autre se dégrade. Le choix d'une solution parmi les autres nécessite plus de connaissances du problème, qui est souvent intuitive et non quantifiable. Cependant, le front de Pareto est très utile car il réduit les choix et aide le décideur dans la sélection d'un point de fonctionnement souhaité (appelé la solution préférée) parmi l'ensemble (limité) des points optimaux de Pareto.

Depuis les premiers travaux de [Schaffer (1985)] au milieu des années 80, un certain nombre d'approches d'optimisation multi-objectif évolutionnaire a été proposé : NSGA [Goldberg (1989)], NPGA [Horn (1994)], SPEA [Zitzler (1999)], NSGA II [Srinivas (1994) et Deb (2000)], PESA [Corne (2000)] ou encore SPEA2 [Zitzler (2001)]. Dans une étude comparative, [Khare (2002)] compare les performances des trois algorithmes les plus populaires : SPEA2, PESA et NSGA-II. Ces trois approches sont élitistes, c'est-à-dire que les meilleures solutions non dominées trouvées sont sauvegardées dans une archive afin d'assurer la préservation de bonnes solutions. Cette étude comparative a été menée sur différents problèmes, avec pour mesure de qualité les deux critères importants pour un algorithme multi-objectif : se rapprocher le plus possible du front de Pareto et obtenir une bonne dispersion des solutions sur ce front. Les résultats de cette étude (qui ont été confirmés dans [Zitzler (2001) et Bui et al. (2004)]) montrent qu'aucun des algorithmes ne domine les autres au sens de Pareto.

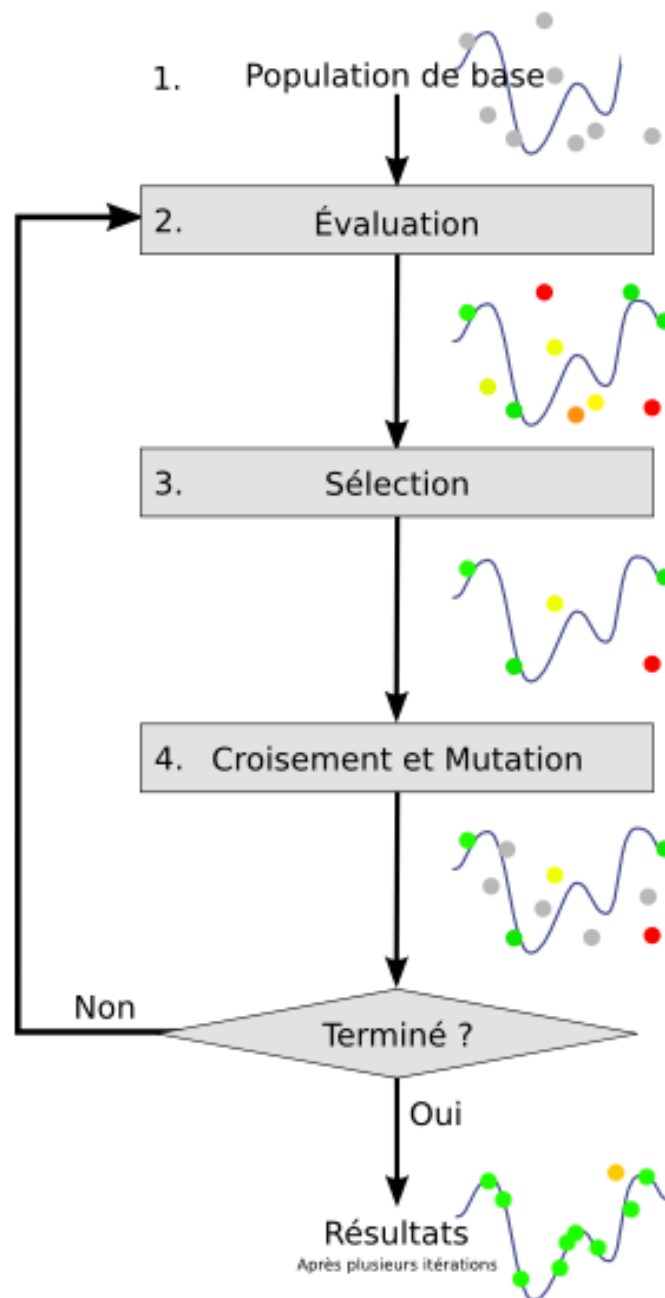


FIGURE 2.5 – Schéma d’algorithme génétique d’optimisation

2.9.4.1 NSGA-II

NSGA-II est une version modifiée de l’algorithme NSGA [Srinivas (1994)]. C’est une approche rapide, élitiste et sans paramètres qui manipule une population de solutions et utilise un mécanisme explicite de préservation de la diversité. Initialement, une population

parent P_0 de N solutions (ou individus) est créée aléatoirement. Cette population est triée sur une base de non-dominance à l'aide d'un algorithme rapide. Ce tri associe un rang de dominance à chaque individu. Les individus non dominés ont un rang de 1 et constituent le front $F1$. Les autres fronts F_i sont ensuite définis récursivement en ignorant les solutions des fronts précédemment détectés. Ce tri est illustré sur la figure 3 (à gauche) dans le cas d'un problème à deux objectifs ($f1, f2$), où pour une population de 16 individus, 3 fronts sont détectés.

2.9.4.2 Algorithme GODLIKE

Le mot GODLIKE signifie : Global Optimum Determination by Linking and Interchanging Kindred Evaluators [Oldenhuis (2010)]. GODLIKE est un algorithme à libre accès développé sous Matlab. L'algorithme utilise simultanément les quatre méthode suivante :

- algorithme génétique (Genetic Algorithm GA) ;
- la méthode de Monté-Carlo (Particle Swarm Optimization PSO) ;
- la méthode de recuits simulés (Adaptive Simulated Annealing ASA) ;
- les méthodes évolutionnistes (Differential Evolution DE).

Il pallie les insuffisances des uns par les performances des autres. Selon l'auteur [Oldenhuis (2010)], le but de l'algorithme n'est pas de réduire le nombre d'évaluations de la fonction objectif. Il vise à augmenter sa robustesse. L'algorithme n'est donc pas adapté à la résolution du problème d'optimisation où l'évaluation de la fonction objectif est coûteuse. Dans nos travaux, nous avons procédé par une approximation mathématique des fonctions objectifs.

2.10 Optimisation du processus d'usinage

Optimiser, c'est rechercher la solution la plus satisfaisante tout en respectant un certain nombre de contraintes. Dans le cas d'une mise en oeuvre d'une nouvelle production ou d'une amélioration d'une production existante, il peut être nécessaire d'optimiser le choix des paramètres de coupe. Il existe de nombreux critères selon lesquels on peut optimiser les paramètres de coupe mais on ne présentera ici que les trois plus utilisés :

- coût minimum d'usinage,
- temps minimal d'usinage cadence maximale de fabrication,
- volume de copeau donné par arête de coupe.

L'algorithme génétique est utilisé dans sa forme initiale mais aussi dans d'autres formes quand il est question d'améliorer une performance et donc la maximiser. Ensuite, le cas d'optimisation en 3D est traité. Pour cela, l'objectif est de chercher l'ensemble des solutions idéales permettant d'avoir un minimum d'effort de coupe, vibration, temps d'usinage et de rugosité de surface, et un maximum de productivité.

Dans l'ordre de s'assurer que les résultats sont physiquement significatifs, des contraintes sur les paramètres du procédé de tournage (a_p, f, Vc) sont ajoutées aux modèles. Ces contraintes sont nécessaires pour que les paramètres du procédé restent dans des limites raisonnables garanties par le plan d'expérience validé.

Les fonctions considérées sont les modèles étudiés dans le chapitre précédent avec une pondération à la valeur max de la fonction dans le domain étudié, établies en fonction des paramètres de coupe. Il s'agit donc, de (Ra, Tu, Pu, Fz, Az, Q) . Ces fonctions devraient varier entre 0 et 1, ceci est vérifié quelle que soit la valeur des variables.

le choix des fonctions f_1 et f_2 : ce choix dépendra des fonctions à étudier, Les différents problèmes traités sont illustrés dans le tableau suivant :

Optimisation mono-objectif

Tout dépendra de l'objectif ciblée, l'optimisation mono-objectif pourra être soit la minimisation ou de maximisation de cette objective. Les différents objectifs envisagés sont :

- réduire la rugosité de surface Ra , pour améliorer l'état de surface ;
- réduire les accélérations Pu ;
- réduire les accélérations Tu ;
- augmenter la productivité et le débit copeaux Q ;
- réduire les accélérations Az ;
- réduire les efforts de coupe Fz .

Optimisation multi-objectif combinée avec somme pondérée

Le but de cette optimisation est d'introduire la notion d'aide à la décision au cours de l'optimisation, elle est basée sur une somme pondérée des fonctions objectives :

$$F_{obj} = \left\{ x_{Ra} \frac{Ra}{Ra_{\max}} + x_{Pu} \frac{Pu}{Pu_{\max}} + x_{Tu} \frac{Tu}{Tu_{\max}} + x_{Fz} \frac{Fz}{Fz_{\max}} + x_{Az} \frac{Az}{Az_{\max}} + x_Q \frac{Q_{\max} - Q}{Q_{\max}} \right\}$$

avec $x_{Ra}, x_{Pu}, x_{Tu}, x_{Fz}, x_{Az}, x_Q$ sont des facteurs de pondération qui permettent de privilégier tel ou tel objectif en fonction des besoins.

Exemples :

- si on cherche un meilleur état de surface Ra (*min*) (cas d'une opération de finition), on choisit $x_{Ra} = 1$;
- si on cherche une production maximum Q (*max*), (cas d'une opération de d'ébauche) on choisit $x_Q = 1$;
- si on cherche un compromis entre l'état de surface et la production, on choisit $x_Q = 0,5$ et $x_{Ra} = 0,5$.

Avec $x_{Pu}, x_{Tu}, x_{Fz}, x_{Ra}$ sont des facteurs de pondération qui permettent de choisir les poids des objectifs en fonction de la configuration recherchée.

Chapitre 3

Application sur un acier 100Cr6

3.1 Introduction

Le tournage est l'un des procédés d'usinage les plus utilisés dans l'industrie mécanique. Ainsi, le choix des paramètres de coupe optimaux est très important afin d'assurer un meilleur état de surface des pièces usinées, la durée de vie des outils de coupe et une productivité plus élevée. Le résultat d'un bon choix de conditions de coupe peut être constaté par une diminution des niveaux d'efforts de coupe et de vibrations de l'outil.

Un grand nombre d'études sur la rugosité de surface, l'usure de l'outil de coupe, les efforts de coupe, liée à des opérations de tournage ont été menées. [Choudhury (2004)] ont utilisé la méthode de surface de réponse (RSM) avec un plan factoriel pour prédire la rugosité de surface lors d'un usinage des matériaux à haute résistance. Horng et al Horng (2008) ont étudié l'usinabilité d'un acier dur Al_2O_3/TiC en tournage avec un outil mixte à base de céramique par la méthode de surface de réponse. [Mansour (2002)] ont utilisé un modèle multiplicatif pour prédire la rugosité de surface en fonction des paramètres de coupe et des vibrations de l'outil. Par ailleurs, la modélisation de la coupe peut être développée en utilisant des approches classiques telles que la régression linéaire ou des méthodes basées sur l'intelligence artificielle. Ces dernières utilisent des approches non-conventionnelles telles que les réseaux de neurones artificiels (ANN), la logique floue (FL) et les algorithmes génétiques (GA) [Balasubramanian et Lakshminarayanan (2009), Sharif (2010), Sahasrabudhe (2003)].

L'objectif de cette étude est, d'une part d'étudier les effets des paramètres de coupe (vitesse de coupe, profondeur de passe et avance par tour) sur l'état de surface des pièces usinées, la productivité, les efforts de coupe, la dynamique de la coupe et, d'autre part de choisir les paramètres de coupe optimaux en tournage d'un acier (100Cr6) pour une configuration choisie à partir d'un minimum d'essais.

Pour atteindre cet objectif, une combinaison de plusieurs méthodes : statistiques, analytiques, et expérimentales a été mise en oeuvre. La méthode de régression linéaire a permis d'obtenir une modélisation mathématique des paramètres de coupe. Pour chacun des modèles, un test de « Student » a été appliqué pour sélectionner les paramètres les plus significatifs. Puis, l'analyse de variance (ANOVA) a été utilisée pour vérifier la validité des modèles. Enfin, l'algorithme d'optimisation choisi est un algorithme génétique d'optimisation multi-objectifs (GAO) utilisant la méthode de sommes pondérées.

Plusieurs paramètres peuvent avoir des effets sur le processus d'usinage. Le diagramme d'ISHIKAWA représenté dans l'introduction est un excellent outil, simple et rapide permettant d'identifier ces paramètres qui affectent la qualité du procédé d'usinage. Les paramètres d'usinage : vitesse de coupe V_c , avance par tour f et profondeur de passe a_p , seront variés simultanément lors des essais. Les valeurs de ces paramètres ont été préconisées par le fabricant de la plaquette de coupe "Safety" dans leur catalogue [Safety (2007)].

3.1. INTRODUCTION

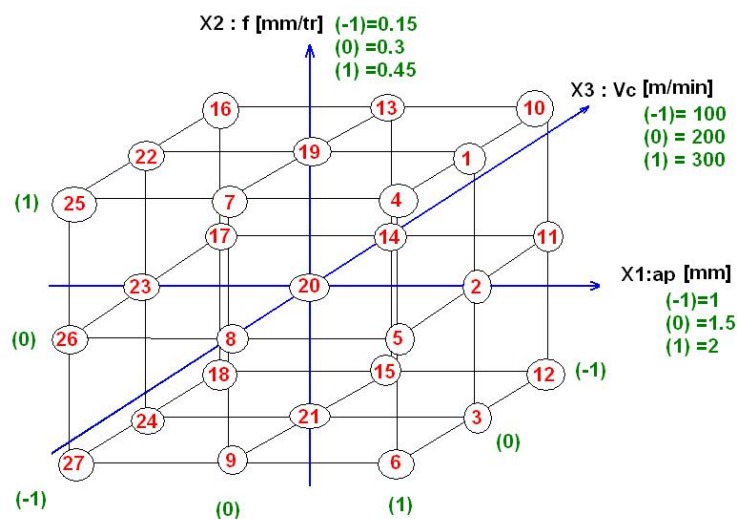


FIGURE 3.1 – Plan d'expérience

Un plan d'expérience factoriel complet (figure 3.1) à 27 essais a été choisi de telle manière à assurer une meilleure précision des résultats. Les trois niveaux de variation des facteurs sont les suivants :

- a_p (1 1,5 2) mm ;
- f (0,15 0,3 0,45) mm/tr ;
- V_c (100 200 300) m/min .

Nous voulons étudier l'influence des ces trois facteurs sur un certain processus dont nous avons des réponses mesurées comme le montre le diagramme expérimental de la figure 3.2.

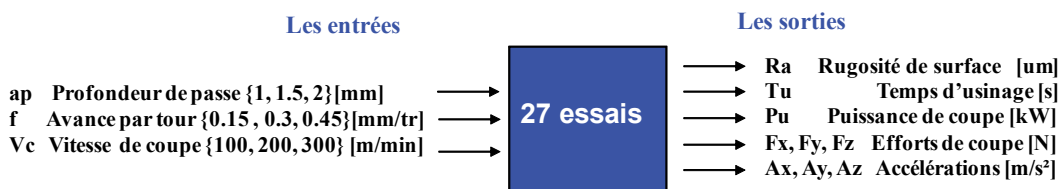


FIGURE 3.2 – Paramètres entrée/sorties

L'organigramme sur la figure 3.3 résume la démarche suivie dans cette étude :

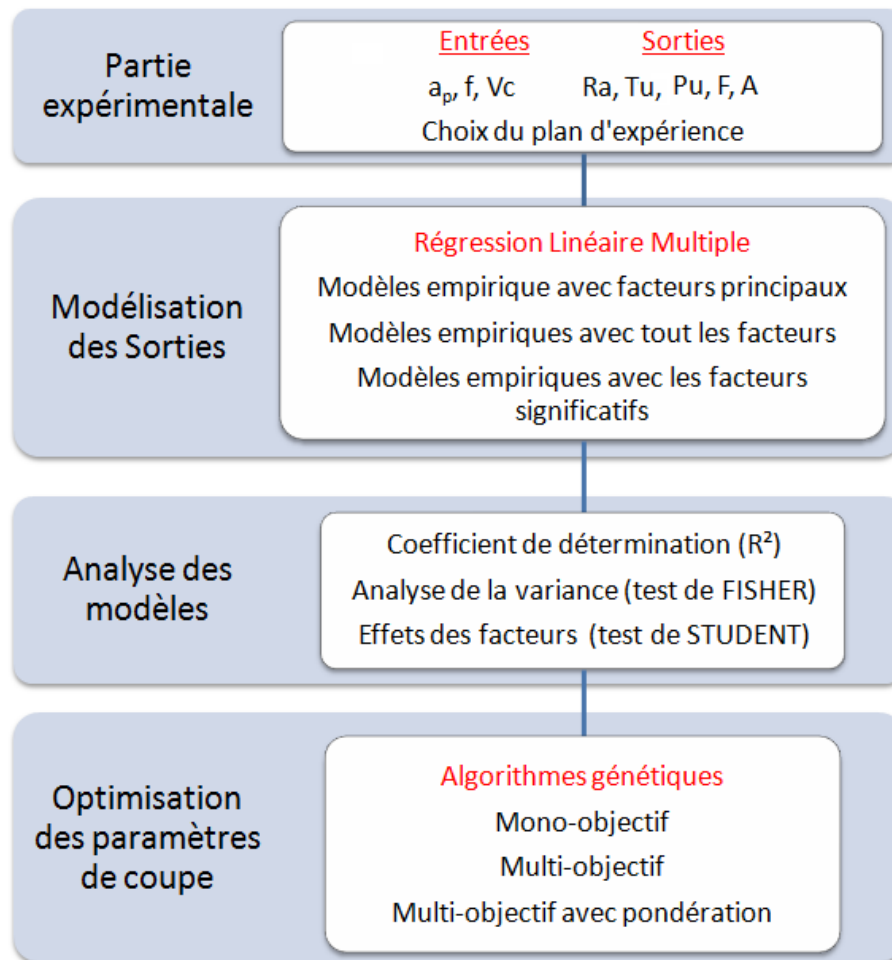


FIGURE 3.3 – Démarche suivie

3.1.1 Environnement expérimental

L'environnement expérimental renferme tous les facteurs maintenus constants pendant les essais, il est composé principalement de :

Machine

Les essais d'usinage ont été réalisés sur un tour à commande numérique type "SOMAB Unimab" 500 d'une puissance de 24 kW et ayant une vitesse de rotation maximale de 2500 tr/min comme le montre la figure 3.4.

Matériau

Au cours de ces essais, nous allons utiliser l'acier 100Cr6. C'est un acier allié ayant une résistance d'environ 850 Mpa et une dureté de 217 HB. Il peut être utilisé à l'état traité,

3.1. INTRODUCTION



FIGURE 3.4 – Machine utilisée (Tour SOMAB 500)

recuit ou trempé pour la fabrication de roulement à billes.

Outil de coupe

la plaquette utilisée est de géométrie CNMG M5 d'utilisation générale de rayon 0,8 mm (voir annexe 2), montée sur un porte plaquette DCLN2525M12. c'est une géométrie dédiée à une large plage d'utilisation. figure (3.5)

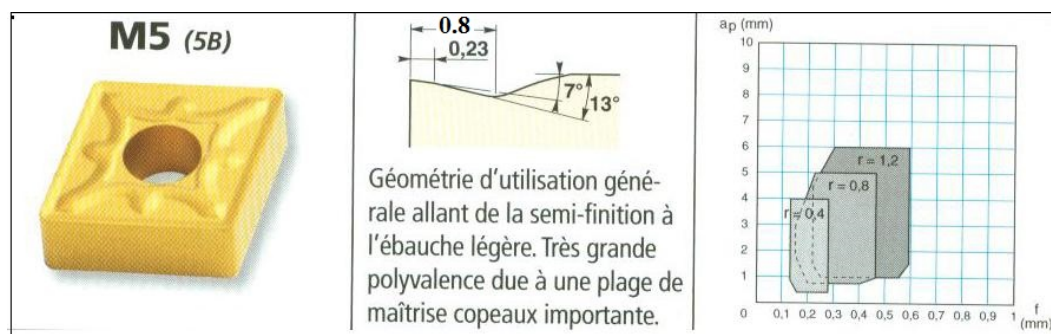


FIGURE 3.5 – Plaquette utilisée (CNMG M5)

3.1.2 Réponses du système (facteurs de sortie)

Les réponses mesurées sont :

État de surface (Ra)

Afin de vérifier la qualité de l'usinage, après chaque essai, la surface de la pièce est nettoyée à l'alcool et son état est caractérisé par la mesure de la moyenne arithmétique du profil de rugosité, notée Ra , à l'aide d'un rugosimètre de marque "Mahr perthometer". Le contrôle est effectué à chaque fois sur une longueur de $17,5\text{ mm}$ et selon la direction parallèle à l'avance de l'outil de coupe dans la matière (direction Z de la machine). L'intervalle d'incertitude dû à l'utilisation du rugosimètre est de 9% . La rugosité de surface est mesurée sur 3 points différents de la surface de la pièce et prise sur une même ligne à environ 120° , pour obtenir une valeur moyenne de la rugosité.

Puissance de coupe (Pu)

Au cours de chaque passe d'usinage, la valeur moyenne de la puissance de coupe a été relevée en utilisant un wattmètre intégré dans la machine au niveau du système d'alimentation. Cette mesure est réalisée avec une incertitude de 20% .

Efforts de coupe (F)

Une table d'effort Kistler est installée pour mesurer les efforts de coupe selon les 3 directions : axiale (F_x), radiale (F_y) et tangentielle (F_z).

Pour enlever de la matière en usinage, il faut imposer à l'outil un effort F qui peut être décomposé, dans le cas du chariotage [Altintas (2000)] selon la figure II-14, en :

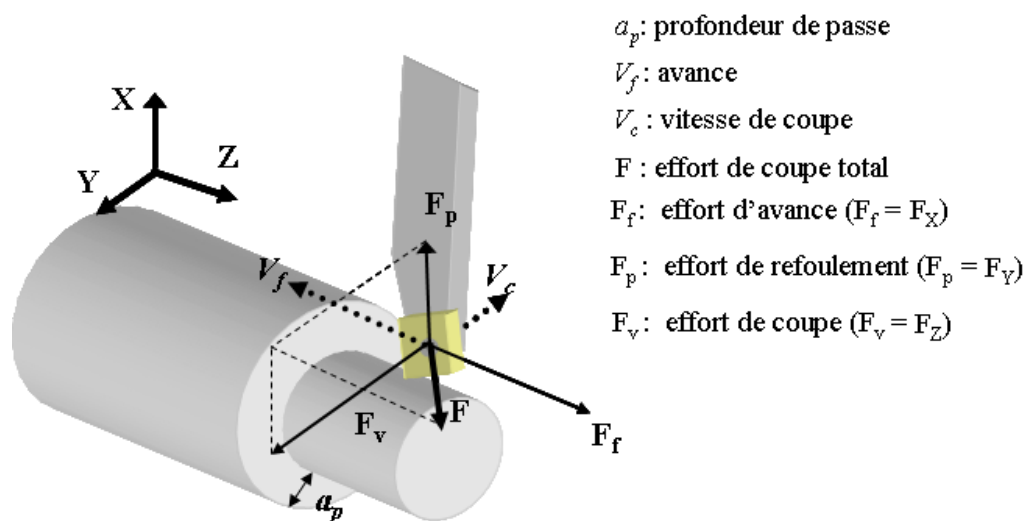


FIGURE 3.6 – Décomposition de l'effort de coupe (coupe orthogonale) [Altintas (2000)]

3.1. INTRODUCTION

- Un effort de coupe F_v (F_z), projection de F sur la direction du mouvement primaire,
- Un effort d'avance F_f (F_x), projection de F sur la direction du mouvement d'avance,
- Un effort de refoulement F_p (F_y), perpendiculaire aux deux directions précédentes.

Temps d'usinage (T_u)

Le temps d'usinage représente le temps de coupe mesuré directement dans le contrôleur de la machine outil (contacte outil/matière), excluant les déplacements en mode rapide, les approches et les retraits d'outil.

Vibrations de l'outil de coupe (A)

Dans cette application, un accéléromètre piézoélectrique triaxial de Brüel et Kjaer de type 4520 a été utilisé, et dont les sensibilités selon ses trois axes de mesure sont les suivantes :

- Selon l'axe x : $1,032 \text{ mV/ms}^{-2}$
- Selon l'axe y : $1,067 \text{ mV/ms}^{-2}$
- Selon l'axe z : $1,045 \text{ mV/ms}^{-2}$

La position de l'accéléromètre est définie selon les deux critères suivants :

- partie fixe de la machine ;
- proximité de la zone de coupe.

Dans cet esprit, l'accéléromètre utilisé a été fixé sur la tourelle afin de mesurer les réponses vibratoires dans l'outil de coupe selon les trois axes de la machine (x , y et z).

Pendant la phase expérimentale, l'acquisition des réponses vibratoires issues de l'accéléromètre utilisé a été effectuée avec une fréquence d'échantillonnage de 16,38 kHz en utilisant un système d'acquisition et d'analyse type 3560 de Brüel et Kjaer piloté par le logiciel PULSE LABSHOP. Ces réponses vibratoires sont enregistrées pendant la durée de chaque essai d'usinage.

Dans le cas de l'usinage en tournage, les vibrations sont générées par la variation des efforts de coupe, puis elles sont entretenues par les ondulations laissées sur la surface lors de l'enlèvement de la matière au tour précédent [Segreti (2002)]. Le système est ainsi auto-excité. Le principe des vibrations auto-excitées peut être représenté par le schéma suivant :

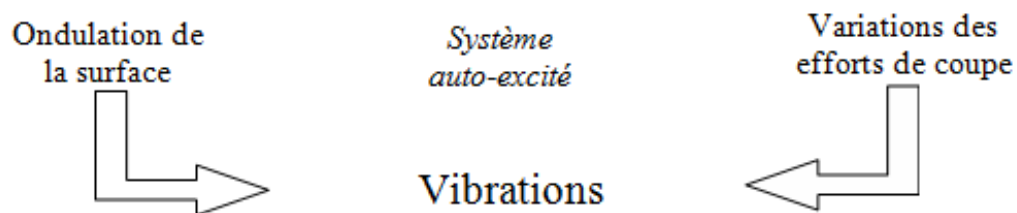


FIGURE 3.7 – Schéma des sources vibratoires en usinage par tournage [Segreti (2002)]

3.2. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Selon la décomposition des efforts de coupe (figure 3.7), nous constatons que le vecteur effort de coupe ($F_v = F_z$) est la composante principale dans le processus de l'usinage. En effet, la variation des efforts de coupe est une source principale des vibrations (3.6), ce qui explique l'amplitude élevée obtenue pour le signal vibratoire acquis suivant la direction Z, ce qui justifie le choix de cette direction pour l'analyse.

Productivité

La productivité est représentée par le débit copeaux Q (cm^3/min) et calculée pour chaque essai par la relation :

$$Q = ap \times f \times Vc \quad (3.1)$$

3.2 Résultats expérimentaux

Les données ont été réorganisées par bloc dans le but d'une meilleure interprétation des résultats comme le montre le tableau 3.1.

3.2. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

TABLE 3.1 – Résultats expérimentaux

a_p	f	Vc	Ra	Tu	Pu	Fx	Fy	Fz	Ax	Ay	Az
1	0,15	100	0,484	46,35	1,00	150	227	547	7,6413	9,4275	12,2509
1	0,15	200	0,457	26,56	1,90	148	186	480	33,3916	36,2301	47,6386
1	0,15	300	0,511	23,36	2,90	169	187	455	41,5854	37,0256	90,7654
1	0,3	100	1,793	24,30	1,70	251	268	904	11,2359	13,3337	19,7482
1	0,3	200	2,049	13,85	3,20	225	212	820	49,588	65,8278	66,9501
1	0,3	300	2,054	12,06	5,10	211	203	806	52,7466	56,6389	149,6158
1	0,45	100	3,442	16,96	2,20	445	315	1159	12,2767	13,8985	18,8094
1	0,45	200	3,652	9,61	4,00	321	234	1033	59,91	81,4903	89,4253
1	0,45	300	3,988	8,29	6,40	301	234	994	109,8874	106,6724	169,5976
1,5	0,15	100	0,856	41,82	2,00	120	400	750	8,0773	10,9374	12,9179
1,5	0,15	200	0,598	29,96	2,70	101	323	682	27,7699	31,009	47,9771
1,5	0,15	300	0,645	25,62	4,30	112	315	696	38,0196	34,4752	87,1003
1,5	0,3	100	3,082	22,61	2,50	243	521	1250	12,0143	16,2299	19,3565
1,5	0,3	200	1,967	15,83	4,60	197	340	1145	47,0024	53,3288	73,3288
1,5	0,3	300	2,516	13,38	7,10	187	367	1135	73,6494	82,9922	119,7132
1,5	0,45	100	4,864	16,20	5,90	437	628	1675	16,9413	21,3106	25,2293
1,5	0,45	200	3,537	11,12	6,60	344	412	1645	58,826	81,6797	98,9062
1,5	0,45	300	4,466	9,29	9,80	350	420	1650	112,7179	173,7419	198,9357
2	0,15	100	1,320	52,00	4,00	141	676	955	10,0672	14,2662	18,7534
2	0,15	200	1,178	32,78	3,40	159	608	866	27,8199	32,0008	49,5799
2	0,15	300	1,203	29,01	5,20	160	600	950	44,5531	39,5303	99,6932
2	0,3	100	2,921	28,26	3,00	240	810	1500	18,1847	25,3559	35,2407
2	0,3	200	2,670	17,52	6,00	203	779	1488	42,6008	54,2019	68,6314
2	0,3	300	2,393	15,26	9,10	468	776	1455	89,3415	110,5889	164,2688
2	0,45	100	6,549	20,35	4,30	378	916	2315	26,0004	34,0002	51,738
2	0,45	200	5,472	12,43	8,00	333	836	2192	85,696	121,8449	157,2322
2	0,45	300	5,811	10,68	13,70	461	618	2172	189,4356	278,0139	347,1723

3.3 Modèles de régression linéaire

Sur la base des résultats d'investigations menées, la régression linéaire et l'analyse de variance (ANOVA) ont été utilisées pour déterminer les modèles de sortie, et les facteurs influents pour chaque sortie (Ra , Tu , Pu , Fz , Az) en fonction des entrées (a_p , f , Vc).

Dans cette partie, trois types de modèles ont été développés :

1. Modèles avec facteur principaux : Il s'agit de trouver les modèles approprié exprimant les sorties (Ra , Tu , Pu , Fz , Az) en fonction des paramètres procédé influents (a_p , f , Vc). L'étude du modèle linéaire du premier degré sans interactions est analysée en premier temps, cette étude permet d'avoir une première idée sur l'influence des facteurs a partie des coefficients normalisés.
2. Modèles avec facteurs principaux et interactions : Ces modèles prend en compte tous les facteurs avec toutes les interactions
3. Modèles avec facteurs principaux et interactions influents (stepwise) : Les modèles de régression ne prenant en compte que des paramètres significatifs ont été déterminé par la méthode de sélection pas à pas "Stepwise". Les variables sont introduites progressivement dans le modèle selon un critère basé sur l'augmentation du coefficient R^2 , leur sélection peut être remise en cause après introduction d'une nouvelle variable selon le même critère (R^2). Cette sélection est élaborée à l'aide d'un test de Fisher, supposant la normalité des erreurs.

Le tableau 3.12 montre les modèles de régression et les facteurs influents pour chaque sortie selon les trois types de modélisation.

TABLE 3.2 – Modèles de régression

<i>Modèles empirique avec facteurs principaux</i>	R^2 adj.
$Ra = -2,8825 + 1,23 * a_p + 12,78 * f - 9,57E - 04 * Vc$	0,913
$Tu = 50,4615 + 4,10 * a_p - 71,31 * f - 6,77E - 02 * Vc$	0,843
$Pu = -7,7129 + 3,14 * a_p + 12,40 * f + 2,05E - 02 * Vc$	0,823
$Az = -179,36 + 36,38 * a_p + 255,69 * f + 0,67 * Vc$	0,75
$Fz = -797,94 + 743,88 * a_p + 3131,11 * f - 0,41 * Vc$	0,926
<i>Modèles empiriques avec tous les facteurs</i>	R^2 adj.
$Ra = -1,83 + 0,47 * a_p + 5,60 * f + 5,06E - 03 * Vc + 5 * a_p * f - 3,69E - 03 * a_p * Vc - 1,60E - 03 * f * Vc$	0,934
$Tu = 57,43234 + 7,66 * a_p - 97,47 * f - 0,12 * Vc - 9,90 * a_p * f - 2,93E - 03 * a_p * Vc + 0,20 * f * Vc$	0,865
$Pu = 3,22 - 1,45 * a_p - 12,03 * f - 1,761E - 02 * Vc + 7,33 * a_p * f + 0,0 * a_p * Vc + 6,72E - 02 * f * Vc$	0,917
$Az = 152,98 - 99,33 * a_p - 608,41 * f - 0,33 * Vc + 289,93 * a_p * f + 0,24 * a_p * Vc + 2,14 * f * Vc$	0,98
$Fz = 324,38 - 44,77 * a_p - 339,99 * f - 0,51 * Vc + 2448,88 * a_p * f + 0,26 * a_p * Vc - 1,01 * f * Vc$	0,991
<i>Modèles empiriques avec les facteurs significatifs (stepwise)</i>	R^2 adj.
$Ra = -1,2264 + 6,43 * f + 4,23 * a_p * f$	0,93
$Tu = 62,7703 + 4,10 * a_p - 112,34 * f - 0,12 * Vc + 0,20 * f * Vc$	0,87
$Pu = -3,80 + 3,14 * a_p + 6,54E - 02 * f * Vc$	0,89
$Az = -49,81 + 0,17 * a_p * Vc + 1,37 * f * Vc$	0,85
$Fz = 235,44 - 317,30 * f + 2475,23 * a_p * f - 1,32 * f * Vc$	0,99

Dans la suite de l'étude, les modèles empiriques avec les facteurs significatifs seront développés.

3.4. MODÈLES AVEC LES FACTEURS INFLUENTS ET INTERACTIONS (STEPWISE)

3.4 Modèles avec les facteurs influents et interactions (step-wise)

3.4.1 Modèle de rugosité de surface Ra

Le modèle de rugosité de surface Ra est donné par l'équation 3.2 :

$$Ra = -1,2264 + 6,4383 * f + 4,2338 * a_p * f \quad (3.2)$$

La figure 3.8 montre la comparaison entre les résultats expérimentaux et le modèle théorique de régression.

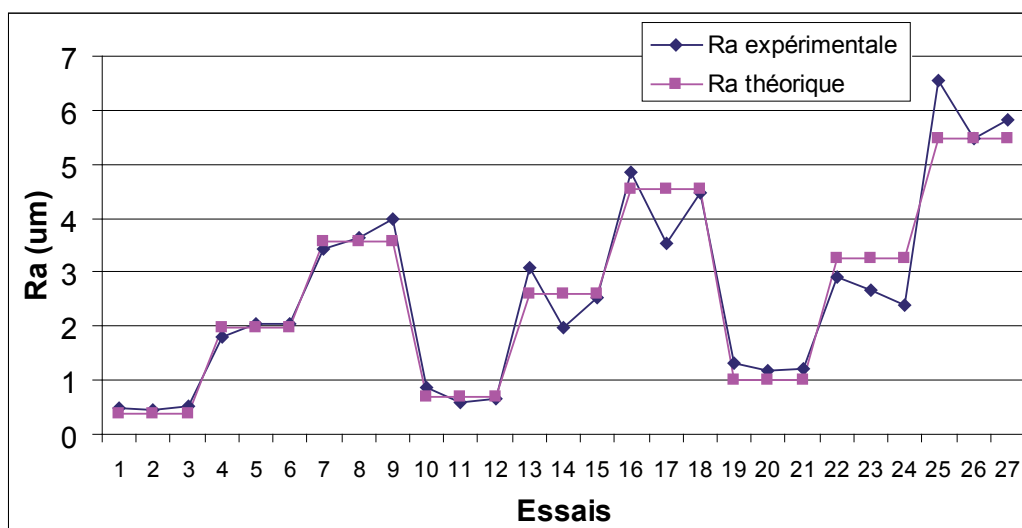


FIGURE 3.8 – Rugosité de surface Ra : comparaison expérimentale / modèle

La valeur du coefficient de détermination R^2 de ce modèle est égale à 0,942. Cela signifie que 94,2% des variations de rugosité sont expliquées par ce modèle et que 5,8% restent par conséquent inexpliquées. La valeur du coefficient de détermination ajusté de ce modèle de vibration est $R_{adj}^2 = 93,7\%$. Il représente une correction du R^2 qui permet de prendre en compte le nombre de variables utilisées dans le modèle. Ces deux coefficients montrent une bonne corrélation entre ce modèle et les données expérimentales.

L'analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée avec un intervalle de confiance de 95 % ($\alpha = 5\%$) est donnée par le tableau 3.3. Le test de FISHER (F) est calculé pour le modèle et sa valeur est : $F = 193,54$. Cela signifie que la part de la variance de vibration expliquée par le modèle est 193,54 fois plus importante que la part de la variance de vibration qui reste inexpliquée. Comme indiqué dans le tableau 3.3, la probabilité ($Prob > F$) associée au test de FISHER (F) est de 0,0001. Cela signifie que le risque de la non signification du modèle est de 0,01%, ce qui est négligeable. En conclusion, l'analyse de la variance a permis de qualifier le modèle retenu. Le test de STUDENT (t) a été utilisé pour estimer les effets des facteurs du modèle de rugosité Ra comme le montre le tableau 3.3. La probabilité

3.4. MODÈLES AVEC LES FACTEURS INFLUENTS ET INTERACTIONS (STEPWISE)

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	74,712	37,356	193,546	< 0,0001
Erreur	24	4,632	0,193		
Total corrigé	26	79,345			

Source	Valeur	Ecart-type	t	Pr > t
Constante	-1,226	0,224	-5,482	< 0,0001
a_p	0,000	0,000		
f	6,438	1,181	5,450	< 0,0001
V_c	0,000	0,000		
$a_p * f$	4,234	0,639	6,624	< 0,0001
$a_p * V_c$	0,000	0,000		
$f * V_c$	0,000	0,000		
$R^2 = 0,942$		$R^2_{ajusté} = 0,937$		

TABLE 3.3 – Analyse de la variance du modèle Ra

$Prob > t$ des facteurs les plus significatifs f et $a_p * f$ est égale à 0,0001, ce qui signifie qu'il y a 0.01 chances sur 100 pour que la vraie valeur des coefficients de f et $a_p * f$ soit nulle. Cela confirme l'influence de ces facteurs. Par ailleurs, les coefficients normalisés étudiés montrent que le modèle avec deux termes (f , $a_p * f$) est le plus approprié pour représenter les données expérimentales.

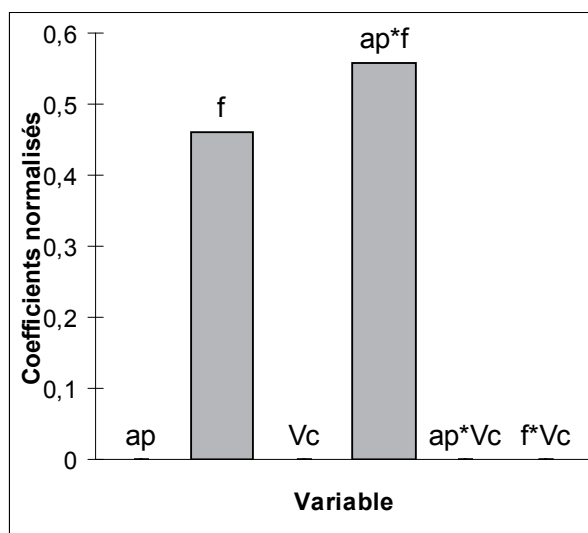


FIGURE 3.9 – Coefficients normalisés

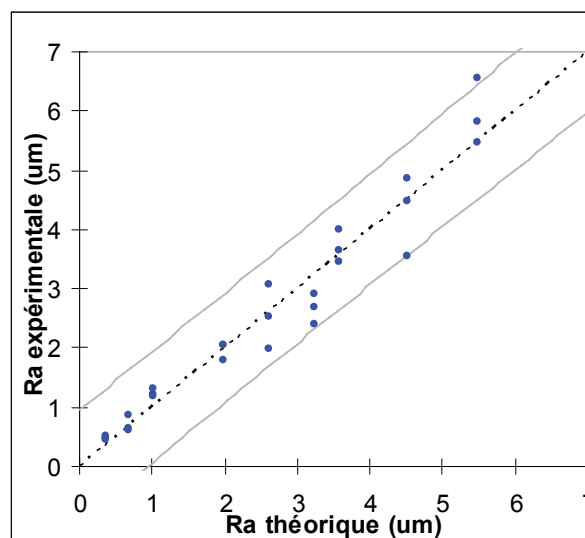


FIGURE 3.10 – Analyse des résidus

La comparaison visuelle du diagramme en bâtons des coefficients normalisés permet de voir les impacts relatifs des paramètres de coupe sur le modèle (Fig. 3.9).

L'analyse des résidus sur la figure 3.10 montre clairement qu'il y a une tendance linéaire car toutes les valeurs sont à l'intérieur de l'intervalle de confiance.

3.4. MODÈLES AVEC LES FACTEURS INFLUENTS ET INTERACTIONS (STEPWISE)

Les paramètres de coupe qui influent sur la rugosité de surface Ra sont : l'avance par tour f et l'interaction profondeur de passe a_p / avance par tour f .

- l'augmentation de l'avance de 100% implique une augmentation de Ra de 100% (pour $a_p = 1 \text{ mm}$);
- l'augmentation de la profondeur de passe a_p de 50% ($a_p = 1,5 \text{ mm}$) implique une augmentation de Ra de 2% (dans ce cas, la vitesse de coupe n'est pas un facteur influent sur la rugosité de surface).

3.4.2 Modèle du temps d'usinage Tu

Le modèle du temps d'usinage Tu est donné par l'équation 3.3 :

$$Tu = 62,7703 + 4,1064 * a_p - 112,3422 * f - 0,1292 * Vc + 0,2051 * f * Vc \quad (3.3)$$

La figure 3.11 montre la comparaison entre les résultats expérimentaux et le modèle théorique de régression.

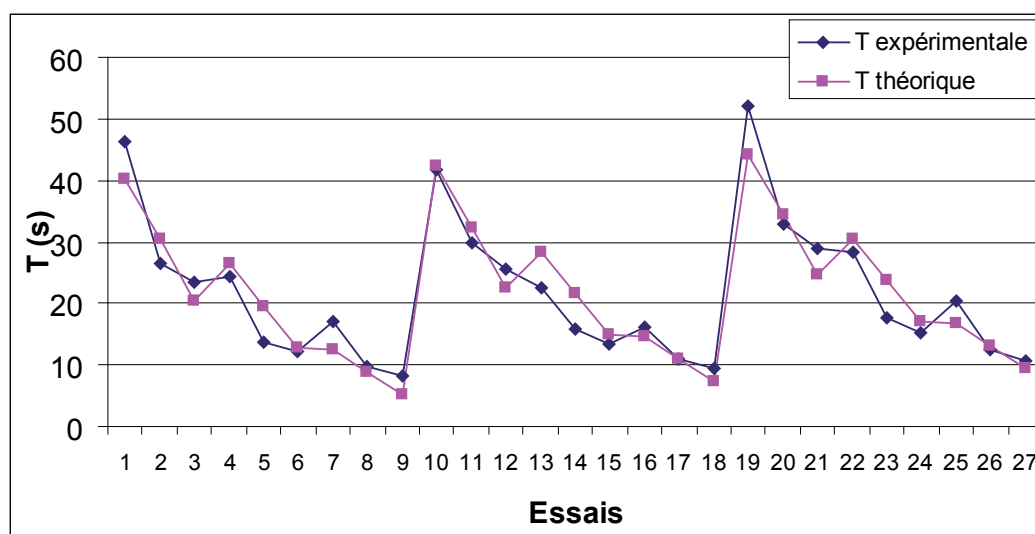


FIGURE 3.11 – Temps d'usinage Tu comparaison expérimentale / modèle

La valeur du coefficient de détermination R^2 de ce modèle est égale à 0,89. Cela signifie que 89% des variations du temps d'usinage sont expliquées par ce modèle et que 11% restent par conséquent inexpliquées. La valeur du coefficient de détermination ajusté de ce modèle de vibration est $R^2_{adj} = 0,87$. Il représente une correction du R^2 qui permet de prendre en compte le nombre de variables utilisées dans le modèle. Ces deux coefficients montrent une corrélation entre ce modèle et les données expérimentales.

L'analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée avec un intervalle de confiance de 95 % ($\alpha = 5\%$) est donnée par le tableau 4.15. Le test de FISHER (F) est calculé pour le modèle et sa valeur est : $F = 46,45$. Cela signifie que la part de la variance de vibration expliquée

3.4. MODÈLES AVEC LES FACTEURS INFLUENTS ET INTERACTIONS (STEPWISE)

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	4	3074,614	768,654	46,459	< 0,0001
Erreur	22	363,989	16,545		
Total corrigé	26	3438,603			
Source	Valeur	Ecart-type	t	Pr > t	
Constante	62,770	6,189	10,143	< 0,0001	
a_p	4,106	1,917	2,142	0,044	
f	-112,342	16,910	-6,643	< 0,0001	
Vc	-0,129	0,025	-5,096	< 0,0001	
$a_p * f$	0,000	0,000			
$a_p * Vc$	0,000	0,000			
$f * Vc$	0,205	0,078	2,621	0,016	
$R^2 = 0,894$		$R^2_{ajusté} = 0,875$			

TABLE 3.4 – Analyse de la variance du modèle Tu

par le modèle est 46,45 fois plus importante que la part de la variance de vibration qui reste inexplicquée. Comme indiqué dans le tableau 4.15, la probabilité ($Prob > F$) associée au test de FISHER (F) est de 0,0001. Cela signifie que le risque de la non signification du modèle est de 0,01%, ce qui est négligeable. En conclusion, l'analyse de la variance a permis de qualifier le modèle retenu. Le test de STUDENT (t) a été utilisé pour estimer les effets des facteurs du modèle du temps d'usinage Tu comme le montre le tableau 4.15. La probabilité $Prob > t$ des facteurs les plus significatifs f et Vc est égale à 0,0001 ce qui signifie qu'il y a 0,01 chances sur 100 pour que la vraie valeur des coefficients de f et Vc soit nulle, suivi par les facteurs $f * Vc$ (0,016) et a_p (0,044). Cela confirme l'influence de ces facteurs. Par ailleurs, les coefficients normalisés étudiés montrent que le modèle avec les termes (f , Vc , $f * Vc$ et a_p) est le plus approprié pour représenter les données expérimentales.

La comparaison visuelle du diagramme en bâtons des coefficients normalisés permet de voir les impacts relatifs des paramètres de coupe sur le modèle (Fig. 3.12). L'analyse des résidus sur la figure 3.13 montre clairement qu'il y a une tendance linéaire car toutes les valeurs sont à l'intérieur de l'intervalle de confiance.

Les paramètres de coupe qui influent sur le temps d'usinage Tu sont : la profondeur de passe a_p , l'avance par tour f , la vitesse de coupe Vc ainsi que l'interaction avance par tour/vitesse de coupe $f * Vc$:

3.4.3 Modèle de la puissance de coupe Pu

Le modèle de la puissance de coupe Pu est donné par l'équation 3.4 :

$$Pu = -3,8052 + 3,1444 * a_p + 6,5427E - 02 * f * Vc \quad (3.4)$$

La figure 3.14 montre la comparaison entre les résultats expérimentaux et le modèle théorique de régression.

3.4. MODÈLES AVEC LES FACTEURS INFLUENTS ET INTERACTIONS (STEPWISE)

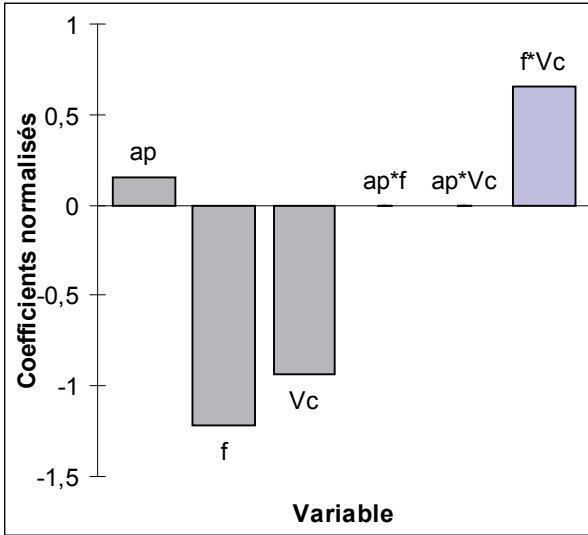


FIGURE 3.12 – Coefficients normalisés

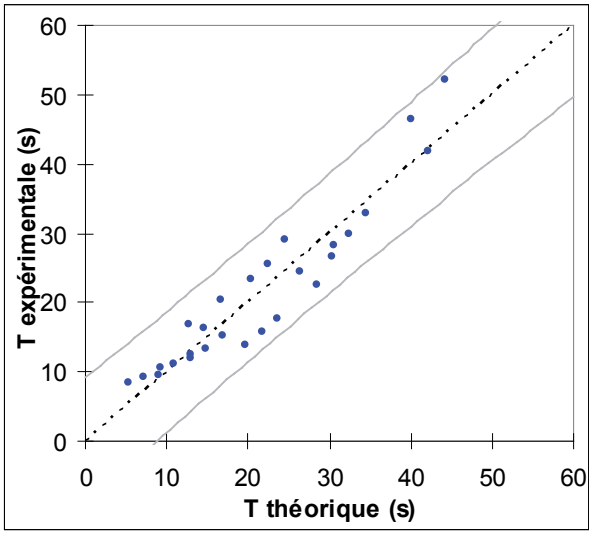


FIGURE 3.13 – Analyse des résidus

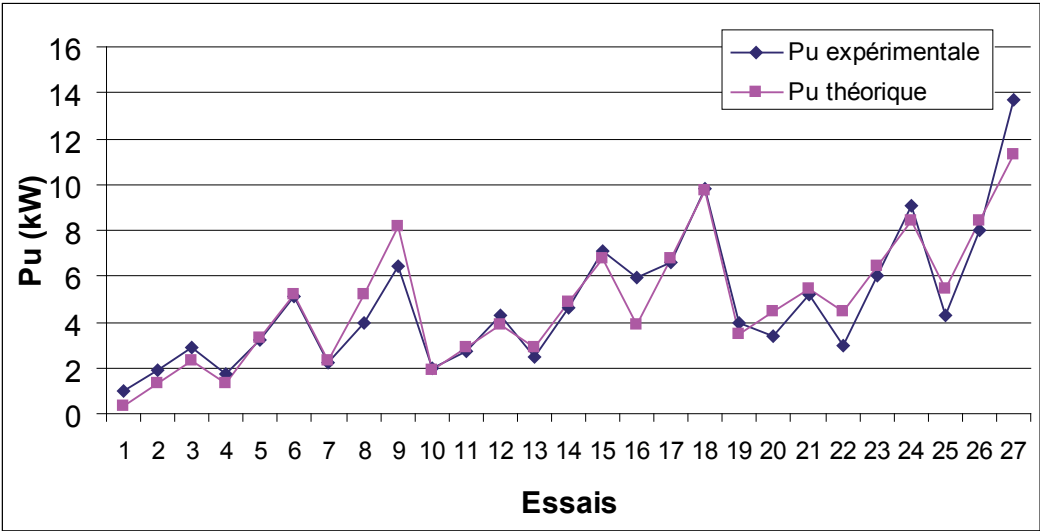


FIGURE 3.14 – Puissance de coupe P_u comparaison expérimentale / modèle

3.4. MODÈLES AVEC LES FACTEURS INFLUENTS ET INTERACTIONS (STEPWISE)

La valeur du coefficient de détermination R^2 de ce modèle est égale à 0,89. Cela signifie que 89% des variations du temps d'usinage sont expliquées par ce modèle et que 11% restent par conséquent inexpliquées. La valeur du coefficient de détermination ajusté de ce modèle de vibration est $R^2_{adj} = 0,89$. Il représente une correction du R^2 qui permet de prendre en compte le nombre de variables utilisées dans le modèle. Ces deux coefficients montrent une corrélation entre ce modèle et les données expérimentales.

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	194,748	97,374	105,769	< 0,0001
Erreur	24	22,095	0,921		
Total corrigé	26	216,843			
Source	Valeur	Ecart-type	t	Pr > t	
Constante	-3,805	0,767	-4,959	< 0,0001	
a_p	3,144	0,452	6,952	< 0,0001	
f	0,000	0,000			
Vc	0,000	0,000			
$a_p * f$	0,000	0,000			
$a_p * Vc$	0,000	0,000			
$f * Vc$	0,065	0,005	12,775	< 0,0001	
$R^2 = 0,898$		$R^2_{ajusté} = 0,890$			

TABLE 3.5 – Analyse de la variance du modèle Pu

L'analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée avec un intervalle de confiance de 95 % ($\alpha = 5\%$) est donnée par le tableau 3.5. Le test de FISHER (F) est calculé pour le modèle et sa valeur est : $F = 105,76$. Cela signifie que la part de la variance de vibration expliquée par le modèle est 105,76 fois plus importante que la part de la variance de vibration qui reste inexpliquée. Comme indiqué dans le tableau 3.5, la probabilité ($Prob > F$) associée au test de FISHER (F) est de 0,0001. Cela signifie que le risque du non signification du modèle est de 0,01% ce qui est négligeable. En conclusion, l'analyse de la variance a permis de qualifier le modèle retenu.

Le test de STUDENT (t) a été utilisé pour estimer les effets des facteurs du modèle du la puissance d'usinage Pu comme le montre le tableau 3.5. La probabilité $Prob > t$ des facteur les plus significatifs a_p et $f * Vc$ est égale à 0,0001 ce qui signifie qu'il y a 0.01 chances sur 100 pour que la vraie valeur des coefficients de a_p et $f * Vc$ soit nulle. Cela confirme l'influence de ces facteurs. Par ailleurs, les coefficients normalisés étudiés montrent que le modèle avec les termes a_p et $f * Vc$ est le plus approprié pour représenter les données expérimentales.

La comparaison visuelle du diagramme en bâtons des coefficients normalisés permet de voir les impacts relatifs des paramètres de coupe sur le modèle (Fig. 3.15).

L'analyse des résidus sur la figure 3.16 montre clairement qu'il y a une tendance linéaire car toutes les valeurs sont à l'intérieur de l'intervalle de confiance.

Les paramètres de coupe qui influent sur la puissance de coupe Pu sont : la profondeur de passe a_p et l'interaction avance par tour/vitesse de coupe $f * Vc$

3.4. MODÈLES AVEC LES FACTEURS INFLUENTS ET INTERACTIONS (STEPWISE)

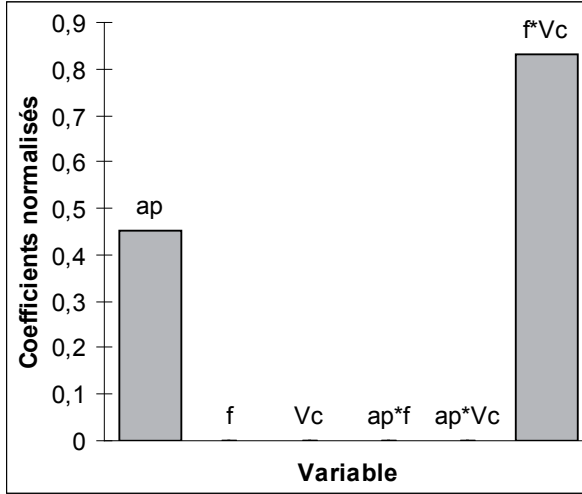


FIGURE 3.15 – Coefficients normalisés

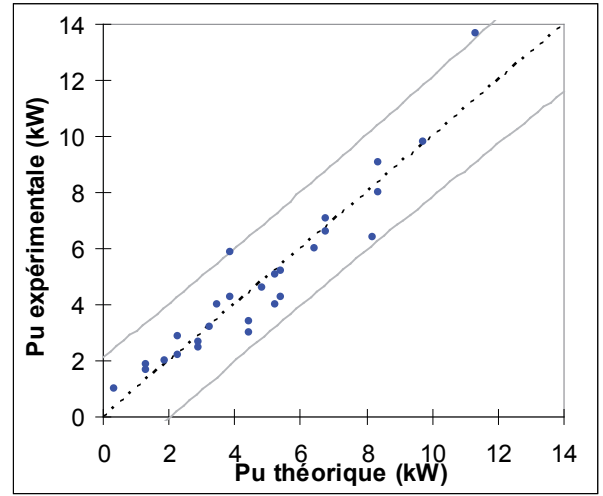


FIGURE 3.16 – Analyse des résidus

3.4.4 Modèle d'effort de coupe Fz

Le modèle d'effort de coupe Fz est donné par l'équation 3.5 :

$$Fz = 235,4444 - 317,3015 * f + 2475,2380 * a_p * f - 1,3222 * f * Vc \quad (3.5)$$

La figure 3.17 montre la comparaison entre les résultats expérimentaux et le modèle théorique de régression.

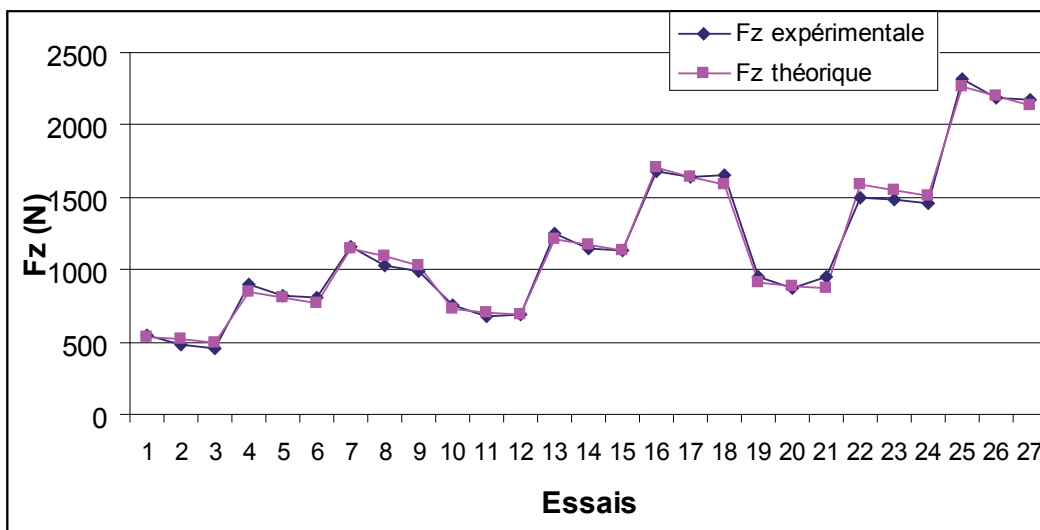


FIGURE 3.17 – Effort de coupe Fz comparaison expérimentale / modèle

3.4. MODÈLES AVEC LES FACTEURS INFLUENTS ET INTERACTIONS (STEPWISE)

La valeur du coefficient de détermination R^2 de ce modèle est égale à 0,86. Cela signifie que 86% des variations du temps d'usinage sont expliquées par ce modèle et que 1% restent par conséquent inexpliquées. La valeur du coefficient de détermination ajusté de ce modèle de vibration est $R^2_{adj} = 0,85$. Il représente une correction du R^2 qui permet de prendre en compte le nombre de variables utilisées dans le modèle. Ces deux coefficients montrent la bonne corrélation entre ce modèle et les données expérimentales.

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	3	6898519,048	2299506,349	1095,919	< 0,0001
Erreur	23	48259,619	2098,244		
Total corrigé	26	6946778,667			
Source	Valeur	Ecart-type	t	Pr > t	
Constante	235,444	23,324	10,095	< 0,0001	
a_p	0,000	0,000			
f	-317,302	140,047	-2,266	0,033	
Vc	0,000	0,000			
$a_p * f$	2475,238	66,639	37,144	< 0,0001	
$a_p * Vc$	0,000	0,000			
$f * Vc$	-1,322	0,333	-3,968	0,001	
$R^2 = 0,99$			$R^2_{ajusté} = 0,99$		

TABLE 3.6 – Analyse de la variance du modèle Fz

L'analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée avec un intervalle de confiance de 95 % ($\alpha = 5\%$) est donnée par le tableau 3.6. Le test de FISHER (F) est calculé pour le modèle et sa valeur est : $F = 78$. Cela signifie que la part de la variance de vibration expliquée par le modèle est 78 fois plus importante que la part de la variance de vibration qui reste inexpliquée. Comme indiqué dans le tableau 3.6, la probabilité ($Prob > F$) associée au test de FISHER (F) est de 0,0001. Cela signifie que le risque du non signification du modèle est de 0,01% ce qui est négligeable. En conclusion, l'analyse de la variance a permis de qualifier le modèle retenu. Le test de STUDENT (t) a été utilisé pour estimer les effets des facteurs du modèle d'efforts de coupe Fz comme le montre le tableau 3.6. La probabilité $Prob > t$ des facteurs les plus significatifs $a_p * f$ et $f * Vc$ est égale à 0,0001 ce qui signifie qu'il y a 0.01 chances sur 100 pour que la vraie valeur des ces coefficients soit nulle. Suivi par le facteurs f (0,0033). Cela confirme l'influence de ces facteurs. Par ailleurs, les coefficients normalisés étudiés montrent que le modèle avec les termes $a_p * f$, $f * Vc$ et f est le plus approprié pour représenter les données expérimentales.

La comparaison visuelle du diagramme en bâtons des coefficients normalisés permet de voir les impacts relatifs des paramètres de coupe sur le modèle (Fig. 3.18).

L'analyse des résidus sur la figure 3.19 montre clairement qu'il y a une tendance linéaire car toutes les valeurs sont à l'intérieur de l'intervalle de confiance.

Les paramètres de coupe qui influent sur les efforts de coupe Fz sont les l'interactions $a_p * Vc$ et $f * Vc$.

3.4. MODÈLES AVEC LES FACTEURS INFLUENTS ET INTERACTIONS (STEPWISE)

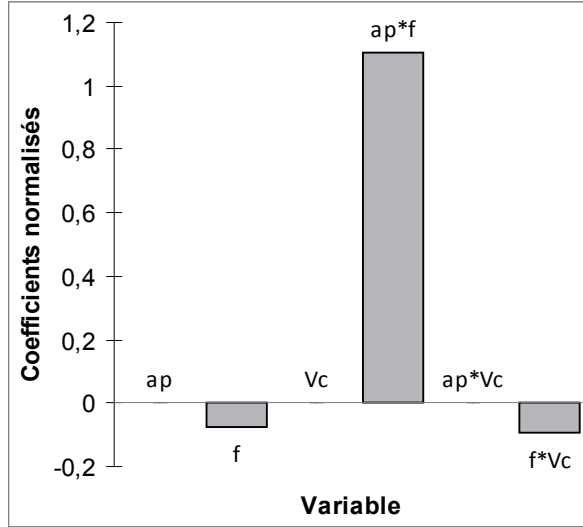


FIGURE 3.18 – Coefficients normalisés

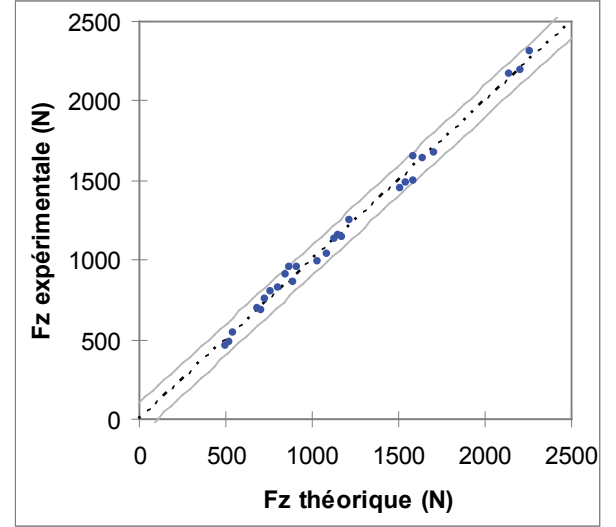


FIGURE 3.19 – Analyse des résidus

3.4.5 Modèle de vibration Az

Le modèle de vibration Az est donné par l'équation 3.6 :

$$Az = -49,8179 + 0,1795 * ap * Vc + 1,3774 * f * Vc \quad (3.6)$$

La figure 3.20 montre la comparaison entre les résultats expérimentaux et le modèle théorique de régression.

La valeur du coefficient de détermination R^2 de ce modèle est égale à 0,89. Cela signifie que 89% des variations du temps d'usure sont expliquées par ce modèle et que 11% restent par conséquent inexpliquées. La valeur du coefficient de détermination ajusté de ce modèle de vibration est $R^2_{adj} = 0.87$. Il représente une correction du R^2 qui permet de prendre en compte le nombre de variables utilisées dans le modèle. Ces deux coefficients montrent une corrélation entre ce modèle et les données expérimentales.

L'analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée avec un intervalle de confiance de 95 % ($\alpha = 5\%$) est donnée par le tableau 3.7. Le test de FISHER (F) est calculé pour le modèle et sa valeur est : $F = 46,45$. Cela signifie que la part de la variance de vibration expliquée par le modèle est 46,45 fois plus importante que la part de la variance de vibration qui reste inexpliquée. Comme indiqué dans le tableau 3.7, la probabilité ($Prob > F$) associée au test de FISHER (F) est de 0,0001. Cela signifie que le risque du non signification du modèle est de 0,01% ce qui est négligeable. En conclusion, l'analyse de la variance a permis de qualifier le modèle retenu. Le test de STUDENT (t) a été utilisé pour estimer les effets des facteurs du modèle de vibration Az comme le montre le tableau 3.7. La probabilité $Prob > t$ des facteurs les plus significatifs $ap * Vc$ et $f * Vc$ est égale à 0,0001 ce qui signifie qu'il y a 0.01 chances sur 100 pour que la vraie valeur des coefficients de $ap * Vc$ et $f * Vc$ soit nulle.

Cela confirme l'influence de ces facteurs. Par ailleurs, les coefficients normalisés étudiés

3.4. MODÈLES AVEC LES FACTEURS INFLUENTS ET INTERACTIONS (STEPWISE)

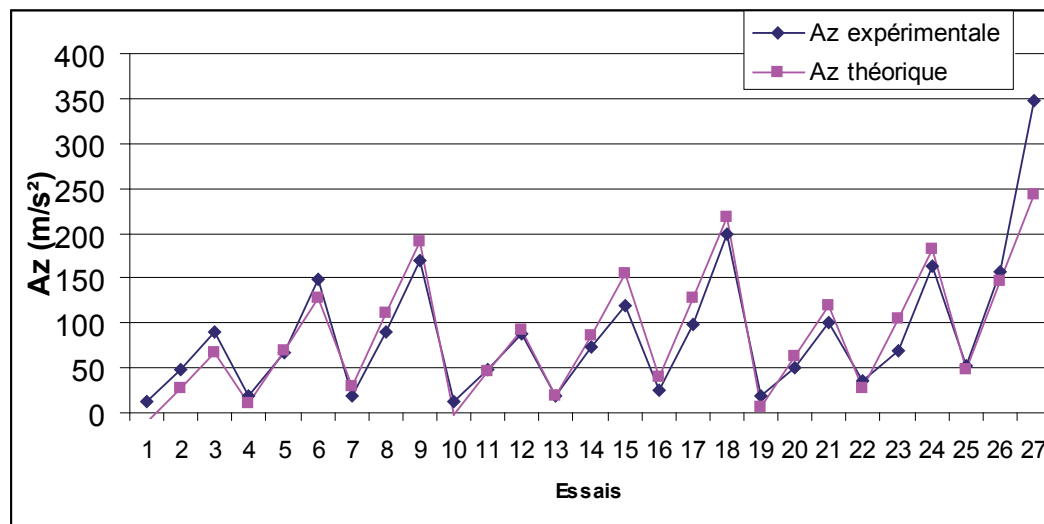


FIGURE 3.20 – Vibration Az comparaison expérimentale / modèle

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	2	126480,381	63240,191	78,260	< 0,0001
Erreur	24	19393,766	808,074		
Total corrigé	26	145874,147			
Source	Valeur	Ecart-type	t	Pr > t	
Constante	-49,818	12,731	-3,913	< 0,0001	
a_p	0		0		
f	0,000	0,000			
Vc	0,000	0,000			
$a_p * f$	0	0	0		
$a_p * Vc$	0,180	0,043	4,132	< 0,0001	
$f * Vc$	1,377	0,182	7,574	< 0,0001	
$R^2 = 0,898$			$R^2_{ajusté} = 0,890$		

TABLE 3.7 – Analyse de la variance du modèle Az

3.5. RÉDUCTION DU NOMBRE D'EXPÉRIENCES

montrent que le modèle avec les termes ($a_p * Vc$ et $f * Vc$) est le plus approprié pour représenter les données expérimentales.

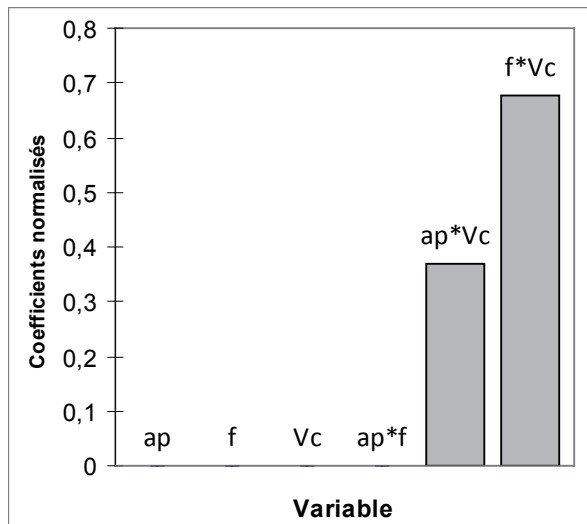


FIGURE 3.21 – Coefficients normalisés

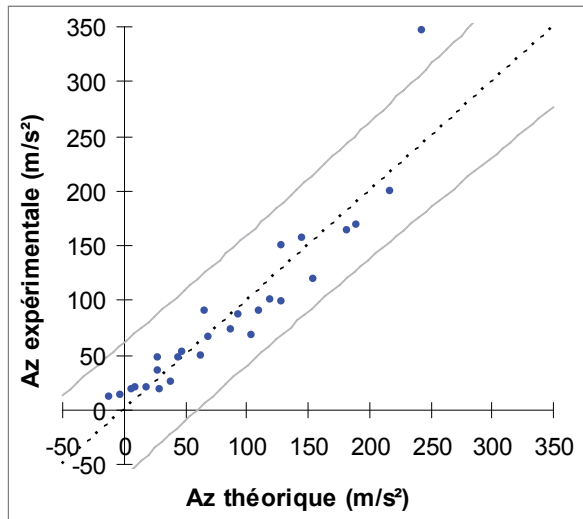


FIGURE 3.22 – Analyse des résidus

La comparaison visuelle du diagramme en bâtons des coefficients normalisés permet de voir les impacts relatifs des paramètres de coupe sur le modèle (Fig. 3.21). L'analyse des résidus sur la figure 3.22 montre clairement qu'il y a une tendance linéaire car toutes les valeurs sont à l'intérieur de l'intervalle de confiance. Les paramètres de coupe qui influent sur la vibration Az sont : les interactions $a_p * Vc$ et $f * Vc$.

3.5 Réduction du nombre d'expériences

Dans le but d'optimiser les paramètres de coupe, il faut définir une stratégie qui conduira à la modélisation des phénomènes étudiés avec la meilleure précision possible tout en évitant des essais inutiles. Dans cette voie, l'utilisation des plans d'expérience est nécessaire. Comme détaillé dans le chapitre II, il en existe un grand nombre de plan d'expérience comme les plans factoriel complet, fractionnaire, Taguchi et Box et Behnken. Chaque plan comporte un nombre d'essais différent ainsi que des spécificités différentes. Par exemple un plan complet de 3 facteurs à 3 niveaux sera composé de 27 essais (3^3) alors qu'un plan de Taguchi de 3 facteurs à 3 niveaux en comptera seulement 9 essais.

Il est évident que plus le nombre d'essais est élevé plus la campagne d'essais est longue et coûteuse. Dans cette partie, une comparaison de plusieurs plans d'expérience est faite pour déterminer lequel est meilleur en termes de nombre d'essais et qualité des résultats.

À partir du plan d'expérience factoriel complet 3 facteurs à 3 niveaux (27 essais) étudié auparavant, quatre autres plans ont été extraits et analysés. Les plans étudiés sont les suivants (voir l'annexe 1) :

1. Plan complet à trois niveaux 3^3 (27 essais).

3.5. RÉDUCTION DU NOMBRE D'EXPÉRIENCES

2. Plan faces centrées (15 essais) avec un gain de 44,44% par rapport au plan factoriel complet .
3. Plan de Box et Behnken (13 essais) avec un gain de 51,85% par rapport au plan factoriel complet.
4. Plan de Taguchi (9 essais) avec un gain de 66,66% par rapport au plan factoriel complet.
5. Plan complet a deux niveaux 2^3 (8 essais) avec un gain de 70,37% par rapport au plan factoriel complet.

Les tableaux suivants récapitulent les plans étudiés :

TABLE 3.8 – Modèles de régression du plan factoriel complet à trois niveaux 3^3 (27 essais)

$Ra = -1,83 + 0,47 * a_p + 5,60 * f + 5,06E - 03 * Vc + 5 * a_p * f - 3,69E - 03 * a_p * Vc - 1,60E - 03 * f * Vc$ $R^2 = 0,934$
$Tu = 57,43234 + 7,66 * a_p - 97,47 * f - 0,12 * Vc - 9,90 * a_p * f - 2,93E - 03 * a_p * Vc + 0,20 * f * Vc$ $R^2 = 0,865$
$Pu = 3,22 - 1,45 * a_p - 12,03 * f - 1,761E - 02 * Vc + 7,33 * a_p * f + 0,0 * a_p * Vc + 6,72E - 02 * f * Vc$ $R^2 = 0,917$
$Az = 152,98 - 99,33 * a_p - 608,41 * f - 0,33 * Vc + 289,93 * a_p * f + 0,24 * a_p * Vc + 2,14 * f * Vc$ $R^2 = 0,98$
$Fz = 324,38 - 44,77 * a_p - 339,99 * f - 0,51 * Vc + 2448,88 * a_p * f + 0,26 * a_p * Vc - 1,01 * f * Vc$ $R^2 = 0,991$

TABLE 3.9 – Modèles de régression du plan faces centrées (15 essais)

$Ra = -1,71 + 0,42 * a_p + 4,47 * f + 4,76E - 03 * Vc + 5,66 * a_p * f - 3,57E - 03 * a_p * Vc - 8,44E - 04 * f * Vc$ $R^2 = 0,93$
$Tu = 62,13 + 7,41 * a_p - 107,76 * f - 0,13 * Vc - 9,21 * a_p * f - 2,51E - 03 * a_p * Vc + 0,23 * f * Vc$ $R^2 = 0,86$
$Pu = 3,53 - 0,79 * a_p - 16,14 * f - 2,18E - 02 * Vc + 6,83 * a_p * f + 0,01 * a_p * Vc + 8,74E - 02 * f * Vc$ $R^2 = 0,96$
$Az = 194,05 - 125,54 * a_p - 687,77 * f - 0,56 * Vc + 325,12 * a_p * f + 0,36 * a_p * Vc + 2,38 * f * Vc$ $R^2 = 0,91$
$Fz = 223,59 + 11 * a_p - 95,16 * f - 0,40 * Vc + 2384,99 * a_p * f + 0,27 * a_p * Vc - 1,75 * f * Vc$ $R^2 = 0,99$

TABLE 3.10 – Modèles de régression du plan de Box et Behnken (13 essais)

$Ra = -1,54 + 0,85 * a_p + 5,41 * f + 2,91E - 03 * Vc + 3,09 * a_p * f - 4,48E - 03 * a_p * Vc + 8,65E - 03 * f * Vc$ $R^2 = 0,95$
$Tu = 77,86 - 5,86 * a_p - 128,11 * f - 0,16 * Vc + 7,76 * a_p * f + 1,88E - 02 * a_p * Vc + 0,23 * f * Vc$ $R^2 = 0,91$
$Pu = 2,65 - 2,63 * a_p - 7,33 * f - 0,01 * Vc + 7,75 * a_p * f + 1,52E - 02 * a_p * Vc + 3,83E - 02 * f * Vc$ $R^2 = 0,99$
$Az = 32,89 - 42,15 * a_p - 315,11 * f + 0,14 * Vc + 201,82 * a_p * f + 5,23E - 02 * a_p * Vc + 1,20 * f * Vc$ $R^2 = 0,97$
$Fz = 406,72 - 120,84 * a_p - 339,99 * f - 0,69 * Vc + 2509,09 * a_p * f + 0,39 * a_p * Vc - 1,21 * f * Vc$ $R^2 = 0,99$

Ces résultats montrent que le choix du plan d'expérience est très important et qu'on peut réduire considérablement le nombre d'expériences et faire un gain de production, de temps et du coût qui peut attendre 70%.

Dans la deuxième partie dédiée à l'usinage des composites, le choix des plans d'expérience utilisés est étudié pour minimiser le nombre d'expériences.

3.5. RÉDUCTION DU NOMBRE D'EXPÉRIENCES

TABLE 3.11 – Modèles de régression du plan de Taguchi (9 essais)

$Ra = -0,85 - 0,43 * a_p + 12,08 * f - 8,07E - 03 * Vc + 1,37 * a_p * f + 5,25E - 03 * a_p * Vc - 9,52E - 05 * f * Vc$ $R^2 = 0,99$
$Tu = 77,18 - 0,26 * a_p - 65,82 * f - 0,31 * Vc - 44,85 * a_p * f + 0,10 * a_p * Vc + 0,32 * f * Vc$ $R^2 = 0,92$
$Pu = -7,61E - 02 - 0,79 * a_p + 46,22 * f - 7,95E - 02 * Vc - 23,04 * a_p * f + 5,91E - 02 * a_p * Vc + 2,19E - 02 * f * Vc$ $R^2 = 0,99$
$Az = 59,34 - 70,80 * a_p - 997,80 * f + 1,21 * Vc + 653,41 * a_p * f - 0,62 * a_p * Vc + 1,15 * f * Vc$ $R^2 = 0,98$
$Fz = 471,61 - 262,85 * a_p - 1003,17 * f + 0,64 * Vc + 3120 * a_p * f - 8,57E - 03 * a_p * Vc - 2,64 * f * Vc$ $R^2 = 1$

TABLE 3.12 – Modèles de régression du plan complet à deux niveaux 2^3 (8 essais)

$Ra = -2,07 + 0,62 * ap + 5,22 * f + 5,25E - 03 * Vc + 5,66 * ap * f - 3,57E - 03 * ap * Vc - 8,44E - 04 * f * Vc$ $R^2 = 0,99$
$Tu = 68,075 + 7,53 * ap - 110,94 * f - 0,14 * Vc - 9,21 * ap * f - 2,51E - 03 * ap * Vc + 0,23 * f * Vc$ $R^2 = 0,99$
$Pu = 3,59 - 0,62 * ap - 16,5 * f - 0,02 * Vc + 6,83 * ap * f + 0,01 * ap * Vc + 0,08 * f * Vc$ $R^2 = 0,95$
$Az = 173,48 - 114,58 * ap - 660,75 * f - 0,51 * Vc + 325,12 * ap * f + 0,36 * ap * Vc + 2,38 * f * Vc$ $R^2 = 0,98$
$Fz = 196,99 + 39,25 * ap - 114,99 * f - 0,38 * Vc + 2385 * ap * f + 0,27 * ap * Vc - 1,75 * f * Vc$ $R^2 = 1$

3.6 Optimisation des paramètres de coupe

Cette partie traite l'optimisation des conditions de coupe en tournage de l'acier 100Cr6. Les modèles empiriques avec les facteurs significatifs présentés dans la première partie de ce chapitre sont utilisés comme fonctions objectives. Trois méthodes d'optimisation ont été utilisées :

1. optimisation mono-objectif ;
2. optimisation multi-objectif ;
3. optimisation mono-objectif avec pondération.

3.7 Optimisation mono-objectif

Les différents objectifs envisagés dans cette étude sont :

- réduire la rugosité de surface Ra , pour améliorer l'état de surface ;
- réduire la puissance de coupe Pu ;
- réduire le temps d'usinage Tu ;
- réduire les efforts de coupe Fz ;
- réduire les accélérations Az ;
- augmenter la productivité et le débit copeaux Q .

Pour s'assurer que les résultats sont physiquement significatifs, des contraintes sur les paramètres de coupe (a_p , f , Vc) sont ajoutées aux modèles. Ces contraintes sont nécessaires pour que les paramètres du procédé restent dans des limites raisonnables garanties par le plan d'expérience validé.

Les quatre méthodes d'optimisation suivantes ont été utilisées :

- algorithme génétique (GA) ;
- la méthode de Monté-Carlo (Particle Swarm Optimization (PSO) ;
- la méthode de recuits simulés (Adaptive Simulated Annealing (ASA) ;
- les méthodes évolutionnistes (Differential Evolution (DE)).

Les résultats des quatre méthodes sont très similaires, le tableau suivant montre les valeurs des conditions de coupe qui minimisent ou maximisent les différentes fonctions objectives étudiées.

TABLE 3.13 – Optimisation mono-objectif

	a_p (mm)	f (mm/rev)	Vc (mm/min)	Ra (μm)	Pu (kW)	Tu (s)	Fz (N)	Az (m^2/s)	Q (cm^3/min)
Ra	1	0,15	[100-300]	0,37	[0,32-2,28]	[20,47-40,17]	[499-539]	[0-66]	[15-45]
Pu	1	0,15	100	0,37	0,32	40,17	539	0	15
T	1	0,45	300	3,6	8,2	5,2	1028	190	135
Fz	1	0,15	300	0,37	2,28	20,47	499	66	45
Az	1	0,15	100	0,37	0,32	40,17	539	0	15
Q	2	0,45	300	5,5	11,3	9,4	2140	243	270

3.8 Optimisation multi-objectif

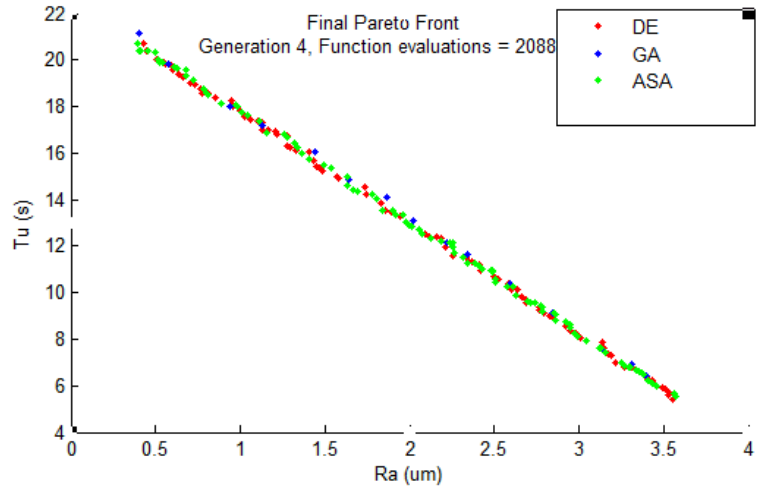
L'objectif est de chercher l'ensemble des solutions idéales permettant d'avoir un minimum d'efforts de coupe, vibration, temps d'usinage et de rugosité de surface, et un maximum de productivité.

le choix des fonctions f_1 et f_2 : ce choix dépendra des fonctions à étudier, Les différents problèmes traités sont illustrés dans le tableau suivant :

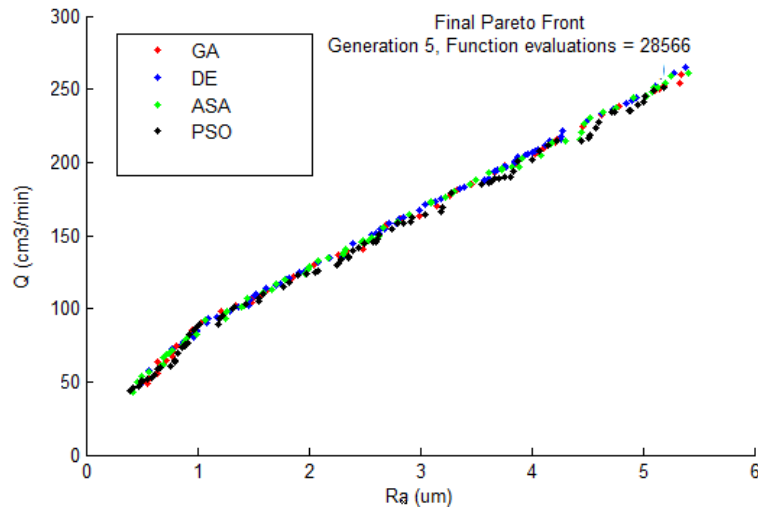
TABLE 3.14 – Optimisation multi-objectif

	ap (mm)	f (mm/rev)	Vc (m/min)	Ra (μm)	Pu (kW)	Tu (s)	Q (cm ³ /min)	Fz (N)
Ra/T	1	0,25	300	1,36	4,11	15,75	72,95	664
Ra/Q	1,99	0,24	299	2,5	7,3	19	148	1281
Pu/T	1	0,45	101	3,6	2,3	12,6	45,5	1147
$Ra/Pu/Q$	1,52	0,18	299	1,17	4,64	20,8	85	805
$Ra/T/Q$	1,74	0,28	300	2,8	7,4	16,4	151	1281
$Ra/Pu/T/Q$	1,19	0,23	290	1,42	4,35	17,95	80,3	757
$Ra/Pu/T/Q/Fz$	1,12	0,25	292	1,6	4,59	16,3	83	763

Les fronts de Pareto 2D sont présentés pour quelques couples de fonctions objectives :



(a) Ra Tu



(b) Ra Q

FIGURE 3.23 – Front Pareto des fonctions Ra , Tu et Q

La figure 3.23(a) montre le front Pareto des deux fonctions objectifs Ra et Tu . Il est clair que la minimisation de l'une des deux fonctions implique la maximisation de l'autre, cela est dû à l'opposition des deux fonctions objectifs, ce qui n'est pas le cas des fonctions Ra et Q comme le montre la figure 3.23(b).

3.8. OPTIMISATION MULTI-OBJECTIF

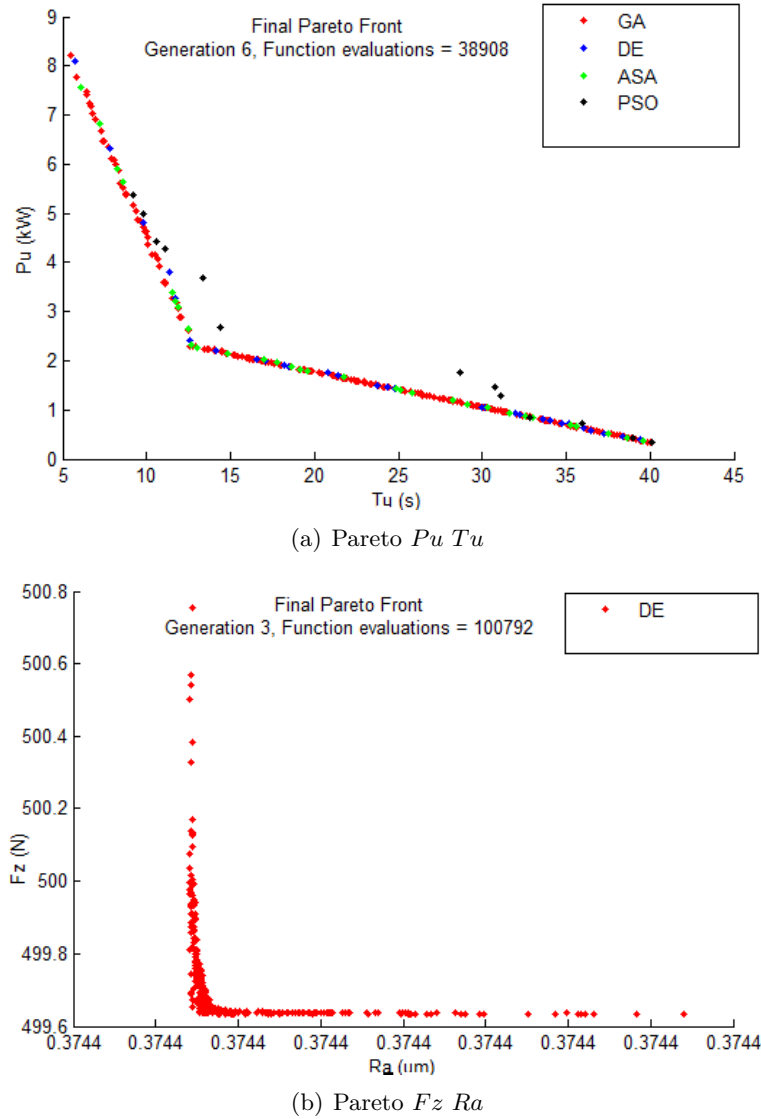
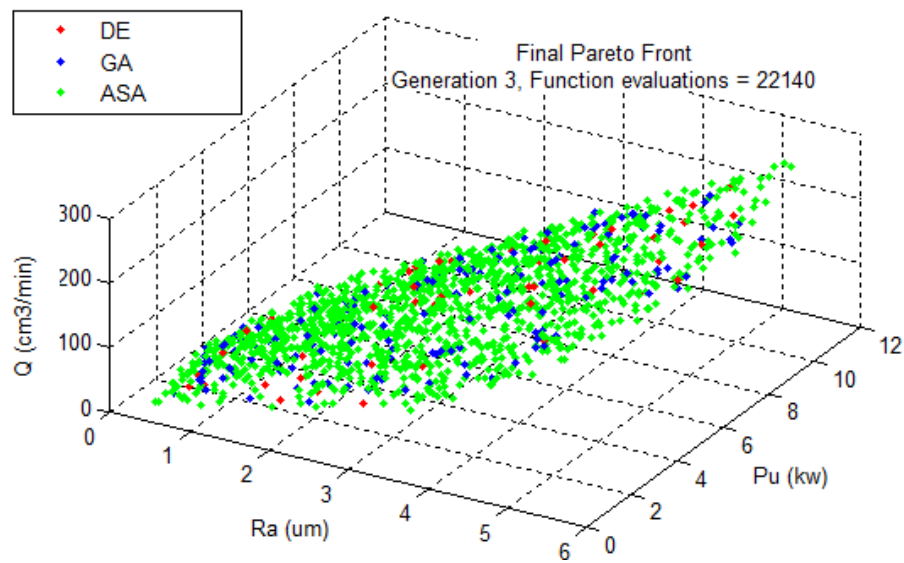


FIGURE 3.24 – Front Pareto des fonctions P_u , T_u , F_z et R_a

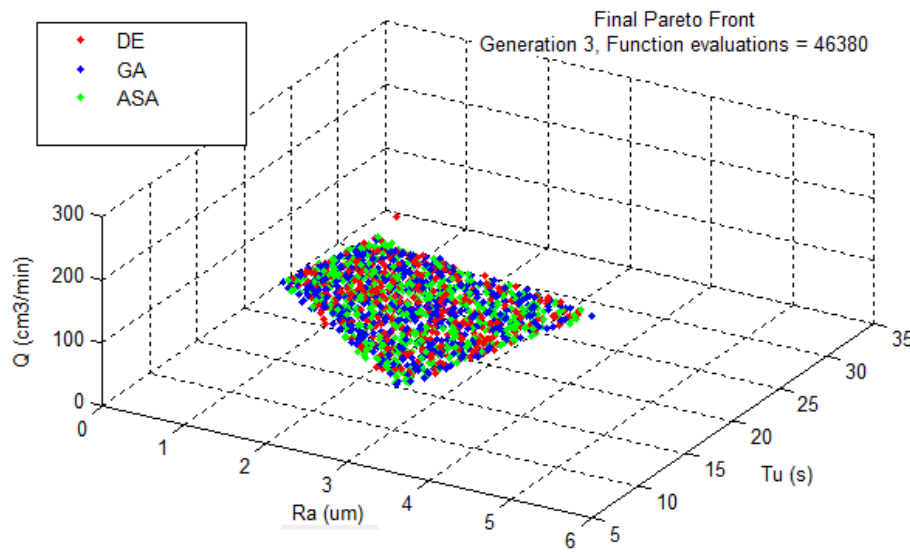
La figure 3.24(a) montre une intersection entre deux fronts Pareto, les graphes des coefficients normalisés des deux fonctions (figure 3.18 montre cet effet inverse des facteurs f et V_c).

La figure 3.24(b) montre deux fronts Pareto perpendiculaire. Cette forme de Pareto est dû au faite que les réponses R_a et F_z ne sont pas influencées par le paramètre de coupe V_c , donc l'ensemble des solutions des deux fronts Pareto correspond aux différentes variations de la vitesse de coupe.

Les figures 3.25(a), 3.25(b), 3.26(a) et 3.26(b) représentent les fronts Pareto des trois des fonctions R_a , Q , P_u , T_u , F_z et Q .



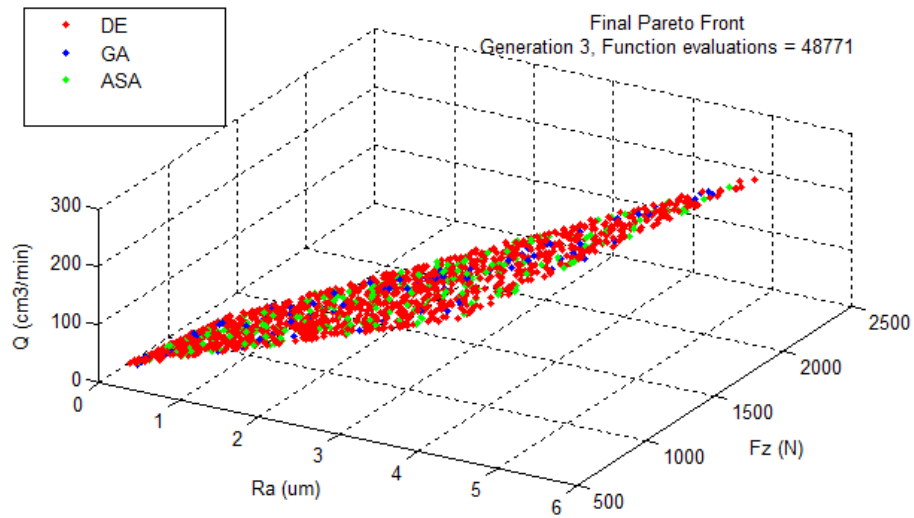
(a) Ra Q Pu



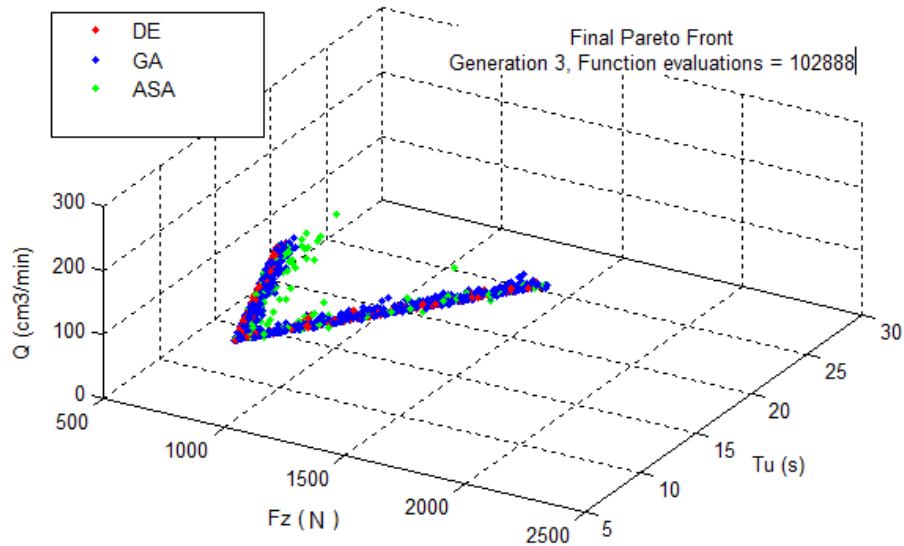
(b) Ra Q Tu

FIGURE 3.25 – Front Pareto des fonctions Ra , Tu et Q

3.9. OPTIMISATION MULTI-OBJECTIF COMBINÉE AVEC LA SOMME PONDÉRÉE



(a) Pareto Ra Q Fz



(b) Pareto Fz Q Tu

FIGURE 3.26 – Front Pareto 3D des fonctions Ra , Pu , Tu , Fz et Q

3.9 Optimisation multi-objectif combinée avec la somme pondérée

Le but de cette optimisation est d'introduire la notion d'aide à la décision au cours de l'optimisation, elle est basée sur une somme pondérée des fonctions objectives :

3.10. CONCLUSION

$$F_{obj} = \left\{ x_{Ra} \frac{Ra}{Ra_{\max}} + x_{Pu} \frac{Pu}{Pu_{\max}} + x_{Tu} \frac{Tu}{Tu_{\max}} + x_{Fz} \frac{Fz}{Fz_{\max}} + x_{Az} \frac{Az}{Az_{\max}} + x_Q \frac{Q_{\max} - Q}{Q_{\max}} \right\}$$

avec $x_{Ra}, x_{Pu}, x_{Tu}, x_{Fz}, x_{Az}, x_Q$ sont des facteurs de pondération qui permettent de privilégier tel ou tel objectif en fonction des besoins.

La pondération de Q est calculée par : $x_Q \frac{Q_{\max} - Q}{Q_{\max}}$, cette formule nous permet de maximiser cette fonction objectif.

Les fonctions considérées sont les modèles étudiés dans le chapitre précédent avec une pondération à la valeur max de la fonction dans le domain étudié, établies en fonction des paramètres de coupe. Il s'agit donc, de (Ra, Tu, Pu, Fz, Az, Q) . Ces fonctions devraient varier entre 0 et 1, ceci est vérifié quelle que soit la valeur des variables.

TABLE 3.15 – Exemple d'optimisation multi-objectif avec pondérations Ra et Q

a_p (mm)	f (mm/tour)	Vc (mm/min)	Ra (um)	Pu (kW)	Tu (s)	Fz (N)	Az (m/s ²)	Q (cm ³ /min)
xRa=0,8, xQ=0,2								
1,6218	0,1500	298,7686	0,7694	4,2266	23,1521	730,7577	98,9052	72,6838
xRa=0,6, xQ=0,4								
1,9969	0,1831	299,8640	0001,5	0006,1	0022,9	1009,6	0133,3	109,6
xRa=0,4, xQ=0,6								
1,9976	0,3182	299,9733	0003,5	0008,7	0016,0	1581,6	0189,2	0190,7
xRa=0,2, xQ=0,8								
1,9948	0,4127	299,5990	0004,9	0010,6	0011,2	1978,7	0227,8	0246,6

Le tableau 3.15 montre un exemple d'optimisation avec deux fonctions objectifs pondérées :

- $x_{Ra} = 0,8$, $x_Q = 0,2$ et les autres facteurs de pondération sont nuls. Cette configuration est conseillée pour un usinage en finition, un meilleur état de surface ($Ra = 0,76$ um) mais avec une faible productivité ($Q = 76$ cm³/min)
- $x_{Ra} = 0,6$, $x_Q = 0,4$ et les autres facteurs de pondération sont nuls. Cette configuration donne un état de surface ($Ra = 1,5$ um) et une productivité ($Q = 109$ cm³/min)
- $x_{Ra} = 0,4$, $x_Q = 0,6$ et les autres facteurs de pondération sont nuls. Cette configuration donne un état de surface ($Ra = 3,5$ um) et une productivité ($Q = 190$ cm³/min)
- $x_{Ra} = 0,2$, $x_Q = 0,8$ et les autres facteurs de pondération sont nuls. Cette configuration peut être utilisée en tournage d'ébauche qui permet d'augmenter la productivité ($Q = 246$ cm³/min) mais en contrepartie on perd la qualité de surface ($Ra = 4,9$ um).

3.10 Conclusion

La modélisation par régression linéaire multiple nous a permis de déterminer l'influence des paramètres de coupe (profondeur de passe, avance par tour et vitesse de coupe sur l'état de surface usinée, les efforts de coupe et les vibrations d'outil. Un test t STUDENT

3.10. CONCLUSION

a été appliqué pour trouver les paramètres les plus significatifs, ainsi, des modèles de régression ont été mis en oeuvre. La validité de ces modèles est testée par une analyse de la variance. Enfin, une optimisation par algorithme génétique nous a permis de choisir les meilleurs jeux de paramètres de coupe. Cette étude va ainsi permettre de choisir les conditions de coupe optimales en fonction de l'importance des critères de sélection définis par l'utilisateur entre état de surface, productivité, durée de vie ou stabilité de l'usinage.

3.10. CONCLUSION

Chapitre 4

Application sur le matériau composite : carbon/époxy T800S/M21

4.1. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC UN INSERT PCD

Ce chapitre présente deux applications sur un matériau composite carbone/époxy T800S/M21. La première a comme objectif de qualifier l'usinabilité de ce matériau avec un outil de coupe du type PCD (Poly-crystalline Diamond). La deuxième avec une plaquette de coupe Penta (5 arêtes de coupe) de trois revêtements différents (DSPN, DB3, DB6). Dans ce chapitre, nous avons utilisé les niveaux de vibration de la plaque composite et les défauts enregistrés au cours d'usinage pour déterminer les conditions de coupe optimales.

4.1 Application sur le matériau composite : carbon/époxy T800S/M21 avec un insert PCD

4.1.1 Partie expérimentale

4.1.1.1 Moyens d'essais

Les essais ont été réalisés sur un centre d'usinage grand vitesse PCI Météor 10 au sein du Centre d'Etudes et de Recherche sur les Outils Coupants (CEROC) en collaboration avec le Laboratoire de Mécanique et de Rhéologie (LMR) de l'université de Tours et l'entreprise (SAFETY) fabriquant d'outils coupants à plaquettes. Le matériau utilisé est un matériau composite carbone/époxy T800S/M21 (figure 4.2). L'opération est le surfacage en avalant avec une fraise de diamètre 80 *mm* équipée d'une seule plaquette à insert PCD (figure 4.1 et annexe 2) .

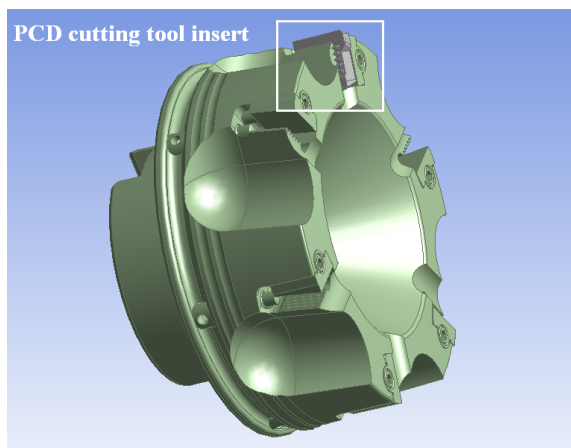


FIGURE 4.1 – Outil de coupe
vv

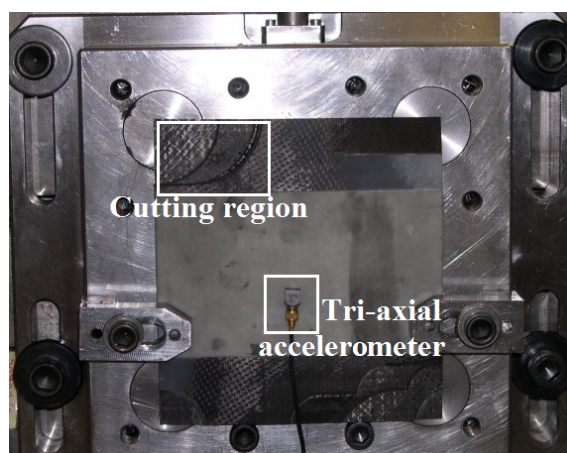


FIGURE 4.2 – Mesure de vibrations

4.1.1.2 Plan d'expérience

Un plan d'expérience composite centré à 20 essais (figure 4.3) a été choisi pour étudier l'influence des trois paramètres de coupe retenus (vitesse de coupe, profondeur de passe et avance par dent). Les méthodes de régression linéaire et de surface de réponse ont permis de déterminer les différents modèles mathématiques exprimant la relation entre les paramètres de coupe et les vibrations enregistrées selon trois directions (x, y, z).

4.1. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC UN INSERT PCD

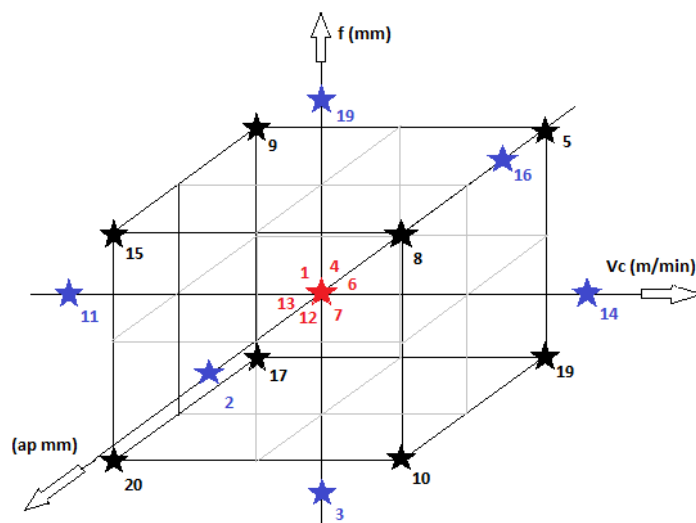


FIGURE 4.3 – Plan d'expérience

Le plan d'expérience est constitué 20 essais, dont 8 essais correspondant au plan orthogonal, 6 essais pour les points axiaux et 6 essais au point central (0, 0, 0) pour vérifier la répétitivité. Le domaine de variation des facteurs codifiés est ramené à l'intervalle [Min ; Max] découpé en 5 niveaux : -1.68, -1, 0, 1, +1.68 qui sont calculés selon les expressions données dans le Table 4.1, où : et N est nombre d'essais du Plan Fractionnaire. Ici $N = 8$, donc :

TABLE 4.1 – Paramètres d'usinage

niveau	V_c (m/min)	f (mm)	a_p (mm)
(-1.68)	659	0.032	0.660
(-1)	1000	0.100	1.000
(0)	1500	0.200	1.500
(+1)	2000	0.300	2.000
(+1.68)	2349	0.368	2.340

4.1.1.3 Mesure de vibration

La chaîne d'acquisition des vibrations est composée de :

- 2 accéléromètres tri-axial, l'un est monté sur le matériau composite à usiner et l'autre est monté sur la platine de mesure des efforts de coupe (figure 4.2).
- 2 accéléromètres mono-axe montés sur la broche.
- Un Multi-analyseur (3560 de Brüel et Kjær) relié à un ordinateur pour l'enregistrement des données temporelles à l'aide du logiciel Pulse Labshop.

Par soucis de clarté, seules les vibrations issues de l'accéléromètre tri-axial monté sur la pièce sont exploitées du fait de la proximité avec la zone de coupe.

4.1. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC UN INSERT PCD

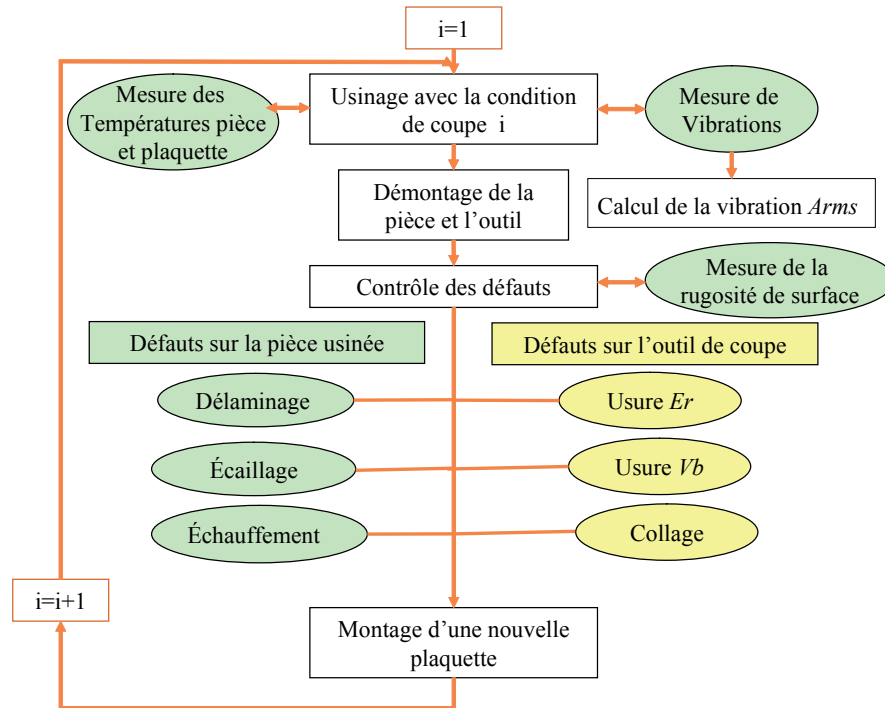


FIGURE 4.4 – Procédure expérimentale

L'accélération A_{rms} est calculée selon la relation suivante :

$$A_{rms} = \sqrt{A_{x_{rms}}^2 + A_{y_{rms}}^2 + A_{z_{rms}}^2} \quad (4.1)$$

Une comparaison entre le test 3 sans défaut et le test 19 avec délaminage est montrée dans la figure 4.5. Cette comparaison montre clairement l'influence de défaut sur les niveaux de vibrations. La vibration RMS est six fois plus élevée dans le test 19 qui présente un défaut.

4.1.1.4 Calcul de la productivité

La productivité est représentée par le débit copeaux Q et calculée par la relation suivante :

$$Q = \sqrt{\frac{a_p \times f \times V_c \times a_e \times Z}{\pi \times d}} \quad (4.2)$$

Où a_e est l'engagement de l'outil de coupe dans la matière ($a_e = 40 \text{ mm}$), Z est le nombre de dents de la fraise ($Z = 1$) et d est le diamètre de la fraise ($d = 80 \text{ mm}$).

4.1. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC UN INSERT PCD

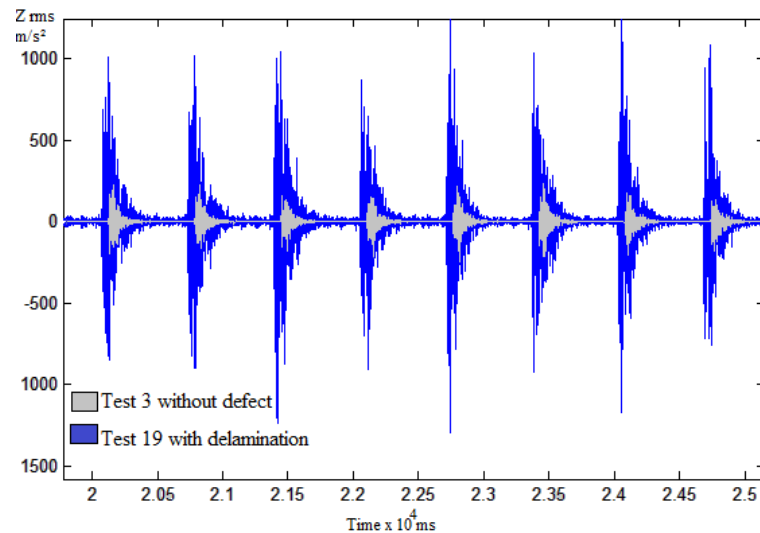


FIGURE 4.5 – Comparaison des niveaux de vibration entre essai avec et sans défauts

TABLE 4.2 – Table de mesures et observations

<i>Essais</i>	<i>Vc m/min</i>	<i>f mm</i>	<i>a_p mm</i>	<i>Arms m/s²</i>	<i>Observations</i>
1	1500	0.2	1.5	129.56	RAS
2	1500	0.2	2.34	232.78	Délaminage
3	1500	0.032	1.5	56.14	RAS
4	1500	0.2	1.5	142.24	RAS
5	2000	0.3	1	124.07	RAS
6	1500	0.2	1.5	128.50	RAS
7	1500	0.2	1.5	162.47	RAS
8	2000	0.3	2	279.54	Délaminage+Usure de l'outil
9	1000	0.3	1	124.84	RAS
10	2000	0.1	2	122.05	RAS
11	659	0.2	1.5	128.11	RAS
12	1500	0.2	1.5	127.97	RAS
13	1500	0.2	1.5	150.47	RAS
14	2340	0.2	1.5	157.91	RAS
15	1000	0.3	2	214.77	Usure de l'outil+Echauffement
16	1500	0.2	0.66	78.51	RAS
17	1000	0.1	1	47.34	RAS
18	2000	0.1	1	65.34	RAS
19	1500	0.368	1.5	241.17	Délaminage
20	1000	0.1	2	108.23	RAS

4.1.2 Résultats et discussion

4.1.2.1 Analyse du modèle empirique

Le modèle choisi prend en compte les effets linéaires, d'interactions et quadratiques. Les coefficients de régression de ce modèle permettent d'exprimer la relation de la vibration de la pièce en fonction des trois paramètres étudiés :

$$A_{rms} = 62.185 - 0.018 \times Vc - 80.999 \times f - 49.112 \times ap + 5.368 \times f^2 + 10.124 \times ap^2 + 46.255 \times ap \times f + 0.080 \times Vc \times f + 0.031 \times Vc \times ap + 319.541 \times f \times ap \quad (4.3)$$

Le coefficient de détermination du modèle vaut 0.962, ce qui signifie que 96.2 % des variations des vibrations sont expliqués par le modèle et que 3.8 % restent par conséquent inexpliqués. Plus ce coefficient est proche de 1, meilleur est le modèle.

Cette valeur du coefficient de détermination indiquent que les mesures de vibrations obtenues sont modélisées de façon très satisfaisante par le modèle obtenu.

Afin de tester la signification du modèle, l'analyse de variance a été réalisée et résumée dans le tableau Table 4.3. Le test du F de Fisher appliqué, montre que la probabilité associée au F est inférieure à 0.001 (Prob>F), cela signifie que l'on prend un risque de 0.1 %, en concluant que la variable explicative apporte une quantité d'information significative au modèle.

La part de la variance de la variable dépendante expliquée par le modèle est ainsi 33.06 fois plus importante que la part de la variance de la variable dépendante qui reste inexpliquée. D'autre part, il est à noter que pour ce modèle, seuls les effets des interactions sont significatives, car Prob>F est inférieur à 0.05, soit 5%.

TABLE 4.3 – Analyse de la Variance

<i>Source</i>	<i>DDL</i>	<i>SCE</i>	<i>SS</i>	<i>F</i>	<i>Prob > F</i>
Régression	9	69792.10	7754.67	33.06	<0.001
Linéaire	3	66988.10	48.59	0.21	0.889
Quadratique	3	161.60	53.85	0.23	0.874
Interaction	3	2642.40	880.80	3.76	0.048
Erreur	5	1005.60			
Total	19	72137.60			

Le tableau Table 4.4 montre que parmi toutes les combinaisons, seule l'interaction $f \times a_p$ est significative. En effet, dans ce cas, la $P - Value$ est égale à 0.015, ce qui est bien inférieur à 0.05. Cela signifie qu'il y a 1.5 chances sur 100 pour que la vraie valeur du coefficient de l'interaction $f \times a_p$ soit nulle.

4.1.2.2 Analyse des surfaces de réponse

Les figures 4.6 (a) et (b) montrent le graphe de la surface de réponse 3D du modèle la vibration A_{rms} pour $Vc = 1500 \text{ m/min}$ et $a_p = 1.5 \text{ mm}$ respectivement. Les figures 4.6

4.1. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC UN INSERT PCD

TABLE 4.4 – Paramètres du modèle

Source	Valeur	Ecart – type	F	P – Value
Constant	62.185	87.813	0.708	0.495
Vc	-0.018	0.063	-0.279	0.786
f	-80.999	283.937	-0.285	0.781
a_p	-49.112	62.807	-0.782	0.452
$Vc \times Vc$	-0.000	0.000	-0.480	0.642
$f \times f$	5.368	404.092	0.013	0.990
$a_p \times a_p$	10.124	16.164	0.626	0.545
$Vc \times f$	0.080	0.108	0.743	0.475
$Vc \times a_p$	0.031	0.022	1.417	0.187
$f \times a_p$	319.541	108.294	2.951	0.015

(c) et (d) montrent les graphes des contours du modèle de vibration A_{rms} pour les mêmes conditions de coupe précédentes. La vibration A_{rms} augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe et de la profondeur de passe.

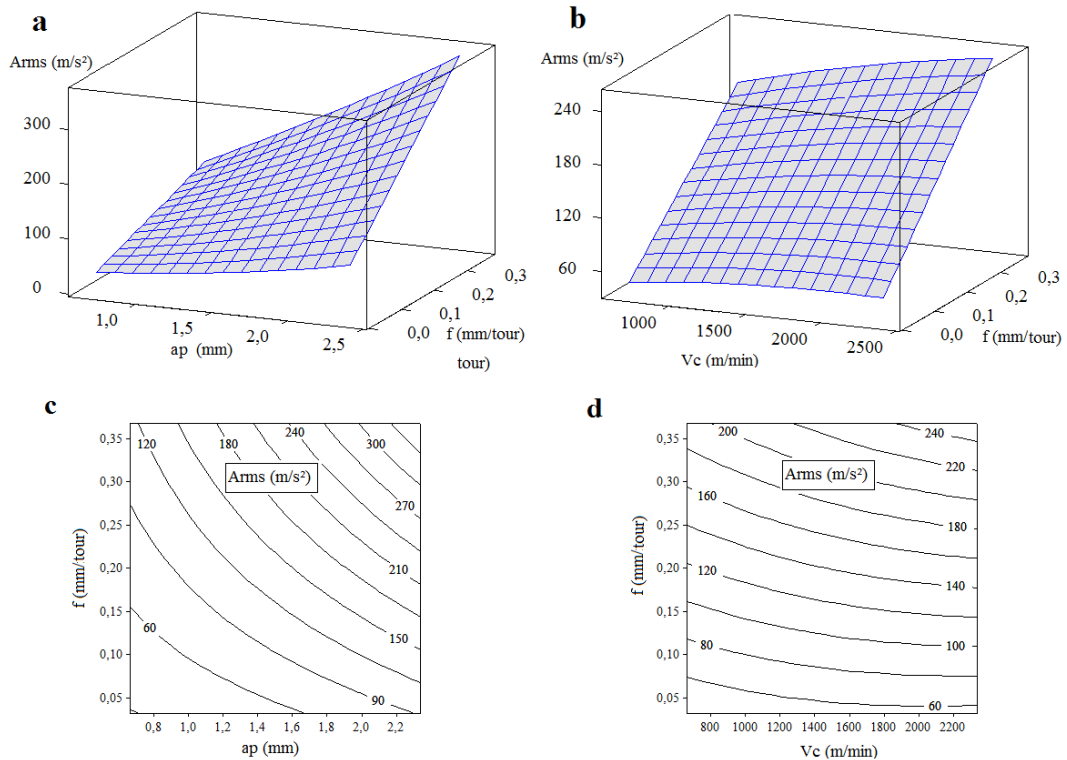


FIGURE 4.6 – Surface de réponse et graphe du contour A_{rms}

La relation entre les différentes variables opératoires et la réponse étudiée est illustrée dans les représentations tridimensionnelles des surfaces de réponse :

- La figure 4.7(a) montre l'effet de l'interaction $a_p f$ sur les vibrations A_{rms} , à savoir :

4.1. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC UN INSERT PCD

la profondeur de passe augmente pour une avance donnée, plus les vibrations sont élevées.

- La figure 4.7(c) montre l'effet de la profondeur de passe a_p et la vitesse de coupe V_c sur la réponse, l'influence de la profondeur de passe a_p est plus importante que celui de la vitesse de coupe.
- La figure 4.7(b) montre l'effet de la profondeur de l'avance f et la vitesse de coupe V_c sur la réponse, l'influence de l'avance f est plus importante que celui de la vitesse de coupe V_c .

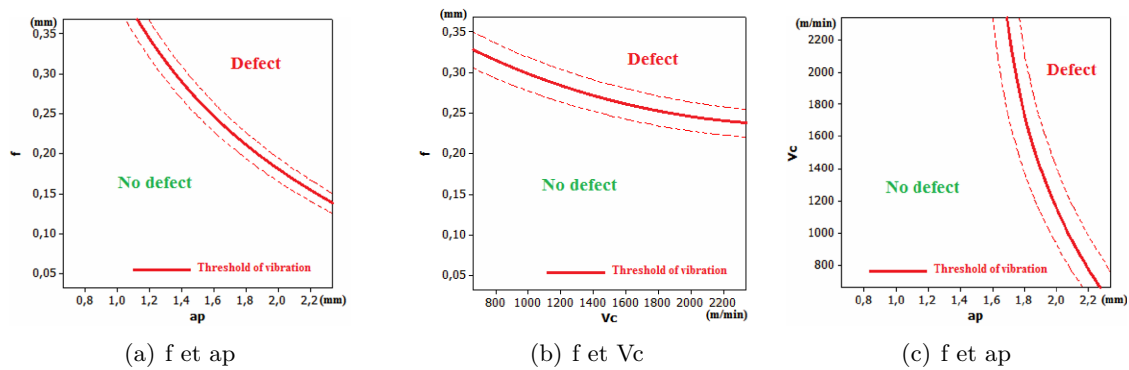


FIGURE 4.7 – Sélection des conditions de coupe

4.1.3 Analyse des défauts d'usinage des composites

Un des modes de défaillance les plus dangereux dans un composite stratifié est le délaminage (figures 4.8 (a) et 4.8) (b). La perte de rigidité peut réduire la durée de vie d'une structure composite d'une manière significative. Pour utiliser la pleine capacité des composites, il est nécessaire d'analyser l'amorçage et la croissance du délaminage. D'autres défauts comme l'usure brute de l'outil de coupe (figure 4.8) (c) et l'échauffement de la matrice composite (figure 4.8) (d) peuvent apparaître au cours de l'usinage des composites. Table 4.2, récapitule l'ensemble des défauts constatés au cours des essais.

La figure 4.9 montre la corrélation entre la vibration Arms de la pièce et les défauts constatés. À partir d'un seuil de vibrations, les défauts étudiés se manifestent, la valeur du seuil de vibration approximative est choisie égale à $175m/s^2$, cette valeur est choisie de telle sorte qu'elle soit la plus proche possible des valeurs de vibrations pour lesquelles il n'y a pas de présence de défauts.

- Pour une valeur de maintien $V_c = 1500$ m/min (figure 4.7(a)) en fonction de la profondeur de passe a_p , choisie on obtient la valeur de l'avance f , par exemple pour une valeur de $a_p = 2$ mm, la valeur de l'avance f doit être inférieure à 0.17 mm.
- Pour une valeur de maintien $f = 0.2$ mm (figure 4.7(c)), en fonction de la vitesse de coupe choisie on obtient la valeur de a_p , par exemple pour une vitesse de coupe $V_c = 1500$ m/min, la profondeur de passe a_p doit être inférieure à 1.8 mm.
- Pour une valeur de maintien $a_p = 1.5$ mm (figure 4.7(b)), en fonction de la vitesse de coupe choisie on obtient la valeur de f , par exemple pour une vitesse de coupe

4.1. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC UN INSERT PCD

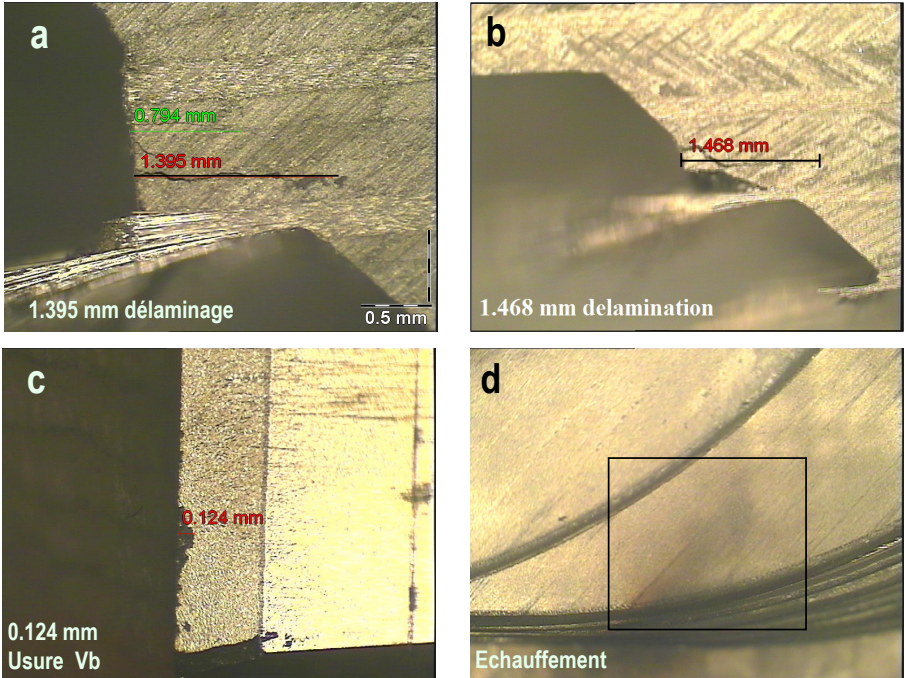


FIGURE 4.8 – Observation of machining defects : (a) test 2, (b) test 19, (c) test 8, (d) test 15.

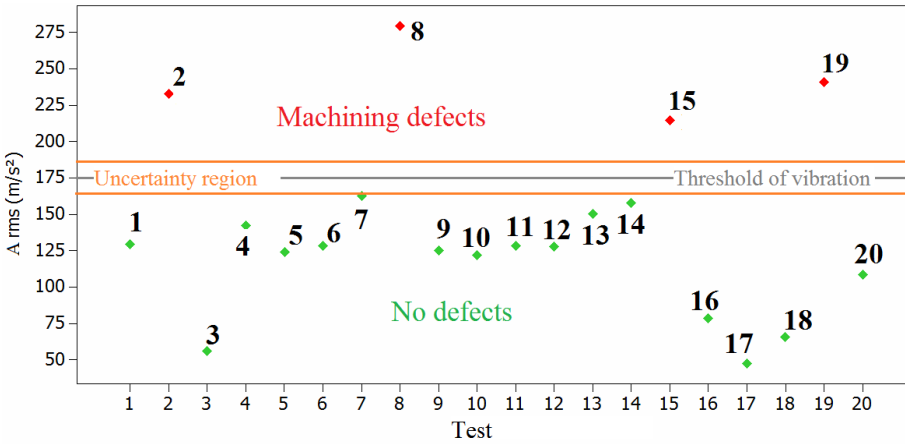


FIGURE 4.9 – Corrélation entre la vibration Arms et les défauts constatés

$Vc = 1500$ m/min, l'avance f doit être inférieur à 0.27 mm.

4.2 Essais de validation

Afin de vérifier la performance du modèle développé, quatre essais de validation ont été effectués pour $Vc = 1500$ m/min et $a_p = 1,5$ mm, les résultats sont indiqués dans le tableau 4.5 :

TABLE 4.5 – Testes de validation

<i>tests</i>	<i>f</i> (mm/tour)	<i>A_{rms}</i> (m/s ²)	<i>Observations</i>
1	0.1	90.91	absence de défauts
2	0.2	148.34	absence de défauts
3	0.3	182.37	délaminage mineur
4	0.35	241	délaminage important

- Essai 1 : effectué avec une avance de 0.1 mm/tous. Pas de défaut observé (figure 4.10 (a)). Cette condition appartient à la zone d'usinage sans défauts.
- Essai 2 : effectué avec une avance de 0.2 mm/tous. Pas de défaut observé (figure 4.10 (b)). Cette condition appartient aussi à la zone d'usinage sans défauts.
- Essai 3 : effectué avec une avance de 0.3 mm/tous. Un délaminage de 0.97 mm a été observé dans la zone d'entrée de l'outil (figure 4.10 (c)). Le niveau de vibration enregistré appartient à la zone d'usinage classée avec défauts.
- Essai 4 : effectué avec une avance de 0.35 mm/tour. Un délaminage important a été observé et le niveau de vibration enregistré appartient à la zone d'usinage classée avec défauts (figure 4.10 (d)).

4.2.1 Intégration de la productivité dans le choix de paramètres

Le but de cette partie est d'intégrer la productivité dans le choix des paramètres de coupe. La productivité est représentée par le débit copeaux Q .

Les deux objectifs envisagés sont :

- Augmenter le débit copeaux Q , pour augmenter la productivité.
- Limiter le seuil de vibration A_{rms} à 175 m/s² pour éviter les défauts étudiés.

Deux configurations ont été représentées :

La première configuration permet de choisir les conditions de coupe avec un débit copeaux supérieur à 50 cm³/min, sur les figures : 4.11(a), 4.11(c) et 4.11(b), le domaine en blanc représente la plage de choix de paramètres qui respectent la non-apparition de défauts étudiés et une productivité $Q > 50$ cm³/min.

- Pour une valeur de maintien de $Vc = 1500$ m/min (figure 4.11(a)), on peut choisir l'avance f variant entre 0.1 et 0.35 mm, et si on prend la valeur de l'avance $f = 0.2$ mm (par exemple), on peut déduire que la valeur de la profondeur de passe a_p doit être comprise entre 1.1 et 1.9 mm.
- Pour une valeur de maintien de $f = 0.2$ mm (figure 4.11(c)), on peut choisir la vitesse de coupe Vc variant entre 650 et 2200 m/min, et si on prend la valeur de la

4.2. ESSAIS DE VALIDATION

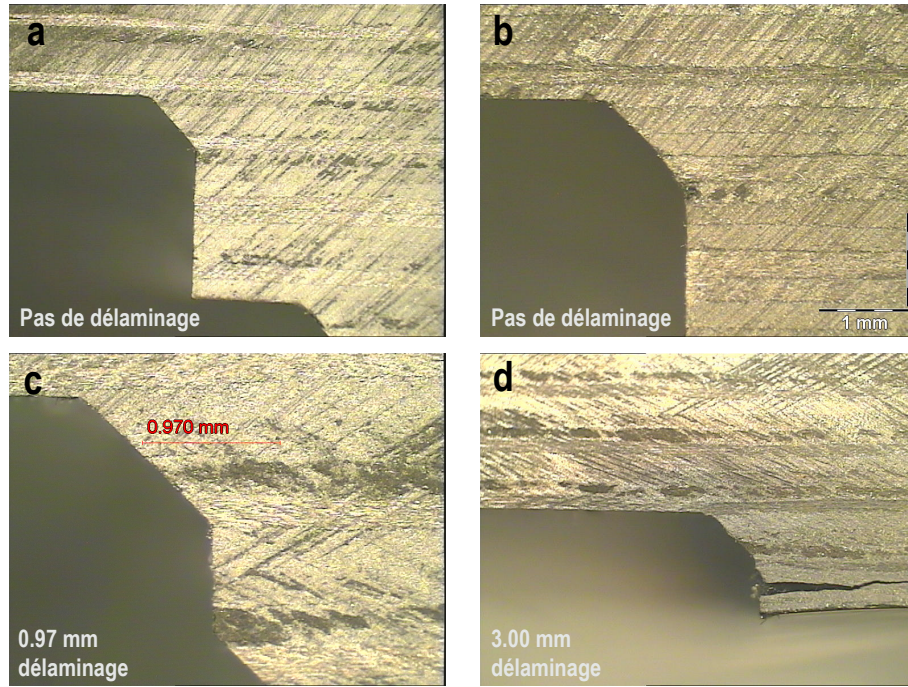


FIGURE 4.10 – Essais de validation : (a) essai 1, (b) essai 2, (c) essai 3 and (d) essai 4.

vitesse de coupe $Vc = 2000$ m/min (par exemple), on peut déduire que la valeur de la profondeur de passe a_p doit être comprise entre 0.8 et 1.8 mm.

- Pour une valeur de maintien de $a_p = 1.5$ mm (figure 4.11(b)), on peut choisir l'avance f variant entre 0.1 et 0.33 mm, et si on prend la valeur de l'avance $f = 0.2$ mm (par exemple), on peut déduire que la valeur de la vitesse de coupe doit être supérieur à 1000 m/min.

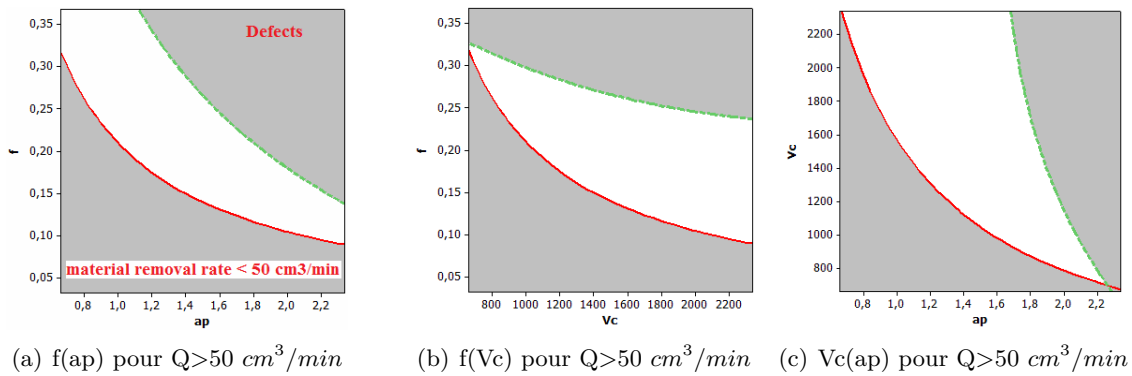


FIGURE 4.11 – Sélection de paramètres de coupe pour $Q > 50 \text{ cm}^3/\text{min}$

La seconde configuration figures 4.12(a), 4.12(c), 4.12(b) permet de choisir les conditions de coupe avec un débit copeaux supérieur à $90 \text{ cm}^3/\text{min}$.

- Pour une valeur de maintien $Vc = 1500$ m/min (figure 4.12(a)), la profondeur de

4.2. ESSAIS DE VALIDATION

pas de passe doit être choisie entre 1.05 et 1.8 mm, et en fonction de la valeur de a_p choisie, on obtient la valeur de f qui sera comprise entre 0.2 et 0.35 mm.

- Pour une valeur de maintien $a_p = 1.5$ mm (4.12(b)), l'avance f doit être choisie entre 0.16 et 0.24 mm, et en fonction de la valeur de f choisie, on obtient la valeur de V_c qui sera supérieur à 1400 m/min.
- Pour une valeur de maintien $f = 0.2$ mm (figures 4.12(c)), la profondeur de passe doit être choisie entre 1.2 et 1.85 mm, et en fonction de la valeur de a_p choisie, on obtient la valeur de V_c qui sera supérieur à 1550 m/min.

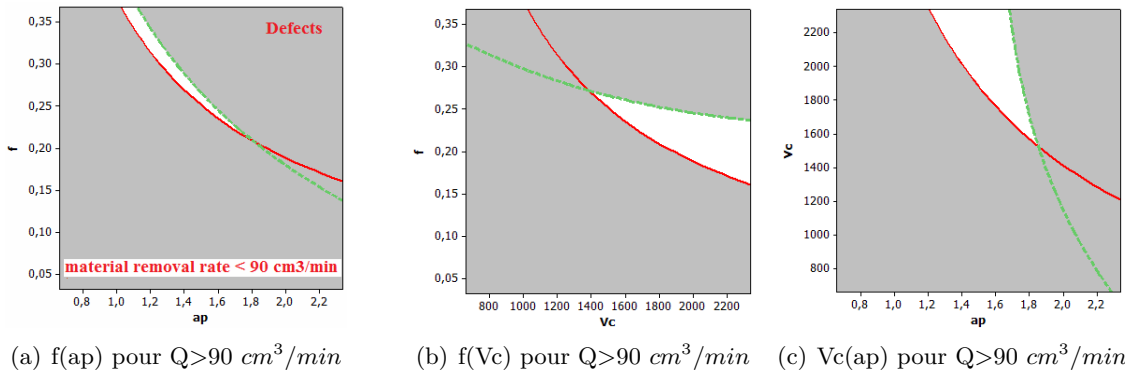


FIGURE 4.12 – Sélection de paramètres de coupe pour $Q > 90 \text{ cm}^3/\text{min}$

4.2.2 Conclusion

L'objectif de ce travail était de montrer la corrélation entre les vibrations et les défauts générés lors de l'usinage d'un matériau composite carbone/époxy T800S/M21. Le modèle déterminé par le plan expérimental est satisfaisant, il permet de choisir les conditions de coupe les mieux adaptées pour éviter les défauts d'usinage de ce matériau et augmenter la productivité. Les résultats ont permis d'établir d'une part, qu'au-delà d'un seuil de vibrations, les défauts de surface et l'augmentation de l'usure de l'outil de coupe apparaissaient et d'autre part, que l'interaction $f * a_p$ est le facteur le plus significatif du modèle pour lequel il est possible de prévenir l'apparition des défauts cités. L'analyse de la variance a permis de qualifier le modèle retenu. La méthode utilisée dans cette étude est une combinaison entre plusieurs objectifs recherchés en usinage des composites comme la qualité des pièces usinées, la durée de vie des outils de coupe et la productivité.

4.3 Application sur le matériau composite : carbon/époxy T800S/M21 avec plaquette carbure de type Penta

Le but de cette deuxième application est d'optimiser les conditions de coupe en fraisage d'un matériau composite carbon/époxy T800S/M21. Trois configurations différentes du revêtement d'outil ont été testées, et pour chaque configuration, nous avons testé 2 angles de coupe différents, 19 et 60°. Une plaquette avec un angle de coupe $Kr = 19^\circ$ a été équipé sur une fraise de coupe appelée (Penta 19). Un autre outil de fraisage appelé (Penta 60) a été utilisé pour l'angle de coupe $Kr = 60^\circ$ (voir l'annexe 2). A noter que tous les essais ont été réalisés à sec.

4.3.1 Partie expérimentale

4.3.1.1 Environnement expérimental

La machine utilisée est un centre d'usinage Météor 10 (entreprise PCI SCEMM) dont les caractéristiques sont : $N_{max} = 24000 \text{ tr/min}$ et $P = 40 \text{ kW}$. Le matériau usiné est un composite multicouche constitué de fibres de carbone T800 dans une résine époxy de référence M21 (T800S/M21) sous forme d'une plaque dont les dimensions sont : $180\text{mm} \times 180\text{mm}$ et d'épaisseur 17mm . La séquence d'empilement des plis dans le composite est la suivante : $[(45/90/135/0)_{16}]_s$, l'épaisseur d'un pli étant de $0,26 \text{ mm}$. La Figure 4.13 montre l'environnement du test.

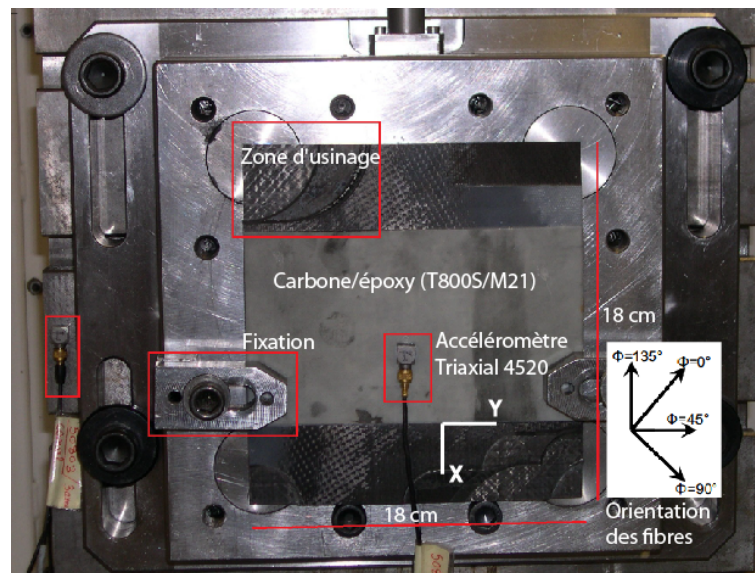


FIGURE 4.13 – Dispositif expérimental

La profondeur de passe a_p a été fixée à $1,04 \text{ mm}$, cette épaisseur correspond à quatre couches de tissu carbone pour éviter l'effet d'orientation des fibres. L'engagement radial a_e a été fixé à 50 % du diamètre de l'outil ($a_e = 36,4 \text{ mm}$ pour la configuration 60° et

4.3. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC PLAQUETTE CARBURE DE TYPE PENTA

$a_e = 33,5 \text{ mm}$ pour la configuration 19°). Dans ces conditions, la longueur de coupe L_c est de 55 mm pour la configuration 60° et $22,5 \text{ mm}$ pour la configuration 19° .

Le tableau 4.3.1.1 résume l'ensemble des moyens expérimentaux utilisés dans l'étude ainsi que les spécifications techniques de ces moyens.

TABLE 4.6 – Liste détaillée des équipements de mesures utilisés (f_a =fréquence d'acquisition)

Matériels	Descriptions	Fabricant, Ref	Spécificités	Mesures effectuées dans l'étude
Mesures direct				
Caméra Infrarouge	Mesure du rayonnement infrarouge émis par un matériau	CEDIP, JADE MWIR	Réponse spectrale 3 à $5 \mu m$, $f_a = 176 \text{ Hz}$	Température de la surface usinée
Table dynamométrique	Mesure d'efforts par capteur piézo-électrique	KISTLER, Type 9255B	$f_a = 10 \text{ kHz}$,	Efforts de coupe
Thermocouples statiques	Mesure de température	National instrument NI9211	12 voies, $f_a = 2 \text{ Hz}$	Température dans la pièce composite
Mesures post essais				
Profilomètre optique	Mesure optique du profil d'une surface	VEECO, WYKO NT1100	Résolution verticale $0,1 \text{ nm}$ à 1 mm	Mesure de la rugosité de la surface usinée et des rayons d'acuité outil
Binoculaire	Mesure visuelle avec agrandissement		Grandissement max $\times 4$	Mesure de l'usure

L'épaisseur du copeau h , fonction de l'avance par dent f et de l'angle d'attaque Kr , est donnée par l'équation 4.4 :

$$h = f \times \sin(Kr). \quad (4.4)$$

4.3.1.2 Plan d'expérience

La complexité du comportement mécanique du matériau composite (matériau non homogène et non isotrope) nécessite un plan d'expérience qui permet une modélisation non linéaire des phénomènes mesurés ou observés lors de l'opération d'usinage (vibrations et délaminage). Parmi les nombreux types de plans permettant de construire des surfaces de réponse, nous utiliserons un plan composite centré [Goupy (2005)]. Ceux-ci permettent d'exploiter un modèle quadratique avec interaction utilisé dans la plupart des cas des phénomènes non linéaires. Un plan d'expérience composite centré à 22 essais a été choisi pour étudier l'influence des deux paramètres les plus influents sur la coupe : vitesse de coupe V_c et épaisseur du copeau h .

Les deux paramètres : vitesse de coupe V_c et épaisseur du copeau h ont été établis en accord avec les recommandations fournies par le constructeur d'outils de coupe [Safety (2011)].

La Figure 4.14 montre le plan d'expérience étudié avec les deux angles d'attaque Kr 19° et 60° . Pour chacun des deux angles d'attaque,

4.3. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC PLAQUETTE CARBURE DE TYPE PENTA

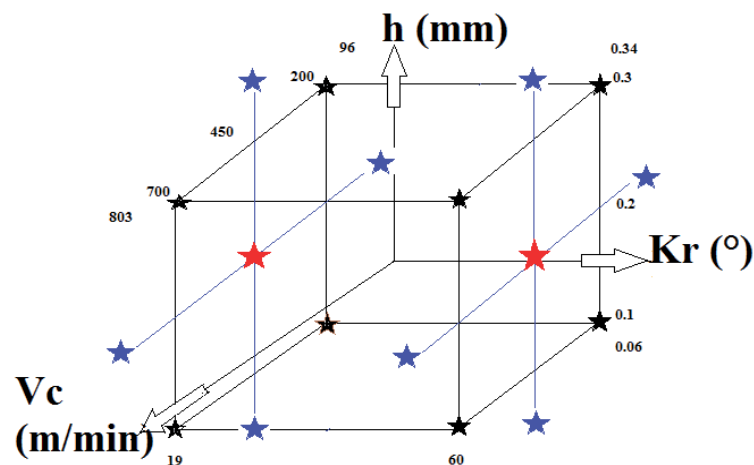


FIGURE 4.14 – Plan d'expérience composite centré utilisé

TABLE 4.7 – Paramètres de coupe et variables codées

Niveaux des variables codées	Expressions	Vc [m/min]	h [mm]
-1,21	Min	96	0,06
-1	$\frac{Min+Max}{2} - \frac{1}{\delta}(Max - \frac{Min+Max}{2})$	200	0,1
0	$\frac{Min+Max}{2}$	450	0,2
+1	$\frac{Min+Max}{2} + \frac{1}{\delta}(Max - \frac{Min+Max}{2})$	700	0,3
+1,21	Max	803	0,34

Les tableaux suivants montrent les conditions de coupe choisies pour les geometries $Kr = 19^\circ$ et $Kr = 60^\circ$:

$Kr(^\circ)$	$a_p(mm)$	$a_e(mm)$	$Lc(mm)$	$Vc(m/min)$	$h(mm)$	i
19	1,04	36,4	55	96,5	0,2	1
				200	0,1	2
				200	0,3	3
				450	0,06	4
				450	0,2	5
				450	0,2	6
				450	0,2	7
				450	0,34	8
				700	0,1	9
				700	0,3	10
				803,5	0,2	11

4.3. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC PLAQUETTE CARBURE DE TYPE PENTA

$Kr(^{\circ})$	$a_p(mm)$	$a_e(mm)$	$Lc(mm)$	$Vc(m/min)$	$h(mm)$	i
60	1,04	33,7	22,5	96,5	0,2	1
				200	0,1	2
				200	0,3	3
				450	0,06	4
				450	0,2	5
				450	0,2	6
				450	0,2	7
				450	0,34	8
				700	0,1	9
				700	0,3	10
				803,5	0,2	11

4.3.1.3 Outils de coupe

Pour les 2 angles de coupe 19 et 60°, une plaquette PENTA de référence PDKT0905DEFR11 produite par l'entreprise Safety Cutting Tool [Safety (2011)] a été utilisée avec trois revêtements différents. Les 3 revêtements d'outil de coupe testés sont les suivants :

1. DLCép1 : Revêtement diamant type DLC (Diamond Like Carbon) avec une épaisseur de 1 μm dont le substrat en carbure de tungstène est composé de 6% de Cobalt. Ce type de revêtement est connu pour sa faible résistance à l'abrasion.
2. NanoC : Revêtement diamant CVD (Chemical Vapor Deposit) nano-cristallin d'une épaisseur de 6 μm .
3. MicroC : Revêtement diamant CVD (Chemical Vapor Deposit) micro-cristallin d'une épaisseur de 16 μm .

Les essais ont été réalisés avec un outil neuf, pour chacun des essais et la nouvelle surface usinée a été décalée à chaque fois de la longueur de coupe.

L'angle axial λ_s et l'angle radial γ_f effectifs de l'outil de coupe sont donnés dans la Table 4.3.1.3 suivant la norme [norme NFE 66 502 (1978)]. La Figure 4.15 montre la géométrie de l'outil ainsi que les directions de coupe et d'avance utilisées. Pour faciliter l'interprétation des efforts de coupe est des niveaux de vibration, une seule plaquette est montée sur l'outil de coupe.

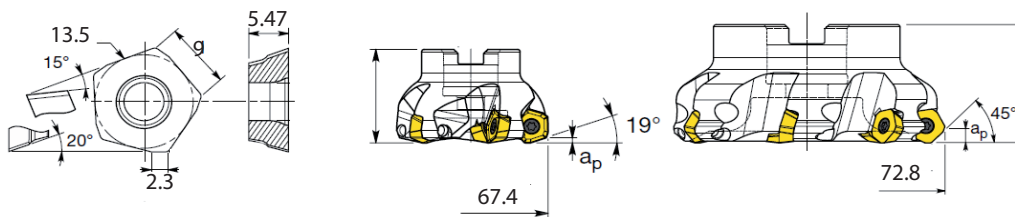


FIGURE 4.15 – Outils de coupe utilisés

4.3. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC PLAQUETTE CARBURE DE TYPE PENTA

TABLE 4.8 – Paramètres d’outils de coupe

Paramètre	Penta 60	Penta 19
Angle d’attaque $Kr(^{\circ})$	60	19
Géométrie de la plaquette interne ($^{\circ}$)	15	15
Angle de coupe axial effectif $\lambda_s(^{\circ})$	6,1	15,2
Angle de coupe radial effectif $\gamma_f(^{\circ})$	24	20
Longueur de passe $L_c(mm)$	55	22,5
Diamètre d’outil $d(mm)$	72,8	67,4
Engagement d’outil $a_e(mm)$	36,4	33,7
Profondeur de passe $a_p(mm)$	1,04	1,04
Nombre de plaquettes Z	1	1

La figure 4.16 montre les directions de coupe et d’avance pour les différentes configurations.

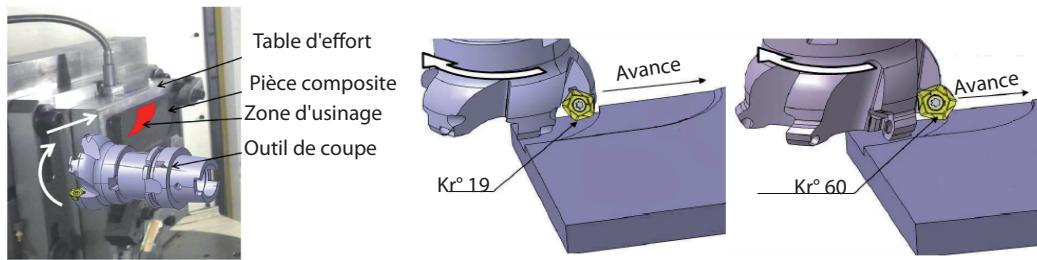


FIGURE 4.16 – Directions de coupe

4.3.1.4 Paramètres mesurés

Vibrations

Les signaux vibratoires générés en usinage ont été mesurés à l’aide d’un système d’acquisition et d’analyse Brüel & Kjær composé de :

- 2 accéléromètres tri-axiaux (X Y Z) de marque Brüel & Kjær et du type 4520, l’un est monté sur le matériau composite à usiner (au plus près de la coupe) et l’autre est monté directement sur la platine Kistler de mesure des efforts de coupe. Les sensibilités selon les directions (XYZ) des deux accéléromètres sont respectivement (1,032 ; 1,067 ; 1,047) mV/g et (1,011 ; 0,991 ; 1,039) mV/g ;
- 1 accéléromètre mono-axe de sensibilité 9,98 mV/g (de marque Brüel & Kjær et de type 4508) monté sur la broche et orienté dans la direction radiale de la broche ;
- un multi-analyseur (3560 de marque Brüel & Kjær), relié à un ordinateur pour l’enregistrement des données temporelles à l’aide du logiciel Pulse Labshop.

Les vibrations sont enregistrées pendant toute la durée de l’essai. L’acquisition a été effectuée à une fréquence d’échantillonnage de 16384 Hz . Le traitement des signaux collectés a été réalisé à l’aide d’une interface d’analyse développée dans l’environnement Matlab.

4.3. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC PLAQUETTE CARBURE DE TYPE PENTA

Les mesures de vibration présentées dans cette étude sont celles du capteur monté sur la plaque composite. En effet, le signal temporel émis par le capteur est enregistré dans les trois directions X, Y et Z , la moyenne quadratique appelée A_{rms} des trois signaux est ainsi calculée sur toute la durée du signal enregistré selon la relation suivante :

$$A_{rms} = \sqrt{Ax_{rms}^2 + Ay_{rms}^2 + Az_{rms}^2}. \quad (4.5)$$

Efforts de coupe

Afin de récupérer les efforts appliqués sur la plaquette nous avons fait un paramétrage de la fraise : les données d'efforts issues de la table Kistler sont dans un repère fixe lié à la table d'acquisition qui pour notre cas est le repère F_{xf}, F_{yf}, F_{zf} . Un repère tournant a été mis en place F_{cx}, F_{cy}, F_{cz} avec comme paramètre l'angle de coupe (19 et 60°) qui est la position angulaire de la fraise à l'instant t . Sur la figure 4.17 les repères F_{cx}, F_{cy}, F_{cz} et F_{xf}, F_{yf}, F_{zf} sont représentés. Finalement un repère fixé à la plaquette $F_{4cx}, F_{4cy}, F_{4cz}$ prend en compte la position de la plaquette dans son logement : angle de coupe radial et angle de coupe axial ainsi que l'angle Ω qui est la position angulaire de la fraise à l'instant t , il est défini entre le repère fixe et le repère tournant. Cet angle varie de 0° à 360° , et comme 50% du diamètre de la fraise est engagé, le domaine de variation qui nous intéresse est situé entre 360° et 270° .

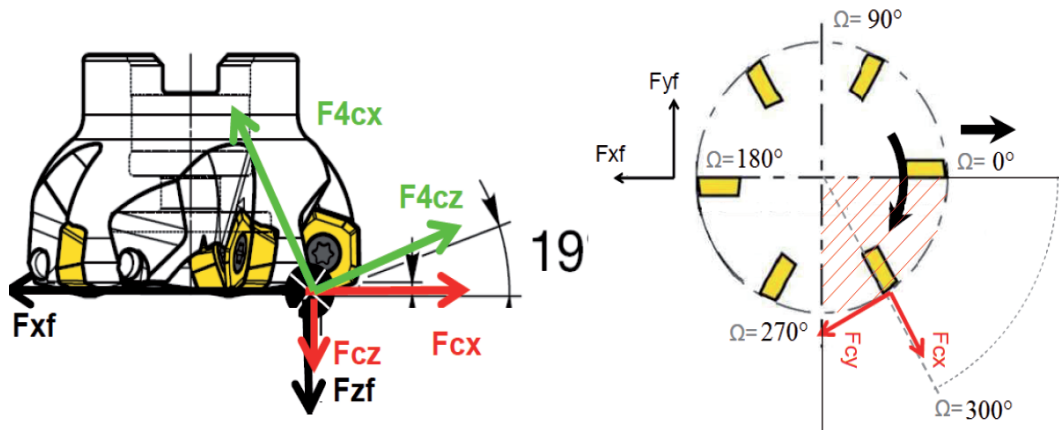


FIGURE 4.17 – Vue de côté et de dessus de la fraise pour un angle de rotation de la fraise de 300°

Les efforts de coupe relevés sur les composites sont souvent bruités, un filtrage des données avec un filtre passe-bas est mis en place pour récupérer la composante statique des signaux.

Rugosité de surface R_a

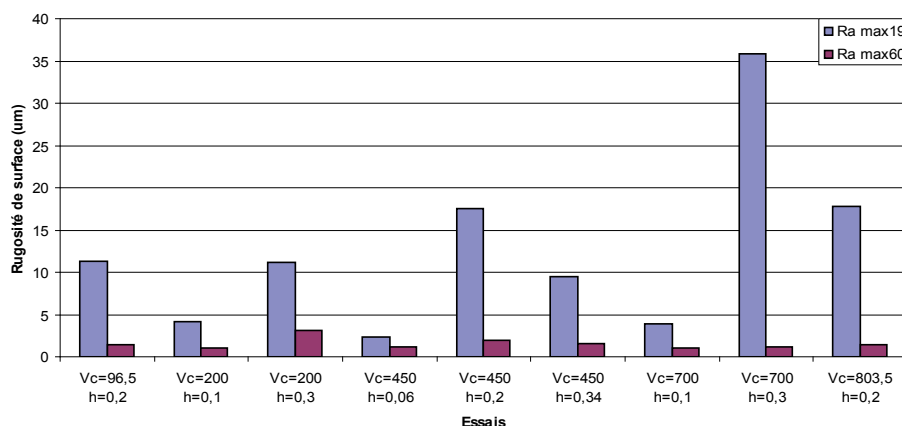
La rugosité de surface a été mesurée pour chacun des essais en utilisant un profilomètre optique (WYKO NT1100 VEECO). Comme le mentionnent les auteurs [Ramulu (1997),

4.3. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC PLAQUETTE CARBURE DE TYPE PENTA

Arola et Ramalu (1997), et Guegan (1992)], la mesure de rugosité de surface est très sensible à l'orientation des fibres composites. Trois mesures ont été réalisées pour estimer le niveau de rugosité de surface pour chaque essai.

La rugosité de la surface, a été mesurée égale à $1,08 \mu m$ pour la condition $Vc = 200 \text{ m/min}$, $h = 0,1 \text{ mm}$, ce niveau donne une information sur la qualité de surface obtenue par un outil revêtu (DLC).

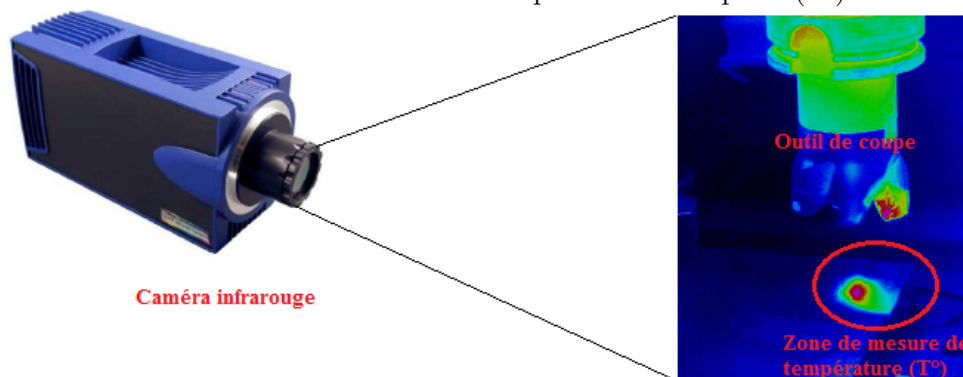
FIGURE 4.18 – Comparaison entre les rugosités de surface $Kr = 19^\circ$ et $Kr = 60^\circ$



Température

La température de la pièce a été enregistrée en utilisant une caméra thermique infrarouge FLIR MWIR JADE (gamme spectrale $3,6$ à $5,1 \mu m$) comme le montre la figure 4.19. L'émissivité de la matière après l'étalonnage est estimée à $0,4$. La valeur de la température est mesurée à l'extrémité de l'opération de fraisage au cours de la sortie d'outil. Une attention particulière a été effectuée pour contrôler la température maximale autorisée par le fabricant du matériau composite qui est fixée à $150^\circ C$.

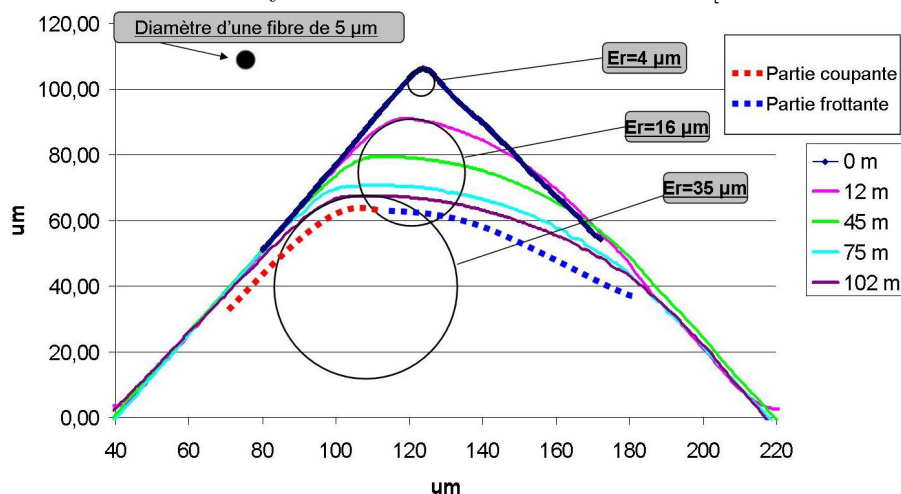
FIGURE 4.19 – Mesure de température de la pièce (T°)



Usure de la plaquette de coupe

L'évolution du rayon d'arête est un paramètre influant sur le mécanisme de coupe et plus spécifiquement la génération de délaminage et de plis non coupés. Une méthode de mesure a été développée à l'aide d'un profilomètre optique VEECO, WYKO NT1100 afin d'obtenir le profil exact du rayon d'arête. La figure 4.20 montre le dessin du cercle retenu pour 3 cas d'usure. Il est défini comme étant le cercle ayant le plus de points en commun avec le profil de l'arête de coupe et de plus il est strictement inscrit dans la géométrie de l'arête. Cette méthode de mesure est introduite par [Sheikh-Ahmad (2009)], dans ces travaux, il considère le rayon d'arête comme étant dans la partie coupante (représentée en rouge sur la figure 2.16) et la zone de dépouille une zone de frottement. Dans les travaux de [Morandeau (2012)] un algorithme de détermination du rayon d'arête à partir des points du profil a été mis en place.

FIGURE 4.20 – Mesure du rayon d'arête suivant la méthode de [Sheikh-Ahmad (2009)]



Délaminage

L'observation en profil de la plaque composite a été réalisée après chaque essai à l'aide d'un stéréomicroscope avec un grossissement de ($\times 4$). Cela a permis de mesurer la longueur de délaminage (L_d) sur la zone d'entrée de l'outil dans la pièce lorsque le délaminage était présent ou de constater qu'il n'y avait de défaut.

Les essais ont été réalisés avec un outil neuf pour chacun des essais et la nouvelle surface à usiner a été décalée à chaque fois de la longueur de coupe, soit 55 mm.

Le tableau 4.9 montre les valeurs mesurées de la longueur de délaminage L_d en fonction des conditions de coupe, à noter que l'essai 5 a été répété 4 fois.

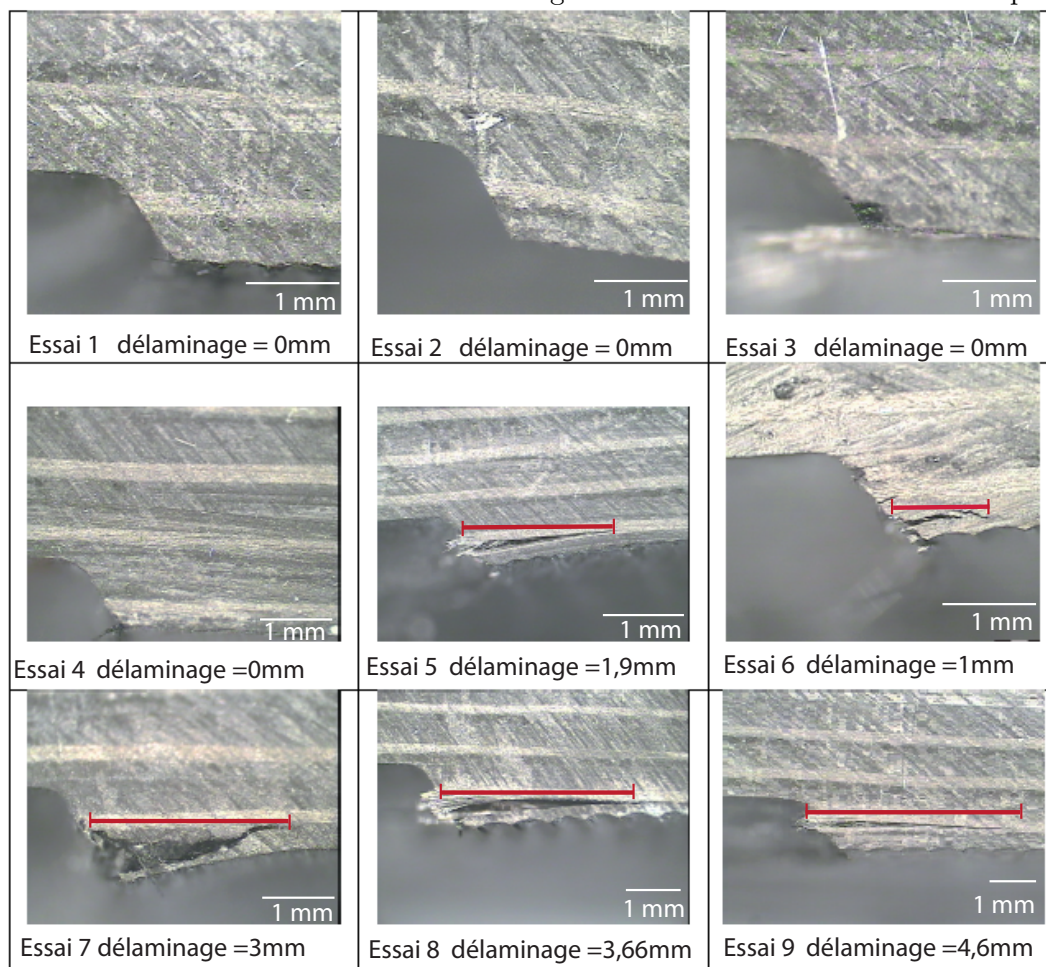
Comme le montre la figure 4.21, les paramètres de coupe influent directement sur la présence du délaminage. Un gain en qualité de coupe pour une géométrie d'angle d'attaque $Kr = 19^\circ$ comparée à un angle d'attaque de $Kr = 60^\circ$ a été observé. En effet, une absence de délaminage a été constatée pour toutes les conditions de coupe avec un angle d'attaque

4.3. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC PLAQUETTE CARBURE DE TYPE PENTA

TABLE 4.9 – Valeurs de la longueur de délaminage L_d en fonction des conditions de coupe

N°	V_c (m/min)	h (mm)	L_d (mm)
1	96,5	0,2	0
2	200	0,1	0
3	200	0,3	0
4	450	0,06	0
5	450	0,2	1,9
6	450	0,34	1
7	700	0,1	3
8	700	0,3	3,66
9	803,5	0,2	4,6

FIGURE 4.21 – Observation du délaminage en fonction des conditions de coupe



4.3. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC PLAQUETTE CARBURE DE TYPE PENTA

d'outil $Kr = 19^\circ$, ce qui n'était pas le cas pour l'angle d'attaque d'outil $Kr = 60^\circ$. La figure 4.22, résume la qualité obtenue pour les deux géométries dans une condition de coupe centrale ($Vc = 450 \text{ m/min}$ et $h = 0,2 \text{ mm}$).

4.3.2 Application sur une plaquette de revêtement DLC et d'angle d'attaque $Kr=60^\circ$

4.3.2.1 Modèles de Vibration / délaminage

La Table 4.10 montre les essais réalisés, à noter que l'essai 5 a été répété 4 fois.

TABLE 4.10 – Table des essais									
N°	Vc_{cod}	h_{cod}	Vc (m/min)	h (mm)	Ax_{rms} (m/s^2)	Ay_{rms} (m/s^2)	Az_{rms} (m/s^2)	$Arms$ (m/s^2)	L_d (mm)
1	-1,21	0	96,5	0,2	23,32	30,36	38,17	54,06	0
2	-1	-1	200	0,1	21,51	27,75	36,93	50,95	0
3	-1	1	200	0,3	29,41	49,49	58,07	81,77	0
4	0	-1,21	450	0,06	33,08	40,97	44,39	68,87	0
5	0	0	450	0,2	48,14	63,59	82,03	114,41	1,9
6	0	1,21	450	0,34	38,7	68,56	67,02	103,39	1
7	1	-1	700	0,1	64,94	81,98	113,18	154,10	3
8	1	1	700	0,3	64,48	104,26	126,46	176,12	3,66
9	1,21	0	803,5	0,2	95,85	110,66	144,52	205,71	4,6

Les résultats ont montré qu'au-delà d'un seuil de vibration situé entre 81 m/s^2 et 103 m/s^2 , l'apparition d'un délaminage est systématique. De plus, la longueur de délaminage augmente avec l'augmentation de la vibration enregistrée comme le montre la Figure 4.23. La zone d'incertitude est située entre les deux niveaux extrêmes de vibration :

- la plus grande valeur de vibration relevée sans délaminage (courbe en vert correspondant à l'essai 3) ;
- la plus petite valeur de vibration relevée avec délaminage (courbe en rouge correspondant à l'essai 6).

La Figure 4.24 montre une comparaison suivant la direction Z entre le niveau de vibration $Arms$ mesuré, le cas le plus favorable correspondant à l'essai 2 et le plus défavorable (avec délaminage) correspondant à l'essai 9. Dans cet exemple, le niveau de vibration $Arms$ de l'essai avec délaminage est quatre fois plus important que celui sans délaminage.

Modèle de vibration $Arms$

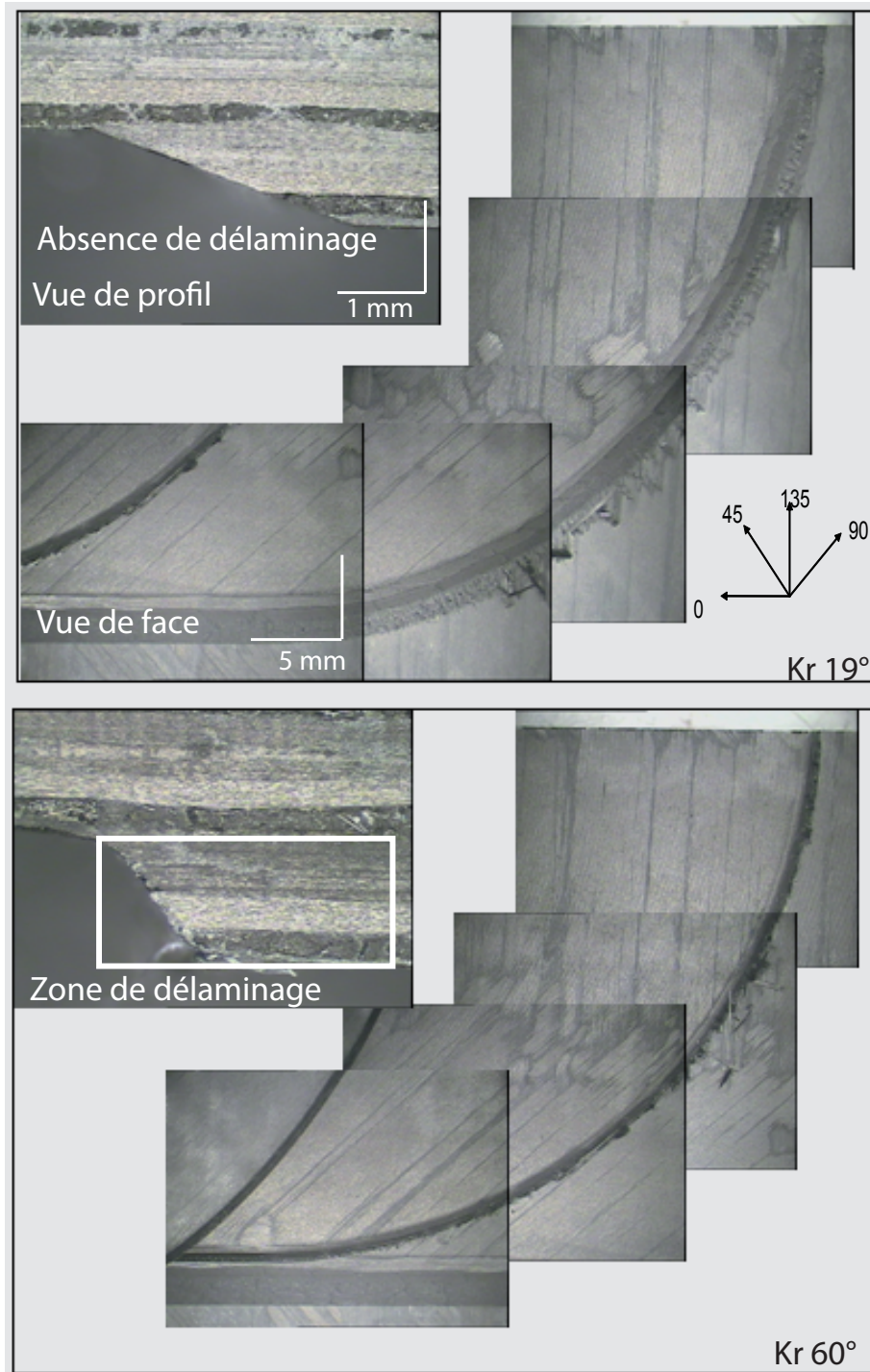
A partir de la méthode de surface de réponse, le modèle de vibration $Arms$ est donné par l'équation 4.6 :

$$Arms = -29,26 + 0,08 \times Vc + 658,51 \times h - 1228,05 \times h^2 - 0,09 \times Vc \times h. \quad (4.6)$$

La valeur du coefficient de détermination R^2 de ce modèle est égale à 0,989. Cela signifie que 98,9% des variations du niveau de vibration sont expliquées par ce modèle

4.3. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC PLAQUETTE CARBURE DE TYPE PENTA

FIGURE 4.22 – Vues de face et profil de la pièce usinée $Kr = 19^\circ$ et $Kr = 60^\circ$ ($V_c = 450 \text{ m/min}$ et $h = 0,2 \text{ mm}$)



4.3. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC PLAQUETTE CARBURE DE TYPE PENTA

FIGURE 4.23 – Seuils de vibration en fonction des conditions de coupe

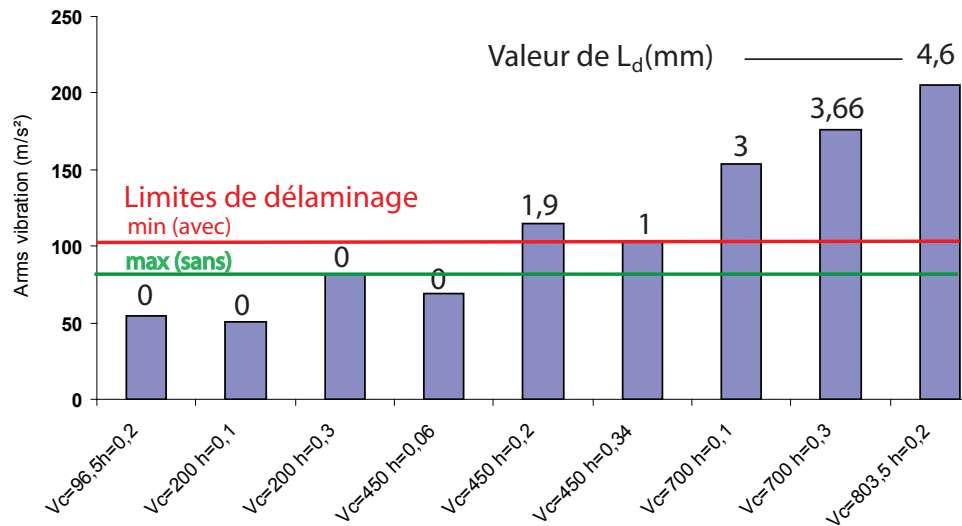
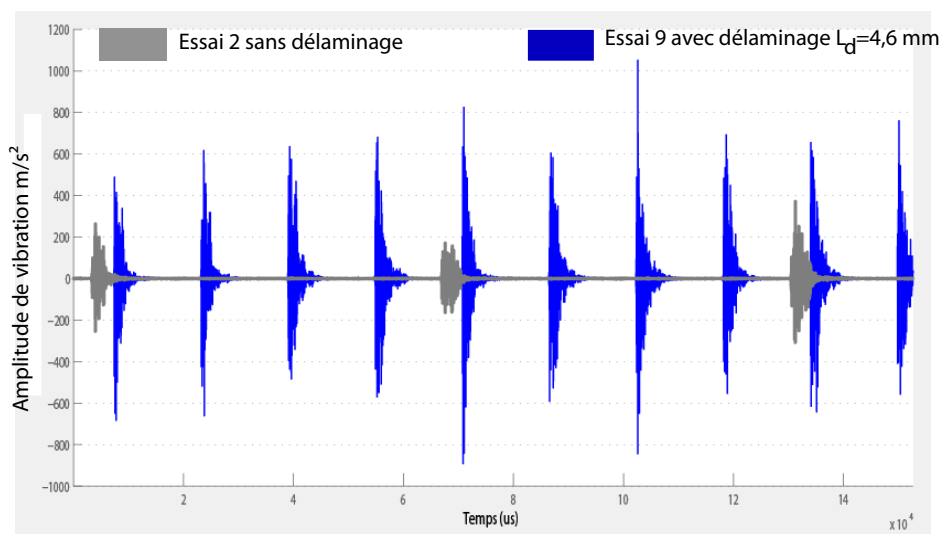


FIGURE 4.24 – Comparaison entre les signaux de vibration enregistrés sans délaminage (essai 2) et avec délaminage (essai 9)



4.3. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC PLAQUETTE CARBURE DE TYPE PENTA

et que 0,011% restent par conséquent inexpliquées. La valeur du coefficient de détermination ajusté de ce modèle de vibration est $R_{adj}^2 = 0,972$. Il représente une correction du R^2 qui permet de prendre en compte le nombre de variables utilisées dans le modèle. Ces deux coefficients montrent une très bonne corrélation entre ce modèle et les données expérimentales.

L'analyse de la variance (ANOVA) est donnée par la Table 4.11. Le test de FISHER (F) est calculé pour le modèle et sa valeur est : $F = 88,98$. Cela signifie que la part de la variance de vibration expliquée par le modèle est 88,98 fois plus importante que la part de la variance de vibration qui reste inexpliquée. Comme indiqué dans la Table 4.11, la probabilité ($Prob > F$) associée au test de FISHER (F) est de 0,002. Cela signifie que le risque de la non signification du modèle est de 0,2% ce qui est négligeable. D'après ce tableau, la partie quadratique du modèle est la plus significative ($%Prob > F = 0,022$). Ensuite vient la partie linéaire et enfin la partie interaction. En conclusion, l'analyse de la variance a permis de qualifier le modèle retenu.

TABLE 4.11 – Analyse de la variance du modèles *Arms*

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	$Prob > F$
Régression	5	24439,4	24439,38	4887,876	88,98	0,002
Linéaire	2	22507,4	788,46	394,228	7,18	0,072
Quadratique	2	1912,7	1912,67	956,337	17,41	0,022
Interaction	1	19,3	19,32	19,322	0,35	0,595
Résidus	3	164,8	164,80	54,932		
Total	8	24604,2				

Le test de STUDENT (t) a été utilisé pour estimer les effets des facteurs du modèle de vibration *Arms* comme le montre la Table 4.12. La probabilité $Prob > t$ du facteur le plus significatif h est égale à 0,041 ce qui signifie qu'il y a 4,1 chances sur 100 pour que la vraie valeur du coefficient de h soit nulle. Cela montre bien que c'est le facteur le plus influent, suivi de près des facteurs quadratiques $h \times h$ et $Vc \times Vc$. Le terme d'interaction $Vc \times h$ ayant ici un rôle secondaire.

TABLE 4.12 – Effet des facteurs du modèle *Arms*

Terme	Coef	SE	t	$Prob > t$
Constant	-29,26	26,54	-1,10	0,351
Vc	0,08	0,07	1,17	0,323
h	658,51	190,45	3,45	0,041
$Vc \times Vc$	0,00	0,00	2,26	0,109
$h \times h$	-1228,05	441,07	-2,78	0,069
$Vc \times h$	-0,09	0,14	-0,59	0,595

4.3. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC PLAQUETTE CARBURE DE TYPE PENTA

Modèle de la longueur de délaminage L_d

Le modèle du second ordre de la longueur de délaminage L_d est donné par l'équation 4.7 :

$$L_d = -2,670 + 0,001 \times Vc + 25,209 \times h - 63,945 \times h^2 + 0,005 \times Vc \times h. \quad (4.7)$$

Les valeurs du coefficient de détermination R^2 et du coefficient de détermination ajusté R_{adj}^2 ont été calculées et valent : $R^2 = 0,991$ et $R_{adj}^2 = 97,6$ respectivement. Ces deux coefficients montrent une très bonne corrélation entre le modèle et les données expérimentales.

L'analyse de la variance (ANOVA) est donnée par la Table 4.13. Pour le modèle, le test de FISHER (F) donne : $F = 66,84$ et la probabilité ($Prob > F$) associée à ce test est ici de 0,003. La partie quadratique du modèle est la plus significative ($Prob > F = 0,016$) suivie par les parties linéaire et interaction dans cet ordre. Comme dans le cas du modèle de vibration *Arms*, la variable explicative apporte une quantité d'information au modèle dont la partie quadratique est la plus significative.

TABLE 4.13 – Analyse de la variance du modèle L_d

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	$Prob > F$
Régression	5	25,656	25,656	5,131	66,84	0,003
Linéaire	2	22,201	1,450	0,725	9,44	0,051
Quadratique	2	3,346	3,346	1,673	21,79	0,016
Interaction	1	0,108	0,108	0,108	1,42	0,319
Résidus	3	0,230	0,230	0,076		
Total	8	25,887				

Le test de STUDENT (T) est utilisé pour estimer les effets des facteurs comme le montre la Table 4.14. La probabilité $Prob > t$ du facteur le plus significatif $h \times h$ est égale à 0,030 ce qui signifie qu'il y a 3,0 chances sur 100 pour que la vraie valeur du coefficient de $h \times h$ soit nulle. Cela montre bien que c'est le facteur le plus influent, suivi de très près par le facteur linéaire h et du facteur quadratique $Vc \times Vc$. Le terme d'interaction ayant ici également un rôle secondaire.

TABLE 4.14 – Effet des facteurs du modèle L_d

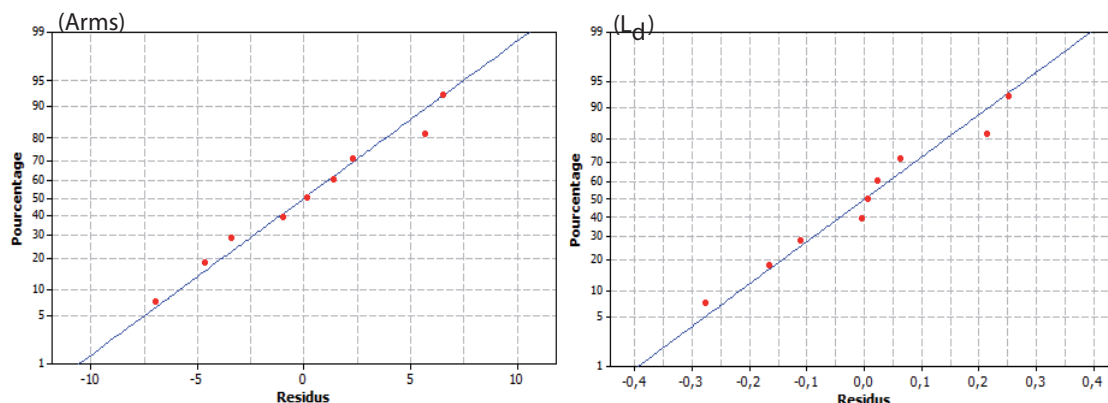
Terme	$Coeff$	SE	t	$Prob > t$
Constant	-2,67	0,99	-2,69	0,074
Vc	0,00	0,00	0,51	0,642
h	25,20	7,12	3,54	0,038
$Vc \times Vc$	0,00	0,00	1,68	0,192
$h \times h$	-63,94	16,48	-3,87	0,030
$Vc \times h$	0,00	0,00	1,19	0,319

Comme pour le modèle de vibrations *Arms*, la figure 4.25 montre que les résidus des

4.3. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC PLAQUETTE CARBURE DE TYPE PENTA

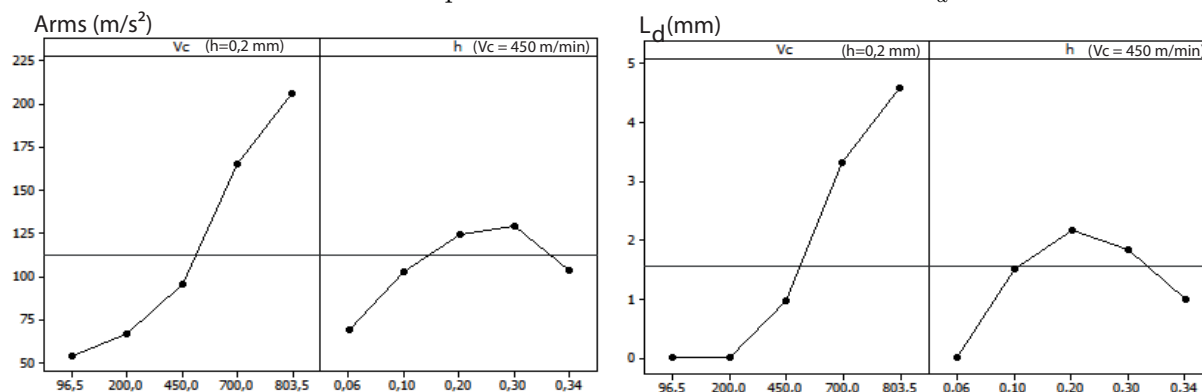
deux modèles suivent fidèlement une droite (droite d'Henry), ce qui confirme que la distribution des résidus suit bien la Loi Normale.

FIGURE 4.25 – Analyse des résidus des modèles $Arms$ et L_d



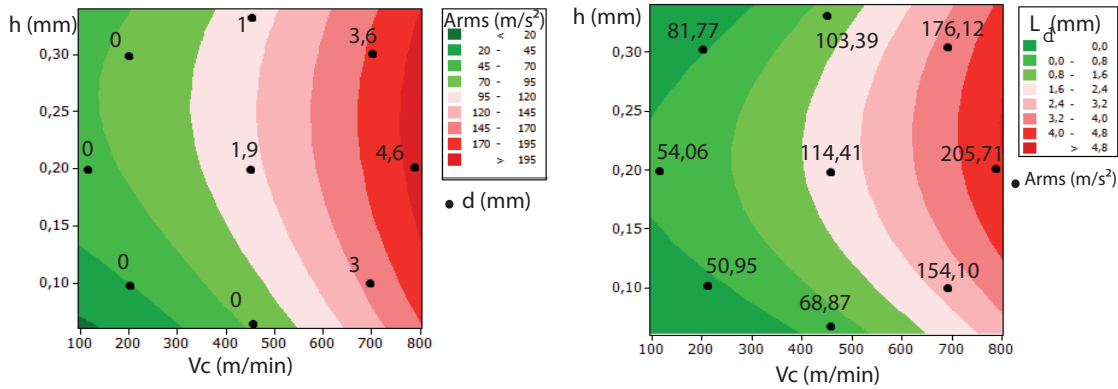
Les influences des facteurs quadratiques et interactions ont été calculées dans la Table 4.11 pour le modèle $Arms$ et la Table 4.13 pour le modèle L_d . Les effets individuels de la vitesse de coupe Vc et l'épaisseur du copeau h sur la vibration $Arms$ sont eux-mêmes positifs. Par contre, l'effet quadratique de l'épaisseur du copeau h sur la vibration $Arms$ est négatif. Sur les graphes des effets (figure 4.26), les évolutions des modèles de vibration $Arms$ et de la longueur de délaminage L_d sont représentées en fonction de chacun des paramètres opératoires étudiés et pour les points du milieu.

FIGURE 4.26 – Graphes des effets des modèles $Arms$ et L_d



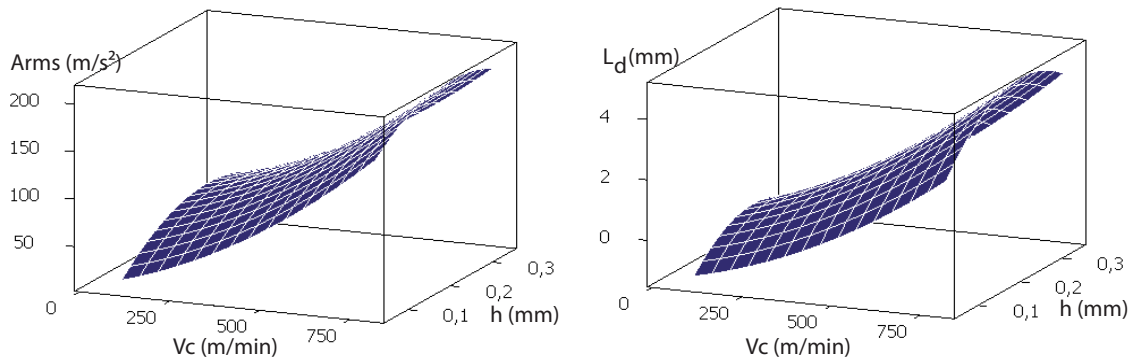
4.3. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC PLAQUETTE CARBURE DE TYPE PENTA

FIGURE 4.27 – Courbes iso-valeurs des modèles $Arms$ et L_d



Les courbes iso-valeurs à plusieurs niveaux qui correspondent aux équations des modèles $Arms$ et L_d sont représentées sur la figure 4.27. Chaque courbe représente une infinité de combinaisons entre les deux variables V_c et h .

FIGURE 4.28 – Surfaces de réponse des modèles $Arms$ et L_d



Les principales informations à retirer de ces courbes sont :

- l'augmentation de la vitesse de coupe V_c entraîne une augmentation du niveau de vibration et de délaminage. L'effet de la vitesse de coupe V_c est toujours positif dans la gamme d'usinage choisie ;
- la variation de l'épaisseur du copeau h a un effet quadratique sur les deux réponses mesurées. Pour une valeur $V_c = 450 \text{ m/min}$ fixe, une variation de h entre $0,06 \text{ mm}$ et $0,2 \text{ mm}$ implique une augmentation dans le niveau de vibration $Arms$ de 68 m/s^2 à 128 m/s^2 et la longueur de délaminage L_d de 0 mm à $2,16 \text{ mm}$. Cependant une variation de h entre $0,2 \text{ mm}$ et $0,34 \text{ mm}$ implique une diminution du niveau de vibration $Arms$ de 128 m/s^2 à 103 m/s^2 et de la longueur de délaminage L_d de $2,16 \text{ mm}$ à 1 mm .

La figure 4.28 représente en 3D les surfaces de réponse ($V_c, h, Arms$) et (V_c, h, L_d) qui correspondent aux équations des modèles $Arms$ et L_d .

4.3. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC PLAQUETTE CARBURE DE TYPE PENTA

Une similitude très claire entre la vibration $Arms$ et la longueur de délaminage L_d est constatée sur le graphe des effets des facteurs (figure 4.26). Cette similitude est confirmée par les courbes iso-valeurs et les surfaces de réponse des deux modèles représentés par les figures 4.27 et 4.28. Ceci confirme la corrélation existant entre le niveau de vibration relevé et la présence de délaminage.

Les résultats ont montré une très bonne corrélation entre les niveaux de vibration enregistrés et la longueur de délaminage mesurée. Au-delà d'un seuil de vibration, l'apparition d'un délaminage est systématique et la longueur du délaminage est proportionnelle avec le niveau de vibration. L'augmentation de la vitesse de coupe entraîne une augmentation du niveau de vibration et de délaminage. Un effet quadratique de l'épaisseur du copeau sur la vibration et le délaminage est constaté. La fiabilité des deux modèles a été testée par la méthode de l'analyse de la variance. Cette analyse a montré que les modèles sont hautement significatifs et en bonne adéquation avec les résultats expérimentaux. À partir de la similitude constatée entre les deux modèles (vibration et délaminage), il a été montré que l'analyse vibratoire permet de quantifier le défaut de délaminage et ainsi suivre ce défaut en temps réel.

4.3.2.2 Modèle de température (T°)

Le modèle du second ordre de la température de la la matière T est donné par l'équation 4.8 :

$$T = -17,43 + 0,22 \times Vc + 734,13 \times h - 1301,45 \times h^2 - 1,02 \times Vc \times h. \quad (4.8)$$

Les valeurs du coefficient de détermination R^2 et du coefficient de détermination ajusté R_{adj}^2 ont été calculées et valent : $R^2 = 0,97$ et $R_{adj}^2 = 0,92$ respectivement. Ces deux coefficients montrent une bonne corrélation entre le modèle et les données expérimentales.

L'analyse de la variance (ANOVA) est donnée par la Table 4.15. Pour le modèle, le test de FISHER (F) donne : $F = 19,48$ et la probabilité ($Prob > F$) associée à ce test est ici de 0,017. La partie linéaire du modèle est la plus significative ($Prob > F = 0,006$) suivie par les parties interaction et quadratique dans cet ordre.

TABLE 4.15 – Analyse de la variance du modèle T

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	$Prob > F$
Régression	5	64035,8	64035,8	12807,2	19,48	0,017
Linéaire	2	56688,8	56688,8	28344,4	43,11	0,006
Quadratique	2	4746,1	4746,1	2373	3,61	0,159
Interaction	1	2601	2601	2601	3,96	0,141
Résidus	Error	3	1972,4	1972,4	657,5	
Total	8	66008,2				

Le test de STUDENT (T) est utilisé pour estimer les effets des facteurs comme le montre la Table 4.16. La probabilité $Prob > t$ du facteur le plus significatif $Vc \times h$ est égale à

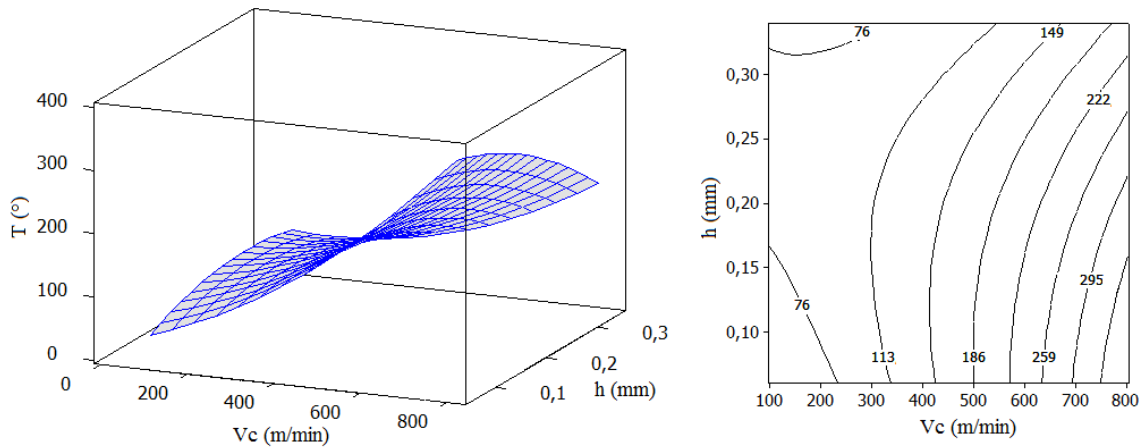
4.3. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC PLAQUETTE CARBURE DE TYPE PENTA

0,141 ce qui signifie qu'il y a 14 chances sur 100 pour que la vraie valeur du coefficient de $Vc \times h$ soit nulle. Cela montre bien que c'est le facteur le plus influent, suivi par le facteur $Vc \times Vc$ et du facteur h .

TABLE 4.16 – Effet des facteurs du modèle T				
Terme	Coeef	SE	t	$Prob > t$
Constant	-17,43	91,84	-0,19	0,862
Vc	0,22	0,24	0,899	0,435
h	734,13	658,87	1,114	0,346
$Vc \times Vc$	0	0	1,432	0,248
$h \times h$	-1301,45	1525,93	-0,853	0,456
$Vc \times h$	-1,02	0,51	-1,989	0,141

La figure 4.29(a) représente en 3D la surface de réponse (Vc, h, T) et qui correspond à l'équations du modèle de température T .

FIGURE 4.29 – (a) Surface de réponse T (b) Courbes iso-valeurs T



Les courbes iso-valeurs à plusieurs niveaux qui correspondent à l'équation du modèle T sont représentées sur la figure 4.29 (b).

Les principales informations à retirer de ces courbes sont :

- l'augmentation de la vitesse de coupe Vc entraîne une augmentation de la température T . Cette augmentation est accentuée pour les faibles valeurs de l'épaisseur de copeau h . L'effet de la vitesse de coupe Vc est toujours positif dans la gamme d'usinage choisie ;
- l'effet de l'épaisseur du copeau h sur la température T dépend de la vitesse de coupe Vc . Pour des vitesses de coupe supérieures à 450 m/min , l'augmentation de l'épaisseur de copeau h implique une diminution de la température T . Pour des vitesses de coupe inférieures à 450 m/min , une variation de h entre 0,1 mm et 0,2 mm implique une augmentation de la température T et une variation de l'épaisseur de copeau h entre 0,2 mm et 0,3 mm implique une diminution de la température T .

4.3. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC PLAQUETTE CARBURE DE TYPE PENTA

Sur les figures 4.29, la température de la surface usinée a tendance à diminuer lorsque l'avance à la dent augmente, en effet le temps total de contact matière est diminué dans ce cas, ce qui contribue à diminuer l'échauffement de la matière. Deux régions distinctes apparaissent sur le graphique 4.29 (a), une première région qui est définie par une vitesse de coupe inférieure et égale à 450 m/min pour laquelle la température maximale admissible de 150°C pour la résine n'est pas dépassée. Au-delà de cette température la résine subit des transformations irréversibles. Une seconde région est définie pour toutes les conditions où V_c devient supérieure à 450 m/min , dans ce cas la limite de température est dépassée.

4.3.2.3 Modèle de l'effort de coupe (F)

Le modèle du second ordre de l'effort de coupe F est donné par l'équation 4.9 :

$$F = 516,12 + 0,94 \times V_c - 2151,78 \times h + 4438,76 \times h^2 - 3,29 \times V_c \times h. \quad (4.9)$$

Les valeurs du coefficient de détermination R^2 et du coefficient de détermination ajusté R_{adj}^2 ont été calculées et valent : $R^2 = 0,99$ et $R_{adj}^2 = 0,99$ respectivement. Ces deux coefficients montrent une bonne corrélation entre le modèle et les données expérimentales.

L'analyse de la variance (ANOVA) est donnée par la Table 4.17. Pour le modèle, le test de FISHER (F) donne : $F = 586,11$ et la probabilité ($Prob > F$) associée à ce test est ici de 0,0001. Les parties linéaire et interaction du modèle sont les plus significatives ($Prob > F = 0,001$) suivie par la partie quadratique.

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	$Prob > F$
Régression	5	410187	410186,7	82037,3	586,11	0,0001
Linéaire	2	376355	51458,8	25729,4	183,82	0,001
Quadratique	2	6756	6756,2	3378,1	24,13	0,014
Interaction	1	27075	27075	27075	193,44	0,001
Résidus	Error	3	420	419,9	140	
Total	8	410607				

Le test de STUDENT (T) est utilisé pour estimer les effets des facteurs comme le montre la Table 4.18. La probabilité $Prob > t$ du facteur le plus significatif $V_c \times h$ est égale à 0,001 ce qui signifie qu'il y a 0,1 chances sur 100 pour que la vraie valeur du coefficient de $V_c \times h$ soit nulle. Cela montre bien que c'est le facteur le plus influent, suivi par le facteur V_c et du facteur $V_c \times V_c$.

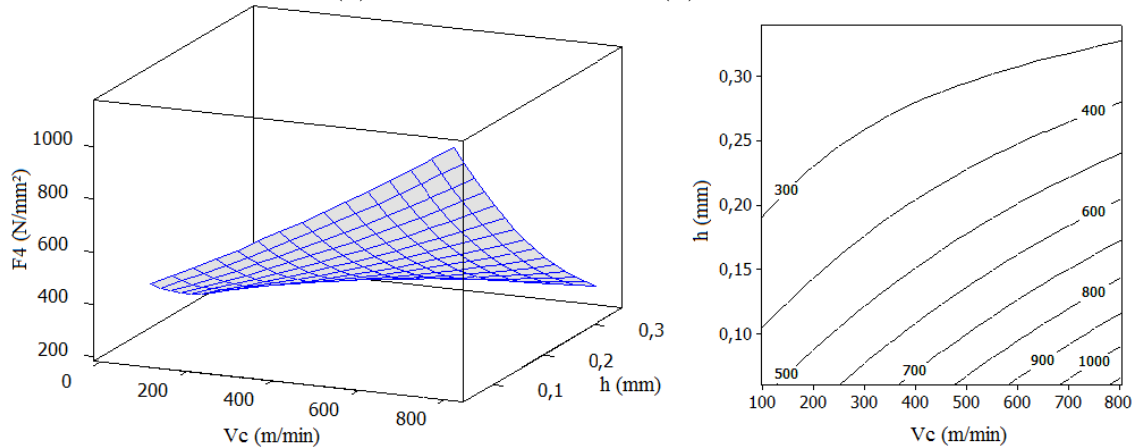
La figure 4.30(a) représente en 3D la surface de réponse (V_c, h, T) qui correspond à l'équations du modèle de l'effort de coupe F .

4.3. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC PLAQUETTE CARBURE DE TYPE PENTA

TABLE 4.18 – Effet des facteurs du modèle d'efforts de coupe F

Terme	<i>Coef</i>	SE	<i>t</i>	<i>Prob</i> > <i>t</i>
Constant	516,12	42,376	12,18	0,001
Vc	0,94	0,112	8,429	0,004
h	-2151,78	304,006	-7,078	0,006
$Vc \times Vc$	0	0	1,732	0,182
$h \times h$	4438,76	704,072	6,304	0,008
$Vc \times h$	-3,29	0,237	-13,908	0,001

FIGURE 4.30 – (a) Surface de réponse F (b) Courbes iso-valeurs F



Les courbes iso-valeurs à plusieurs niveaux qui correspondent à l'équation du modèle F sont représentées sur la figure 4.30 (b).

Les principales informations à retirer de ces courbes sont :

- L'augmentation de l'épaisseur du copeau h entraîne la diminution de l'effort de coupe F , cet effet est accentué pour les Vitesse de coupe élevées.
- L'augmentation de la vitesse de coupe Vc entraîne une augmentation de l'effort de coupe F , cet effet est accentué pour les faibles valeurs de h .
- Pour une épaisseur de copeau h constante $h = 0,1 \text{ mm}$, une augmentation de la vitesse de coupe Vc de 100 m/min à 800 m/min entraîne une augmentation de l'effort de coupe F de 400 à 900 N/mm^2 , et pour une épaisseur de copeau h constante $h = 0,2 \text{ mm}$, une augmentation de la vitesse de coupe Vc de 100 m/min à 800 m/min entraîne une augmentation de l'effort de coupe F de 300 à 600 N/mm^2 .
- L'effort de coupe est minimal pour des faibles vitesses de coupe et des épaisseurs de coupe élevées.

4.3. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC PLAQUETTE CARBURE DE TYPE PENTA

4.3.2.4 Modèle d'usure (Vb)

Le modèle du second ordre de l'usure de l'outil de coupe Vb est donné par l'équation 4.10 :

$$Vb = -1,029 + 0,138 \times Vc - 177,93 \times h - 130,279 \times h^2 - 0,32 \times Vc \times h. \quad (4.10)$$

Les valeurs du coefficient de détermination R^2 et du coefficient de détermination ajusté R_{adj}^2 ont été calculées et valent : $R^2 = 0,96$ et $R_{adj}^2 = 0,91$ respectivement. Ces deux coefficients montrent une bonne corrélation entre le modèle et les données expérimentales. L'analyse de la variance (ANOVA) est donnée par la Table 4.15. Pour le modèle, le test de FISHER (F) donne : $F = 17,35$ et la probabilité ($Prob > F$) associée à ce test est ici de 0,02. La partie quadratique du modèle est la plus significative.

TABLE 4.19 – Analyse de la variance du modèle Vb

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	$Prob > F$
Régression	5	83928,4	83928,43	16785,69	17,35	0,02
Linéaire	2	80936,9	228,18	114,09	0,12	0,893
Quadratique	2	2735,5	2735,52	1367,76	1,41	0,369
Interaction	1	256	256	256	0,26	0,642
Résidus	Error	3	2901,8	2901,79	967,26	
Total	8	86830,2				

Le test de STUDENT (T) est utilisé pour estimer les effets des facteurs comme le montre la Table 4.20. Ce test montre que $Vc \times Vc$ est le facteur le plus influent.

TABLE 4.20 – Effet des facteurs du modèle Vb

Terme	$Coeff$	SE	t	$Prob > t$
Constant	-1,029	111,4	-0,009	0,993
Vc	0,138	0,29	0,469	0,671
h	177,93	799,17	0,223	0,838
$Vc \times Vc$	0	0	1,256	0,298
$h \times h$	-130,279	1850,86	-0,07	0,948
$Vc \times h$	-0,32	0,62	-0,514	0,642

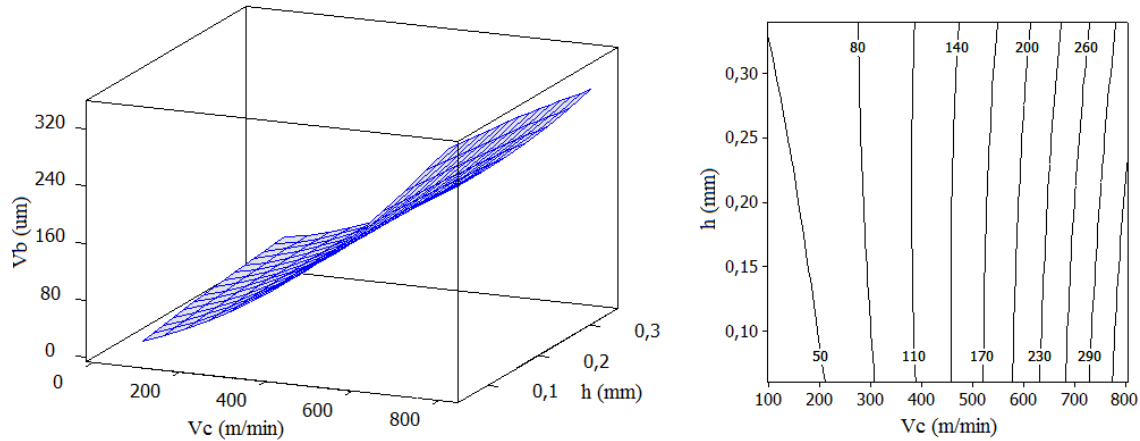
La figure 4.31(a) représente en 3D la surface de réponse (Vc , h , Vb) qui correspond à l'équations de l'usure Vb .

Les courbes iso-valeurs à plusieurs niveaux qui correspondent à l'équation du modèle Vb sont représentées sur la figure 4.31 (b). Chaque courbe représente une infinité de combinaisons entre les deux variables Vc et h .

Les principales informations à retirer de ces courbes sont :

- l'augmentation de la vitesse de coupe Vc entraîne une augmentation de l'usure Vb ;
- l'effet de l'épaisseur du copeau h sur l'usure Vb est très négligeable.

FIGURE 4.31 – (a) Surface de réponse T (b) Courbes iso-valeurs T



4.3.3 Optimisation par surface de réponse

Les courbes d'iso-réponse sont créées en ajustant les fonctions des modèles de surface de réponse étudiés auparavant à un nuage de points en 3D ; les courbes d'iso-réponse obtenues sont ensuite projetées sur le plan $h - V_c$. Les courbes d'iso-réponse nous permettent d'examiner l'évolution de toutes les réponses étudiées dans un tracé.

Dans cet exemple, la zone optimale est délimitée par les quatre contraintes suivantes :

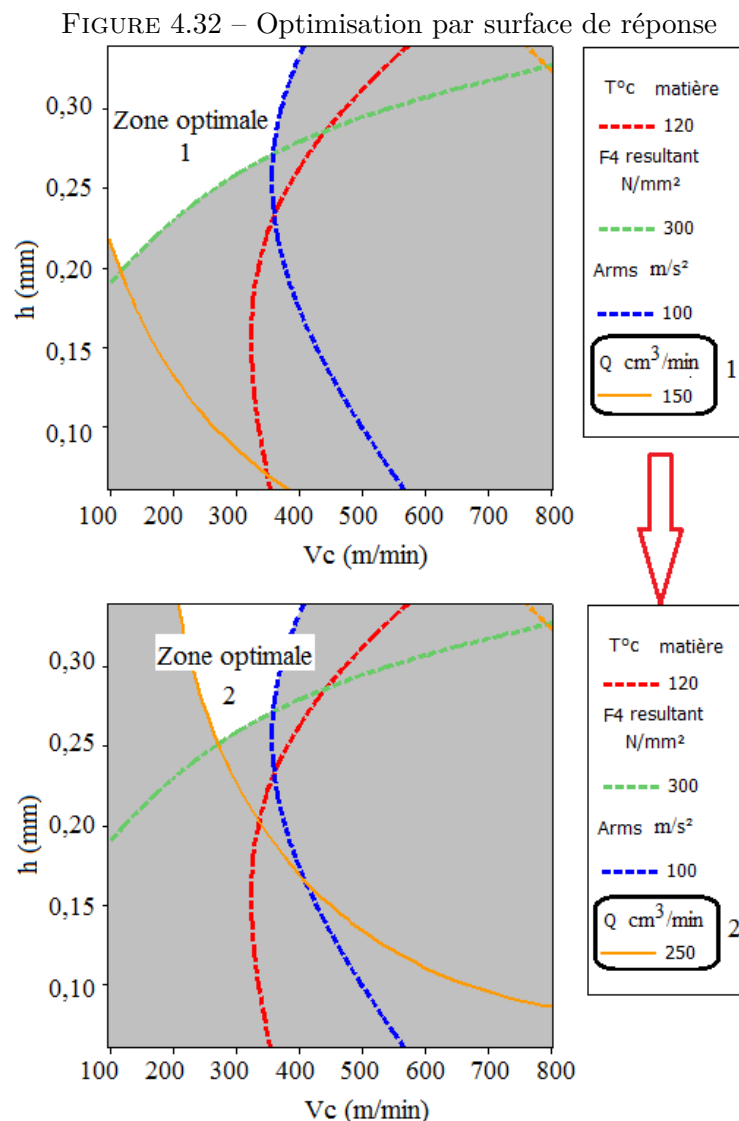
1. Température maximale de la pièce est limitée à 120°
2. Effort de coupe maximum, dans ce cas, il est fixé à 300 N/mm^2
3. Vibration Arms fixée dans cet exemple à 100 m/s^2
4. Débit copeaux minimum, fixé à $150 \text{ cm}^3/\text{min}$ pour (cas 1).

Pour simuler une augmentation de productivité, le débit copeaux est porté à $250 \text{ cm}^3/\text{min}$ (cas2).

La solution graphique est illustrée par la figure 4.32. Les lignes courbes correspondent aux limites des différentes fonctions objectives. La zone en blanc correspond au domaine de solutions permettant de satisfaire simultanément les contraintes de réponses.

La zone optimale du cas 1 est limitée en termes d'épaisseur de coupe par l'effort de coupe, et en termes de vitesse de coupe par la vibration. Cette zone appartient aux intervalles $[V_c = 100-400]$ et $[h = 0,20-0,35]$. Dans le cas 2 où on augmente le niveau de la contrainte "débit copeaux", on constate un rétrécissement de la zone optimale ($[V_c = 200-400]$ et $[h = 0,25-0,35]$) de plus de 50%.

4.3. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC PLAQUETTE CARBURE DE TYPE PENTA



Un deuxième cas est étudié avec les contraintes suivantes :

1. La première, qui est la température maximale de la pièce est limitée à 150°
2. La deuxième est l'effort de coupe maximum, dans ce cas, est compris entre 300 N/mm^2 et 500 N/mm^2
3. La troisième contrainte est la vibration Arms : dans cet exemple est fixée à 100 m/s^2
4. La quatrième est le débit copeaux, fixé à $150 \text{ cm}^3/\text{min}$ (cas 3)

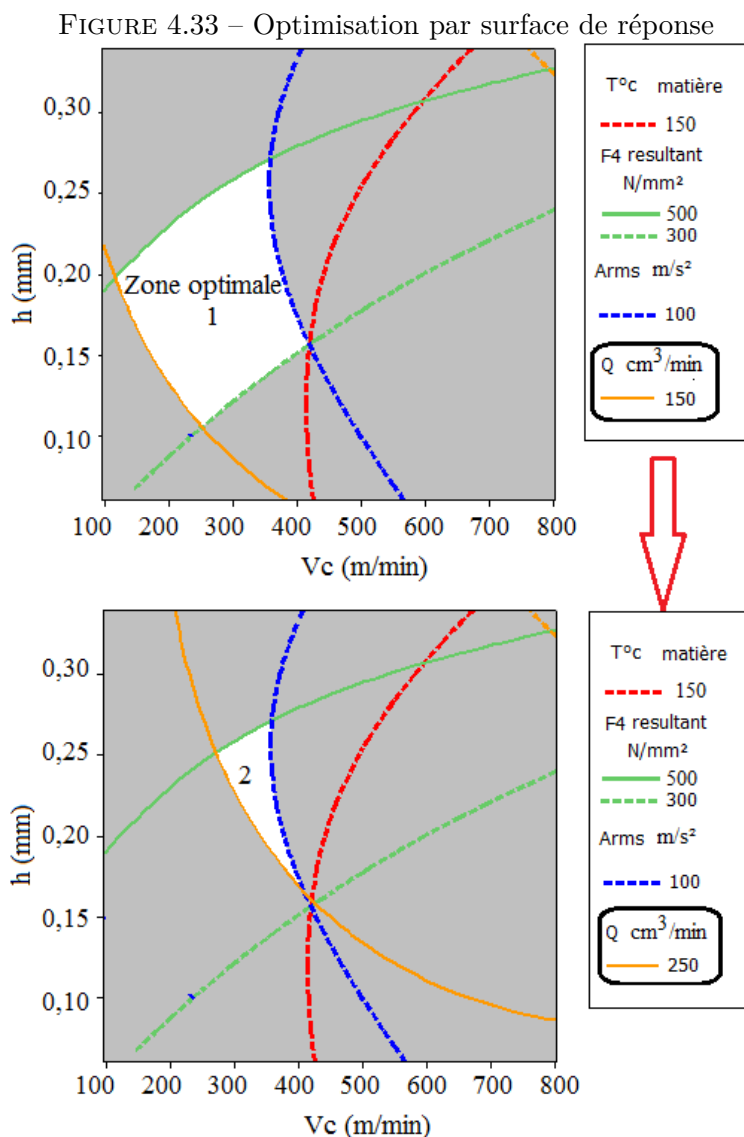
Pour simuler une augmentation de productivité, le débit copeaux est porté à $250 \text{ cm}^3/\text{min}$ (cas 4).

La zone optimale du cas 3 est limitée par la vibration, l'effort de coupe et le débit copeaux. cette zone appartient aux intercales $[V_c = 150-400]$ et $[h = 0,1-0,25]$. Dans le cas

4.3. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC PLAQUETTE CARBURE DE TYPE PENTA

3 où on augmente le niveau de la contrainte "débit copeaux" à $250 \text{ cm}^3/\text{min}$, on constate un rétrécissement de la zone optimale ($[V_c = 300-400]$ et $[h = 0,15-0,25]$) de plus de 75%.

Cette méthode nous permet de choisir les conditions de coupe en prenant en compte des objectifs voulus.



4.3.4 Comparaison des deux géométries 19 et 60°

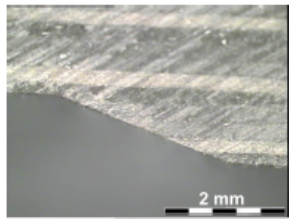
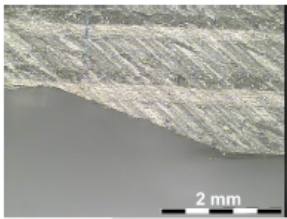
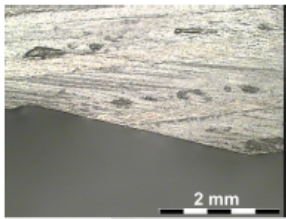
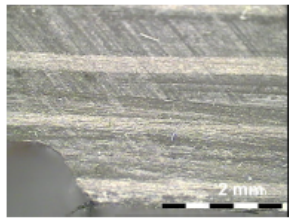
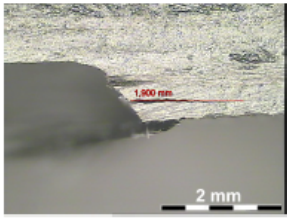
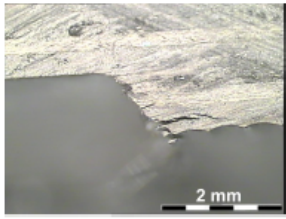
Les modèles de vibration, température, usure de l'outil et efforts de coupe pour la plaquette de revêtement DB3 et d'angle d'attaque $Kr = 19^\circ$ sont présentés dans l'annexe 3.

Concernant l'observation des délaminages, une première approche consiste à inspecter visuellement le composite dans la zone d'entrée de l'outil et à mesurer la longueur de

4.3. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC PLAQUETTE CARBURE DE TYPE PENTA

délaminage notée L_d . Les images sont présentées dans la figure 4.34.

FIGURE 4.34 – Observation des délaminages en entrée matière pour la condition centrale $V_c=450$ m/min pour les géométries $Kr=19^\circ$ et $Kr=60^\circ$

	$h = 0,06$ mm	$h = 0,2$ mm	$h = 0,34$ mm
$Kr = 19^\circ$	 $L_d = 0$ mm	 $L_d = 0$ mm	 $L_d = 0$ mm
$Kr = 60^\circ$	 $L_d = 0$ mm	 $L_d = 1,9$ mm	 $L_d = 1$ mm

Les résultats ont montré une absence du délaminage pour tous les essais réalisés avec un angle d'attaque 19° . Cependant, les niveaux de vibrations sont plus importants pour l'angle d'attaque 60° , cela est dû à la surface du contact plus importante dans le cas 19° comme le montre la figure 4.35.

La deuxième méthode de détection des délaminages est la méthode par analyse de signaux vibratoires décrite dans la modélisation de la vibration *Arms*. Pour toutes les valeurs d'accélération *Arms* plus grande que $103m/s^2$ un délaminage apparaît. Même si aucune inspection complémentaire n'est prévue pour détecter un délaminage, on admet qu'en couplant les deux méthodes citées précédemment, aucun délaminage n'est apparu pendant l'usinage pour les conditions qui n'ont pas dépassé $103m/s^2$.

[Lachaud (2001)] montre que le délaminage peut être directement lié à une augmentation de l'effort d'avance en perçage. Dans notre cas, cet effort d'avance s'apparente à la composante F_{cz} .

La figure 4.36 compare les résultats obtenus sur cette composante pour les deux géométries. Il en résulte que la géométrie $Kr = 19^\circ$ génère plus d'efforts d'avance que la géométrie $Kr = 60^\circ$. Cependant, aucun délaminage n'a été observé pour la géométrie "grande avance". Ce phénomène s'explique par l'orientation de la composante F_{cz} qui est dirigée vers le composite, c'est la raison pour laquelle cette composante tend à réduire et à limiter la propagation du délaminage des plis.

4.3. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC PLAQUETTE CARBURE DE TYPE PENTA

FIGURE 4.35 – Vues en coupe de la section copeau d'un outil $Kr = 19^\circ$ et $Kr = 60^\circ$
[Morandeau (2012)]

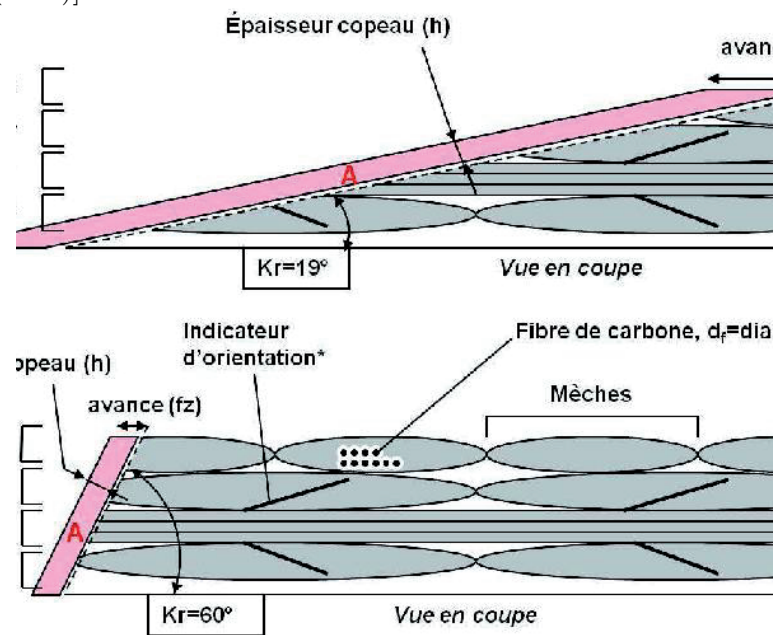
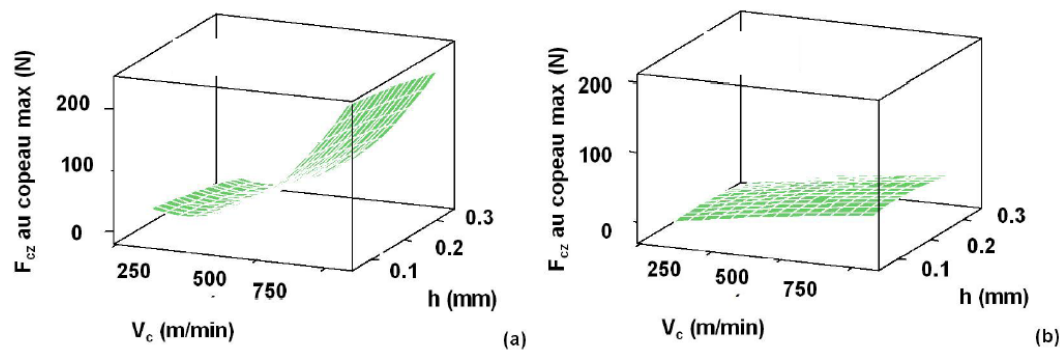


FIGURE 4.36 – Composante F_{cz} de l'effort résultant de coupe pour la géométrie $Kr = 19^\circ$ (a)
et $Kr = 60^\circ$ (b)



4.3.5 Influence du revêtement

Trois revêtements diamants ont été étudiés, un DLC, un CVD microcristallin et un CVD nanocristallin. Les résultats sont présentés dans cette partie en termes d'efforts de coupe spécifiques pris au copeau maximum.

Les efforts spécifiques sont supérieurs pour la géométrie $Kr = 60^\circ$. Sur les deux géométries, le revêtement DLC a observé une brusque montée des efforts pour les conditions supérieures à $Vc = 450 \text{ m/min}$. Cette évolution est due à la dégradation très rapide du revêtement DLC d'épaisseur fine ($1 \text{ }\mu\text{m}$). Sur les six premières conditions, le revêtement CVD microcristallin a généré l'effort le plus élevé, ce qui s'explique par le rayon d'arête qui est plus important pour ce revêtement ($Er = 25 \text{ }\mu\text{m}$). Cependant, l'écart d'effort entre un revêtement épais et fin se resserre pour l'angle d'attaque à 19° . L'angle d'attaque et le rayon d'arête semblent donc liés.

4.3.6 Conclusion

L'objectif de cette étude est de déterminer les conditions de coupe au cours d'une opération de fraisage d'un matériau composite stratifiés permettant d'éviter l'apparition des défauts de délaminage. Les modèles de vibration, de la longueur de délaminage, température et usure de l'outil ont été établis par la méthodologie de surface de réponse. Deux outils à plaquette carbure de type Penta avec trois configurations différentes de revêtement ont été testés, un outil avec une plaquette orientée avec un angle de coupe 19° (Penta 19) et un autre outil pour une orientation de la plaquette à 60° (Penta 19). Ces essais ont été réalisés à sec. Ainsi, six plans d'expérience composite centrés de 12 essais ont été étudiés en fonction des paramètres de coupe (vitesse de coupe Vc et épaisseur du copeau h). Les résultats ont montré une absence du délaminage pour tous les essais réalisés avec un angle d'attaque 19° . Cependant, les niveaux de vibrations sont plus importants pour l'angle d'attaque 60° . Les résultats ont montré une très bonne corrélation entre les niveaux de vibration enregistrés et la longueur de délaminage mesurée. Au-delà d'un seuil de vibration, l'apparition d'un délaminage est systématique et la longueur du délaminage est proportionnelle avec le niveau de vibration. L'augmentation de la vitesse de coupe entraîne une augmentation du niveau de vibration et de délaminage. Un effet quadratique de l'épaisseur du copeau sur la vibration et le délaminage est constaté. La fiabilité des deux modèles a été testée par la méthode de l'analyse de la variance. Cette analyse a montré que les modèles sont hautement significatifs et en bonne adéquation avec les résultats expérimentaux. À partir de la similitude constatée entre les deux modèles (vibration et délaminage), il a été montré que l'analyse vibratoire permet de quantifier le défaut de délaminage et ainsi suivre ce défaut en temps réel.

4.3. APPLICATION SUR LE MATÉRIAU COMPOSITE : CARBON/ÉPOXY T800S/M21 AVEC PLAQUETTE CARBURE DE TYPE PENTA

Conclusion générale

Le but de ces travaux de thèse est de caractériser la réponse d'un matériau à des sollicitations d'usinage et de choisir les conditions de coupe optimales pour ce matériau, en utilisant des moyens de mesure et de surveillance adaptés. Il s'agit notamment de mettre en place des méthodologies de détection de toute dérive de la qualité d'usinage ayant un impact direct sur l'intégrité de surface de la pièce usinée et/ou l'usure des outils coupants. Actuellement, les méthodes les plus utilisées pour faire ce choix sont des méthodes empiriques basées sur l'expérience des fabricants et des utilisateurs des outils coupants (abaques, diagrammes par constat expérimental, etc.). Ces expériences, souvent très coûteuses, donnent une large plage de choix des paramètres en fonction de leurs besoins. Ainsi, l'objectif est de fournir à ces utilisateurs un nouvel outil permettant de choisir les conditions de coupe de façon intelligente, à partir d'un minimum d'expériences en optimisant les intérêts.

Un bon choix de conditions de coupe permet d'optimiser l'état de surface des pièces usinées, d'augmenter la durée de vie des outils de coupe et de diminuer le coût et le temps de production. Les critères pouvant permettre d'évaluer une opération d'usinage sont nombreux et dépendent non seulement du type d'opération, mais aussi de l'objectif lié à cette opération. La production à moindre coût reste toutefois liée aux conditions d'intégrité de surface auxquelles la pièce usinée doit répondre. Les principales sorties prises en compte lors de la caractérisation sont :

- l'état de surface obtenu sur la pièce (la rugosité de surface) ;
- les efforts de coupe et la puissance consommée par la coupe ;
- la durée de vie des outils et l'usure au cours du temps ;
- les vibrations de l'outil et la pièce ;
- la productivité (le débit et le volume copeau) ;
- la puissance de coupe ;
- l'absence de défaut de surface (le délaminage dans le cas d'un matériau composite).

Pour modéliser ces sorties, nous avons opté pour une méthode empirique, celle des plans d'expérience.

L'objectif exposé dans ces travaux réside dans l'optimisation et le choix de paramètres de coupe lors de l'usinage d'un matériau ferreux (100Cr6) et d'un matériau composite (T800S/M21). Nous avons été amené à modéliser plusieurs phénomènes qui apparaissent lors de l'usinage de ces matériaux, notamment l'état de surface, les efforts de coupe, les vibrations,...

Le principe général des plans d'expérience consiste à étudier seulement certains points

CONCLUSION GÉNÉRALE

du domaine expérimental tout en appréhendant le phénomène physique étudié sur l'ensemble du domaine considéré. Un plan d'expériences peut être défini comme une organisation raisonnée d'essais. Une difficulté importante de la méthodologie réside alors dans la manière de choisir les points d'études de façon optimale. Au cours de cette études, plusieurs types de plans d'expérience ont été utilisés en fonction de la matière à usiner. Dans le cas de l'acier 100Cr6 (matériau homogène), un plan d'expériences factoriel complet a été utilisé, ce qui permet une modélisation linéaire de la coupe. La complexité du comportement mécanique du matériau composite (matériau non homogène et orthotrope) nécessite un plan d'expérience qui permet une modélisation non linéaire des phénomènes mesurés (vibration) ou observés (délaminage) lors de l'opération d'usinage. Dans ce cas, nous avons utilisé un plan composite centré pour construire des surfaces de réponse à partir duquel nous avons pu exploiter un modèle quadratique avec interaction utilisé dans la plupart des cas pour des phénomènes non linéaires.

Les études proposées dans le cadre de cette thèse ont porté sur l'optimisation du procédé d'usinage par approche des plans d'expérience. Le couplage entre la méthodologie des plans d'expérience, la méthode d'optimisation (mono et multi-objectif) et la méthodologie des surfaces de réponse nous a permis une réduction des coûts très importante parce qu'elle propose un nombre réduit d'expériences. Par exemple, pour l'acier 100Cr6 la réduction du coût d'expérience est de 70%.

En usinage du matériau composite carbone/époxy T800S/M21, nous avons constaté que la mesure de l'état de surface n'est pas exploitable ce qui est dû à l'hétérogénéité de ce matériau (résine époxy et fibres de carbone). Une corrélation entre les vibrations et les défauts générés lors de l'usinage de ce matériau (délaminage des couches composites, usure sur l'arête de coupe, échauffement de la pièce) est montrée. La mesure de vibration de la plaque composite nous a permis de qualifier la qualité d'usinage en temps réel, pour cela nous avons utilisé la mesure des vibrations pour choisir les conditions de coupe optimales qui évitent l'apparition de ces défauts. Les résultats ont permis d'établir, d'une part, qu'au-delà d'un seuil de vibrations, les défauts de surface et l'augmentation de l'usure de l'outil de coupe apparaissaient et que, d'autre part, l'interaction ($f * a_p$) est le facteur le plus significatif du modèle. L'analyse de la variance (ANOVA) a permis de qualifier le modèle retenu.

Deux outils à plaquette carbure de type Penta avec trois configurations différentes de revêtement ont été testés, un outil avec une plaquette orientée avec un angle de coupe 19° (Penta 19) et un autre outil pour une orientation de la plaquette à 60° (Penta 19). Ces essais ont été réalisés à sec. Un gain en qualité de coupe pour une géométrie d'angle d'attaque 19° comparée à un angle d'attaque de 60° est montré. En effet, une absence de délaminage a été constatée pour toutes les conditions de coupe avec un angle d'attaque d'outil 19°, ce qui n'était pas le cas pour l'angle d'attaque d'outil 60°. Ce résultat est expliqué par la longueur de flexion des fibres qui est supérieure dans le cas des géométries 19°. L'utilisation de l'angle d'attaque à 19° contribue à une rupture fragile et plus efficace énergiquement que la géométrie avec un angle d'attaque de 60°. Les modèles de vibration et de longueur de délaminage ont été établis par la méthodologie des surfaces de réponses. Ainsi, un plan d'expérience composite centré de 12 essais a été étudié en fonction des paramètres de coupe en l'occurrence la vitesse de coupe V_c et l'épaisseur du copeau h . Les résultats ont montré une très bonne corrélation entre les niveaux de vibration enregistrés et la longueur

CONCLUSION GÉNÉRALE

de délaminage mesurée. Au-delà d'un seuil de vibration, l'apparition d'un délaminage est systématique et sa longueur est proportionnelle au niveau de vibration. L'augmentation de la vitesse de coupe entraîne une augmentation du niveau de vibration et de délaminage. Un effet quadratique de l'épaisseur du copeau sur la vibration et le délaminage est constaté. La fiabilité des deux modèles a été testée par la méthode de l'analyse de la variance (ANOVA). Celle-ci a montré que les modèles sont hautement significatifs et en bonne adéquation avec les résultats expérimentaux. À partir de la similitude constatée entre les deux modèles (vibration et délaminage), il a été montré que l'analyse vibratoire permet de quantifier le défaut de délaminage et ainsi suivre ce défaut en temps réel. Les modèles d'efforts de coupe, d'usure de l'outil et de la température de la pièce ont été développés. L'optimisation par surfaces de réponses a permis de définir des zones de solutions qui respectent les contraintes d'intégrité de surface.

Pour conclure, les méthodes des plans d'expérience, des surfaces de réponses et d'optimisation multi-objectif, nous ont permis de qualifier et d'optimiser l'intégrité de surface pour différents matériaux avec un nombre minimum d'expériences. Ces méthodes peuvent être utilisées comme des puissants outils de qualification d'un couple outil matière (COM), d'un nouvel outil de coupe ou juste pour sélectionner les meilleures conditions de coupe d'une opération d'usinage.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Chapitre 5

Annexes

5.1 Plans d'expérience

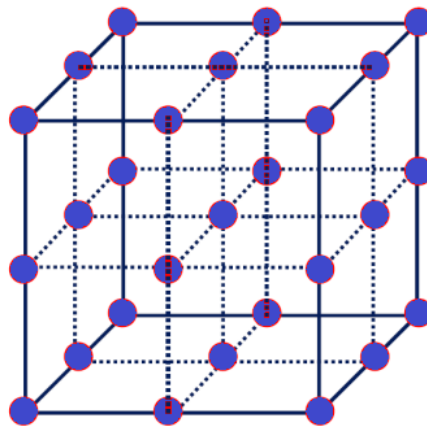


FIGURE 5.1 – Plan factoriel complet 3^3 27 essais

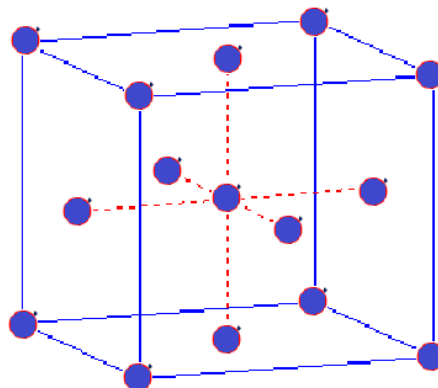


FIGURE 5.2 – Plan faces centrées 15 essais

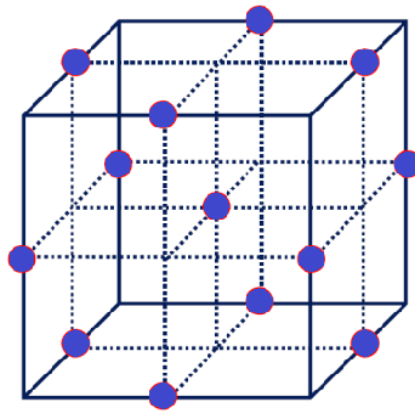


FIGURE 5.3 – Plan de Box et Behnken 13 essais

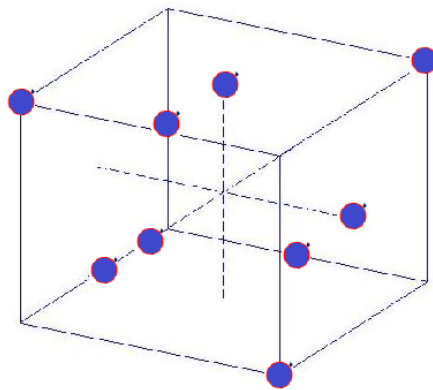


FIGURE 5.4 – Plan de Taguchi 2^3 9 essais

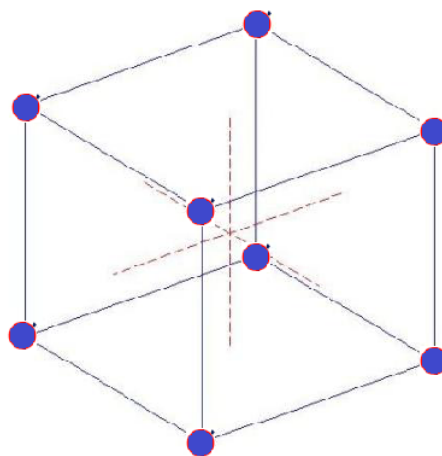


FIGURE 5.5 – Plan factoriel 2^3 8 essais

5.2 Outils de coupe



FIGURE 5.6 – Outils de coupe *DCLN2525M12*

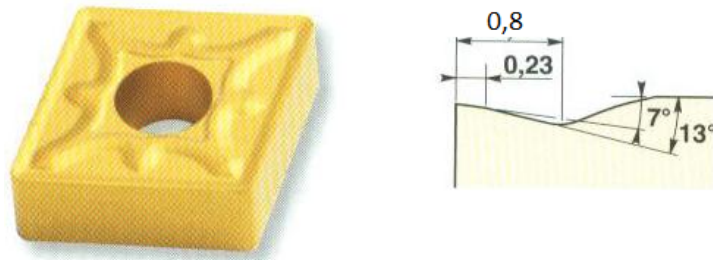


FIGURE 5.7 – Plan de la plaquette CNMG 120408-M5 [Safety (2011)]

d	s	d_1	l	b_s
13,50	5,47	5,50	9,00	2,30

TABLE 5.1 – Dimensions de la plaquette PDKT 09 05 DE ER611

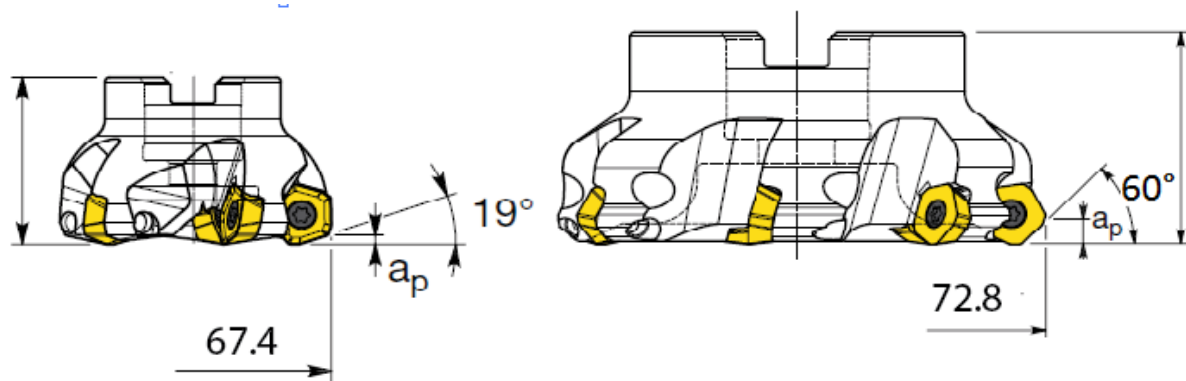


FIGURE 5.8 – Outils de coupe 19 et 60° [Safety (2011)]

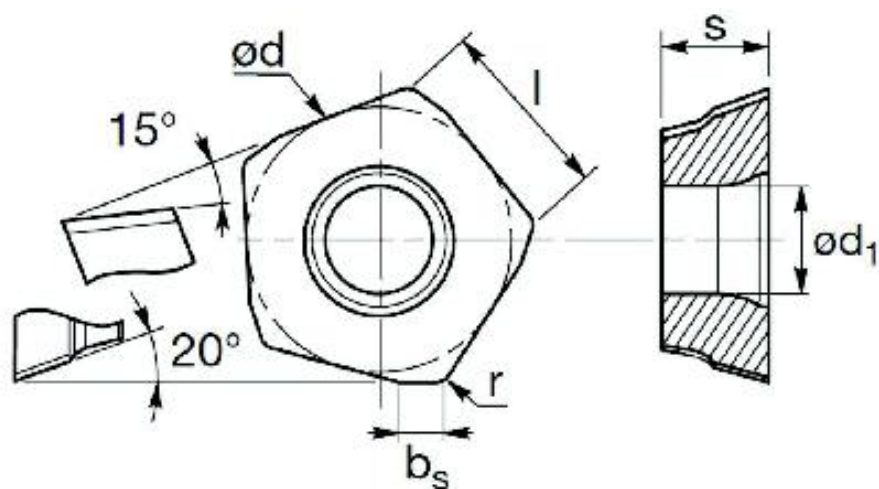


FIGURE 5.9 – Plan de la plaquette PDKT 09 05 DE ER611 [Safety (2011)]

5.3. APPLICATION SUR UNE PLAQUETTE DE REVÊTEMENT DLC ET D'ANGLE D'ATTAQUE $KR=19^\circ$

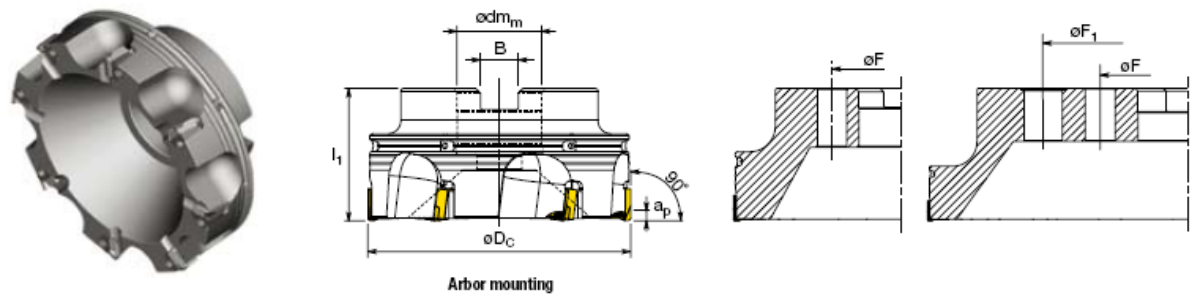


FIGURE 5.10 – Outils de coupe Flash-SAF [Safety (2011)]

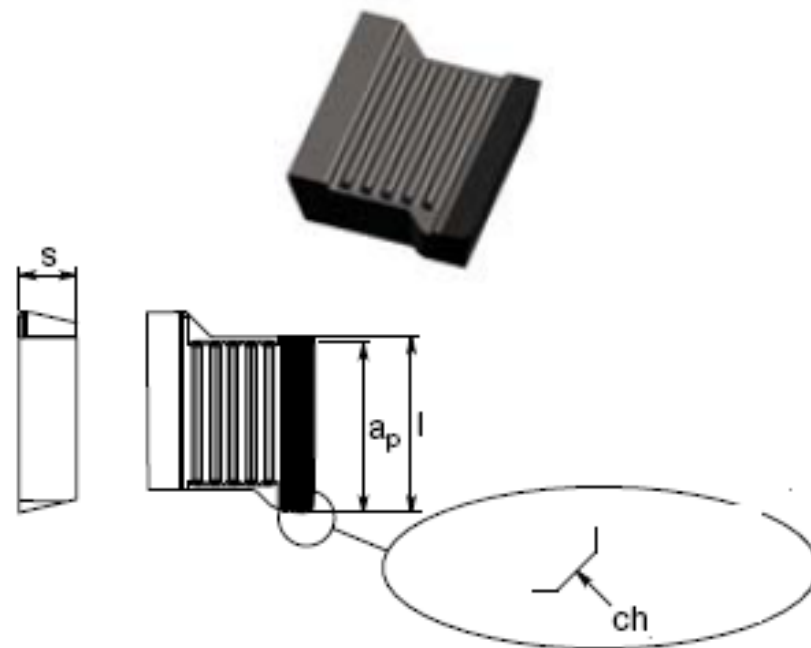


FIGURE 5.11 – Plan de la plaquette PCD [Safety (2011)]

5.3 Application sur une plaquette de revêtement DLC et d'angle d'attaque $Kr=19^\circ$

Modèles de Vibration / délaminage

TABLE 5.2 – Table des essais

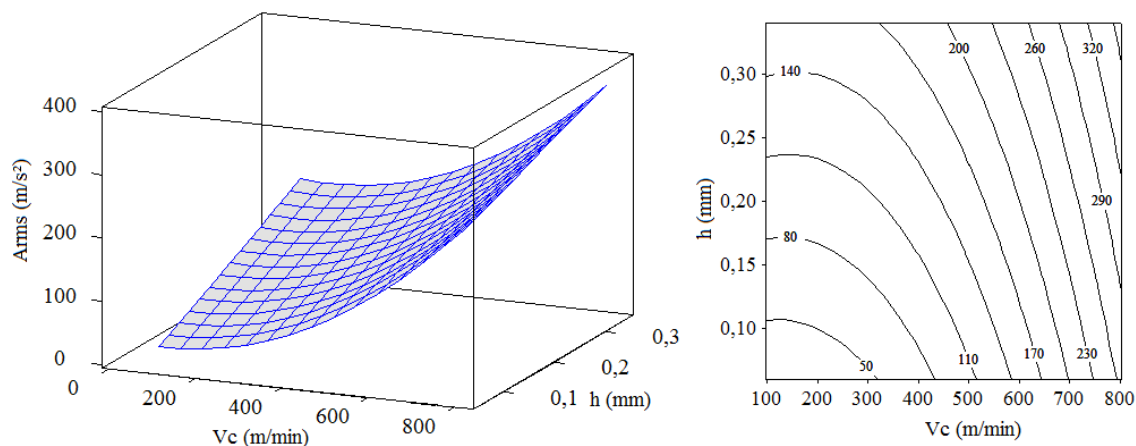
N°	V_{cod}	h_{cod}	Vc (m/min)	h (mm)	Ax_{rms} (m/s^2)	Ay_{rms} (m/s^2)	Az_{rms} (m/s^2)	$Arms$ (m/s^2)	L_d (mm)
1	-1,21	0	96,5	0,2	23,12	37,75	43,33	61,9442152	0
2	-1	-1	200	0,1	29,75	44,15	51,22	73,8767446	0
3	-1	1	200	0,3	56,81	97,27	113,84	160,151099	0
4	0	-1,21	450	0,06	42,17	42,07	61,06	85,3025052	0
5	0	0	450	0,2	64,32	81,69	96,13	141,602597	0
6	0	1,21	450	0,34	75,34	129,2	137,94	203,460559	0
7	1	-1	700	0,1	80,64	96,42	142,82	190,255561	0
8	1	1	700	0,3	97,37	151,25	183,92	257,262601	0
9	1,21	0	803,5	0,2	159,24	156,22	269,41	349,776806	0

TABLE 5.3 – Analyse de la variance du modèle $Arms$

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	$Prob > F$
Régression	5	65692	65692,04	13138,41	8,28	0,056
Linéaire	2	60957,2	1308,69	654,34	0,41	0,695
Quadratique	2	4642	4642	2321	1,46	0,36
Interaction	1	92,8	92,81	92,81	0,06	0,824
Résidus	3	4760,6	4760,63	1586,88		
Total	8	70452,7				
$R^2 = 93,2$						
$R^2_{adj} = 93,2$						

TABLE 5.4 – Effet des facteurs du modèle $Arms$

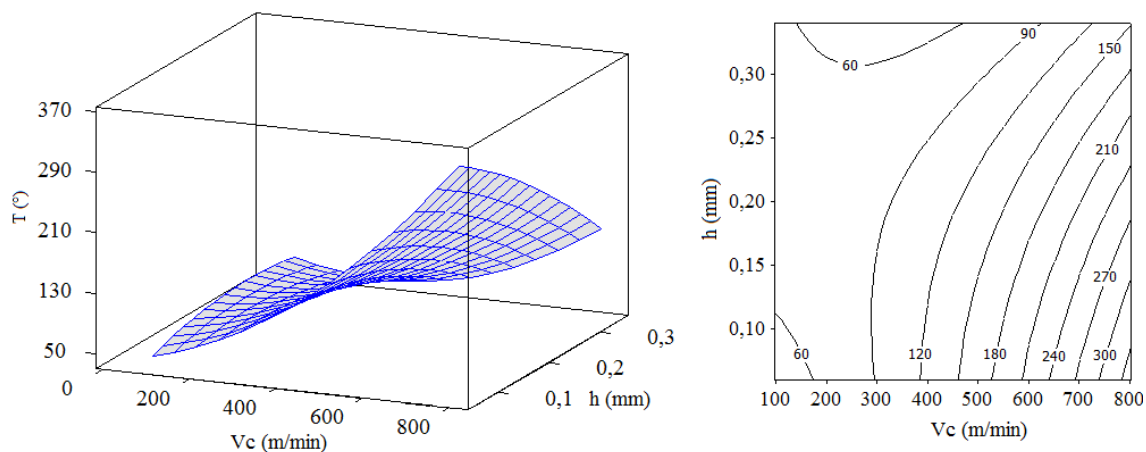
Terme	Coef	SE	t	$Prob > t$
Constant	4,947	142,68	0,035	0,975
Vc	-0,096	0,38	-0,256	0,814
h	483,557	1023,62	0,472	0,669
$Vc \times Vc$	0	0	1,327	0,276
$h \times h$	13,871	2370,68	0,006	0,996
$Vc \times h$	-0,193	0,8	-0,242	0,824

FIGURE 5.12 – (a) Surface de réponse $Arms$ (b) Courbes iso-valeurs $Arms$ Modèle de température T TABLE 5.5 – Analyse de la variance du modèle T

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	Prob > F
Régression	5	50745,1	50745,15	10149,03	18,66	0,018
Linéaire	2	43365,9	352,76	176,38	0,32	0,746
Quadratique	2	4463,3	4463,26	2231,63	4,1	0,139
Interaction	1	2916	2916	2916	5,36	0,104
Résidus	3	1631,7	1631,74	543,91		
Total	8	52376,9				
$R^2 = 96,9$						
$R^2_{adj} = 91,7$						

TABLE 5.6 – Effet des facteurs du modèle T

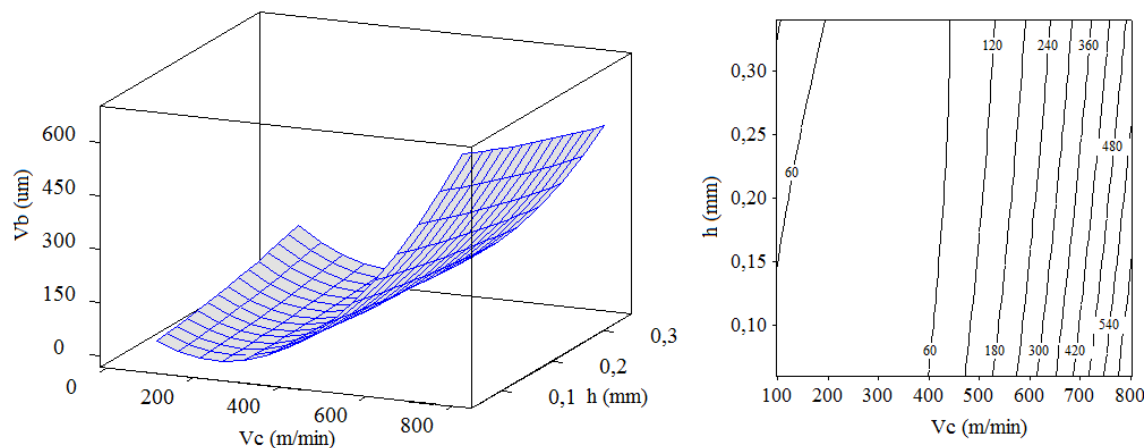
Terme	Coef	SE	t	Prob > t
Constant	11,515	83,53	0,138	0,899
Vc	0,125	0,22	0,569	0,609
h	482,072	599,28	0,804	0,48
$Vc \times Vc$	0	0	1,822	0,166
$h \times h$	-773,009	1387,93	-0,557	0,616
$Vc \times h$	-1,08	0,47	-2,315	0,104

FIGURE 5.13 – (a) Surface de réponse T (b) Courbes iso-valeurs T Modèle de l'usure Vb TABLE 5.7 – Analyse de la variance du modèle Vb

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	$Prob > F$
Régression	5	327432	327432,3	65486,5	4,36	0,128
Linéaire	2	249586	17526,2	8763,1	0,58	0,611
Quadratique	2	74003	74002,8	37001,4	2,46	0,233
Interaction	1	3844	3844	3844	0,26	0,648
Résidus	3	45080	45079,7	15026,6		
Total	8	372512				
$R^2 = 87,$						
$R^2_{adj} = 67,7$						

TABLE 5.8 – Effet des facteurs du modèle Vb

Terme	Coef	SE	t	$Prob > t$
Constant	95,155	439,07	0,217	0,842
V_c	-0,857	1,16	-0,742	0,512
h	258,319	3149,9	0,082	0,94
$V_c \times V_c$	0,002	0	1,754	0,178
$h \times h$	428,496	7295,11	0,059	0,957
$V_c \times h$	-1,24	2,45	-0,506	0,648

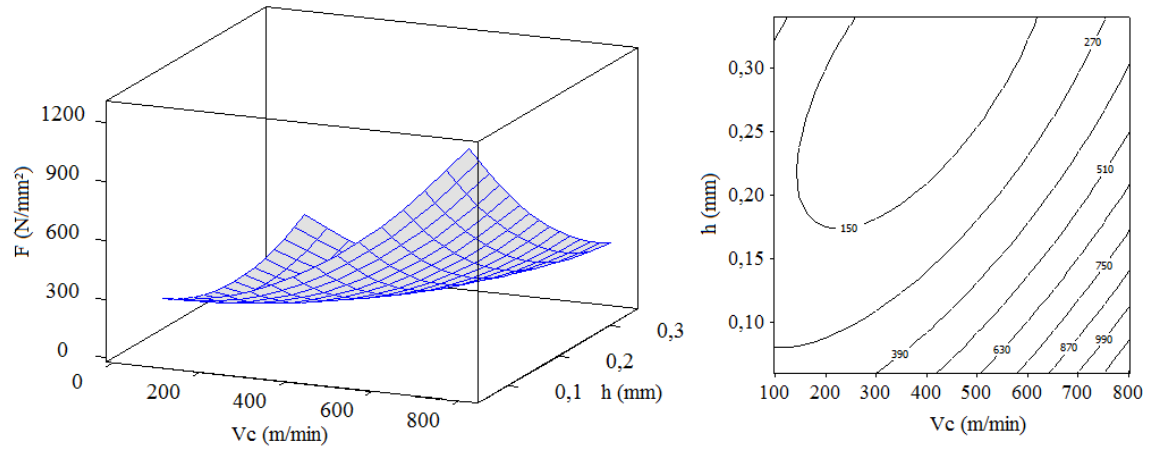
FIGURE 5.14 – (a) Surface de réponse Vb (b) Courbes iso-valeurs Vb Modèle de l'effort de coupe F TABLE 5.9 – Analyse de la variance du modèle F

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	$Prob > F$
Régression	5	533759	533759,5	106751,9	14,27	0,027
Linéaire	2	444213	12938,6	6469,3	0,86	0,505
Quadratique	2	36864	36864,2	18432,1	2,46	0,233
Interaction	1	52682	52682	52682	7,04	0,077
Résidus	3	22449	22448,7	7482,9		
Total	8	556208				
$R^2 = 98$						
$R^2_{adj} = 95$						

TABLE 5.10 – Effet des facteurs du modèle F

Terme	Coef	SE	t	$Prob > t$
Constant	422,88	309,84	1,365	0,266
Vc	-0,01	0,82	-0,013	0,99
h	-2182,9	2222,8	-0,982	0,398
$Vc \times Vc$	0	0	2,213	0,114
$h \times h$	6537,48	5147,97	1,27	0,294
$Vc \times h$	-4,59	1,73	-2,653	0,077

FIGURE 5.15 – (a) Surface de réponse F (b) Courbes iso-valeurs F



Bibliographie

- [Alauddin et El-Baradie, 1997] ALAUDDIN, M. et EL-BARADIE, M.A. (1997). Tool Life model for end milling steel (190BHN). *Journal of Materials Processing Technology*, 68 :50-59.
- [Altintas, 2000] ALTINTAS, Y. (2000). Manufacturing automation, Cambridge university press.
- [Altintas et Ko, 2006] ALTINTAS, Y. et KO, J.H. (2006). Chatter stability of plunge milling. *Annals of the cirp*, 55.
- [Arnold, 1946] ARNOLD, R.N. (1946). The mechanism of tool vibration in the cutting of steel. *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers*, 154.
- [Arola et Ramalu, 1997] AROLA, D. et RAMULU, M. (1997). Orthogonalcutting of fiber-reinforced composites : Afiniteelementanalysis. *International Journal of Mechanical Sciences*, 39(5) :597-613.
- [Astakhnov et al., 1997] ASTAKHNOV, V.P., OSMAN, M.O.M. et AL-ATA, M. (1997). Statistical Design of Experiments in Metal Cutting- Part One : Methodology. *Journal of Testing and Evaluation*, 25(3) :322-327.
- [Balasubramanian et Lakshminarayanan, 2009] BALASUBRAMANIAN, V. et LAKSHMINARAYANAN, A. K. (2009). Comparison of rsm with ann in predicting tensile strength of friction stir welded aa7039 aluminium alloy joints, *Science Press China*, 19 :9-18.
- [Becze et Elbestawi, 2002] BECZE, C.E. et ELBESTAWI, M.A.(2002). A chip formation based analytic force model for oblique cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(4) :529-538.
- [Bisu et al., 2007] BISU, C.F., DARNIS, P., K'NEVEZ, J.Y., CAHUC, O., LAHEURTE, R., GERARD, A. et ISPAS, C. (2007). Nouvelle analyse des phénomènes vibratoires en tournage. *Mécanique et Industries*.
- [Bouelatta et Mad, 2001] BOUELATTA, O.B. et MAD, J. (2001). Surface roughness prediction on cutting parameters and tool vibrations in turning operations. *Journal of Materials Processing Technology*, 118 :269-277.
- [Box et Wilson, 1951] BOX, G.E.P. et WILSON, K.B. (1951). On the experimental attainment of optimum conditions. *Journal of the Royal Statistical Society : Series B (Statistical Methodology)* 13 :1-45.

BIBLIOGRAPHIE

- [Box et Stuart Hunter, 1957] BOX, G.E.P. et STUART HUNTER, J. (1957). Multi-factor experimental design for exploring response surfaces. *Annals of Mathematical Statistics*, 28 :195-241.
- [Box et al., 1978] BOX, G.E.P., HUNTER, W.G et STUART HUNTER, J. (1978). Statistics for experimenters an introduction to design data analysis and model building. New York : J. Wiley and Sons, c1978, ISBN : 0-471-09315-7
- [Bui et al., 2004] BUI, L., ESSAM, D., ABBASS, H. et GREEN, D. (2004). Performance analysis of multiobjective evolutionary methods in noisy environments. APS 2004, 29-39.
- [Carrilero et al., 2002] CARRILERO, M.S., SOLA, J.M.S. (2002). A SEM and EDS insight into the BUL and BUE differences in the turning process of AA2024 Al-Cu Alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42 ;215-220.
- [Cherif, 2003] CHÉRIF, M.(2003). Modélisation Générique des Efforts de Coupe en Fraisage pour la CFAO et la Surveillance d'Usinage. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes.
- [Choudhury et El-Baradie, 1999] CHOUDHURY, I.A. et EL-BARADIE, M.A. (1999). Machinability assessment of Inconel 718 by factorial design of experiment coupled with response surface methodology. *Journal of Materials Processing Technology*, 95 :30 -39.
- [Choudhury et Srinivas, 2004] CHOUDHURY S.K. et SRINIVAS P. (2004). Tool wear prediction in turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 153(154) :276-280.
- [Chua et al., 1991] CHUA, M.S., RAHMAN, M., WONG, Y.S. et LOH, H.T. (1991). Determination of optimal Cutting design of Experiments and Optimization Techniques. *Int. J. Mach. Tools Manufact*, 33(2) :297-305.
- [Chung chen et Weng, 1997] CHUNG CHEN, T. et WENG CHOU, C. (1997). Prediction of the location of delamination in the drilling of composite laminates. *Journal of Materials Processing Technology*, 70 :185-198.
- [Cochran et Cox, 1962] COCHRAN, W.G. et COX, G.M.(1962). Experimental design [M]. Asia Publishing House.
- [Cochran, 1977] COCHRAN W.G. et WILLIAM, G. (1977). Sampling Techniques (Third ed.). Wiley. ISBN 0-471-16240-X.
- [Corne et al., 2000] CORNE, D., KNOWLES, J., et OATES, M. (2000). The pareto envelope-based selection algorithm for multiobjective optimization. Parallel problem solving from nature, pages 839-848.
- [Dagnelie, 2000] DAGNELIE, P. (2000). La planification des expériences : choix des traitements et dispositif expérimental. *Journal de la Société Française de Statistique*, 141(1-2) :5-29.

- [Darwish et El-Tamimi, 1997] DARWISH, S.M. et EL-TAMIMI, A.M., (1997). Formulation of Surface Roughness Models for Machining Nickel Super Alloy With Different Tools. *Materials and Manufacturing Processes*, 12(3) :395-408.
- [David, 1978] DAVID, J.F. (1978). Statistical methods in biological assay. 3rd ed. London : Charles Griffin and Co Ltd.
- [Davim, 2001] DAVIM, J.P. (2001). A note on the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments. *Journal of Materials Processing Technology*, 116 :305-308.
- [Davim et Reis, 2003] DAVIM, J.P. et REIS, P. (2003). Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments. *Composite Structures*, 59 :481-487.
- [Davim et Reis, 2005] DAVIM, J.P. et REIS, P. (2005). Damage and dimensional precision on milling carbon fiber-reinforced plastics using design experiments. *Journal of Materials Processing Technology*, 160 :160-167.
- [Deb et al., 2000] DEB, K., AGRAWAL, S., PRATAP, A., et MEYARIVAN, T. (2000). A fast elitist nondominated sorting genetic algorithm for multiobjective optimization : Nsga-ii. *In Parallel problem solving from nature*, 849-858.
- [Dimarogonas et Haddad, 1992] DIMAROGONAS, A.D. et HADDAD, S.D. (1992). Vibration for Engineers, Prentice Hall, Englewood cliffs, NJ.
- [Droesbeke et al., 1997] DROESBEKE, J.J, FINE, J. et SAPORTA, G. (1997). Plans d'expériences : applications en entreprise [7e Journées d'étude en statistique, 1996, Marseille], l'Association pour la statistique et ses utilisations et la Société statistique de France ; Paris : Éd. Technip, ISBN :2-7108-0733-5.
- [Dura0 et al, 2010] DURAO, L.M.P., GONÇALVES, D.J.S., TAVARES, J.M.R.S, ALBUQUERQUE V.H., VIEIRA A.A. et MARQUES, A.T. (2010). Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates. *Composite Structures*. 92 :1545-1550.
- [Friedrichs et Igel, 2005] FRIEDRICHS, F., et IGEL, C. (2005). Evolutionnary tuning of multiple svm parameters. *Neurocomputing*, 64 :107-117.
- [Gendre, 2004] GENDRE, L. (2011). Matériaux composites et structures composites. *science de l'ingénieur*, r76.
- [Ghidossi et al, 2004] GHIDOSSI, P., EL MANSORI, M. et PIERRON, F. (2004). Edge machining effects on the failure of polymer matrix composite coupons. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 35 :7-8.
- [Goldberg, 1989] GOLDBERG, D.E. (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA.
- [Goupy, 1999] GOUPY, J. (1999). Plans d'expériences pour surfaces de réponse. Paris : Dunod, c1999 ISBN :2-10-003993-8.

- [Goupy, 2005] GOUPY J. (2005). Pratiquer les plan d'expériences. Dunod, Paris.
- [Guegan et al., 1992] GUEGAN, P., LE MAITRE, F. et HAMANN, J.C. (1992). Contribution a l'usinage des materiaux composites. *Actes de Colloques La construction navale en composites*, 45 :7-9.
- [Hocheng et al., 1993] HOCHENG, H., PUW, H.Y. et Huang, Y. (1993). Preliminary study on milling of unidirectional carbon fibre-reinforced plastics. *Composites Manufacturing*, 4(2) :103-108.
- [Horn et al., 1994] J. HORN, J. et NAFPLIOTIS, N. (1994). A niched pareto genetic algorithm for multiobjective optimization. *Proceedings of IEEE-WCCC*, 82-87.
- [Horng et al., 2008] HORNG J.T., TSONG J., LIU, N. et CHIANG, K. (2008). Investigating the machinability evaluation of hadfield steel in the hard turning with al2o3/tic mixed ceramic tool based on the response surface methodology. *Journal of materials processing technology*, 208 :532-541.
- [Hsu et Lin, 2002] HSU, C. et LIN, C. (2002). A simple decomposition method for support vector machine. *Machine Learning*, 46 :219-314.
- [iliescu, 2008] ILIESCU, D. (2008). *L'usinage à sec des composites*. Thèse doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'arts et Métiers.
- [Sheikh-Ahmad, J.Y., 2009] SHEIKH-AHMAD, J.Y. (2009). Machining of polymer composites, Springer, ISBN 978-0-387-35539-9.
- [Jang et al., 1996] JANG, DY, CHOI, Y.G., KIM, H.G. et HSIAO, A. (1996). Study of the correlation between surface roughness and cutting vibrations to develop an online roughness measuring technique in hard turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 36(4) :453-464.
- [Khare et al., 2002] KHARE, V., YAO, X. et DEB, K. (2002). *Performance scaling of multiobjective evolutionary algorithm*. Technical report - SCS, University of Birmingham, 1-70.
- [Khashaba, 2004] KHASHABA, U.A. (2004). Delamination in drilling GFR-thermoset composites. *Composite Structures*, 63 :313-327.
- [Kline et al., 1982] KLINE, W.A., DEVOR, R.E. et SHAREEF, I.A., (1982). The Prediction of Surface Accuracy in End Milling. *Transactions of the ASME*. 104 ; 272-278.
- [Koplev et al., 1983] KOPLEV, A., LYSTRUP, A. et VORM, T. (1983). The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP. *Composites 14*, 14 :371-376.
- [Kuang-Hua et Hung-Yen, 1997] KUANG-HUA, F. et HUNG-YEN, C. (1997). An accuracy model for the peripheral milling of aluminum alloys using response surface design. *Journal of Materials Processing Technology*, 72 ;42-47.
- [Lachaud et al., 2001] LACHAUD, F., PIQUET, R., COLLOMBET, F. et SURCIN, L. (2001). Drilling of composite structures. *Composite Structures*, 52(3-4) :511-516.

BIBLIOGRAPHIE

- [Lasota et Rusek, 1983] LASOTA, A. et RUSEK, P. (1983). Influence of random vibrations on the roughness of turned surfaces. *Journal of Mechanical Working Technology*, 7(3) :277-284.
- [Louvet et Delplanque, 2005] LOUVET, F. et DELPLANQUE, L. (2005). Témoignage de l'association Expérimentique [1996-2005] « Design of experiments : une approche pragmatique et illustrée : the French touch », Orléans, DL 2005 ISBN :2-9525126-0-4.
- [Limido, 2008] LIMIDO, J. (2008). *Etude de l'effet de l'usinage grande vitesse sur la tenue en fatigue de pièces aéronautiques*. Thèse de Doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier.
- [Mansour et Abdallah, 2002] MANSOUR A. et ABDALLA H. (2002). Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations, *Journal of materials processing technology*, 124 :183-191.
- [Marques et al., 2009] MARQUES, A.T., DUROA, L.M., MAGALHAES, A.G., SILVA, J.F. et TAVARES, J.M.R.S. (2009). Delamination analysis of carbon fibre reinforced laminates :Evaluation of a special step drill. *Composites Science and Technology*, 69 :2376-2382.
- [Mbeilissouck, 2009] MBEILISSOUCK, E.G. (2008). *Contribution à la détermination des paramètres ultrasonores des gondolements des fibres dans un matériau composite à matrice céramique renforcée*. Université-Douala, DEA Mécanique Matériaux.
- [Mer et Diniz, 1994] MER, B. et DINIZ, A.E. (1994). Correlating tool wear, tool life, surface-roughness and tool vibration in finish turning with coated carbide tools. *Wear*, 173 :137-144.
- [Merchant, 1944] MERCHANT, M.E. (1944). Basic mechanics of the metal cutting process. *Journal of applied Mechanics*, 11 :168-175.
- [Merritt, 1965] MERRITT, H.E. (1965). Theory of self-excited machine tool chatter : contribution to machine tool chatter. *Journal of Engineering for Industry*.
- [Monreal et Rodriguez, 2003] MONREAL, M. et RODRIGUEZ, C.A. (2003). Influence of tool path strategy on the cycle time of high-speed milling, *Computer-Aided Design*, 35 :395-401.
- [Montgomery, 1997] MONTGOMERY, D.C. (1997). Design and Analysis of experiments. 4th ed. Wiley New York.
- [Morandeau, 2012] MORANDEAU, A. (2012). *Méthodologie de caractérisation et de conception d'un outil coupant à plaquettes amovibles pour l'usinage de matériaux composites aéronautique*. Thèse de doctorat, Université François Rabelais de Tours.
- [Norme-iso3534-1, 1999] NORME INTERNATIONALE ISO 3534-1 :1999. Statistics Vocabulary and symbols Part 1 : General statistical terms and terms used in probability.
- [Norme-iso3534-2, 1999] NORME INTERNATIONALE ISO 3534-2 :1999. Statistics Vocabulary and symbols Part 2 : Applied statistics.

BIBLIOGRAPHIE

- [Norme-iso3534-3, 1999] NORME INTERNATIONALE ISO 3534-3 :1999. Statistics Vocabulary and symbols Part 3 : Design of experiments.
- [Norme66502, 1978] NORME NFE 66 502 (1978). Géométrie de la partie active des outils coupants, notions générales, Systemes de référence, angles de l'outil et angles de travail. Association Française de Normalisation (AFNOR).
- [Oldenhuis, 2010] OLDENHUIS, R.P.S. (2010). Godlike : Global optimum determination by linking and interchanging kindred evaluators. Delft University of Technology, Department of Astrodynamics and Satellite Systems.
- [Oxley, 1989] OXLEY, P.L.B. (1989). Mechanics of Machining : an Analytical Approach to Assessing Machinability. Ellis Horwood Limited(UK), 242.
- [Paquet, 2005] PAQUET, G. (2005). Guide de l'usage, Delagrave, Paris.
- [PILLET, 1992] PILLET, M. (1992). Introduction aux plans d'expériences par la méthode Taguchi, Paris : Editions d'Organisation, c1992 ISBN : 2-7081-1442-5.
- [Poulachon et al., 2002] POULACHON, G., MOISAN, A., et DESSOLY, M. (2002). A contribution to the study of the cutting mechanisms in hard turning. *Mécanique et Industries*, 3 :291-299.
- [Ramulu, 1997] RAMULU, M. (1997). Machining and surface integrity of fibre-reinforced plastic composites. *Sadhana* 1997;22 :449-472.
- [Rawat et Attia, 2009] RAWAT, S. et ATTIA, H. (2009). Characterization of the dry high speed drilling process of woven composites using Machinability Maps approach. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(1) :105-108.
- [Risbood et al., 2003] RISBOOD, K.A., DIXIT, U.S. et SAHASRABUDHE, A.D. (2003). Prediction of surface roughness and dimensional deviation by measuring cutting forces and vibrations in turning process. *Journal of Materials Processing Technology*, 132 :203-214.
- [Safety, 2007] SAFETY (2007). Turning Catalog Valenite Safety. TURN-CAT 2007.
- [Safety, 2011] SAFETY (2011). Catalogue général Safety cutting tools solutions.
- [Sahasrabudhe et al., 2003] SAHASRABUDHE A.D., RISBOOD K.A. et DIXIT U.S., Prediction of surface roughness and dimensional deviation by measuring cutting forces and vibrations in turning process. *Journal of Materials Processing Technology*, 132 :03-214.
- [Schaffer et Grefenstette, 1985] SCHAFFER, J. et GREFENSTETTE, J. (1985). Multiobjective learning via genetic algorithms. *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 593-595.
- [Segreti, 2002] SEGRETI, M. (2002). *Vibration en coupe orthogonale. Modélisation, étude de stabilité, validation expérimentale*. Thèse de doctorat. Université Paul Verlaine - Metz.
- [Selaimia, 2008] SELAIMIA, M. (2008). *Etude des efforts de coupe et de la rugosité lors de l'usinage du PE80*. Memoire on line, Université Guelma, Algerie.

BIBLIOGRAPHIE

- [Sharif et al., 2010] SHARIF, S., AZLAN MOHD, Z. et HABIBOLLAH, H. (2010). Prediction of surface roughness in the end milling machining using artificial neural network. *Expert Systems with Applications*, 37 :1755-1768.
- [Songmene et al.,1998] SONGMENE, V., STEFAN, M., STEPHENSON, T.F. et WAMER, A.E.M. (1998). Turning and Honing of GrA-Ni MMC Cylinder Liners : Experimental Investigation on Surface Texture. *CSME Forum SCGM 1998*, 4 :186-193.
- [Soulier, 1994] SOULIER, B. (1994). Sur la modélisation expérimentale en mécanique : précision, optimisation et applications industrielles. Thèse doctorat E.N.S. de Cachan.
- [Srinivas et Deb, 1994] SRINIVAS, N. et DEB, K. (1994). Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary Computation*, 221-248.
- [Teti, 2002] TETI, R. (2002). Machining of Composite Materials. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 51(2) :611-634.
- [Tlustý et Polacek, 1963] TLUSTÝ, J. et POLACEK, M. (1963). The stability of the machine tools against self excited vibrations in machining. *International research in production engineering*.
- [Tobias, 1965] TOBIAS, S.A. (1965). Machine tool vibration, Blackie.
- [Tsao, 2008] TSAO, C.C. (2008). Comparison between response surface methodology and radial basis function network for core-center drill in drilling composite materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37(11) :1061-1068.
- [Vasques, 2008] VASQUES, B. (2008). *Etude du comportement du rayon d'arête et de son influence sur l'intégrité de surface en tournage à sec*. Thèse de doctorat en Génie mécanique, Université de Tours.
- [WAGNER, 2011] WAGNER, V. (2011). *Amélioration de la productivité en usinage d'un titane réfractaire : le Ti5553*. Thèse doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [Wasserman, 2004] WASSERMAN, L. (2004). All of Statistics : A Concise Course in Statistical Inference, New York, Springer-Verlag. (ISBN 978-0387402727))
- [Wu, 1964] WU, S. M. (1964). Tool-Life Testing by Response Surface Methodology-Part 1. *Journal of Engineering for Industry*, 105-116.
- [Wu et al., 2006] WU, C.H., TZENG, G.H., GOO, Y.J. et FANG W.C. (2006). A realvalued genetic algorithm to optimize the parameters of support vector machine for predicting bankruptcy. *Expert Systems with Applications*, 32(2007) :397-408.
- [Zitoun et al., 2005] ZITOUNE, R., COLLOMBET, F., LACHAUD, F., PIQUET, R. et PASQUET, P. (2005). Experiment calculation comparison of the cutting conditions representative of the long fiber composite drilling phase. *Composites Science and Technology*; 65(3-4) :455-466.

BIBLIOGRAPHIE

- [Zitzler et Thiele, 1999] ZITZLER, E., et THIELE, L. (1999). Multiobjective evolutionary algorithms : A comparison case study and the strength pareto approach. *Evolutionary Computation*, 257-271.
- [Zitzler et al, 2001] ZITZLER, E., LAUMANN, M. et THIELE, L. (2001). Spea2 : Improving the strength pareto evolutionary algorithm. Technical report - Swiss Federal Institute of Technology, 2001.

LISTE DES TRAVAUX DE RECHERCHE ET PUBLICATIONS

1. ARTICLES DANS DES REVUES AVEC COMITÉ DE LECTURE -ACL :

- (a) CHIBANE, H., MORANDEAU, A., SERRA, R., BOUCHOU, A. et LEROY, R. (2013). Optimal milling conditions for composite material using damage and vibration. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68(5-6) :1111-1121.
- (b) CHIBANE, H., SERRA, R., MORANDEAU, R. BOUCHOU, A. et LEROY, R. (2012). Détermination des conditions d'usinage sans délaminage d'un matériau composite par analyse vibratoire. *Revue des composites et des matériaux avancés*, (Accepté le 21/11/2012).
- (c) MORANDEAU, A., CHIBANE, H., BOUCHOU, A., SERRA, R., BONHOURE, D. et LEROY, R. (2012). Machining Carbon Fibre Reinforced Plastics : lead angle effect. *International Journal Machining and Machinability of Materials*, 13(2) :311-330.

2. LES COMMUNICATIONS AVEC ACTES - ACT :

- (a) SERRA, R., CHIBANE, H., et LEROY, R. (2009). Dynamic characterization of the cutting conditions in dry turning. *Journal of Physics : Conference Series*, 181(1) :012025.
- (b) SERRA, R., CHIBANE, H. (2010). Effects of cutting parameters during turning 100C6 steel. *14th International Conference on Experimental Mechanics, EPJ Web of Conferences*, 6 :13004.
- (c) CHIBANE, H., SERRA, R., MORANDEAU, A. et LEROY, R. (2011). Selection of machining conditions for aeronautic composite using vibration analysis. *18th International Conference on composite materials., Corée du sud*.
- (d) MORANDEAU, A., BÖHLMARK, J., LEROY, R., BONHOURE, D., CHIBANE, H. et BOUCHOU, A. (2011) Composites machining Cutting strategy and diamond coatings. *18th International Conference on composite materials, Corée du sud*.
- (e) CHIBANE, H., SERRA, R. (2011). Choix de conditions de coupe en usinage des composites par analyse vibratoire. *Journées Nationales sur les Composites, Poitiers*.
- (f) CHIBANE, H., SERRA, R., MORANDEAU, A. et LEROY, R. (2011). Corrélation entre les vibrations et les défauts générés lors de l'usinage d'un matériau composite carbone/époxy T800S/M21. *20ème Congrès Français de Mécanique, Besançon*.
- (g) CHIBANE, H., SERRA, R. et LEROY, R. (2011). Mise en oeuvre d'une optimisation multi-objectif en tournage d'un acier 100C6 : compromis entre qualité de surface et productivité. *20ème Congrès Français de Mécanique, Besançon*.
- (h) MORANDEAU, A., CHIBANE, H., BOUCHOU, A., SERRA, R. et LEROY, R. (2012). Cutting tools research center (CEROC) : Carbon fibers reinforced plastics machining. *JST-AMAC : Usinage des Matériaux Composites, Paris*.
- (i) SERRA, R. et CHIBANE, H. (2012). Multi-objective optimization of cutting parameters for turning AISI 52100 steel. *7ème Assises MUGV2012*.

LISTE DES TRAVAUX DE RECHERCHE ET PUBLICATIONS

3. LES COMMUNICATIONS SANS ACTES :

- (a) CHIBANE, H., SERRA, R. et LEROY, R. (2009). Modélisation et Optimisation de la coupe. *Manufacturing'21*, Tours.
- (b) MORANDEAU, A., LEROY, R., BOUCHOU, A., BONHOURE, D. et CHIBANE, H. (2011). Usinage des matériaux composites CFRP : impact d'une géométrie grande avance. *Manufacturing'21*, Toulouse.
- (c) CHIBANE, H., SERRA, R., MORANDEAU, R. BOUCHOU, A. et LEROY, R. (2011). Choix de conditions de coupe en usinage des composites. *Manufacturing'21*, Toulouse.

Résumé

Les procédés de fabrication de pièces mécaniques par enlèvement de matière (tournage, fraisage, perçage, ...) connaissent une utilisation massive dans l'industrie aéronautique et l'automobile. Les pièces obtenues par ces procédés doivent satisfaire à des propriétés géométriques, métallurgiques et à des caractéristiques de qualité. Pour répondre à ces exigences, plusieurs essais expérimentaux basés sur le choix des conditions de coupe sont souvent nécessaires avant d'aboutir à une pièce satisfaisante. Actuellement, ces méthodes empiriques basées sur l'expérience des fabricants et des utilisateurs des outils coupants sont souvent très longues et coûteuses, donnent une large plage de choix des paramètres en fonction de leurs besoins. Toutefois, le coût très élevé d'un essai limite fondamentalement le nombre d'expériences, avoir une pièce respectant les caractéristiques souhaitées avec un coût acceptable devient une tâche difficile. L'importance d'encadrer les conditions de coupe par certaines limites est liée au type de matériau à usiner, puisqu'il détermine le comportement de la coupe. Il est donc d'un grand intérêt de connaître l'interaction entre l'outil et la matière. Cela permettrait d'identifier les conditions acceptables de coupe pour une matière déterminée. Un problème fondamental dans l'usinage d'un matériau composite est la méconnaissance de la plage des conditions de coupe optimales. Ce problème est dû d'une part, à l'hétérogénéité du matériau, et d'autre part à la présence de défauts liés à la structure de ce matériau comme le délaminage, l'écaillage et la présence de fibres non coupées. L'objectif de la thèse est de fournir des outils permettant de choisir les conditions de coupe de façon intelligente à partir d'un nombre suffisant d'expériences tout en prenant en compte des intérêts parfois contradictoires comme l'état de surface des pièces usinées, l'usure de l'outil de coupe et la productivité. Pour atteindre cet objectif, une combinaison de plusieurs méthodes : statistiques, analytiques, et expérimentales a été mise en oeuvre. Une première application de ces méthodes sur un matériau en acier 100Cr6 a été entreprise. Des modèles empiriques ont été établis à partir de la régression linéaire et des plans d'expériences réalisés, les optimisations mono-objectif et multi-objectif ont été utilisées pour le choix de conditions de coupe. Deux applications sur un matériau composite carbone/époxy T800S/M21 sont illustrées : la première avec un outil de coupe de type PCD et la deuxième avec une plaquette de coupe Penta amovible à 3 revêtements différents (DLCép1, NanoC, MicroC). Dans cette partie, des modèles empiriques et des optimisations multi-objectifs ont été établis par la méthode de surface de réponse. Les niveaux de vibration de la plaque composite et les défauts enregistrés au cours d'usinage ont été analysés pour déterminer les conditions de coupe optimales.

Mots clés : Usinage, conditions de coupe, optimisation multi-objectif, surface de réponse, plan d'expérience, matériau composite, acier100Cr6, vibration, délaminage.

Abstract

Manufacturing processes of mechanical parts by removal of material (turning, milling, drilling ...) have extensive use in aeronautic and automobile industry. The components obtained using these methods must satisfy geometric properties, metallurgical and quality characteristics. To meet these requirements, several experimental tests based on the selection of cutting conditions are often necessary before manufacturing. Currently, these empirical methods based on the experience of manufacturers and users of cutting tools (charts, diagrams with experimental findings, ...) are often very lengthy and costly. However, the high cost of a trial limits the number of experiments, so to have a deserted component with an acceptable cost is a difficult task. The importance of cutting conditions monitored by limitations is related to the type of material to be machined, since it determines the behavior of the machining. It is therefore of great interest to know the interaction between the tool and the material. This would identify the acceptable cutting conditions in a particular material. A fundamental problem in the machining of composite material is the ignorance of the range of optimum cutting conditions. This problem is partly due to the heterogeneity of the material, and due to the presence of defects in the structure of this material such as delamination, chipping and the presence of uncut fiber. The objective of this thesis is to provide certain criteria for selecting cutting conditions intelligently from a sufficient number of experiments taking into account deferent objectives such as the surface of the work-pieces, the wear of the cutting tool and productivity. To achieve this goal, a combination of several methods : statistical, analytical, and experimental has been implemented. The first application of these methods on steel 100Cr6 is illustrated. Empirical models were derived from linear regression and design of experiments. Single and multi objective optimization coupled with the method of weighted sum were used for the selection of cutting conditions. Two applications of a composite carbon / epoxy T800S/M21 are shown : one with a Poly-Crystalline Diamond cutting tool type and the second with a cutting removable Penta with three different coating (DL-Cép1, NanoC, MicroC). In this section, empirical models and multi-objective optimization have been developed by the method of response surfaces. Vibration levels of the composite plate and defects recorded during machining were used to determine the optimum cutting conditions.

Keywords : Machining, cutting conditions, multi-objective optimization, response surface methodology, design of experiment, composite material, steel 100Cr6, vibration, delamination.