

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
École Nationale Polytechnique



Département de Génie Mécanique

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'État en Génie Mécanique

Influence du régime de coupe sur l'état de surface dans le
domaine de l'usinage – expérimentation et optimisation –

Réalisé par :

BENKHELOUF Doua

Sous la supervision de :

Dr. SAIDI Djamel & Dr. ZEROUDI Nasreddine

Présenté et soutenu publiquement le 23 septembre 2025, devant le jury composé de :

Président :	Dr. BELKACEMI Yacine	ENP
Promoteur :	Dr. SAIDI Djamel	ENP
Promoteur :	Dr. ZEROUDI Nasreddine	ENP
Examineur :	Dr. SEDJAL Hamid	ENP
Invité :	Pr. BOUAZIZ Mohamed	ENP

ENP 2025

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
École Nationale Polytechnique



Département de Génie Mécanique

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'État en Génie Mécanique

Influence du régime de coupe sur l'état de surface dans le
domaine de l'usinage – expérimentation et optimisation –

Réalisé par :

BENKHELOUF Doua

Sous la supervision de :

Dr. SAIDI Djamel & Dr. ZEROUDI Nasreddine

Présenté et soutenu publiquement le 23 septembre 2025, devant le jury composé de :

Président :	Dr. BELKACEMI Yacine	ENP
Promoteur :	Dr. SAIDI Djamel	ENP
Promoteur :	Dr. ZEROUDI Nasreddine	ENP
Examineur :	Dr. SEDJAL Hamid	ENP
Invité :	Pr. BOUAZIZ Mohamed	ENP

ENP 2025

الملخص :

تُعد حالة السطح عاملاً رئيسياً في عمليات التشغيل، لما لها من تأثير مباشر على أداء الأجزاء الميكانيكية وطول عمرها الوظيفي. يهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير ظروف القطع على حالة السطح الناتجة عن عملية التفرير للفولاذ AISI 1010، وذلك بالاعتماد على تصميم التجارب من نوع بوكس-بينكن. أتاحت التجارب المنجزة، إلى جانب التحليل الإحصائي، بنمذجة العلاقة بين عوامل القطع وخشونة السطح. تساهم هذه الدراسة في تعزيز الفهم التقني لعمليات التشغيل، كما تمثل قاعدة علمية لتحسين شروط القطع، وتفتح آفاقاً نحو اعتماد المنهجية الرقمية في التنبؤ بالخشونة السطحية.

الكلمات المفتاحية : عملية التشغيل، عوامل القطع، تصميم التجارب، حالة السطح، الخشونة، التحسين.

Abstract

Surface finish is a key criterion in machining, as it directly affects the performance and durability of components. This work aims to investigate the influence of cutting conditions on the surface finish obtained during the milling of AISI 1010 steel, using a Box–Behnken experimental design. The conducted experiments, combined with statistical analysis, allowed modeling the relationship between cutting parameters and surface roughness. The study contributes to a better understanding of the machining process and provides a foundation for optimizing machining conditions, while also opening prospects for the numerical prediction of surface roughness.

Keywords : Machining, Cutting parameters, Design of experiments, Surface finish, Roughness, Optimization.

Résumé

L'état de surface est un critère majeur en usinage, car il influence directement les performances et la durabilité des pièces. Ce travail vise à étudier l'influence des conditions de coupe sur l'état de surface obtenu lors du fraisage de l'acier AISI 1010, à l'aide d'un plan d'expériences de type Box–Behnken. Les essais réalisés, combinés à une analyse statistique, ont permis de modéliser la relation entre les paramètres de coupe et la rugosité. L'étude contribue à une meilleure compréhension du procédé et fournit une base pour l'optimisation des conditions d'usinage, tout en ouvrant des perspectives pour la prédiction numérique de la rugosité.

Mots clés : Usinage, Régime de coupe, Plans d'expérience, État de surface, Rugosité, Optimisation.

Dédicaces

Louange à Dieu, infiniment reconnaissante pour sa grâce, sa guidance et le succès accordé.

À la mémoire de mon défunt père, mon pilier, mon refuge, dont le soutien constant m'a guidée jusqu'ici. Ton absence en ce moment d'achèvement laisse un vide immense, mais ta présence demeure gravée dans mon cœur.

Je t'offre ce travail comme un hommage à ton amour, à tes sacrifices et à tout ce que tu as représenté pour moi.

À ma chère mère, dont les prières ont illuminé mon chemin et portées chacun de mes pas.

À ma tante bien-aimée, seconde mère au cœur immense, qui m'a appris la générosité sans attendre en retour.

À ma sœur Asma, ma confidente, ma première amie, celle qui m'encourage à chaque étape, qui croit en moi même lorsque j'en doute.

À mon frère Rabah, fidèle soutien dans les épreuves comme dans les réussites.

À mes sœurs, mes compagnes de vie, source de force et d'inspiration.

À ma chère grand-mère, à mon oncle Saleh, ainsi qu'à mes nièces et neveux.

À mes chères amies, Imen, Nihad, Rayhane, Israa, et à toutes les autres qui se reconnaissent, merci de votre présence, de vos encouragements et de vos mots qui ont apaisé les moments difficiles.

Je vous dédie ce mémoire comme un humble témoignage d'amour, de gratitude et de fidélité.

Remerciements

Je souhaiterais exprimer ma sincère reconnaissance à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail de recherche.

En premier lieu, mes plus vifs remerciements s'adressent à M. SAIDI et M. ZEROUDI, mes promoteurs, pour leur disponibilité, la pertinence de leurs conseils et leur accompagnement constant tout au long de ce travail. Leur expertise et leur rigueur scientifique ont été d'un grand soutien dans l'élaboration et l'aboutissement de ce mémoire.

Je remercie également M. BELKACEMI et M. SEDJAL d'avoir accepté de faire partie du jury et d'avoir consacré de leur temps pour évaluer mon travail.

J'exprime toute ma gratitude à la fonderie de Rouiba, à l'entreprise ACMP usinage de précision, au personnel du Laboratoire de Technologie des Métaux (LTM) de l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), ainsi qu'au Centre de Recherche en Technologies Industrielles (CRTI) pour leur soutien technique et matériel, sans lequel la partie expérimentale de ce projet n'aurait pu être menée à bien.

Je tiens également à remercier l'ensemble des enseignants du département de Génie Mécanique, et plus particulièrement M. BOUAZIZ et M. BENBRAIKA, pour leur aide précieuse, qui a grandement facilité l'aboutissement de ce travail.

Table des matières

Liste des tableaux

Table des figures

Liste des acronymes

Liste des symboles

Introduction générale	20
1 Généralités sur l'usinage et le fraisage	22
1.1 Introduction	22
1.2 L'usinage : principe et évolution	22
1.3 Procédés de l'usinage	23
1.3.1 Procédés conventionnels	24
1.3.2 Procédés non conventionnels	28
1.4 Le fraisage : procédé clé de l'usinage	33
1.4.1 Types de fraisage	33
1.4.2 Modes de fraisage	34
1.5 Outils et matériaux de coupe en fraisage	35
1.5.1 Outils de coupe	35
1.5.2 Matériaux de coupe	39
1.6 Opérations principales de fraisage	41
1.6.1 Surfaçage	41
1.6.2 Contournage	42
1.6.3 Fraisage d'épaulement	42
1.6.4 Rainurage	42

1.6.5	Profilage	43
1.7	Machines-outils utilisés en fraisage	44
1.7.1	Fraiseuses horizontales	44
1.7.2	Fraiseuses verticales	44
1.7.3	Fraiseuses universelles	45
1.7.4	Fraiseuses à commande numérique 3 axes	46
1.7.5	Fraiseuses à commande numérique 3 + 2 axes	46
1.7.6	Fraiseuses à commande numérique 5 axes	46
1.7.7	Centres d'usinage à commande numérique	47
1.8	Paramètres principaux en fraisage	48
1.8.1	Fréquence de rotation	48
1.8.2	Vitesse de coupe	48
1.8.3	Avance par dent	49
1.8.4	Vitesse d'avance	49
1.8.5	Profondeur de coupe axiale	50
1.8.6	Profondeur de coupe radiale	50
1.8.7	Débit copeaux	50
1.8.8	Épaisseur moyenne de copeaux	51
1.9	Caractérisation de la coupe en fraisage	51
1.9.1	Mécanisme de formation de copeaux	51
1.9.2	Efforts de coupe	52
1.10	Présentation générale de la dynamique de coupe	54
1.11	Conclusion	55
2	Plans d'expériences	56
2.1	Introduction	56
2.2	Définition et évolution des plans d'expérience	56
2.3	Terminologie	58
2.3.1	Facteur	58
2.3.2	Domaine du facteur	59
2.3.3	Espace expérimental	59
2.3.4	Domaine d'étude	60
2.3.5	Réponse	62

2.3.6	Coordonnées centrées réduites	62
2.4	Démarche de la méthode d'étude par DoE	63
2.5	Types des plans d'expérience	63
2.5.1	Plans de criblage	63
2.5.2	Plans d'optimisation	64
2.5.3	Plans de mélange	64
2.6	Méthodologie de la surface de réponse	65
2.6.1	Principaux plans d'expériences pour surface de réponse	65
2.6.2	Modélisation mathématique	66
2.6.3	Modélisation graphique	68
2.7	Plan de Box-Behnken pour trois facteurs	69
2.7.1	Construction du plan	69
2.7.2	Matrice du plan	69
2.7.3	Choix du plan	70
2.8	Analyse de la variance	71
2.8.1	Définition et principes	71
2.8.2	Tests statistiques	71
2.8.3	Hypothèses de validité de l'ANOVA	74
2.9	Logiciels d'analyse statistique	74
2.10	Conclusion	75
3	États de surface	76
3.1	Introduction	76
3.2	Classification des surfaces en métrologie	76
3.2.1	Surface d'un corps	77
3.2.2	Surface géométrique	77
3.2.3	Surface spécifiée	77
3.2.4	Surface réelle	77
3.2.5	Surface mesurée	77
3.3	Notion d'état de surface	78
3.3.1	État géométrique de surface	78
3.3.2	État physico-chimique de la surface	78
3.4	Généralités sur les défauts géométriques de surface	79

3.4.1	Défauts de forme	79
3.4.2	Défauts d'état de surface	81
3.5	Paramètres de caractérisation de l'état de surface	83
3.5.1	Notions géométriques de base	83
3.5.2	Paramètres liés à la ligne moyenne	86
3.5.3	Paramètres liés aux motifs de rugosité	88
3.5.4	Paramètres de rugosité choisis pour l'étude	89
3.6	Représentation de l'état de surface sur le dessin	89
3.6.1	Symboles de base normalisés	89
3.6.2	Spécifications de l'état de surface	90
3.6.3	Positions du symbole sur le dessin	91
3.7	Moyens et techniques de mesure de l'état de surface	92
3.7.1	Méthodes mécaniques à contact	92
3.7.2	Evaluation par comparaison viso-tactile	93
3.7.3	Méthodes optiques	94
3.7.4	Méthodes avancées et nanométriques	95
3.8	Facteurs influençant l'état de surface	95
3.8.1	Paramètres d'usinage	95
3.8.2	Propriétés de l'outil de coupe	96
3.8.3	Phénomène de coupe	96
3.8.4	Propriétés de la pièce	96
3.9	Influence de l'état de surface sur la qualité fonctionnelle	97
3.9.1	Friction et usure	97
3.9.2	Résistance à l'usure	98
3.9.3	Résistance à la fatigue	98
3.9.4	Scellabilité	98
3.9.5	Qualité esthétique et fonctionnelle	98
3.10	Conclusion	99
4	Travaux expérimentaux	100
4.1	Introduction	100
4.2	Caractérisation du matériau de base	100
4.2.1	Analyse chimique	101

4.2.2	Essais de traction	104
4.2.3	Essais de dureté	107
4.2.4	Caractérisation normalisée du matériau	110
4.3	Préparation des échantillons	112
4.4	Surfaçage de finition	113
4.4.1	Machine utilisée	113
4.4.2	Choix de l'outil de coupe	114
4.4.3	Choix des niveaux des conditions de coupe	115
4.4.4	Procédure de fraisage	118
4.5	Mesures de la rugosité	120
4.5.1	Moyen de mesure	120
4.5.2	Techniques de mesure	121
4.6	Visualisation des surfaces par microscope optique	122
4.7	Conclusion	123
5	Résultats et discussions	124
5.1	Introduction	124
5.2	Analyse des mesures de la rugosité avant usinage	124
5.3	Analyse des mesures de la rugosité après usinage	126
5.4	Analyse visuelle des états de surfaces	129
5.5	Analyse statistique	131
5.5.1	Modèles quadratiques complets	131
5.5.2	Modèles ajustés	137
5.6	Optimisation des conditions de coupe	148
5.7	Évaluation de l'état de surface par microscope	153
5.8	Conclusion	155
	Conclusion générale et perspectives	156
	Bibliographie	158
A	Éprouvette plate selon la norme ISO 6892-1	165
B	Limites de composition chimique des aciers au carbone selon la classification AISI	167

C	Fiche technique de l'acier AISI 1010	169
D	Extrait du catalogue des outils utilisé pour le choix des niveaux des conditions de coupe	171
E	Valeurs critiques du coefficient F	173
F	Valeurs critiques du coefficient t	175

Liste des tableaux

2.1	Matrice du plan Box-Behnken pour trois facteurs	70
4.1	Résultats de l'analyse chimique par spectrométrie en pourcentage massique	102
4.2	Résultats de l'analyse chimique par combustion en pourcentage massique .	104
4.3	Propriétés mécaniques du matériau issues des essais de traction	106
4.4	Résultats des essais de microdureté Vickers	108
4.5	Résultats des essais de dureté Brinell	110
4.6	Caractéristiques techniques principales de la machine EMCO Maxxmill 750	114
4.7	Niveaux des facteurs	115
4.8	Matrice du plan de Box-Behnken pour les conditions de coupe étudiés en unité courante	116
4.9	Matrice du plan de Box-Behnken pour les conditions de coupe opérationnels en unité courante	117
5.1	Valeurs de la rugosité des surfaces avant usinage selon deux directions . . .	125
5.2	Valeurs de la rugosité des surfaces après usinage selon le sens de l'avance de la fraise	127
5.3	Valeurs de la rugosité des surfaces après usinage selon le sens perpendicu- laire au sens de l'avance de la fraise	128
5.4	Récapitulatif du modèle quadratique complet de la réponse Ra	132
5.5	Table d'ANOVA pour le modèle quadratique complet de la réponse Ra . .	132
5.6	Récapitulatif du modèle quadratique complet de la réponse Rz	134
5.7	Table d'ANOVA pour le modèle quadratique complet de la réponse Rz . .	135
5.8	Récapitulatif du modèle ajusté de la réponse Ra	137
5.9	Table d'ANOVA pour le modèle ajusté de la réponse Ra	138
5.10	Récapitulatif du modèle ajusté de la réponse Rz	140
5.11	Table d'ANOVA pour le modèle ajusté de la réponse Rz	140

Table des figures

1.1	Outil de coupe en tournage	25
1.2	Opérations de tournage	26
1.3	Types de trous percés	27
1.4	Opérations de perçage et d'alésage	28
1.5	Procédés d'usinage mécanique non-traditionnel	29
1.6	Procédés d'usinage thermique	31
1.7	Principe de l'usinage électrochimique	32
1.8	Principe de l'usinage chimique	32
1.9	Types de fraisage : à gauche le fraisage en roulant et à droite le fraisage en bout	34
1.10	Modes de fraisage	35
1.11	Types de fraises selon la construction	36
1.12	Types de fraises selon le nombre de taille	37
1.13	Types de fraises selon la forme	37
1.14	Types de fraises selon la denture	38
1.15	Organes intermédiaires entre la fraise et la broche	39
1.16	Résistance à l'usure des différents matériaux de coupe en fonction résilience	40
1.17	Opération de surfaçage	41
1.18	Opération de fraisage d'épaulement	42
1.19	Opération de rainurage	43
1.20	Opération de profilage	43
1.21	Fraiseuse horizontale	44
1.22	Fraiseuse verticale	45
1.23	Fraiseuse universelle	45
1.24	Directions de déplacement de l'outil en fraisage CNC 3 axes	46
1.25	Mouvements du couple outil-pièce susceptibles en fraisage CNC 5 axes	47

1.26	Mouvement de coupe de la fraise avec les paramètres principaux	48
1.27	Mouvement d'avance avec les paramètres principaux	49
1.28	Représentation de la profondeur de coupe axiale a_p et le profondeur de coupe radiale a_e	50
1.29	Mécanisme de formation de copeaux	52
1.30	Représentation des efforts de coupe en fraisage	53
1.31	Diagramme de lobes de stabilité	55
2.1	Applications des plans d'expérience par domaine scientifique	57
2.2	Modèle général d'un processus	58
2.3	Domaine du facteur	59
2.4	Espace expérimental	60
2.5	Point expérimental	60
2.6	Domaine d'étude	61
2.7	Représentation géométrique du plan d'expérience	61
2.8	Représentations graphiques des plans utilisés dans la RSM	66
2.9	Modélisation graphique de la surface de réponse	68
2.10	Illustration du plan de Box-Behnken pour 3 facteurs	69
2.11	Logiciels utilisés pour la mise en œuvre des plans d'expérience	75
3.1	Classification des surfaces en métrologie	77
3.2	Détails de la surface solide : texture de la surface (axe vertical agrandi) et couches de surface typiques	79
3.3	Défauts de forme	80
3.4	Caractérisation graphique des écarts de forme	80
3.5	Profil de surface	81
3.6	Profil d'ondulation	82
3.7	Profil de rugosité	82
3.8	États de surface obtenus selon le procédé de fabrication	83
3.9	Représentation de la ligne de référence, les longueurs de base et la longueur d'évaluation	84
3.10	Représentation de la ligne moyenne	85
3.11	Sommet local et creux local	85
3.12	Définition de la hauteur maximale du profil R_t	86

3.13	Définition de la hauteur maximale des saillies Rp	86
3.14	Définition de l'écart moyen arithmétique Ra	86
3.15	Définition de la hauteur des irrégularités sur dix points Rz	87
3.16	Représentation du taux de portante	88
3.17	Définition de la profondeur de rugosité R	88
3.18	Symboles de base normalisés	90
3.19	Spécifications de l'état de surface	90
3.20	Directions des irrégularités et symboles correspondants	91
3.21	Position du symbole sur le dessin	92
3.22	Appareil à palpeur	93
3.23	Comparateur viso-tactile	94
3.24	Diagramme d'Ishikawa avec les paramètres influençant l'état de surface	97
4.1	Spectromètre d'émission optique par étincelle Poly Spek Neo	101
4.2	Étapes de l'analyse chimique par spectrométrie d'émission optique par étincelle	102
4.3	Analyseur élémentaire par combustion LECO CS-200	103
4.4	Éprouvettes plates pour les essais de traction	104
4.5	Machine universelle électromécanique d'essais mécaniques de capacité de 100 kN	105
4.6	Étapes de l'essai de traction	106
4.7	Microduromètre TUKON 1202 de Wilson Hardness	107
4.8	Étapes de l'essai de microdureté Vickers	108
4.9	Duromètre INNOVATEST NEMESIS 9000	109
4.10	Étapes de l'essai de dureté Brinell	110
4.11	Échantillon réalisé par surfacage d'ébauche	112
4.12	Centre d'usinage vertical EMCO MAXXMILL 750	113
4.13	Fraise cylindrique à deux tailles	114
4.14	Préparation à l'usinage : Outil fixé à la broche et pièce monté sur la table	118
4.15	Écran du pupitre de commande	119
4.16	Pièce usinée	119
4.17	Rugosimètre portable TESA rugosurf 10-G	120

4.18	Mesure de la rugosité dans deux directions à l'aide du rugosimètre TESA rugosurf 10-G	121
4.19	Visualisation de l'état de surface par microscope optique intégré dans le microduromètre TUKON 1202	122
5.1	Images des surfaces obtenues par les 15 essais expérimentaux	130
5.2	Diagramme de Pareto des effets normalisés pour le modèle quadratique complet de Ra	133
5.3	Diagramme de Pareto des effets normalisés pour le modèle quadratique complet de Rz	135
5.4	Diagramme de Pareto des effets normalisés pour le modèle ajusté de Ra . .	138
5.5	Diagramme de Pareto des effets normalisés pour le modèle ajusté de Rz . .	141
5.6	Nuage de points des résidus en fonction des valeurs prédites de Ra	143
5.7	Nuage de points des résidus en fonction des valeurs prédites de Rz	143
5.8	Diagrammes des interactions pour la réponse Ra	145
5.9	Diagrammes des interactions pour la réponse Rz	146
5.10	Surfaces et contours de la réponse Ra selon les couples de facteurs	149
5.11	Surfaces et contours de la réponse Rz selon les couples de facteurs	150
5.12	Graphique de désirabilité des paramètres optimaux	151
5.13	Images obtenues par microscope optique des surfaces usinées	153

Liste des acronymes

ANOVA	Analyse of Variance
ATC	Automatic Tool Changer
AWJM	Abrasive Water Jet Machining
BB	Box-Behnken
CHM	Chemical Machining
CNC	Computer Numerical Control
CVD	Chemical Vapor Deposition
DoE	Design of Experiments
EBM	Electron Beam Machining
ECM	Electrochemical Machining
EDM	Electrical Discharge Machining
HSS	High Speed Steel
LBM	Laser Beam Machining
MS	Mean Square
PVD	Physical Vapor Deposition
RSM	Response Surface Methodology
SS	Sum of Squares
USM	Ultrasonic Machining
WEDM	Wire Electrical Discharge Machining
WJM	Water Jet Machining

Liste des symboles

a_e	Profondeur de coupe radiale	mm
a_p	Profondeur de coupe axiale	mm
AR	Pas moyen de rugosité	μm
D	Diamètre de l'outil	mm
F_a	Effort axial	N
F_r	Effort radial	N
F_t	Effort tangentiel	N
f_z	Avance par dent	mm/dent
h_m	Épaisseur moyenne de copeaux	mm
K_r	Angle principal de coupe	°
L	Longueur d'évaluation	mm
M_a	Mouvement d'avance	–
M_c	Mouvement de coupe	–
N	Fréquence de rotation	tr/min
Q	Débit copeaux	cm^3/min
R	Profondeur moyenne de la rugosité	μm
Ra	Écart moyen arithmétique	μm
Rq	Écart quadratique moyen	μm
Rp	Hauteur maximale de saillie	μm
Rt	Hauteur maximale du profil	μm
Rz	Hauteur des irrégularités sur dix points	μm
V_c	Vitesse de coupe	m/min
V_f	Vitesse d'avance	mm/min
Z	Nombre de dents de la fraise	–
ℓ	Longueur de base	mm

ℓ_m	Ligne moyenne	–
η_p	Longueur portante effective	mm
$(t_p)_c$	Taux de longueur portante	–
R^2	Coefficient de détermination	–
R_A^2	Coefficient de détermination ajusté	–
$R_{\text{prév}}^2$	Coefficient de prédiction	–

Introduction générale

Dans le contexte actuel de l'industrie manufacturière, l'usinage reste un procédé incontournable pour la fabrication de pièces mécaniques de haute précision. Les exigences croissantes en matière de qualité, de performance et de compétitivité imposent une maîtrise rigoureuse des conditions de coupe, notamment pour garantir un bon état de surface. Ce dernier influence directement la fonctionnalité des pièces, leur durée de vie, leur comportement en service, mais aussi le coût global de production. En effet, une rugosité excessive peut nécessiter des opérations supplémentaires de finition ou de rectification, entraînant des surcoûts et des pertes de temps. À l'inverse, une surface conforme dès l'usinage permet d'éviter ces étapes correctives.

Le présent travail s'inscrit dans cette perspective. Il porte sur l'étude de l'influence du régime de coupe sur l'état de surface des pièces usinées, avec une application au fraisage, procédé couramment utilisé pour sa flexibilité et sa précision. L'objectif est d'analyser l'effet de trois paramètres principaux – vitesse de coupe, avance par dent et profondeur de passe – sur la rugosité, notamment à travers les deux indicateurs R_a et R_z . Cette étude vise ainsi à identifier une combinaison optimale des paramètres de coupe permettant de minimiser la rugosité, éviter les reprises et réduire les coûts de production, tout en assurant la qualité requise.

Néanmoins, la génération de la rugosité est un phénomène complexe, influencé par plusieurs facteurs technologiques et physiques souvent interdépendants, comme la géométrie de l'outil, la matière usinée, ou encore les vibrations. Cela rend difficile la prédiction directe de l'état de surface à partir des seuls paramètres de coupe. Cette situation soulève la problématique suivante : comment quantifier l'effet réel des principaux paramètres de coupe sur la rugosité générée en fraisage, et comment en déduire des conditions de coupe optimales permettant d'obtenir une surface de qualité sans recours à des opérations de

inition coûteuses ? Pour répondre à cette problématique, une démarche expérimentale basée sur un plan d'expériences est adoptée, combinée à des outils de modélisation statistique et d'optimisation.

Le présent mémoire est structuré en cinq chapitres, organisés comme suit :

Chapitre 1 : Ce chapitre présente des généralités sur l'usinage et ses principaux procédés, avant de se focaliser sur le fraisage, procédé retenu pour l'étude. Il aborde les principes de base, les outils et matériaux de coupe, les opérations fondamentales, les machines-outils, les principaux paramètres de coupe ainsi qu'une caractérisation générale de la coupe en fraisage.

Chapitre 2 : Ce chapitre est consacré aux plans d'expériences, considérés comme une méthode rigoureuse de planification et d'analyse des essais. Il présente les notions fondamentales, les différents types de plans, ainsi que la méthodologie RSM, en mettant l'accent sur le plan de Box-Behnken utilisé dans cette étude. Les méthodes statistiques employées pour l'analyse des résultats expérimentaux y sont également détaillées.

Chapitre 3 : Ce chapitre traite de la notion d'état de surface, en mettant particulièrement l'accent sur la rugosité. Il en décrit les principaux paramètres (R_a , R_z , etc.), les méthodes de mesure disponibles, ainsi que les facteurs influençant cette caractéristique en usinage. L'importance de la rugosité dans le rôle fonctionnel des pièces y est également soulignée.

Chapitre 4 : Ce chapitre décrit les travaux expérimentaux réalisés. Il détaille la caractérisation du matériau, le choix de l'outil en fonction de l'opération d'usinage, la détermination des conditions de coupe, la réalisation des essais sur la machine-outil, ainsi que les techniques de mesure de la rugosité mises en œuvre.

Chapitre 5 : Ce chapitre présente et discute les résultats expérimentaux. L'analyse met en évidence l'effet des paramètres de coupe, les tendances observées, les interactions éventuelles, ainsi que les conditions optimales identifiées à l'aide des outils statistiques.

Le mémoire se termine par une conclusion générale et propose quelques perspectives d'approfondissement pour des travaux futurs.

Chapitre 1

Généralités sur l'usinage et le fraisage

1.1 Introduction

Ce chapitre présente un aperçu général de l'usinage, en abordant ses principes fondamentaux, son évolution ainsi que les différents procédés qui en découlent. Une attention particulière sera ensuite accordée au fraisage, considéré comme l'un des procédés majeurs de l'usinage. Ses caractéristiques essentielles seront décrites à travers l'étude de ses types et modes, de ses opérations, des outils et matériaux de coupe, des machines-outils, ainsi que des paramètres principaux de la coupe. Enfin, la caractérisation et la dynamique de la coupe en fraisage seront abordées. La compréhension de ces principes et des conditions de coupe constitue une base solide pour orienter l'expérimentation et optimiser les paramètres, dans l'objectif d'améliorer la qualité de surface obtenue.

1.2 L'usinage : principe et évolution

L'usinage est une méthode de fabrication qui consiste à enlever de la matière d'une pièce brute pour la transformer en pièce finie avec la forme et les dimensions désirées. Cet arrachement de matière se fait généralement sur une machine-outil.

Ce procédé joue un rôle économique majeur, contribuant à environ 2,5 % du produit national brut des pays développés. Il concerne principalement les matériaux métalliques. Celui-ci intervient après la mise en forme des bruts, qui s'effectue selon deux approches principales : soit par découpe d'une ébauche destinée à être ensuite transformée par laminage ou forgeage, soit par moulage, frittage ou assemblage par soudage, suivi d'un usinage

pour ajuster les dimensions finales. Ces opérations peuvent être complétées par des traitements thermiques ou de surface.

Toutefois, il ne se limite pas aux matériaux métalliques. En effet, tous les matériaux non métalliques, tels que le bois, les polymères, les céramiques, les composites et les verres peuvent être également usinés, selon des méthodes adaptées à leurs propriétés spécifiques et aux exigences du procédé. [1]

L'évolution de l'usinage est marquée par l'introduction de la première machine-outil. Avec l'essor des besoins de production, les premières machines, telles que le tour à arbre et le tour à pédale, émergèrent au XIII^e siècle. La précision de ces machines a été considérablement améliorée par l'invention du tour à vis par Jacques Besson au XVI^e siècle, suivi par Wilkinson, qui inventa la machine à aléser en 1774, et Maudsley, qui automatisa la coupe avec son tour à porte-outil en 1797. Au XIX^e siècle, l'avènement du fraisage avec Whitney (1818) et Brown (1862) permit la standardisation des pièces. L'électrification au XX^e siècle marqua l'Industrie 2.0, caractérisée par l'automatisation des machines-outils, tandis que l'introduction de la commande numérique dans les années 1940 ouvrit l'ère de l'Industrie 3.0. Depuis les années 1980, le progrès des technologies CNC et des centres d'usinage multi-axes a accru la précision et l'efficacité opérationnelle, menant à l'Industrie 4.0. [2]

1.3 Procédés de l'usinage

Pour usiner une pièce mécanique, l'enlèvement de matière peut être réalisé à l'aide d'un outil coupant, ce qui correspond à l'usinage par coupe. Il peut également se faire sans outil de coupe, par l'action d'un milieu abrasif, procédé désigné sous le terme d'usinage par abrasion. Ces deux types de procédés constituent une grande catégorie connue sous le nom de procédés conventionnels. Par ailleurs, des sources d'énergie thermique, chimique ou électrochimique peuvent être utilisées, ce qui définit les procédés physicochimiques, une catégorie distincte appelée procédés non conventionnels. Cette terminologie permet de distinguer les procédés d'usinage en fonction de l'évolution des technologies utilisées. [3]

1.3.1 Procédés conventionnels

Également appelés procédés traditionnels, les procédés d'usinage conventionnels reposent sur le principe du contact direct de l'outil avec la pièce, permettant ainsi la soustraction de l'excès de matière. L'outil, généralement plus dur que la pièce à usiner, permet de classer les procédés classiques en usinage par coupe et usinage par abrasion selon sa nature. [3]

Les principaux procédés de coupe sont les suivants :

- Tournage.
- Fraisage.
- Perçage et alésage.

Quand aux procédés d'abrasion, on distingue principalement deux types selon les abrasifs utilisés :

- Abrasifs lâches.
- Abrasifs liés.

Dans la suite de cette section on s'intéresse seulement aux procédés d'usinage par coupe.

1.3.1.1 Tournage

Le tournage est un procédé qui permet d'usiner des pièces de révolution (cylindriques ou coniques) en utilisant une machine-outil appelée tour. Il est caractérisé par deux principaux mouvements [4] :

- **Mouvement de coupe** : La pièce est animé d'une rotation appelé mouvement de coupe, noté M_c , qui constitue le mouvement principal du procédé.
- **Mouvement d'avance** : L'outil effectue un mouvement de translation rectiligne, noté M_a , pouvant être longitudinal (parallèle à l'axe de la pièce) ou transversal (perpendiculaire à l'axe de la pièce) selon l'opération de tournage.

L'outil de coupe en tournage est composé d'une queue, qui représente la partie non-active et d'un corps d'outil comportant une ou plusieurs parties actives qui génèrent les copeaux. L'arête de coupe est délimitée par deux faces : la face de coupe et la face de dépouille (figure 1.1).

Les matériaux de coupe utilisés en tournage sont choisis en fonction du matériau de la pièce. On distingue trois principales familles : Les aciers rapides, les carbures et les céramiques. [5]

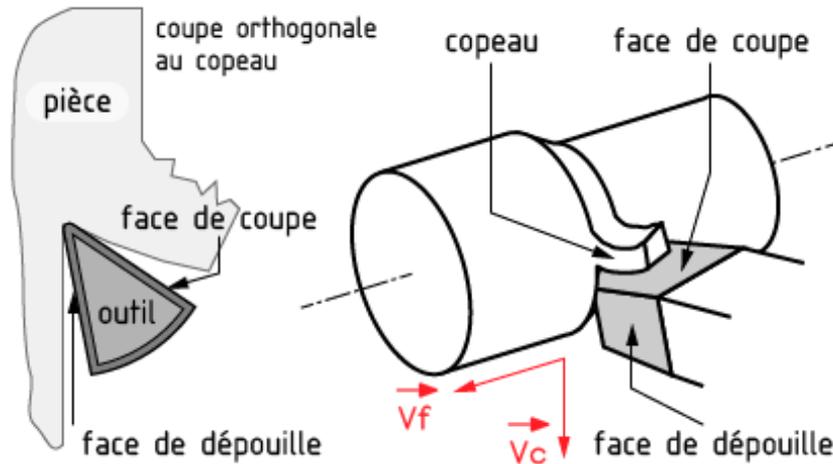


FIGURE 1.1 – Outil de coupe en tournage [6]

En fonction de la géométrie de la pièce à usiner, on peut choisir l'opération de tournage parmi les différentes opérations élémentaires montrées sur la figure 1.2.

- Chariotage : Il s'agit d'une opération de tournage extérieur qui consiste à réduire le diamètre de la pièce. Elle est réalisée au moyen d'un outil à charioter droit ou coudé, dans un plan parallèle à l'axe de révolution.
- Dressage : Il s'agit d'une opération de tournage extérieur vise à réduire la longueur de la pièce. Elle est effectuée par un outil à dresser, dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation.
- Rainurage : Il s'agit d'une opération de forme extérieure permettant de créer des rainures ou des gorges au moyen d'un outil à saigner.
- Perçage : Il s'agit d'une opération de forme intérieure permet de créer un trou au centre de la pièce en utilisant un foret.
- Alésage : Il s'agit d'une opération de tournage intérieure réalisé en utilisant un outil à aléser permettant d'augmenter le diamètre d'un trou préexistant.
- Filetage : Cette opération, pouvant être réalisée bien à l'extérieur qu'à l'intérieure de la pièce, consiste à créer des filets sur sa surface à l'aide d'un outil à fileter.

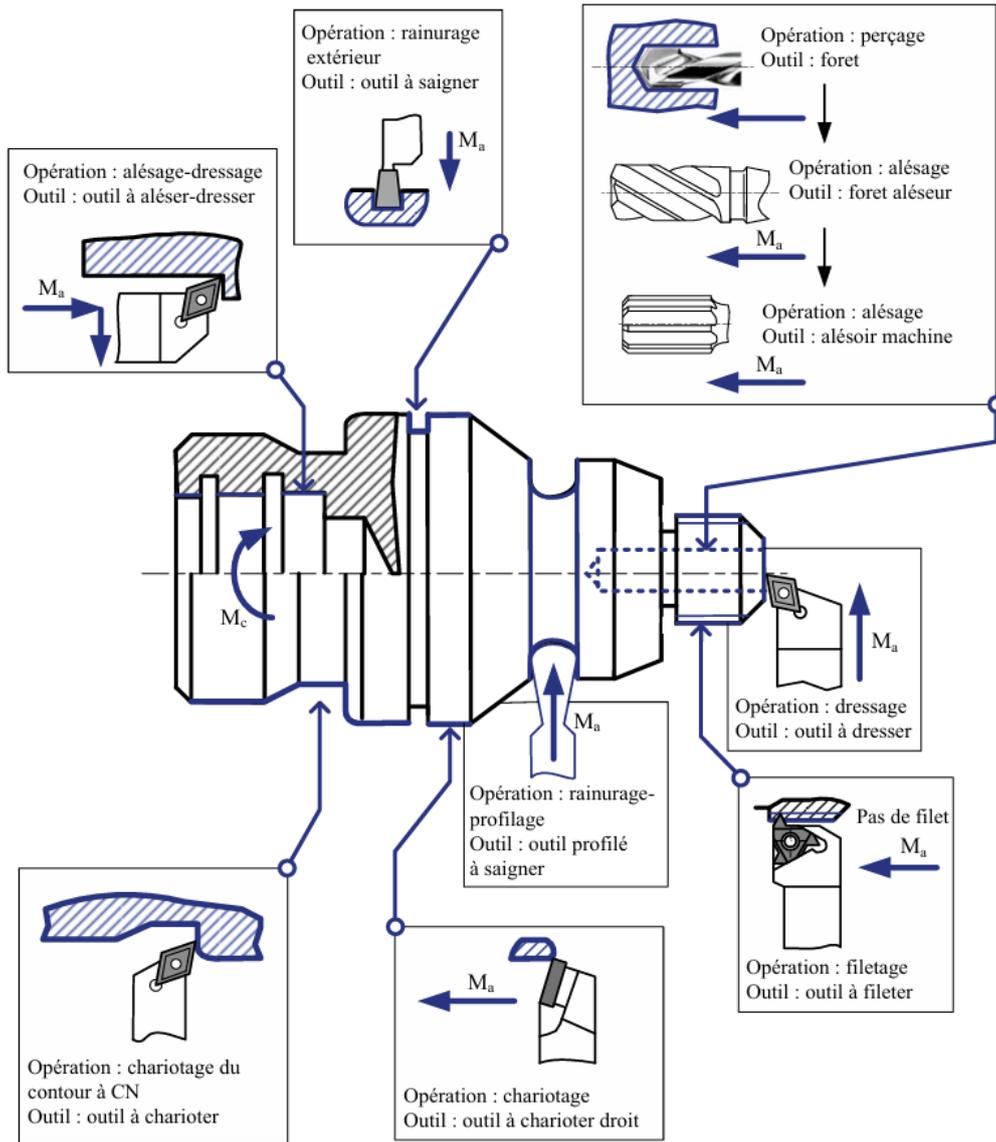


FIGURE 1.2 – Opérations de tournage [4]

1.3.1.2 Fraisage

Le fraisage est un procédé d'usinage permettant de réaliser des pièces prismatiques sur une machine-outil appelée fraiseuse, à l'aide d'une fraise. Il est caractérisé par deux mouvements principaux : le mouvement de coupe M_c et le mouvement d'avance M_a . Dans les fraiseuses conventionnelles, le mouvement de coupe est assuré par l'outil, tandis que le mouvement d'avance est réalisé par la table sur laquelle est montée la pièce. En revanche, sur les fraiseuses à commande numérique, les deux mouvements sont effectués par l'outil-fraise. Ce procédé sera détaillé ultérieurement dans les sections suivantes.

1.3.1.3 Perçage et alésage

Le perçage est une opération d'usinage par coupe permettant de réaliser principalement des trous cylindriques d'un diamètre bien défini, voire coniques dans certains cas, à l'aide d'un outil appelé foret (figure 1.4(a)), généralement en acier rapide supérieur (ARS) ou, dans des cas particuliers, équipé de plaquettes amovibles en carbure. Il s'effectue directement en plein matière, sans pré-trou préalable. La figure 1.3 illustre les différents types de trous pouvant être obtenus. [4]

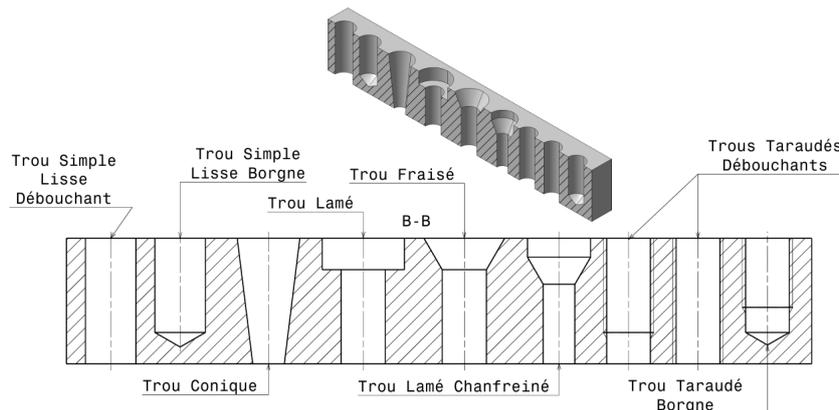


FIGURE 1.3 – Types de trous percés [7]

En perçage, le mouvement de coupe M_c (mouvement principal) est rotatif, tandis que le mouvement d'avance M_a est linéaire. Les mouvements relatifs entre l'outil et la pièce dépendent de la machine utilisée : sur une perceuse, le foret assure à la fois la rotation et l'avance, tandis que sur un tour, il réalise uniquement l'avance, la rotation étant assurée par la pièce. [4]

L'alésage quand à lui, est une opération d'usinage permettant d'améliorer la qualité et la précision d'un trou préalablement percé ou d'en augmenter le diamètre. Il s'effectue en deux étapes : d'abord à l'aide d'un foret aléueur, qui enlève une quantité importante de matière, puis avec un foret alésoir, qui assure la finition en éliminant des couches fines de matériau. L'aléueur est généralement doté de 3 à 4 hélices, tandis que l'alésoir en possède entre 6 et 12, garantissant une meilleure qualité de surface. [4]

La figure 1.4 ci-dessous illustre les différents outils utilisés pour la création des trous.

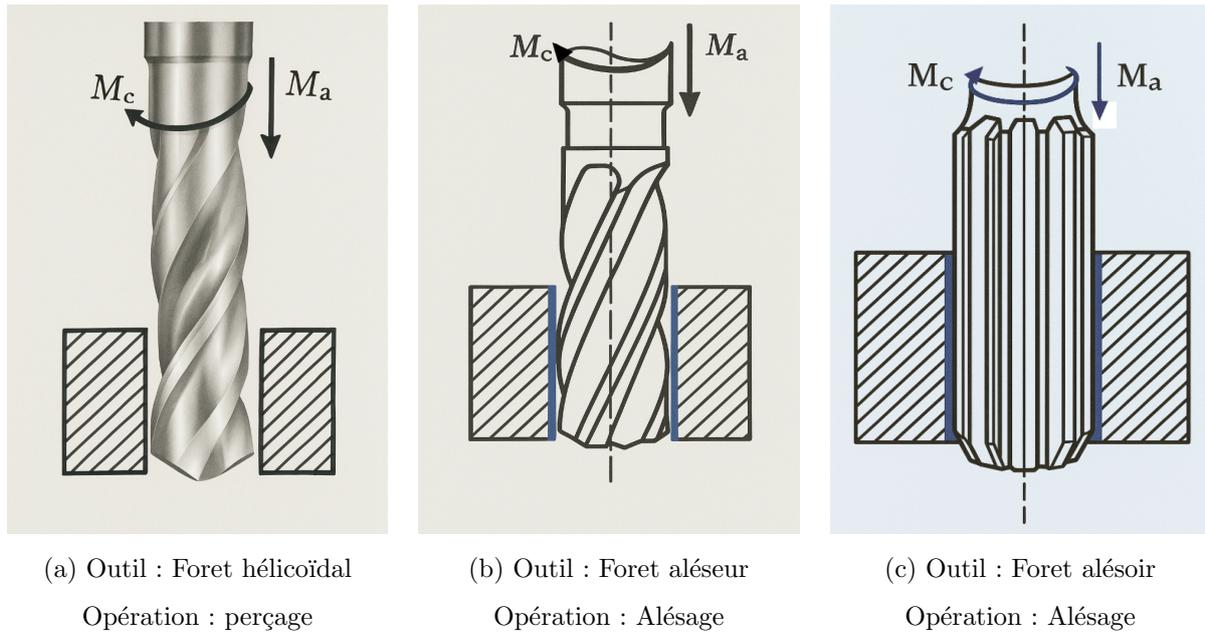


FIGURE 1.4 – Opérations de perçage et d'alésage [4]

1.3.2 Procédés non conventionnels

Apparus après 1945, ces procédés d'usinage se distinguent par l'absence d'intervention mécanique directe de l'outil, à l'exception du jet d'eau abrasif. Ils sont principalement employés pour l'usinage de pièces dont la fabrication est impossible par les méthodes conventionnelles. L'enlèvement de matière repose sur différentes sources d'énergie, permettant ainsi de classer ces procédés en plusieurs catégories, parmi lesquelles [8] :

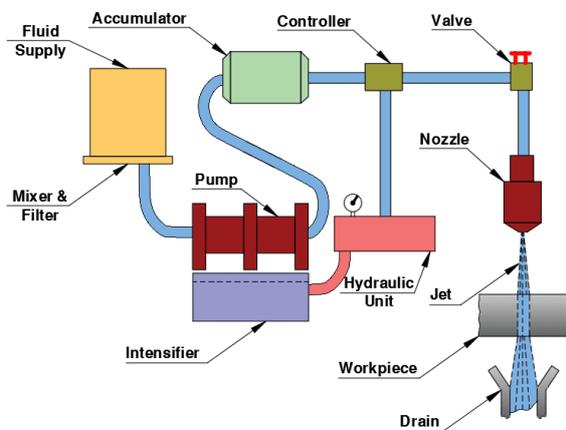
- Usinage mécanique.
- Usinage thermique.
- Usinage électrochimique.
- Usinage chimique.

1.3.2.1 Usinage mécanique

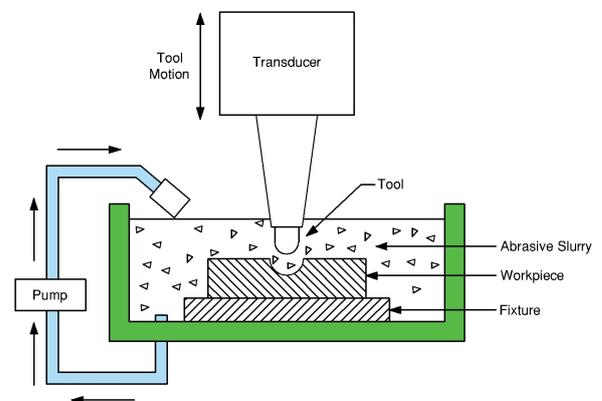
L'usinage mécanique, dans ce contexte, ne doit pas être confondu avec l'usinage traditionnel. Par « mécanique », on entend que la source d'énergie responsable de l'enlèvement de matière est une énergie mécanique. Cette catégorie constitue l'une des principales classes des procédés d'usinage non conventionnels. Elle regroupe plusieurs techniques reposant

sur l'enlèvement de matière mécanique, telles que l'usinage par jet d'eau (WJM), l'usinage par jet d'eau abrasif (AWJM), ainsi que l'usinage ultrasonique (USM). [8]

1. **Usinage par jet d'eau** : L'usinage par jet d'eau à haute pression consiste à projeter un jet d'eau à grande vitesse et pression sur la surface d'un matériau afin d'en assurer la découpe. Généralement automatisé via commande numérique (CNC) ou robotisée pour des raisons de sécurité, ce procédé permet un contrôle précis du mouvement de la buse et garantit une découpe fine avec une faible perte de matière. [1]
2. **Usinage par jet d'eau abrasif** : Ce procédé reprend le principe du jet d'eau à haute pression, auquel sont ajoutées des particules abrasives pour renforcer la capacité de coupe, notamment sur les métaux. Ces particules, projetées à grande vitesse, érodent la surface du matériau et permettent un enlèvement efficace de matière. Le choix du type d'abrasif (garnet, oxyde d'aluminium, carbure de silicium), ainsi que sa granulométrie et ses caractéristiques (forme, dureté), est essentiel pour adapter le procédé au matériau et à l'objectif visé. [9]
3. **Usinage ultrasonique** : Ce procédé repose sur l'action d'un outil vibrant à haute fréquence (15 à 30 kHz) et faible amplitude (25 à 100 microns), appliqué perpendiculairement à la surface de la pièce. L'outil, associé à une suspension abrasive, provoque l'érosion localisée du matériau par micro-impacts successifs des particules abrasives. Il permet de réaliser des formes complexes, notamment des perçages non circulaires ou suivant des axes courbes. [10]



(a) Usinage par jet d'eau à haute pression [11]



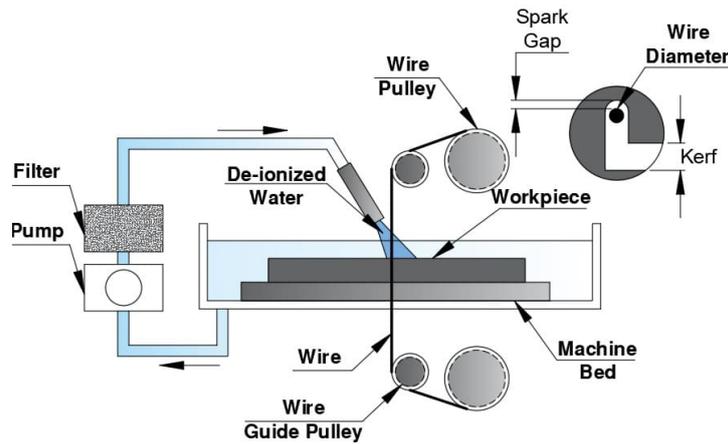
(b) Usinage ultrasonique [12]

FIGURE 1.5 – Procédés d'usinage mécanique non-traditionnel

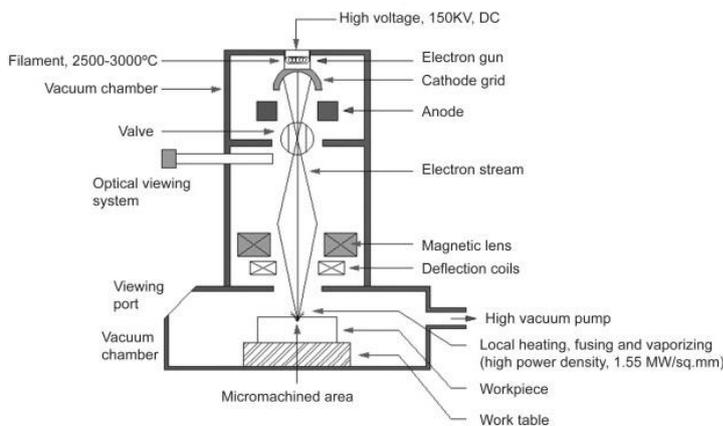
1.3.2.2 Usinage thermique

L'usinage thermique regroupe des procédés dans lesquels l'énergie électrique est convertie en énergie thermique, permettant l'enlèvement de matière par fusion ou vaporisation. Ces techniques sont adaptées à l'usinage de matériaux difficiles, mais peuvent engendrer des effets indésirables comme des altérations de surface ou des déformations. Plusieurs procédés spécifiques relèvent de cette catégorie selon la source et la méthode de génération de chaleur.

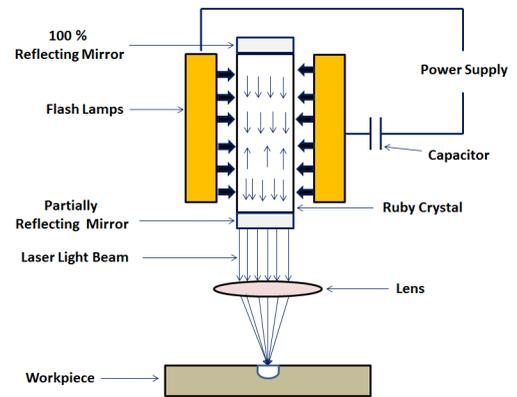
1. **Usinage par électro-érosion** : Le procédé d'usinage par électro-érosion (EDM) repose sur un phénomène thermo-électrique, dans lequel l'énergie électrique est convertie en chaleur pour provoquer la fusion et la vaporisation localisée du matériau. Une série d'étincelles est générée entre l'outil et la pièce, séparés par un faible espace et immergés dans un liquide diélectrique qui évacue les résidus métalliques. Ce procédé exige que les deux éléments soient électriquement conducteurs. [8]
2. **Usinage par électro-érosion à fil** : L'usinage par électro-érosion à fil (WEDM) repose sur le même principe thermo-électrique que l'EDM, mais utilise un fil conducteur – généralement en laiton – comme électrode, alimenté en continu à travers la pièce plongée dans un fluide diélectrique. Des étincelles se forment entre le fil et la pièce, provoquant l'enlèvement de matière. Guidé par commande numérique, le fil permet la découpe de formes complexes avec une grande précision. [8]
3. **Usinage par faisceau d'électrons** : Le procédé d'usinage par faisceau d'électrons (EBM) consiste à concentrer un flux d'électrons à grande vitesse sur la surface de la pièce afin de provoquer l'enlèvement de matière par fusion ou vaporisation. Les électrons, accélérés à environ 75 % de la vitesse de la lumière, sont focalisés à l'aide d'une lentille électromagnétique, permettant une action thermique localisée et précise. [10]
4. **Usinage par faisceau de laser** : L'usinage par faisceau laser (LBM) utilise un rayon laser de haute densité d'énergie pour enlever la matière par fusion, vaporisation ou rupture des liaisons chimiques. Le faisceau est focalisé sur une zone très réduite, et l'énergie absorbée par le matériau entraîne sa transformation, facilitée par un jet de gaz sous pression qui évacue les résidus. Ce procédé sans contact, sans usure d'outil ni contraintes mécaniques, permet de traiter une grande variété de matériaux, métalliques ou non, et s'applique à des opérations telles que la découpe et le perçage. [10]



(a) Usinage par électro-érosion à fil [13]



(b) Usinage par faisceau d'électrons [8]



(c) Usinage par faisceau de laser [10]

FIGURE 1.6 – Procédés d'usinage thermique

1.3.2.3 Usinage électrochimique

L'usinage électrochimique (ECM) est un procédé sans contact basé sur le principe de l'électrolyse, dans lequel la pièce joue le rôle d'anode et l'outil celui de cathode. Un courant continu de faible tension et d'intensité élevée traverse un électrolyte circulant sous pression dans l'espace inter-électrodes, provoquant la dissolution anodique du matériau. L'outil, sans jamais toucher la pièce, façonne la surface par reproduction inverse de sa géométrie. Ce procédé, réservé aux matériaux électriquement conducteurs, permet un enlèvement rapide et précis de matière, sans contrainte thermique ni mécanique, ce qui en fait une solution privilégiée dans les secteurs aéronautique, automobile et médical. [8, 10]

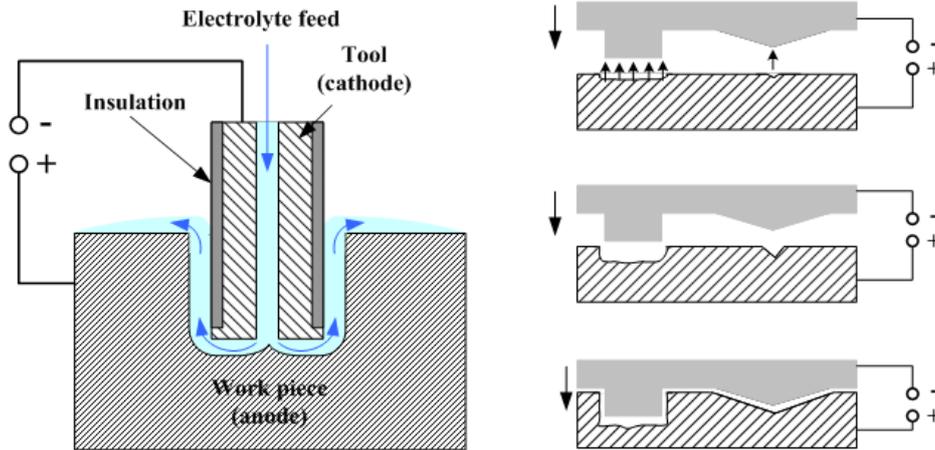


FIGURE 1.7 – Principe de l'usinage électrochimique [14]

1.3.2.4 Usinage chimique

L'usinage chimique (CHM) repose sur l'élimination sélective de matière par attaque chimique à l'aide d'un agent corrosif, appliqué sur des zones non protégées de la pièce. Le procédé suit plusieurs étapes : nettoyage, masquage avec un revêtement résistant, gravure chimique des zones exposées, puis retrait du masque. Différentes variantes existent selon l'application : le fraisage chimique pour réduire l'épaisseur, le découpage pour découper des formes complexes dans des tôles fines, l'usinage photochimique pour les motifs de précision, et la gravure chimique pour graver de plaques. Le procédé offre une bonne qualité de surface sans contrainte mécanique, mais implique des risques liés aux produits chimiques utilisés. [10]

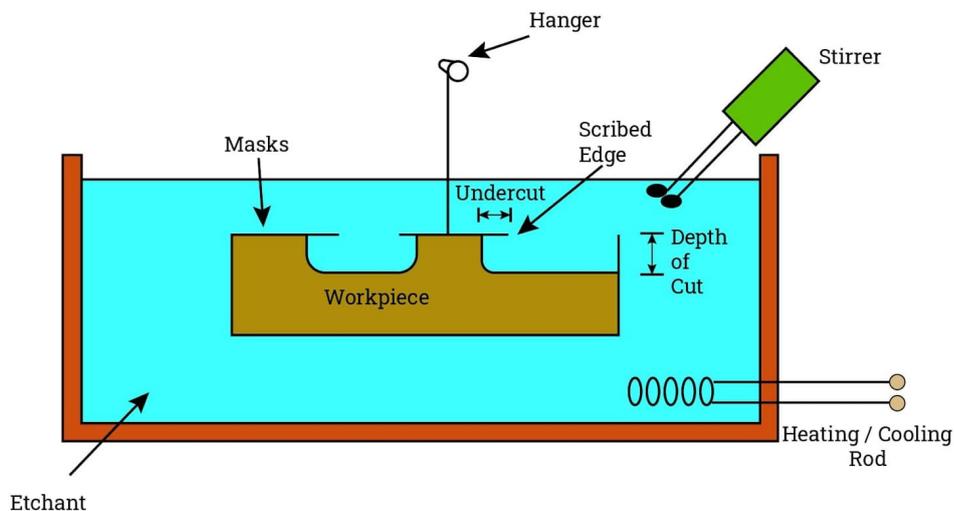


FIGURE 1.8 – Principe de l'usinage chimique [15]

1.4 Le fraisage : procédé clé de l'usinage

Le fraisage est un procédé d'usinage par coupe qui repose sur la combinaison du mouvement de rotation M_c d'un outil à arêtes multiples, et du déplacement rectiligne de la pièce M_a . Dans les configurations modernes, le déplacement relatif entre l'outil et la pièce peut s'effectuer selon des trajectoires complexes dans presque toutes les directions, offrant une grande flexibilité. Le fraisage présente plusieurs avantages, tels qu'un rendement élevé, une bonne qualité de surface, une grande précision, ainsi qu'une capacité à générer des formes variées. Ce procédé permet de réaliser une large gamme d'opérations, en s'appuyant sur une diversité de machines, d'outils et de géométries de pièces.

1.4.1 Types de fraisage

Le fraisage comporte deux types principaux, qui se distinguent selon la position de la fraise par rapport à la pièce à usiner : le fraisage en roulant et le fraisage en bout, comme illustré dans la figure 1.9. Il existe également un troisième type, résultant de la combinaison des deux précédents, appelé fraisage combiné.

1.4.1.1 Fraisage en roulant

Également appelé fraisage de profil, ce type d'usinage se caractérise par un axe de fraise parallèle à la surface à usiner. La surface obtenue résulte d'un travail de forme réalisé par les arêtes latérales de la fraise [16]. Elle peut toutefois présenter des défauts d'ondulation, généralement dus à la flexion de l'outil sous l'effet des efforts de coupe, au faux-rond de la fraise ou encore aux imperfections issues de l'affûtage, notamment dans le cas d'une fraise monobloc en carbure [17].

1.4.1.2 Fraisage en bout

Également appelé fraisage de face, ce procédé se caractérise par un axe de fraise perpendiculaire à la surface à usiner. L'enlèvement de matière s'effectue par les arêtes frontales de la fraise, selon un travail d'enveloppe [16]. La surface obtenue peut présenter des défauts de forme, notamment une concavité, généralement causée par un dépinçage de l'axe de la broche lors de l'usinage [17]. Ce type de fraisage est généralement privilégié lorsqu'une grande précision dimensionnelle de la surface usinée est recherchée.

1.4.1.3 Fraisage combiné

La surface usinée résulte de l'usinage simultané de deux zones : l'une traitée par fraisage de face, l'autre par fraisage de profil. Le choix du mode prédominant dépend de plusieurs facteurs, notamment des possibilités offertes par l'outillage ainsi que de l'accessibilité des surfaces à usiner. [4]

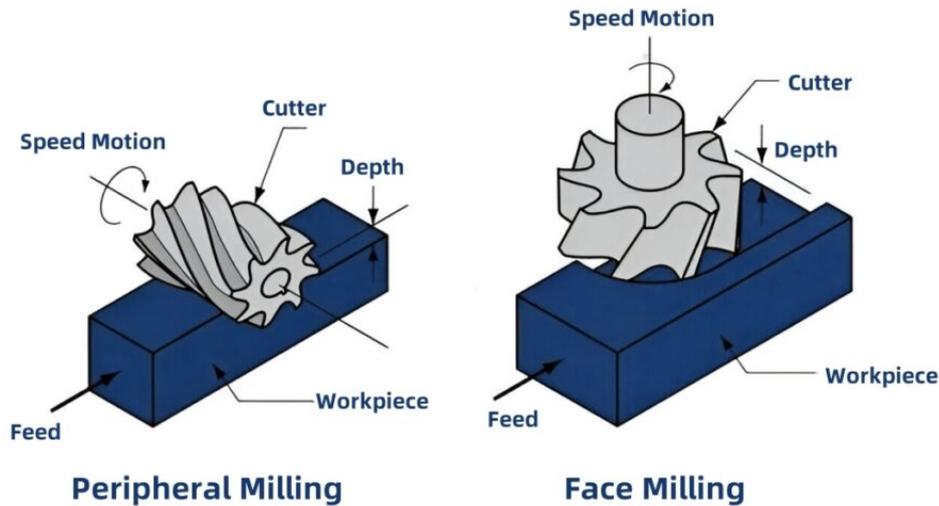


FIGURE 1.9 – Types de fraisage : à gauche le fraisage en roulant et à droite le fraisage en bout [18]

1.4.2 Modes de fraisage

Les modes de fraisage dépendent de la direction du mouvement d'avance par rapport au sens de rotation de l'outil. On distingue principalement deux configurations : le fraisage en avalant et le fraisage en opposition.

1.4.2.1 Fraisage en avalant

Dans le cas du fraisage en avalant (figure 1.10a), l'avance et la rotation de l'outil s'effectuent dans le même sens. Chaque dent engage directement un copeau d'épaisseur maximale, ce qui entraîne des chocs répétés lors de la coupe, susceptibles de provoquer l'écaillage des plaquettes. Les forces de coupe s'exercent vers la table, ce qui tend à plaquer la pièce, favorisant ainsi la stabilité. Toutefois, pour limiter les vibrations, la machine doit être équipée d'un système de rattrapage de jeu, et il est recommandé d'avoir plusieurs dents simultanément en prise. [16, 19]

1.4.2.2 Fraisage en opposition

Dans le cas du fraisage en opposition (figure 1.10b), l'avance de la pièce s'effectue dans le sens opposé à la rotation de l'outil. Chaque dent débute la coupe avec une épaisseur de copeau nulle, ce qui peut provoquer un refus de coupe au début de l'engagement. Ce phénomène entraîne une flexion de la dent, qui peut alors frotter sur la surface au lieu de couper efficacement. Les forces de coupe générées tendent à soulever la pièce hors du montage, ce qui peut nuire à la stabilité de l'usinage. Ce mode est déconseillé pour les matériaux écrouissables et doit être évité sur les machines dépourvues de système de rattrapage de jeu. [16, 19]

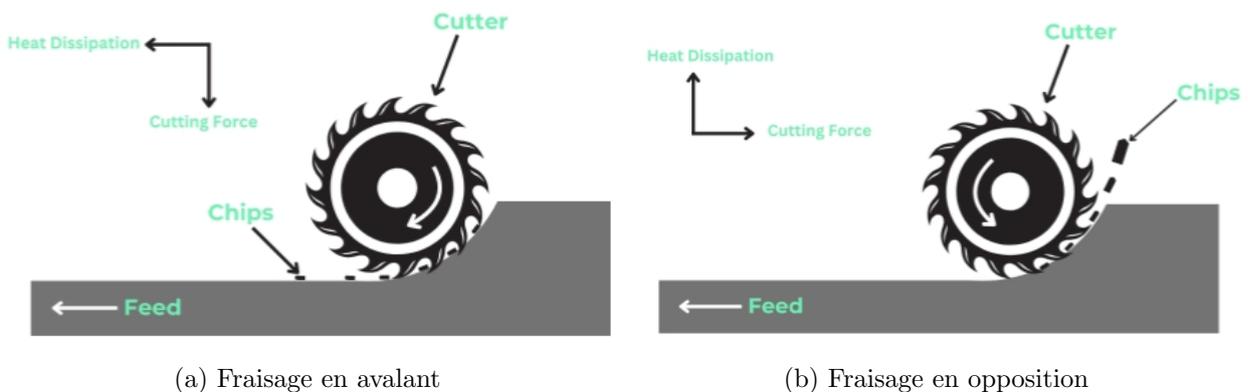


FIGURE 1.10 – Modes de fraisage [18]

1.5 Outils et matériaux de coupe en fraisage

1.5.1 Outils de coupe

En fraisage, l'outil de coupe utilisé est la fraise, un solide de révolution portant plusieurs arêtes coupantes appelées dents, réparties régulièrement sur sa périphérie [4]. Le choix de la fraise à utiliser dépend de l'opération à réaliser ainsi que la géométrie et le matériau de la pièce.

Les fraises se distinguent selon plusieurs critères, notamment leur construction, leur nombre de tailles, leur forme, la forme de leur denture, le nombre de dents et les dimensions ainsi que leur mode de fixation sur la machine.

1.5.1.1 Critère 1 : Construction

Les fraises se différencient par leur construction. On distingue d'abord les fraises monoblocs (figure 1.11a), entièrement fabriquées dans un même matériau, comme l'acier rapide (HSS) ou le carbure; dans ce cas, les dents de coupe font partie intégrante du corps de l'outil. Ensuite, on trouve les fraises à plaquettes amovibles (ou rapportées) (figure 1.11b), généralement en carbure, où des plaquettes de coupe sont fixées par serrage sur le corps de la fraise. Ces inserts peuvent être facilement remplacés lorsqu'ils sont usés, sans devoir changer l'outil complet. Enfin, il existe des fraises à plaquettes brasées (figure 1.11c), dans lesquelles les plaquettes sont fixées de manière permanente sur un corps en acier par un procédé de brasage. Ce type de fraise nécessite un réaffûtage ou un remplacement en cas d'usure. [5, 20]

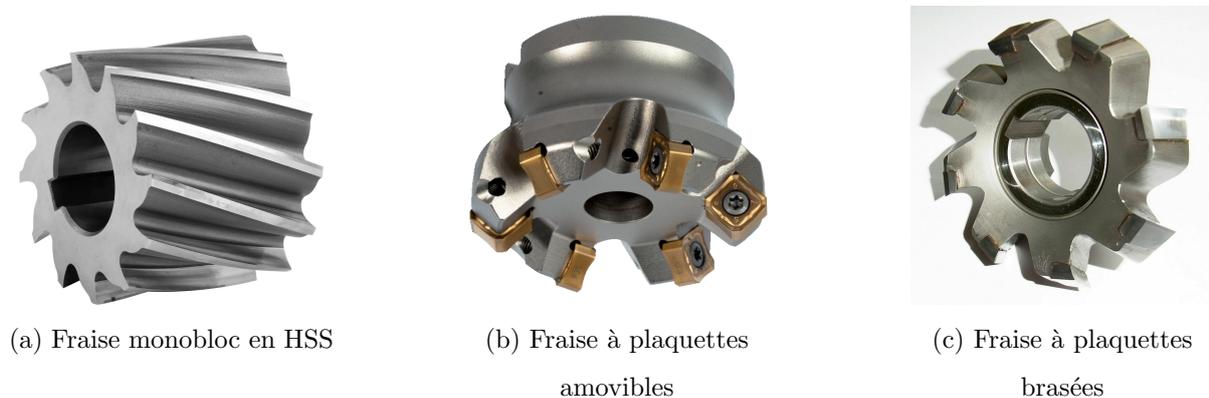


FIGURE 1.11 – Types de fraises selon la construction

1.5.1.2 Critère 2 : Nombre de tailles

Le nombre de tailles correspond au nombre d'arêtes tranchantes présentes sur chaque dent. On distingue ainsi trois types de fraises : à une, deux ou trois tailles. Celles à une taille (figure 1.12a) sont généralement utilisées pour le surfacage ou le rainurage, celles à deux tailles (figure 1.12b) pour le surfacage-dressage, et celles à trois tailles (figure 1.12c) principalement pour le rainurage. [5]

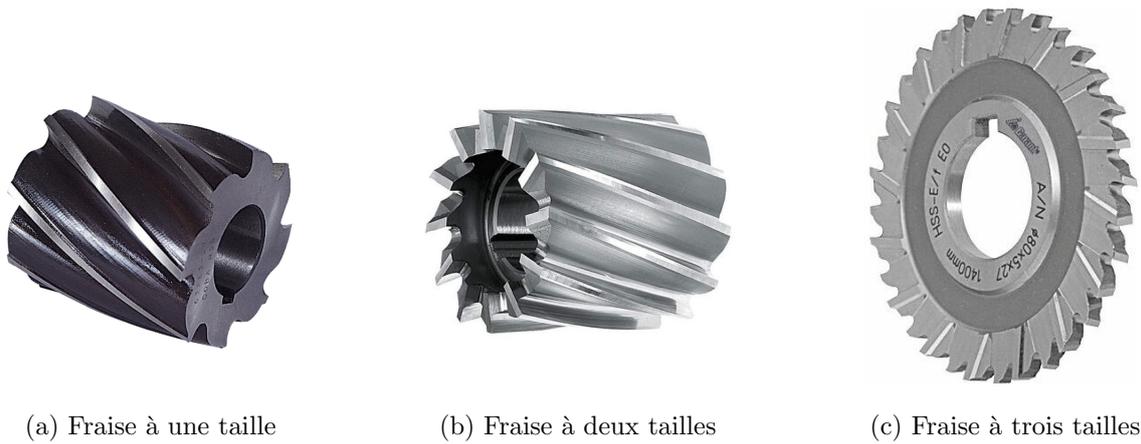


FIGURE 1.12 – Types de fraises selon le nombre de taille

1.5.1.3 Critère 3 : Forme

La forme d'une fraise est déterminée par le profil des génératrices par rapport à l'axe de l'outil. Les principales catégories sont les fraises cylindriques (figure 1.13a), coniques (figure 1.13b) et de forme (figure 1.13c), cette classification étant basée sur la forme géométrique de la partie active. [4]



FIGURE 1.13 – Types de fraises selon la forme

1.5.1.4 Critère 4 : Denture

La denture est définie en fonction de l'inclinaison des arêtes coupantes par rapport à l'axe de la fraise. Plusieurs types existent : denture droite (figure 1.14a), denture hélicoïdale à droite (figure 1.14b) ou à gauche et denture à double hélice alternée. Pour les fraises hélicoïdales, le sens de rotation doit impérativement correspondre à celui des arêtes coupantes, afin de garantir une coupe efficace et éviter tout dysfonctionnement. [20]

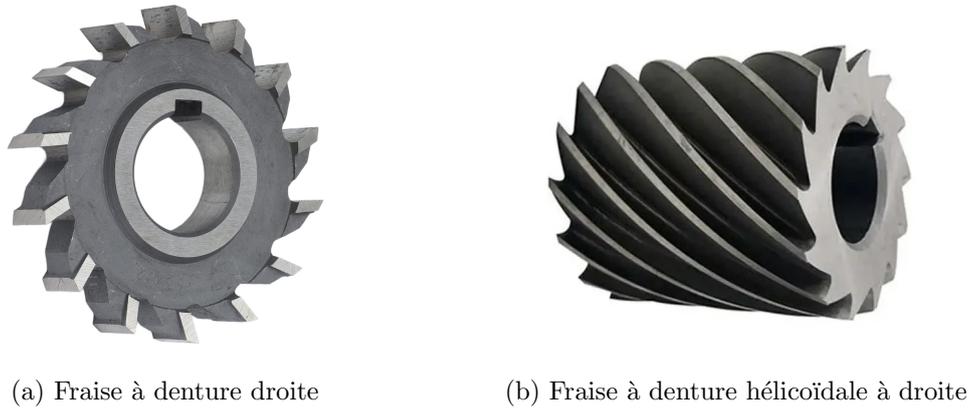


FIGURE 1.14 – Types de fraises selon la denture

1.5.1.5 Critère 5 : Nombre de dents et dimensions

Le nombre de dents varie d'une fraise à une autre, et commence généralement à partir de deux. Les dimensions caractéristiques dépendent du nombre de tailles et de la forme de la fraise.

Par exemple, pour une fraise à deux tailles, les dimensions couramment spécifiées sont le diamètre extérieur, la hauteur taillée et le diamètre de l'alésage. Pour une fraise à trois tailles, on précise généralement le diamètre extérieur, l'épaisseur et le diamètre de l'alésage. Dans le cas des fraises coniques pour queue d'aronde, les dimensions principales sont le diamètre extérieur et l'épaisseur. [5, 20]

1.5.1.6 Critère 6 : Mode de fixation

Les fraises se distinguent également par leurs modes de montage sur l'organe porte-outil de la fraiseuse, appelé broche (élément rotatif principal d'une machine-outil, chargé de transmettre la rotation à l'outil de coupe avec précision et rigidité). Dans tous les cas, la fraise est montée à l'extrémité de la broche. On distingue plusieurs configurations [20] :

- Les fraises à trou (alésé lisse ou taraudé), qui sont montées à l'aide d'un mandrin intermédiaire, comme celui illustré dans la figure 1.15a, conforme au nez de la broche et à l'évidement de la fraise.
- Les fraises à queue (cylindrique ou conique), qui sont fixées par emmanchement direct dans la broche. Des douilles intermédiaires ou des adaptateurs, comme celui illustré dans la figure 1.15b, sont utilisés. Il est nécessaire d'utiliser une seule douille, dont l'extérieur est conforme au nez de la broche et l'intérieur conforme à la queue de la fraise.

- Le montage sur arbre porte-fraise utilise des arbres, comme celui illustré dans la figure 1.15c, conçus pour une utilisation sur des machines à fraiser horizontales. Ces arbres sont capables de supporter simultanément des contraintes de flexion et de torsion, et sont fabriqués en acier au chrome-nickel, traité thermiquement et rectifié, avec des longueurs allant jusqu'à environ 600 mm.



FIGURE 1.15 – Organes intermédiaires entre la fraise et la broche

1.5.2 Matériaux de coupe

1. **Les aciers rapides HSS** : Ce sont des aciers fortement alliés contenant environ 0.7% de carbone et 4% de chrome et de vanadium ainsi que des proportions variables de molybdène et de cobalt [5]. Ils ont la propriété de pouvoir acquérir, après trempe, une dureté très élevée de 65 à 70 HRC, et de la conserver jusqu'à une température de l'ordre de 600 °C [17], ce qui permet de les utiliser dans la fabrication des outils monoblocs (fraises, alésoirs, etc) et des mises rapportées (outils de tournage, rabotage, etc).
2. **Les carbures** : Ils sont utilisés lorsque les vitesses de coupe sont élevées et que les profondeurs de passe sont importantes, sous forme de plaquettes fixes ou amovibles. Obtenus par frittage, ils sont composés de tungstène, de titane ou de bore, auxquels est ajouté un liant, généralement du cobalt. Leur dureté peut atteindre 80 HRC jusqu'à une température de 1000 °C, ce qui les rend plus fragiles que les HSS. Selon la norme NF E 66-304 [5], ils sont classés en trois catégories : P, M et K selon le domaine d'application.

Les plaquettes en carbure sont souvent revêtues par des procédés physiques (PVD) ou chimiques (CVD) afin d'améliorer leur résistance. Les revêtements CVD sont généralement composés de couches successives de TiC, TiN, TiCN ou Al₂O₃, offrant une bonne résistance thermique et à l'usure, adaptés aux fortes sollicitations. Les revêtements

PVD, plus fins, sont souvent constitués de $TiAlN$, TiN , ou $AlCrN$, assurant une bonne dureté de surface et convenant aux opérations de finition. [4]

3. **Le céramiques** : Existantes sous forme frittée, les céramiques sont utilisées pour l'usinage des matériaux extrêmement durs (elles conviennent aux matériaux ferreux, mais ne sont pas adaptées aux alliages légers ni aux alliages de titane) grâce à leur grande dureté proche de celles des carbures. Elles conservent leurs performances jusqu'à 1200 °C, avec des conditions de coupe très élevées [5]. Elles résistent bien à l'usure mais mal aux chocs. Il existe deux grandes familles de céramiques [17] :

- Les céramiques à base d'alumine sous deux aspects : les céramiques pures de couleur blanche composées d'oxyde d'aluminium et d'autres oxydes métalliques, et les céramiques mixtes de couleur grise composées d'oxydes d'aluminium et de carbures métalliques.
- Les céramiques à base de nitrure de silicium : ce sont des matériaux nouveaux, les plus connus sont étant les sialons. Elles sont de couleur noire, composées de nitrure de silicium et d'oxydes métalliques.

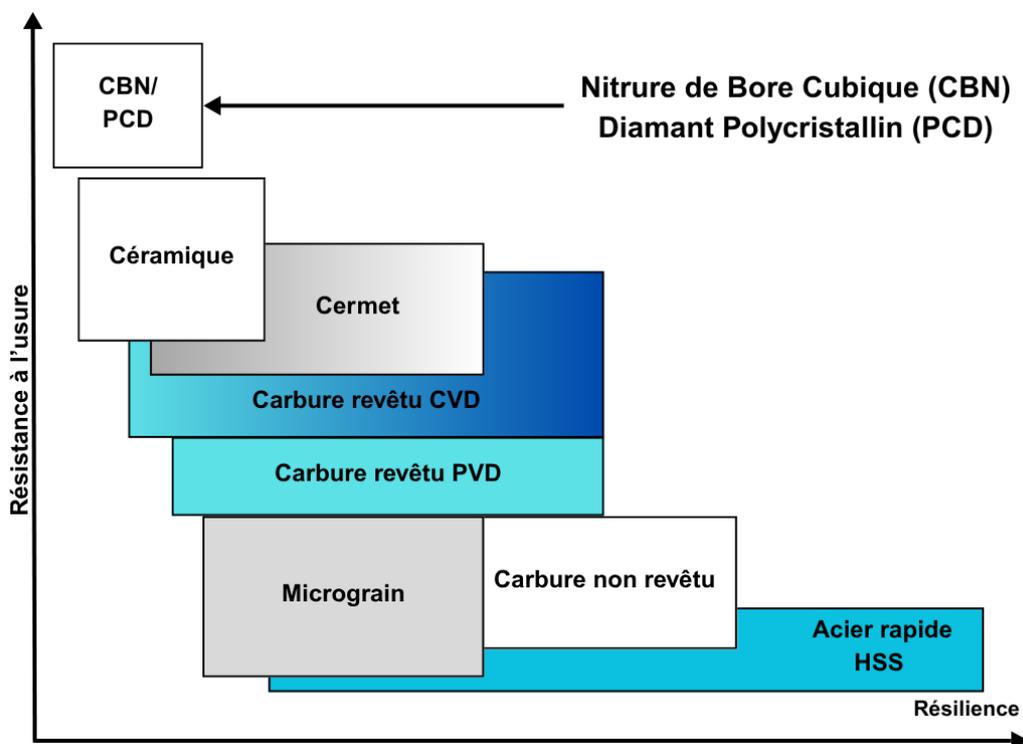


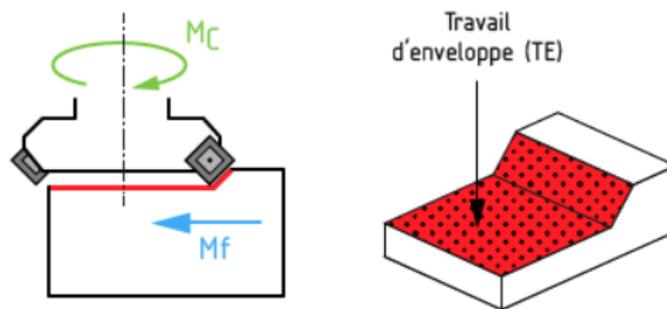
FIGURE 1.16 – Résistance à l'usure des différents matériaux de coupe en fonction de la résilience [17]

1.6 Opérations principales de fraisage

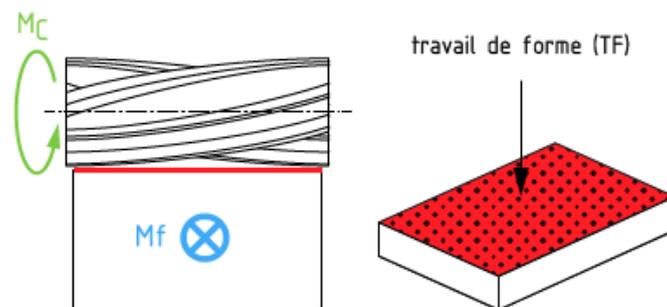
Le fraisage est connu par la variété de ces opérations, dont on a cinq opérations principales qui sont : le surfacage, le contournage, le fraisage d'épaulement, le rainurage et le profilage.

1.6.1 Surfaçage

Le surfacage est une opération qui consiste à usiner une surface plane. L'outil utilisé peut être une fraise à surfacer ou une fraise cylindrique à une ou à deux tailles. Lors de cette opération, l'outil est engagé à au moins 50% de son diamètre (D), ce qui permet de générer une surface usinée avec une profondeur de coupe radiale (a_e) élevée, et une profondeur de coupe axiale (a_p) faible. [21]



(a) Surfaçage avec une fraise à surfacer à plaquettes amovibles



(b) Surfaçage avec une fraise à deux tailles

FIGURE 1.17 – Opération de surfacage [6]

Le surfacage est fréquemment utilisé comme opération de base pour préparer une surface de référence avant d'autres usinages plus complexes. Il permet d'obtenir une bonne planéité ainsi qu'un état de surface représentatif, dont la qualité dépend fortement des pa-

ramètres de coupe appliqués. Ces caractéristiques en font une opération particulièrement adaptée aux études sur l'influence des conditions de coupe. C'est dans ce contexte que le surfacage a été retenu comme opération d'usinage pour l'étude expérimentale présentée dans ce travail.

1.6.2 Contournage

Le contournage est une opération qui consiste à usiner le périmètre extérieur d'une pièce afin de lui donner une forme définie. Il est généralement réalisé à l'aide d'une fraise cylindrique à une ou à deux tailles. Dans ce type d'usinage, l'outil travaille avec une profondeur de coupe radiale (a_e) faible, et une profondeur de coupe axiale (a_p) élevée, ce qui permet de suivre le profil extérieur avec précision tout en limitant les efforts latéraux. [17]

1.6.3 Fraisage d'épaulement

Le fraisage d'épaulement est une opération de fraisage qui consiste à usiner deux surfaces planes perpendiculaires entre elles, formant un angle droit net entre une surface verticale et une surface horizontale. Cette opération est généralement effectuée à l'aide d'une fraise cylindrique à deux tailles à denture lisse ou brie copeaux, dont la coupe se fait principalement par les flancs, avec une profondeur de passe axiale (a_p) élevée et une profondeur de passe radiale (a_e) réduite, ce qui assure une bonne précision géométrique au niveau de l'angle formé. [6, 17]

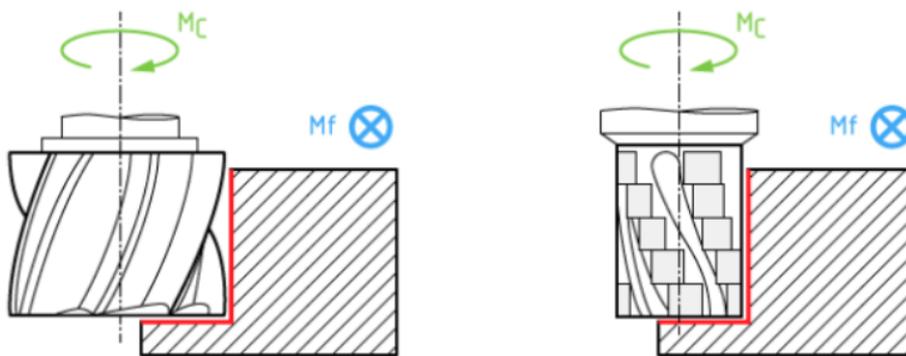


FIGURE 1.18 – Opération de fraisage d'épaulement [6]

1.6.4 Rainurage

Le rainurage est une opération de fraisage qui consiste à usiner trois surfaces orthogonales entre elles afin de créer une rainure. Cette opération peut être réalisée à l'aide d'une

fraise à deux ou trois tailles, en acier rapide (HSS) ou en carbure, selon la forme et les dimensions de la rainure à produire [21]. Les rainures peuvent être droites, de forme (comme les rainures en U ou en T), ou destinées à loger des clavettes [6]. Lors de cette opération, l'outil est pleinement engagé, c'est-à-dire que la profondeur de passe radiale (a_e) est égale au diamètre de la fraise (D), tandis que la profondeur de passe axiale (a_p) est généralement comprise entre 1 et 1.5 fois ce diamètre [17].

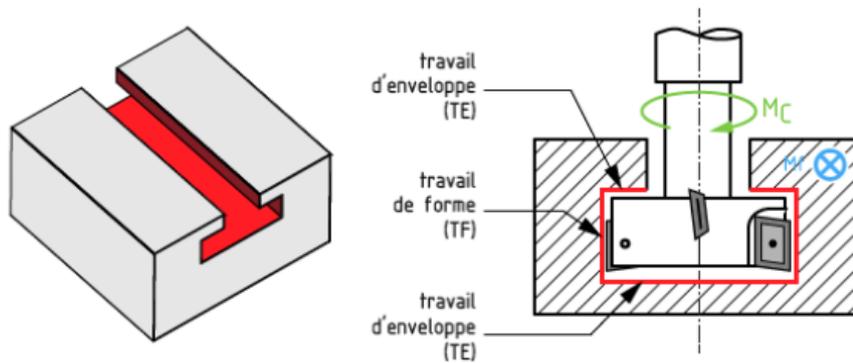


FIGURE 1.19 – Opération de rainurage en T [6]

1.6.5 Profilage

Le profilage regroupe l'ensemble des opérations de fraisage destinées à réaliser des formes complexes sur une pièce, obtenues par le travail de forme de la denture latérale de la fraise. Selon la géométrie recherchée, il existe différents types de profils : ceux composés de lignes droites, de lignes courbes, ou encore des profils particuliers nécessitant l'utilisation de fraises spéciales. [6]

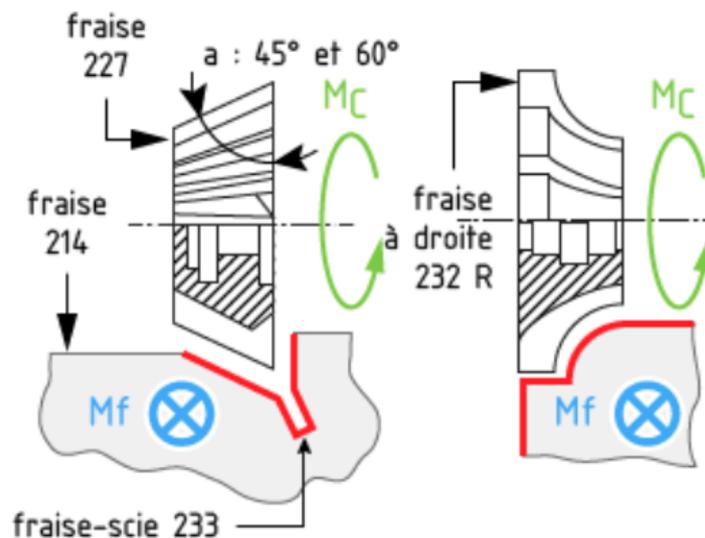


FIGURE 1.20 – Opération de profilage [6]

1.7 Machines-outils utilisés en fraisage

Au fil du temps, le fraisage a connu une évolution rapide, portée par les avancées constantes dans le domaine des machines-outils, appelées fraiseuses. Celles-ci se déclinent en plusieurs types, selon la technologie employée. La classification suivante distingue les principales catégories de fraiseuses, en les regroupant entre modèles conventionnels et machines à commande numérique.

1.7.1 Fraiseuses horizontales

Ces sont des fraiseuses conventionnelles dotées d'une broche horizontale parallèle à la table (figure 1.21), elles sont utilisées pour les opérations lourdes de surfacage ou de rainurage. L'outil est généralement monté sur un arbre porte-fraise. Ce type est bien adapté aux pièces longues ou à usiner plusieurs faces en une seule passe. [20]



FIGURE 1.21 – Fraiseuse horizontale

1.7.2 Fraiseuses verticales

Ce type de fraiseuses conventionnelles est caractérisée par une broche verticale perpendiculaire à la table (figure 1.22). Elle est plus polyvalente que la fraiseuse horizontale, notamment pour le perçage, le surfacage et l'usinage de formes diverses. C'est le type le plus répandu des fraiseuses dans les ateliers. [5]



FIGURE 1.22 – Fraiseuse verticale

1.7.3 Fraiseuses universelles

Ce type de fraiseuses combine les fonctions des fraiseuses horizontales et verticales grâce à une tête de fraisage orientable (figure 1.23). Elle permet des usinages complexes sous plusieurs angles et s'adapte aux travaux variés, ce qui en fait une machine très flexible.

[5]



FIGURE 1.23 – Fraiseuse universelle

1.7.4 Fraiseuses à commande numérique 3 axes

Les fraiseuses à commande numérique 3 axes réalisent des déplacements interpolés sur les axes linéaires X, Y et Z, permettant l'usinage de surfaces planes ou légèrement courbées. L'orientation de l'outil reste constante tout au long de la trajectoire, ce qui signifie que l'axe de la fraise est toujours perpendiculaire au plan de coupe défini initialement. [22]

Ce type de configuration est bien adapté à l'usinage de formes simples ou de surfaces gauches de convexité régulière. Cependant, en raison de l'absence de mouvement angulaire, les conditions de coupe en bout d'outil sont rarement optimales, notamment lors de l'usinage de cavités profondes ou de zones inclinées. Les fraiseuses à commande numérique 3 axes sont souvent utilisées pour des opérations standards, nécessitant une bonne précision sans complexité géométrique élevée.

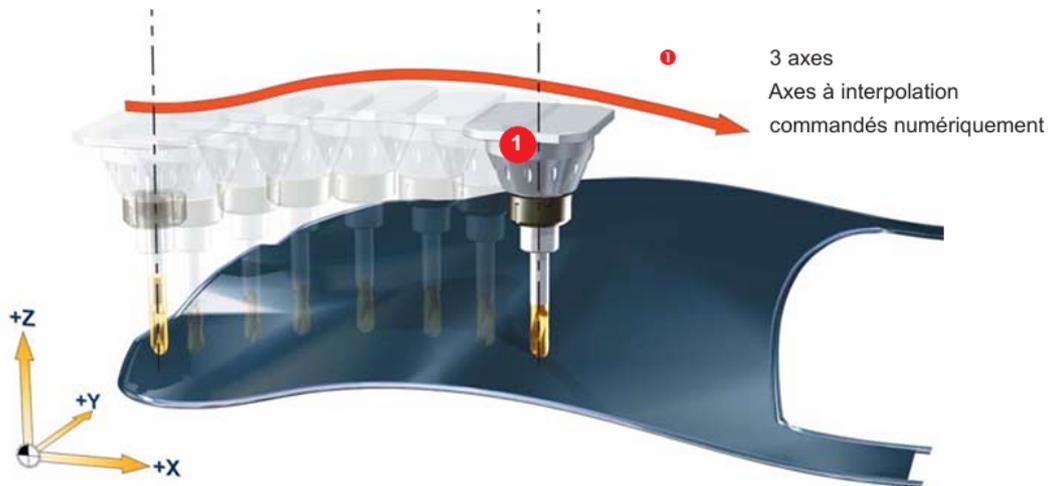


FIGURE 1.24 – Directions de déplacement de l'outil en fraisage CNC 3 axes [22]

1.7.5 Fraiseuses à commande numérique 3 + 2 axes

Les fraiseuses CNC 3 + 2 axes combinent trois axes linéaires interpolés (X, Y et Z) et deux axes rotatifs (A, C ou similaires), orientables manuellement ou indexables entre les passes. L'orientation de l'outil peut être modifiée entre les opérations pour accéder à différentes faces, mais reste fixe pendant l'usinage. [22]

1.7.6 Fraiseuses à commande numérique 5 axes

Les fraiseuses CNC 5 axes permettent l'interpolation simultanée des trois axes linéaires (X, Y, Z) et de deux axes rotatifs (A, B ou A, C). Cette configuration permet d'ajuster

dynamiquement l'orientation de l'outil pendant toute la trajectoire d'usinage, ce qui assure des conditions de coupe optimales en tout point. [22]

Elle est indispensable pour l'usinage de formes complexes, de surfaces gauches à courbure multiple ou de cavités profondes difficilement accessibles. L'avantage majeur de ce type de fraiseuse réside dans sa capacité à usiner des pièces en une seule prise, réduisant ainsi le temps de fabrication et les erreurs de repositionnement. [17]

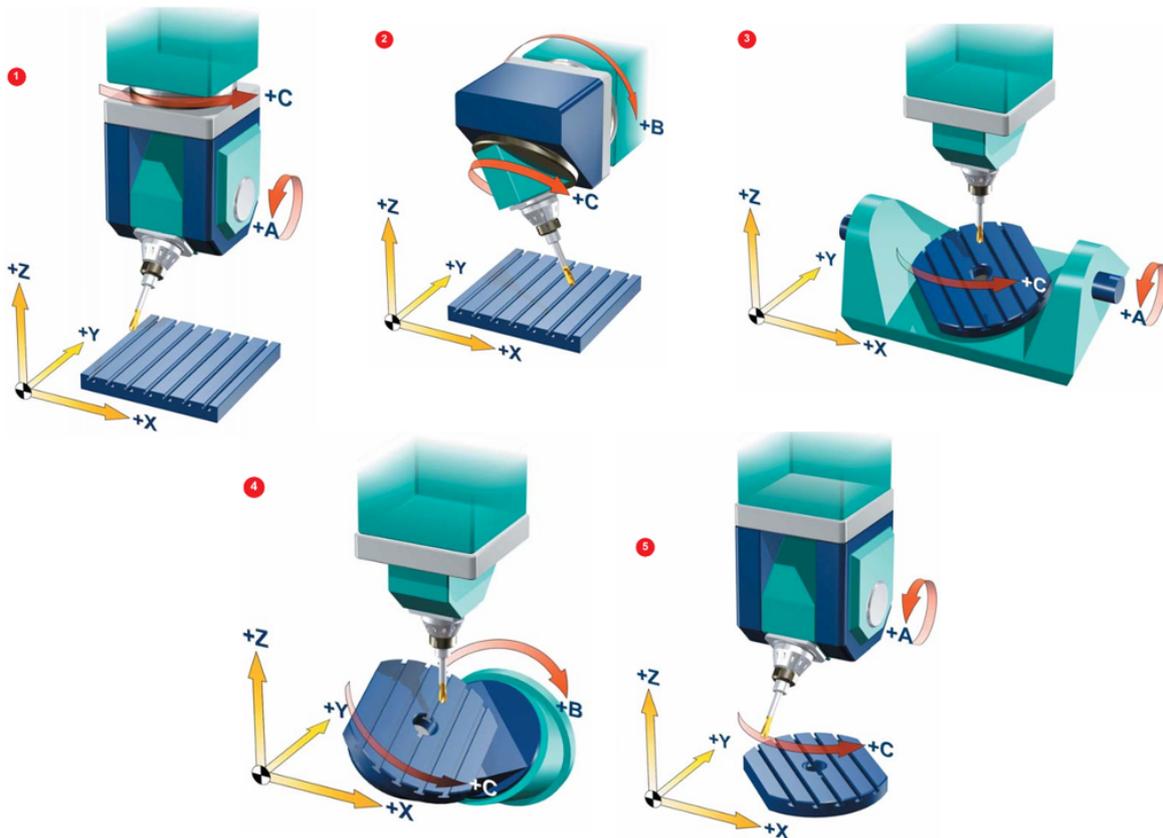


FIGURE 1.25 – Mouvements du couple outil-pièce dans le fraisage CNC 5 axes [22]

1.7.7 Centres d'usinage à commande numérique

Les centres d'usinage à commande numérique sont des fraiseuses CNC dotées de dispositifs automatisés tels qu'un magasin d'outils, un changeur automatique (ATC), et parfois un système de palettisation. Ils peuvent fonctionner selon une configuration 3 axes, 3 + 2 axes ou 5 axes continus. Leur principale caractéristique réside dans leur haut degré d'autonomie et leur fort rendement, ce qui en fait une solution privilégiée pour la production en série et les environnements industriels à cadence élevée. [17]

1.8 Paramètres principaux en fraisage

1.8.1 Fréquence de rotation

La fréquence ou la vitesse de rotation N de la broche en (tr/min) est le nombre de tours que l'outil de fraisage monté sur la broche de la machine-outil, effectue par minute. Il s'agit là d'une valeur dépendant de la machine, qui ne renseigne guère sur ce qui se passe à la périphérie où l'arête de coupe fait son office. [16]

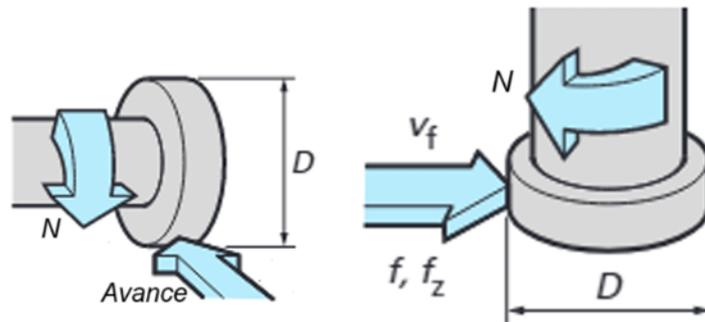


FIGURE 1.26 – Mouvement de coupe de la fraise avec les paramètres principaux [16]

1.8.2 Vitesse de coupe

La vitesse de coupe V_c en (m/min) représente l'espace parcouru (en mètres) par l'extrémité d'une dent de l'outil en une minute. C'est un important paramètre, qui fait partie intégrante des conditions de coupe. [20]

Ce paramètre exerce une influence directe sur la durée de vie des outils. Sa valeur dépend de plusieurs facteurs : le type de matériau à usiner et celui de l'outil, la nature de l'opération (ébauche ou finition) ainsi que les conditions de lubrification, qu'il s'agisse d'un usinage à sec ou lubrifié [6]. Pour guider le choix de cette valeur, les vitesses de coupe usuelles sont généralement établies en fonction de la matière à usiner et du matériau de l'outil, et sont disponibles dans des abaques normalisés ou dans les catalogues publiés par les fabricants d'outils.

La vitesse de coupe se calcule par la formule suivante :

$$V_c = \frac{\pi \times D \times N}{1000} \quad (1.1)$$

Où :

- V_c est la vitesse de coupe en (m/min).
- N est la fréquence de rotation en (tr/min).
- D est le diamètre de la fraise en (mm).

La fréquence de rotation sera calculée donc par la formule suivante :

$$N = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times D} \quad (1.2)$$

1.8.3 Avance par dent

L'avance par dent f_z en (mm/dent) indique la distance linéaire parcourue par la pièce (fraisage conventionnel) ou par l'outil (fraisage à commande numérique) alors qu'une certaine dent est engagée.

Elle représente aussi la distance couverte entre la pénétration de deux dents successives dans la pièce. Elle peut donc exprimée en fonction du nombre de dents de l'outil Z et la vitesse d'avance V_f . [16]

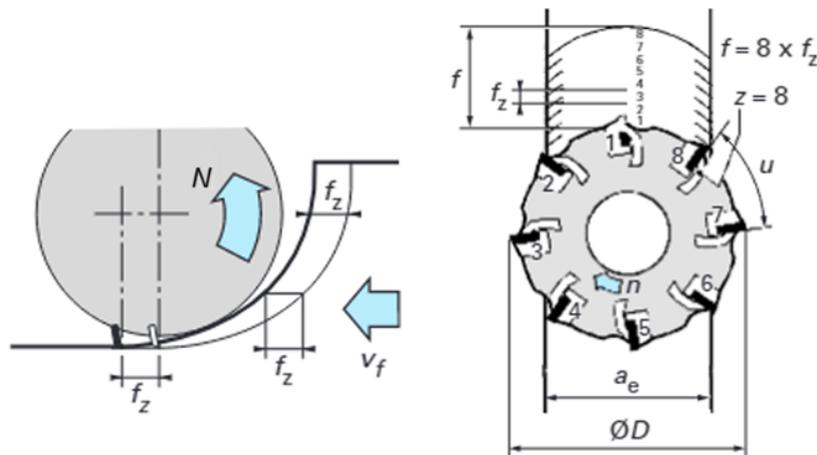


FIGURE 1.27 – Mouvement d'avance avec les paramètres principaux [16]

1.8.4 Vitesse d'avance

La vitesse d'avance V_f en (mm/min) est la translation (l'avance) de la pièce ou l'outil (selon la machine utilisée) exprimée en unité de temps. [20]

Elle peut être calculée en fonction de la fréquence de rotation N , le nombre de dents de

la fraise Z et l'avance par dent f_z par la relation suivante :

$$V_f = N \times Z \times f_z \quad (1.3)$$

1.8.5 Profondeur de coupe axiale

La profondeur de coupe axiale a_p en (mm), également appelée, profondeur de passe, correspond à l'épaisseur de matière enlevée par l'outil. C'est la distance à laquelle l'outil est réglé au-dessous de la surface initiale de la pièce. [5]

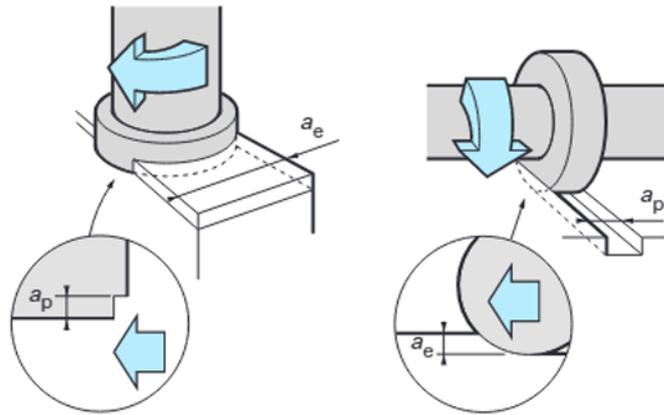


FIGURE 1.28 – Représentation de la profondeur de coupe axiale a_p et le profondeur de coupe radiale a_e [16]

1.8.6 Profondeur de coupe radiale

La profondeur de coupe radiale a_e (en mm), également appelée largeur de passe, correspond à la quantité de matière engagée latéralement par l'outil dans la pièce. Elle représente la dimension de l'engagement de l'outil dans le plan horizontal, perpendiculairement à l'axe d'avance. [16]

Cette grandeur est particulièrement déterminante dans les opérations de fraisage, car elle influe directement sur les efforts de coupe, la génération de chaleur et la durée de vie de l'outil.

1.8.7 Débit copeaux

Le débit copeaux Q en (cm^3/min) est le volume de matière enlevée par unité de temps. Ce paramètre correspond à la profondeur de coupe multipliée par la largeur de coupe, multipliées par la vitesse d'avance. Il peut donc être calculé par :

$$Q = \frac{a_p \times a_e \times V_f}{1000} \quad (1.4)$$

1.8.8 Épaisseur moyenne de copeaux

L'épaisseur moyenne de copeaux h_m peut être déterminée à l'aide de différentes formules, chacune correspondant à un cas spécifique de fraisage. [17]

- Si $a_e/D \leq 0.3$, alors :

$$h_m = f_z \times \sqrt{\frac{a_e}{D}} \quad (1.5)$$

- Si $a_e/D \geq 0.3$, alors :

$$h_m = \frac{\sin(K_r) \times 180 \times a_e \times f_z}{\pi \times D \times [90 - \arcsin(1 - 2 \times a_e/D)]} \quad (1.6)$$

Où K_r est l'angle principale de coupe qui représente à l'angle entre l'arête de coupe principale de l'outil et la direction d'avance.

1.9 Caractérisation de la coupe en fraisage

1.9.1 Mécanisme de formation de copeaux

La coupe est un processus thermomécanique complexe faisant intervenir simultanément des sollicitations mécaniques, des déformations élasto-visco-plastiques, des frottements aux interfaces ainsi que des phénomènes thermiques générés et dissipés lors de l'usinage. Le processus de formation de copeaux repose essentiellement sur le cisaillement du matériau et s'organise autour de trois zones principales, illustrées dans la figure 1.29. [23]

- La première, dite zone de cisaillement primaire, se situe en amont de l'arête de coupe et se caractérise par une forte déformation plastique induite par l'échauffement du matériau sous l'effet de la pénétration de l'outil.
- La deuxième, la zone de cisaillement secondaire, se développe à l'interface entre l'outil et le copeau ; elle est responsable de phénomènes d'usure, notamment en cratère, en raison des contraintes de frottement et de l'érouissage localisé.

- La troisième, la zone de cisaillement tertiaire se trouve au contact entre la face de dépouille de l'outil et la surface usinée, où naît l'usure en dépouille, liée au retour élastique du matériau après le passage de l'outil.

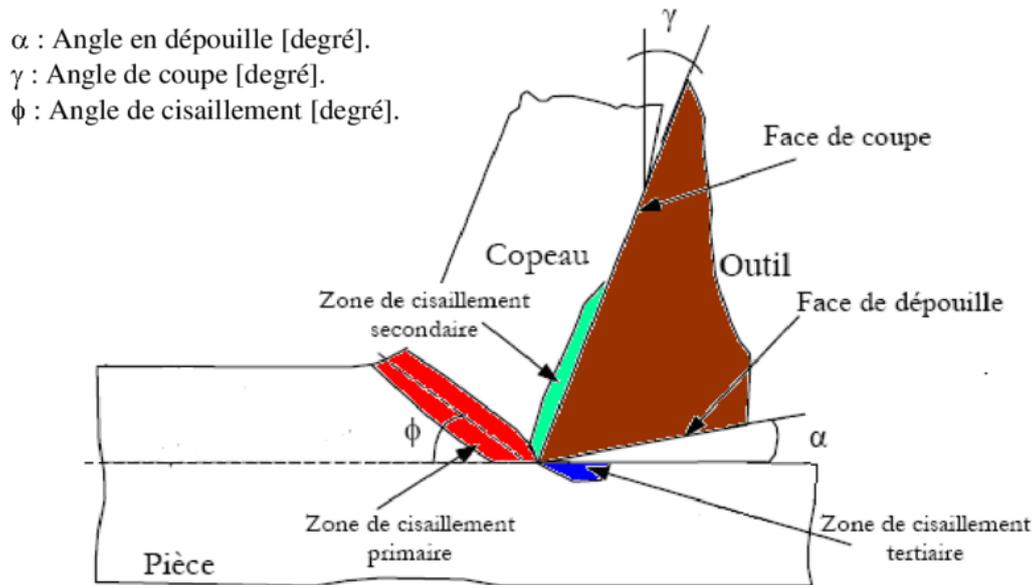


FIGURE 1.29 – Mécanisme de formation de copeaux [23]

La coupe orthogonale constitue un cas d'école en deux dimensions, largement utilisé pour poser les bases de la compréhension de ces mécanismes. C'est pourquoi la figure 1.29 adopte cette représentation simplifiée. En pratique, les procédés industriels mettent en jeu la coupe oblique, qui est l'extension tridimensionnelle de la coupe orthogonale. C'est notamment le cas du fraisage, où l'inclinaison de l'arête de la fraise impose une configuration oblique. Ainsi, bien que le schéma retenu corresponde à une coupe orthogonale, il reste pertinent pour décrire les trois zones fondamentales de formation du copeau.

1.9.2 Efforts de coupe

Les efforts de coupe générés en fraisage résultent des interactions complexes entre l'outil et la pièce (figure 1.30). Ils se décomposent en trois composantes principales [6] :

- L'effort tangentiel F_t : Il agit dans le sens de coupe (le même sens que la vitesse de coupe) et est directement responsable de l'enlèvement de matière.
- L'effort radial F_r : Il agit perpendiculairement à la surface de coupe et tend à repousser l'outil vers l'extérieur.

- L'effort axial F_a : Il est orienté suivant l'axe de rotation de la fraise et peut influencer sur la stabilité de l'opération.

Ces efforts dépendent de plusieurs facteurs [23], notamment :

- La géométrie de l'outil : L'angle de coupe, l'angle de dépouille, le nombre de dents et l'angle d'hélice influencent directement la répartition et l'intensité des forces.
- Les paramètres de coupe : Une augmentation de l'avance par dent f_z ou de la profondeur de passe a_p engendre des efforts plus importants. La vitesse de coupe V_c affecte également la dynamique de la coupe.
- Le matériau de la pièce : Des matériaux durs ou résistants mécaniquement nécessitent des forces de coupe plus élevées, ce qui influence l'usure de l'outil et la consommation énergétique.
- La rigidité de la machine : Une machine rigide et bien amortie permet de réduire les vibrations, d'améliorer la stabilité et de diminuer les efforts perturbateurs.

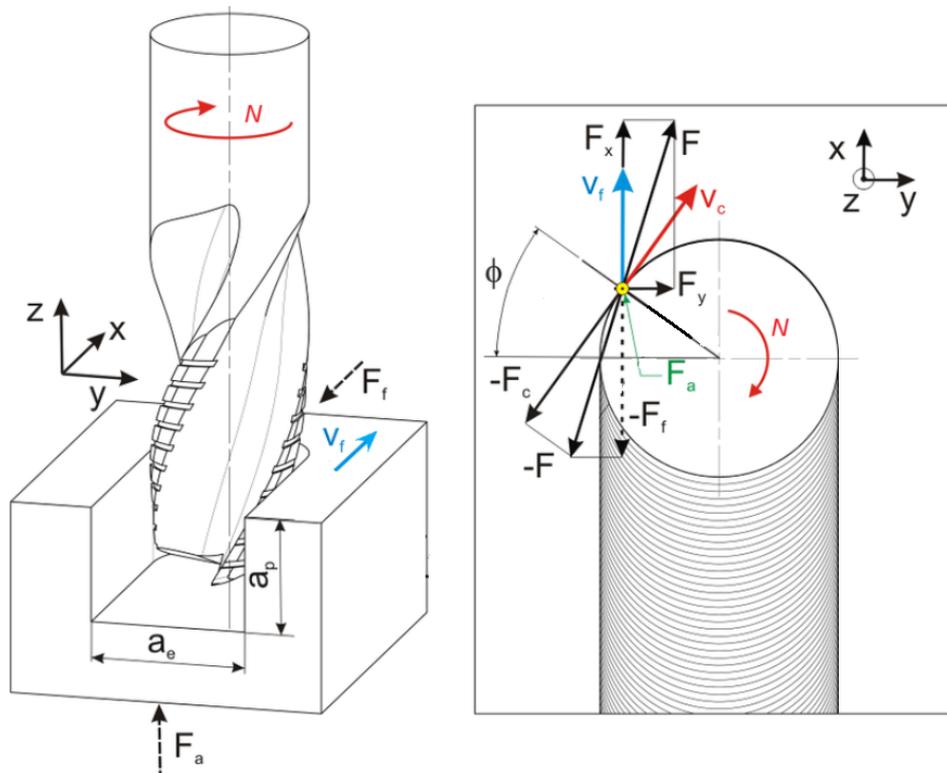


FIGURE 1.30 – Représentation des efforts de coupe en fraisage [24]

1.10 Présentation générale de la dynamique de coupe

La dynamique de coupe en fraisage désigne l'ensemble des phénomènes vibratoires qui apparaissent lors de l'interaction entre l'outil et la pièce. Ces vibrations sont induites par les efforts de coupe et sont intimement liées au comportement dynamique du système outil-pièce-machine. On distingue principalement trois types de vibrations en usinage [25] :

- Les vibrations libres, qui sont des réponses naturelles du système à une perturbation ponctuelle.
- Les vibrations forcées, induites par des excitations périodiques comme le passage successif des dents d'une fraise.
- Les vibrations auto-entretenues, aussi appelées vibrations régénératives, résultant d'une instabilité du processus de coupe. Ces dernières, responsables du phénomène de broutement, se manifestent lorsque les variations d'épaisseur de copeau dues aux oscillations du système engendrent des forces qui amplifient les vibrations.

Ces vibrations provoquent non seulement une dégradation de la qualité de la surface usinée, mais aussi une usure accélérée des outils et des composants mécaniques de la machine-outil.

Afin de prévenir ces instabilités, des outils de prédiction ont été développés, parmi lesquels les lobes de stabilité. Ce sont des courbes tracées dans un plan représentant la profondeur de passe a_p en fonction de la vitesse de rotation N de la broche. Ils permettent de délimiter les zones où l'usinage peut être réalisé sans vibrations auto-entretenues.

Sur un tel diagramme comme celui présenté dans la figure 1.31, les zones situées sous les courbes correspondent aux régimes de coupe stables, où l'enlèvement de matière s'effectue sans broutement, avec une bonne qualité de surface. À l'inverse, les zones situées à l'intérieur ou au-dessus des lobes représentent des régimes instables, où des vibrations auto-excitées peuvent apparaître, nuisant à l'efficacité du procédé. Ces lobes sont généralement calculés à partir d'un modèle dynamique du système (à un ou plusieurs degrés de liberté), prenant en compte la réponse du système à une excitation périodique. [26]

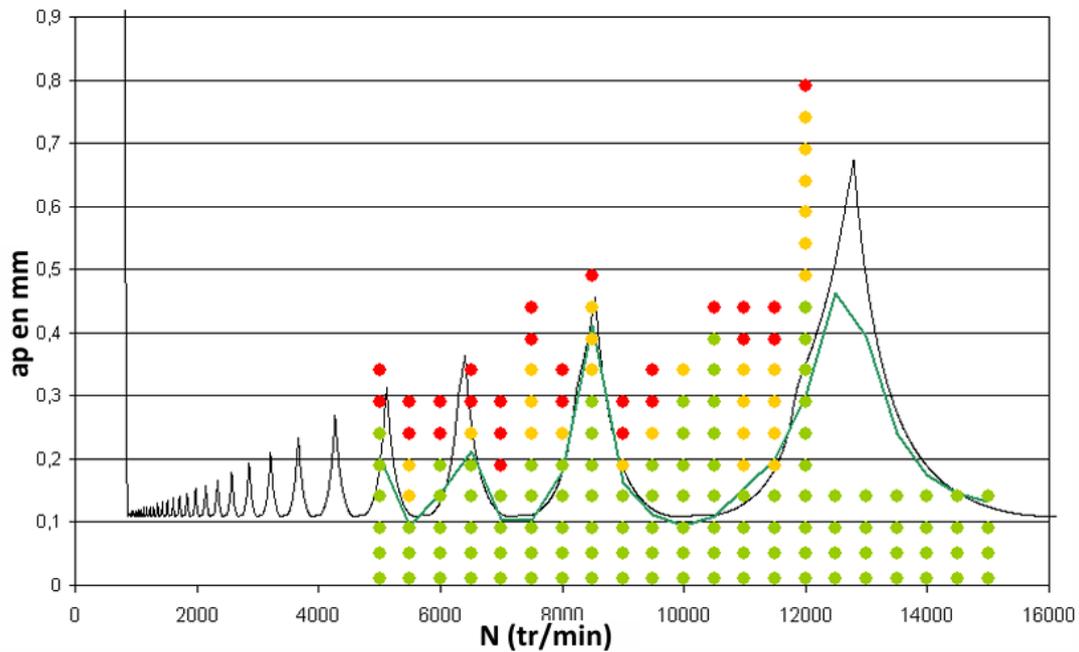


FIGURE 1.31 – Diagramme de lobes de stabilité [25]

1.11 Conclusion

À travers ce chapitre, les bases nécessaires à la compréhension des procédés d'usinage ont été posées, en insistant sur les éléments essentiels permettant de situer le fraisage dans son contexte technologique. Les spécificités de ce procédé ont été examinées en détail, notamment à travers ses opérations, ses outils, et les paramètres qui conditionnent son efficacité. Ces connaissances, désormais établies, serviront de repères pour la préparation des essais expérimentaux et permettront d'interpréter les résultats obtenus avec pertinence et rigueur dans les chapitres suivants.

Chapitre 2

Plans d'expériences

" Nous devons faire reposer nos recherches non sur des opinions, mais sur des expériences ; ces dernières doivent être faites de façon répétée, et les résultats soigneusement enregistrés." [27]

Ibn Al Haytham

2.1 Introduction

L'expérimentation est l'un des moyens les plus efficaces pour étudier les phénomènes et processus industriels. La qualité de ses résultats dépend fortement de la façon dont les essais sont réalisés. Pour cela, l'expérimentateur cherche toujours à les organiser au mieux, afin d'obtenir un maximum de renseignements avec une précision optimale, tout en minimisant le nombre de tests expérimentaux [28]. Cette problématique met en évidence la nécessité de recourir aux plans d'expérience.

Ce chapitre présente les principes fondamentaux de la méthodologie des plans d'expérience, en abordant leurs domaines d'application, la terminologie utilisée et leurs différents types et en mettant l'accent sur les méthodes mathématiques et statistiques employées pour mener notre étude vers des résultats fiables.

2.2 Définition et évolution des plans d'expérience

Les plans d'expérience, ou Design of Experiments (DoE), représentent la science d'organisation des essais appelée Expérimentique [29]. Cette discipline, issue de la statistique

appliquée, fournit une méthodologie rigoureuse pour planifier, réaliser, analyser et interpréter les expériences. Elle permet de varier les paramètres d'entrée afin d'étudier leur influence sur un ou plusieurs réponses mesurées, dans le but d'améliorer les performances du processus et obtenir les meilleurs résultats possibles, tout en garantissant sa robustesse.

Les plans d'expériences (DoE), bien que n'étant pas une méthode nouvelle, ont connu une croissance rapide dans leur application à travers les disciplines scientifiques au cours des deux dernières décennies. Cette expansion est largement due à l'amélioration de la formation et à la disponibilité de logiciels conviviaux. Initialement introduite dans les années 1920 par Ronald A. Fisher dans le domaine de l'agriculture, la DOE est restée sous-utilisée jusqu'à les années 1970. Son adoption s'est accélérée dans les années 1990 avec l'essor des logiciels statistiques. Aujourd'hui, la DoE est largement appliquée dans divers domaines de recherche. L'ingénierie à lui seule représente environ 10% de l'ensemble des applications scientifiques recensées, comme indiqué dans la figure 2.1. [30]

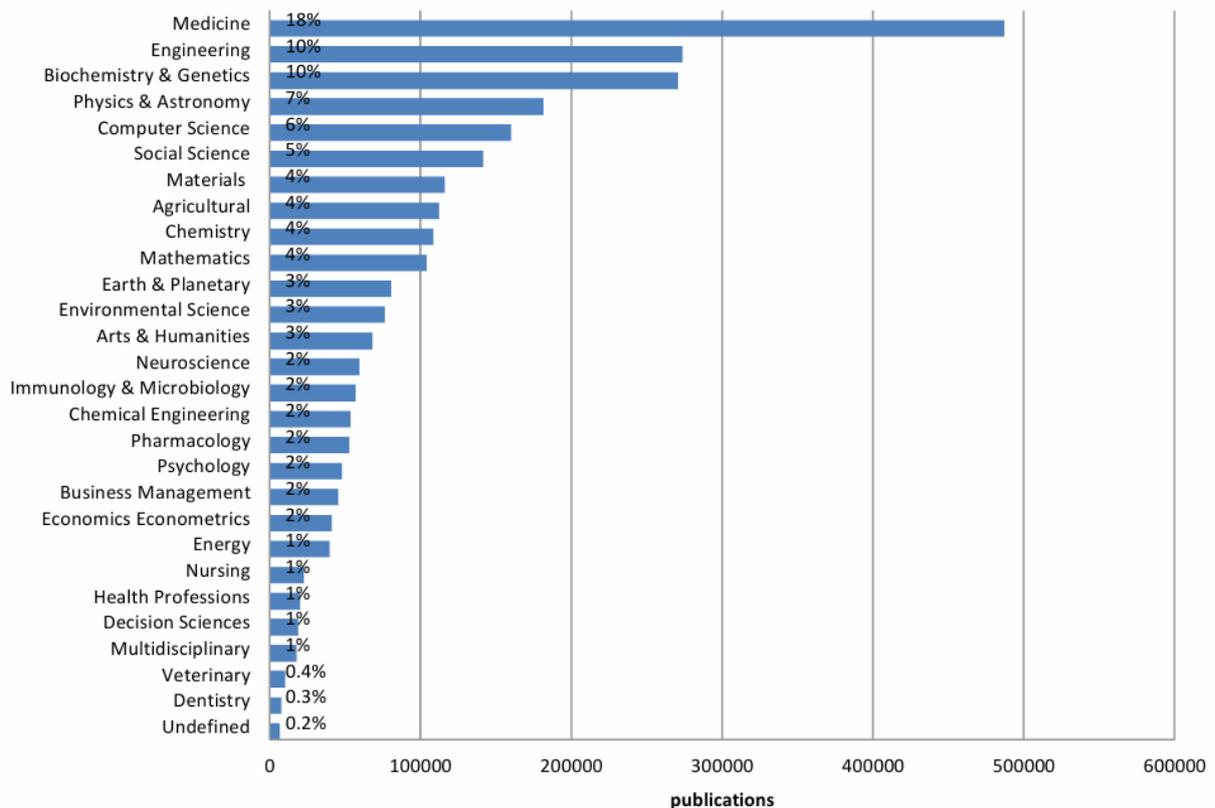


FIGURE 2.1 – Applications des plans d'expérience par domaine scientifique [30]

2.3 Terminologie

2.3.1 Facteur

On appelle facteur toute variable susceptible d'influencer la variable d'intérêt, appelée réponse [31]. Les facteurs sont donc les variables indépendantes dont on désire étudier l'effet sur la réponse.

Certains facteurs sont dits contrôlables, car ils peuvent être fixés ou ajustés durant l'expérimentation (par exemple les conditions de coupe, le courant électrique, les dimensions, etc.), tandis que d'autres sont incontrôlables, comme des variations environnementales ou des propriétés difficilement maîtrisables. La figure 2.2 illustre un processus, défini comme une combinaison d'opérations et de ressources qui transforme une entrée en une sortie, influencée par ces deux types de facteurs. [32]

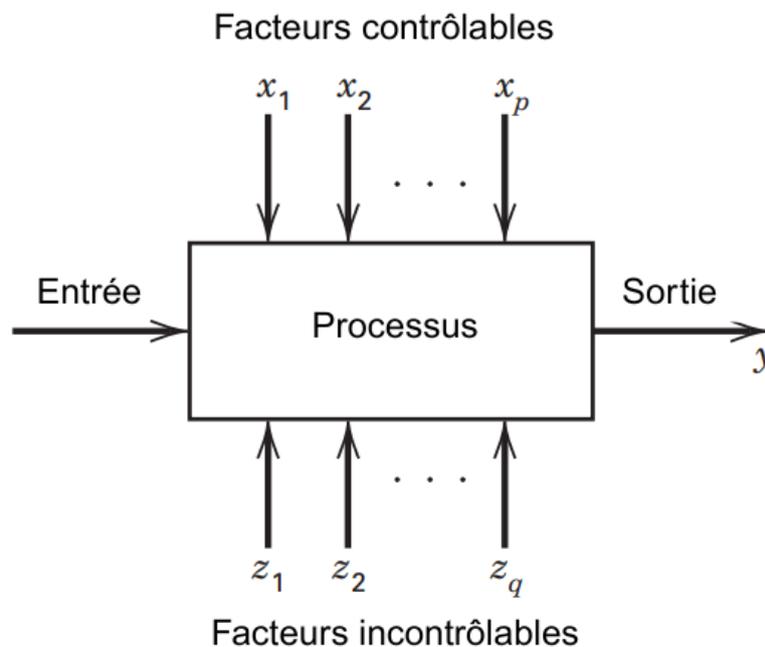


FIGURE 2.2 – Modèle général d'un processus [32]

L'élaboration du plan d'expérience et l'analyse des résultats reposent majoritairement sur les différents types de facteurs identifiés dans l'étude. Ces facteurs peuvent être classés selon les catégories suivantes : [31]

1. Facteurs continus : ce sont des variables qui prennent des valeurs représentées par des nombres continus comme la température, la vitesse, la pression, etc.

2. Facteurs discrets : il s'agit de variables discontinus et non ordonnables qui ne peuvent prendre que des valeurs spécifiques, souvent non numériques. Ces valeurs représentent des modalités qualitatives telles que des noms, des lettres ou des catégories sans relation d'ordre.
3. Facteurs ordonnables : il s'agit des facteurs discontinus qui peuvent être ordonnés selon une logique.
4. Facteurs booléens : ce sont des facteurs discrets qui ne peuvent prendre que deux valeurs, par exemple haut et bas, blanc et noir, etc.

2.3.2 Domaine du facteur

Pour effectuer un essai, chaque facteur est associé à une valeur appelé niveau. La variation d'un facteur est limitée entre deux bornes définies par l'expérimentateur selon les spécificités de l'étude : une borne inférieure appelée niveau bas noté -1 et une borne supérieure appelée niveau haut noté $+1$. Les valeurs que peut prendre le facteur entre ces deux bornes constituent le domaine de variation du facteur ou plus simplement domaine du facteur (figure 2.3). [28]

Dans le cas d'un facteur continu, toutes les valeurs sont théoriquement possibles. Le nombre de niveaux à utiliser sera déterminé par les objectifs de recherche. Par exemple, un modèle quadratique comportera fréquemment trois ou quatre niveaux tandis qu'un modèle de premier ordre comportera deux niveaux seulement. [31]

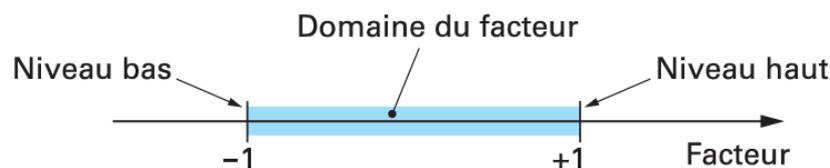


FIGURE 2.3 – Domaine du facteur [28]

2.3.3 Espace expérimental

L'espace expérimental est généralement représenté dans un système de coordonnées cartésiennes à deux dimensions (figure 2.4). Chaque facteur continu est associé à un axe gradué et dirigé, et les axes sont positionnés perpendiculairement l'un à l'autre. Si un troisième facteur est considéré, un troisième axe orthogonal aux deux premiers est ajouté, l'espace

est donc tridimensionnel. Avec des facteurs supplémentaires, il devient un hypervolume multidimensionnel, et il est représenté mathématiquement. [31]

Dans le cas de deux facteurs, le niveau x_1 du facteur 1 et le niveau x_2 du facteur 2 peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point dans l'espace expérimental (figure 2.5). Chaque expérience est ainsi représentée comme un point dans ce système bidimensionnel appelé point expérimental. [28]

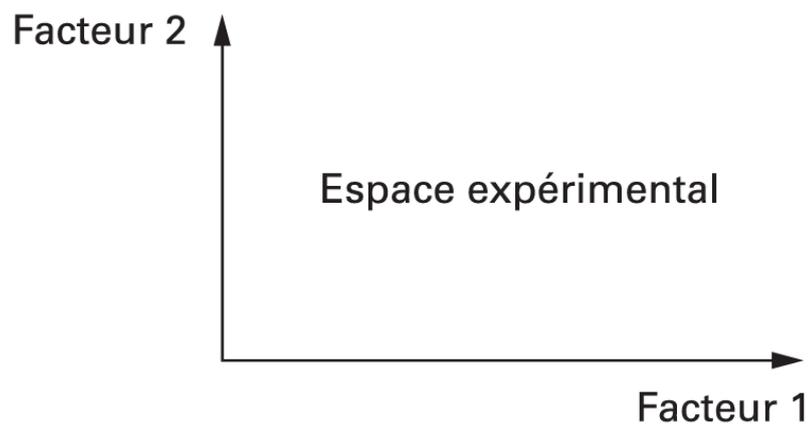


FIGURE 2.4 – Espace expérimental [28]

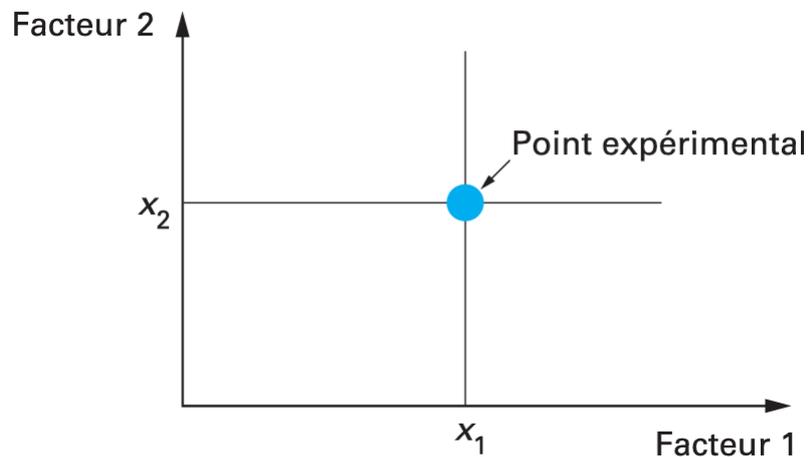


FIGURE 2.5 – Point expérimental [28]

2.3.4 Domaine d'étude

Le domaine d'étude est la partie de l'espace expérimental que l'expérimentateur a retenu pour faire ses essais. Il représente l'ensemble des points de la surface délimitée par les

niveaux bas et haut de chaque facteur (surface en bleu dans la figure 2.6a). [29]

Dans certains cas, des contraintes peuvent exister entre les facteurs, ce qui entraîne une réduction du domaine d'étude initial par l'exclusion de la zone où les expériences ne peuvent pas être réalisées comme illustré sur la figure 2.6b.

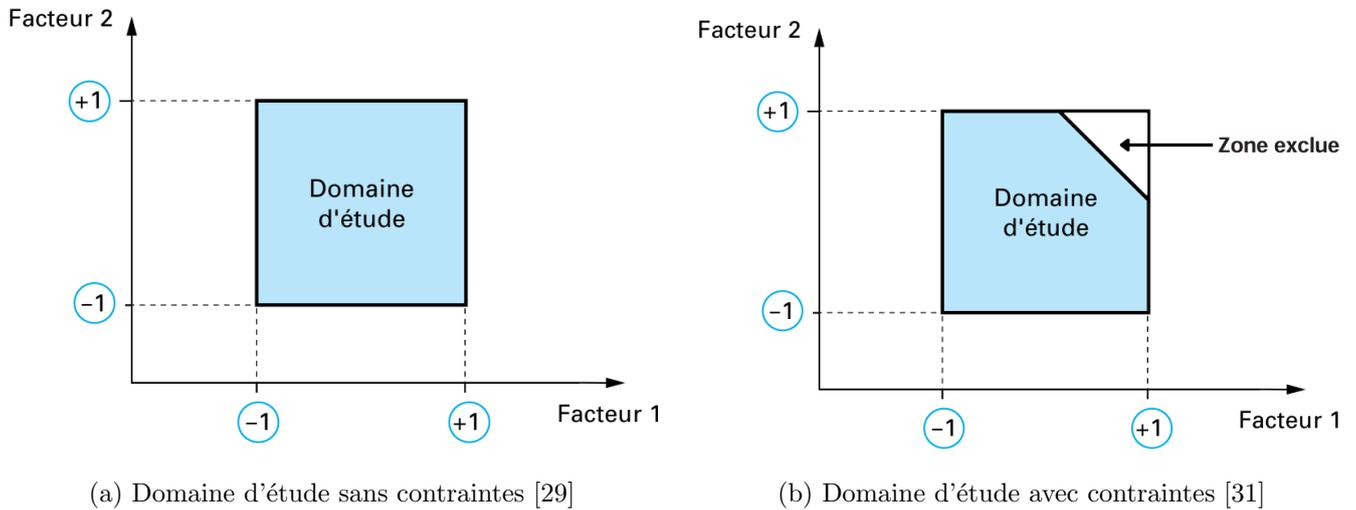


FIGURE 2.6 – Domaine d'étude

L'ensemble des points d'expérience disposés dans le domaine d'étude constitue la représentation géométrique du plan d'expérience tel qu'indiqué sur la figure 2.7.

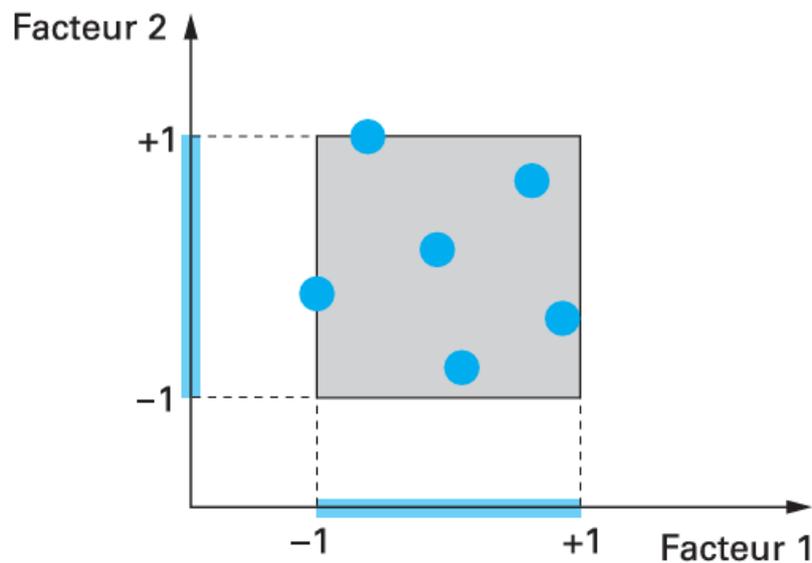


FIGURE 2.7 – Représentation géométrique du plan d'expérience [28]

2.3.5 Réponse

L'objectif de l'expérimentation est d'étudier un phénomène à travers une grandeur mesurable, appelée réponse ou grandeur d'intérêt. Celle-ci est enregistrée à chaque essai.

Sa variation peut être modélisée mathématiquement en fonction des différents facteurs étudiés, selon la relation suivante [29] :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.1)$$

Où

- y désigne la réponse, ou sortie du système.
- x_i représentent les facteurs d'entrée.
- n est le nombre de facteurs considérés.
- f est la fonction mathématique reliant la réponse aux facteurs.

2.3.6 Coordonnées centrées réduites

Lorsqu'une étude en utilisant les plans d'expériences est menée avec les valeurs -1 et +1 pour les niveaux des facteurs, les variables d'origine en unité courante A subissent deux modifications principales : le déplacement de l'origine de mesures, permettant de définir la valeur centrale en unité courante A_0 , et le changement d'unité de mesure en une nouvelle unité appelée *pas*.

Ces changements conduisent à définir de nouvelles variables appelées coordonnées centrées réduites — également désignées comme variables codées ou unités codées — notées x et calculées par l'équation 2.2.

$$x = \frac{A - A_0}{pas} \quad (2.2)$$

Les coordonnées centrées réduites permettent donc de généraliser la théorie des plans d'expérience en les présentant de la même manière quels que soient les facteurs, leurs domaines de variation et leurs unités. [31]

2.4 Démarche de la méthode d'étude par DoE

Pour appliquer efficacement la méthode des plans d'expériences, il est essentiel de suivre une démarche rigoureuse afin de réussir l'expérimentation et obtenir des résultats précis. Les étapes à suivre sont les suivants [33] :

1. **Définir l'objectif de l'étude** : formuler clairement les problématiques à résoudre ainsi que les résultats attendus à l'issue de l'expérimentation.
2. **Choisir la réponse** : identifier la variable d'intérêt qui sera mesurée au cours de l'expérimentation et qui permettra d'analyser le phénomène étudié.
3. **Définir les facteurs et leurs niveaux** : déterminer les paramètres d'entrée pourraient influencer la réponse définie et choisir pour chacun les niveaux bas et haut.
4. **Choisir le plan d'expérience convenable** : sélectionner le plan le plus adapté aux objectifs de l'étude et aux facteurs définis.
5. **Effectuer les essais expérimentaux** : réaliser les expériences en respectant les niveaux des facteurs définis dans la matrice du plan d'expérience et l'ordre prévu des essais.
6. **Analyser et interpréter les résultats** : mener une analyse statistique des données obtenues à l'aide de méthodes telles que l'ANOVA en utilisant des logiciels de statistiques, puis discuter les tableaux et graphes pour tirer des conclusions pertinentes.

2.5 Types des plans d'expérience

Les plans d'expériences se répartissent en trois grandes catégories : les plans de criblage, les plans d'optimisation et les plans de mélanges. Les deux premiers s'appliquent pour les facteurs indépendants, c'est à dire des facteurs dont le choix du niveau de l'un n'influe pas sur le choix du niveau de l'autre. En revanche, les plans de mélange concernent les facteurs dépendants, dont les niveaux sont liés par une contrainte [33].

2.5.1 Plans de criblage

Ces plans sont conçus pour être utilisés en phase exploratoire d'une étude expérimentale afin d'identifier les facteurs qui exercent une influence significative sur la réponse étudiée.

Ils sont particulièrement utiles lorsqu'il est nécessaire de traiter de nombreuses variables, car ils réduisent le nombre de tests tout en identifiant les effets principaux. Une interprétation rigoureuse des résultats peut également permettre de mettre en évidence certaines interactions entre facteurs, même si ce n'est pas leur but principal. Ils regroupent les plans « un facteur à la fois », les plans factoriels fractionnaires, les plans sursaturés et les plans factoriels complets [33]. Certains de ces plans peuvent néanmoins être utilisés à des fins de modélisation grâce à l'utilisation de modèles mathématiques de premier ordre présentant les termes des effets principaux et, dans certains cas, les termes d'interactions de second ordre [31].

2.5.2 Plans d'optimisation

Également appelés plans de second degré, plans de surface de réponse ou simplement plans de modélisation, les plans d'optimisation sont utilisés lorsque le phénomène étudié ne peut être correctement représenté par un modèle du premier degré [33]. Dans ce cas, un modèle du second ordre est privilégié, d'où la désignation de plan de second degré. Ces plans créent une relation empirique qui donne la réponse en fonction des facteurs, quel que soit leur nombre, en combinant des méthodes statistiques et mathématiques afin de prédire et d'optimiser la réponse [31]. Le nombre de niveaux est alors égale à trois ou plus, et les interactions ainsi que les effets quadratiques sont inclus dans le modèle.

2.5.3 Plans de mélange

Contrairement aux deux autres types de plans, où les facteurs peuvent varier indépendamment, ce type de plan traite des situations où les facteurs représentent les proportions des constituants d'un mélange. Ici, la somme de tous ces proportions est égale à 1 (ou 100%), ce qui constitue la contrainte fondamentale et crée la dépendance des facteurs. Ces plans sont donc utilisés lorsque la réponse étudiée varie en fonction de la composition du mélange, et non de sa quantité globale. [31]

Par exemple, dans le domaine des matériaux composites, on peut étudier l'effet des proportions de fibres (x_1), de résine (x_2) et d'additifs (x_3) sur les propriétés mécaniques du matériau. Ces proportions sont liées par la contrainte $x_1 + x_2 + x_3 = 1$. Dans ce cas, les plans de mélange sont utiles pour analyser l'influence de la composition sur les performances du matériau tout en respectant la relation de dépendance.

2.6 Méthodologie de la surface de réponse

La méthodologie de la surface de réponse (RSM) est une combinaison de techniques statistiques et mathématiques, utiles pour la conception, le développement et l'analyse de processus où une réponse d'intérêt est affectée par plusieurs variables d'entrée. Son objectif est d'optimiser cette réponse soit en la minimisant, soit en la maximisant. Cette discipline permet d'établir un modèle mathématique par régression puis de le représenter graphiquement après avoir choisit le plan d'expérience approprié. [34]

2.6.1 Principaux plans d'expériences pour surface de réponse

2.6.1.1 Plans composites

Les plans composites conviennent aux études séquentielles en permettant de modéliser une réponse au second degré. On commence par un plan factoriel (complet ou fractionnaire) avec des points centraux pour valider un modèle linéaire avec interactions. Si la validation échoue, des essais supplémentaires sont ajoutés : des points en étoile, situés sur les axes, et d'autres au centre. Un plan composite (figure 2.8a) comprend ainsi trois parties : plan factoriel, plan en étoile et points centraux. Il comporte généralement cinq niveaux par facteur $(-1, -\alpha, 0, +\alpha, +1)$, ou trois dans le cas des plans à faces centrées. [31]

2.6.1.2 Plans de Doehlert

Les plans de Doehlert, proposés en 1970, répartissent uniformément les points expérimentaux dans l'espace d'étude. Pour deux facteurs, les points sont placés aux sommets d'un hexagone régulier avec un point central, totalisant sept essais. Ces points correspondent aux niveaux codés indiqués sur la figure 2.8b, permettant de modéliser efficacement la réponse. Ce plan est extensible dans n'importe quelle direction de l'espace en ajoutant des points également répartis, sans perdre les données existantes. Il permet aussi l'introduction facile de nouveaux facteurs, à condition de maintenir les autres à un niveau constant. [31]

2.6.1.3 Plans de Box-Behnken

Introduits en 1960, les plans de Box-Behnken sont largement utilisés pour élaborer des modèles quadratiques en études expérimentales. Reposant sur trois niveaux $(-1, 0, +1)$,

ils disposent les points de façon à couvrir le domaine sans en tester les extrémités. Leur facilité de mise en œuvre et leur caractère séquentiel permettent d'étudier d'abord les k premiers facteurs tout en préservant la possibilité d'ajouter d'autres facteurs sans compromettre les résultats déjà obtenus. Un plan pour trois facteurs est construit sur un cube, tandis que des plans pour n facteurs ($n > 3$) reposent sur des hypercubes à n dimensions. L'efficacité de ces plans en fait un choix pertinent pour l'étude des surfaces de réponse, notamment dans le cadre de ce travail. [33]

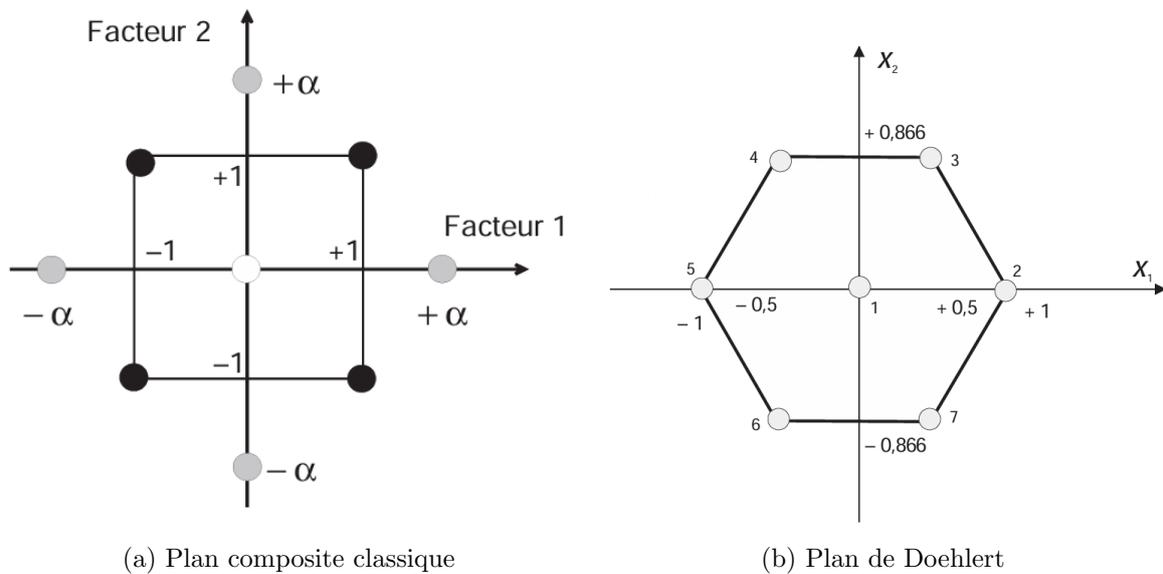


FIGURE 2.8 – Représentations graphiques des plans utilisés dans la RSM [31]

2.6.2 Modélisation mathématique

L'objectif principal des études expérimentales est d'établir une relation, initialement inconnue, entre la réponse et les facteurs étudiés. Dans le cadre de la méthodologie de la surface de réponse, cette relation est modélisée de manière à optimiser une ou plusieurs réponses influencées par plusieurs variables indépendantes. La première étape de la RSM consiste donc à formuler une hypothèse raisonnable sur la forme fonctionnelle de cette relation, afin de construire un modèle mathématique adapté.

Un polynôme de bas degré est approprié dans une région relativement restreinte du domaine d'étude. Dans de nombreux cas, on utilise soit un modèle du premier ordre, soit un modèle du second ordre. [34]

Si la réponse y peut être correctement représentée par une fonction linéaire des n variables indépendantes x_i , alors une modélisation de premier ordre (équation 2.3) constitue une approximation adéquate.

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \cdots + a_nx_n + e \quad (2.3)$$

Si le système présente une courbure, il devient nécessaire d'utiliser un polynôme de degré supérieur, comme un modèle du second ordre donnée par l'équation 2.4. [32]

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_ix_i + \sum_{i=1}^n a_{ii}x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1+1}^n a_{ij}x_ix_j + e \quad (2.4)$$

Dans ces modèles, le terme e représente le résidu, c'est-à-dire l'écart entre la valeur observée et celle prédite par le modèle. Il regroupe deux sources d'imprécision : d'une part, le manque d'ajustement, dû au fait que le modèle choisi ne reflète pas parfaitement la réalité du phénomène étudié ; d'autre part, les erreurs expérimentales, qui traduisent la variabilité aléatoire des mesures. [28]

Chaque essai fournit une valeur de réponse permettant d'estimer les p coefficients inconnus du polynôme. À la fin du plan, on obtient un système d'équations que l'on peut exprimer en notation matricielle comme suit :

$$\mathbf{y} = \mathbf{X} \mathbf{a} + \mathbf{e} \quad (2.5)$$

Où

- \mathbf{y} : Vecteur des réponses de taille $(n, 1)$.
- \mathbf{X} : Matrice de calcul de taille (n, p) .
- \mathbf{a} : Vecteur des coefficients de taille $(p, 1)$.
- \mathbf{e} : Vecteur des résidus.

En général, ce système ne peut pas être résolu directement car il comporte plus d'inconnues que d'équations. Pour permettre sa résolution, une méthode de régression est utilisée, reposant sur le critère des moindres carrés, afin d'estimer au mieux les coefficients du modèle représentés par le vecteur $\hat{\mathbf{a}}$ donné par l'équation 2.6. [28]

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{X}^t \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^t \mathbf{y} \quad (2.6)$$

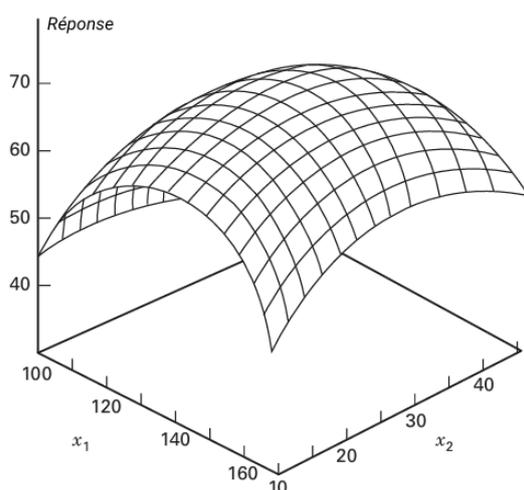
- ${}^t\mathbf{X}$ est la transposée de la matrice \mathbf{X} .
- ${}^t\mathbf{X}\mathbf{X}$ représente la matrice d'information.
- $({}^t\mathbf{X}\mathbf{X})^{-1}$: représente la matrice de dispersion.

2.6.3 Modélisation graphique

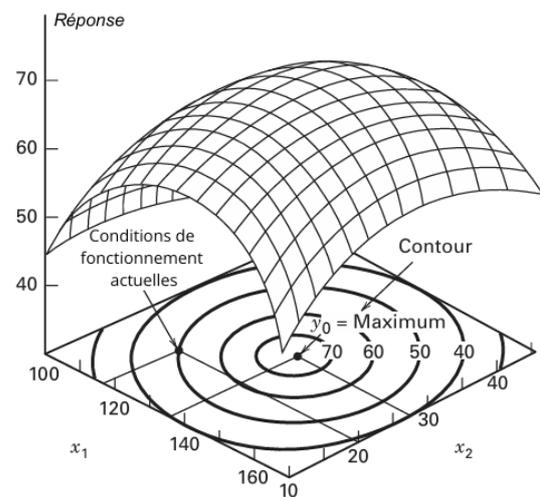
Dans la modélisation graphique de la RSM, la relation entre la réponse et deux variables indépendantes est d'abord représentée comme une surface en trois dimensions (Figure 2.9a), où l'on fait varier une paire de facteurs (x_1, x_2) tandis que tous les autres sont maintenus à un niveau constant. Pour chaque couple (x_1, x_2) , la valeur observée de la réponse se traduit par un point situé à la hauteur correspondante, formant ainsi une « surface de réponse » au-dessus du plan (x_1, x_2) .

Afin de faciliter la lecture et l'interprétation de sa forme, on projette ensuite ses lignes d'égale valeur sur ce même plan (Figure 2.9b) : chaque contour unit une série de points pour lesquels la réponse est constante. [32, 34]

Cette double représentation – surface 3D et tracé de contours – permet de visualiser tant l'altitude globale de la réponse que ses variations locales. Elle offre en outre un moyen direct d'identifier les points stationnaires de la surface : maximum, minimum et point-selle, indispensables pour repérer les conditions optimales ou les zones de transition du modèle.



(a) Surface de réponse tridimensionnelle pour 2 facteurs



(b) Graphique de contours pour 2 facteurs

FIGURE 2.9 – Modélisation graphique de la surface de réponse [32]

2.7 Plan de Box-Behnken pour trois facteurs

2.7.1 Construction du plan

Ce plan de BB, fréquemment employé en ingénierie, s'appuie sur un cube composé de huit sommets, douze arêtes et six faces. Afin d'éviter les conditions extrêmes, les points expérimentaux ne sont pas placés aux sommets mais au centre des arêtes et des faces, de manière à ce qu'ils soient tous situés à égale distance du centre du domaine d'étude. De plus, trois points supplémentaires sont généralement ajoutés au centre du cube afin de réduire l'erreur de prévision. Au total, on obtient douze essais sur les arêtes et les faces, auxquels s'ajoutent trois essais au centre, soit quinze essais au total, comme illustré à la figure 2.10. [33]

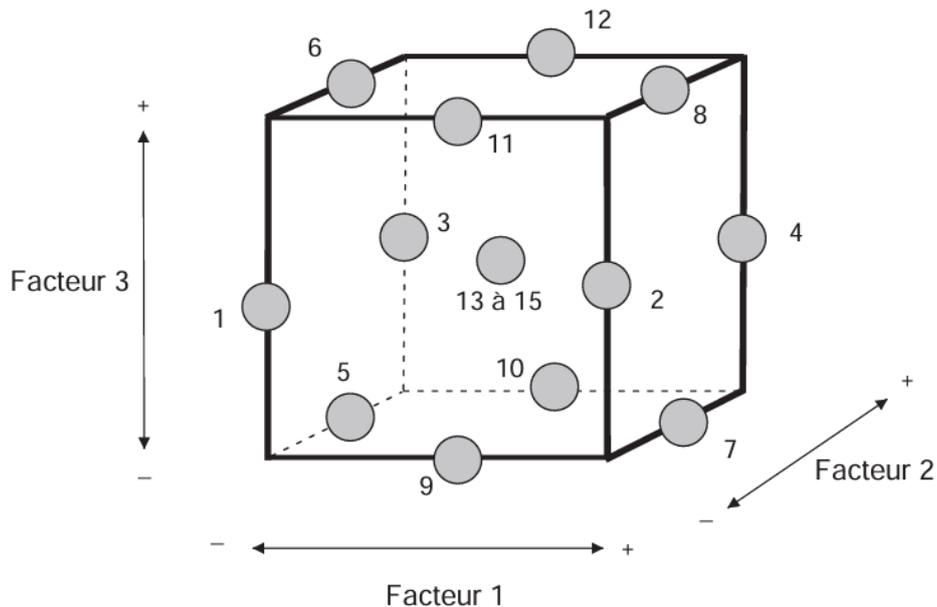


FIGURE 2.10 – Illustration du plan de Box-Behnken pour 3 facteurs [31]

2.7.2 Matrice du plan

Le plan de BB pour trois facteurs peut également être représenté sous forme de matrice, comme illustré dans la Table 2.1. Cette matrice indique l'ensemble des combinaisons d'essais en unités codées correspondant aux différents niveaux des trois facteurs. Elle constitue la base selon laquelle les expériences seront réalisées en suivant les niveaux attribués à chaque facteur.

TABLE 2.1 – Matrice du plan Box-Behnken pour trois facteurs [33]

Essai	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3
1	-1	-1	0
2	+1	-1	0
3	-1	+1	0
4	+1	+1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	+1
7	+1	0	-1
8	+1	0	+1
9	0	-1	-1
10	0	+1	-1
11	0	-1	+1
12	0	+1	+1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

2.7.3 Choix du plan

Dans cette étude, l'objectif est de modéliser la relation entre la rugosité de surface et trois paramètres de coupe (V_c , f_z , a_p) au moyen d'un modèle du second degré, afin d'analyser les effets principaux, les termes quadratiques et les interactions entre variables. Le plan de BB pour trois facteurs a été retenu pour ses nombreuses propriétés avantageuses qui facilitent l'obtention des résultats. Ces avantages sont les suivants :

- Possibilité de modéliser la réponse par un modèle du second degré grâce à l'utilisation de trois niveaux (-1, 0, +1) par facteur.
- Efficacité expérimentale avec un nombre d'essais limité par rapport aux autres plans.
- Souplesse séquentielle permettant d'ajouter de nouveaux facteurs sans perdre les résultats obtenus.
- Précision des estimations, les erreurs de prédiction sur les réponses étant généralement

inférieures aux erreurs expérimentales. [33]

- Sécurité expérimentale assurée par l'absence de points aux sommets du cube, évitant les combinaisons de niveaux extrêmes (par exemple lorsque V_c , f_z et a_p atteignent simultanément leurs valeurs maximales).

2.8 Analyse de la variance

2.8.1 Définition et principes

L'Analyse de Variance (ANOVA) est un outil statistique utilisé pour étudier plusieurs groupes expérimentaux, avec ou sans groupes de contrôle, afin de déterminer si les écarts observés entre les moyennes des populations μ_k sont statistiquement significatifs. Autrement dit, elle permet d'évaluer l'effet de plusieurs facteurs ainsi que leurs interactions sur une variable de réponse continue. Cette analyse repose sur deux hypothèses [35, 36] :

- L'hypothèse nulle (H_0), qui postule l'égalité des moyennes de toutes les populations comparées jusqu'à preuve du contraire :

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = \mu \quad (2.7)$$

- L'hypothèse alternative (H_1), selon laquelle au moins une moyenne diffère des autres :

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \dots \neq \mu_k \quad (2.8)$$

L'ANOVA convient à différents types de facteurs (fixes ou aléatoires) et à divers plans expérimentaux [32]. Elle peut être utilisée dans le cadre d'une analyse à un facteur (one-way ANOVA) si un seul facteur est étudié, ou d'une analyse à deux facteurs (two-way ANOVA) ou plus si l'effet de plusieurs facteurs est examiné simultanément [37].

Initialement développée par Ronald A. Fisher pour les essais agricoles [30], la méthode a fait des percées dans plusieurs domaines comme l'agriculture, l'éducation, l'ingénierie et la médecine en raison de sa capacité à quantifier l'effet de chaque source de variation [35].

2.8.2 Tests statistiques

Afin d'évaluer la précision du modèle de prédiction obtenu, ainsi que les termes les plus significatifs et leur degré d'importance, une série de tests statistiques est réalisée. Bien que

ces tests impliquent l'utilisation de formules mathématiques, leur application concrète est désormais facilitée par des logiciels d'analyse statistique qui fournissent directement les résultats nécessaires à l'interprétation.

2.8.2.1 Coefficient de détermination R^2

Le coefficient de détermination R^2 représente un indice de mesure de la qualité du modèle mathématique obtenu. Il est défini par le rapport de la somme des carrés de réponses calculées corrigées à la moyenne à la somme des carrés des réponses prédites corrigées à la moyenne, donné par la relation suivante : [31]

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2} \quad (2.9)$$

Où

- N est le nombre d'observations.
- y_i est la valeur mesurée de la réponse .
- \bar{y} est la moyenne des valeurs mesurées de la réponse.
- \hat{y}_i est la valeur prédite de la réponse.

Considéré comme interprétant de la proportion de variabilité expliquée par le modèle, ce coefficient varie entre 0 et 1. Cependant, une grande valeur de R^2 n'implique pas nécessairement que le modèle de régression est pertinent car l'ajout d'une variable, même non significative, augmente systématiquement cette valeur [34].

2.8.2.2 Coefficient de détermination ajusté R_A^2

Le coefficient de détermination ajusté R_A^2 est une version corrigée du R^2 qui prend compte le nombre de variables utilisées dans le modèle. Contrairement à R^2 , il peut diminuer si des termes supplémentaires n'améliorent pas significativement la qualité du modèle. Il est défini par la relation : [34]

$$R_A^2 = 1 - \frac{SSE/(N-p)}{SST/(N-1)} = 1 - \frac{N-1}{N-p}(1-R^2) \quad (2.10)$$

Où p est le nombre de coefficients a_{ij} du modèle de prédiction choisi.

2.8.2.3 Test de Fisher

Le test de Fisher, ou F-test, permet d'évaluer si la variation expliquée par un modèle est significativement plus grande que la variation inexpliquée. Il repose sur le calcul d'un rapport entre deux variances moyennes : celle due au modèle MSR et celle due à l'erreur MSE . [34, 36]

La décision se fait alors comme suit :

$$F = \frac{MSR}{MSE} = \frac{SSR/(p-1)}{SSE/(N-p)} = \frac{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{p-1}}{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N-p}} \quad (2.11)$$

Autrement dit, il s'agit de tester l'hypothèse nulle H_0 , en comparant la valeur calculée de F à la valeur théorique, disponible dans les tables statistiques. Cette dernière notée $F_{\alpha,(p-1),(N-p)}$ dépend du niveau de signification α (qui représente le risque de rejeter H_0 alors qu'elle est vraie), le degré de liberté du modèle ($p-1$) et le degré de liberté de l'erreur ($N-p$), comme suit : [35]

$$H_0 \text{ est } \begin{cases} \text{Rejetée si } F > F_{\alpha,(p-1),(N-p)} \\ \text{Acceptée si } F < F_{\alpha,(p-1),(N-p)} \end{cases}$$

Ce test peut être effectué aussi bien pour le modèle global que pour les différents termes du modèle, voire pour l'erreur d'ajustement. Toutefois, le F-test partiel sur un seul terme est équivalent au t-test présenté dans la section 2.8.2.4. [34]

2.8.2.4 Test de Student

Le test de Student, ou t-test, est couramment utilisé pour examiner l'impact d'un coefficient de régression individuel a_{ij} en vérifiant H_0 selon laquelle ce coefficient est nul, c'est-à-dire qu'il n'a pas d'effet significatif sur la variable dépendante [34]. Il est caractérisé par la statistique de test t défini comme le rapport entre la valeur estimée du coefficient et son écart type [31].

Ce test consiste à comparer la valeur estimée de t à la valeur critique notée $t_{\alpha,(N-p)}$ obtenue par les tables, où α représente le niveau de signification et $(N-p)$ le degré de liberté associé à l'erreur. Si t est plus grand que $t_{\alpha,(N-p)}$, H_0 est rejetée.

2.8.2.5 Valeur de p

La valeur de p, ou p-value, est la probabilité que la statistique de test prenne une valeur qui est au moins aussi extrême que la valeur observée, sous l'hypothèse que H_0 est vraie [32]. Elle est généralement déduite à partir du test de Student [31], puis comparée à un seuil de signification α , souvent fixé à 5%, notamment dans les études sur les procédés d'usinage [38]. Lorsque la valeur de p est inférieure à α , H_0 est rejetée, ce qui signifie que le paramètre (facteur ou modèle) testé est statistiquement significatif [32].

2.8.3 Hypothèses de validité de l'ANOVA

1. **Normalité** : L'ANOVA suppose que les résidus suivent une distribution normale de moyenne nulle et de variance finie. De légères déviations sont tolérées grâce au théorème central limite, mais une forte asymétrie peut réduire la puissance du test. [37]
2. **Indépendance des erreurs** : L'ANOVA suppose que les erreurs sont indépendantes : aucun lien ne doit exister entre les résidus d'observations proches dans le temps, l'espace ou les conditions expérimentales. [36].
3. **Homogénéité** : L'ANOVA repose sur l'hypothèse que les variances des différentes populations (ou niveaux du facteur) sont égales, ce qui permet de considérer un seul terme d'erreur commun. Cette homogénéité est jugée acceptable tant que les variances sont proches, les tailles d'échantillons comparables, et qu'il n'y a pas d'outliers. [36]

2.9 Logiciels d'analyse statistique

Pour faciliter la conception et l'analyse des plans d'expériences, il est recommandé d'avoir recours à des logiciels d'analyse statistique. Plusieurs solutions commerciales sont utilisées (figure 2.11), offrant une interface conviviale, des outils graphiques performants et des fonctionnalités adaptées aux méthodes avancées telles que la régression, l'ANOVA ou la modélisation par surface de réponse. Ces logiciels permettent de générer des matrices expérimentales optimisées, de modéliser l'influence des facteurs, et d'analyser les résultats avec précision. Bien qu'il existe des alternatives gratuites comme Microsoft Excel ou R, celles-ci sont généralement moins intuitives et moins bien adaptées à l'analyse complète des plans d'expérience, notamment pour les modèles de second ordre. [30]



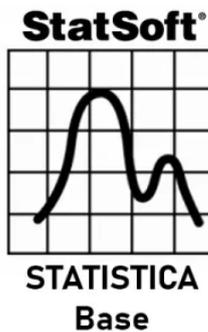
(a) Minitab



(b) Design Expert



(c) jmp



(d) Statistica



(e) Prisma



(f) Statgraphics

FIGURE 2.11 – Logiciels utilisés pour la mise en œuvre des plans d'expérience

Dans le cadre de cette étude, le choix s'est porté sur le logiciel Minitab pour effectuer la modélisation mathématique et l'analyse statistique. Ce logiciel est largement utilisé dans des domaines variés en raison de sa fiabilité et de sa simplicité d'utilisation. Il offre un large éventail de fonctionnalités adaptées aux calculs statistiques et permet de produire des représentations graphiques claires et variées, facilitant l'interprétation des résultats.

2.10 Conclusion

A travers ce chapitre, un aperçu général a été présenté afin de comprendre l'importance des plans d'expériences dans la recherche scientifique et dans le domaine industriel. Cela permet de mieux organiser l'expérimentation et d'utiliser efficacement les outils nécessaires à l'interprétation des résultats expérimentaux.

Cette méthodologie permet à l'expérimentateur de réaliser ses essais à moindres coûts et en temps réduit, tout en garantissant une collecte de données optimale. Grâce aux différents outils mathématiques et statistiques, il devient possible d'obtenir des résultats fiables et exploitables pour l'analyse des phénomènes étudiés.

Chapitre 3

États de surface

3.1 Introduction

La surface d'un solide est une zone d'interaction cruciale avec le milieu extérieur. C'est à cet endroit que se manifestent des phénomènes essentiels tels que le frottement, l'usure ou encore les réactions chimiques. La physique des surfaces, aujourd'hui largement développée, montre que les propriétés superficielles sont à la fois complexes et déterminantes pour le bon fonctionnement des pièces. Face à cette complexité, la métrologie cherche à caractériser les surfaces par des paramètres simples mais représentatifs, parmi lesquels la rugosité occupe une place centrale. Cette dernière, bien qu'insuffisante à elle seule, reste l'un des critères principaux pour évaluer la qualité d'une surface usinée. Ce chapitre s'intéresse à l'origine, la classification et la mesure de ces irrégularités, avec une attention particulière portée à la rugosité, paramètre fondamental dans notre étude.

3.2 Classification des surfaces en métrologie

Selon la norme ISO 4287 de 1984 [39], plusieurs types de surfaces sont définis pour une pièce fabriquée. Ces désignations ne représentent pas des surfaces différentes, mais plutôt différentes représentations ou références d'une même surface, en fonction du contexte. Les principales catégories de surfaces définies sont les suivantes :

3.2.1 Surface d'un corps

Cette surface est le lieu des points qui délimitent une proportion de l'espace. En mécanique, une surface peut être composée d'une ou de plusieurs surfaces élémentaires. Par exemple, une pièce de forme cylindrique comprend généralement une surface latérale courbée et deux surfaces planes circulaires aux extrémités constituant ainsi la surface totale de la pièce. [40]

3.2.2 Surface géométrique

La surface géométrique (figure 3.1a), également appelée surface nominale ou idéale, est définie géométriquement par des cotes nominales spécifiées sur le dessin technique établi par le bureau d'études. Elle représente une surface parfaite sans irrégularités ni défauts. [39]

3.2.3 Surface spécifiée

La surface spécifiée est la surface résultante de la surface nominale, transformée par le bureau d'études qui prescrit les limites de réalisation de cette surface. [5]

3.2.4 Surface réelle

La surface réelle (figure 3.1b) est celle issue de la fabrication incluant les défauts générés par les procédés de production. [5]

3.2.5 Surface mesurée

La surface mesurée est le résultat de l'exploration à l'aide des instruments de mesure, de la surface réelle. [40]

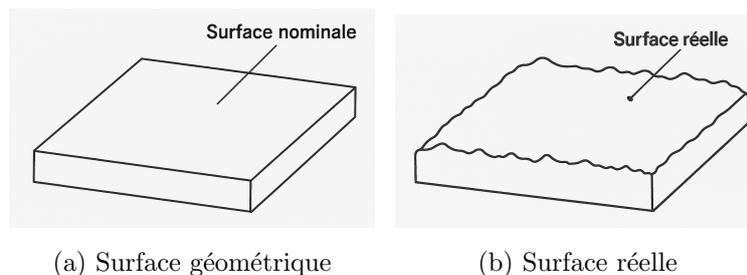


FIGURE 3.1 – Classification des surfaces en métrologie [39]

3.3 Notion d'état de surface

L'aptitude d'une pièce mécanique à remplir une ou plusieurs fonctions dépend de nombreux facteurs, parmi lesquels l'état de surface occupe une place importante. Ce dernier regroupe deux aspects complémentaires : l'état géométrique de la surface et l'état physico-chimique de la surface. [5]

3.3.1 État géométrique de surface

L'état géométrique d'une surface solide est fait référence aux irrégularités ou déviations par rapport à la forme géométrique théorique (surface nominale). Ces écarts se produisent quelle que soit la méthode de fabrication de la pièce et se manifestent à différentes échelles, depuis les écarts de forme jusqu'aux irrégularités de l'ordre inter-atomiques. [41]

Même l'usinage le plus précis ne permet pas d'obtenir une surface parfaite à l'échelle moléculaire. Par conséquent, les surfaces les plus lisses, telles que celles créées par le clivage de certains cristaux, présentent des aspérités supérieures à l'espacement atomique entre les atomes. Dans le contexte technologique, il est nécessaire de prendre en compte la topographie de surface aux niveaux macro , micro et nano, car elle affecte significativement le contact réel , le frottement, l'usure et la lubrification.

3.3.2 État physico-chimique de la surface

Au-delà des aspects géométriques, la surface d'un solide présente une structure physico-chimique complexe, constituée de nombreuses strates dont les propriétés diffèrent de celles du matériau dans son ensemble. On distingue notamment une zone fragilisée ou écrouie à la surface des métaux et alliages, recouverte d'une couche microcristalline ou amorphe, appelé la couche de Beilby. Ces strates superficielles sont également observées sur les céramiques et les polymères. Elles présentent des caractéristiques mécaniques et chimiques différentes de celles du matériau, la différence étant principalement due aux contraintes résiduelles et aux modifications structurales.

Par ailleurs, la plupart des surfaces solides sont chimiquement réactives. À l'air, des couches d'oxydes se forment spontanément sur les métaux (à l'exception des métaux nobles), et d'autres couches telles que les nitrures, les sulfures ou les chlorures dans d'autres environnements. [41]

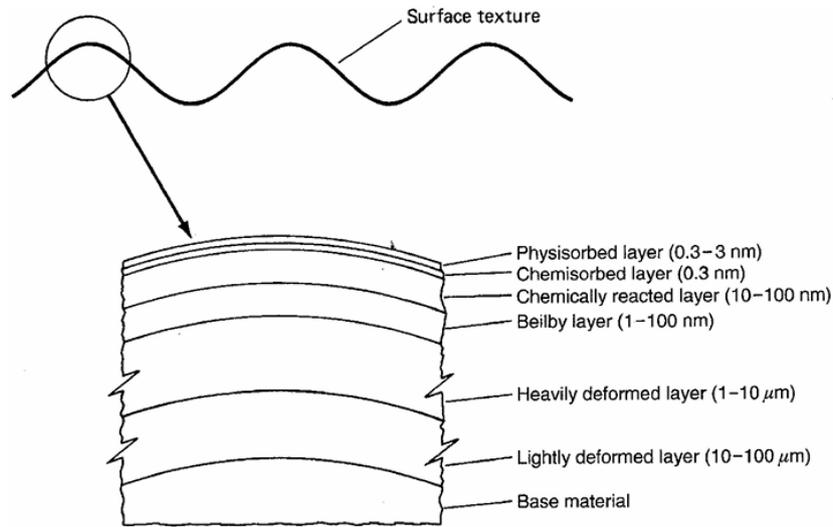


FIGURE 3.2 – Détails de la surface solide : texture de la surface (axe vertical agrandi) et couches de surface typiques [41]

3.4 Généralités sur les défauts géométriques de surface

3.4.1 Défauts de forme

Les écarts de forme sont des défauts macro-géométriques qui affectent la forme géométrique, l'orientation ou la position relative des pièces usinées [42]. Il s'agit d'écarts de premier ordre, que peuvent dans certains cas, être observés à l'œil nu. Ces défauts sont classés en deux catégories selon l'utilisation ou non d'un élément de référence (axe, plan, etc.) :

- Défauts de forme, identifiés sans élément de référence.
- Défauts d'orientation et de position, définis par rapport à un élément de référence.

La figure 3.3 montre les principaux défauts macro-géométriques selon la norme ISO 1101, accompagnés de leurs symboles normalisés utilisés sur les dessins industriels.

Types de défauts	Cas	Symbole (ISO)
Défauts de forme	rectitude	—
	planéité	▭
	circularité	○
	cylindricité	⊘
	profil d'une ligne	⤿
	profil d'une surface	⤿
Défauts d'orientation	parallélisme	//
	perpendicularité	⊥
	inclinaison	∠
Défauts de position	concentricité (centres) coaxialité (axes)	⊙
	symétrie	≡
	localisation	⊕

FIGURE 3.3 – Défauts de forme [43]

Ils peuvent être représentés en domaine bidimensionnel par la courbe montrée sur la figure 3.4.

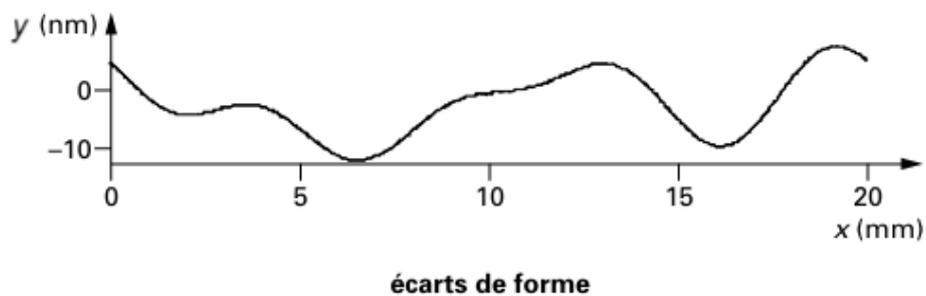


FIGURE 3.4 – Caractérisation graphique des écarts de forme [44]

3.4.2 Défauts d'état de surface

Dans la littérature scientifique le terme « état de surface » est utilisé de manière parfois large, englobant l'ensemble des défauts géométriques et physico-chimiques sur une surface usinée. Il peut ainsi désigner les écarts répartis sur différentes échelles, allant de la macro-géométrie à la nano-géométrie. Toutefois, de nombreuses références, comme [44], l'emploient plus spécifiquement pour caractériser les défauts micro ou nano-géométriques seulement, c'est à dire qui influencent directement la qualité des surfaces.

Ces défauts correspondent généralement aux défauts d'ordre 2, 3 et 4, selon la classification couramment admise dans la métrologie des surfaces. Les défauts de 2^{ème} ordre représentent les défauts moyens, appelés ondulations, tandis que ceux du 3^{ème} et 4^{ème} concernent un paramètre fondamental pour la caractérisation de l'état de surface : la rugosité. [5]

En effet, la caractérisation de l'état de surface repose sur l'étude de la variation de la cote localement normale à la surface moyenne. En trois dimensions (3D), cette variation est représentée par une fonction $z(x, y)$, où x et y sont les paramètres de position sur la surface. En deux dimensions (2D), on considère la variation de la cote $y(x)$ en fonction de la position x , représentant le profil d'une ligne suivant la surface. [44]

L'utilisation d'un instrument adapté permet de représenter l'état de surface – combinaison de l'ondulation et de la rugosité – sous la forme d'un enregistrement appelé profil de surface figure 3.3.

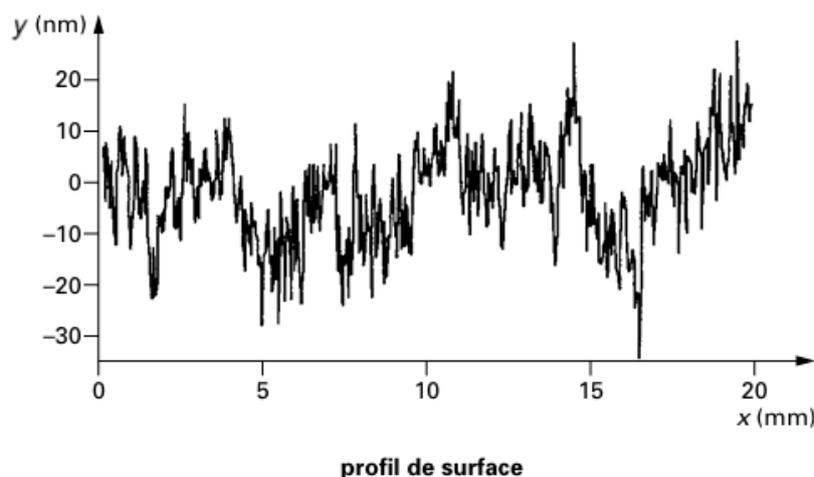


FIGURE 3.5 – Profil de surface [44]

3.4.2.1 Ondulation

L'ondulation, ou waviness en anglais, représente une catégorie intermédiaire de défauts de surface situé entre les écarts de forme et la rugosité. Elle se manifeste par des variations périodiques de la cote $z(x, y)$. Elle regroupe les irrégularités dont les périodes spatiales sont comprises généralement entre quelques centaines de micromètres et quelques millimètres. Les paramètres d'ondulation commencent tous par la lettre W suivi d'un indice pour définir le paramètre. [44]

La figure 3.6 présente un profil d'ondulation avec des valeurs choisies aléatoirement.

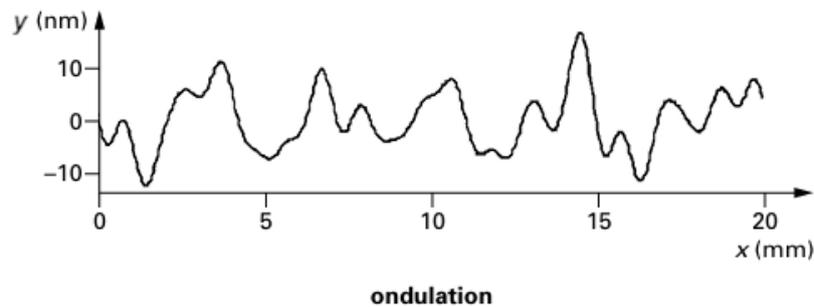


FIGURE 3.6 – Profil d'ondulation [44]

3.4.2.2 Rugosité

La rugosité correspond aux irrégularités superficielles présentes à microscopique échelle, généralement de l'ordre de quelques micromètres à quelques dizaines de micromètres. Elle est définie comme l'écart entre une surface réelle et une surface lissée qui suit les formes générales de la pièce [44]. Ces irrégularités, pseudo-périodiques ou apériodiques [5], traduisent des défauts de très courtes périodes spatiales (grandes fréquences spatiales) comme il est illustré dans la figure 3.7.

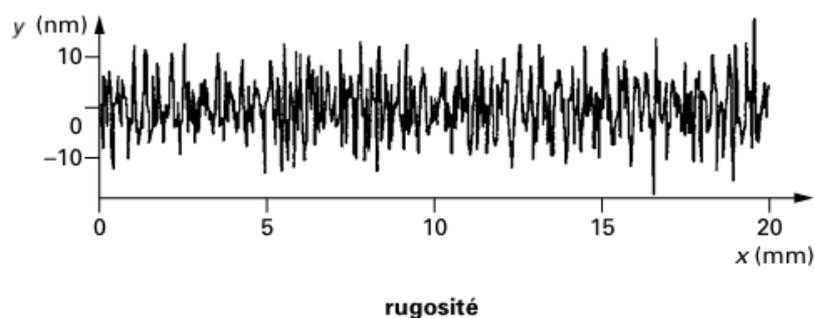


FIGURE 3.7 – Profil de rugosité [44]

Il est nécessaire de définir la qualité techniquement nécessaire et suffisante lors du choix d'un état de surface car le cout d'obtention d'un état de surface s'accroît lorsque le degré de finition exigé augmente. Le tableau ci-dessous (figure 3.8) facilite le choix du procédé de fabrication grâce aux plages de rugosité Ra proposés.

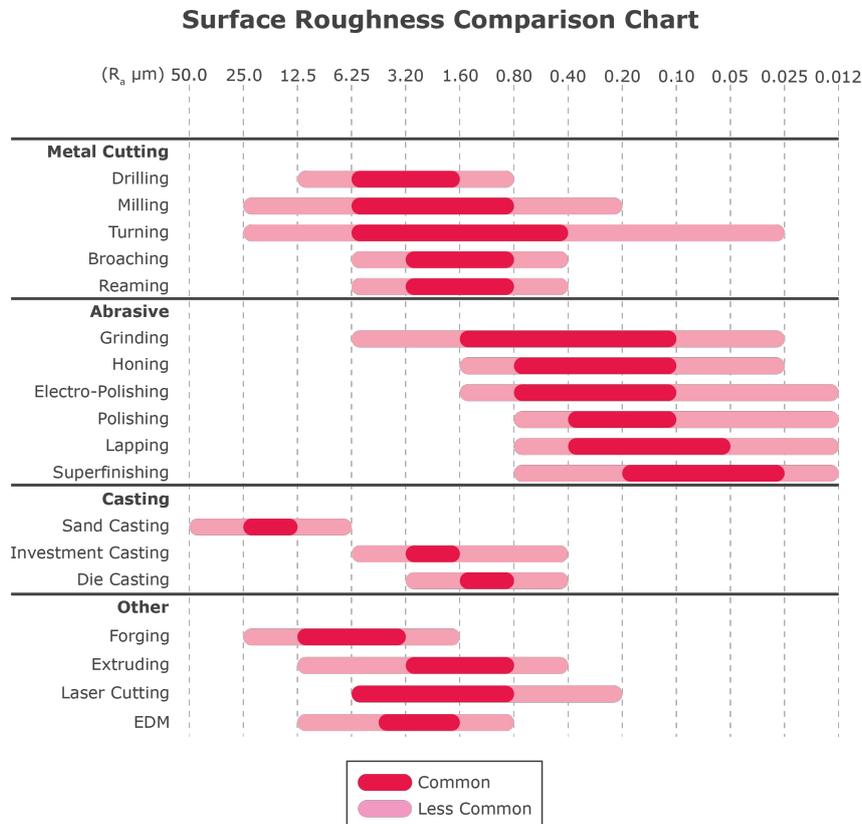


FIGURE 3.8 – États de surface obtenus selon le procédé de fabrication [40]

3.5 Paramètres de caractérisation de l'état de surface

Avant d'établir les paramètres de caractérisation de l'état de surface, il est nécessaire d'introduire notions géométriques de base selon la norme ISO 4287 de 1984 [39], qui aide à comprendre l'origine des différents paramètres.

3.5.1 Notions géométriques de base

3.5.1.1 Ligne de référence

La ligne de référence est une ligne donnée par rapport à laquelle l'évaluation des paramètres du profil est effectuée.

3.5.1.2 Longueur de base

La longueur de base ℓ – appelée aussi longueur d'échantillonnage – représente la portion de la ligne de référence utilisée pour identifier les irrégularités caractérisant la rugosité de la surface.

3.5.1.3 Longueur d'évaluation

La longueur d'évaluation L est la longueur sur laquelle les valeurs des paramètres de rugosité de la surface évaluées. Elle contient n longueurs de base permettant d'écrire $L = n\ell$. Dans le cas général, la longueur d'évaluation comprend cinq longueurs de base, soit $n = 5$.

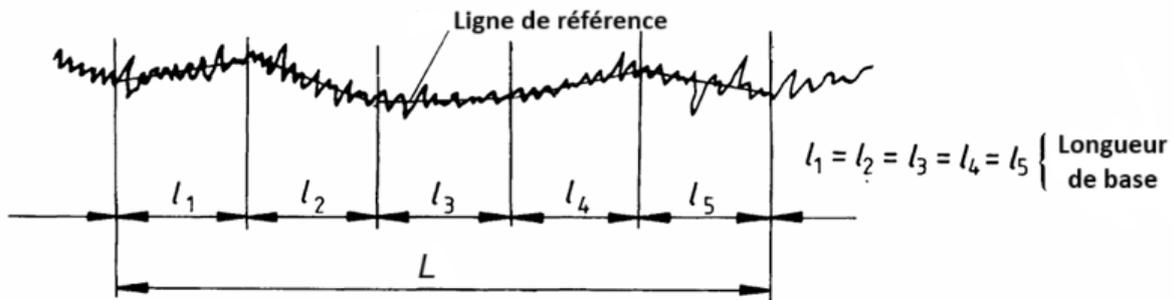


FIGURE 3.9 – Représentation de la ligne de référence, les longueurs de base et la longueur d'évaluation [39]

3.5.1.4 Écart de profil

L'écart de profil y est l'écart entre un point du profil et la ligne de référence dans la direction de la mesure.

3.5.1.5 Ligne moyenne au sens des moindres carrés

Appelé aussi ligne moyenne ℓ_m , elle représente la ligne de référence ayant la même forme du profil géométrique et divisant le profil de telle sorte que, dans la longueur de base, la somme des carrés des écarts du profil y par rapport à cette ligne soit minimale.

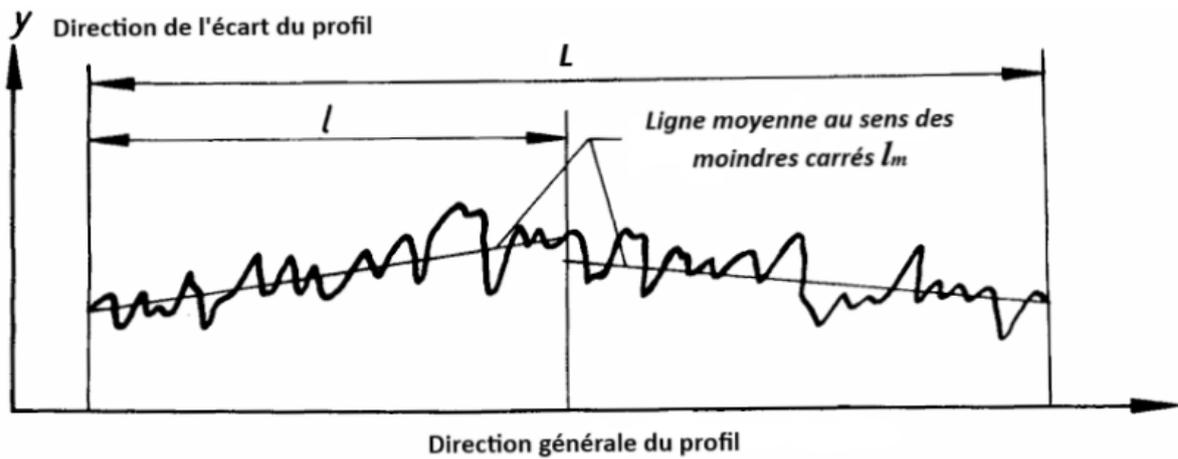


FIGURE 3.10 – Représentation de la ligne moyenne [39]

3.5.1.6 Sommet et creux locaux du profil

Le sommet local du profil est une partie du profil entre deux minima adjacents. Tandis que le creux est une partie du profil entre deux maxima adjacents.

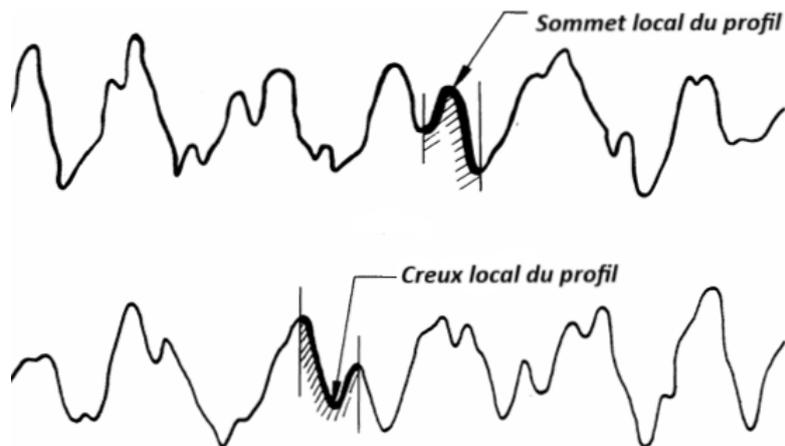


FIGURE 3.11 – Sommet local et creux local [39]

3.5.2 Paramètres liés à la ligne moyenne

3.5.2.1 Hauteur maximale du profil

La distance entre la ligne des saillies et la ligne des creux sur la longueur de base est notée R_{yi} .

R_t est la hauteur maximale du profil, ou hauteur totale sur la longueur d'évaluation L , qui est égale à la valeur maximale des R_{yi} . [42]

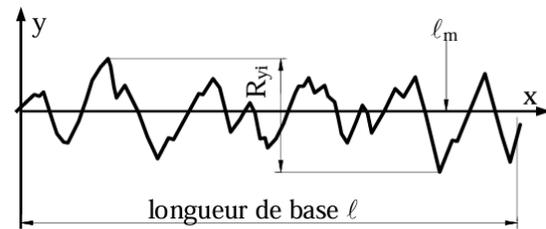


FIGURE 3.12 – Définition de la hauteur maximale du profil R_t [42]

3.5.2.2 Hauteur maximale de saillie

La distance du point le plus haut et la ligne moyenne sur la longueur de base est notée R_{pi} .

R_p est la hauteur maximale de saillie qui représente la moyenne de R_{pi} sur la longueur d'évaluation L [39] :

$$R_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{pi} \quad (3.1)$$

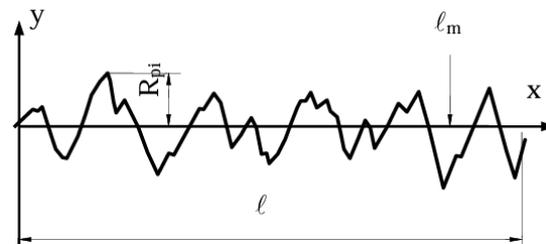


FIGURE 3.13 – Définition de la hauteur maximale des saillies R_p [42]

3.5.2.3 Écart moyen arithmétique du profil

L'écart moyen arithmétique R_{ai} sur la longueur de base est calculé par la formule :

$$R_{ai} = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} |y(x)| dx \quad (3.2)$$

R_a est l'écart moyen arithmétique du profil (ou rugosité moyenne arithmétique) qui représente la moyenne de R_{ai} sur la longueur d'évaluation L [45] :

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{ai} \quad (3.3)$$

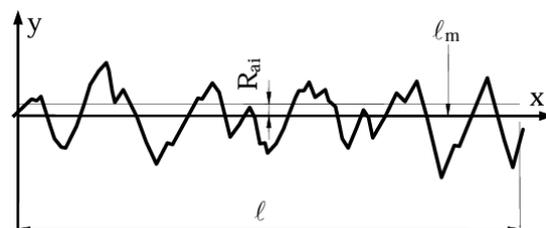


FIGURE 3.14 – Définition de l'écart moyen arithmétique R_a [42]

3.5.2.4 Écart moyen quadratique

Ce paramètre est également connu sous le nom de rugosité moyenne quadratique R_q . Il représente l'écart de la distribution des hauteurs de surface, c'est donc un paramètre important pour décrire la rugosité de surface par des méthodes statistiques. La définition mathématique de cet écart sur la longueur de base est :

$$R_{q_i} = \sqrt{\frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} y^2(x) dx} \quad (3.4)$$

Sur la longueur d'évaluation L , il devient :

$$R_q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{q_i} \quad (3.5)$$

La ligne moyenne de l'écart moyen quadratique R_q est la ligne qui dévie le profil de telle sorte que la somme des carrés des déviations de la hauteur du profil par rapport à cette ligne soit égale à zéro. [45]

3.5.2.5 Hauteur des irrégularités sur dix points

La valeur moyenne R_{z_i} des valeurs absolues des hauteurs de cinq saillies les plus élevées du profil et des profondeurs de cinq creux les plus profondes du profil sur la longueur de base est calculée par :

$$R_{z_i} = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 y_{p_i} + \sum_{i=1}^5 |y_{v_i}| \right) \quad (3.6)$$

R_z est la hauteur des irrégularités sur dix points. Elle représente la moyenne de R_{z_i} sur la longueur d'évaluation L [39] :

$$R_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{z_i} \quad (3.7)$$

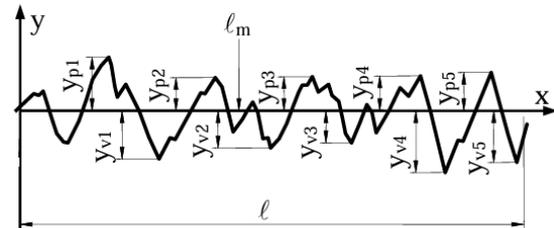


FIGURE 3.15 – Définition de la hauteur des irrégularités sur dix points R_z [42]

3.5.2.6 Taux de longueur portante

Le taux de longueur portante est un paramètre fonctionnel de rugosité qui décrit la proportion de la longueur d'une section de profil occupée par le matériau, à un niveau donné en hauteur. Il est calculé par [42] :

$$(t_p)_c = \frac{\eta_p}{L} \quad (3.8)$$

Avec : $\eta_p = b_1 + b_2 + \dots + b_n$

- c est le niveau de coupe (distance entre la ligne de saillie ℓ_s et une ligne parallèle coupant le profil).
- η_p est la longueur portante effective.
- b_i est la longueur du segment sur un motif où le profil est au-dessus de ℓ_s .

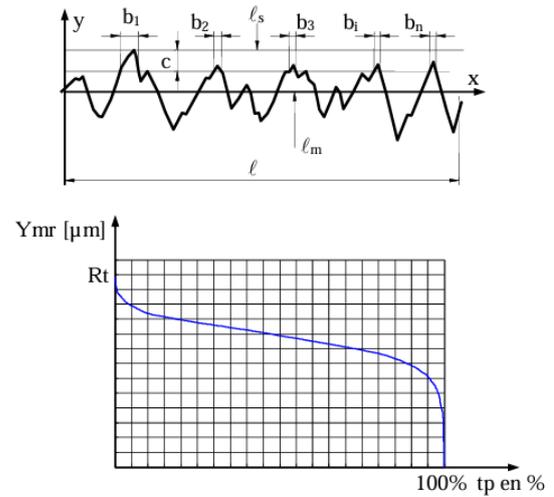


FIGURE 3.16 – Représentation du taux de portante [42]

3.5.3 Paramètres liés aux motifs de rugosité

3.5.3.1 Profondeur moyenne de la rugosité

Pour un profil donné, il est constaté qu'il existe deux fois plus de profondeurs individuelles R_i que de pas AR_i , ce qui conduit à la relation : $m = 2n$

Où n représente le nombre de motifs caractéristiques présents sur la longueur d'évaluation L , et m le nombre de valeurs R_i . [42]

La profondeur moyenne de rugosité est ainsi définie par :

$$R = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R_i \quad (3.9)$$

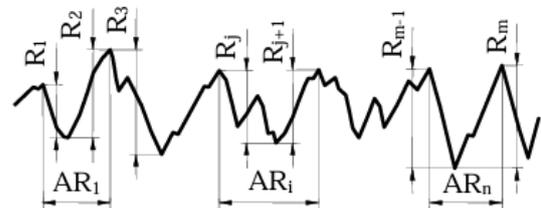


FIGURE 3.17 – Définition de la profondeur de rugosité R [42]

3.5.3.2 Pas moyen de rugosité

Le pas moyen de rugosité est défini comme la moyenne des distances AR_i séparant les motifs caractéristiques. Il s'écrit sous la forme :

$$AR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AR_i \quad (3.10)$$

3.5.3.3 Profondeur maximale de rugosité

La profondeur maximale de rugosité notée R'_{\max} représente la valeur maximale de la rugosité : $R'_{\max} = \max\{R_i\}$

3.5.4 Paramètres de rugosité choisis pour l'étude

Dans le cadre de notre étude, seuls les paramètres de rugosité moyenne arithmétique R_a et la hauteur des irrégularités sur dix points R_z ont été retenus comme paramètres de réponse. Ce choix se justifie par leur fréquence d'utilisation dans la caractérisation de l'état de surface dans les travaux antérieurs [46, 47, 48], ainsi que par leur pertinence pratique dans le contrôle de la qualité des surfaces usinées.

Le paramètre R_a , bien que ne tenant pas compte de la distribution des irrégularités, offre une mesure simple et normalisée de la rugosité globale, ce qui facilite la comparaison entre les conditions d'usinage. Le paramètre R_z , quant à lui, complète cette information en représentant la différence moyenne entre les sommets et les creux les plus prononcés, fournissant ainsi un indicateur plus sensible des défauts locaux.

3.6 Représentation de l'état de surface sur le dessin

3.6.1 Symboles de base normalisés

La norme ISO 1302 [49] définit les symboles normalisés utilisés pour spécifier l'état de surface sur les dessins techniques. Sur la figure 3.18, les différents symboles sont représentés chacun avec une lettre comme suit :

- Le symbole de base, représenté par (a), sert à indiquer qu'une surface est concernée par une spécification d'état de surface.

- Si la surface doit obligatoirement subir un usinage, le symbole (b) est utilisé.
- Si au contraire aucun enlèvement de matière n'est autorisé, le symbole (c) est utilisé.
- Lorsque les caractéristiques spécifiques de l'état de surface doivent être précisées, les symboles seront complétés pour obtenir les symboles (a'), (b') et (c').
- Enfin, si ces spécifications doivent s'appliquer) toutes les surfaces de la pièce, le symbole d'un cercle est ajouté au symbole comme dans (a''), (b'') et (c'').

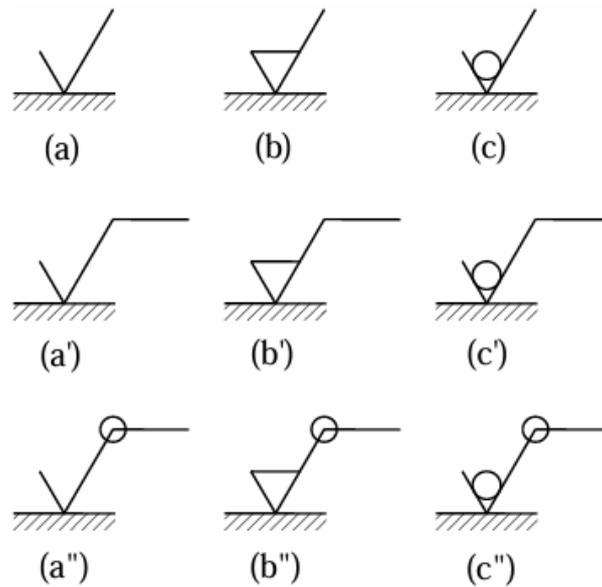


FIGURE 3.18 – Symboles de base normalisés [42]

3.6.2 Spécifications de l'état de surface

Les spécifications de l'état de surface sont des indications ajoutées aux symboles graphiques. Elles doivent être disposée par rapport au symbole de la manière indiquée à la figure 3.19. [49]

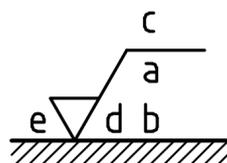


FIGURE 3.19 – Spécifications de l'état de surface [49]

- a : S'il y a une seule exigence sur l'état de surface, la valeur maximale en (μm) doit être indiquée à cette position

- b : En cas de plusieurs exigences d'état de surface, la 1^{ère} exigence doit être placée à la position a et la 2^{ème} exigence à la position b.
- c : Cette position doit être sacrifiée pour le procédé de fabrication en toutes lettres (meulé, fraisé en bout, etc)
- d : Cette position permet de spécifier la direction des stries laissées par le procédé de fabrication (figure 3.20), si elle est importante pour la fonction de la pièce.
- e : Si nécessaire une surépaisseur à enlever peut être indiquée ici, exprimée en (mm).

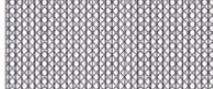
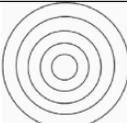
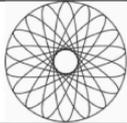
Type	Lay symbol	Visual representation of surface irregularities	Description
Parallel	=		Irregularities are parallel to the line representing the studied surface on the drawing
Perpendicular	⊥		Irregularities are perpendicular to the line representing the studied surface on the drawing
Crossed	X		Irregularities are angular in two directions to the line representing the studied surface on the drawing
Multidirectional	M		Irregularities are multidirectional relative to the line representing the studied surface on the drawing
Concentric	C		Circular relative to the center of the studied surface.
Radial	R		Radial relative to the center of the studied surface.
Non-directional	P		Irregularities without any structured pattern; may look like dotted inclusions, randomly oriented lines, or protuberant.

FIGURE 3.20 – Directions des irrégularités et symboles correspondants [50]

3.6.3 Positions du symbole sur le dessin

Conformément à la norme ISO 1302 [49], les symboles d'état de surface doivent être orientés de manière à être lisibles soit depuis le bas, soit depuis le côté droit du dessin, selon les conventions établies par la norme ISO 129-1. Ces symboles peuvent être placés directement sur le contour de la pièce, ou être reliés à la surface concernée par une ligne de repère terminée par une flèche. Ils peuvent également être associés à une cote dimensionnelle, à

un cadre de tolérance géométrique, ou encore positionnés sur une ligne de rappel prolongée.

Pour les surfaces cylindriques et prismatiques (figure 3.21), la spécification de l'état de surface peut être appliquée de manière globale si toutes les surfaces concernées présentent les mêmes exigences. Par exemple, une surface cylindrique usinée sur toute sa longueur peut être indiquée avec un seul symbole placé le long de l'axe de symétrie. En revanche, si différentes surfaces présentent des états de surface distincts, chaque face doit être spécifiée séparément à l'aide de symboles individualisés.

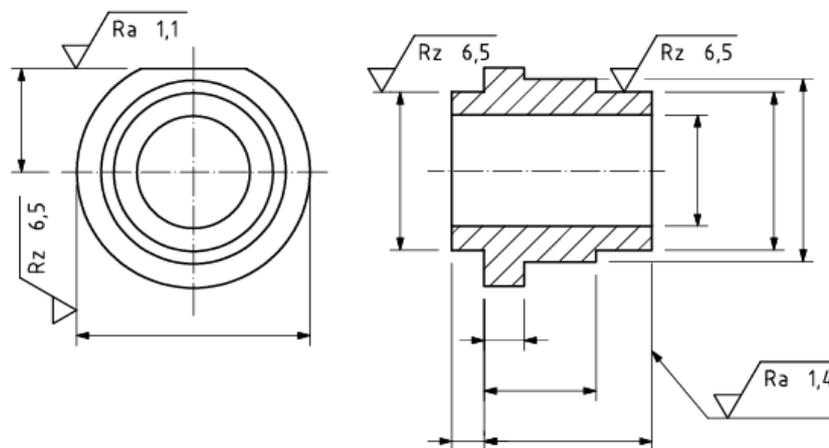


FIGURE 3.21 – Position du symbole sur le dessin [49]

3.7 Moyens et techniques de mesure de l'état de surface

L'état de surface, et plus particulièrement sa rugosité, est caractérisé par une multitude de techniques allant des méthodes mécaniques à palpeur aux approches optiques et interférométriques de haute précision. Ces outils permettent d'évaluer, à différentes échelles, la texture des surfaces, en réponse aux exigences de qualité, de fonctionnalité ou de conformité aux normes.

3.7.1 Méthodes mécaniques à contact

Les appareils à palpeur (rugosimètre à palpeur) sont parmi les plus utilisés dans l'industrie pour mesurer la rugosité. Ils fonctionnent par contact direct entre une pointe (souvent sphérique, rayon typique de 2 à 10 μm) et la surface à analyser. Le profil ainsi relevé est ensuite filtré pour séparer la rugosité des autres composantes (ondulation, forme). Les longueurs d'onde de coupe normalisées du filtre de profil sont généralement : 0.08 mm,

0.25 mm, 0.8 mm, 2.5 mm et 8 mm.

La configuration typique de ces systèmes inclut : un capteur, une unité d'avance, un transducteur, un amplificateur et un convertisseur analogique-numérique. Les résultats obtenus sont traités pour extraire des paramètres normalisés comme Ra, Rz ou Rt, en fonction des longueurs de base et d'évaluation spécifiées. [51]

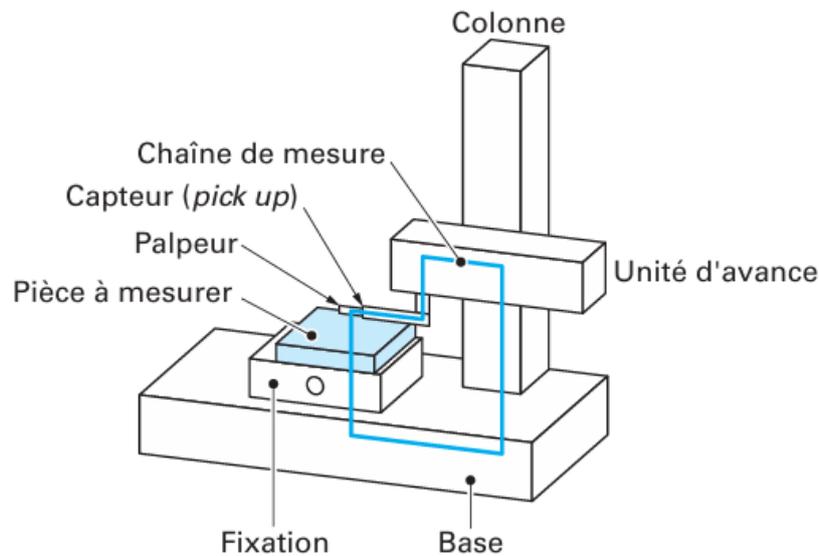


FIGURE 3.22 – Appareil à palpeur [51]

3.7.2 Evaluation par comparaison visuo-tactile

Le principe consiste à comparer la surface spécifiée à des échantillons de comparaison visuo-tactile appelés aussi « Rugotest » (figure 3.23). Ces échantillons sont des reproductions de surfaces réelles réalisées généralement par électroformage, caractérisés par un ou plusieurs paramètres d'états de surface ayant des valeurs connues. Pour chaque procédé de fabrication, fraisage, tournage, rabotage, rectification, rodage, électroérosion,..., les échantillons sont échelonnés suivant la gamme de valeurs nominales de Ra suivantes :

$$0.05 - 0.1 - 0.2 - 0.4 - 0.8 - 1.6 - 3.2 - 6.3 - 12.5 (\mu\text{m})$$

Par simple comparaison visuelle et tactile, il est facile de situer l'état de surface de la pièce entre deux échantillons successifs. Cette méthode permet de faciliter le choix de la valeur limite du paramètre à spécifier, aider au choix du procédé de fabrication, aider au réglage de la fabrication et surveiller, en fabrication, la constance et la qualité des surfaces. [51]

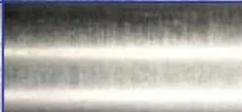
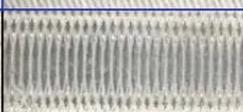
			0.4	2.5
			0.8	4.0
			1.6	8.0
			3.2	16.0
			6.3	32.0
			12.5	50.0
Horizontal Milling	Vertical Milling	Turning	$\mu\text{m Ra}$	$\mu\text{m Rz}$

FIGURE 3.23 – Comparateur viso-tactile

3.7.3 Méthodes optiques

Les techniques optiques se sont largement développées grâce aux progrès en imagerie et traitement du signal. Elles permettent une mesure sans contact, ce qui est idéal pour les matériaux fragiles ou souples. Parmi ces techniques, on trouve :

- La microscopie optique interférométrique ;
- La microscopie confocale ;
- Les capteurs chromatiques ;
- La projection de franges (white light interferometry).

Ces méthodes permettent une reconstruction 3D de la topographie de surface avec une résolution verticale allant jusqu'au nanomètre. L'usage des palpeurs optiques différentiels a subi une croissance importante dans le contrôle industriel. [44]

3.7.4 Méthodes avancées et nanométriques

Avec la miniaturisation des composants, des méthodes issues de la nanométrie sont de plus en plus utilisées, telles que :

- La microscopie à force atomique (AFM).
- Le microscope à effet tunnel (STM).

Ces outils permettent d'observer et de quantifier la rugosité à l'échelle atomique. Ces approches, bien qu'encore réservées à la recherche ou aux applications critiques, sont en train d'émerger dans l'industrie. [44]

3.8 Facteurs influençant l'état de surface

L'état de surface obtenu après une opération d'usinage dépend de nombreux paramètres liés à l'outil, à la pièce à usiner, aux conditions de coupe ainsi qu'aux phénomènes physiques intervenant durant l'usinage. Une analyse à l'aide d'un diagramme d'Ishikawa (figure 3.24) permet de visualiser l'ensemble des facteurs susceptibles d'avoir un impact sur la rugosité de surface. Les principaux facteurs sont détaillés ci-dessous.

3.8.1 Paramètres d'usinage

3.8.1.1 Vitesse d'avance

Lors d'une opération d'usinage à l'outil coupant, celui-ci trace, sur la surface de la pièce, un sillon de pas équivalent à celui de l'avance [5]. Une augmentation de la vitesse d'avance engendre une rugosité plus élevée [47, 48].

3.8.1.2 Vitesse de coupe

A cause du phénomène d'arête rapportée, la vitesse de coupe a une influence importante sur la rugosité. L'arête rapportée est un petit dépôt de matière à l'extrémité de la face de coupe de l'outil (dépôt formé par micro-soudage sous l'action du frottement élevé). Elle se détruit et se forme périodiquement, provoquant ainsi des variations de l'effort de coupe et des irrégularités sur la surface usinée. Une augmentation de la vitesse de coupe, par élévation de la température détruit l'arête rapportée. [5]

3.8.1.3 Profondeur de passe

Moins influente que la vitesse et l'avance, elle influe néanmoins sur la rugosité en interaction avec d'autres paramètres. [47]

3.8.1.4 Lubrifiant

Le lubrifiant de l'arête de coupe permet d'améliorer l'état de surface, surtout à faible vitesse de coupe, en évitant la formation d'une arête rapportée. [5]

3.8.2 Propriétés de l'outil de coupe

Le matériau de l'outil, sa géométrie, le rayon de bec et les erreurs de faux-rond influencent fortement la qualité de la surface usinée. Une géométrie stable et un rayon de bec correctement choisi permettent de limiter les irrégularités comme les creux ou les ondulations. De plus, un outil bien équilibré minimise les vibrations et améliore la précision dimensionnelle, ce qui se traduit par une rugosité plus faible. [52]

3.8.3 Phénomène de coupe

Les phénomènes physiques comme la formation du copeau, les vibrations, les accélérations, les forces de coupe et la friction dans la zone de coupe ont un impact direct sur l'état de surface. En particulier, les vibrations engendrent des irrégularités périodiques qui augmentent la rugosité. Une bonne maîtrise de ces phénomènes est essentielle pour assurer une surface régulière et de bonne qualité. [53]

3.8.4 Propriétés de la pièce

La dureté de la pièce joue un rôle important dans l'état de surface. Jusqu'à un certain seuil (environ 55 HRC), une dureté plus élevée permet d'obtenir une finition meilleure, avec une rugosité réduite. En parallèle, le diamètre et la longueur de la pièce influencent sa rigidité. Une pièce plus rigide est moins sujette aux vibrations, ce qui améliore la stabilité du processus d'usinage et la qualité de la surface obtenue. [52]

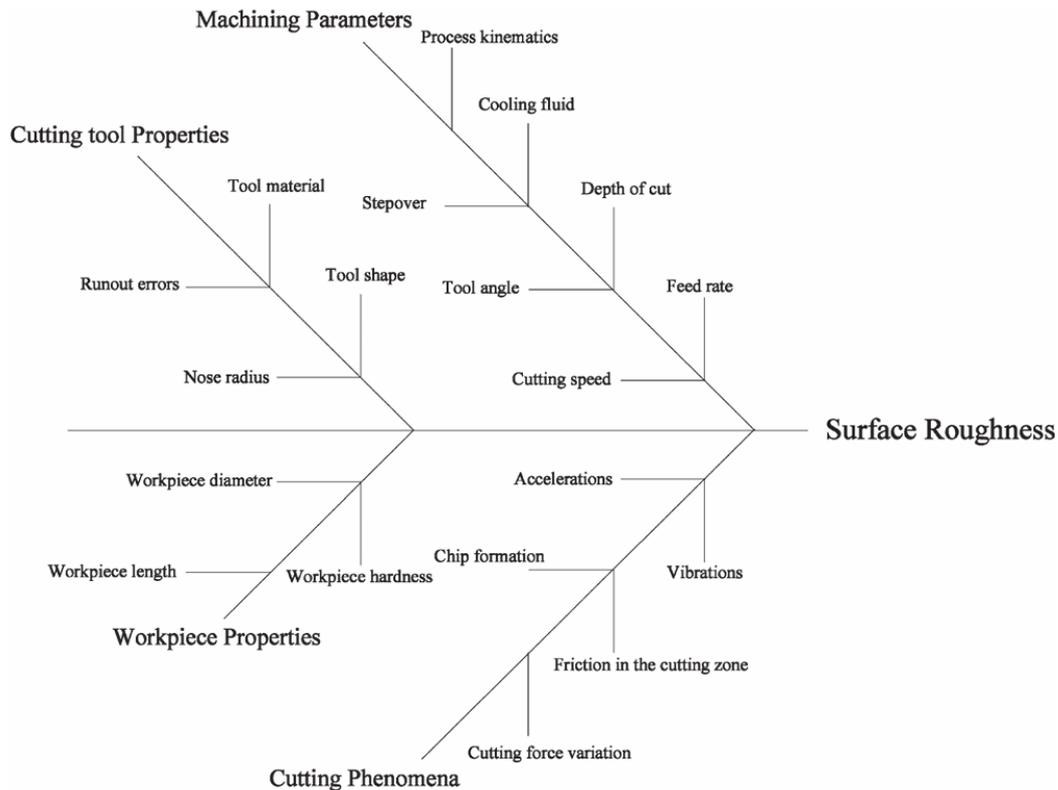


FIGURE 3.24 – Diagramme d’Ishikawa avec les paramètres influençant l’état de surface [53]

3.9 Influence de l’état de surface sur la qualité fonctionnelle

La finition de surface est un facteur essentiel pour déterminer les performances, la longévité et la qualité globale des composants techniques. La finition de surface, caractérisée par sa texture et sa douceur, influence directement divers attributs fonctionnels d’une pièce, tels que le frottement, la résistance à l’usure et la résistance à la fatigue. [54]

3.9.1 Friction et usure

L’état de surface joue un rôle fondamental dans la détermination de la friction entre les composants en contact. En général, une surface plus lisse réduit les forces de frottement, ce qui améliore l’efficacité des mécanismes et réduit les pertes d’énergie. À l’inverse, une surface rugueuse peut entraîner une friction accrue, favorisant l’usure prématurée des pièces et augmentant le risque de défaillance. Ce phénomène est particulièrement critique dans les applications comportant des mouvements glissants, comme les paliers, les glissières ou les engrenages.

3.9.2 Résistance à l'usure

Un état de surface correctement maîtrisé permet également de limiter l'usure par abrasion. Les aspérités trop marquées peuvent provoquer des micro-arrachages de matière ou des déformations localisées, surtout en présence de charges importantes ou de particules abrasives. Une rugosité modérée, adaptée à l'application, contribue à prolonger la durée de vie des composants en réduisant les mécanismes d'usure.

3.9.3 Résistance à la fatigue

Les défauts de surface tels que les pics de rugosité ou les rayures peuvent agir comme des amorces de fissures sous l'effet des sollicitations mécaniques répétées. Cela diminue considérablement la résistance à la fatigue du matériau. À l'inverse, des surfaces plus homogènes permettent de répartir les contraintes de manière plus uniforme, limitant ainsi la concentration de contraintes et retardant l'apparition des fissures. La maîtrise de l'état de surface est donc un facteur essentiel pour assurer la durabilité des pièces soumises à des cycles de chargement-déchargement.

3.9.4 Scellabilité

Dans les systèmes d'étanchéité (hydrauliques, pneumatiques, etc.), l'état de surface est un facteur déterminant. Une surface trop rugueuse empêche un contact optimal entre la pièce et le joint d'étanchéité, ce qui peut générer des micro-fuites. En revanche, une surface suffisamment lisse permet un meilleur appui du joint, réduisant ainsi les risques de fuite et assurant le maintien de la pression dans le système. Ce paramètre est particulièrement critique dans les composants soumis à des contraintes de confinement de fluides sous pression.

3.9.5 Qualité esthétique et fonctionnelle

Au-delà des exigences techniques, l'état de surface influence l'aspect visuel et le toucher d'un produit, des critères importants dans les secteurs à forte valeur ajoutée ou destinés à l'utilisateur final. Une finition soignée donne une impression de qualité, de précision et de professionnalisme. De plus, dans certains cas, la rugosité de surface peut affecter la sensation au toucher ou l'ergonomie d'un produit, comme dans les dispositifs médicaux.

Il convient toutefois de souligner qu'une surface extrêmement lisse n'est pas systématiquement souhaitable. Dans certaines applications, une rugosité maîtrisée est nécessaire pour assurer des fonctions spécifiques. Par exemple, une légère rugosité favorise l'entraînement de la tôle dans les laminoirs, ou encore permet de retenir une fine couche d'huile dans les paliers de vilebrequin, contribuant ainsi à une meilleure lubrification. Ainsi, l'état de surface optimal dépend fortement de la fonction attendue de la pièce. [42]

3.10 Conclusion

L'état de surface, et plus particulièrement la rugosité, constitue un paramètre fondamental pour évaluer la qualité géométrique et fonctionnelle des pièces usinées. À travers ce chapitre, une étude approfondie des notions, des paramètres et des méthodes de mesure a été menée, permettant de mieux comprendre les enjeux liés aux caractéristiques superficielles.

Cette base théorique est essentielle pour l'interprétation des résultats expérimentaux présentés ultérieurement dans ce mémoire. Elle servira de référence pour analyser l'influence des paramètres de coupe sur la rugosité mesurée, et ainsi orienter les décisions d'optimisation dans le cadre de notre plan d'expérience.

Chapitre 4

Travaux expérimentaux

4.1 Introduction

Ce chapitre présente les travaux expérimentaux réalisés dans le cadre de cette étude. Il commence par la caractérisation du matériau de base, destiné à être utilisé pour l'usinage des échantillons. Cette étape inclut une analyse chimique ainsi que des essais mécaniques. La suite du chapitre aborde la préparation des échantillons, comprenant le débitage suivi d'un surfaçage d'ébauche. L'opération principale d'usinage, à savoir le surfaçage de finition, est ensuite effectuée selon le plan d'expérience. Enfin, les méthodes de mesure de la rugosité des surfaces usinées ainsi que l'analyse par microscopie optique sont présentées. Ces étapes assurent une base expérimentale solide pour l'interprétation des résultats développés dans le chapitre suivant.

4.2 Caractérisation du matériau de base

Le matériau de base utilisé dans cette étude est un acier dont la nuance exacte n'était pas spécifiée, identifié uniquement par une bandelette jaune sur la barre brute, ce qui correspond généralement à un acier doux. Il était donc indispensable de procéder à sa caractérisation afin de déterminer précisément sa composition et ses propriétés, garantissant ainsi la fiabilité et la cohérence des essais menés par la suite.

4.2.1 Analyse chimique

L'analyse chimique du matériau a été réalisée au sein de la fonderie de Rouiba, située à Alger.

4.2.1.1 Analyse par spectrométrie d'émission optique par étincelle

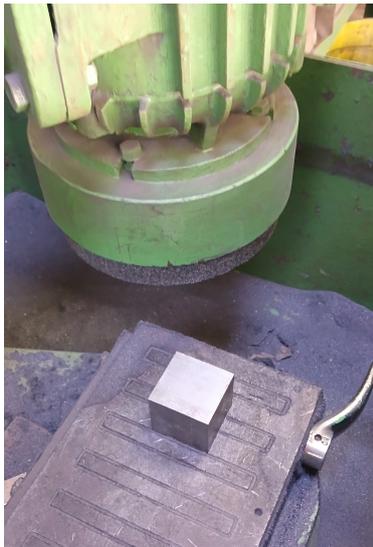
Afin de déterminer avec précision la composition élémentaire du matériau utilisé dans cette étude, une analyse a été réalisée par spectrométrie d'émission optique à étincelle. Cette technique consiste à exciter les atomes présents à la surface du métal à l'aide d'une décharge électrique à haute énergie. L'excitation provoque l'émission de rayonnements lumineux spécifiques à chaque élément chimique. L'analyse du spectre émis permet alors de déterminer la nature et la teneur des éléments présents dans le matériau.

Cette analyse a été effectuée à l'aide du spectromètre Poly Spek Neo de la société ARUN Technology illustré dans la figure 4.1.

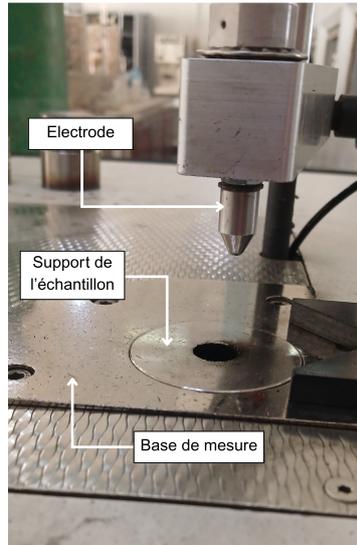


FIGURE 4.1 – Spectromètre d'émission optique par étincelle Poly Spek Neo

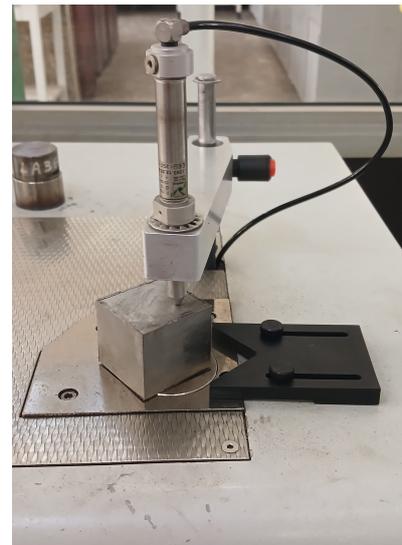
L'échantillon analysé, de dimensions $42 \times 42 \times 47$ mm, a été découpé à partir de la barre brute à section carrée (45×45 mm) utilisée pour l'ensemble de l'étude, puis préparé par surfacage d'ébauche afin d'obtenir des surfaces planes et régulières. Avant la mesure, la face destinée à entrer en contact avec l'électrode a été polie pour garantir une bonne conductivité de l'étincelle (figure 4.2a). L'échantillon a ensuite été positionné directement sur la base de mesure du spectromètre illustrée dans la figure 4.2b, avec la surface polie orientée vers le bas, en regard de l'orifice de mesure situé sous le support. L'électrode, positionnée sur la face supérieure de l'échantillon via le bras vertical (figure 4.2c), a permis la génération d'une étincelle à travers le support, directement sur la surface préparée afin de lancer l'analyse.



(a) Polissage de la surface de base de l'échantillon



(b) Base de mesure du spectromètre



(c) Positionnement de l'échantillon dans le spectromètre

FIGURE 4.2 – Étapes de l'analyse chimique par spectrométrie d'émission optique par étincelle

Le tableau 4.1 présente la composition élémentaire du matériau. Les teneurs en carbone et en soufre, bien que détectées, étant sujettes à des incertitudes, ne seront pas prises en compte dans l'analyse.

TABLE 4.1 – Résultats de l'analyse chimique par spectrométrie en pourcentage massique

Symbole	Élément	Pourcentage massique (%)
Fe	Fer	98.91
Mn	Manganèse	0.428
As	Arsenic	0.083
V	Vanadium	0.057
Ti	Titane	0.049
Cr	Chrome	0.034
Ni	Nickel	0.031
W	Tungstène	0.017
Co	Cobalt	0.012
Mo	Molybdène	< 0.002
Si	Silicium	< 0.001
P	Phosphore	< 0.001
Al	Aluminium	< 0.001

4.2.1.2 Analyse par combustion

L'analyse chimique par combustion a été réalisée afin de déterminer avec précision les teneurs en carbone et en soufre dans le matériau de base, ceux-ci n'étant pas quantifiés de manière fiable par la spectrométrie d'émission optique à étincelle.

L'appareil utilisé pour cette analyse est le LECO CS-200 illustré dans la figure 4.3. L'échantillon utilisé se présente sous forme de copeaux métalliques, prélevés sur le matériau de base. Le protocole expérimental consiste à introduire successivement dans un creuset en céramique 0.5 g de poudre d'étalonnage, suivie d'un accélérateur, puis 1 g de copeaux d'acier. Toutes les masses sont rigoureusement mesurées à l'aide d'une balance électronique de précision, afin de garantir la fiabilité des résultats obtenus.

Le principe de la méthode repose sur l'oxydation complète de l'échantillon dans un four à induction en présence d'oxygène pur. Lors de la combustion, le carbone est transformé en dioxyde de carbone (CO_2) et le soufre en dioxyde de soufre (SO_2). Ces gaz sont ensuite captés et analysés par des détecteurs infrarouges, ce qui permet de quantifier avec exactitude leur concentration dans le matériau analysé.

Les pourcentages massiques obtenus pour le carbone et le soufre sont présentés dans le tableau 4.2.



FIGURE 4.3 – Analyseur élémentaire par combustion LECO CS-200

TABLE 4.2 – Résultats de l'analyse chimique par combustion en pourcentage massique

Symbole	Élément	Pourcentage massique (%)
C	Carbone	0.0927
S	Soufre	0.0335

4.2.2 Essais de traction

Les essais de traction réalisés dans le cadre de cette étude ont pour objectif de déterminer les propriétés mécaniques caractéristiques du matériau inconnu.

4.2.2.1 Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes de traction utilisées dans cette étude ont été usinées au sein de l'entreprise ACMP Usinage de Précision, située à Ouled Moussa, Boumerdès. Elles ont été fabriquées à partir d'un bloc massif parallélépipédique de dimensions $45 \times 45 \times 200$ mm, découpé à partir de la même barre brute utilisée pour l'ensemble de l'étude. Cette continuité dans la matière première garantit l'homogénéité du matériau étudié.

Le bloc a été débité longitudinalement par découpe plasma pour obtenir l'épaisseur souhaitée, puis usiné conformément aux exigences géométriques et dimensionnelles de la norme ISO 6892-1 [55], relative aux essais de traction sur matériaux métalliques à température ambiante. Le dessin technique utilisé pour l'usinage, précisant les cotes normalisées, est fourni en section A.

Trois éprouvettes plates identiques ont été réalisées, comme illustré dans la figure 4.4, afin d'assurer la répétabilité des essais et de détecter d'éventuelles anomalies.



FIGURE 4.4 – Éprouvettes plates pour les essais de traction

4.2.2.2 Réalisation des essais

Les essais de traction ont été réalisés au sein du Département de Génie Mécanique de l'École Nationale Polytechnique, à l'aide d'une machine universelle électromécanique d'essais mécaniques de capacité de 100 kN (figure 4.5), équipée d'un capteur de force haute précision et d'un extensomètre longitudinal. La vitesse d'essai a été fixée à 2 mm/min, conformément aux recommandations de la norme pour les faibles vitesses de déformation.

Chaque éprouvette a été montée entre les mâchoires de la machine (figure 4.6a) en veillant à un alignement axial rigoureux, afin d'éviter toute sollicitation parasite, notamment les moments de flexion. L'extensomètre a été fixé avec une longueur de référence de 50 mm (figure 4.6b), puis l'essai a été lancé et poursuivi jusqu'à la rupture complète de l'éprouvette (figure 4.6c).



FIGURE 4.5 – Machine universelle électromécanique d'essais mécaniques de capacité de 100 kN

Les données collectées lors des essais ont permis de déterminer les différentes propriétés mécaniques du matériau en calculant la moyenne des résultats obtenus (tableau 4.3). Toutefois, le deuxième essai a été écarté, car les résultats obtenus étaient significativement différents des deux autres. Cette divergence s'explique par la présence d'une flexion parasite, due à un mauvais alignement de l'éprouvette entre les deux mâchoires de la machine.

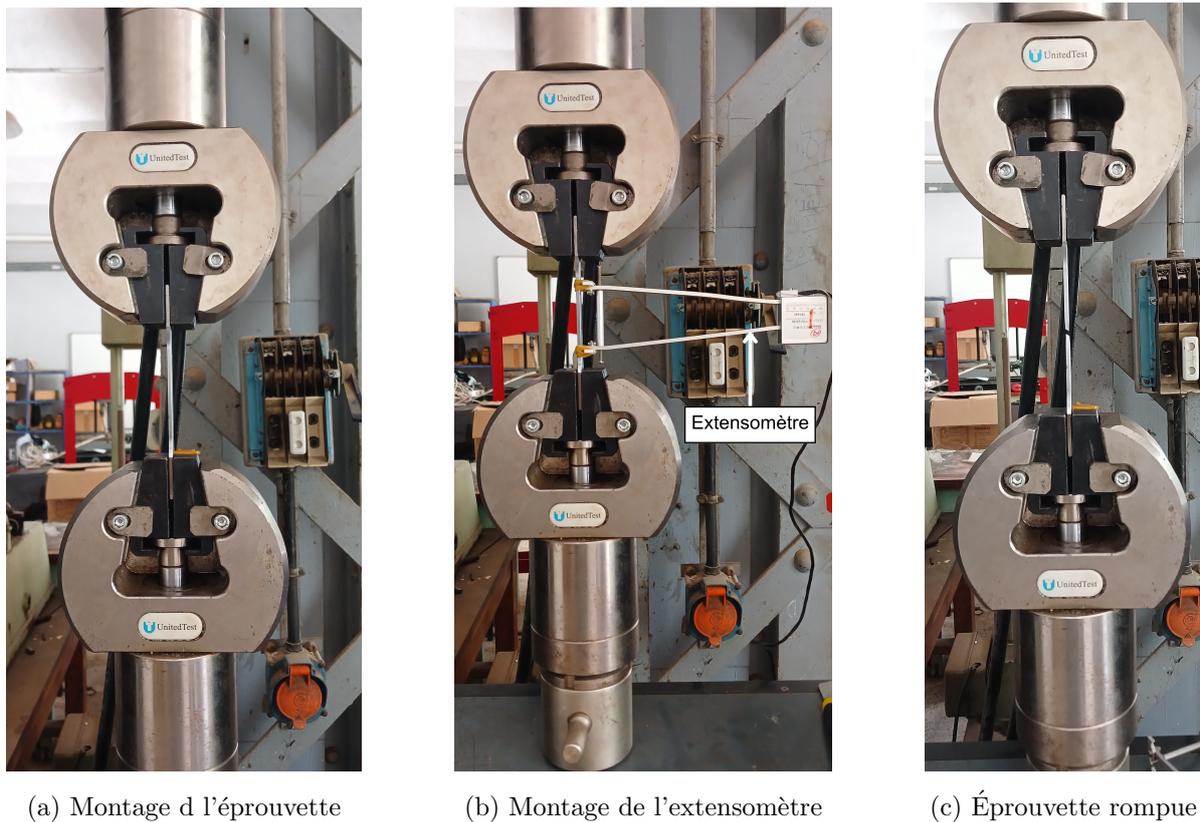


FIGURE 4.6 – Etapes de l'essai de traction

TABLE 4.3 – Propriétés mécaniques du matériau issues des essais de traction

Propriété	Symbole	Unité	Valeur
Limite élastique	R_e	(MPa)	249.5
Résistance à la traction	R_m	(MPa)	388
Module de Young	E	(GPa)	263
Allongement à la rupture	A	(%)	35.8

Il est observé que la valeur du module de Young est surestimée pour ce type de matériau. Cette surestimation pourrait être due à un défaut de mesure de l'extensomètre, ce qui justifie une vérification de celui-ci. Toutefois, il convient de préciser que cette valeur n'a aucune incidence sur les résultats recherchés dans le cadre de cette étude.

4.2.3 Essais de dureté

4.2.3.1 Essais de microdureté Vickers

Les essais de microdureté Vickers ont été réalisés au sein du Laboratoire de Technologie des Matériaux de l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), à Alger, à l'aide d'un microduromètre TUKON 1202 de Wilson Hardness (figure 4.7), conçu spécifiquement pour les essais de microdureté Vickers. L'appareil est conforme à la norme ISO 6507-1 [56], relative aux essais de dureté Vickers sur matériaux métalliques. Les essais ont été conduits à température ambiante.

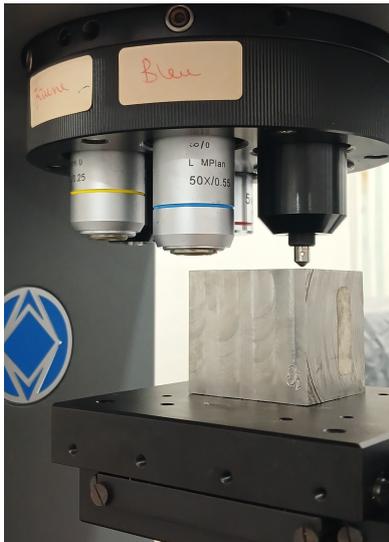
L'échantillon, initialement utilisé pour l'analyse par spectrométrie, a été réutilisé après une préparation soignée adaptée à l'essai de microdureté. Il a été placé sur le support de l'appareil, avec la surface préalablement polie orientée vers le pénétrateur (figure 4.8a). Trois mesures ont été réalisées sur des zones différentes de la surface, afin de couvrir une portion représentative. La charge maximale de 1 kgf (9.81 N) a été appliquée à l'aide d'un pénétrateur pyramidal en diamant à base carrée.

Le pénétrateur a été enfoncé dans la surface pendant 10 secondes, puis l'empreinte laissée a été observée à l'aide du microscope optique intégré avec un grossissement de $\times 500$, comme illustré dans la figure 4.8b. Les deux diagonales ont été mesurées automatiquement, et la

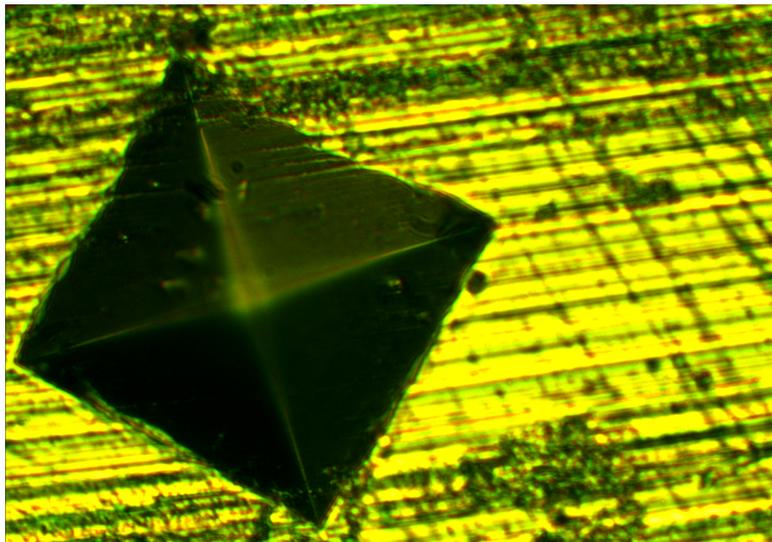


FIGURE 4.7 – Microduromètre TUKON 1202 de Wilson Hardness

valeur de la microdureté a été calculée puis affichée directement à l'écran.



(a) Montage de l'essai HV :
échantillon positionné sous le
pénétrateur



(b) Empreinte du pénétrateur Vickers observée au microscope
(×500)

FIGURE 4.8 – Étapes de l'essai de microdureté Vickers

La valeur de microdureté Vickers retenue correspond à la moyenne des trois mesures effectuées comme indique le tableau 4.4.

TABLE 4.4 – Résultats des essais de microdureté Vickers

N° d'essai	1	2	3	Moyenne
HV 1	159.5	158.3	145.9	154.6

4.2.3.2 Essais de dureté Brinell

Les essais de dureté Brinell ont été effectués au sein du Centre de Recherche en Technologies Industrielles (CRTI), situé à Alger, à l'aide d'un duromètre INNOVATEST NEMESIS 9000 (figure 4.9). Il a été mené à température ambiante sur le même échantillon que celui utilisé précédemment, après préparation par polissage de la surface à analyser.

L'échantillon a été positionné sur le support de l'appareil, avec la face préparée orientée sous le pénétrateur (figure 4.10a), constitué d'une bille en carbure de tungstène de 1 mm de diamètre. Une charge de 10 kgf a été appliquée sur cette bille, l'enfonçant dans la surface de l'échantillon pendant 10 secondes.

Après retrait de la charge, l'empreinte circulaire laissée par la bille est observée sur l'écran (figure 4.10b). Les deux diamètres perpendiculaires sont mesurés automatiquement, et la valeur de la dureté Brinell est calculée puis affichée directement.



FIGURE 4.9 – Duromètre
INNOVATEST NEMESIS 9000

La valeur de la dureté Brinell retenue correspond à la moyenne de cinq essais réalisés sur l'ensemble de la surface, en respectant les distances minimales entre les empreintes telles qu'exigées par la norme ISO 6506-1 [57] relative aux essais de dureté Brinell des matériaux métalliques. Les résultats détaillés de ces essais sont présentés dans le tableau 4.5.



(a) Montage de l'essai HB : échantillon positionné sous le pénétrateur



(b) Écran du duromètre montrant l'empreinte du pénétrateur Brinell observée au microscope ($\times 10$)

FIGURE 4.10 – Étapes de l'essai de dureté Brinell

TABLE 4.5 – Résultats des essais de dureté Brinell

N° d'essai	1	2	3	4	5	Moyenne
HBW 1/10	150.4	147.6	144.6	148.5	145.9	147.4

4.2.4 Caractérisation normalisée du matériau

L'analyse chimique du matériau de base, qui est un acier, a révélé une faible teneur en carbone (0.0927 %) ainsi que des pourcentages très faibles en éléments d'alliage, négligeables devant la forte proportion de fer (98.91 %). Sur la base de ces résultats et à l'issue d'une recherche bibliographique comparative, il a été conclu que le matériau appartient à la famille des aciers doux non alliés.

Dans la classification normalisée des aciers selon la désignation AISI, les aciers allant de AISI 1008 à AISI 1024 appartiennent à la catégorie des aciers doux non alliés, caractérisés

par une très faible teneur en carbone et une composition majoritairement ferritique. En comparant la composition chimique obtenue expérimentalement avec les spécifications de cette gamme, notamment les teneurs en carbone, manganèse, phosphore et soufre, deux nuances proches ont été identifiées : AISI 1008 et AISI 1010, conformément aux données de référence disponibles dans la section B.

La comparaison des propriétés mécaniques trouvées – à savoir une limite élastique de 249.5 MPa, une résistance à la traction de 388 MPa, un allongement à la rupture de 35.8 %, et une dureté Brinell moyenne de 147.5 HBW 1/10 – avec celles spécifiées dans la fiche technique de l’AISI 1010, présentée en section C, révèle une bonne concordance. Le matériau de base utilisé dans cette étude peut ainsi être identifié comme étant de nuance **AISI 1010**.

Il convient de noter que la valeur de dureté Brinell obtenue est légèrement plus élevée que celle indiquée dans la fiche technique (section C), qui est généralement établie selon des conditions normalisées impliquant une bille de 10 mm et des charges plus élevées (habituellement 500 ou 3000 kgf), tandis que l’essai réalisé ici a été effectué avec une bille de 1 mm et une charge de 10 kgf, ce qui tend à produire une empreinte plus petite et donc une valeur de dureté surestimée (effet d’échelle).

La valeur mesurée de microdureté Vickers (154.6 HV 1) peut être considérée, conformément à la norme ISO 6507-1, comme une mesure de dureté Vickers à faible charge. Cette désignation s’applique lorsque la charge appliquée ne dépasse pas 1 kgf, ce qui est le cas dans cet essai. Dans le contexte d’un acier doux non allié à structure homogène, principalement constituée de ferrite avec une faible fraction de perlite, l’application de la charge maximale du microduromètre permet d’atteindre simultanément les deux phases. Ainsi, la valeur obtenue est représentative de la dureté globale du matériau, et non d’une phase isolée. Par ailleurs, en s’appuyant sur les relations empiriques entre la dureté Vickers et la résistance à la traction disponibles dans la littérature [17], la dureté mesurée permet d’estimer une résistance à la rupture proche de celle obtenue expérimentalement, ce qui conforte la fiabilité de l’essai.

4.3 Préparation des échantillons

À partir de la même barre brute, déjà utilisée pour la préparation de l'échantillon ayant servi à la caractérisation du matériau, cinq échantillons ont été découpés à l'aide d'une scie mécanique. Chaque échantillon, de dimensions $45 \times 45 \times 50$ mm, constitue une pièce brute destinée à être usinée.

Les échantillons bruts ont ensuite subi une opération de surfacage d'ébauche sur une fraiseuse conventionnelle universelle, disponible dans l'atelier du Département de Génie Mécanique. L'outil utilisé est une fraise à surfacer à plaquettes brasées en acier rapide (HSS), comportant six dents et d'un diamètre de 80 mm.

Chaque lopin est positionné sur la table de la machine et solidement maintenu à l'aide d'un étau. La vitesse de rotation est réglée à 160 tr/min, la vitesse d'avance à 100 mm/min, et la profondeur de passe est fixée à 0.5 mm, afin de limiter l'usure de l'outil. Plusieurs passes successives sont effectuées jusqu'à l'obtention des dimensions finales souhaitées.

Toutes les faces de chaque échantillon sont usinées de cette manière, ce qui permet d'obtenir des prismes de dimensions approximatives $42 \times 42 \times 47$ mm, aux surfaces planes et régulières. Ces échantillons seront utilisés ultérieurement dans les essais expérimentaux de surfacage de finition.

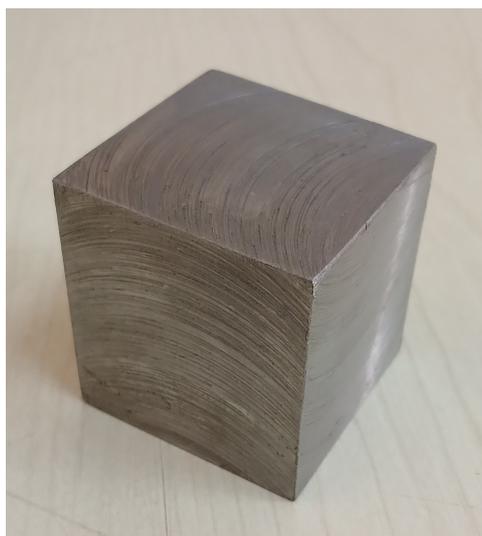


FIGURE 4.11 – Échantillon réalisé par surfacage d'ébauche

4.4 Surfaçage de finition

4.4.1 Machine utilisée

Dans le cadre de cette étude, les essais d'usinage ont été réalisés au sein du Département de Génie Mécanique de l'École Nationale Polytechnique d'Alger, à l'aide d'un centre d'usinage vertical EMCO MAXXMILL 750 (figure 4.12).

Cette machine, compacte et rigide, repose sur un bâti en acier électrosoudé avec des guidages en fonte, assurant une excellente stabilité mécanique et thermique. Elle est équipée d'une table roto-pivotante, d'un magasin d'outils de type tambour, et d'une broche pouvant être mécanique ou électromagnétique selon les besoins. Le pilotage est assuré via un pupitre de commande Siemens SINUMERIK ONE, monté sur un support orientable à 90°, intégrant l'environnement ShopMill. La zone d'usinage est protégée par une porte de sécurité coulissante en polycarbonate. Les principales caractéristiques techniques de la machine sont résumées dans le tableau .

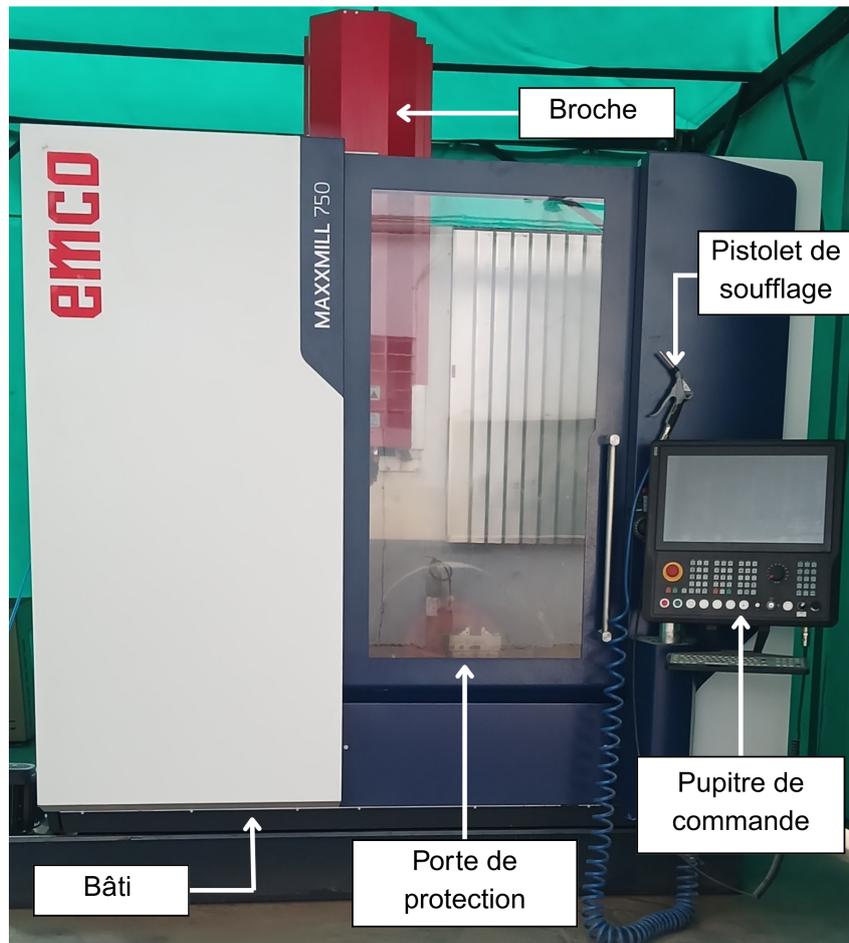


FIGURE 4.12 – Centre d'usinage vertical EMCO MAXXMILL 750

TABLE 4.6 – Caractéristiques techniques principales de la machine EMCO Maxxmill 750

Caractéristique	Valeur
Dimensions maximales des pièces usinables	530 × 530 × 417 mm
Surface de la table roto-pivotante	750 × 600 mm
Poids maximal de la pièce	jusqu'à 500 kg
Nombre de positions dans le magasin d'outils	30 outils
Vitesse de rotation – broche mécanique	50–12 000 tr/min
Vitesse de rotation – électrobroche	50–15 000 tr/min
Avances rapides (axes X, Y, Z)	30 m/min
Orientation du pupitre de commande	90°
Commande numérique	Siemens SINUMERIK ONE

4.4.2 Choix de l'outil de coupe

L'opération retenue dans le cadre de cette étude expérimentale est un surfacage de finition, réalisée en fraisage de face. Le choix de l'outil de coupe a été orienté à la fois par la nature de l'opération, la disponibilité des outils en magasin, et la nécessité d'utiliser un matériau d'outil plus dur que la pièce à usiner.

Ainsi, une fraise cylindrique monobloc à deux tailles et quatre dents, en carbure métallique, a été sélectionnée (figure 4.13). Elle est revêtue d'un dépôt de couleur cuivrée, probablement de type TiAlN (nitrure de titane-aluminium), connu pour ses propriétés de résistance à l'usure et à la chaleur. L'outil est identifié par le marquage 16D*100L-4F HRC58, indiquant un diamètre de 16 mm, une longueur totale de 100 mm, 4 dents, et une dureté adaptée à l'usinage de matériaux de dureté inférieure à 58 HRC.



FIGURE 4.13 – Fraise cylindrique à deux tailles

4.4.3 Choix des niveaux des conditions de coupe

Le choix des niveaux des conditions de coupe constitue une étape essentielle dans l'élaboration du plan d'expérience de Box-Behnken. Les paramètres considérés sont la vitesse de coupe V_c , l'avance par dent f_z et la profondeur de passe a_p , reconnus pour leur influence déterminante sur la qualité de l'état de surface lors du fraisage.

Les niveaux ont été définis en fonction du couple outil-matière disponible, à savoir un acier doux non allié qui sera usiné à l'aide d'une fraise cylindrique monobloc en carbure, revêtue de TiAlN. En l'absence d'un catalogue technique propre à la marque de l'outil utilisé, le catalogue de la fraise « 47C HPC Milling Cutter $Z = 4/5$ » de la marque INNO-TOOL a été utilisé comme référence (section D). Cette fraise présente des caractéristiques géométriques similaires : même diamètre (16 mm), même nombre de dents (4) et même matériau de base (carbure monobloc). Le revêtement diffère légèrement, sans influencer de manière significative les plages recommandées pour ce type d'application.

À partir de ce document, les plages de vitesses de coupe et d'avances par dent ont été sélectionnées pour servir respectivement de niveaux bas et haut dans le plan d'expérience. Pour la profondeur de passe, les limites ont été choisies de manière à rester dans une plage admissible compatible avec l'usinage de finition, tout en maximisant l'amplitude du facteur.

Les niveaux sélectionnés sont récapitulés dans le tableau 4.7, tandis que la matrice du plan Box-Behnken, exprimée en conditions de coupe étudiés, est présentée dans le tableau 4.8.

TABLE 4.7 – Niveaux des facteurs

Facteur	Symbole	Unité	Niveau du facteur		
			-1	0	+1
Vitesse de coupe	V_c	(m/min)	140	170	200
Avance par dent	f_z	(mm/dent)	0.05	0.09	0.13
Profondeur de passe	a_p	(mm)	0.2	0.6	1

TABLE 4.8 – Matrice du plan de Box-Behnken pour les conditions de coupe étudiés en unité courante

Ordre standard	Ordre d'exécution	V_c (m/min)	f_z (mm/dent)	a_p (mm)
1	1	140	0.05	0.6
2	2	200	0.05	0.6
3	3	140	0.13	0.6
4	4	200	0.13	0.6
5	5	140	0.09	0.2
6	7	140	0.09	1
7	6	200	0.09	0.2
8	8	200	0.09	1
9	9	170	0.05	0.2
10	10	170	0.13	0.2
11	11	170	0.05	1
12	12	170	0.13	1
13	13	170	0.09	0.6
14	14	170	0.09	0.6
15	15	170	0.09	0.6

Étant donné que la machine ne permet pas la saisie directe des conditions de coupe en termes de vitesse de coupe et d'avance par dent, il est nécessaire de les convertir en vitesse de rotation N (en tr/min) et en vitesse d'avance V_f (en mm/min). Ainsi, à partir des données du tableau 4.8 et en appliquant les équations (1.2) et (1.3), le plan opérationnel d'usinage a été établi et présenté dans le tableau 4.9.

TABLE 4.9 – Matrice du plan de Box-Behnken pour les conditions de coupe
opérationnels en unité courante

Ordre standard	Ordre d'exécution	N (tr/min)	V_f (mm/min)	a_p (mm)
1	1	2786.21	557.04	0.6
2	2	3978.87	557.04	0.6
3	3	2786.21	2069.01	0.6
4	4	3978.87	2069.01	0.6
5	5	2786.21	1313.03	0.2
6	7	2786.21	1313.03	1
7	6	3978.87	1313.03	0.2
8	8	3978.87	1313.03	1
9	9	3382.04	557.04	0.2
10	10	3382.04	2069.01	0.2
11	11	3382.04	557.04	1
12	12	3382.04	1313.03	1
13	13	3382.04	1313.03	0.6
14	14	3382.04	1313.03	0.6
15	15	3382.04	1313.03	0.6

4.4.4 Procédure de fraisage

Une fois l'outil de coupe sélectionné et le plan des essais établi, on procède à l'usinage sur la machine. La pièce (échantillon préparé) est d'abord fixée solidement sur la table à l'aide d'un étau (figure 4.14), en veillant à un bon positionnement pour garantir la stabilité durant l'usinage.

L'outil est automatiquement monté dans la broche électromécanique par le système de changement d'outil intégré à la machine, évitant toute intervention manuelle. Après l'installation, la broche est mise en rotation à vide pendant quelques minutes à vitesse maximale, afin de vérifier le bon fonctionnement mécanique de l'ensemble.

Le réglage de la position de l'outil par rapport à la pièce est effectué à l'aide d'une manivelle électronique, qui permet un déplacement fin et manuel des axes. Une fois le point de référence défini, les coordonnées de l'outil sont mises à zéro et affichées en temps réel sur le panneau de commande numérique.

Le mode de fraisage retenu pour cette opération est le fraisage en avalant, afin de favoriser une meilleure qualité de surface et de réduire les efforts de coupe. Les paramètres de coupe sont ensuite saisis via le pupitre de commande numérique : la vitesse de rotation (S), la vitesse d'avance (F), ainsi que la profondeur de passe, comme illustré dans la figure 4.15, et ce, conformément aux conditions définies dans le plan d'expérience présenté dans le tableau 4.9. La lubrification est ensuite activée pour limiter l'échauffement de l'outil et améliorer l'état de surface. Le programme d'usinage est lancé, et la machine exécute automatiquement l'opération de surfacage selon le parcours défini. Une fois l'usinage terminé,

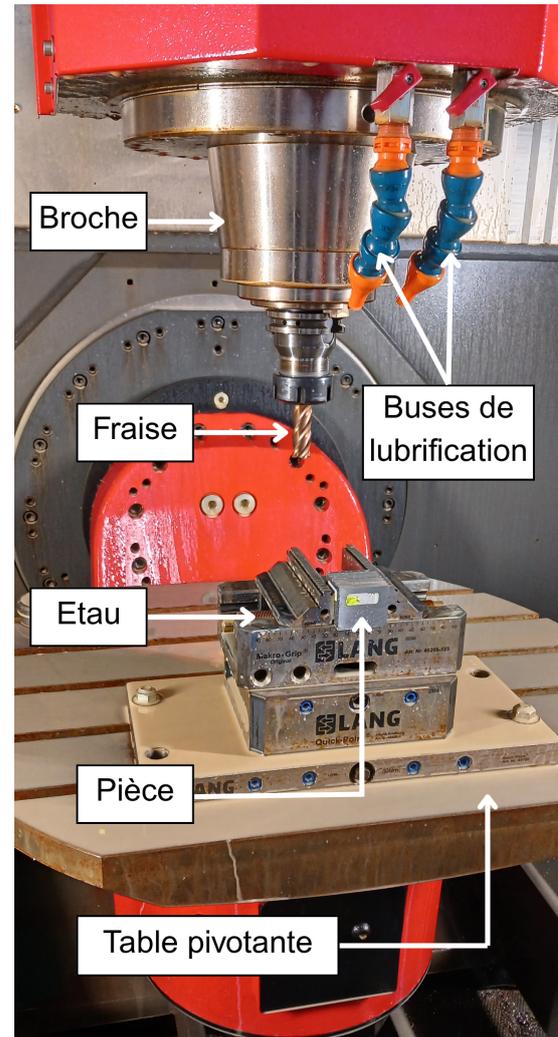


FIGURE 4.14 – Préparation à l'usinage : Outil fixé à la broche et pièce monté sur la table

l'outil est relevé et la broche est arrêtée.

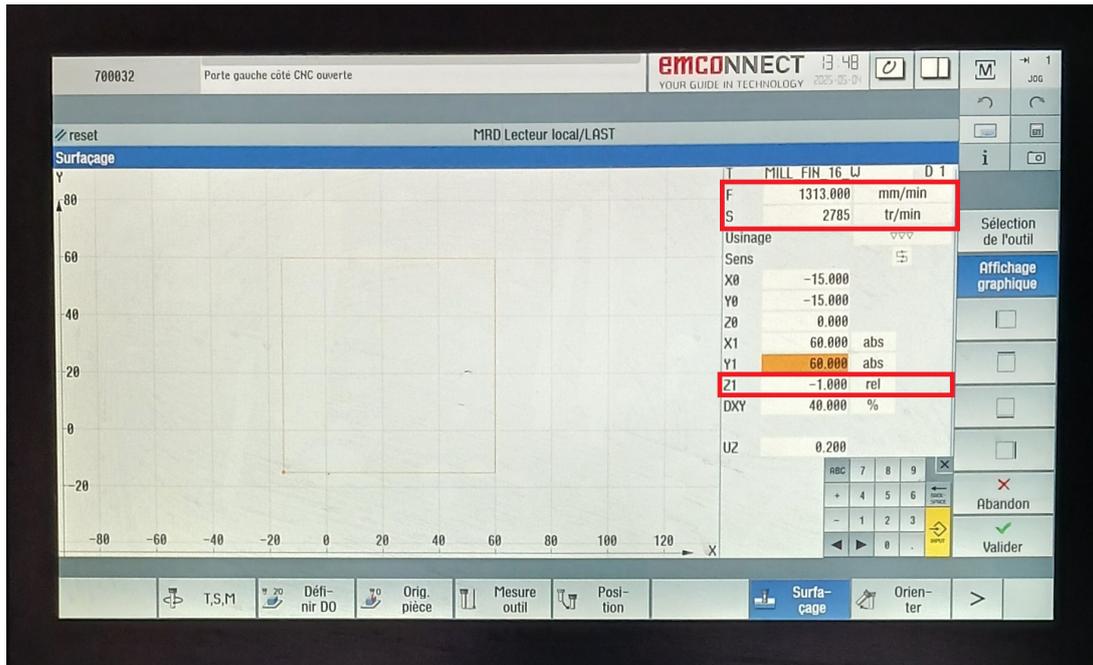


FIGURE 4.15 – Écran du pupitre de commande

La pièce usinée, comme celle illustrée dans la figure 4.16, est d'abord nettoyée à l'aide d'un pistolet de soufflage avant d'être récupérée et démontée de l'étau, une fois la porte de sécurité ouverte.

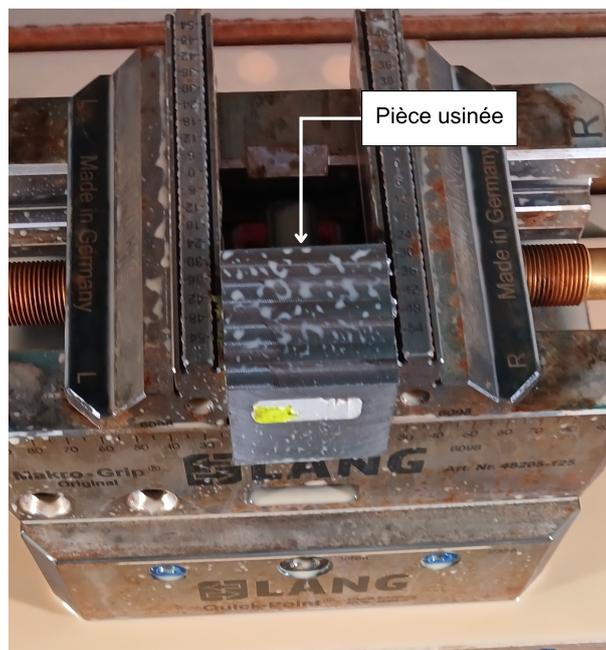


FIGURE 4.16 – Pièce usinée

4.5 Mesures de la rugosité

Pour mener à bien cette étude, les paramètres de rugosité R_a et R_z ont été retenus comme réponses principales. Afin de quantifier avec précision leurs variations en fonction des conditions de coupe, des mesures ont été réalisées au sein du Laboratoire de Métrologie du Département de Génie Mécanique de l'École Nationale Polytechnique, à l'aide d'un appareil adapté et selon des techniques spécifiques tenant compte des particularités du procédé de fraisage.

4.5.1 Moyen de mesure

Les mesures de rugosité ont été réalisées à l'aide du rugosimètre portable TESA rugosurf 10-G (figure 4.17), un appareil conçu pour l'évaluation précise de l'état de surface. Cet instrument intègre un palpeur mécanique à pointe diamantée qui se déplace linéairement sur la surface à analyser, avec une course d'évaluation de 4 mm. Les variations verticales du palpeur, causées par les aspérités de la surface, sont converties en signaux électriques, puis traitées pour déterminer les différents paramètres normés liés aux longueurs et aux motifs tels que R_a et R_z comme indiqué sur la figure 4.18.

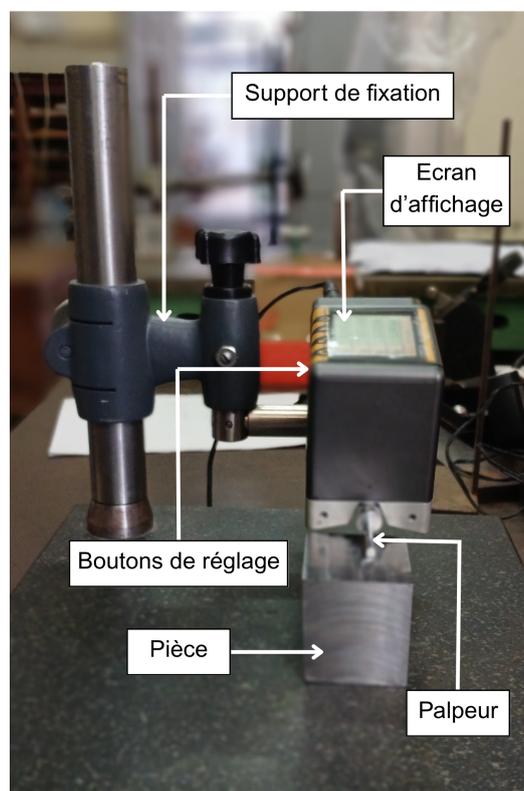


FIGURE 4.17 – Rugosimètre portable TESA rugosurf 10-G

4.5.2 Techniques de mesure

Pour chaque surface, la rugosité a été mesurée dans deux directions distinctes : dans le sens de l'avance de l'outil et dans la direction perpendiculaire à celle-ci. Conformément à la norme ISO 4288 [58], cinq relevés ont été effectués pour chaque direction, sur des positions réparties mais suffisamment proches afin d'assurer la représentativité sans introduire de dispersion excessive. Les extrémités des surfaces, correspondant aux zones d'engagement et de dégagement de l'outil, ont été exclues, car les efforts de coupe y sont plus importants, ce qui peut engendrer une surestimation de la rugosité. De plus, lors du positionnement du palpeur, les crêtes résiduelles laissées entre les passes successives de la fraise ont été soigneusement évitées. Ces dernières résultent du faible diamètre de l'outil par rapport à la largeur usinée, ce qui empêche un recouvrement complet entre les passes et génère une topographie irrégulière localisée, susceptible de fausser les mesures.



(a) Mesure dans le sens de l'avance de l'outil - paramètre Ra affiché



(b) Mesure le sens de perpendiculaire au sens d'avance de l'outil - paramètre Rz affiché

FIGURE 4.18 – Mesure de la rugosité dans deux directions à l'aide du rugosimètre TESLA rugosurf 10-G

4.6 Visualisation des surfaces par microscope optique

La visualisation des surfaces usinées a été réalisée au sein du Laboratoire de Technologie des Matériaux de l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), à l'aide du microscope optique intégré au microduromètre Wilson Hardness Tukon 1202, illustré dans la figure 4.7. Cette méthode a été privilégiée en raison des dimensions relativement importantes des échantillons, qui ne permettaient pas l'utilisation d'un microscope optique standard de paillasse.

Deux surfaces ont été examinées dans cette analyse : la première correspond à une surface d'ébauche obtenue avant l'usinage de finition, tandis que la seconde provient de la surface usinée lors du deuxième essai du plan d'expérience de BB (surfaçage CNC de finition), réalisé avec une vitesse de coupe de 200 m/min, une avance par dent de 0.05 mm/dent et une profondeur de passe de 0.6 mm.

Pour chaque cas, la surface à analyser a été orientée vers l'objectif, puis positionnée avec soin sur le plateau de l'appareil, afin d'assurer une mise au point optimale, comme illustré dans la figure 4.19. L'observation a été réalisée à l'aide de l'éclairage coaxial intégré à l'appareil, basé sur une source lumineuse blanche focalisée, permettant une analyse localisée de la microtopographie de la surface. La lumière étant dirigée perpendiculairement à la zone observée, seule une petite surface était examinée à la fois, ce qui favorise une bonne résolution optique.

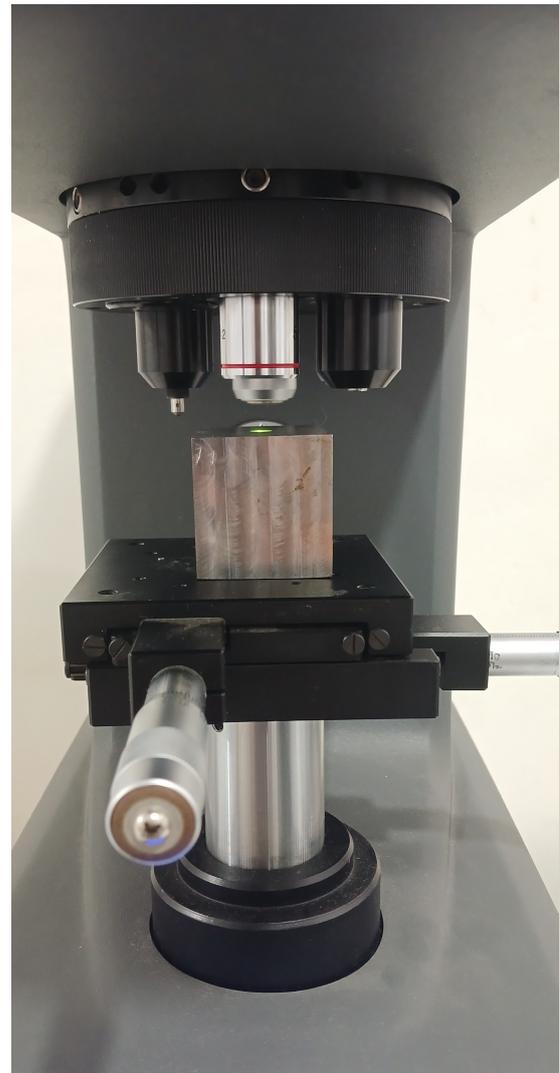


FIGURE 4.19 – Visualisation de l'état de surface par microscope optique intégré dans le microduromètre TUKON 1202

Les images ont été capturées à trois niveaux de grossissement successifs : $\times 50$, $\times 100$ et $\times 500$, conformément aux standards d'analyse qualitative de l'état de surface. Cette exploration visuelle permet de mettre en évidence les différences morphologiques entre la surface d'ébauche et celle obtenue après usinage de finition par CNC, offrant ainsi un complément pertinent aux mesures de rugosité précédemment réalisées.

4.7 Conclusion

Ce chapitre a détaillé l'ensemble des méthodes expérimentales mises en œuvre pour l'étude de l'influence des conditions de coupe sur l'état de surface. Il a couvert les étapes relatives à la préparation des échantillons, le choix de l'outil et des paramètres de coupe, ainsi que les techniques de mesure utilisées. Les résultats obtenus à l'issue de ces expérimentations seront présentés, analysés et discutés dans le chapitre suivant.

Chapitre 5

Résultats et discussions

5.1 Introduction

Ce chapitre présente et interprète les résultats expérimentaux obtenus en vue d'évaluer l'effet des conditions de coupe sur l'état de surface des pièces fraisées. L'analyse commence par la comparaison des valeurs de rugosité mesurées avant et après les essais expérimentaux (surfaçage de finition), dans deux directions de mesure, complétée par une observation visuelle des quinze surfaces usinées. Une modélisation mathématique des rugosités R_a et R_z est ensuite réalisée à partir d'un modèle quadratique complet, dont l'analyse ANOVA permet d'identifier les paramètres significatifs. Après ajustement, un modèle prédictif réduit est retenu pour étudier les interactions entre facteurs et conduire l'optimisation des paramètres de coupe à l'aide de surfaces de réponse et de courbes de contours, en vue de déterminer les conditions favorables à l'obtention d'un bon état de surface.

5.2 Analyse des mesures de la rugosité avant usinage

Les valeurs de rugosité mesurées après le surfaçage d'ébauche, avant le lancement des essais expérimentaux, sont présentées dans le tableau 5.1. On observe des valeurs moyennement élevées, avec une tendance progressive à l'augmentation de la surface 1 jusqu'à la surface 15.

Bien que les conditions de coupe aient été fixées de manière constante tout au long de l'ébauche, la vitesse de rotation a été volontairement choisie relativement faible. Ce choix visait à limiter l'usure rapide de l'outil, qui devient importante à grande vitesse en raison

de l'échauffement généré par les frottements à l'interface outil-matière. Toutefois, une vitesse de rotation trop réduite favorise, en contrepartie, la formation d'arêtes rapportées. Ce phénomène, courant dans l'usinage des matériaux ductiles, consiste en l'accumulation de matière sur l'arête de coupe, ce qui perturbe le processus d'enlèvement de matière et engendre des irrégularités sur la surface usinée.

En parallèle, des vibrations mécaniques ont été observées durant cet usinage, en raison d'un léger jeu au niveau du système de fixation de l'outil. Ces vibrations se traduisent par des micro-oscillations pendant la coupe, amplifiant la rugosité finale par l'apparition d'ondulations supplémentaires.

Ainsi, la combinaison de conditions de coupe modérées, du phénomène d'arête rapportée et des vibrations mécaniques explique les valeurs de rugosité relativement élevées mesurées lors de ce surfaçage.

TABLE 5.1 – Valeurs de la rugosité des surfaces avant usinage selon deux directions

Face	Sens des stries		Sens perpendiculaire aux stries	
	Ra (μm)	Rz (μm)	Ra (μm)	Rz (μm)
1	1.661	10.436	1.292	7.061
2	1.737	11.107	1.703	9.005
3	1.963	8.185	0.689	4.181
4	1.997	14.717	1.488	8.261
5	2.790	15.896	2.559	14.377
6	3.075	11.357	1.600	8.230
7	3.426	21.626	1.644	9.748
8	3.483	21.363	1.615	9.159
9	3.517	20.977	1.795	10.649
10	3.593	21.837	2.968	16.483
11	4.049	18.944	1.768	8.935
12	4.188	18.469	2.61	12.957
13	4.332	23.937	2.933	14.517
14	4.583	22.709	3.124	15.731
15	5.259	24.469	3.123	15.748

Les résultats du tableau 5.1 montrent aussi une différence notable entre les deux directions de mesure de la rugosité. On constate que la rugosité mesurée dans le sens des stries — autrement dit, perpendiculairement au sens d’avance de la fraise — est systématiquement plus élevée que celle mesurée dans la direction perpendiculaire aux stries. Cette observation met en évidence le caractère anisotrope de la surface usinée par fraisage en bout. Contrairement à des procédés comme le tournage ou le rabotage, où l’outil suit une trajectoire linéaire, le fraisage en bout combine une rotation de l’outil avec une translation de la pièce, ce qui génère des stries de forme cycloïdale. Ces stries ne sont donc pas parfaitement parallèles à l’axe d’avance, ce qui rend la topographie de la surface plus complexe.

Dans notre cas, les mesures révèlent que la rugosité est plus faible dans la direction perpendiculaire aux stries. Cette différence peut s’expliquer par la manière dont l’instrument de mesure interagit avec le profil de la surface : dans la direction perpendiculaire aux stries, le palpeur franchit des irrégularités plus régulières et de faible amplitude, tandis que dans le sens des stries, il suit des ondulations plus marquées dues au passage répété des arêtes de coupe. Cette anisotropie de l’état de surface, propre au fraisage, doit donc être prise en compte lors de l’analyse et de la comparaison des résultats.

5.3 Analyse des mesures de la rugosité après usinage

Le tableau 5.2 et le tableau 5.3 présentent les valeurs de rugosité R_a et R_z issues des essais expérimentaux d’usinage mesurées respectivement dans le sens de l’avance de l’outil et dans la direction perpendiculaire.

Une première observation importante concerne le comportement parallèle des deux réponses : les valeurs de R_a et R_z évoluent de manière cohérente d’un essai à l’autre. Autrement dit, lorsque R_a augmente, R_z augmente également, et inversement. Cela reflète la nature complémentaire des deux indicateurs.

On remarque également que R_z est systématiquement plus élevé que R_a . Cette différence s’explique par la définition même des deux paramètres : R_a représente l’écart moyen arithmétique des irrégularités sur toute la longueur d’évaluation, tandis que R_z correspond à la hauteur maximale entre les cinq saillies les plus hauts et les cinq creux les plus profonds du profil. R_z est ainsi plus sensible aux défauts localisés et aux irrégularités ponctuelles,

contrairement à Ra qui traduit une moyenne globale. Il est donc logique que Rz dépasse toujours Ra en valeur, ce qui est bien confirmé par les résultats obtenus.

Par ailleurs, les essais correspondant aux points centraux du plan de Box-Behnken (essais 13, 14 et 15) présentent un état de surface stable, avec des valeurs de rugosité Ra et Rz très proches les unes des autres, quel que soit le sens de mesure. Cette cohérence traduit la bonne répétabilité du procédé d'usinage ainsi que la fiabilité des mesures de rugosité. Elle confirme également que les conditions de coupe au centre du domaine expérimental conduisent à une stabilité du processus et à un état de surface relativement constant.

TABLE 5.2 – Valeurs de la rugosité des surfaces après usinage selon le sens de l'avance de la fraise

Surface	V_c (m/min)	f_z (mm/dent)	a_p (mm)	Ra (μm)	Rz (μm)
1	140	0.05	0.6	0.706	3.649
2	200	0.05	0.6	0.293	2.051
3	140	0.13	0.6	1.578	6.874
4	200	0.13	0.6	0.850	4.097
5	140	0.09	0.2	0.601	3.430
6	200	0.09	0.2	0.484	2.975
7	140	0.09	1.0	0.686	3.629
8	200	0.09	1.0	0.500	3.254
9	170	0.05	0.2	0.308	2.660
10	170	0.13	0.2	0.722	3.880
11	170	0.05	1.0	0.394	2.546
12	170	0.13	1.0	1.244	6.737
13	170	0.09	0.6	0.592	3.420
14	170	0.09	0.6	0.536	3.243
15	170	0.09	0.6	0.554	3.281

TABLE 5.3 – Valeurs de la rugosité des surfaces après usinage selon le sens perpendiculaire au sens de l’avance de la fraise

Surface	V_c (m/min)	f_z (mm/dent)	a_p (mm)	Ra (μm)	Rz (μm)
1	140	0.05	0.6	0.471	2.590
2	200	0.05	0.6	0.273	1.717
3	140	0.13	0.6	1.166	5.635
4	200	0.13	0.6	0.500	3.058
5	140	0.09	0.2	0.417	2.518
6	200	0.09	0.2	0.324	1.914
7	140	0.09	1.0	0.523	2.855
8	200	0.09	1.0	0.364	2.129
9	170	0.05	0.2	0.297	2.126
10	170	0.13	0.2	0.444	2.999
11	170	0.05	1.0	0.389	2.300
12	170	0.13	1.0	0.926	5.054
13	170	0.09	0.6	0.282	1.792
14	170	0.09	0.6	0.292	1.796
15	170	0.09	0.6	0.283	1.866

D’autre part, l’analyse des combinaisons de paramètres montre clairement que certaines conditions de coupe entraînent des niveaux de rugosité plus élevés. C’est le cas notamment des essais 3, 4 et 12, qui partagent un point commun : une avance par dent élevée (0.13 mm/dent), bien que les autres paramètres (vitesse de coupe et profondeur de passe) varient. À l’inverse, les essais 2, 9 et 11, réalisés avec une avance par dent plus faible de 0.05 mm/dent, présentent les valeurs de rugosité les plus faibles. Cette tendance est observée de manière similaire pour les deux directions de mesure, ce qui suggère une influence notable de l’avance par dent sur la qualité de surface.

L’analyse comparative de certaines paires d’essais met également en évidence le rôle conditionnel de la profondeur de passe. En effet, pour des combinaisons où l’avance par dent et la vitesse de coupe sont identiques – comme dans les essais 5 et 7, 6 et 8, ainsi que 9 et 11 – les variations de la profondeur de passe n’induisent que de faibles écarts sur

les valeurs de R_a et R_z . Cela suggère que l'effet de ce paramètre est relativement limité lorsque l'avance est faible à modérée. En revanche, dans les essais 10 et 12, tous deux réalisés avec une avance élevée (0.13 mm/dent), la profondeur de passe semble avoir un effet plus significatif sur la rugosité mesurée. Ce constat laisse penser que l'influence de la profondeur de passe dépend fortement du niveau d'avance appliqué.

Ces premières observations seront approfondies dans les sections suivantes, à travers la modélisation mathématique des réponses et l'analyse ANOVA, afin de quantifier précisément l'effet de chaque paramètre et de leurs interactions.

5.4 Analyse visuelle des états de surfaces

La figure 5.1 regroupe les photographies des 15 surfaces obtenues après le surfacage de finition réalisé sur la machine CNC, dans le cadre des essais expérimentaux. L'analyse visuelle de ces surfaces permet de compléter les résultats métrologiques, en apportant des éléments qualitatifs sur l'aspect et la régularité des états de surface générés.

Toutes les surfaces présentent des stries visibles, caractéristiques du fraisage en bout. Ces stries, de forme cycloïdale, résultent du mouvement combiné de rotation et d'avance de l'outil. Bien qu'elles soient nettement perceptibles à l'œil, elles ne sont pas détectables au toucher, en raison de leur faible profondeur et de leur régularité. Ce contraste s'explique par le fait que la rugosité mesurée reste dans des plages faibles ($R_a < 3 \mu\text{m}$), ce qui donne à la surface un aspect visuel texturé mais une sensation lisse au contact. En effet, l'œil humain peut percevoir des variations d'altitude de l'ordre de quelques microns à travers la réflexion de la lumière, notamment sur des surfaces métalliques brillantes, alors que le doigt ne détecte généralement que des irrégularités de plus grande amplitude.

Par ailleurs, aucune bavure ou arrachement de matière n'a été observé, ce qui atteste de la qualité du procédé d'usinage et de la stabilité du système outil-pièce-machine. La brillance des surfaces est globalement homogène, et l'on observe, sur l'ensemble des pièces, des bandes parallèles légèrement décalées correspondant aux passes successives de l'outil en largeur, dues à un recouvrement partiel des passes (diamètre de l'outil inférieur à la largeur de la pièce).

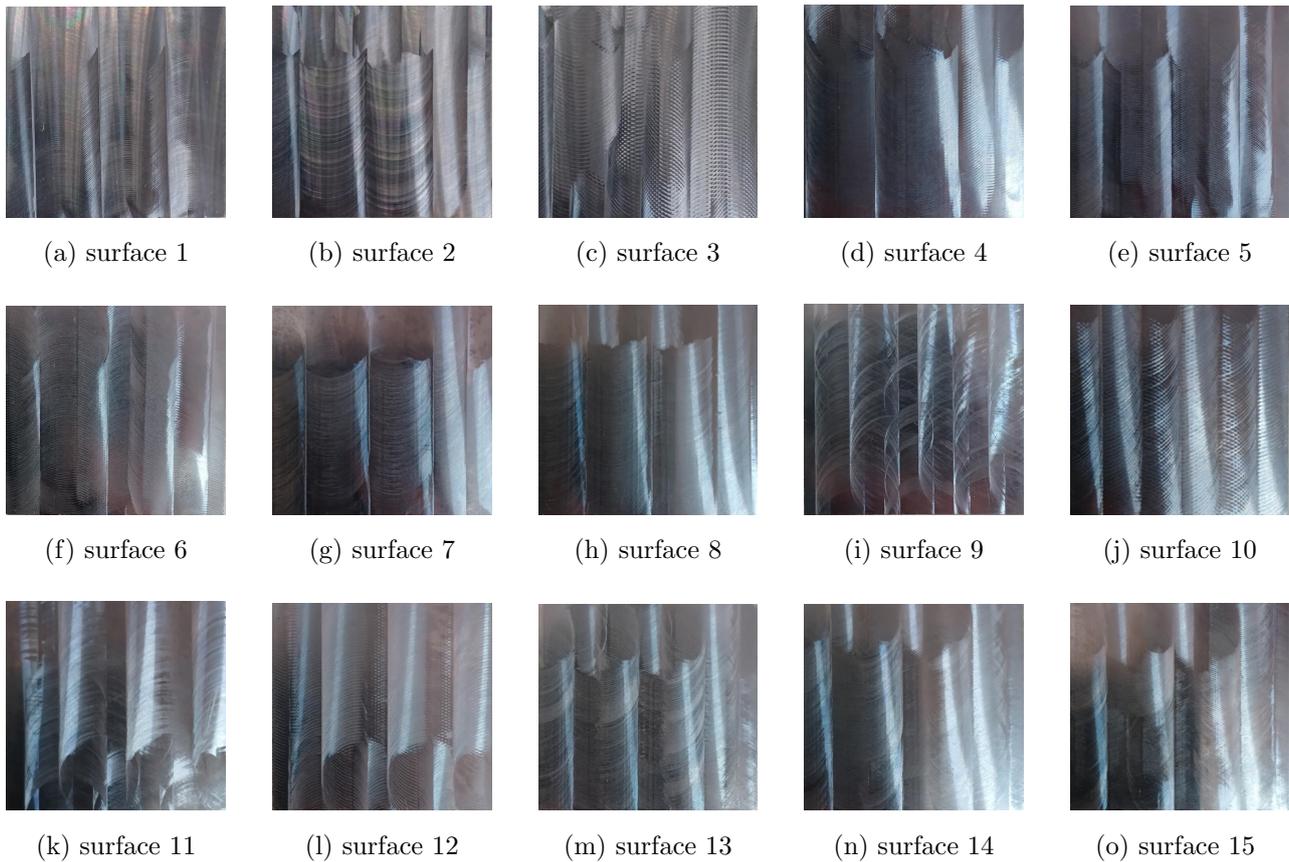


FIGURE 5.1 – Images des surfaces obtenues par les 15 essais expérimentaux

Certaines surfaces présentent toutefois un état visuel distinct. Les surfaces 3, 4, 10 et 12 (figure 5.1c, figure 5.1d, figure 5.1j et figure 5.1l) apparaissent plus rugueuses, avec des stries plus larges et des irrégularités plus prononcées, ce qui est cohérent avec les valeurs numériques élevées de R_a et R_z relevées précédemment. Ce niveau de rugosité visuelle peut être attribué à des combinaisons de conditions de coupe plus agressives, notamment une avance par dent élevée. À l'inverse, les surfaces 2, 9 et 11 (figure 5.1b, figure 5.1i et figure 5.1k) présentent un état de surface nettement plus homogène et lisse, avec des stries fines et resserrées. Ces surfaces, visuellement brillantes et sans défauts, traduisent une excellente qualité de surfacage, en cohérence avec les rugosités minimales mesurées numériquement. Il est à noter que l'effet de diffraction lumineuse observé sur ces surfaces (reflets arc-en-ciel) peut être lié à la régularité microscopique du profil, typique des surfaces très bien usinées.

Les surfaces 13, 14 et 15 (figure 5.1m, figure 5.1n et figure 5.1o), correspondant aux points centraux du plan d'expériences, présentent également un état de surface visuellement ho-

mogène et similaire. Cet aspect uniforme reflète la stabilité du processus dans la zone centrale du domaine expérimental, et vient corroborer la cohérence des valeurs de rugosité relevées sur ces trois essais.

Globalement, cette analyse visuelle vient renforcer les résultats quantitatifs de rugosité et illustre l'effet des paramètres de coupe sur l'aspect final de la surface usinée.

5.5 Analyse statistique

Avant d'aborder l'analyse statistique, il est important de justifier le choix de limiter l'étude aux rugosités mesurées dans le sens de l'avance de l'outil. Ce choix repose sur les considérations suivantes :

- Le sens de l'avance correspond à la direction influencée directement par le paramètre d'avance par dent, qui peut être contrôlé lors de l'usinage. Il est donc plus pertinent d'étudier l'effet des conditions de coupe dans cette direction, car elle est liée à un paramètre effectivement maîtrisable.
- Les résultats expérimentaux présentés dans le tableau 5.2 et le tableau 5.3 montrent que les valeurs de R_a et R_z sont systématiquement plus élevées dans le sens de l'avance que dans le sens perpendiculaire. Il est donc logique de chercher à optimiser la rugosité dans cette direction, car elle représente le cas le plus critique.
- L'analyse des résultats révèle un comportement parallèle entre les deux directions : toute augmentation (ou diminution) de la rugosité dans le sens de l'avance est accompagnée d'une évolution similaire dans le sens perpendiculaire. L'optimisation dans une direction conduit ainsi à une amélioration globale de l'état de surface.

5.5.1 Modèles quadratiques complets

Les modèles quadratiques complets de la rugosité R_a et R_z ont été établis à partir des résultats des 15 essais du plan de Box-Behnken, en utilisant le logiciel Minitab 21.

Les données expérimentales ont été saisies dans le logiciel afin de modéliser la relation entre la rugosité et les trois paramètres de coupe.

5.5.1.1 Modèle quadratique complet pour la rugosité Ra

Le modèle quadratique complet obtenu pour la rugosité Ra (en unités réelles) est donné par l'équation (5.1).

$$\begin{aligned} \text{Ra} = & 3.87 - 0.0364 V_c - 6.8 f_z + 0.54 a_p + 0.000109 V_c^2 + 123.5 f_z^2 \\ & - 0.571 a_p^2 - 0.0656 V_c f_z - 0.00144 V_c a_p + 6.81 f_z a_p \end{aligned} \quad (5.1)$$

TABLE 5.4 – Récapitulatif du modèle quadratique complet de la réponse Ra

Paramètre	R^2	R_A^2	$R_{\text{prév}}^2$
Valeur	92.41 %	78.74 %	0.00 %

TABLE 5.5 – Table d'ANOVA pour le modèle quadratique complet de la réponse Ra

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur de F	Valeur de t	Valeur de p
Modèle	9	1.52075	0.168972	6.76		0.024
Linéaires	3	1.23001	0.410003	16.41		0.005
V_c	1	0.26064	0.260642	10.43	-3.23	0.023
f_z	1	0.90653	0.906531	36.28	6.02	0.002
a_p	1	0.06284	0.062835	2.51	1.59	0.174
Carré	3	0.21722	0.072407	2.90		0.141
V_c^2	1	0.03576	0.035763	1.43	1.20	0.285
f_z^2	1	0.14427	0.144266	5.77	2.40	0.061
a_p^2	1	0.03080	0.030800	1.23	-1.11	0.317
Interaction à 2	3	0.07352	0.024507	0.98		0.472
$V_c * f_z$	1	0.02481	0.024806	0.99	-1.00	0.365
$V_c * a_p$	1	0.00119	0.001190	0.05	-0.22	0.836
$f_z * a_p$	1	0.04752	0.047524	1.90	1.38	0.226
Erreur	5	0.12495	0.024990			
Manque d'ajust	3	0.12331	0.041105	50.29		0.020
Erreur pure	2	0.00163	0.000817			
Total	14	1.64570				

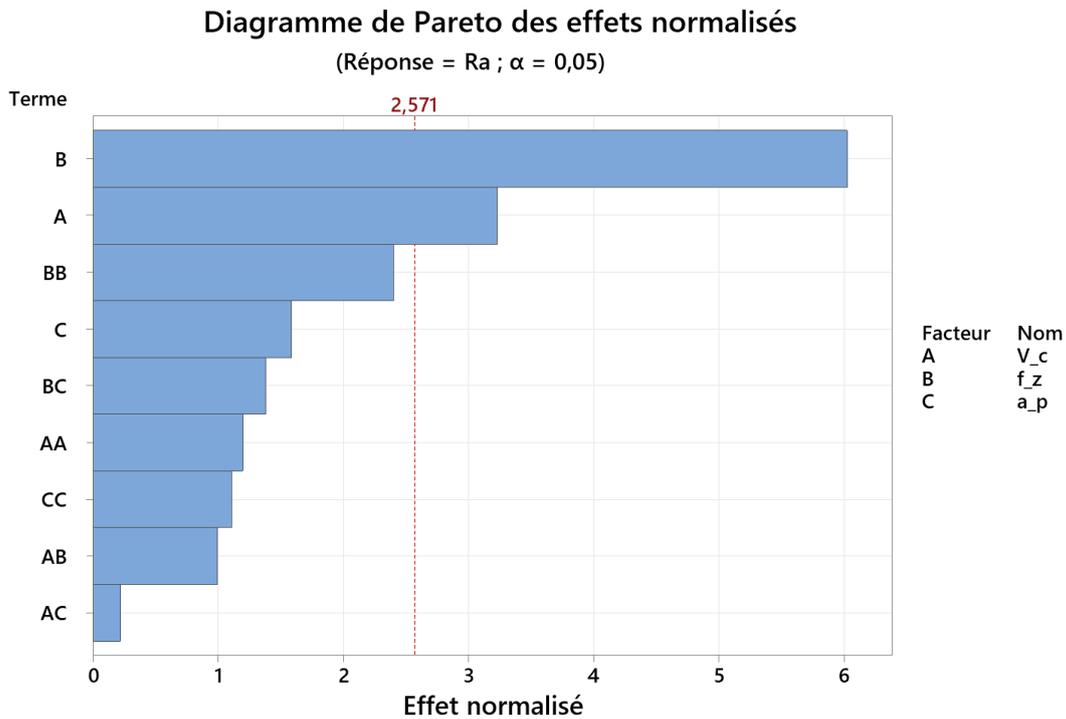


FIGURE 5.2 – Diagramme de Pareto des effets normalisés pour le modèle quadratique complet de Ra

Le modèle quadratique complet obtenu pour la rugosité Ra présente une bonne capacité d'ajustement aux données expérimentales, avec un coefficient de détermination de R^2 de 92.41 % et un coefficient de détermination ajusté R_A^2 de 78.74 %, ce qui indique qu'une grande partie de la variabilité de la rugosité Ra est expliquée par les termes inclus dans ce modèle.

De plus, les résultats de l'ANOVA (tableau 5.5) montrent que la valeur de p associée à ce modèle est de 0.024, ce qui confirme que le modèle est statistiquement significatif au seuil de 5 %.

Cependant, malgré cette significativité globale, le coefficient de prédiction $R_{\text{prév}}^2$ de 0.00 % relève d'une incapacité totale du modèle à prévoir correctement des observations hors l'ensemble d'apprentissage. Cette faiblesse est probablement due à la présence de nombreux termes non significatifs (termes quadratiques et interactions), qui augmentent la complexité du modèle sans contribuer efficacement à la prédiction.

Ce phénomène traduit un surajustement : le modèle colle bien aux données disponibles mais ne généralise pas. Ainsi, bien que le modèle soit valide sur le plan statistique global, il n'est pas exploitable dans une démarche prédictive fiable.

D'autre part, en s'appuyant sur le diagramme de Pareto pour la réponse Ra, qui classe les effets du moins influent (en bas) au plus influent (en haut) (figure 5.2), ainsi que sur les résultats de l'ANOVA (tableau 5.5), on constate que parmi les effets simples, f_z est le facteur le plus significatif sur le plan statistique. Elle présente une valeur de p de 0.002 (inférieure à 0.05), une valeur de F de 36.28 (supérieure à la valeur critique de 6.61, voir section E), ainsi qu'une valeur de t égale à 6.02 (également supérieure à la valeur critique de 2.571, voir section F). Elle est suivie par V_c , avec une valeur de p égale à 0.023, F égale à 10.43 et t égale à -3.23 (dont la valeur absolue dépasse la valeur critique).

En revanche, a_p , les termes quadratiques, ainsi que les interactions n'ont pas d'effet significatif sur la réponse Ra, comme l'indiquent leurs valeurs de p supérieures à 0.05. Ce constat est cohérent avec la valeur prédictive $R_{\text{prév}}^2$ nulle du modèle.

On remarque également que les termes présentant la plus faible significativité statistique sont les interactions $V_c \times a_p$ et $V_c \times f_z$ caractérisés par les valeurs de p les plus élevées et les valeurs de F et de t les plus faibles. Cela confirme leur faible influence sur la réponse Ra et justifie leur éventuelle élimination lors de la simplification du modèle.

5.5.1.2 Modèle quadratique complet pour la rugosité Rz

Le modèle quadratique complet obtenu pour la rugosité Rz (en unités réelles) est donné par l'équation (5.2).

$$\begin{aligned} Rz = & 9.4 - 0.042 V_c - 36.3 f_z - 2.69 a_p + 0.000122 V_c^2 + 465 f_z^2 \\ & - 0.64 a_p^2 - 0.246 V_c f_z + 0.0017 V_c a_p + 46.4 f_z a_p \end{aligned} \quad (5.2)$$

TABLE 5.6 – Récapitulatif du modèle quadratique complet de la réponse Rz

Paramètre	R^2	R_A^2	$R_{\text{prév}}^2$
Valeur	91.38 %	75.86 %	0.00 %

TABLE 5.7 – Table d'ANOVA pour le modèle quadratique complet de la réponse Rz

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur de F	Valeur de t	Valeur de p
Modèle	9	23.6527	2.6281	5.89		0.033
Linéaires	3	18.9465	6.3155	14.15		0.007
V _c	1	3.3865	3.3865	7.59	-2.75	0.040
f _z	1	14.2631	14.2631	31.95	5.65	0.002
a _p	1	1.2969	1.2969	2.91	1.70	0.149
Carré	3	2.1504	0.7168	1.61		0.300
V _c ²	1	0.0444	0.0444	0.10	0.32	0.765
f _z ²	1	2.0406	2.0406	4.57	2.14	0.086
a _p ²	1	0.0387	0.0387	0.09	-0.29	0.780
Interaction à 2	3	2.5558	0.8519	1.91		0.246
V _c * f _z	1	0.3475	0.3475	0.78	-0.88	0.418
V _c * a _p	1	0.0016	0.0016	0.00	0.06	0.955
f _z * a _p	1	2.2067	2.2067	4.94	2.22	0.077
Erreur	5	2.2320	0.4464			
Manque d'ajust	3	2.2146	0.7382	85.02		0.012
Erreur pure	2	0.0174	0.0087			
Total	14	25.8847				

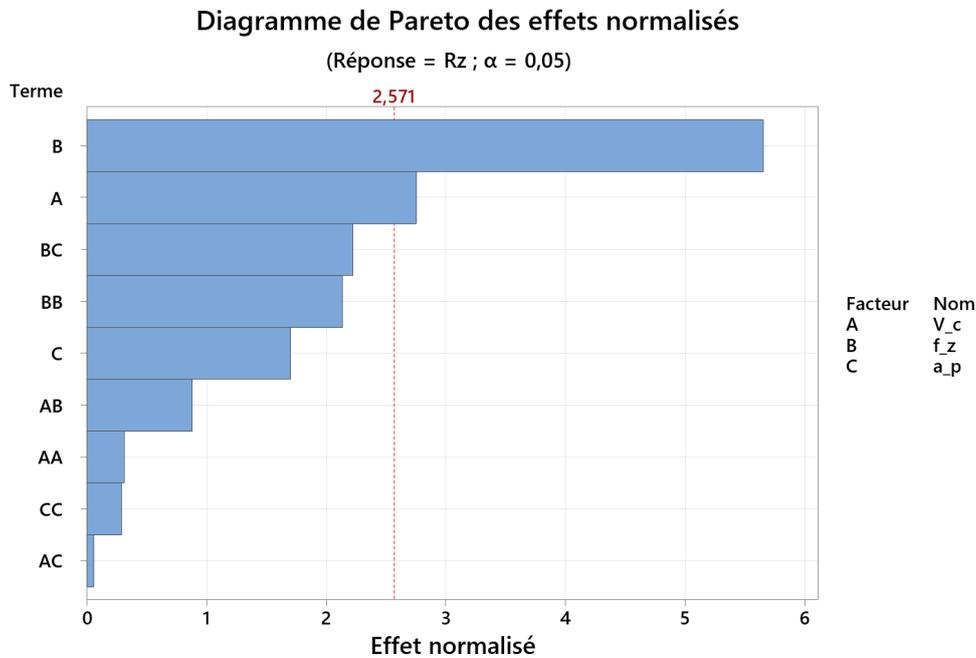


FIGURE 5.3 – Diagramme de Pareto des effets normalisés pour le modèle quadratique complet de Rz

Le modèle quadratique complet établi pour la rugosité Rz présente également un bon ajustement aux données expérimentales, avec un R^2 de 91.38 % et un R_A^2 de 75.86 %, ce qui témoigne d'une bonne capacité explicative.

L'analyse ANOVA associée (tableau 5.7) indique une valeur de p globale de 0.033, inférieure au seuil de 5 %, ce qui confirme la significativité statistique globale du modèle.

Cependant, à l'instar du modèle de Ra, le coefficient de prédiction $R_{\text{prév}}^2$ égale à 0.00 % signale une absence totale de pouvoir prédictif en dehors des données d'origine. Cette limitation s'explique, là encore, par la présence de nombreux termes non significatifs dans le modèle, qui nuisent à sa capacité de généralisation.

Le modèle présente donc d'un surajustement. Ainsi, malgré sa validité statistique, le modèle quadratique complet de Rz nécessite une simplification pour devenir exploitable dans un cadre prédictif.

D'autre part, en s'appuyant sur le diagramme de Pareto pour la réponse Rz (figure 5.3), ainsi que sur les résultats de l'ANOVA (tableau 5.7), on constate que parmi les effets simples, f_z est le facteur le plus significatif sur le plan statistique. Elle présente une valeur de p égale à 0.002, une valeur de F égale à 31.95 ainsi qu'une valeur de t égale à 5.65. Elle est suivie par V_c , avec une valeur de p égale à 0.040, F égale à 7.59 et t égale à -2.75. Ce qui est déjà remarqué pour la réponse Ra.

En revanche, a_p , les termes quadratiques, ainsi que les interactions n'ont pas d'effet significatif sur la réponse Rz, comme en témoignent leurs valeurs de p supérieures à 0.05. Ce constat est en cohérence avec la valeur prédictive $R_{\text{prév}}^2$ de 0.00 %, indiquant que parmi ces termes, il existe des termes qui doivent être exclus pour améliorer le modèle.

On remarque également que les termes présentant la plus faible significativité statistique sont l'interaction $V_c \times a_p$ et les termes quadratiques V_c^2 et a_p^2 , avec les plus grandes valeurs de p (respectivement 0.955, 0.765 et 0.780), ainsi que les valeurs de F et de t les plus faibles. Cela confirme leur influence négligeable sur la réponse Rz et justifie leur suppression lors de la réduction du modèle.

5.5.2 Modèles ajustés

Le modèle quadratique complet a été retenu dans un premier temps afin de représenter l'ensemble des effets linéaires, quadratiques et d'interaction des paramètres de coupe sur la rugosité. Bien que les indicateurs globaux d'ajustement soient satisfaisants, le test du manque d'ajustement révèle une valeur de p inférieure à 0.05, associée à un coefficient de prédiction $R_{\text{prév}}^2$ nul. Cela indique que le modèle, bien qu'adéquat pour les données expérimentales, ne permet pas de prédire efficacement en dehors de celles-ci. D'où la nécessité de proposer un modèle réduit, plus parcimonieux, mais avec de meilleures capacités prédictives.

Les modèles mathématiques ajustés, exprimant les réponses R_a et R_z en fonction des facteurs V_c , f_z et a_p , ont été obtenus en éliminant les termes les moins significatifs identifiés précédemment pour chaque cas. Cette simplification vise à améliorer les coefficients R_A^2 et $R_{\text{prév}}^2$, tout en réduisant le manque d'ajustement.

5.5.2.1 Modèle ajusté pour la rugosité R_a

Le modèle ajusté de la réponse R_a , obtenu après élimination des termes non significatifs $V_c \times a_p$ et $V_c \times f_z$ du modèle quadratique complet, est présenté par l'équation (5.3).

$$R_a = 3.87 - 0.0364 V_c - 6.8 f_z + 0.54 a_p + 0.000109 V_c^2 + 123.5 f_z^2 - 0.571 a_p^2 + 6.81 f_z a_p \quad (5.3)$$

TABLE 5.8 – Récapitulatif du modèle ajusté de la réponse R_a

Paramètre	R^2	R_A^2	$R_{\text{prév}}^2$
Valeur	90.83 %	81.66 %	50.53 %

TABLE 5.9 – Table d'ANOVA pour le modèle ajusté de la réponse Ra

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur de F	Valeur de t	Valeur de p
Modèle	7	1.49475	0.213536	9.90		0.004
Linéaires	3	1.23001	0.410003	19.01		0.001
V _c	1	0.26064	0.260642	12.09	-3.48	0.010
f _z	1	0.90653	0.906531	42.04	6.48	0.000
a _p	1	0.06284	0.062835	2.91	1.71	0.132
Carré	3	0.21722	0.072407	3.36		0.085
V _c ²	1	0.03576	0.035763	1.66	1.29	0.239
f _z ²	1	0.14427	0.144266	6.69	2.59	0.036
a _p ²	1	0.03080	0.030800	1.43	-1.20	0.271
Interaction à 2	1	0,04752	0,047524	2,20		0,181
f _z * a _p	1	0.04752	0.047524	2.20	1.48	0.181
Erreur	7	0.15095	0.021564			
Manque d'ajust	5	0.14931	0.029862	36.54		0.027
Erreur pure	2	0.00163	0.000817			
Total	14	1.64570				

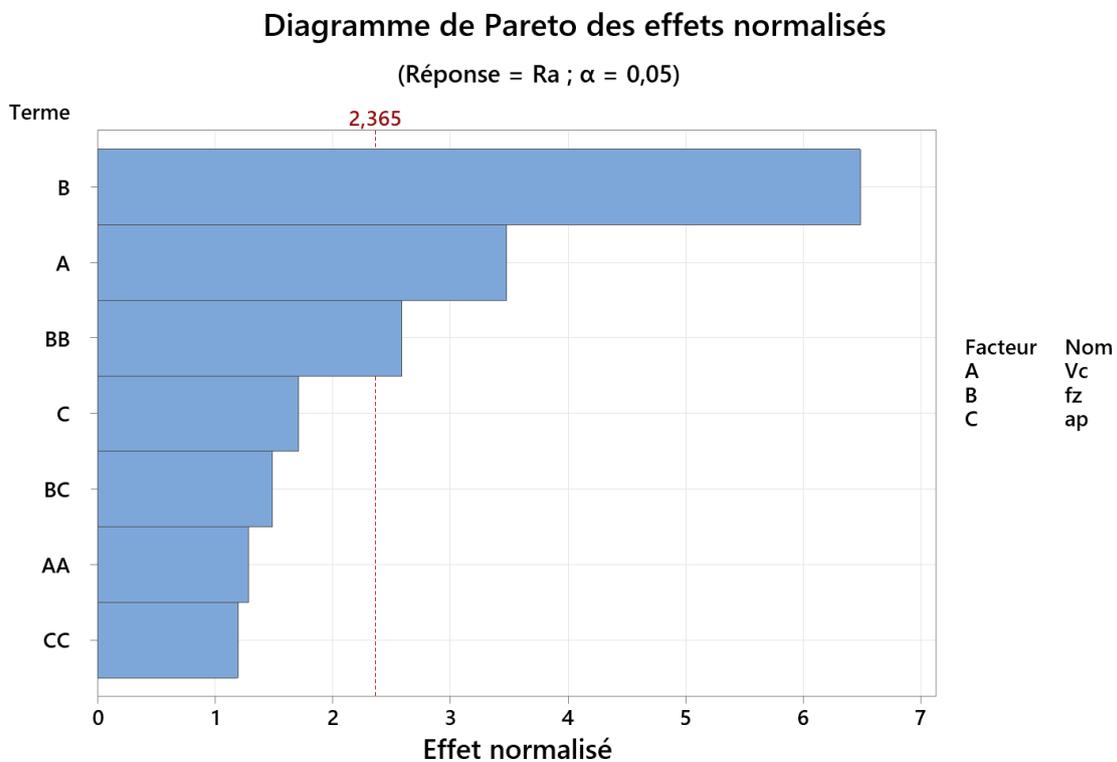


FIGURE 5.4 – Diagramme de Pareto des effets normalisés pour le modèle ajusté de Ra

Le modèle ajusté de la réponse Ra montre de bonnes performances globales d'ajustement :

- $R^2 = 90.83 \%$, ce qui traduit une forte proportion de la variance expliquée. Il est à noter que la légère diminution de ce coefficient, par rapport au modèle complet, est un phénomène attendu : en effet, R^2 a tendance à croître avec l'ajout de termes (même non pertinents) et à décroître lorsqu'on les élimine.
- $R_A^2 = 81.66 \%$, une nette amélioration par rapport au modèle complet, ce qui confirme la pertinence des termes retenus.
- $R_{\text{prév}}^2 = 50.53 \%$, révélant une capacité prédictive modérée mais significative, contrairement au modèle complet dont le pouvoir prédictif était nul. Ce qui reflète une amélioration sensible de la capacité de prédiction.

La table d'ANOVA associée (tableau 5.9) indique une valeur de p du modèle de 0.004, bien inférieure au seuil de 5 %, avec une valeur de F égale à 9.90, bien supérieure à la valeur critique de 3.79. Cela confirme la significativité statistique globale du modèle ajusté.

En s'appuyant sur le diagramme de Pareto correspondant (figure 5.4) et sur les résultats de l'ANOVA (tableau 5.9), les effets les plus influents sur la rugosité Ra peuvent être classés comme suit :

- L'avance par dent f_z est le facteur le plus influent, avec une valeur de p de 0.000, une valeur de F de 42.04 et un t de 6.48, dépassant largement les seuils critiques ($F > 5.59$, $t > 2.365$).
- Elle est suivie par la vitesse de coupe V_c , également significative, avec une valeur de p de 0.010, une valeur de F de 12.09 et une valeur de t de 3.48, confirmant son impact sur la rugosité.
- Le terme quadratique f_z^2 est lui aussi significatif ($p = 0.036$, $F = 6.69$, $t = 2.59$), ce qui justifie son maintien dans le modèle ajusté.
- La profondeur de passe a_p , bien que non significative au sens strict ($p = 0.132$, $F = 2.91 < 6.61$, $t = 1.71 < 2.365$), reste incluse dans le modèle en raison de son rôle en tant que paramètre de coupe étudié et de son effet modéré sur la réponse.

- Les autres termes, tels que V_c^2 , a_p^2 et l'interaction $f_z \times a_p$, présentent des valeurs de p supérieures à 0.05, traduisant une contribution statistiquement moins marquée.

5.5.2.2 Modèle ajusté pour la rugosité Rz

Le modèle ajusté de la réponse Rz est donné par l'équation (5.4).

$$Rz = 5.91 + 0.0004 V_c - 36.3 f_z - 3.17 a_p + 464 f_z^2 - 0.246 V_c f_z + 46.4 f_z a_p \quad (5.4)$$

TABLE 5.10 – Récapitulatif du modèle ajusté de la réponse Rz

Paramètre	R^2	R_A^2	$R_{\text{prév}}^2$
Valeur	91.02 %	84.29 %	55.38 %

TABLE 5.11 – Table d'ANOVA pour le modèle ajusté de la réponse Rz

Source	DL	SomCar ajust	CM ajust	Valeur de F	Valeur de t	Valeur de p
Modèle	6	23.5611	3.9269	13.52		0.001
Linéaires	3	18.9465	6.3155	21.74		0.000
V_c	1	3.3865	3.3865	11.66	-3.41	0.009
f_z	1	14.2631	14.2631	49.11	7.01	0.000
a_p	1	1.2969	1.2969	4.47	2.11	0.068
Carré	1	2.0604	2.0604	7.09		0.029
f_z^2	1	2.0604	2.0604	7.09	2.66	0.29
Interaction à 2	2	2.5542	1.2771	4.40		0.051
$V_c * f_z$	1	0.3475	0.3475	1.20	-1.09	0.306
$f_z * a_p$	1	2.2067	2.2067	7.60	2.76	0.025
Erreur	8	2.3236	0.2904			
Manque d'ajust	6	2.3062	0.3844	44.27		0.022
Erreur pure	2	0.0174	0.0087			
Total	14	25.8847				

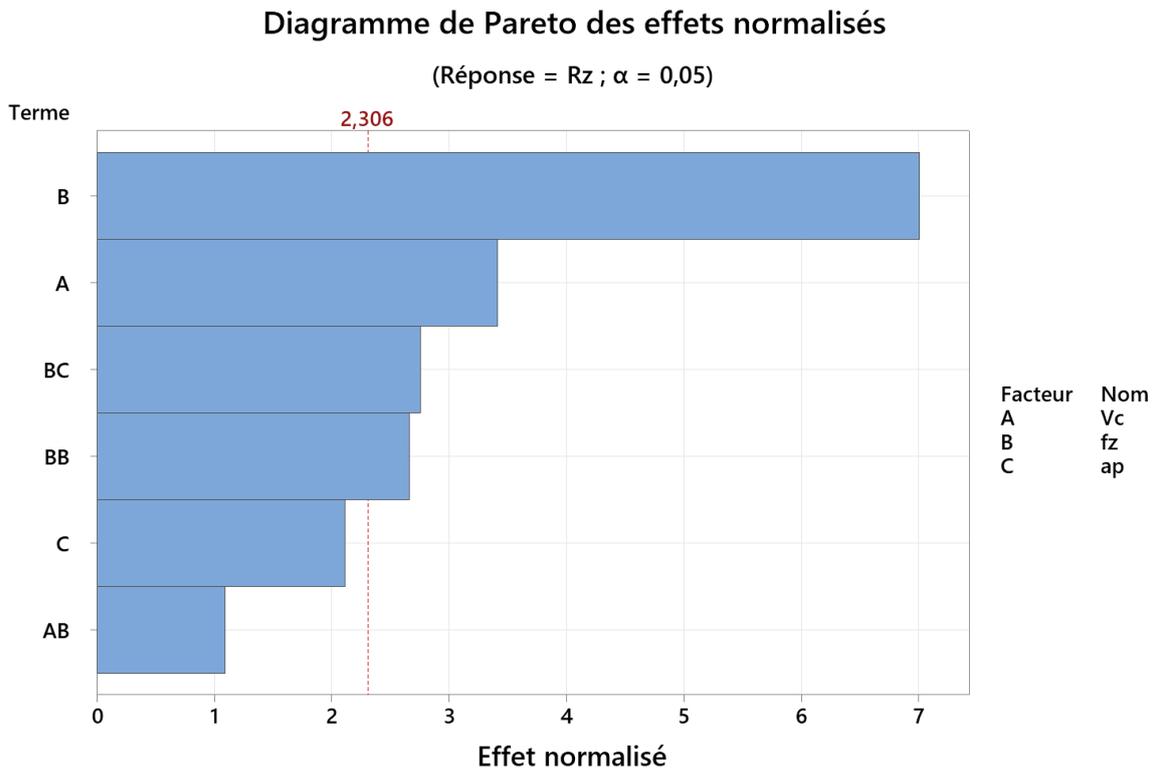


FIGURE 5.5 – Diagramme de Pareto des effets normalisés pour le modèle ajusté de Rz

Le modèle ajusté de la rugosité Rz présente de très bonnes performances globales selon le tableau 5.10 :

- $R^2 = 91.02\%$ indique que plus de 90 % de la variabilité de la rugosité Rz est expliquée par le modèle. Comme attendu, cette valeur est légèrement inférieure à celle du modèle complet, ce qui est cohérent avec l'élimination de certains termes peu pertinents.
- $R_A^2 = 84.29\%$ traduit une amélioration nette par rapport au modèle complet, confirmant que les termes conservés dans ce modèle apportent une explication pertinente sans complexité inutile.
- $R_{prév}^2 = 55.38\%$ révèle une capacité de prédiction raisonnable, bien meilleure que celle du modèle complet, renforçant l'intérêt de cette version ajustée dans une perspective prédictive.

L'analyse de la table d'ANOVA (tableau 5.11) montre que la valeur de p associée au modèle est de 0.001, très inférieure au seuil de 5 %. La statistique de Fisher est de 13.52, largement supérieure à la valeur critique de 3.58. Cela confirme que le modèle ajusté est statistiquement significatif.

À partir du diagramme de Pareto correspondant (figure 5.5) et des résultats de l'ANOVA, les effets peuvent être classés par ordre d'influence décroissante sur la rugosité Rz comme suit :

- L'avance par dent f_z est de loin le facteur le plus déterminant, avec une valeur de p de 0.000, une valeur de F de 49.11 et une valeur de t de 7.01 ($F > 5.32$, $t > 2.306$).
- La vitesse de coupe V_c suit, avec une valeur de p de 0.009, une valeur de F de 11.66 et une valeur de t de -3.41, indiquant un effet statistiquement significatif.
- L'interaction $f_z \times a_p$ est également significative ($p = 0.025$, $F = 7.60$, $t = 2.76$), ce qui justifie son inclusion. Cela est conforme avec l'observation déjà faite pendant l'analyse des mesures de la rugosité des surfaces après l'usinage.
- Le terme quadratique f_z^2 présente un effet non négligeable ($p = 0.029$, $F = 7.09$, $t = 2.66$).
- La profondeur de passe a_p a un effet modéré ($p = 0.068$, $F = 4.47$, $t = 2.11$), proche des seuils critiques (5 % pour p, 5.32 pour F, 2.306 pour t). Bien qu'elle ne franchisse pas strictement ces seuils, elle reste pertinente en tant que paramètre de coupe étudié.
- Enfin, l'interaction $V_c \times f_z$ est le facteur le moins influent, avec une valeur de p de 0.306, une valeur de F de 1.20 et une valeur de t de -1.09, bien en deçà des seuils requis.

5.5.2.3 Analyse des résidus pour la rugosité Ra et Rz

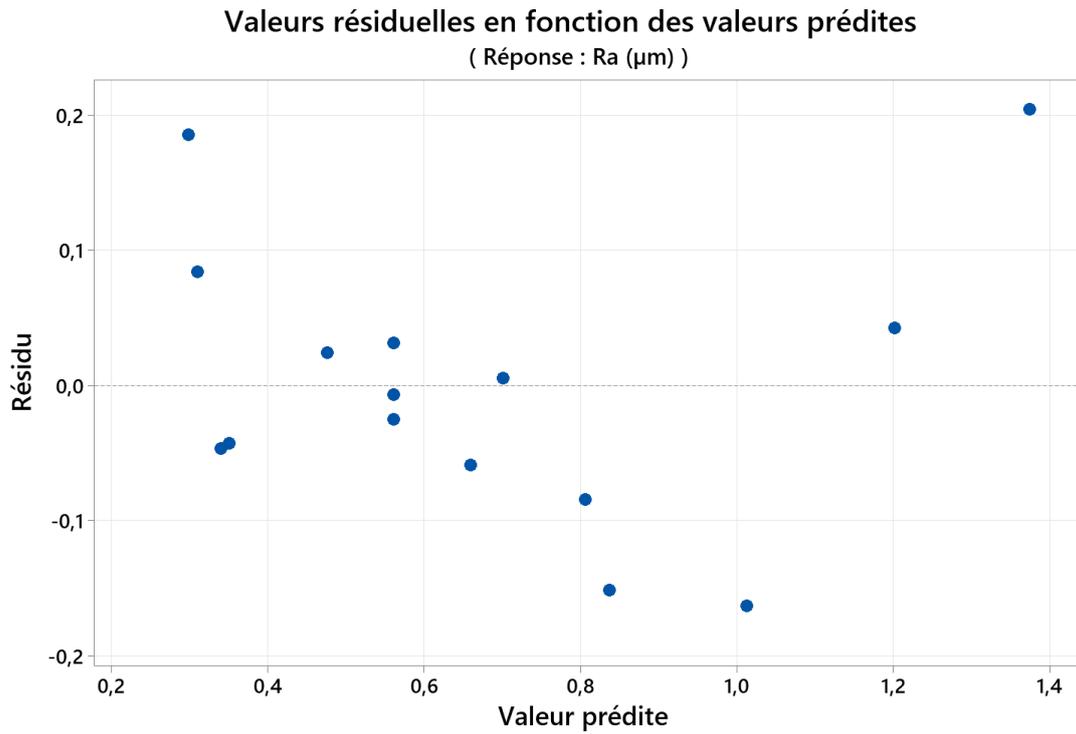


FIGURE 5.6 – Nuage de points des résidus en fonction des valeurs prédites de Ra

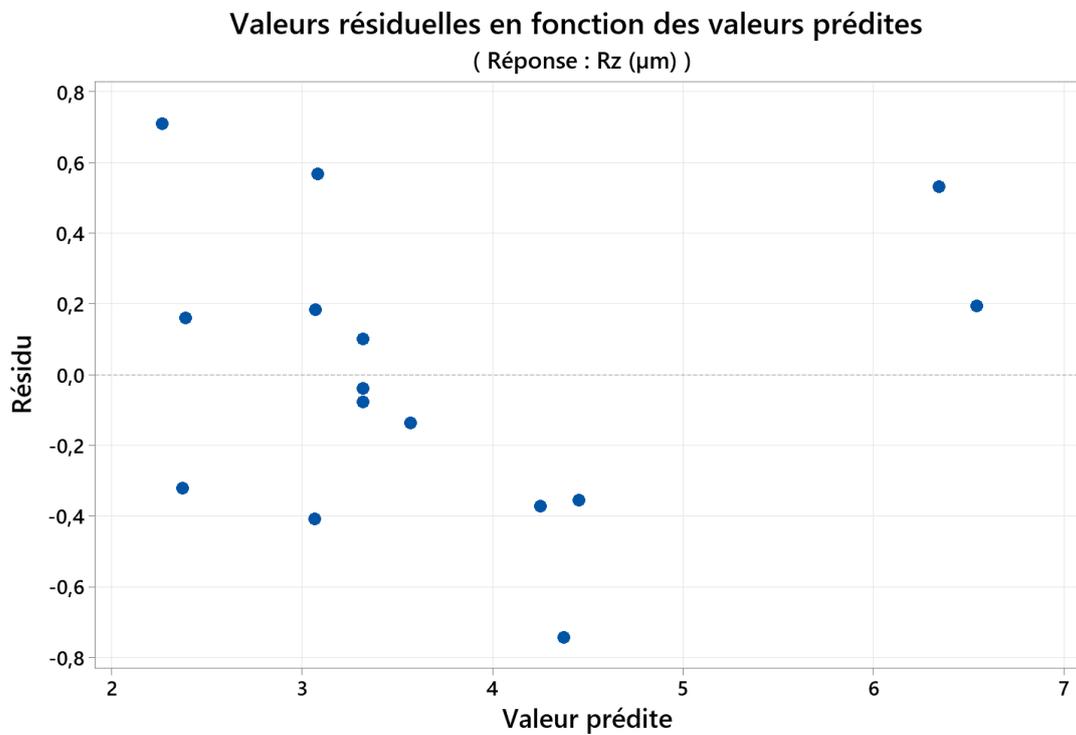


FIGURE 5.7 – Nuage de points des résidus en fonction des valeurs prédites de Rz

L'analyse des graphiques des résidus en fonction des valeurs prédites pour les réponses R_a (figure 5.6) et R_z (figure 5.7) constitue un outil de diagnostic essentiel pour évaluer la qualité de l'ajustement des modèles. Ces graphiques illustrent les écarts entre les mesures expérimentales et les valeurs estimées par les modèles, en fonction des prédictions.

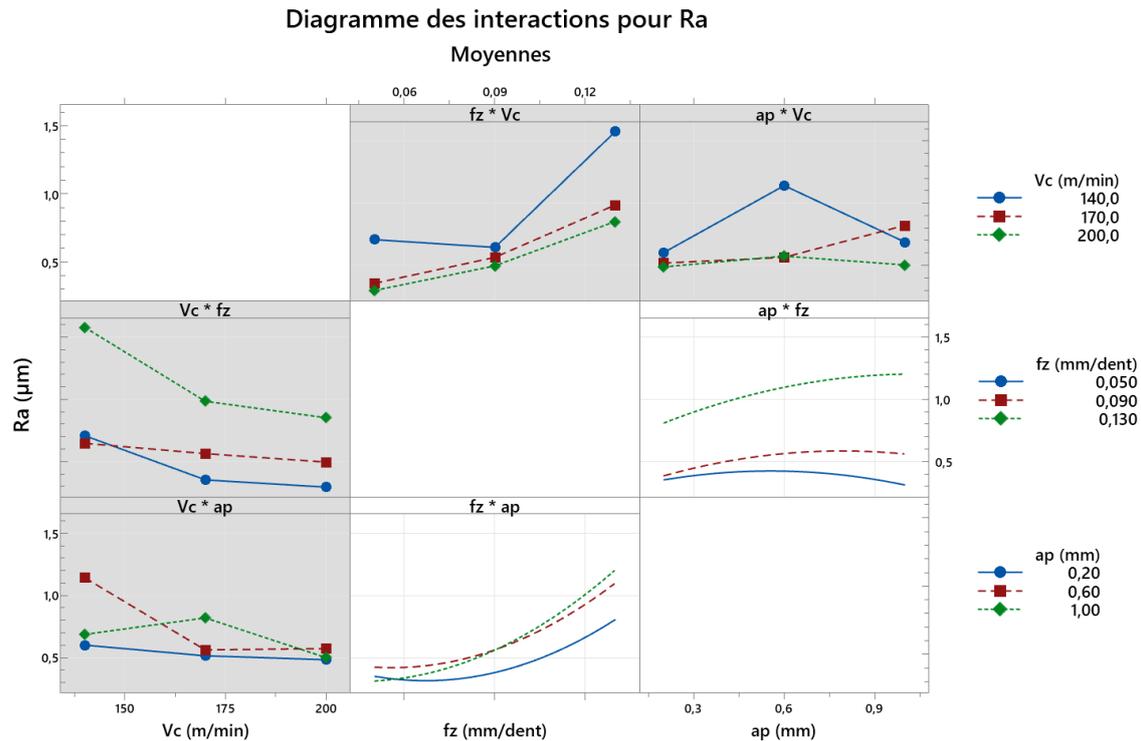
Dans les deux cas, les résidus sont globalement répartis de manière aléatoire autour de la ligne zéro, sans motif régulier ni tendance systématique apparente. Cette répartition confirme que les modèles ajustés décrivent correctement la relation entre les paramètres de coupe et la rugosité, sans laisser apparaître de biais majeur dans l'ajustement.

Cependant, on note quelques résidus éloignés de la ligne de référence, notamment à certaines valeurs prédites, ce qui pourrait être lié à des variations expérimentales ponctuelles ou à des imprécisions lors des mesures. Ces points ne remettent pas en cause la validité globale du modèle, mais méritent une attention particulière dans le cadre d'analyses futures.

En résumé, l'examen du graphique des résidus confirme la pertinence des modèles ajustés pour R_a et R_z , tout en signalant la présence éventuelle de quelques valeurs atypiques.

Ces modèles constituent ainsi une base fiable pour l'étude de l'influence des paramètres de coupe sur l'état de surface, et peuvent être utilisés dans le cadre d'une optimisation visant à minimiser la rugosité et à améliorer la qualité finale de la surface usinée dans la plage de fonctionnement étudiée.

5.5.2.4 Analyse des interactions entre les facteurs


 FIGURE 5.8 – Diagrammes des interactions pour la réponse R_a

Le diagramme présenté dans la figure 5.8 illustre l'effet de l'interaction entre les deux paramètres de coupe f_z et a_p sur la rugosité R_a . Cette interaction est la seule retenue dans le modèle ajusté, car elle est statistiquement significative. Les autres interactions apparaissent sur le graphique mais sont grisées, indiquant qu'elles ne sont pas incluses dans le modèle final.

Dans le graphique représentant l'interaction $f_z \times a_p$, où f_z varie pour des valeurs fixes de a_p (V_c étant maintenue constante à 170 m/min), on observe que l'augmentation de f_z entraîne une augmentation de la rugosité R_a dans les trois cas. Toutefois, cette augmentation est plus marquée pour les grandes valeurs de a_p .

Dans le second graphique représentant $a_p \times f_z$, on constate que la variation de R_a en fonction de a_p reste modérée pour les faibles avances. En revanche, à forte avance par dent, la profondeur de passe semble accentuer l'effet sur la rugosité, indiquant une interaction entre les deux paramètres.

Ces résultats peuvent être expliqués par des considérations physiques et mécaniques. Lorsque l'avance par dent augmente, l'épaisseur du copeau unitaire s'accroît, ce qui engendre une empreinte plus prononcée de l'arête de coupe sur la surface usinée, augmentant ainsi la rugosité R_a . Par ailleurs, une avance élevée tend à amplifier les vibrations et à intensifier la déformation plastique à la surface, ce qui détériore davantage la qualité de l'état de surface. [59]

D'autre part, la profondeur de passe a_p exerce peu d'influence sur la rugosité à faible avance, mais son impact devient plus marqué à forte avance. Une grande a_p accroît l'effort de coupe, ce qui intensifie les déformations mécaniques dans la zone de cisaillement et peut aggraver la rugosité. [60]

L'effet d'interaction observé entre f_z et a_p s'interprète par le rôle amplificateur de la profondeur de passe sur les effets de l'avance par dent. À forte a_p , le volume de matière à enlever augmente, ce qui intensifie l'usure de l'outil, les contraintes mécaniques et la température générée au niveau de la zone de coupe. Cela perturbe davantage la stabilité du processus lorsque l'avance est également élevée, ce qui se traduit par une dégradation accrue de l'état de surface. [61]

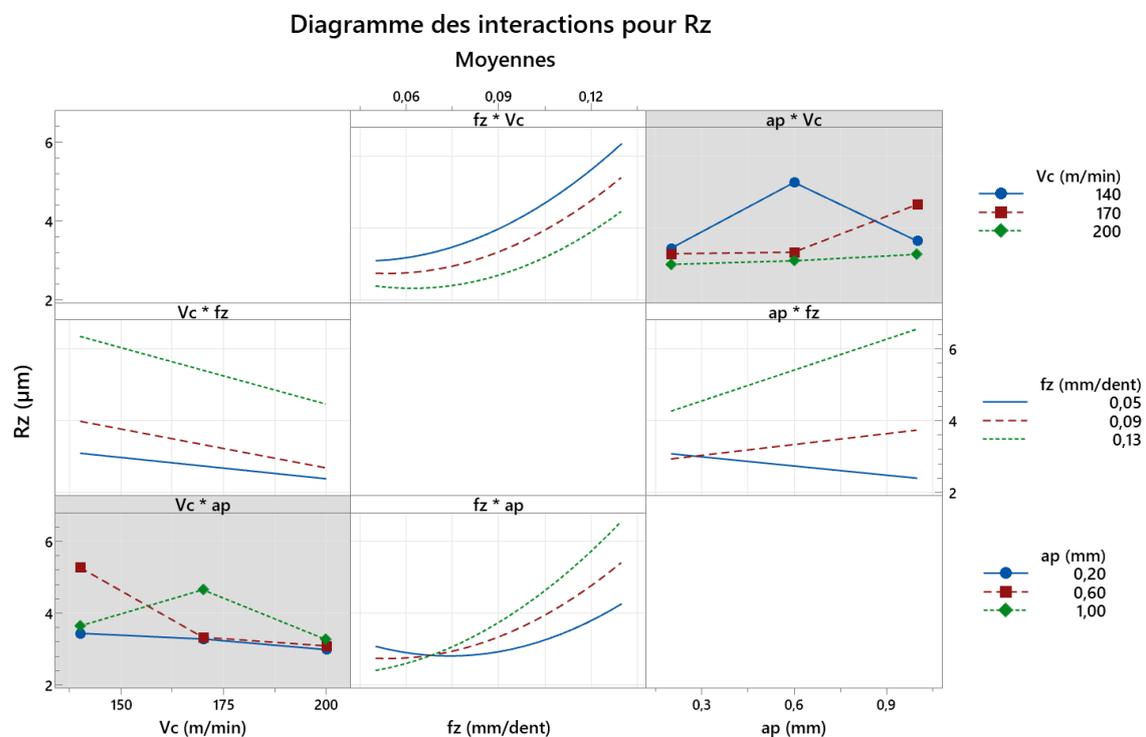


FIGURE 5.9 – Diagrammes des interactions pour la réponse R_z

Le diagramme présenté dans la figure 5.9 illustre l'effet des interactions entre les paramètres de coupe V_c , f_z et a_p sur la rugosité Rz. Deux interactions sont effectivement prises en compte dans le modèle mathématique ajusté : $V_c \times f_z$ et $f_z \times a_p$. L'interaction $V_c \times a_p$, bien qu'affichée sur le graphique, apparaît en grisé, ce qui indique qu'elle n'est pas retenue dans le modèle final en raison de sa non-significativité statistique.

Dans le graphique illustrant l'interaction entre V_c et f_z , la rugosité Rz est représentée en fonction de V_c pour trois niveaux de f_z , avec une profondeur de passe maintenue constante à sa valeur moyenne de 0.6 mm. On observe, pour les trois courbes, une diminution progressive de la rugosité lorsque la vitesse de coupe augmente. Cette tendance, linéaire, indique une amélioration de l'état de surface à vitesses plus élevées. Par ailleurs, à vitesse de coupe constante, la rugosité s'accroît avec l'augmentation de l'avance par dent, confirmant l'effet défavorable des avances importantes sur la qualité de surface.

Le second graphique, représentant la même interaction selon une lecture croisée (Rz en fonction de f_z pour trois niveaux de V_c), met également en évidence une élévation de la rugosité avec l'augmentation de l'avance par dent. Cet effet est plus prononcé à faibles vitesses de coupe, où les valeurs de rugosité atteignent leurs maximums. À l'inverse, les niveaux élevés de V_c atténuent partiellement l'impact négatif d'une avance importante.

Un autre effet significatif est mis en évidence par le graphique représentant l'interaction entre f_z et a_p , où la rugosité Rz est tracée en fonction de f_z pour trois niveaux de a_p , avec une vitesse de coupe V_c maintenue constante à 170 m/min. On observe que la rugosité augmente avec l'élévation de l'avance, et cet effet est d'autant plus prononcé que la profondeur de passe est élevée.

Le second graphique, illustrant la variation de Rz en fonction de a_p pour trois niveaux d'avance, révèle une évolution globalement linéaire. Ce comportement, combiné aux observations précédentes, suggère que la composante quadratique de la rugosité provient principalement de l'effet de f_z . En outre, on constate que pour des avances moyennes à élevées (0.09 et 0.13 mm/dent), Rz augmente avec a_p . En revanche, à faible avance (0.05 mm/dent), la rugosité tend à diminuer malgré l'augmentation de la profondeur de passe. Ces tendances concordent avec celles observées lors de l'analyse des interactions influençant la rugosité Ra, confirmant ainsi la cohérence du comportement de la surface en fonction des paramètres de coupe étudiés.

Ces résultats peuvent s'expliquer par les mécanismes physiques régissant la génération de la surface usinée. L'amélioration de l'état de surface observée avec l'augmentation de la vitesse de coupe peut être attribuée à plusieurs facteurs. À vitesses élevées, le temps de contact entre l'outil et la pièce diminue, ce qui réduit la formation de bavures, la formation de copeaux discontinus, et l'accumulation de matière à l'arête de coupe (phénomène de l'arête rapportée), facteurs connus pour détériorer la qualité de surface. De plus, une vitesse plus élevée augmente localement la température, adoucissant le matériau et facilitant la coupe, ce qui conduit à une finition plus fine. [59]

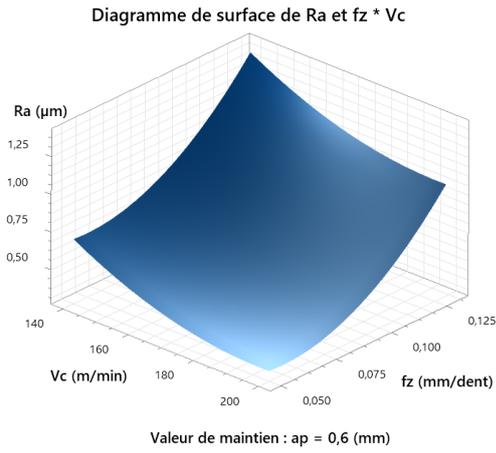
Inversement, une augmentation de l'avance par dent engendre un copeau plus épais, ce qui accroît la pression de coupe et la déformation plastique dans la zone affectée par la chaleur. Cette déformation se traduit par une trace plus profonde laissée par l'arête de l'outil, donc une rugosité plus élevée [59]. De plus, de fortes avances favorisent l'apparition de vibrations et de phénomènes de rebond dynamique, altérant encore davantage la qualité de surface.

L'effet atténuateur de vitesses de coupe élevées sur l'impact négatif de grandes avances peut également s'expliquer : à haute V_c , la coupe est plus stable, la température est mieux répartie et l'usure de l'outil est moins localisée, ce qui réduit les défauts liés à l'enlèvement de matière brutal provoqué par une grande f_z . [61]

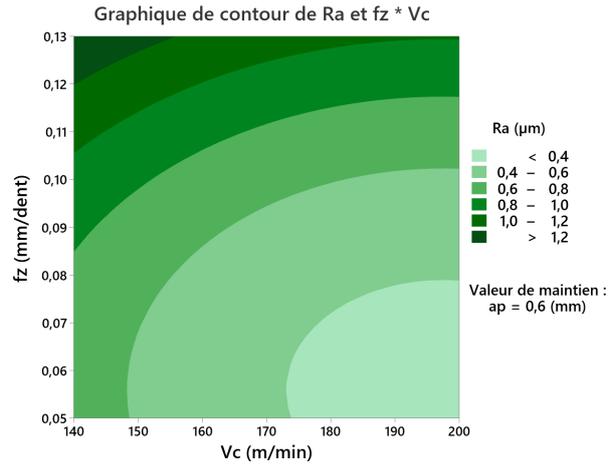
5.6 Optimisation des conditions de coupe

En s'appuyant sur les modèles de prédiction établis pour R_a et R_z , il est désormais possible de procéder à l'optimisation des paramètres de coupe (V_c , f_z et a_p) dans le but de minimiser simultanément les deux indicateurs de rugosité. Cette optimisation a été réalisée à l'aide du logiciel Minitab 21, qui identifie la meilleure combinaison de conditions de coupe garantissant un état de surface optimal, c'est-à-dire les valeurs minimales de R_a et R_z .

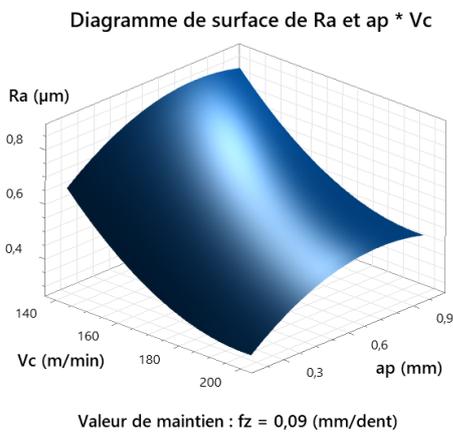
Avant de présenter les résultats de l'optimisation, les surfaces de réponse et les graphes de contours relatifs à R_a (figure 5.10) et R_z (figure 5.11) sont présentés. Ils ont été obtenus à partir des modèles de prédiction ajustés ((5.3) et (5.4), respectivement). Ces représentations offrent une meilleure interprétation de l'influence de chaque paramètre de coupe, ainsi que de leurs interactions, sur la rugosité de surface, et constituent ainsi un support essentiel à la compréhension du processus d'optimisation.



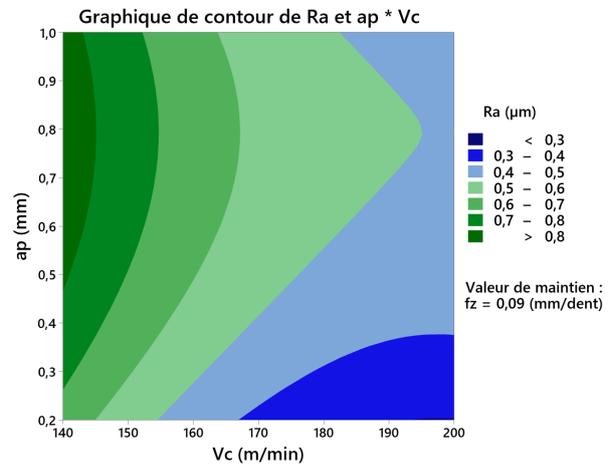
(a) Diagramme de surface de Ra selon f_z et V_c



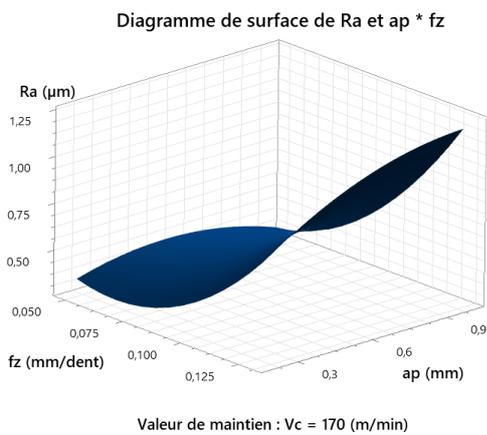
(b) Graphique de contour de Ra selon f_z et V_c



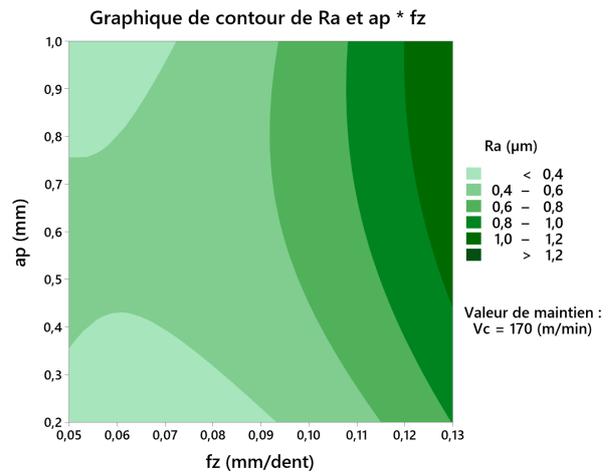
(c) Diagramme de surface de Ra selon a_p et V_c



(d) Graphique de contour de Ra selon a_p et V_c

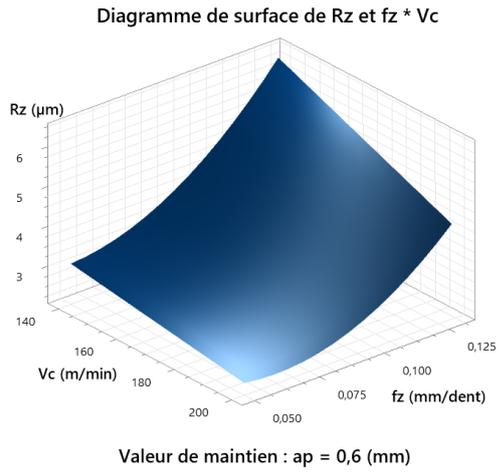


(e) Diagramme de surface de Ra selon a_p et f_z

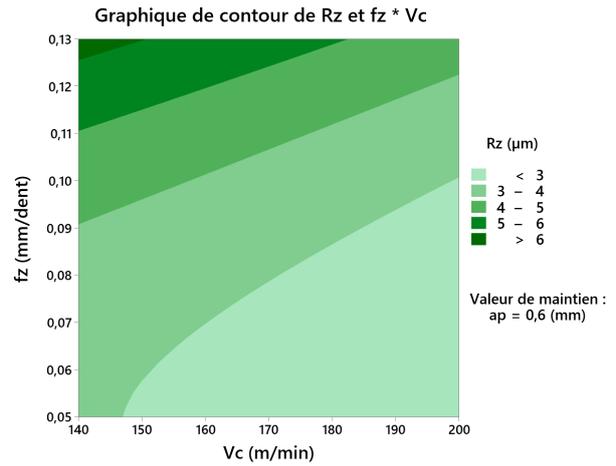


(f) Graphique de contour de Ra selon a_p et f_z

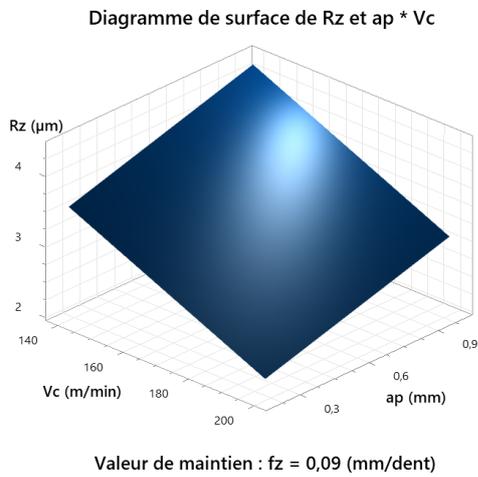
FIGURE 5.10 – Surfaces et contours de la réponse Ra selon les couples de facteurs



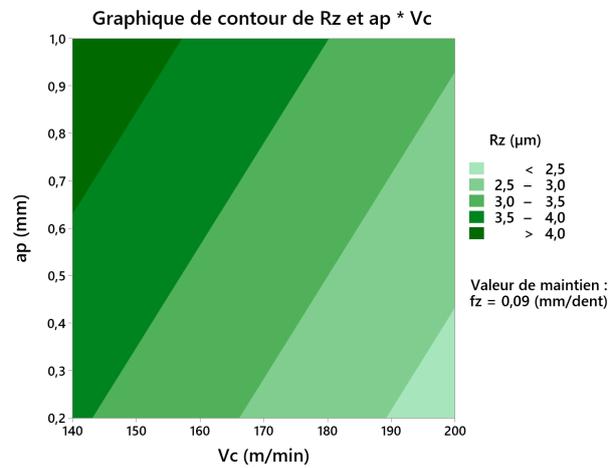
(a) Diagramme de surface de Rz selon f_z et V_c



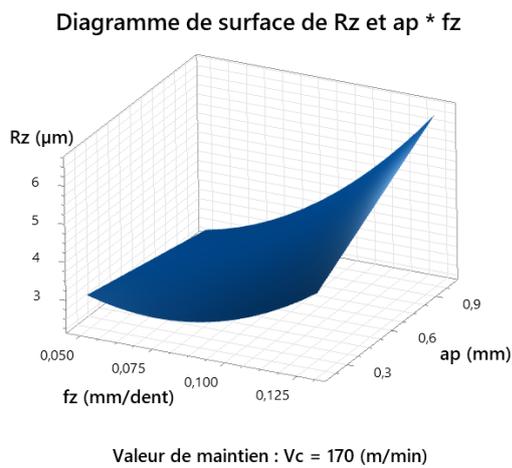
(b) Graphique de contour de Rz selon f_z et V_c



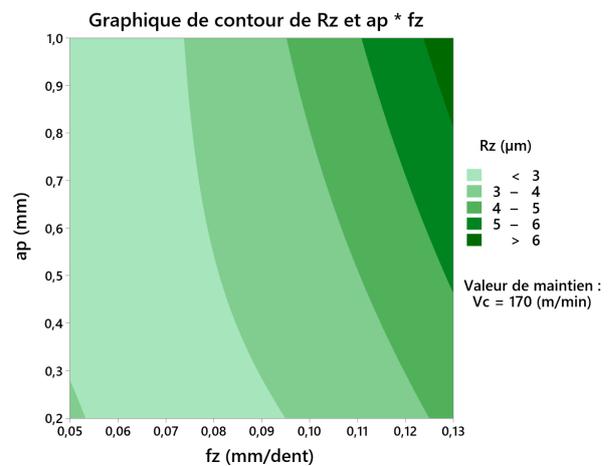
(c) Diagramme de surface de Rz a_p et V_c



(d) Graphique de contour de Rz a_p et V_c



(e) Diagramme de surface de Rz selon a_p et f_z



(f) Graphique de contour de Rz selon a_p et f_z

FIGURE 5.11 – Surfaces et contours de la réponse Rz selon les couples de facteurs

Pour la réponse Ra, les courbes de contours révèlent une nette dégradation de la rugosité avec l'augmentation de l'avance par dent, particulièrement lorsque la profondeur de passe est également élevée. Cette tendance est matérialisée par les zones de couleur vert foncé. À l'inverse, une vitesse de coupe élevée associée à une faible avance favorise une réduction significative de Ra, représentée par les zones de couleur vert clair.

Concernant la réponse Rz, un comportement similaire est observé : la rugosité diminue lorsque la vitesse de coupe est élevée et l'avance modérée à faible (zones de couleur claire). Toutefois, Rz se montre plus sensible aux interactions entre l'avance par dent et la profondeur de passe, ce qui corrobore les résultats de l'ANOVA.

De manière générale, les meilleurs résultats en termes de qualité de surface (valeurs faibles de Ra et Rz) apparaissent dans les zones de couleur claire des graphes de contours, correspondant à une vitesse de coupe élevée, une avance réduite et une profondeur de passe modérée. L'examen des surfaces de réponse confirme ces observations, les valeurs les plus faibles étant localisées dans les régions basses des surfaces tridimensionnelles.

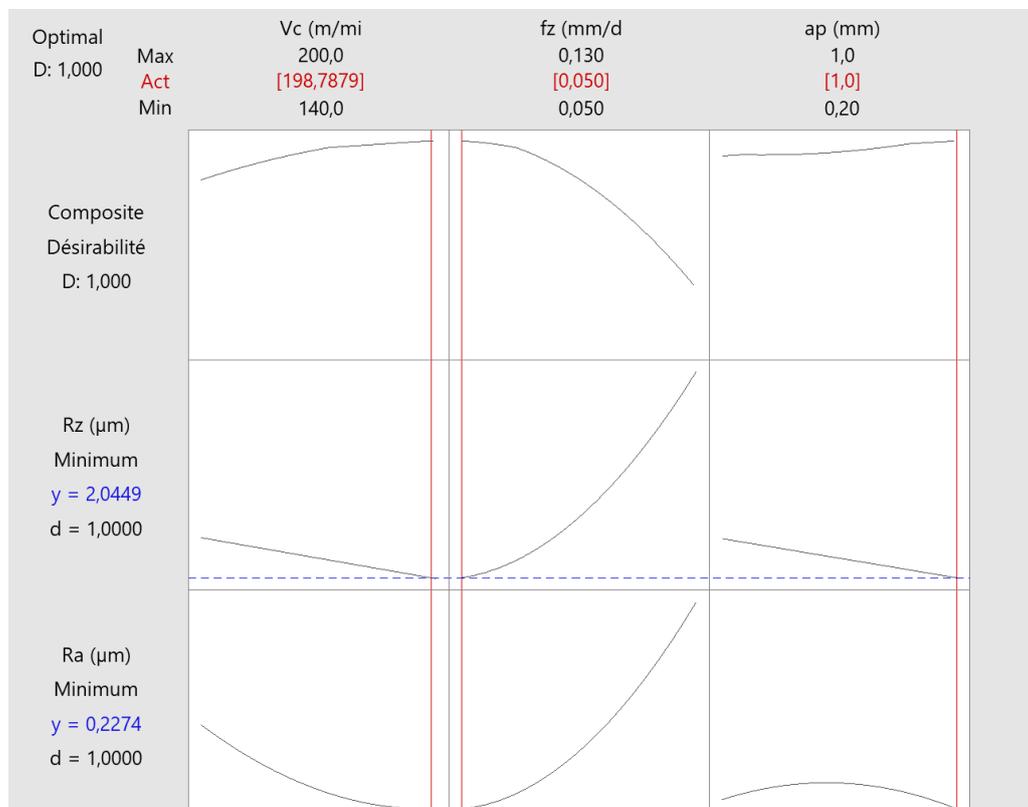


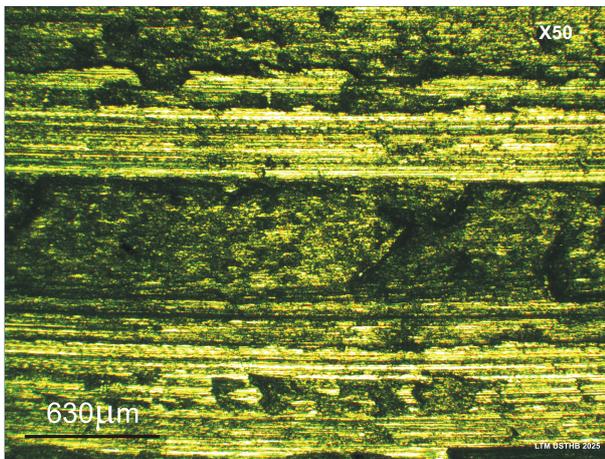
FIGURE 5.12 – Graphique de désirabilité des paramètres optimaux

Le graphe de désirabilité globale, présenté dans la figure 5.12, met en évidence la combinaison optimale des paramètres de coupe permettant de minimiser simultanément les deux réponses de rugosité, Ra et Rz. Cet outil, fondé sur une approche multi-objectifs, attribue une note de désirabilité comprise entre 0 (résultat totalement insatisfaisant) et 1 (résultat parfaitement optimal). Dans notre cas, la valeur maximale de désirabilité atteinte est de 1.000, ce qui indique que la solution proposée est parfaitement conforme aux objectifs d'optimisation définis.

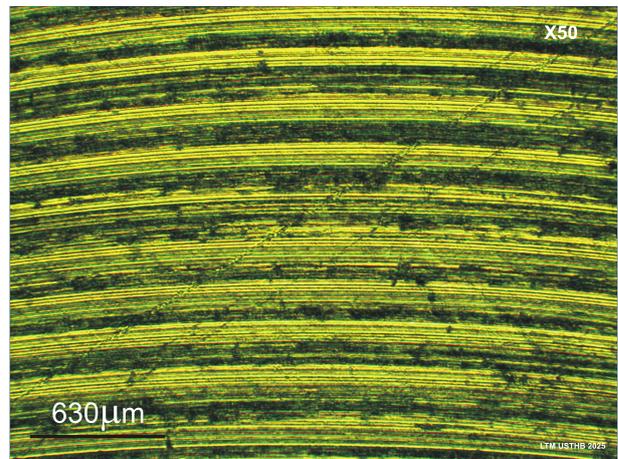
La combinaison optimale identifiée par le logiciel correspond à une vitesse de coupe de 198.79 m/min, une avance par dent de 0.05 mm/dent et une profondeur de passe de 1 mm. Sous ces conditions, les modèles prédisent une rugosité Ra minimale de 0.227 μm et une rugosité Rz minimale de 2.045 μm , soit des valeurs faibles qui traduisent un état de surface de bonne qualité.

Il est également remarquable, à l'observation de ces graphes, que l'augmentation de la vitesse de coupe entraîne une diminution des rugosités Ra et Rz, traduisant une amélioration de l'état de surface. En revanche, une hausse de l'avance par dent se traduit par une augmentation de la rugosité, indiquant un effet défavorable sur la qualité de surface. Quant à la profondeur de passe, elle ne présente pas de tendance clairement définie, ce qui reflète son impact modéré dans ce contexte.

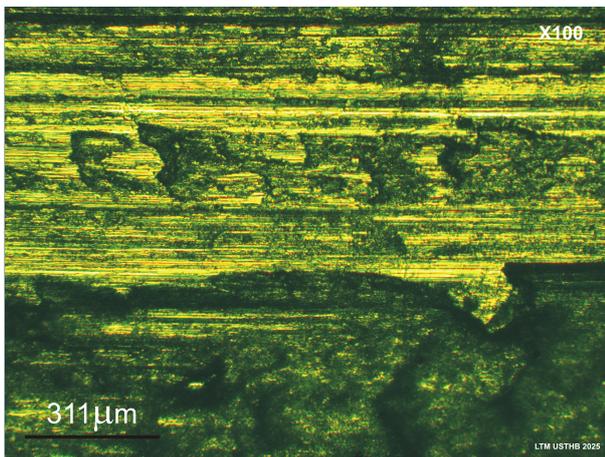
5.7 Évaluation de l'état de surface par microscope



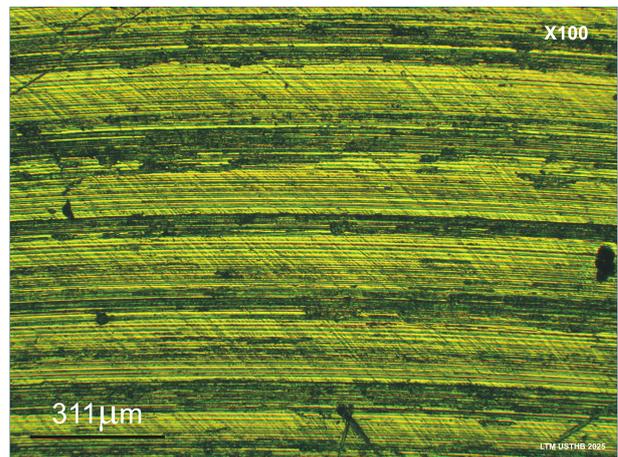
(a) Surface d'ébauche avec un grossissement de x50



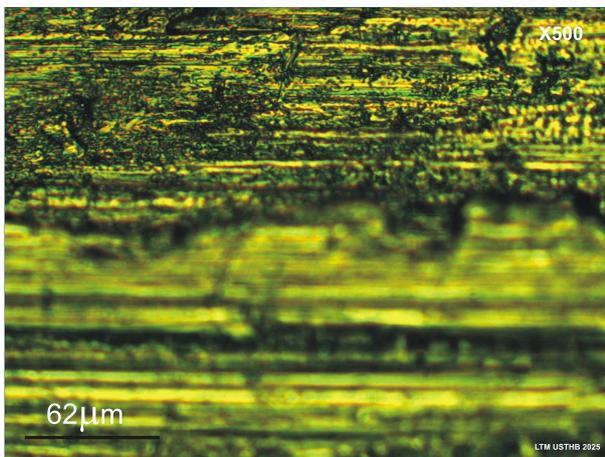
(b) Surface de finition avec un grossissement de x50



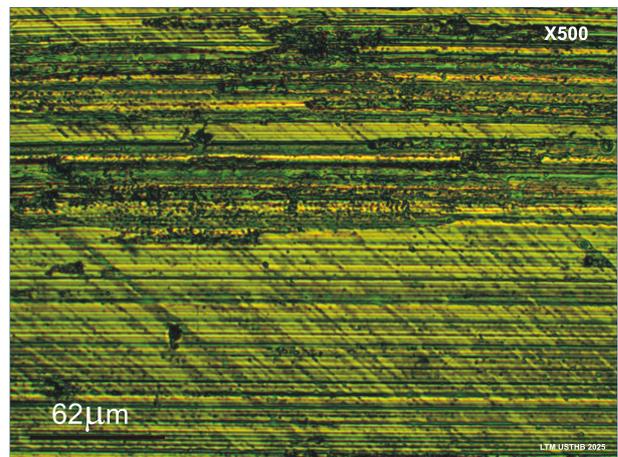
(c) Surface d'ébauche avec un grossissement de x100



(d) Surface de finition avec un grossissement de x100



(e) Surface d'ébauche avec un grossissement de x500



(f) Surface de finition avec un grossissement de x500

FIGURE 5.13 – Images obtenues par microscope optique des surfaces usinées

La figure 5.13 présente des images obtenues par microscope optique de deux surfaces usinées : d'une part, une surface d'ébauche réalisée sur une fraiseuse conventionnelle avec des conditions de coupe modérées, et d'autre part, une surface de finition issue de l'essai expérimental 2 (surfaçage de finition sur une machine CNC). Cette dernière a été usinée avec une combinaison de paramètres de coupe comprenant une vitesse de coupe V_c de 200 m/min, une avance par dent de 0.05 mm/dent et une profondeur de passe a_p de 0.6 mm. Ces conditions sont très proches des conditions optimales déterminées pour minimiser la rugosité (198.79 m/min, 0.05 mm/dent et 1 mm), à l'exception d'une profondeur de passe légèrement inférieure. Les deux surfaces ont été observées sous trois grossissements différents : x50, x100 et x500, afin d'analyser en détail leur état de surface et de comparer leur qualité en fonction du procédé d'usinage utilisé.

À un grossissement de x50, la différence entre les deux surfaces est immédiatement perceptible. La surface d'ébauche (figure 5.13a) présente un aspect très irrégulier, marqué par des stries profondes et désordonnées, avec des zones sombres traduisant des arrachements de matière et une rugosité importante. En comparaison, la surface issue de l'usinage CNC (figure 5.13b) révèle une structure beaucoup plus régulière, caractérisée par des lignes parallèles et continues correspondant aux passes de l'outil. La qualité d'usinage est nettement améliorée, avec une réduction visible des défauts macroscopiques.

Sous un grossissement de x100, les différences structurelles deviennent encore plus nettes. La surface d'ébauche (figure 5.13c) montre de nombreuses microcavités et des irrégularités accentuées, reflétant un état de surface très hétérogène. Les stries sont plus marquées et leur orientation semble aléatoire, traduisant un surfaçage brut peu contrôlé. En revanche, la surface usinée par usinage CNC (figure 5.13d) présente une microstructure fine et régulière, avec des stries continues et orientées dans le sens de l'avance. Quelques fines rayures, probablement dues au passage du palpeur du rugosimètre, sont visibles mais ne compromettent pas l'uniformité globale de la surface.

À fort grossissement (x500), les microdétails et l'altimétrie des surfaces deviennent cruciaux. L'image de la surface d'ébauche (figure 5.13e) est partiellement floue, ce qui s'explique par les irrégularités importantes de hauteur sur la surface : une moitié apparaît nette alors que l'autre est hors du plan focal du microscope. Cela confirme la présence

de micro-reliefs et d'un manque de planéité locale. À l'opposé, l'image de la surface usinée par usinage CNC (figure 5.13f) reste globalement nette sur toute sa surface, preuve d'une meilleure uniformité altimétrique. Les stries sont fines, bien définies, et les rares irrégularités visibles semblent provenir du contact du rugosimètre, ce qui n'altère pas significativement l'aspect général.

5.8 Conclusion

Ce chapitre présente une analyse détaillée des résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de l'étude de l'influence des conditions de coupe sur l'état de surface en fraisage. À travers les modèles établis pour les rugosités R_a et R_z , l'impact de chaque paramètre – la vitesse de coupe (V_c), l'avance par dent (f_z) et la profondeur de passe (a_p) – a été examiné.

L'analyse statistique a permis d'identifier les facteurs les plus influents, de vérifier la validité des modèles prédictifs et d'optimiser les conditions d'usinage. Les résultats montrent que l'avance par dent f_z est le paramètre dominant : son augmentation entraîne une élévation significative de la rugosité. En revanche, la vitesse de coupe V_c joue un rôle modérateur sur la qualité de surface, une augmentation de V_c tendant à améliorer cette dernière. Quant à la profondeur de passe a_p , son effet est plus limité : elle n'influence notablement la rugosité qu'à forte avance. Ces observations constituent une base solide pour la sélection de régimes de coupe visant à optimiser la qualité d'usinage.

Conclusion générale et perspectives

Ce travail s'est inscrit dans le cadre d'une étude expérimentale visant à analyser l'influence du régime de coupe sur l'état de surface des pièces usinées par fraisage. Plus précisément, l'objectif était d'évaluer l'impact de trois paramètres principaux — la vitesse de coupe, l'avance par dent et la profondeur de passe — sur la rugosité obtenue, et d'en déduire des conditions de coupe optimales.

L'étude a permis de dégager plusieurs résultats importants. Grâce à la mise en œuvre d'un plan d'expériences de type Box-Behnken et à l'analyse statistique des résultats, il a été possible de modéliser l'évolution de la rugosité (R_a et R_z) en fonction des paramètres de coupe. Les essais ont été réalisés à l'aide d'une fraise cylindrique monobloc en carbure revêtue de $TiAlN$, sur un matériau de type AISI 1010, un acier doux non allié, constituant ainsi le couple outil-matière retenu pour cette étude.

Les modèles obtenus ont montré que l'avance par dent est le facteur le plus influent sur la rugosité, suivie de la vitesse de coupe, tandis que la profondeur de passe exerce un effet plus modéré. L'analyse a également révélé que l'avance par dent a un effet direct et défavorable sur l'état de surface : son augmentation entraîne une élévation de la rugosité, ce qui dégrade la qualité de surface. À l'inverse, l'augmentation de la vitesse de coupe contribue à diminuer la rugosité, et donc à améliorer l'état de surface. Quant à la profondeur de passe, son influence est moins directe, mais elle devient significative lorsque l'avance par dent est élevée : dans ce cas, une profondeur de passe plus importante accentue la rugosité. En revanche, à faible avance, son effet reste négligeable.

Ces résultats sont en accord avec les tendances observées dans la littérature, bien que les couples outil-matière diffèrent d'une étude à l'autre.

Enfin, l'utilisation des courbes de désirabilité a permis d'identifier une combinaison optimale des paramètres de coupe minimisant simultanément les deux indicateurs de rugosité R_a et R_z . Les conditions optimales déterminées sont : une vitesse de coupe de 198.79

m/min, une avance par dent de 0.05 mm/dent, et une profondeur de passe de 1 mm.

Cependant, certaines limites doivent être soulignées. L'étude a été conduite dans un cadre expérimental restreint, avec un seul matériau, un seul type d'outil, et des conditions de coupe fixées à des plages précises. Par ailleurs, des facteurs secondaires comme l'usure de l'outil, la lubrification ou encore les effets thermiques n'ont pas été pris en compte, bien qu'ils puissent également influencer la rugosité.

Pour la suite, plusieurs perspectives peuvent être envisagées. D'une part, il serait pertinent d'élargir l'étude à d'autres matériaux et à d'autres configurations de coupe, afin de généraliser les résultats obtenus. D'autre part, l'intégration de variables supplémentaires, telles que la durée de vie de l'outil, la consommation énergétique ou encore la topographie tridimensionnelle de la surface usinée, permettrait une évaluation plus complète et plus réaliste des performances du procédé.

Par ailleurs, il serait également intéressant de remonter à l'origine physique des phénomènes influençant la rugosité, notamment en étudiant plus directement l'impact des efforts de coupe et des vibrations générés pendant l'usinage. En effet, ces derniers sont à l'origine des irrégularités de surface observées, et une modélisation fine de leur comportement pourrait permettre de prédire la rugosité avec une meilleure précision. Une telle approche pourrait être menée à l'aide de logiciels de simulation numérique comme Abaqus ou Ansys, en modélisant les interactions outil-pièce-matière dans des conditions de coupe variées. Ces simulations offriraient la possibilité d'explorer des cas complexes difficilement accessibles par l'expérimentation seule, tout en renforçant la compréhension des mécanismes mécaniques et dynamiques à l'œuvre.

Bibliographie

- [1] Éric Felder. Procédés d'usinage - Présentation. *Techniques de l'ingénieur, Mécanique*. Réf. article : BM7000 V1, Octobre 2023.
- [2] Jie Wen, Fugui Xie, Xinjun Liu, and Yi Yue. Evolution and Development Trend Prospect of Metal Milling Equipment. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 36(1) :33, March 2023.
- [3] Hassan El-Hofy. *Fundamentals of Machining Processes : Conventional and Nonconventional Processes, Third Edition*. CRC Press, Boca Raton, 3rd edition, October 2018.
- [4] Christian Mascle and Walery Wygowski. *Fabrication avancée et méthodes industrielles : Du dossier produit au dossier fabrication Tome 1*. Presses inter Polytechnique, 2012.
- [5] R. Dietrich, D. Garsaud, S. Gentillon, and M. Nicolas. *Précis de méthodes d'usinage : méthodologie, production et normalisation*. AFNOR, 1981.
- [6] Préparation de Production en Productique Mécanique - étude de Fabrication et Analyse d'Usinage (3PM-EFAU) - La formation du copeau, . URL https://analyse-fabrication.univ-lille.fr/co/ch4_3_1.html.
- [7] Types de Trous | PDF, . URL <https://fr.scribd.com/document/787873768/Types-de-Trous>.
- [8] Kanak Kalita, Santonab Chakraborty, Ranjan Kumar Ghadai, and Shankar Chakraborty. Parametric optimization of non-traditional machining processes using multi-criteria decision making techniques : literature review and future directions. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, 6(1) :1–40, 2023.

- [9] Tarek Sultan Charles. *Usinage de métaux durs par Jet d'Eau Abrasif*. PhD thesis, INSA de Toulouse, 2015.
- [10] O.M. Ikumapayi, B.H. Omietimi, P. Onu, T.S. Ogedengbe, J.R. Oluwafemi, S.A. Afolalu, and E.T. Akinlabi. Non-traditional machining techniques in manufacturing industries—an overview. In *E3S Web of Conferences*, volume 430, page 01213. EDP Sciences, 2023.
- [11] Yuvaraj Natarajan, Pradeep Kumar Murugesan, Mugilvalavan Mohan, and Shakeel Ahmed Liyakath Ali Khan. Abrasive water jet machining process : A state of art of review. *Journal of Manufacturing Processes*, 49 :271–322, 2020.
- [12] Mahesh Vyas. Ultrasonic machining (usm) – working principle, setup applications, advantages and disadvantages. <https://enggkatta.com/ultrasonic-machining/>, June 2025.
- [13] Wire edm : Comparisons, considerations and applications. <https://www.iqsdirectory.com/articles/edm/wire-edm.html>, June 2025.
- [14] Z. Pandilov. Application of electro chemical machining for materials used in extreme conditions. In *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, volume 329, page 012014. IOP Publishing, 2018.
- [15] Chemical machining – leading chemical machining manufacturers. <https://metaletching.org/chemical-machining/>, June 2025.
- [16] Société Sandvik-Coromant. Fraisage – principes. *Techniques de l'Ingénieur, Mécanique*, Réf. article : BM7082 V1, Janvier 2001.
- [17] Claude BARLIER and Luc CEPPETELLI. *Méthodes et Production en usinage*. Métotech Plus. castella, 1re edition, Décembre 2013.
- [18] Sam. Maîtriser les techniques de fraisage périphérique pour des résultats d'usinage optimaux. <https://at-machining.com/fr/mastering-peripheral-milling-techniques-for-optimal-machining-results/>, Janvier 2025.
- [19] SSK Deepak. Milling operation and its optimization—a literature review. *Research Journal of Engineering and Technology*, 3(4) :310–313, 2012.

- [20] A. DOURNIER and P. SAGET. *Le fraisage des métaux*. LAIBRAIRIE DELA-GRAVE, Paris, 1966.
- [21] Société Sandvik-Coromant. Fraisage – principales opérations. *Techniques de l'Ingénieur, Mécanique*, Réf. article : BM7083 V1, Janvier 2001.
- [22] SIEMENS. *Fabrication de pièces complexes en fraisage : SINUMERIK 810D/840D*. Allemagne, 4e édition, 2004. Manuel technique.
- [23] Hédi Yengui. *Modélisation du comportement dynamique non linéaire d'un système machine-outil-pièce lors d'une opération de fraisage*. PhD thesis, Ecole Centrale Paris ; École nationale d'ingénieurs de Sfax (Tunisie), 2011.
- [24] Jan Burek, M Plodzien, L Zylka, and P Sulkowicz. High-performance end milling of aluminum alloy : Influence of different serrated cutting edge tool shapes on the cutting force. *Advances in Production Engineering & Management*, 14(4) :494–506, 2019.
- [25] Vincent Moreau. *Etude dynamique de l'usinage et de l'interaction pièce-outil par mesure des déplacements : application au fraisage et au tournage*. PhD thesis, Arts et Métiers ParisTech, 2010.
- [26] Guillaume Rebergue, Jean-Philippe Costes, and Quentin Hardoin. Calcul des lobes de stabilité en fraisage appliqué aux fraises disques. In *CFM 2015-22ème Congrès Français de Mécanique*. AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie, 2015.
- [27] Ibn al Haytham. *Le Livre d'Optique (Kitab al-Manazir)*, volume 1–2. University of Chicago Press, 2001. Traduction anglaise annotée du texte arabe, avec une introduction historique.
- [28] Jacques Goupy. Modélisation par les plans d'expériences. *Techniques de l'ingénieur, Instrumentation et méthodes de mesure*. Réf. article : R275 V2, Septembre 2016.
- [29] Jacques Goupy. Plans d'expérience. *Techniques de l'ingénieur, Génie industriel, Conception et Production*. Réf. article : P230 V2, Septembre 1997.
- [30] Benjamin Durakovic. Design of experiments application, concepts, exemples : State of the art. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 5(3) :421–439, 2017.

- [31] Jacques Goupy and Lee Creighton. *Introduction aux plans d'expériences*. Technique et ingénierie. Dunod "L'Usine nouvelle", Paris, 3e édition, 2006.
- [32] Douglas C. Montgomery. *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons, Inc, 8th edition, 2013.
- [33] Jaques Goupy. *Plans d'expériences pour surface de réponse*. Techniques et ingénierie. Dunod, Paris, 1999.
- [34] Raymond H Myers, Douglas C Montgomery, and Christine M Anderson-Cook. *Response surface methodology : process and product optimization using designed experiments*. John Wiley & Sons, 3rd edition, 2009.
- [35] AT Adeniran, JO Olilima, and RO Akano. Analysis of variance : The fundamental concepts and application with r. *Int. J. Math. Comput. Res*, 9 :2408–2422, 2021.
- [36] Barbara G Tabachnick and Linda S Fidell. *Experimental designs using ANOVA*, volume 724. Thomson/Brooks/Cole Belmont, CA, 2007.
- [37] Lars St, Svante Wold, et al. Analysis of variance (anova). *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 6(4) :259–272, 1989.
- [38] Carlos H Lauro, Robson BD Pereira, Lincoln C Brandão, and JP Davim. Design of experiments—statistical and artificial intelligence analysis for the improvement of machining processes : A review. *Design of experiments in production engineering*, pages 89–107, 2015.
- [39] International Organization for Standardization. Surface roughness – terminology – part 1 : Surface and its parameters, 1984.
- [40] André Chevalier. *Guide du dessinateur industriel*. Hachette, 2004.
- [41] Bharat Bhushan. Surface roughness analysis and measurement techniques. In *Modern tribology handbook, two volume set*, pages 79–150. CRC press, 2000.
- [42] M. BOUAZIZ. Chapitre 2 : Défauts de formes et d'états de surface, support de cours, non publié, École nationale polytechnique d'alger, 2020.

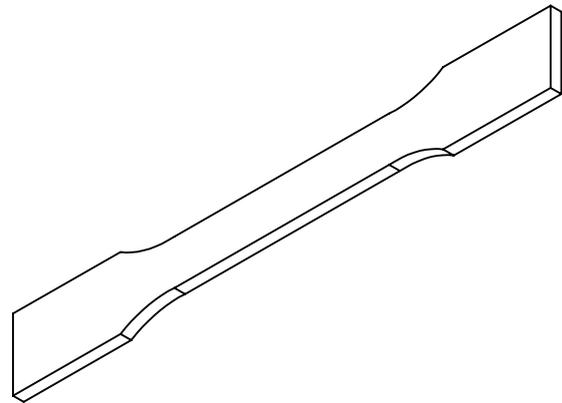
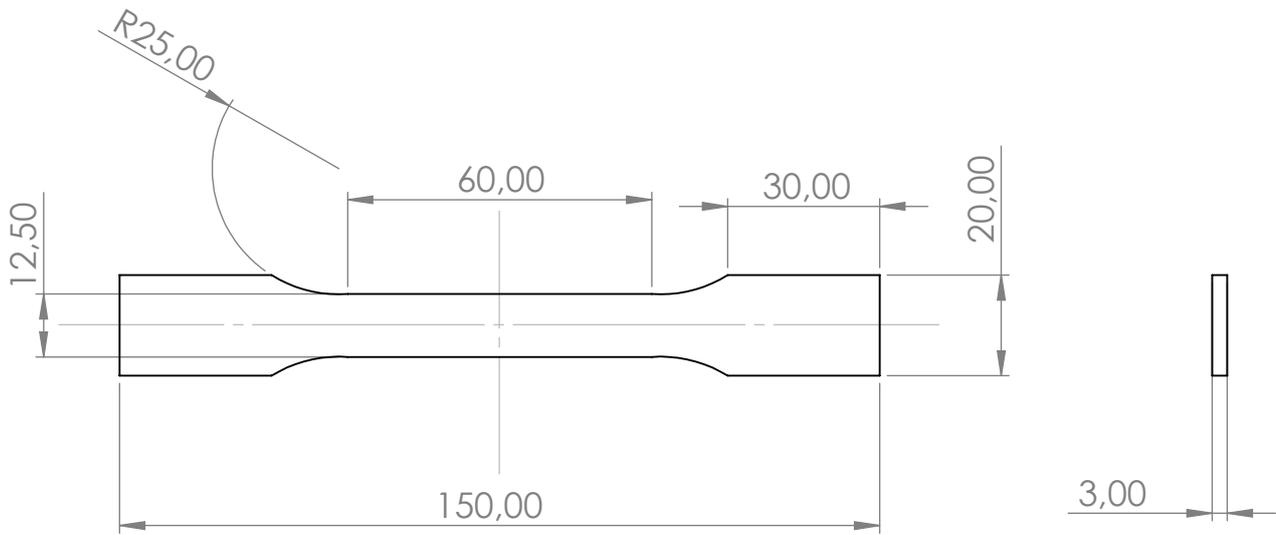
- [43] AFNOR. NF EN ISO 1101 : Spécification géométrique des produits (GPS) – Tolérancement géométrique – Tolérances de forme, orientation, position et battement, Janvier 2006.
- [44] Patrick BOUCHARÉINE. Métrologie des surfaces. *Techniques de l'ingénieur, Mécanique | Frottement, usure et lubrification*. Réf. article : R1390 V1, Septembre 1999.
- [45] E. S. Gadelmawla, M. M. Koura, T. M. A. Maksoud, I. M. Elewa, and H. H. Soliman. Roughness parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, 123(1) :133–145, 2002.
- [46] Sudhansu Ranjan Das, Amaresh Kumar, Debabrata Dhupal, and Kali Charan Rath. Estimating the effect of machining parameters on surface roughness during machining of hardened EN24 steel using coated carbide inserts. *Industrial Engineering*, 4(2) : 10, 2014.
- [47] Nguyen Man Do Lien and Ph ung Trãn. Investigate the Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness When Milling X12m Steel. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, pages 258–263, April 2021.
- [48] Fuqiang Lai, Anqiong Hu, Kun Mao, Zhangbin Wu, and Youxi Lin. Effect of Milling Processing Parameters on the Surface Roughness and Tool Cutting Forces of T2 Pure Copper. *Micromachines*, 14, January 2023.
- [49] ISO 1302 : 2002 - geometrical product specifications (GPS) — indication of surface texture in technical product documentation, 2002.
- [50] T.A. Ruzova and B Haddadi. Surface roughness and its measurement methods - Analytical review. *Results in Surfaces and Interfaces*, 19 :100441, 2025.
- [51] Bernard RAPHET. États de surface. *Techniques de l'ingénieur, Mécanique | Frottement, usure et lubrification*. Réf. article : R1390 V1, Juin 2006.
- [52] José V. Abellán-Nebot, Carlos Vila Pastor, and Hector R. Siller. A review of the factors influencing surface roughness in machining and their impact on sustainability. *Sustainability*, 16(5) :1917, 2024.

- [53] PG Benardos and G-C Vosniakos. Predicting surface roughness in machining : a review. *International journal of machine tools and manufacture*, 43(8) :833–844, 2003.
- [54] Accu Components. Maîtriser la rugosité des surfaces : un guide complet, 2025. URL <https://accu-components.com/fr/p/450-rugosite-de-surface-un-guide-complet>.
- [55] Organisation internationale de normalisation. Matériaux métalliques — essai de traction — partie 1 : Méthode d’essai à température ambiante, 2019.
- [56] Organisation internationale de normalisation. Matériaux métalliques — essai de dureté vickers — partie 1 : Méthode d’essai, 2018.
- [57] Organisation internationale de normalisation. Matériaux métalliques — essai de dureté brinell — partie 1 : Méthode d’essai, 2014.
- [58] Organisation internationale de normalisation. Spécification géométrique des produits (gps) — État de surface : Méthode du profil — règles et procédures pour l’évaluation de l’état de surface, 1996.
- [59] Serope Kalpakjian and Steven R. Schmid. *Manufacturing Engineering & Technology*. Pearson Education, Upper Saddle River, New Jersey, 7th edition, 2013.
- [60] Jiri Tlustý. *Manufacturing Processes and Equipment*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2000.
- [61] Kurt Toenshoff Hans and Berend Denkena. *Basics of Cutting and Abrasive Processes*. Lecture Notes in Production Engineering. Springer Science & Business Media, Berlin, Heidelberg, 2013.

ANNEXES

Annexe A

Éprouvette plate selon la norme ISO 6892-1



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	1:1.5		Eprouvette de test de traction	Département G. Mécanique
Etudiante	BENKHELOUF			
Encadrant	SAIDI			
Encadrant	ZEROUDI			
Matériau				02/05/2025

Annexe B

Limites de composition chimique des aciers au carbone selon la classification AISI

AISI CHEMICAL COMPOSITION LIMITS:
Nonresulphurized Carbon Steels

AISI No.	SAE No.	Chemical Composition Limits, per cent			
		C	Mn	P Max.	S Max.
1008	—	0.10max.	0.30/0.50	0.040	0.050
1010	1010	0.08/0.13	0.30/0.50	0.040	0.050
1012	1012	0.10/0.15	0.30/0.60	0.040	0.050
1015	1015	0.13/0.18	0.30/0.60	0.040	0.050
1016	1016	0.13/0.18	0.60/0.90	0.040	0.050
1017	1017	0.15/0.20	0.30/0.60	0.040	0.050
1018	1018	0.15/0.20	0.60/0.90	0.040	0.050
1019	1019	0.15/0.20	0.70/1.00	0.040	0.050
1020	1020	0.18/0.23	0.30/0.60	0.040	0.050
1021	1021	0.18/0.23	0.60/0.90	0.040	0.050
1022	1022	0.18/0.23	0.70/1.00	0.040	0.050
1023	1023	0.20/0.25	0.30/0.60	0.040	0.050
1024	1024	0.19/0.25	1.35/1.65	0.040	0.050
1025	1025	0.22/0.28	0.30/0.60	0.040	0.050
1026	1026	0.22/0.28	0.60/0.90	0.040	0.050
1027	1027	0.22/0.29	1.20/1.50	0.040	0.050
1029	—	0.25/0.31	0.60/0.90	0.040	0.050
1030	1030	0.28/0.34	0.60/0.90	0.040	0.050
1035	1035	0.32/0.38	0.60/0.90	0.040	0.050
1036	1036	0.30/0.37	1.20/1.50	0.040	0.050
1037	1037	0.32/0.38	0.70/1.00	0.040	0.050
1038	1038	0.35/0.42	0.60/0.90	0.040	0.050
1039	1039	0.37/0.44	0.70/1.00	0.040	0.050
1040	1040	0.37/0.44	0.60/0.90	0.040	0.050
1041	1041	0.36/0.44	1.35/1.65	0.040	0.050
1042	1042	0.40/0.47	0.60/0.90	0.040	0.050
1043	1043	0.40/0.47	0.70/1.00	0.040	0.050
1044	1044	0.43/0.50	0.30/0.60	0.040	0.050
1045	1045	0.43/0.50	0.60/0.90	0.040	0.050
1046	1046	0.43/0.50	0.70/1.00	0.040	0.050
1048	1048	0.44/0.52	1.10/1.40	0.040	0.050
1049	1049	0.46/0.53	0.60/0.90	0.040	0.050
1050	1050	0.48/0.55	0.60/0.90	0.040	0.050
1051	—	0.45/0.56	0.85/1.15	0.040	0.050
1052	1052	0.47/0.55	1.20/1.50	0.040	0.050
1053	—	0.48/0.55	0.70/1.00	0.040	0.050
1055	1055	0.50/0.60	0.60/0.90	0.040	0.050
1060	1060	0.55/0.65	0.60/0.90	0.040	0.050
1070	1070	0.65/0.75	0.60/0.90	0.040	0.050
1078	1078	0.72/0.85	0.30/0.60	0.040	0.050
1080	1080	0.75/0.88	0.60/0.90	0.040	0.050
1084	1084	0.80/0.93	0.60/0.90	0.040	0.050
1090	1090	0.85/0.98	0.60/0.90	0.040	0.050
1095	1095	0.90/1.03	0.30/0.50	0.040	0.050

Silicon: When silicon is required, the following ranges and limits are commonly used:

STANDARD STEEL DESIGNATIONS

Up to 1015 excl.
1015 to 1025 incl.
Over 1025

SILICON RANGES OR LIMITS

0.10 Max.
0.10 Max., 0.10/0.20, or 0.15/0.30
0.10/0.20, or 0.15/0.30

Copper: Can be added to a standard steel.

Lead: When lead is required as an added element to a standard steel, a range of 0.15 to 0.35 per cent, inclusive is generally used. Such a steel is identified by inserting the letter "L" between the second and third numerals of the AISI number, e.g., 10 L 45.

Annexe C

Fiche technique de l'acier AISI 1010



Material - AISI 1010

Standard Specification For Carbon Steel Compositions For Forging To Hot-Rolled And Cold-Finished Tubing

Group - Ferrous Mild Steel Alloys

Sub Group - AISI 1010 Carbon Steel Compositions For Forging To Hot-Rolled And Cold-Finished Tubing

Application - Intended for Valve, Pump, General Engineering, Automotive and Other Industries

Grade Belongs to the Industry - Tubing

Chemical Composition			Heat Treatment	
Carbon	C %	0.080 - 0.130	As Raw or Annealing or Normalizing or Hardening and Tempering	
Manganese	Mn %	0.300 - 0.600		
Phosphorus	P %	0.035 max.		
Sulphur	S %	0.035 max.		
Iron	Fe %	Balance		
-	-	-		
-	-	-		
-	-	-	Mechanical Properties	
-	-	-	Tensile Strength in Mpa	275 - 655
-	-	-	Yield Strength in Mpa	170 min.
-	-	-	Elongation in %	5 min.
-	-	-	Reduction of Area in %	40 - 50
-	-	-	Hardness in HB	95 - 105
-	-	-	Impact in Joule	-

Cross Reference Table			
Material	Standard	Country	Grade Belong to the Industry
G10100	UNS	USA	Bars, Wire Rods, Plates, Strip, Sheets and Tubing
1010	SAE	USA	Sheet and Tubing
A 1040 1010	ASTM	USA	Bars, Wire Rods, Plates, Strip, Sheets and Tubing
A 108 Grade 1010	ASTM	USA	Bar and Sheet
A 29 1010	ASTM	USA	Bar
A 29 M1010	ASTM	USA	Bar
A 510 1010	ASTM	USA	Bars, Wire Rods, Plates, Strip, Sheets and Tubing

Further any inquiry to discuss with Gravity Cast Pvt. Ltd. – Gravity Group of Companies team member Call on +918469160029, or email marketing@gravitycastindia.com

All information in our data sheets and website is indicative only and is not intended to be a substitute for the full specification from which it is extracted. It is intended to provide typical values to allow comparison between metal alloy option rather than a definitive statement of mechanical performance or suitability for a particular application as these will vary with temperature, product type and product application. It is presented apart from contractual obligations and does not constitute any guarantee of properties or of processing or application possibilities in individual cases. Our warranties and liabilities are stated exclusively in our terms of business.

Annexe D

**Extrait du catalogue des outils utilisé
pour le choix des niveaux des conditions
de coupe**


Recommended cutting data:

material	DC [mm]	cutting speed vc [m / min]	feed rate per tooth fz [mm]	cutting depth ap max [mm]	grade
unalloyed steel	3	140 - 200	0.02 - 0.04	1.5 x Ø	IN2005
	4	140 - 200	0.02 - 0.05	1.5 x Ø	IN2005
	5	140 - 200	0.025 - 0.06	1.5 x Ø	IN2005
	6	140 - 200	0.025 - 0.07	1.5 x Ø	IN2005
	8	140 - 200	0.03 - 0.09	1.5 x Ø	IN2005
	10	140 - 200	0.03 - 0.10	1.5 x Ø	IN2005
	12	140 - 200	0.035 - 0.11	1.5 x Ø	IN2005
	16	140 - 200	0.05 - 0.13	1.5 x Ø	IN2005
	20	140 - 200	0.05 - 0.17	1.5 x Ø	IN2005
	25	140 - 200	0.07 - 0.20	1.5 x Ø	IN2005
alloyed steel < 800N/mm ²	3	140 - 200	0.02 - 0.04	1.5 x Ø	IN2005
	4	140 - 200	0.02 - 0.05	1.5 x Ø	IN2005
	5	140 - 200	0.025 - 0.06	1.5 x Ø	IN2005
	6	140 - 200	0.025 - 0.07	1.5 x Ø	IN2005
	8	140 - 200	0.03 - 0.09	1.5 x Ø	IN2005
	10	140 - 200	0.03 - 0.10	1.5 x Ø	IN2005
	12	140 - 200	0.035 - 0.11	1.5 x Ø	IN2005
	16	140 - 200	0.05 - 0.13	1.5 x Ø	IN2005
	20	140 - 200	0.05 - 0.17	1.5 x Ø	IN2005
	25	140 - 200	0.07 - 0.20	1.5 x Ø	IN2005
alloyed steel < 1100N/mm ²	3	120 - 180	0.02 - 0.04	1.5 x Ø	IN2005
	4	120 - 180	0.02 - 0.05	1.5 x Ø	IN2005
	5	120 - 180	0.025 - 0.06	1.5 x Ø	IN2005
	6	120 - 180	0.025 - 0.07	1.5 x Ø	IN2005
	8	120 - 180	0.03 - 0.09	1.5 x Ø	IN2005
	10	120 - 180	0.03 - 0.10	1.5 x Ø	IN2005
	12	120 - 180	0.035 - 0.11	1.5 x Ø	IN2005
	16	120 - 180	0.05 - 0.13	1.5 x Ø	IN2005
	20	120 - 180	0.05 - 0.17	1.5 x Ø	IN2005
	25	120 - 180	0.07 - 0.20	1.5 x Ø	IN2005
stainless steel	3	60 - 120	0.02 - 0.03	0.5 - 0.8 x Ø	IN2005
	4	60 - 120	0.02 - 0.035	0.5 - 0.8 x Ø	IN2005
	5	60 - 120	0.02 - 0.04	0.5 - 0.8 x Ø	IN2005
	6	60 - 120	0.02 - 0.05	0.5 - 0.8 x Ø	IN2005
	8	60 - 120	0.02 - 0.07	0.5 - 0.8 x Ø	IN2005
	10	60 - 120	0.02 - 0.08	0.5 - 0.8 x Ø	IN2005
	12	60 - 120	0.03 - 0.09	0.5 - 0.8 x Ø	IN2005
	16	60 - 120	0.04 - 0.10	0.5 - 0.8 x Ø	IN2005
	20	60 - 120	0.04 - 0.13	0.5 - 0.8 x Ø	IN2005
	25	60 - 120	0.05 - 0.15	0.5 - 0.8 x Ø	IN2005

Successful machining results depend on many factors, so cutting data recommendations can only be a rough guideline. Therefore in any case of doubt do not hesitate to contact your Innotool partner.

Annexe E

Valeurs critiques du coefficient F

TABLE A.3

F Distribution: Critical Values of F (5% significance level)

ν_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20
ν_2															
1	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54	241.88	243.91	245.36	246.46	247.32	248.01
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.42	19.43	19.44	19.45
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.71	8.69	8.67	8.66
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.87	5.84	5.82	5.80
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.64	4.60	4.58	4.56
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.96	3.92	3.90	3.87
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.53	3.49	3.47	3.44
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.24	3.20	3.17	3.15
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.03	2.99	2.96	2.94
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.86	2.83	2.80	2.77
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.74	2.70	2.67	2.65
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.64	2.60	2.57	2.54
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.55	2.51	2.48	2.46
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.48	2.44	2.41	2.39
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.42	2.38	2.35	2.33
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.37	2.33	2.30	2.28
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.33	2.29	2.26	2.23
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.29	2.25	2.22	2.19
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.26	2.21	2.18	2.16
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.22	2.18	2.15	2.12
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.20	2.16	2.12	2.10
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.17	2.13	2.10	2.07
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.15	2.11	2.08	2.05
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.13	2.09	2.05	2.03
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.11	2.07	2.04	2.01
26	4.22	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.09	2.05	2.02	1.99
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.08	2.04	2.00	1.97
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.06	2.02	1.99	1.96
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.05	2.01	1.97	1.94
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.04	1.99	1.96	1.93
35	4.12	3.27	2.87	2.64	2.49	2.37	2.29	2.22	2.16	2.11	2.04	1.99	1.94	1.91	1.88
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.95	1.90	1.87	1.84
50	4.03	3.18	2.79	2.56	2.40	2.29	2.20	2.13	2.07	2.03	1.95	1.89	1.85	1.81	1.78
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.86	1.82	1.78	1.75
70	3.98	3.13	2.74	2.50	2.35	2.23	2.14	2.07	2.02	1.97	1.89	1.84	1.79	1.75	1.72
80	3.96	3.11	2.72	2.49	2.33	2.21	2.13	2.06	2.00	1.95	1.88	1.82	1.77	1.73	1.70
90	3.95	3.10	2.71	2.47	2.32	2.20	2.11	2.04	1.99	1.94	1.86	1.80	1.76	1.72	1.69
100	3.94	3.09	2.70	2.46	2.31	2.19	2.10	2.03	1.97	1.93	1.85	1.79	1.75	1.71	1.68
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.78	1.73	1.69	1.66
150	3.90	3.06	2.66	2.43	2.27	2.16	2.07	2.00	1.94	1.89	1.82	1.76	1.71	1.67	1.64
200	3.89	3.04	2.65	2.42	2.26	2.14	2.06	1.98	1.93	1.88	1.80	1.74	1.69	1.66	1.62
250	3.88	3.03	2.64	2.41	2.25	2.13	2.05	1.98	1.92	1.87	1.79	1.73	1.68	1.65	1.61
300	3.87	3.03	2.63	2.40	2.24	2.13	2.04	1.97	1.91	1.86	1.78	1.72	1.68	1.64	1.61
400	3.86	3.02	2.63	2.39	2.24	2.12	2.03	1.96	1.90	1.85	1.78	1.72	1.67	1.63	1.60
500	3.86	3.01	2.62	2.39	2.23	2.12	2.03	1.96	1.90	1.85	1.77	1.71	1.66	1.62	1.59
600	3.86	3.01	2.62	2.39	2.23	2.11	2.02	1.95	1.90	1.85	1.77	1.71	1.66	1.62	1.59
750	3.85	3.01	2.62	2.38	2.23	2.11	2.02	1.95	1.89	1.84	1.77	1.70	1.66	1.62	1.58
1000	3.85	3.00	2.61	2.38	2.22	2.11	2.02	1.95	1.89	1.84	1.76	1.70	1.65	1.61	1.58

Annexe F

Valeurs critiques du coefficient t

TABLE A.2

t Distribution: Critical Values of t

<i>Degrees of freedom</i>	<i>Two-tailed test: One-tailed test:</i>	<i>Significance level</i>					
		10% 5%	5% 2.5%	2% 1%	1% 0.5%	0.2% 0.1%	0.1% 0.05%
1		6.314	12.706	31.821	63.657	318.309	636.619
2		2.920	4.303	6.965	9.925	22.327	31.599
3		2.353	3.182	4.541	5.841	10.215	12.924
4		2.132	2.776	3.747	4.604	7.173	8.610
5		2.015	2.571	3.365	4.032	5.893	6.869
6		1.943	2.447	3.143	3.707	5.208	5.959
7		1.894	2.365	2.998	3.499	4.785	5.408
8		1.860	2.306	2.896	3.355	4.501	5.041
9		1.833	2.262	2.821	3.250	4.297	4.781
10		1.812	2.228	2.764	3.169	4.144	4.587
11		1.796	2.201	2.718	3.106	4.025	4.437
12		1.782	2.179	2.681	3.055	3.930	4.318
13		1.771	2.160	2.650	3.012	3.852	4.221
14		1.761	2.145	2.624	2.977	3.787	4.140
15		1.753	2.131	2.602	2.947	3.733	4.073
16		1.746	2.120	2.583	2.921	3.686	4.015
17		1.740	2.110	2.567	2.898	3.646	3.965
18		1.734	2.101	2.552	2.878	3.610	3.922
19		1.729	2.093	2.539	2.861	3.579	3.883
20		1.725	2.086	2.528	2.845	3.552	3.850
21		1.721	2.080	2.518	2.831	3.527	3.819
22		1.717	2.074	2.508	2.819	3.505	3.792
23		1.714	2.069	2.500	2.807	3.485	3.768
24		1.711	2.064	2.492	2.797	3.467	3.745
25		1.708	2.060	2.485	2.787	3.450	3.725
26		1.706	2.056	2.479	2.779	3.435	3.707
27		1.703	2.052	2.473	2.771	3.421	3.690
28		1.701	2.048	2.467	2.763	3.408	3.674
29		1.699	2.045	2.462	2.756	3.396	3.659
30		1.697	2.042	2.457	2.750	3.385	3.646
32		1.694	2.037	2.449	2.738	3.365	3.622
34		1.691	2.032	2.441	2.728	3.348	3.601
36		1.688	2.028	2.434	2.719	3.333	3.582
38		1.686	2.024	2.429	2.712	3.319	3.566
40		1.684	2.021	2.423	2.704	3.307	3.551
42		1.682	2.018	2.418	2.698	3.296	3.538
44		1.680	2.015	2.414	2.692	3.286	3.526
46		1.679	2.013	2.410	2.687	3.277	3.515
48		1.677	2.011	2.407	2.682	3.269	3.505
50		1.676	2.009	2.403	2.678	3.261	3.496
60		1.671	2.000	2.390	2.660	3.232	3.460
70		1.667	1.994	2.381	2.648	3.211	3.435
80		1.664	1.990	2.374	2.639	3.195	3.416
90		1.662	1.987	2.368	2.632	3.183	3.402
100		1.660	1.984	2.364	2.626	3.174	3.390
120		1.658	1.980	2.358	2.617	3.160	3.373
150		1.655	1.976	2.351	2.609	3.145	3.357
200		1.653	1.972	2.345	2.601	3.131	3.340
300		1.650	1.968	2.339	2.592	3.118	3.323
400		1.649	1.966	2.336	2.588	3.111	3.315
500		1.648	1.965	2.334	2.586	3.107	3.310
600		1.647	1.964	2.333	2.584	3.104	3.307
∞		1.645	1.960	2.326	2.576	3.090	3.291