

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 Guelma



Faculté des Sciences Et De La Technologie
Département de Génie Mécanique
Laboratoire de Mécanique et structures (LMS)

THÈSE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
DOCTORAT EN 3^{ème} CYCLE

Domaine : Sciences et Techniques Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Construction mécanique

Présentée par

Khelfaoui Fethi

Intitulée

Modélisation statistique et optimisation des paramètres d'usinage pour minimiser les vibrations, l'intensité sonore, la rugosité de surface, et la puissance consommée lors de l'usinage discontinu.

Soutenue le : 04 juillet 2024

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom

Grade

Mr Djebala abderrazek

Professeur

Univ. 8 Mai 1945 Guelma

Président

Mr Yallese M.A.

Professeur

Univ. 8 Mai 1945 Guelma

Rapporteur

Mr Ouelaa Nouredine

Professeur

Univ. 8 Mai 1945 Guelma

Co-rapporteur

Mr Laouar Lakhdar

Professeur

Univ. Badji Mokhtar Annaba

Examineur

Mr Belhadi Salim

Professeur

Univ. 8 Mai 1945 Guelma

Examineur

Mr Boucherit septi

MCA

Univ. 8 Mai 1945 Guelma

Examineur

Année Universitaire : 2023/2024

Dédicace

À ma mère et à mon défunt père, dont l'amour et le soutien indéfectibles ont été les piliers de mon parcours académique. Votre encouragement constant m'a donné la force de poursuivre mes rêves et de m'épanouir dans le monde de la connaissance. À ma famille, qu'elle soit petite ou grande, vous êtes ma source d'inspiration infinie. Chaque réussite dans ce voyage académique est également la vôtre. Merci pour votre soutien inconditionnel et votre amour sans bornes. Cette thèse est dédiée à vous tous, avec gratitude et affection infinie. À tous les enseignants qui ont partagé leur savoir et leur passion pour l'apprentissage, et en particulier à M. **Bendjamaa Ali**, dont la guidance et le dévouement ont illuminé mon chemin académique. Vos enseignements ont été une source d'inspiration constante et ont contribué à façonner ma compréhension du monde qui m'entoure. Je vous suis profondément reconnaissant pour votre soutien inestimable tout au long de ce parcours éducatif. Merci d'avoir enrichi ma vie de vos connaissances et de votre bienveillance.

Remerciement

Nous commençons par exprimer notre gratitude envers Dieu, notre Créateur, pour nous avoir donné la force nécessaire pour mener à bien cette recherche.

*Ce travail a été réalisé sous la direction du Professeur **Yaltese Mohamed Athmane**, du département de Génie Mécanique de l'Université 8 Mai 1945 de Guelma. Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance envers lui pour sa confiance, son soutien constant, ses conseils et son assistance tout au long de cette période.*

*Je souhaite également remercier chaleureusement mon co-directeur de thèse, le Professeur **Ouelaa Nouredine** de l'Université 8 Mai 1945 de Guelma, pour son précieux soutien et ses conseils avisés.*

*Un grand merci à Monsieur **Djebala Abderrezek**, Professeur au département de Génie Mécanique de l'Université de Guelma, pour l'honneur qu'il me fait en présidant ce jury de thèse.*

*Mes remerciements vont également à Messieurs : **Laouar Lakhdar**, Professeur à l'Université Badji Mokhtar d'Annaba, **Belhadi Salim**, Professeur à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma, et **Bouchrif Septi**, Maître de Conférences Agrégé à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma, pour avoir accepté la tâche d'examineurs et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail de thèse.*

*Je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers **Belhadi Salim**, et **Bouchrif septi** pour son*

précieux soutien et ses conseils tout au long de la réalisation de ma thèse de doctorat.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous les enseignants qui interviennent et assurent la formation doctorale. Votre dévouement, votre expertise et votre soutien continu sont inestimables et contribuent grandement à notre réussite

J'adresse mes remerciements également à toutes celles et tous ceux qui m'ont aidé à différents stades de ce travail, et à tous les membres, les thésards et les techniciens du Laboratoire de Mécanique et Structure (LMS).

Résumé

Le tournage intermittent est un procédé d'usinage couramment utilisée dans l'industrie manufacturière, il est également appelé tournage discontinu. Ce procédé d'usinage est utilisé pour fabriquer des pièces métalliques ou autres composants avec des formes spécifiques ayant des discontinuités. Contrairement au tournage continu, où l'outil de coupe maintient un contact constant avec la pièce en rotation, le tournage intermittent implique des périodes d'engagement et de désengagement de l'outil avec la pièce. C'est dans ce cadre que cette étude est réalisée. L'objectif principal était d'évaluer l'impact des paramètres de coupe, à savoir, la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f), la profondeur de coupe (a_p) et le rayon du bec de l'outil (r) sur la qualité de la surface (R_a), la puissance consommée (P_m), l'effort de coupe tangentiel (F_z), l'usure de l'outil de coupe (V_B), la température de coupe (C_t), la vibration tangentielle (A_z), l'intensité sonore (L_p) et la productivité (MRR), lors du tournage intermittent de l'acier AISI D3. Notre travail subdivisé en quatre grandes parties :

Une première partie qui s'intéresse de la quantification de l'impact de chaque paramètre de coupe sur les performances visées exploitant l'analyse de la variance (ANOVA). La deuxième partie se focalise à modéliser les performances étudiées afin de pouvoir prédire les paramètres technologiques de sortie étudiées, à cet objectif, la méthode de surface de réponse (RSM) a été utilisée. Une troisième partie dédiée à faire une optimisation multi objective des paramètres de performance exploitant les méthodes DF, GRA, MOORA, VIKOR, et NSGAI couplé avec VIKOR afin d'optimiser les performances technologiques et trouver la meilleure combinaison des paramètres de coupe. Une comparaison des résultats obtenus des approches utilisées a été effectuée afin de proposer des régimes optimaux qui vise à satisfaire les exigences industrielles. Une dernière partie qui traite les signaux vibratoires obtenus à l'objectif d'étudier le comportement vibratoire de l'outil dans la phase d'engagement dans la matière et de déengagement, et de trouver un critère d'évaluation pour minimiser l'usure.

Mots clés : Modélisation, Optimisation des paramètres de coupe, Vibrations, Intensité sonore, rugosité de surface, Puissance consommée, Tournage discontinu (intermittent).

Abstract

Intermittent turning is a machining process commonly used in the manufacturing industry, and is also known as discontinuous turning. This machining process is used to manufacture metal parts or other components with specific shapes and discontinuities. Unlike continuous turning, where the cutting tool maintains constant contact with the rotating workpiece, intermittent turning involves periods of engagement and disengagement of the tool with the workpiece. It is in this context that this study was carried out. The main objective was to assess the impact of cutting parameters, namely cutting speed (V_c), feed per revolution (f), depth of cut (a_p) and tool nose radius (r) on surface quality (R_a), power consumption (P_m), tangential cutting force (F_z), cutting tool wear (V_B), cutting temperature (C_t), tangential vibration (A_z), noise intensity (L_p) and productivity (MRR), during intermittent turning of AISI D3 steel. Our work is divided into four main parts:

The first part focuses on quantifying the impact of each cutting parameter on the target performance using analysis of variance (ANOVA). The second part focuses on modelling the performance studied in order to be able to predict the technological output parameters studied. For this purpose, the response surface method (RSM) was used. A third part is dedicated to a multi-objective optimization of the performance parameters exploiting the DF, GRA, MOORA, VIKOR, and NSGAII methods coupled with VIKOR in order to optimize the technological performance and find the best combination of cutting parameters. A comparison of the results obtained from the approaches used was carried out in order to propose optimal regimes that aim to satisfy industrial requirements. The final part, which deals with the vibration signals obtained, aims to study the vibratory behavior of the tool during the material engagement and disengagement phases, and to find an evaluation criterion for minimizing wear.

Key words: Modeling, Optimization, machining parameters, Vibration, Sound intensity, Surface roughness, Power consumption, Intermittent Turing

المخلص

الخراطة المتقطعة هي عملية تشغيل آلي شائعة الاستخدام في الصناعة الميكانيكية، وتعرف أيضا باسم الخراطة غير المستمرة. تستعمل عملية الخراطة لتصنيع الأجزاء المعدنية أو المكونات الأخرى ذات الأشكال المحددة والتقطيعات المعقدة. على عكس الخراطة المستمرة، حيث تحافظ أداة القطع على اتصال دائم بقطعة التشغيل فإن الخراطة المتقطعة تتضمن فترات من اتصال وانفصال أداة القطع عن قطعة التشغيل، وفي هذا السياق تم إجراء هذه الدراسة. هدف هذه الدراسة هو تقييم تأثير عوامل القطع التالية (a_p, f, V_c, r) على جودة السطح (R_a)، استهلاك الطاقة (P_m)، قوة القطع المماسية (F_z) وتآكل أداة القطع (V_B)، درجة حرارة القطع (C_t)، الاهتزازات المماسية (A_z)، شدة الصوت (L_p) والإنتاجية (MRR).

ينقسم البحث إلى أربعة أقسام كبيرة: يركز الجزء الأول على تحديد تأثير كل عامل من عوامل القطع على الأداء المستهدف باستخدام تحليل التباين ($ANOVA$). ويركز على الجزء الثاني على نمذجة الأداء المدروس من أجل التمكن من التنبؤ بعوامل المخرجات التكنولوجية المدروسة ولهذا الغرض تم استخدام طريقة سطح الاستجابة (RSM) أما الجزء الثالث فهو مخصص لتحسين متعدد الأهداف لعوامل الأداء باستخدام الطرق: $NSGAI, VIKOR, MOORA, GRA, DF$ المقترنة بـ $VIKOR$ من أجل تحسين الأداء التكنولوجي وإيجاد أفضل مجموعة من عوامل القطع. وفي نهاية هذا الجزء تم إجراء مقارنة للنتائج المحصل عليها من الطرق المستخدمة من أجل اقتراح العوامل المثلى التي تهدف إلى تلبية المتطلبات الصناعية. يهدف الجزء الأخير والذي يتناول إشارات الاهتزازات المتحصل عليها تجريبيا إلى دراسة السلوك الاهتزازي لأداة القطع أثناء مرحلتي الدخول إلى المادة والخروج منها وإيجاد معيار تقييمي للتقليل من تآكل أداة القطع إلى الحد الأدنى.

الكلمات المفتاحية: النمذجة، تحسين عوامل القطع، الاهتزازات، شدة الصوت، نوعية السطح، الطاقة المستهلكة، الخراطة المتقطعة

Index des figures

Chapitre I Étude bibliographique

Figure I.1	Tournage intermittent	6
Figure I.2	Classement des matériaux à outils selon l'usure et la dureté.	9
Figure I.3	Variation de conductivité thermique en fonction de (°C)	10
Figure I.4	Applications de l'aciers a outils	12
Figure I.5	Différents paramètres de rugosité de surface	13
Figure I.6	Secteurs les plus consomment de l'énergie en USA	14
Figure I.7	Puissance consommée sur une machine du tournage en fonction du temps	15
Figure I.8	Composants des efforts de coupe lors du tournage	16
Figure I.9	Différente forme d'usure d'outil de coupe	17
Figure I.10	Répartition de la chaleur en tournage	18
Figure I.11	Signal de vibration	19
Figure I.12	Génération d'émission acoustique pendant la coupe des métaux	20
Figure I.13	Différent test par rapport au niveau de précision et de contrôle	20
Figure I.14	Événements d'émission acoustique enregistrés	21
Figure I.15	Pièce a usiner	22
Figure I.16	Effort de coupe en fonction des facteurs V_c , f , et a_p	22
Figure I.17	Usure de l'outil en fonction de différents teneurs en CBN	23
Figure I.18	Pièces a usiné : (a) Intermittent, (b) Semi intermittent, (c) Continu	23
Figure I.19	Temps de coupe pour chaque expérience	24
Figure I.20	Pièces usinées, (a) continu, (b) intermittent	24
Figure I.21	Rugosité de surface en fonction de MMR	25
Figure I.22	Temps de coupe et MRR des différents types d'outils	25
Figure I.23	Illustration de la fixation des éprouvettes	27
Figure I.24	Variation de Q et N en fonction des facteurs d'entrée	27
Figure I.25	Types de pièces utilisées	28
Figure I.26	Rugosité de surface attendue par rapport à la largeur des interruptions pour les outils testés HX et TP2500	28
Figure I.27	Eprouvettes utilisées	29
Figure I.28	Vibration en fonction de l'avance (f) pour les trois types d'interruption	29
Figure I.29	Rugosité de surface en fonction des vibrations en usinage : (a) sec et (b) MQL	29
Figure I.30	Les quatre pièces fixées sur le dispositif	30
Figure I.31	Effort de coupe en fonction de (V_c), (f) et (a_p). a) la phase d'usure initiale, b) la phase d'usure normale, c) phase d'usure rapide.	30
Figure I.32	Eprouvettes à usiner	31

Figure I.33	Ra en fonction de (V_c), (f), (i)	31
Figure I.34	Crête à crête de chaque essai	31
Figure I.35	Eprouvette à usiner	32
Figure I.36	Surface 3D des trois paramètres et la zone optimale	32
Figure I.37	Eprouvette à usiner	33
Figure I.38	Outil d'amortissement : (1) plaquette de coupe ; (2) ressort ; (3) support ; (4) boîtier ; (5) matériau de remplissage auto vulcanisant.	33
Figure I.39	Rugosité de surface en fonction de (V) et (F) ; (1) outil standard (2) outil avec amortissement	33
Figure I.40	(a) Procédure de coupe (b) Dimension de la pièce à usiner	34
Figure I.41	L'effort moyenne et de l'impact en fonction de V_c	34
Figure I.42	Usure en fonction de V_c	35
Figure I.43	Surface 3D de l'effort de coupe en fonction de (f) et (V_c)	35
Figure I.44	Conception d'un processus du tournage intermittent plus durable	36
Figure I.45	Taux d'usure W_r et I_t de l'outil en fonction de V_r et A_w	36
Figure I.46	Eprouvettes installées sur le support	37
Figure I.47	(F) en fonction de (V_c) et (a_p)	37
Figure I.48	Température de coupe en fonction de (V_c) et (a_p)	37
Figure I.49	Usure de flanc (V_B max) en fonction du nombre d'impacts pour les cinq outils	38

Chapitre II Procédure expérimentale

Figure II.1	Eprouvette utilisée	43
Figure II.2	Machine-outil modèle SN40C	43
Figure II.3	Variateur de fréquence ABB	44
Figure II.4	Outil de coupe, porte outil et plaquette	44
Figure II.5	Rugosimètre surfest 210-SJ	45
Figure I.6	Composantes de l'effort de coupe	46
Figure II.7	Acquisition des efforts par le dynamomètre Kistler type 9257 B	46
Figure II.8	Mesure de la puissance par analyseur Lutron type DW- 6095	47
Figure II.9	Mesure de la température de coupe par caméra thermographie	48
Figure II.10	Mesure de l'usure V_B	49
Figure II.11	Mesure de vibration	49
Figure II.12	Mesure de l'intensité sonore	50
Figure II.13	Organigramme de la démarche scientifique.	53

Chapitre III

Analyse statistique et modélisation du processus du tournage intermittent

Figure III.1	Diagramme de Pareto des effets normalisés pour (Ra).	59
Figure III.2	Droite de Henry des effets normalisés de (Ra).	60
Figure III.3	Diagramme de Pareto des effets normalisés pour (Ct).	61
Figure III.4	Droite de Henry des effets normalisés de (Ct).	62
Figure III.5	Diagramme de Pareto des effets normalisés pour (V_B).	63
Figure III.6	Droite de Henry des effets normalisés de (V_B).	63
Figure III.7	Graphes des effets principaux des réponses (Ra), (Ct), et (V_B).	65
Figure III.8	Diagramme de Pareto des effets normalisés pour (Pm) et (Pc).	66
Figure III.9	Droite de Henry des effets normalisés de (Pm) et (Pc).	67
Figure III.10	Graphes des effets principaux des réponses (Pm) et (Pc).	68
Figure III.11	Diagramme de Pareto des effets normalisés pour (Fz).	69
Figure III.12	Droite de Henry des effets normalisés de (Fz).	70
Figure III.13	Diagramme de Pareto des effets normalisés pour (Az).	71
Figure III.14	Droite de Henry des effets normalisés de (Az).	71
Figure III.15	Diagramme de Pareto des effets normalisés pour (Lp).	72
Figure III.16	Droite de Henry des effets normalisés de (Lp).	73
Figure III.17	Graphes des effets principaux des réponses (Fz) (Az) et (Pc).	74
Figure III.18	Graphes (3D) des performances étudiées.	76
Figure III.19	Plan normal des résiduels de la réponse (Ra), (V_B), et (Ct).	78
Figure III.20	Plan normal des résiduels de la réponse (Pm), et (Pc).	79
Figure III.21	Plan normal des résiduels de la réponse (Fz), (Az) et (Lp).	80
Figure III.22	Plan de distribution des résiduels par rapport aux prédites pour (Ra), (V_B), et (Ct).	81
Figure III.23	Plan de distribution des résiduels par rapport aux prédites pour (Pm) et (Pc).	82
Figure III.24	Plan de distribution des résiduels par rapport aux prédites pour (Fz), (Az) et (Lp).	84

Chapitre IV

Optimisation des paramètres de performance

Figure IV.1	Graphiques de bar de désirabilité pour les trois scénarios d'optimisation	89
Figure IV.2	Graphiques de bar de désirabilité pour les quatre scénarios examinés	91
Figure IV.3	Graphes (3D) de la fonction Désirabilité	93
Figure IV.4	Etapas de la méthode GRA	93
Figure IV.5	GRG pour chaque essai du 1er cas étudié	95
Figure IV.6	GRG pour chaque essai du 2ieme cas étudié	96
Figure IV.7	Etapas de la méthode MOORA	97

Figure IV.8	Etapes de la méthode VIKOR	100
Figure IV.9	Etapes de la méthode NSGA II	101
Figure IV.10	Courbes de Pareto des réponses (Ra, Pm, VB, Ct, Fz, et Az,) en fonction de (1/MRR)	103

Chapitre IV

Etude du comportement vibratoire de l'outil lors du tournage intermittent

Figure V.1	Signal de vibration de l'essai n° :01	115
Figure V.2	Signal de vibration de l'essai n° :02	115
Figure V.3	Signal de vibration de l'essai n° :03	116
Figure V.4	Signal de vibration de l'essai n° :04	116
Figure V.5	Signal de vibration de l'essai n° :05	116
Figure V.6	Signal de vibration de l'essai n° :06	117
Figure V.7	Signal de vibration de l'essai n° :07	117
Figure V.8	Signal de vibration de l'essai n° :08	117
Figure V.9	Signal de vibration de l'essai n° :09	118
Figure V.10	Engagements et dégagements lors du tournage intermittent.	118
Figure V.11	Engagements et dégagements de l'essai n° :01.	119
Figure V.12	Engagements et dégagements de l'essai n° :02.	119
Figure V.13	Engagements et dégagements de l'essai n° :03.	120
Figure V.14	Engagements et dégagements de l'essai n° :04.	120
Figure V.15	Engagements et dégagements de l'essai n° :05.	121
Figure V.16	Engagements et dégagements de l'essai n° :06.	121
Figure V.17	Engagements et dégagements de l'essai n° :07.	122
Figure V.18	Engagements et dégagements de l'essai n° :08.	122
Figure V.19	Engagements et dégagements de l'essai n° :09.	123
Figure V.20	Zoom sur la zone de dégagement de l'outil de la matière usinée	123
Figure V.21	Zoom sur la zone d'engagement de l'outil dans la matière usinée.	124
Figure V.22	Zoom sur l'engagement du palier 2 de l'essai n° :6.	124
Figure V.23	Zoom sur l'engagement du palier 3 de l'essai n° :8.	125
Figure V.24	Système élémentaire à un degré de liberté.	126
Figure V.25	Réponse en oscillation libre d'un système sous-amorti.	127
Figure V.26	Zoom dans la zone de dégagement.	128

Index des tableaux

**Chapitre I
Étude bibliographique**

Tableau I.1	Type et rôle de revêtements	10
Tableau I.2	Temps d'impact et V_B des outils	26
Tableau I.3	Articles publiés en 2023/2024 dans le domaine de l'usinage utilisant les approches DF, MOORA, GRA, VIKOR et NSGA-II.	39

**Chapitre II
Procédure expérimentale**

Tableau II.1	Désignation de l'acier utilisé	42
Tableau II.2	Composition chimique de l'acier AISI D3	43
Tableau II.3	Géométrie de l'outil de coupe utilisé	44
Tableau II.4	Facteurs d'entrée et les niveaux adoptés	51
Tableau II.5	Tableau de Taguchi L9 (3^4)	51
Tableau II.6	Conditions opératoires	52

**Chapitre III
Analyse statistique et modélisation du processus du tournage intermittent**

Tableau III.1	Résultats expérimentaux selon le plan de Taguchi L9	58
Tableau III.2	ANOVA de R_a	59
Tableau III.3	ANOVA de C_t	61
Tableau III.4	ANOVA de V_B	62
Tableau III.5	ANOVA de P_m et P_c	66
Tableau III.6	ANOVA F_z	69
Tableau III.7	ANOVA de A_z	70
Tableau III.8	ANOVA de L_p	72

Chapitre IV

Optimisation des paramètres de performance

Tableau IV.1	Contraintes d'optimisation et importances	88
Tableau IV.2	Solutions proposées par la (DF) selon les trois scénarios étudiés	88
Tableau IV.3	Contraintes d'optimisation et importances	90
Tableau IV.4	Solutions proposées par la (DF) selon les quatre scénarios étudiés	90
Tableau IV.5	Contraintes d'optimisation et importances	92
Tableau IV.6	Solutions proposées par la (DF) selon les quatre scénarios étudiés	92
Tableau IV.7	Résultats de la méthode GRA	95
Tableau IV.8	Résultats obtenus par l'approche GRA et classification	96
Tableau IV.9	Matrice normalisée	98
Tableau IV.10	Matrice normalisée pondérée et classement final	98
Tableau IV.11	Solution proposée et combinaison de facteurs	98
Tableau IV.12	Matrice normalisée	100
Tableau IV.13	Matrice normalisée pondérée et classement final	100
Tableau IV.14	Solution proposée et combinaison de facteurs	101
Tableau IV.15	Solutions proposées par l'approche NSGAI	104
Tableau IV.16	Matrice normalisée	105
Tableau IV.17	Classement final	106
Tableau IV.18	Solution proposée par la méthode NSGA II couplée avec VIKOR	107
Tableau IV.19	Résultats de l'optimisation par DF et GRA	107
Tableau IV.20	Résultats de l'optimisation par DF et GRA	108
Tableau IV.21	Régimes optimaux proposés par les quatre méthodes	109
Tableau IV.22	Variation en (%) des paramètres de sortie pour les quatre méthodes comparativement aux valeurs optimales trouvées	109

Chapitre V

Etude du comportement vibratoire de l'outil lors du tournage intermittent

Tableau V.1	Temps de relaxation et de stabilisation.	125
Tableau V.2	Période, fréquence propre, décrétement et coefficient d'amortissement	129

Nomenclature

ANOVA	Analyse de variance
ap	Profondeur de passe (mm)
Az	Vibration tangentielle (m/s ²)
Con%	Pourcentage de contribution (%)
Ct	Température de coupe (°C)
DF	Fonction de désirabilité
DL	Degrés de libertés
f	Avance par tour (mm/rev)
F	Valeur de Fisher
Fz	Effort de coupe tangentiel (N)
GRA	Analyse Relationnelle Grise
Lp	Niveau sonore (dB)
MC	Moyenne des carrés
MCDM	Analyse décisionnelle multicritère
MOORA	Analyse du ratio d'optimisation multi-objectif
MQL	Lubrification Minimum Quantité
MS	Moyenne des carrés
NSGAI	Algorithme Génétique de Tri Non Dominé II
P	Facteur de Probabilité
Pc	Puissance de coupe (Watt)
Pm	Puissance consommée par le moteur (Watt)
Prob.	Probabilité
r	Rayon de bec de l'outil (mm)
R ²	Coefficient de détermination (%)
Ra	Rugosité moyenne arithmétique (µm)
RSM	Méthodologie de surface de réponse
SC	Somme des carré
SS	Somme des carrés
TC	Tournage continu
TD	Tournage dur
TDI	Tournage dur intermittent
TI	Tournage intermittent
Tr	Temps de relaxation
Ts	Temps de stabilisation
V _B	Usure en dépouille (mm)
V _c	Vitesse de coupe (m/min)
VIKOR	Classement Compromis Multicritère (VIsekriterijumska KOMPromisno Rangiranje)
α	Angle de dépouille principal (degré)
γ	Angle d'attaque (degré)
λ	Angle d'inclinaison de l'arête tranchante (degré)
χ _r	Angle de direction principal (degré)

Table des matières

Chapitre I

Étude bibliographique

I.1	Introduction.....	5
I.2	Usinage et usinabilité des matériaux.....	5
I.2.1	Usinage par tournage.....	5
I.2.1.1	Tournage intermittent.....	5
I.2.1.2	Tournagescontinu.....	6
I.3	Matériaux de coupe.....	6
I.3.1	Carbures cémentés.....	7
I.3.2	Cermets.....	7
I.3.3	Céramiques.....	8
I.3.4	Nitrure de bore cubique CBN.....	8
I.3.5	Diamant polycristallin PCD.....	9
I.4	Revêtement de surface d'outil de coupe.....	9
I.4.1	Rôle des revêtements dans les outils de coupe.....	10
I.5	Aciers à outils.....	11
I.5.1	Classification des aciers a outils.....	11
I.5.2	Propriétés de l'aciers a outils.....	11
I.6	Performances technologique en tournage.....	12
I.6.1	Etat de surface (Rugosité de surface).....	12
I.6.2	Puissance consommée.....	13
I.6.2.1	Classification de puissance consommée.....	14
I.6.3	Effort de coupe.....	15
I.6.4	Usure des outils de coupe.....	16
I.6.5	Température de coupe.....	17
I.6.6	Vibration en tournage.....	18
I.6.7	Emission acoustique.....	19
I.7	Etat de l'art.....	21
I.7.1	Tournage intermittent.....	21
I.7.2	Méthodes d'optimisation.....	38

I.8 Conclusion	40
-----------------------------	-----------

Chapitre II

Procédure expérimentale

II.1 Introduction	42
II.2 Procédure expérimentale	42
II.2.1 Matériau de l'étude	42
II.2.2 Machine - outil	43
II.2.3 Outil de coupe utilisé et porte outil	44
II.3 Instruments de mesure des performances	45
II.3.1 Rugosité de surface (Ra)	45
II.3.2 Effort de coupe tangentiel (Fz).....	45
II.3.3 Puissance consommée par le moteur (Pm).....	46
II.3.4 Température de coupe (Ct).....	47
II.3.5 Usure d'outil de coupe (V_B)	48
II.3.6 Mesure des vibrations.....	49
II.3.7 Mesure de l'intensité sonore.....	50
II.3.8 Calcul du taux de la matière enlevée	50
II.3.9 Calcul de la puissance de coupe (Pc)	50
II.4 Paramètres de coupe, plan d'expérience et conditions opératoire	51
II.4.1 Choix des paramètres de coupe	51
II.4.2 Choix du plan d'expérience.....	51
II.4.3 Choix des conditions opératoires.....	52
II.5 Démarche scientifique.....	52
II.6 Conclusion.....	54

Chapitre III

Analyse statistique et modélisation du processus du tournage intermittent

III.1 Introduction	56
III.2 Analyse statistique et modélisation par la méthode MSR	56
III.2.1 Analyse de la variance (ANOVA).....	56

III.3 Résultats expérimentaux.....	58
III.4 Analyse des résultats par la méthode MSR	58
III.4.1 ANOVA pour les réponses de coupe	58
III.4.2 Graphes des effets principaux (Ra,Ct,V _B).....	64
III.4.3 ANOVA pour les réponses de coupe (Fz, Az, Lp).....	65
III.4.4 Graphes des effets principaux (Pm, Pc).....	67
III.4.5 ANOVA pour les réponses de coupe (Fz, Az, Lp).....	68
III.4.6 Graphes des effets principaux (Fz, Az, Lp).....	73
III.5 Modélisations des réponses de coupe	74
III.5.1 Modèles proposés	75
III.5.2 Diagnostic de validation de Modèles	77
III.5.2.1 Examen de la distribution normale des résidus	77
III.5.2.2 Evaluation de l'homoscédasticité	81
III.6 Conclusion	84

Chapitre IV

Optimisation des paramètres de performance

IV.1 Introduction.....	86
IV.2 Optimisation multi objective	86
IV.2.1 Méthode de la fonction de désirabilité (DF)	86
IV.2.1.1 Graphes 3D et les rampes de la fonction de désirabilité	87
IV.2.1.2 Cas des performances (Ra, V _B , Ct)	88
IV.2.1.3 Cas des performances (Ra, Pm, Pc, Fz, MRR)	90
IV.2.1.4 Cas des performances (Ra, Pm, V _B , Ct, Fz, Az, Lp, et MRR).....	92
IV.2.2 Méthode de l'analyse relationnelle grise (GRA)	93
IV.2.2.1 Cas des performances (Ra, V _B , Ct)	95
IV.2.2.2 Cas des performances (Ra, Pm, Pc, Fz, MRR)	95
IV.2.3 Approche MOORA	97
IV.2.4 Approche VIKOR	99
IV. 2.5 Méthode NSGA II couplée avec VIKOR	101
IV.3 Comparaison entre les résultats	107
IV.3.1 Comparaison des résultats pour le cas des performances (Ra, Ct, V _B).....	107
IV.3.2 Comparaison des résultats pour le cas des performances (Ra, Pm, Pc, Fz, MRR) .	107

IV.3.3 Comparaison des résultats pour le cas des performances (Ra, Pm, V _B , Ct, Fz, Az, Lp, MRR)	108
IV.4 Conclusion.....	110

Chapitre V

Etude du comportement vibratoire de l'outil lors du tournage intermittent

V.1 Introduction	112
V.2 Présentation de la méthodologie de travail.....	112
V.3 Interprétations des signaux	113
V.4 Signaux mesurés pour les 9 essais.....	115
V.5 Zooms sur les engagements et les dégagements lors du tournage intermittent.....	118
V.6 Temps de relaxations et de stabilisations	123
V.7 Phénomène de Broutage	124
V.8 Détermination des caractérisations dynamique de l'outil	125
V.8.1 Résolution de l'équation du mouvement en vibration libre amortie	126
V.8.2 Système sous-amortis	127
V.8.3 Détermination expérimentale du décrétement logarithmique.....	128
V.9 Conclusions	130

Introduction générale

L'usinage, particulièrement le tournage, joue un rôle crucial dans l'industrie manufacturière contemporaine. Dans le cadre de l'amélioration constante des processus d'usinage, le tournage intermittent, caractérisé par des interruptions périodiques dans le mouvement de coupe, se distingue du tournage continu où l'outil reste en contact avec la pièce tout au long de l'opération.

La fabrication de pièces complexes présentant des formes géométriques précises constitue un défi majeur pour les ingénieurs concepteurs. Ils doivent souvent produire des composants mécaniques avec des géométries internes ou externes complexes. La satisfaction des exigences industrielles en termes de forme géométrique et de qualité des pièces usinées revêt une importance capitale. Cette satisfaction ne peut être atteinte sans une maîtrise du processus du tournage intermittent, car une bonne maîtrise garantit non seulement la qualité des pièces produites, mais aussi l'efficacité énergétique, la productivité et la réduction des coûts de fabrication.

La présente thèse se concentre sur la modélisation des facteurs de performance et l'optimisation des paramètres de coupe du processus du tournage intermittent. Nous nous intéressons particulièrement à la rugosité de surface (R_a), la puissance du moteur consommée (P_m), la puissance de coupe (P_c), les efforts de coupe (F_z), l'usure de l'outil (V_B), la température de coupe (C_t), les vibrations (A_z), l'intensité sonore (L_p) et la productivité (MRR). En raison du nombre élevé des facteurs de coupe et les performances étudiées, l'exploitation des approches statistique modernes et des méthodes MCDM est très important. Les travaux de recherche de cette thèse de doctorat s'inscrivent dans ce contexte. Le manuscrit est ensuite divisé en cinq chapitres :

Dans le premier chapitre de la thèse, nous avons abordé un ensemble de concepts fondamentaux relatifs à l'usinage des métaux. Nous avons examiné l'usinabilité et l'usinage des matériaux par tournage, en mettant particulièrement l'accent sur la différence entre tournage continu et intermittent, les outils de coupe et revêtement. Les diverses actions mécaniques et les différents paramètres permettant d'évaluer les performances d'usinage, tels que la qualité de surface, la puissance consommée, l'usure des outils de coupe, les efforts de coupe, la température de coupe, les vibration, l'intensité sonore et la productivité. Enfin, ce chapitre se

termine par une synthèse des travaux de recherche portant sur le tournage intermittent, et les méthodes d'optimisation du processus de coupe.

Le deuxième chapitre est dédié à une présentation détaillée des équipements, des appareils et des techniques nécessaires pour mesurer les performances étudiées. Il expose également les conditions expérimentales établies pour mener les essais, fournissant ainsi tous les éléments nécessaires à une étude expérimentale approfondie dans le domaine de fabrication des pièces mécaniques par usinage. De plus, ce chapitre examine en profondeur les aspects théoriques et pratiques des méthodes statistiques utilisées pour élaborer les plans d'expérience.

Le troisième chapitre se consacre à la présentation des résultats obtenus à partir de nos expériences, dans le but de procéder à une analyse statistique visant à évaluer l'impact de chaque paramètre de coupe, notamment, (r) , (V_c) , (f) et (ap) , sur les performances étudiées telles que R_a , P_m , P_c , V_B , C_t , F_z , A_z , L_p et MRR . Nous avons adopté une approche méthodique en utilisant la méthode de la surface de réponse (MSR) conjointement avec l'analyse de la variance (ANOVA) afin d'examiner l'influence relative de chaque paramètre du processus de coupe sur les résultats technologiques. De plus, cette approche nous a permis de déterminer des modèles statistiques prédictifs, et finalement, et afin d'exploiter les modèles nous avons procédé à faire des examens de validation des modèles obtenus.

Le quatrième chapitre marque une étape cruciale de notre étude, se concentrant sur l'optimisation des facteurs de coupe à travers l'utilisation de diverses approches statistiques. Notre objectif est d'explorer différentes méthodologies statistiques pour déterminer la combinaison optimale des paramètres (r) , (V_c) , (f) et (ap) afin d'optimiser les performances technologiques recherchées telles que la rugosité de surface, la puissance du moteur consommée, la puissance de coupe, l'usure des plaquettes, la température de coupe, les efforts de coupe, les vibrations, l'intensité sonore et le taux de matériau enlevé. Nous avons recours à diverses approches statistiques telles que DF, GRA, MOORA, VIKOR, NSGAI associé à VIKOR, chacune contribuant à la recherche des conditions de coupe idéales. La finalité est de réaliser une optimisation multi-objectif de toutes les performances afin d'assurer des opérations plus efficaces et des résultats optimaux. Une comparaison des résultats des différentes techniques d'optimisation est réalisée.

Le dernier chapitre est consacré pour l'analyse vibratoire des différentes phases des signaux mesurés ; et d'étudier le comportement vibratoire de l'outil au moment de son entrée et sortie de la matière en coupe, pour les différentes conditions de coupe. Le but est de trouver une

corrélation entre les vibrations de l'outil et l'évolution de l'usure des plaquettes utilisées dans l'usinage. Cette approche témoigne de notre engagement envers une démarche scientifique rigoureuse dans la quête de l'excellence opérationnelle industrielle.

La conclusion générale de cette thèse de doctorat offre une synthèse des résultats obtenus au cours de cette recherche, ainsi que les perspectives futures, suivies d'une liste de références bibliographiques.

CHAPITRE

I

Étude bibliographique

I.1 Introduction

Ce chapitre vise à présenter théoriquement le processus de la fabrication par tournage. En se concentrant sur le tournage intermittent. Il couvre les paramètres de coupe, les outils utilisés, ainsi que les performances de coupe attendues. De plus, il aborde la spécification du tournage intermittent, tout en faisant référence à l'état de l'art à travers les recherches antérieures dans ce domaine. En mettant en lumière les avancées récentes, les tendances émergentes et les défis contemporains auxquels sont confrontés les praticiens de cette technique d'usinage.

I.2 Usinage et usinabilité des matériaux

L'usinage mécanique, continue d'être l'un des procédés les plus répandus et le plus utilisés. Même si des techniques de fabrication émergentes telles que l'impression 3D a évolué au-delà du simple prototypage pour englober la production de pièces structurales et fonctionnelles, l'usinage conserve son rôle prépondérant. Sa flexibilité, sa qualité de surface élevée, son taux d'enlèvement de matière important et sa capacité à travailler quasiment tous les types de matériaux en font une technique irremplaçable et de haute importance [1].

L'usinage est un processus de création de surfaces où une nouvelle surface est formée en enlevant de la matière, ce qui entraîne la formation de copeaux à l'aide d'un outil coupant [2]. L'usinabilité, fait référence à l'évaluation de la facilité avec laquelle un matériau peut être transformé ou usiné en une forme souhaitée tout en maintenant des performances et des caractéristiques acceptables de la pièce usinée. Cela inclut la facilité de coupe, la qualité de la surface usinée, la longévité de l'outil, les forces de coupe impliquées et d'autres facteurs pertinents. En d'autres termes, l'usinabilité évalue la facilité et l'efficacité avec lesquelles un matériau peut être usiné en fonction de divers facteurs et conditions de coupe [3].

L'usinabilité est un cadre général qui tente de quantifier la réponse d'un matériau d'une pièce à l'usinage mécanique, et qui a été développé comme l'un des principaux facteurs qui influent sur la sélection finale des paramètres de coupe, des outils et des applications de lubrification. Au fil des ans, de nombreuses tentatives ont été faites pour développer une méthode d'évaluation standard de l'usinabilité. Cependant, en raison de la complexité des facteurs d'influence, c'est-à-dire du matériau à usiner et de l'outil de coupe à la machine-outil, qui peuvent affecter la machinabilité des matériaux, il n'existe actuellement aucune quantification de l'usinabilité clairement définie [4].

I.2.1 Usinage par tournage

Le tournage est une procédure complexe d'usinage qui se caractérise par l'élimination de matériau de la surface d'une pièce en rotation, au moyen d'un outil de coupe spécifique, dans le but de sculpter et de façonner la pièce selon des spécifications précises [5]. Autrement le processus du tournage, des copeaux sont générés par l'action de retirer le matériau à l'aide d'une plaquette d'outil de coupe à pointe unique [6].

I.2.1.1 Tournages intermittents

La découpe des métaux peut être catégorisée en coupe continue et coupe intermittent (discontinu). On parle du processus du tournage intermittent des pièces usinées sur un tour, lorsque l'outil de coupe ne sera pas engagé dans la coupe des surfaces discontinues, en outre,

il y a un impact entre l'outil de coupe et la pièce à chaque fois que l'outil passe sur l'arête discontinue et recommence à couper, cela peut entraîner des mauvais paramètres de réponses provoquer par les paramètres des coupes non maîtrisés [7]. Dans la coupe intermittente, l'outil est soumis à des conditions de charge sévères dues au contact intermittent entre la pièce et l'outil [8]. Les exigences techniques des ingénieurs concepteurs en terme géométrique des pièce rond le processus du tournage intermittent s'est avéré être une solution polyvalente pour la fabrication de surfaces complexes [9].

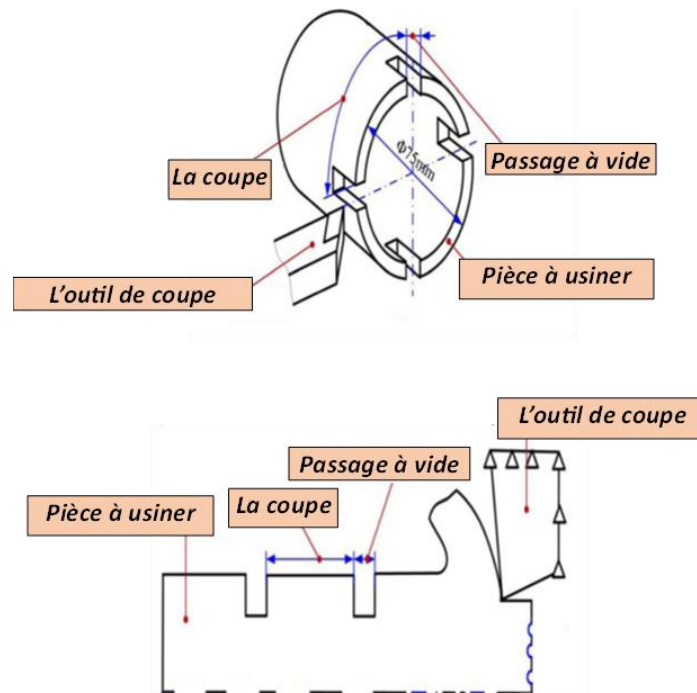


Figure I.1 Tournage intermittent [10] .

I.2.1.2 Tournages continu

Habituellement, l'analyse des processus d'usinage se fait en se basant sur l'utilisation du tournage continu[11]. Ce processus d'usinage dans lequel la pièce à usiner est maintenue en rotation constante pendant que l'outil de coupe la façonne de manière continue. Cette procédé de fabrication est très utilisée pour produire des pièces cylindrique, coniques ou profilées de manière uniforme et régulière. L'outil de coupe avance d'une manière régulièrement le long de la pièce pour enlever de la matière (copeaux) et former la surface souhaitée[12].

I.3 Matériaux de coupe

Sélectionner le matériau et la nuance de coupe appropriés est un élément crucial pour garantir le succès d'une opération d'usinage. Bien qu'il existe de plusieurs types de matériaux d'outil de coupe, aucun d'entre eux ne peut satisfaire toutes les exigences des applications d'usinage en raison de la complexité et de la variabilité des conditions de coupe. Il est essentiel de comprendre les propriétés fondamentales des matériaux de coupe et leurs performances, examiner la compatibilité entre les matériaux d'outil et les matériaux de la pièce, le type et les dimensions de la pièce, les conditions d'usinage afin d'améliorer la productivité, d'obtenir une qualité de surface optimale et de réduire les coûts d'usinage[13].

Dans le cas du tournage intermittent, les matériaux des outils de coupe doivent être sélectionnés en tenant compte des contraintes et des chocs auxquels ils sont soumis lorsqu'ils arrêtent et entrent en contact avec une nouvelle surface (**figure I.1**). Il est essentiel que les outils de coupe présentent certaines propriétés mécaniques, chimiques, et tribologique notamment [7, 14] :

✚ Propriétés mécaniques :

- ✓ Haute résistance à température élevée.
- ✓ Résistance élevée à la déformation (éviter la déformation plastique au niveau du bord de coupe).
- ✓ Haute rigidité pour assurer la précision pendant l'opération de coupe.
- ✓ Haute résistance à la fatigue pour résister à la charge mécanique maximale.
- ✓ Haute ténacité à la rupture.

✚ Propriétés thermiques :

- ✓ Une conductivité thermique élevée afin d'évacuer la chaleur loin du bord de coupe.
- ✓ Haute résistance aux chocs thermiques.
- ✓ Composition chimique stable.

✚ Propriétés tribologiques :

- ✓ Résistance à l'usure.
- ✓ Lubrification adéquate pour prévenir l'accumulation sur le bord de coupe.

Les principaux outils de coupe utilisés dans le tournage intermittent sont les outils en PCBN ; en carbure cémenté avec revêtement ; les cermets ainsi que les outils en céramique [7].

I.3.1 Carbures cémentés

Les outils en carbure cémenté sont généralement utilisés en raison de leur haute dureté et de leur résistance à la rupture prévisible [15]. Les carbures métalliques sont regroupés par l'organisation internationale des standards (ISO) par catégories (H, K, M, N, P, et S) en fonction de leur utilisation prévue, sans spécifier la quantité de cobalt ni la taille des grains. Ainsi, un carbure métallique provenant de différents fabricants peut porter la même désignation mais présenter des performances différentes.

I.3.2 Cermets

Les cermets ont fait l'objet d'un développement significatif, et l'accent est désormais mis sur la production de cermets à base de TiC en raison de leurs propriétés uniques [16]. Ils offrent une meilleure résistance à l'oxydation pendant l'usinage des métaux et à la formation de bord de coupe grâce à leur stabilité chimique accrue et leur haute dureté à température élevée. La fabrication des cermets implique le mélange, le broyage et le frittage de divers types de carbures, de nitrures et d'oxydes en tant que matières premières. Les outils de coupe en cermet sont couramment utilisés pour la semi-finition et la finition sur l'acier et la fonte. Cependant,

leur fragilité reste une limitation inévitable pour leur utilisation. L'addition de zirconium vise à améliorer la ténacité à la rupture des cermets à base de Ti (C, N)[17].

I.3.3 Céramiques

Les céramiques sont largement utilisées dans de nombreuses industries manufacturières en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques à haute température, de leur bonne stabilité à l'oxydation et de leur haute dureté. Cependant, leurs propriétés de fragilité inhérentes ont rendu l'obtention d'une précision dimensionnelle difficile, ce qui limite leurs applications[18]. L'améliorer de leur ténacité, exige souvent un renforcement avec des éléments chimiques telle que : Al_2O_3 , MgO , ZrO_2 , (W, Ti) C, TiB_2 , TiC , SiC , Si_3N_4 , Malgré une certaine amélioration apportée par l'ajout de ces éléments, leur ténacité reste toujours inférieure à celle des carbures cémentés, augmentant ainsi le risque de rupture soudaine de l'outil. Parmi les renforcements [14, 18]:

- Par le nitrure de silicium (Si_3N_4) offrent une meilleure résistance au choc thermique et une dureté supérieure, les rendant appropriées pour l'usinage de la fonte et pour les opérations de coupe fortement interrompues telles que le fraisage.
- Par les fibres de carbure de silicium ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}_w$) sont efficacement utilisées dans l'usinage de matériaux réfractaires comme l'Inconel 718, et peuvent même être employées lors de coupes interrompues.
- Les plaquettes renforcées à 30 % par le nitrure et/ou le carbure de titane, désignées sous le nom de mixtes ou noires, sont idéales pour l'usinage de finition des aciers durcis à des vitesses de coupe élevées. L'utilisation de la céramique noire wiper améliore la rugosité de surface par rapport à la céramique conventionnelle et contribue également à réduire les efforts de coupe, la puissance nécessaire et l'effort spécifique.

I.3.4 CBN (Nitrure de bore cubique)

Les outils en nitrure de bore cubique (CBN) sont des composés fabriqués à partir de CBN comme matériau de base qui est combiné avec une céramique, parfois même avec un liant métallique [19]. L'utilisation du CBN est reconnue comme le meilleur choix pour l'opération du tournage des matériaux durs. Les outils en CBN présentent une combinaison unique de propriétés : une dureté, une résistance à chaud et à l'usure très élevés tout en étant stable thermo-chimiquement. En 1972, le CBN a été introduit pour la première fois avec du cobalt comme liant, et depuis lors, des progrès significatifs ont été réalisés dans la technologie des outils de coupe. Les outils CBN sont généralement classés en deux catégories principales : ceux à haute teneur en CBN et ceux à faible teneur en CBN. Cette classification repose sur le pourcentage de CBN ainsi que sur les éléments d'alliage ou liants tels que le cobalt, la céramique, le TiC , le TiN , présents dans la matrice de CBN. Ces liants et éléments d'alliage influent directement sur diverses propriétés du matériau de l'outil CBN, notamment la conductivité thermique, la dureté, la résistance à la rupture, etc. Par conséquent, il est vivement recommandé d'évaluer les différentes propriétés du grade de CBN avant de faire un choix, car chaque grade est adapté à des applications d'usinage spécifiques telles que la coupe interrompue ou continue[20].

I.3.5 Diamant polycristallin PCD

L'application des outils en diamant polycristallin (PCD) a une grande influence sur des industries telles que l'aérospatiale, l'automobile, les matériaux biomédicaux, les matériaux optiques et la fabrication d'outils. En particulier dans le domaine de la fabrication d'outils, des fabricants mondiaux d'outils tels que Sandvik Coromant et EHWA ont élargi leur gamme de produits et se concentrent davantage sur les outils PCD haute performance[21]. Le (PCD) est un matériau extrêmement dur, recommandé notamment pour l'usinage des matériaux durs. Les comparaisons entre les carbures cémentés et le PCD démontrent que les outils PCD offrent de meilleurs résultats lors de l'usinage en tournage interrompu. Ainsi, la durée de vie des outils PCD peut être jusqu'à 100 fois supérieure à celle des carbures cémentés. En tournage interrompu, les outils PCD offrent une meilleure résistance à l'usure de l'outil, notamment en ce qui concerne l'usure du flanc [19]. La figure (I.2) illustre le classement des matériaux à outil en fonction de l'usure et dureté.

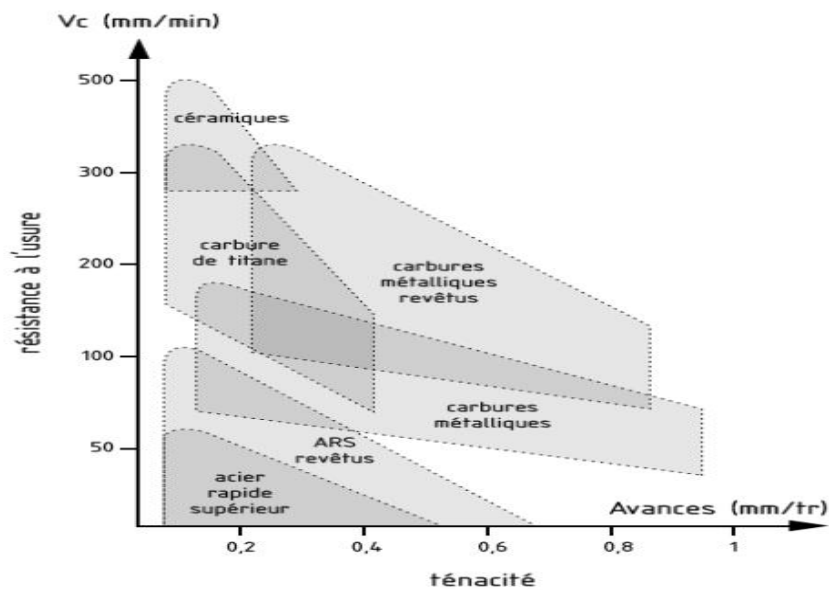


Figure I.2 Classement des matériaux à outils selon l'usure et la dureté.

I.4 Revêtement de surface d'outil de coupe

Les revêtements de surface des outils de coupe sont principalement obtenus par deux méthodes : le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) et le dépôt physique en phase vapeur (PVD). En utilisant l'une ou l'autre de ces techniques, une fine couche de revêtement de plusieurs microns, dotée des propriétés souhaitées, peut être formée sur les surfaces des outils de coupe. En pratique, plusieurs couches de revêtement composées de différents matériaux peuvent être appliquées à un outil de coupe. La couche la plus proche du substrat présente une meilleure affinité avec le matériau de l'outil, tandis que la couche externe offre de meilleures propriétés pour les applications de coupe[22]. Le revêtement sur un outil de coupe a un impact considérable en termes de propriétés mécaniques et tribologiques (**figure I.3**), ainsi que sur les résultats finaux du produit. Les couches peuvent être produites dans différentes formes et structures en utilisant différentes combinaisons de matériaux. Le nombre de couches peut être des revêtements simples, des revêtements multiples et divers autres types[23]. Les matériaux de revêtement sont choisis en fonction des paramètres d'application tels que le matériau de la pièce, les conditions de coupe.

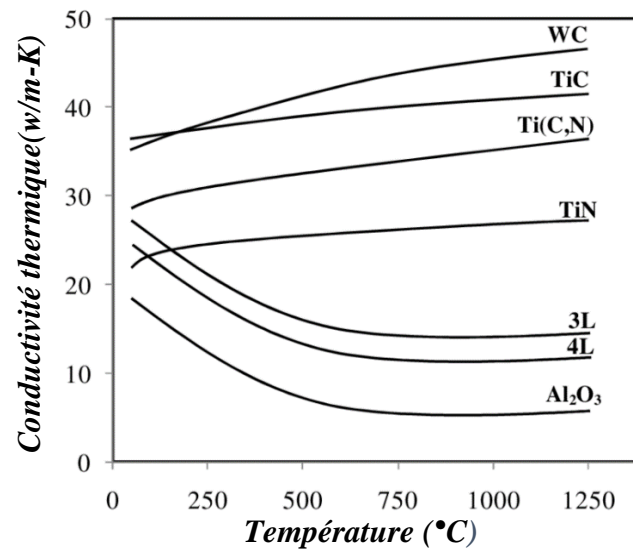


Figure I.3 Variation de conductivité thermique en fonction de (°C) [22].

I.4.1 Rôle des revêtements dans les outils de coupe

Les études les plus récentes ont exploré les caractéristiques des revêtements multicouches avec des caractéristique mécanique telles que la fragilité, la plasticité et la résistance à l'usure abrasive. Dès le début, l'accent principal pour le développement des revêtements a été mis sur leur rôle de protection contre l'usure abrasive et adhésive[24]. En coupe continue, le revêtement garantira que les conditions de contact de surface sont optimales pour réduire la pression d'alignement dans le coin de coupe et améliorer la stabilité de la forme. Le revêtement doit également adhérer parfaitement à la surface de l'outil de coupe, ce qui prolongera la durée de vie de l'outil de coupe jusqu'à ce que le revêtement sur la surface de la plate-forme disparaisse complètement. Parmi les revêtements disponibles les plus utilisés, le TiN, le TiCN et le TiAlN sont largement préférés[23]. Le tableau (I.1) récapitule les types de revêtement des outils de coupe et la performance de chaque élément de revêtement.

Tableau I.1Type et rôle de revêtements [23, 25].

Type de revêtement	Fonction de revêtement
TiC	Haute résistance à l'usure abrasif
TiN	Réduit le frottement et empêche l'usure adhésive ainsi que la formation d'arêtes d'usure
Ti (C, N)	Haute résistance à la rupture et excellente résistance à l'usure abrasive.
AlN	Excellente résistance thermique et chimique.
TiAlN	Haute dureté thermique, ductilité et résistance aux chocs thermiques.
Al ₂ O ₃	Excellente séparation thermique et bonne résistance à l'oxydation.
CrN	Excellente résistance à l'usure et à la corrosion, faible friction et résistance à la pression interne.
WC	Amélioration de la résistance à l'usure et la dureté de de l'outil.
ZrN	Améliorer la résistance à l'usure, et conductivité thermique,
CBN	Haute dureté et de résistance à l'usure.
Diamant	Excellente résistance à l'usure.

I.5 Aciers à outils

La norme NF EN ISO 4957 définit un acier à outils comme un type d'acier spécial conçu spécifiquement pour être utilisé dans le travail ou la transformation de différents matériaux. Ces aciers sont adaptés à des fonctions telles que la mise en forme, la manutention et le mesurage des pièces à façonner. Pour remplir ces fonctions, les aciers à outils doivent présenter des caractéristiques spécifiques telles qu'une dureté élevée, une ténacité accrue et une résistance à l'usure. En général, les aciers à outils sont utilisés dans diverses industries pour travailler avec une gamme variée de matériaux. Cela peut inclure la mise en forme du verre, du plastique, des poudres métalliques, du zinc, du magnésium, de l'aluminium, du cuivre, de l'acier, du titane, ainsi que des matériaux plus exotiques comme le zirconium ou le tantale.

Ces aciers sont fabriqués avec des compositions chimiques et des traitements thermiques spécifiques afin de répondre aux exigences de chaque application particulière. Ils sont essentiels pour assurer la précision et la qualité des produits finis dans de nombreux processus de fabrication industriels.

I.5.1 Classification des aciers à outils

La norme NF EN ISO 4957 propose une classification en quatre classes, avec les deux premières adaptées aux applications où la température de surface ne dépasse généralement pas 200 °C :

- Aciers à outils non alliés pour le travail à froid.
- Aciers à outils alliés pour le travail à froid. La classification entre aciers alliés et non alliés peut être approfondie en consultant les détails supplémentaires.
- Aciers à outils pour le travail à chaud destinés aux applications où la température de surface dépasse 200 °C.
- Aciers à outils rapides, principalement utilisés pour l'usinage et le formage. Leur composition chimique offre une dureté et une résistance élevées après trempe, même à des températures élevées (jusqu'à environ 600 °C). La métallurgie des poudres permet de produire des nuances avec une teneur plus élevée en éléments carbures (comme le vanadium, le tungstène et le molybdène), ce qui permet d'obtenir des performances supérieures et une durée de vie prolongée pour les outils de coupe.

I.5.2 Propriétés de l'aciers à outils

Les caractéristiques des aciers à outils sont distinguées selon la température ambiante et la température de travail. Ils sont évalués selon cinq critères principaux : la ténacité, la dureté, la résistance à la fatigue thermique, la résistance à l'usure et la résistance à la corrosion. Ces caractéristiques déterminent la performance et la durabilité des outils dans différentes conditions de travail [26] :

Les applications des aciers à outils sont variées et couvrent un large éventail d'industries et de domaines. La figure (I.4) présente les différents domaines d'application de l'aciers à outil.



Figure I.4 Applications de l'aciers a outils.

I.6 Performances technologique en tournage

Les performances en tournage sont déterminées par la capacité à produire des pièces de haute qualité de manière productive, économe en énergie et rentable, tout en garantissant la fiabilité et la durabilité du processus. L'amélioration continue de ces performances est un objectif clé.

I.6.1 Etat de surface (Rugosité de surface)

La surface d'un matériau présente souvent une texture ou des irrégularités, ce que l'on appelle la rugosité de surface. Cette rugosité est généralement évaluée en mesurant les variations de hauteur en comparaison à une surface plane idéale de référence. On utilise souvent des paramètres spécifiques comme la rugosité moyenne arithmétique (R_a), la rugosité maximale (R_{max}), ou la hauteur de rugosité moyenne (R_z) pour quantifier cette rugosité. Les méthodes de mesure de la rugosité de surface peuvent varier en fonction du matériau et des besoins de l'application, mais elles comprennent souvent l'utilisation de techniques telles que la profilomètre optique, la rugosimètre à contact, la rugosimètre à balayage laser, ou d'autres méthodes de cartographie de la topographie de surface [27]. Dans le secteur mécanique, la rugosité généralement caractérisée par l'un des deux descripteurs de hauteur statistique recommandés par l'American National Standards Institute (ANSI) et l'Organisation internationale de normalisation (ISO). Les principaux critères de rugosité sont (figure I.5) :

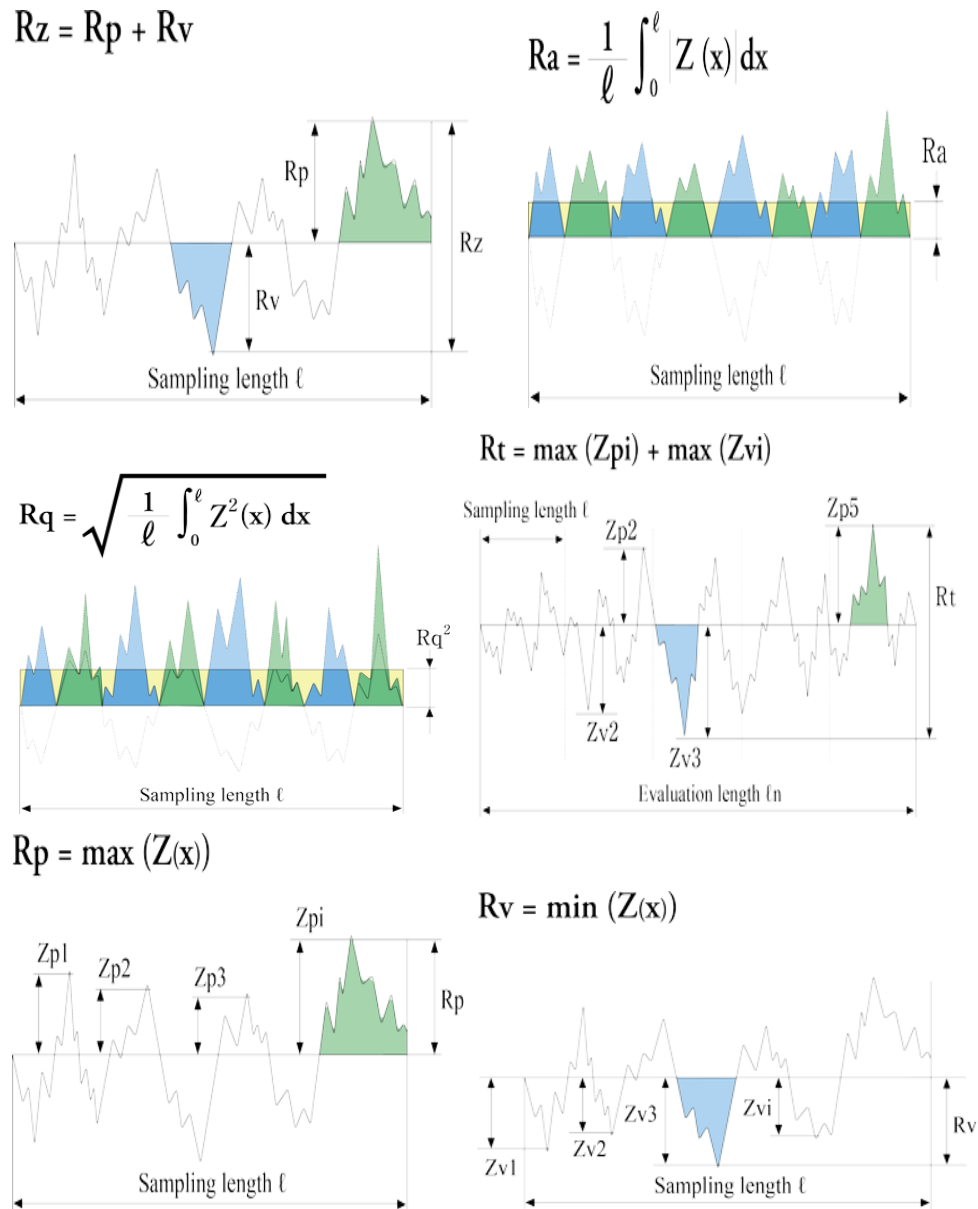


Figure I.5 Différents paramètres de rugosité de surface [27].

I.6.2 Puissance consommée

L'accroissement de la demande en énergie a dépassé les capacités d'approvisionnement disponibles, engendrant ainsi le défi complexe de garantir une alimentation énergétique fiable. Les installations de fabrication avancées consomment une part importante de l'électricité industrielle, principalement dévolue à alimenter les moteurs, les compresseurs et les machines-outils. Dans le domaine manufacturier (figure I.6), l'énergie est principalement utilisée dans les processus de production, qui reposent largement sur des équipements tels que les machines-outils [28]. L'optimisation des facteurs de coupe pour minimiser la puissance de coupe, la consommation énergétique ou l'énergie nécessaire à la coupe est devenue un enjeu majeur de l'industrie pour garantir l'efficacité énergétique essentielle à la disponibilité des machines-outils [29].

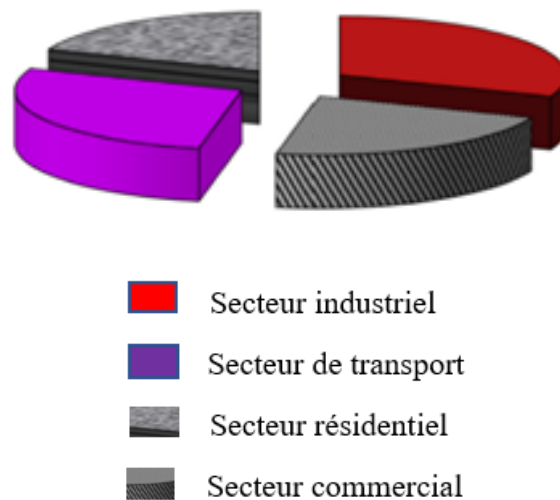


Figure I.6 Secteurs les plus consommateurs de l'énergie en USA [30].

I.6.2.1 Classification de puissance consommée

Une classification de la puissance consommée adéquate (**figure I.7**), peut faciliter la mesure et diminuer la consommation d'énergie. Cependant il n'existe pas de classification standardisée de la consommation d'énergie dans le domaine de l'usinage [30].

- a) **Classification selon la consommation de la puissance à différents niveaux** : La consommation de la puissance d'un processus d'usinage peut être évaluée à différents niveaux :
 - ❖ Au niveau de la machine-outil, c'est la puissance spécifique de la machine (énergie total);
 - ❖ Au niveau de la broche puissance spécifique de la broche (énergie de rotation de la broche) ;
 - ❖ Au niveau du processus. La puissance consommée pour enlever une unité de volume; de matériau, l'énergie spécifique de coupe.

- b) **Classification de la consommation de la puissance basée sur les états de la machine-outil** :
 - ❖ démarrage de la machine ;
 - ❖ le retour au point de référence ;
 - ❖ la préparation à l'opération ;
 - ❖ le découpage à vide ;
 - ❖ le découpage du matériau ;
 - ❖ l'arrêt de la machine ;

- c) **Classification de la consommation d'énergie selon les composants** :
 - ❖ La consommation de la puissance constante comprend l'énergie consommée lors du processus de démarrage ;
 - ❖ La consommation de la puissance variable est liée à l'action d'usinage ;

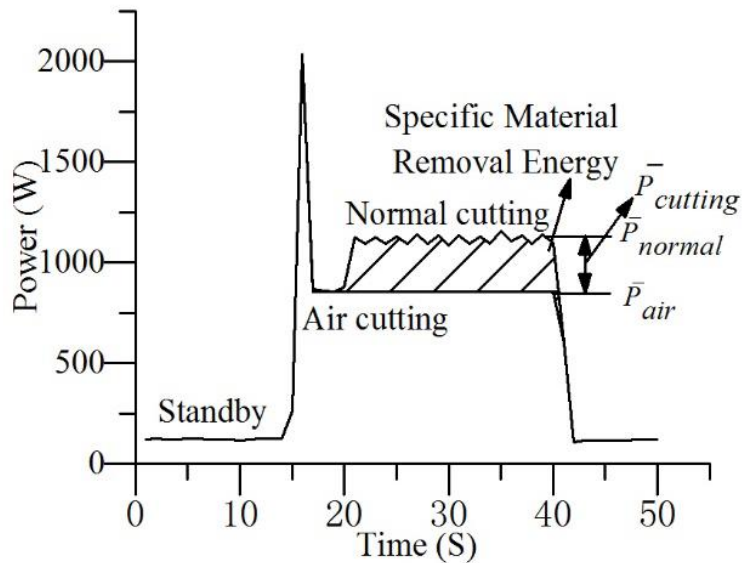


Figure I.7 Puissance consommée sur une machine du tournage en fonction du temps.

I.6.3 Effort de coupe

Pendant l'usinage, les forces de coupe jouent un rôle déterminant dans la qualité et la précision de pièces produites. Ces forces, qui se manifestent par des pressions exercées sur l'outil et la pièce, sont cruciales pour comprendre et améliorer le processus de fabrication. En effet, les forces de coupe peuvent impacter plusieurs aspects de l'opération du tournage, tels que la longévité de l'outil, la qualité d'état de surface des pièces usinées, la précision et l'exactitude dimensionnelle de la pièce, et généralement la stabilité du processus d'usinage. Les trois composantes d'effort de coupe sont les suivantes (**figure I.8**) :

- **Effort de coupe tangentiel (F_t)** : effort tangentiel de coupe, générer du mouvement de coupe, noté (F_t), est de nature tangentielle et représente souvent la force la plus importante dans le processus d'usinage. Comme illustré dans la figure I.8, cette force s'exerce orthogonalement à la direction de déplacement de l'outil de coupe. Donc F_t est le garant à l'enlèvement de la matière de la pièce.
- **Effort radiale (F_r)** : effort de poussée, dû à la profondeur de passe. Elle s'exerce radialement par rapport à l'axe de vitesse de coupe.
- **Effort axiale (F_a)** : L'effort d'avancement est généré par le mouvement d'avance et agit dans la direction axiale de la pièce.
- **L'effort global de coupe (F_c)** : c'est l'effort global de coupe, c'est la sommation vectorielle des trois forces de coupe agissant sur l'outil pendant le tournage. L'effort (F_c) est important pour étudier la charge totale supportée par le couple outil- machine, l'effort global F_c , garantit une l'opération d'usinage idéale.

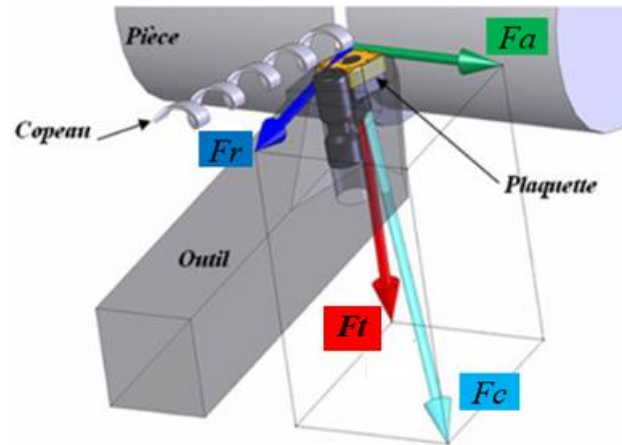


Figure I.8 Composants des efforts de coupe lors du tournage [31].

I.6.4 Usure des outils de coupe

L'usure des outils de coupe est un aspect critique dans le domaine de l'usinage (**figure I.9**). Au fil du temps, les outils de coupe subissent un processus d'usure qui peut affecter leur performance et la qualité des pièces usinées. Comprendre les mécanismes et les facteurs qui influent sur l'usure des outils est essentiel pour optimiser les processus d'usinage, prolonger la durée de vie des outils et améliorer la qualité des pièces produites [32].

- **L'usure en cratère** : L'usure en forme de cratère survient lorsque le frottement du copeau sur la face d'attaque de l'outil entraîne une diminution de la dureté de l'outil, soit par diffusion, soit par adhésion des particules sur le copeau à cause de l'augmentation de la température de coupe. Cette forme d'usure est courante, en particulier lors de l'usinage de matériaux à faible conductivité thermique. La profondeur maximale du cratère, définie par KT , caractérise la forme du cratère.
- **L'usure en dépouille** : L'usure de dépouille est le résultat du frottement de la surface usinée contre la face de dépouille de l'outil, se manifestant comme une bande brillante et striée apparente en parallèle à l'arête de l'outil. Cette usure est identifiable par sa largeur moyenne VB . Elle impacte la qualité de la surface de la pièce et sa précision dimensionnelle.
- **L'usure par écaillage et fissuration de l'arête** : survient lorsque de petits morceaux de l'outil se cassent en raison de l'impact mécanique ou du choc thermique résultant du refroidissement et du chauffage cyclique. Cette forme d'usure est courante lors de coupes discontinues ou dans des conditions d'usinage instables (broutement).
- **L'usure en entaille** : résulte de l'usure en cratère et en dépouille au point où l'arête tranchante principale de l'outil rencontre la surface usinée, correspondant à la ligne de la profondeur de coupe. Cette forme d'usure est courante lors du tournage de matériaux sujets à l'érouissage sous l'effet des charges mécaniques. Elle est caractérisée par VN .
- **L'usure par déformation plastique** : résulte de l'augmentation de la température et des fortes pressions dans la zone de coupe, en particulier dans le bec de l'outil, pouvant entraîner une déformation permanente de ce dernier, se manifestant par un déplacement sur les faces de dépouille.

- **La rupture brutale du bec de l'outil** : affecte principalement les outils de coupe présentant une faible ténacité et une résistance à la rupture moindre par rapport au matériau usiné, comme c'est le cas pour les outils en céramique.

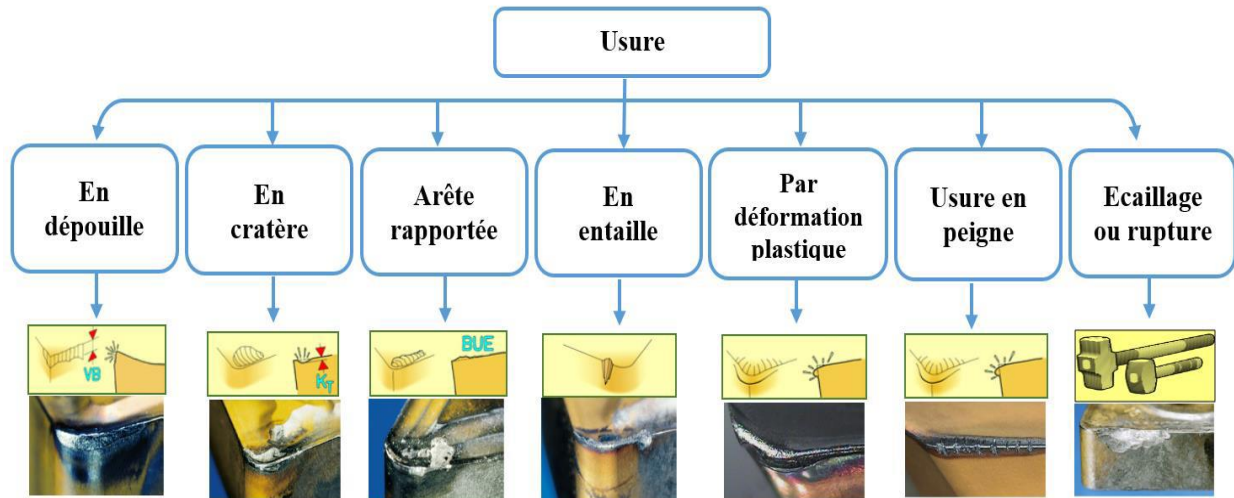


Figure I.9 Différentes forme d'usure d'outil de coupe[32].

I.6.5 Température de coupe

La température de coupe est l'un des aspects les plus critiques du processus du tournage. Lorsque l'outil entre en contact avec la pièce en rotation, une grande quantité de chaleur est générée en raison du frottement entre l'outil et la pièce, ainsi que du processus de coupe lui-même. Cette chaleur peut avoir un impact significatif sur le processus d'usinage, affectant la durée de vie de l'outil, la qualité de la surface de la pièce et même les propriétés du matériau usiné[33]. La chaleur en tournage est générée en raison du frottement à l'interface copeau-outil et aux interfaces pièce-outil. En raison de cette augmentation de température dans la zone de coupe. La plupart de la chaleur de l'application de coupe devrait être emportée avec le copeau, environ 60 à 80 % de la chaleur totale, la pièce emporte 10 à 20 % de la chaleur, tandis que l'outil de coupe emporte environ 10 % de la chaleur (**figure I.10**). Une chaleur excessive dans l'outil et la pièce augmente leurs températures. L'augmentation de la température entraîne l'allongement de l'outil de coupe, ce qui entraîne une erreur dimensionnelle [34].

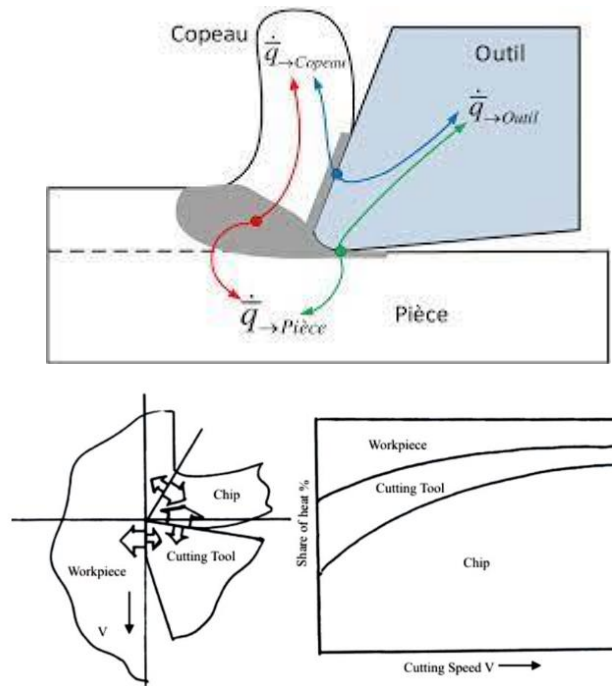


Figure I.10 Répartition de la chaleur en tournage [35, 36].

❖ Les paramètres influent sur la température de coupe

Plusieurs facteurs influent directement ou indirectement sur la température de coupe, parmi les facteurs prédominants la vitesse, la profondeur et l'avance de coupe, le matériau de la pièce usinée et le matériau de l'outil de coupe, l'environnement de l'usinage (sec, lubrifiant), ainsi que la géométrie de l'outil [37].

I.6.6 Vibration en tournage

Les vibrations sont un phénomène courant dans les opérations du tournage et peuvent avoir un impact significatif sur la qualité de l'usinage, et la durée de vie de l'outil. Lorsque la machine-outil et l'outil de coupe entrent en contact avec la pièce en rotation, diverses forces peuvent être générées, entraînant des oscillations non désirées. Ces vibrations peuvent être causées par une variété de facteurs, tels que la géométrie de la pièce, les conditions de coupe, la rigidité de la machine-outil et l'état de l'outil[38].

➤ Paramètres du signal vibration temporel

Lorsqu'un système mécanique subit des vibrations, cela signifie qu'il est en mobilité oscillatoire autour d'un point d'équilibre (référence). Ce mouvement peut s'exprimer par :

- ✚ Un déplacement : la masse se déplace par rapport un point d'équilibre.
- ✚ Une vitesse de déplacement : un déplacement variable en fonction du temps ;
- ✚ Une accélération : une vitesse variable en fonction du temps.

Un signal de vibration temporel peut montrer les valeurs suivantes ;(figure 1.11) :

- **Crête à crête (Acc)** : Le niveau crête-crête représente la différence entre les amplitudes maximale et minimale du mouvement. Cette mesure est précieuse pour évaluer le déplacement d'un composant, un aspect souvent critique pour des considérations de contraintes maximales ou de jeu mécanique.

- **Crête (A_c)** : c'est la valeur maximale de l'amplitude, est une mesure importante pour comprendre les phénomènes de courte durée ; les chocs par exemple. Mais, elle ne s'intéresse pas de la variation de la vibration en fonction du temps.
- **RMS (La valeur efficace)** : une valeur importante dans la mesure des amplitudes de vibration, elle s'intéresse de l'évolution des valeurs de vibration en fonction du temps.
- **Le facteur de crête** : c'est le rapport entre (Crête/RMS).
- **La fréquence** : exprimée en Hertz, c'est le nombre de cycles par seconde ; $f=1/T$, T est la période.

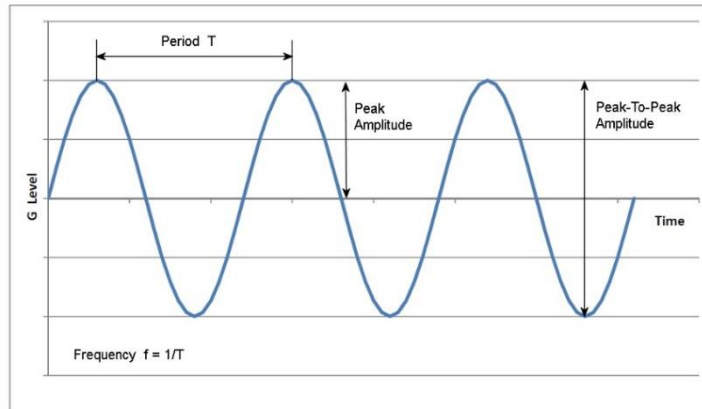


Figure I.11 Signal de vibration.

I.6.7 Emission acoustique

L'émission acoustique lors de l'usinage par tournage est un phénomène qui se produit lorsque des ondes élastiques transitoires sont générées par la libération rapide d'énergie à partir de sources localisées à l'intérieur du matériau usiné. Ces ondes, également appelées ondes de contrainte, se propagent à travers le matériau en raison de la libération soudaine d'énergie de déformation. Ce phénomène peut être détecté et utilisé pour surveiller le processus d'usinage, ainsi que pour évaluer la qualité de l'usinage et l'intégrité de la pièce [39].

- ✚ Les sources potentielles suivantes d'émission acoustique pendant les processus de coupe des métaux (**figure I.12**) :
 - ✓ Déformation plastique pendant le processus de coupe dans la pièce ;
 - ✓ Déformation plastique dans le copeau ;
 - ✓ Contact frictionnel entre la face de flanc de l'outil et la pièce, entraînant une usure du flanc ;
 - ✓ Contact frictionnel entre la face frontale de l'outil et le copeau, entraînant une usure en cratère ;
 - ✓ Collisions entre le copeau et l'outil ;
 - ✓ Rupture du copeau ;
 - ✓ Rupture de l'outil.

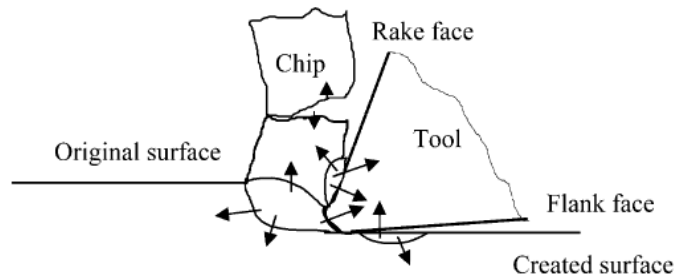


Figure I.12 Génération d'émission acoustique pendant la coupe des métaux [39].

L'utilisation de l'émission acoustique comme technique de surveillance des opérations d'usinage présente de nombreux avantages, en raison de leur plage de fréquences élevées et de la sensibilité qui fournit de plusieurs informations précieuses.

La figure (I.13) présente une version actualisée d'un diagramme des test capteurs classés en fonction de leur classe et de leur utilité, en termes de type de paramètre de contrôle que de niveau de précision.

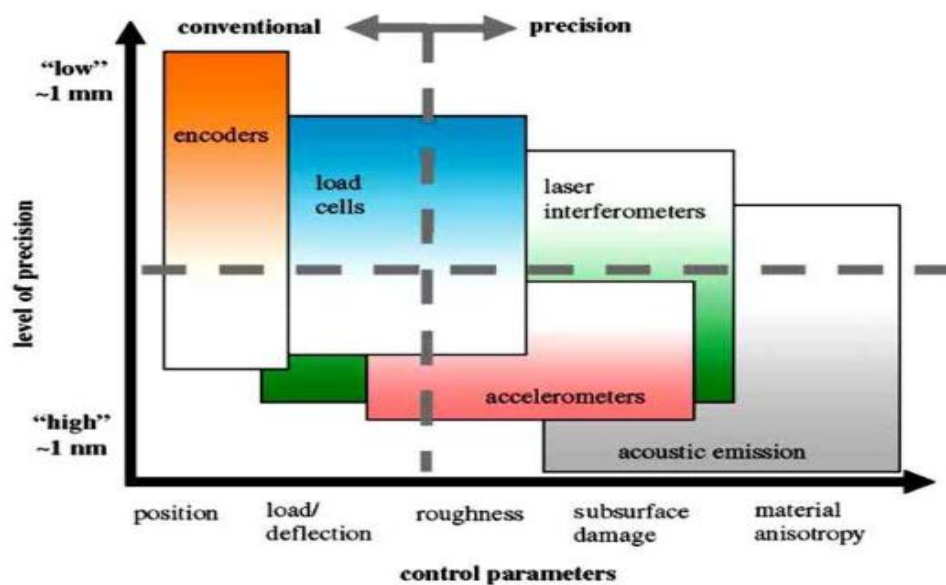


Figure I.13 Différent test par rapport au niveau de précision et de contrôle.

✚ Paramètres de forme d'onde d'émission acoustique[40]

Les principaux paramètres de mesure du signal largement utilisés dans l'analyse du signal AE comprennent le nombre de comptes, la durée, l'amplitude, le temps de montée, ainsi que la surface mesurée sous l'enveloppe du signal corrigé, souvent désignée sous le terme d'énergie relative, comme présenté dans la figure (I.14).

- ✓ **Comptes** : Les comptes sont généralement présentés par N. Lorsque l'amplitude du signal est supérieure au seuil, le nombre d'impulsions émises par le circuit de mesure est défini comme N. Les comptes dépendent fortement des propriétés de l'AE et de la nature réverbérante du capteur et du matériau de l'échantillon.
- ✓ **Frappes** : Lorsqu'un signal dépasse le seuil, un canal du système accumule des données, ce signal est appelé la frappe et décrit un événement AE. Le nombre d'événements ou

de frappes par unité de temps détermine le taux d'événements. Le nombre de frappes et le nombre de comptes déterminent la quantité d'activité AE.

- ✓ **Durée, (D)** : L'intervalle de temps entre un déclenchement du signal et le moment où il revient en dessous de la valeur du seuil est connu sous le nom de durée du signal.
- ✓ **Énergie MARSE** : La zone mesurée de l'enveloppe du signal redressé est appelée MARSE (Measured Area of the Rectified Signal Envelope) et est parfois représentée par E, également appelée comptes d'énergie. Cette zone est située en dessous de l'enveloppe du signal, qui est redressée et mesurée à partir du capteur. L'énergie est préférée aux comptes car elle est sensible à l'amplitude ainsi qu'à la durée, et elle dépend moins de l'emplacement du seuil et de la fréquence de fonctionnement.
- ✓ **Temps de montée** : Le temps de montée est présenté par R et définit l'intervalle de temps entre l'amplitude maximale du signal en rafale et le premier franchissement du seuil. Ce paramètre est fréquemment utilisé lorsque des processus dépendant du temps tels que les vibrations ou les charges dynamiques sont impliqués.
- ✓ **Seuil** : Le seuil est un type de paramètre de configuration utilisé pour l'élimination des bruits de fond électroniques. Son objectif principal est d'éliminer autant de bruit de fond que possible. Cependant, un équilibre doit être trouvé pour que le seuil n'élimine pas également les signaux faibles mais utiles, étant donné que les bruits de fond se caractérisent par une faible amplitude.

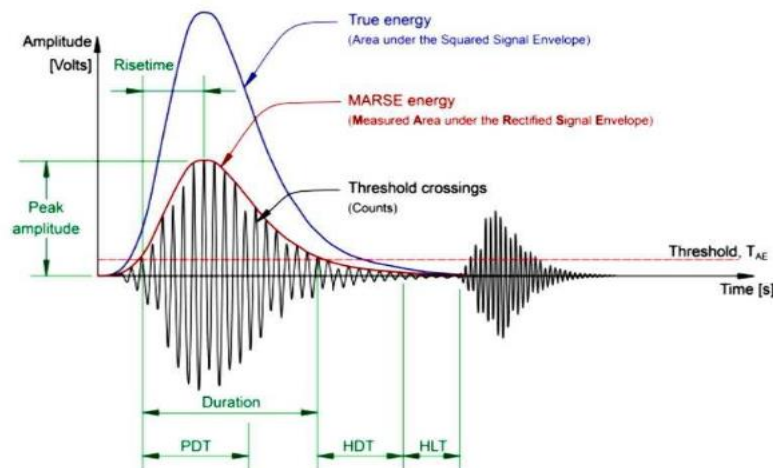


Figure I.14 Événements d'émission acoustique enregistrés.

I.7 État de l'art

Le domaine du tournage a connu des avancées significatives au cours des dernières années, poussées par le développement rapide de la technologie et la diversification des approches méthodologiques et statistiques. Cette évolution rend le domaine du tournage fertile de recherches.

I.7.1 Tournage intermittent

L'étude du tournage intermittent (TI) qui se distingue du tournage continu (TC) et l'évaluation de leurs performances, ainsi que le choix pertinent des paramètres de coupe qui conduisent à des performances répondant aux exigences industrielles sont le cœur des préoccupations de nombreux chercheurs. Dans ce contexte plusieurs articles ont été publiés.

T. J. Ko et al. [41] ont mené une enquête expérimentale sur l'usinage de l'acier AISI 52100 dans le contexte de (TI) pour évaluer les avantages des outils de coupe (CBN) avec des teneurs en nitrure variables. La pièce à usiner est une douille à billes qui contient des rainures internes, (**figure I.15**). Trois outils de coupe avec différentes teneurs en CBN ont été sélectionnés pour la comparaison comme suit : BN250 (60%), BNX4 (70%), et BN100 (80%) de la société SUMITOMO. Le rayon du bec d'outil de coupe est de 0,8 mm, (V_c) varie entre 97 ; 145 ; 215m/min, une avance varie entre 0,05 ; 0,1 ; 0,15mm/tr et une profondeur de coupe varie entre 0,5 ; 0,1 ; 0,2mm. Les facteurs de sortie (V_B , R_a et F_z) ont été contrôlés (**figure I.16**). Les auteurs ont confirmé la relation proportionnelle entre la teneur en nitrure et les performances (R_a) et (V_B). L'effort de coupe est inversement proportionnel à (V_c). Ceci est dû au ramollissement de la pièce en raison de l'augmentation de la température de coupe. En particulier, la force de coupe radiale a augmenté de manière significative avec l'augmentation de l'usure de l'outil, étant donné que la zone de contact entre l'usure du flanc et la pièce à usiner augmente considérablement dans le cas du tournage intermittent intérieur. Les causes de l'usure de l'outil de coupe dans le TDI, sont connues pour être un effet combiné de l'usure abrasive et de l'usure par adhérence due à l'effet tribochimique résultant de la température élevée (**figure I.17**).

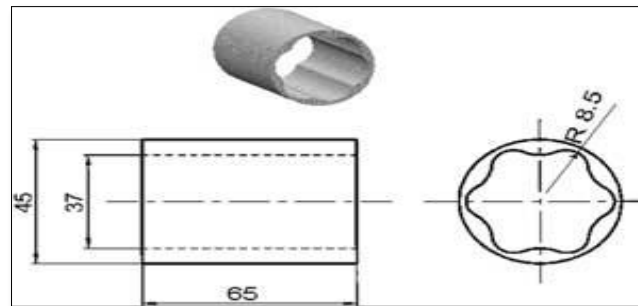


Figure I.15 Pièce à usiner.

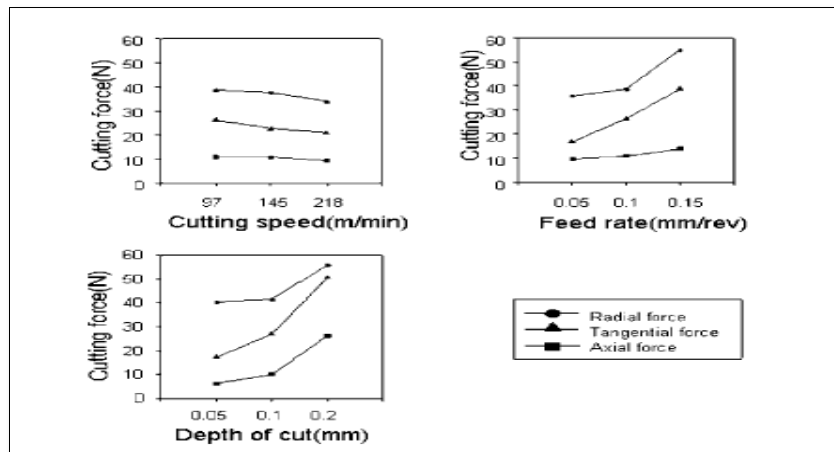


Figure I.16 Effort de coupe en fonction des facteurs V_c , f , et a_p .

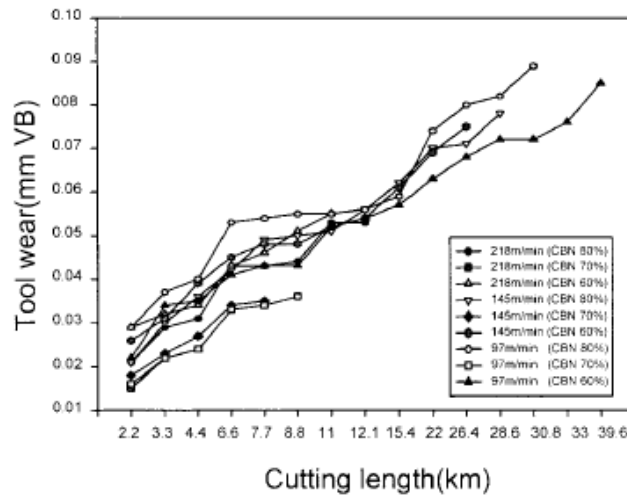


Figure I.17 Usure de l'outil en fonction de différentes teneurs en CBN.

Diniz, A. E et al [42] ont réalisé une investigation expérimentale afin d'évaluer la durée de vie des outils dans le tournage : continu, semi-intermittent et intermittent (TI) d'une pièce en acier AISI 4340, (figure I.18). Deux grades d'outils en CBN ont été utilisés (faible teneur en CBN, (7020), et haute teneur en CBN, (7050)) et deux géométries micro de bord de coupe (chanfreiné et arrondi). Les conditions de coupe recommandées pour mener les expériences étaient les suivantes : $V_c = 150$ m/min, $f = 0,08$ mm/rev, et $a_p = 0,15$ mm. La durée de vie de l'outil était considérée comme terminée lorsque l'usure du flanc atteignait $V_{BB} = 0,20$ mm. L'expérience était également interrompue si après 100 minutes de temps de coupe, cette valeur d'usure du flanc n'avait pas été atteinte. Après la fin de la durée de vie de l'outil (ou la fin de l'expérience), les plaquettes usées étaient examinées au microscope optique.

Les résultats ont montré que la durée de vie de l'outil la plus longue a été obtenue lorsque le grade (7020) a été utilisé, quel que soit le type de surface (figure I.19). Cependant, en coupe continue, les outils avec des bords chanfreinés se sont avérés avoir la durée de vie la plus longue, tandis que pour la coupe interrompue, les meilleurs résultats ont été obtenus avec des outils à bord arrondi. La durée de vie de l'outil était plus longue lors de la coupe de surfaces interrompues que les autres car la température de l'outil était plus basse lors des coupes interrompues. Aucun éclat ni aucune rupture n'ont été observés sur les arêtes de coupe, même lors de la réalisation de surfaces interrompues. Ce fait prouve que tous les outils ont montré une résistance suffisante pour supporter les impacts typiques de la coupe interrompue, peu importe le matériau de l'outil ou la géométrie du bord de coupe.

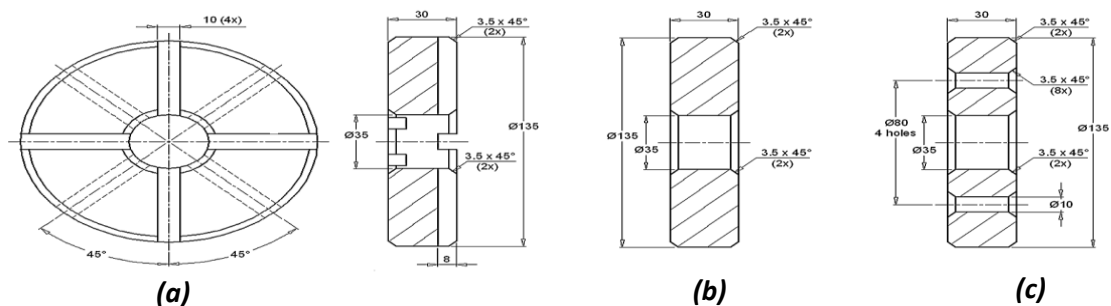


Figure I.18 Pièces usinées : (a) Intermittent, (b) Semi intermittent, (c) Continu.

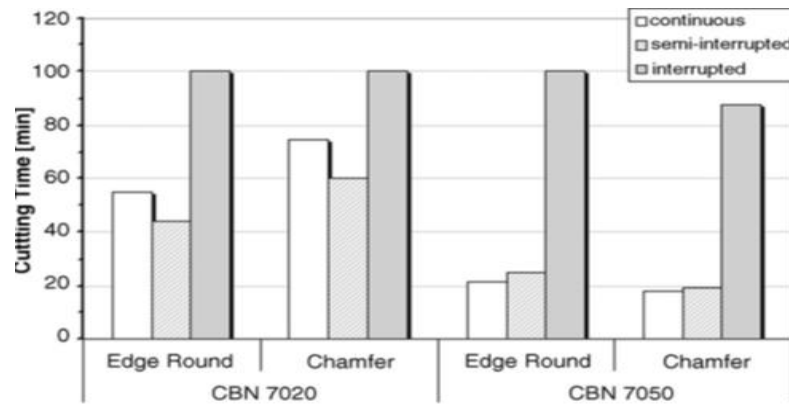


Figure I.19 Temps de coupe pour chaque expérience.

Une étude expérimentale a été effectuée par **De Godoy et al [43]** à l'objectif de comparer les outils CBN et céramiques dans le tournage continu et interrompu. Le matériau de la pièce était de l'acier AISI 4340 avec une dureté de 56 HRC. Deux types de pièces ont été utilisés, (**figure I.20**), conçues pour le tournage continu et interrompu. Deux outils de coupe ont été utilisés dans les expériences, le premier en CBN avec deux grades : 7015 (CBN-L) et 7025 (CBN-H), et le deuxième en céramiques avec deux nuances : CC670 et CC650. Les conditions de coupe utilisées étaient : $a_p = 0,15$ mm, $f = 0,08$ mm/rev, et des vitesses de coupe (V_c) qui dépendent de type d'outil (CBN-L 270 m/min CBN-H 195 m/min, CC650 150 m/min, CC670 150 m/min). Les principales conclusions de ce travail ont montré que tant dans le tournage continu que dans le tournage interrompu, les outils CBN présentaient une efficacité d'usinage que ce soit pour l'intermittent ou continu (**figures I.21, 22**).

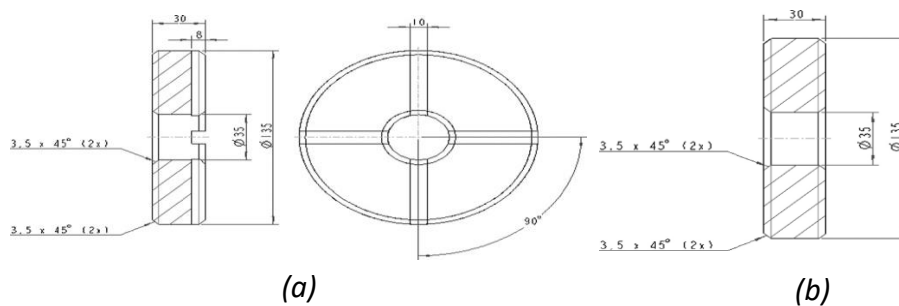


Figure I.20 Pièces usinées, (a) continu, (b) intermittent.

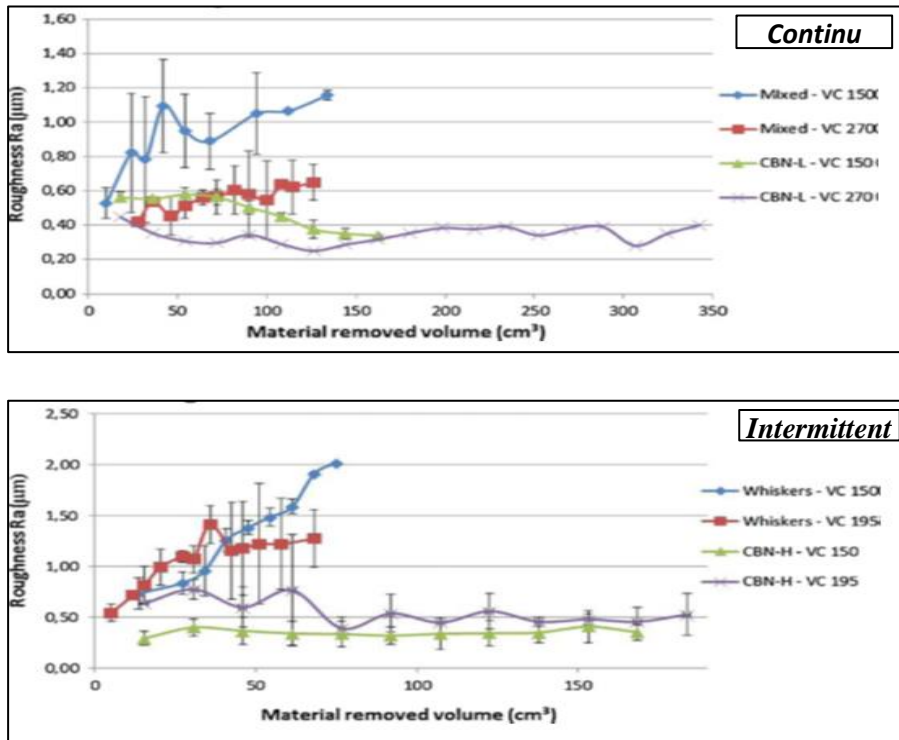


Figure I.21 Rugosité de surface en fonction de MMR.

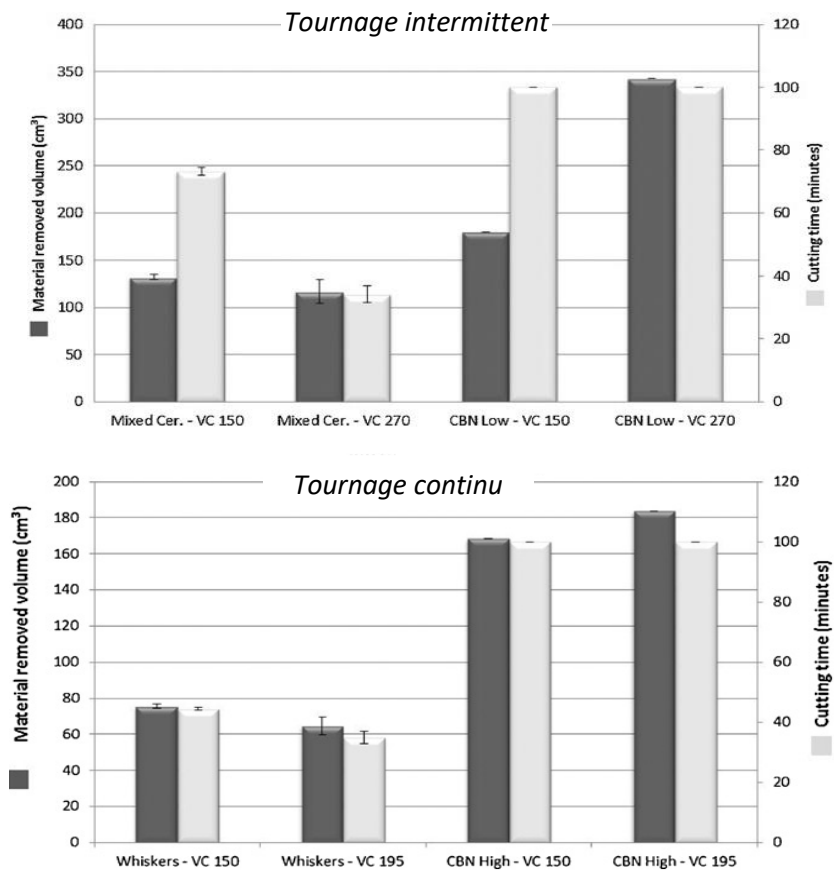


Figure I.22 Temps de coupe et MRR des différents types d'outils.

H.L. Liu et al. [44] ont mené une étude expérimentale dans le tournage intermittent de l'acier 2,25-Cr-1Mo-0,25-V en utilisant deux outils de coupe spécifiés à savoir (YT5) et (GC4235) qui est examiné avec deux formes géométriques différentes, quadratique et circulaire. Le plan d'expérience était orthogonal L9(3³), avec la variation de (V_c) entre 50 ; 100 et 150 m/min, (f) entre 0,2 ; 0,5 et 0,8 mm/tr, (a_p) entre 0,6 ; 1,2 et 1,6 mm sont des facteurs d'entrées et l'usure (V_B) est le facteur de sortie à examiner. Les résultats trouvés ont révélé l'efficacité de l'outil (GC4235) par rapport à l'outil (YT5). Les résultats obtenus (**tableau I.2**) démontrent la supériorité de l'outil (GC4235) en comparaison avec l'outil (YT5), ainsi que l'efficacité notable de la forme quadratique comparée à la forme circulaire. Les résultats tirés de cette étude confirment que pour la coupe intermittente de l'acier à haute résistance 2.25Cr1Mo0.25V, il convient d'adopter une vitesse de coupe faible ou moyenne et une grande profondeur de coupe lors de l'utilisation des outils YT5. Avec les facteurs de coupe optimaux de V_c=50m/min, f=0,5mm/r, a_p=1,2mm, la quantité d'enlèvement de matière a atteint le niveau maximum dans cette étude. La principale forme d'usure du carbure cémenté (YT5) à faible vitesse de coupe est l'usure de flanc, tandis qu'à vitesse de coupe élevée, la forme d'usure est la rupture. Les performances de coupe du carbure revêtu avancé (GC423) sont bien meilleures que celles du (YT5), Cependant, la durée de vie de l'outil quadratique est beaucoup plus longue que celle de l'outil circulaire. La principale circulaire est l'écaillage du revêtement, tandis que la forme de défaillance du (GC4235) quadrillé est une légère usure des flancs.

Tableau I.2 Temps d'impact et V_B des outils.

Outil de coupe	Impact du temps	Usure (V _B)
YT5	3600	0,34
GC4235 Circulaire	12480	0,53
GC4235 Quadratique	44160	0,175

Dans une autre étude similaire, **H.L. Liu et al.[45]** ont réalisé des expériences dans le processus du tournage intermittent (**figure I.23**) afin d'évaluer l'efficacité d'usinage de l'acier 2,25Cr-1Mo-0,25V et la durée de vie de l'outil en carbure revêtu (GC4235). Le plan d'expérience est de Taguchi L9 (3³), dont lequel les trois facteurs à trois niveaux sont (V_c) qui varie entre 50, 100, et 150 m/min, (f) qui varie entre 0,1 0,2, 0,3mm/tr et (a_p) qui varie entre 1, 2, 3mm. Les meilleurs paramètres de coupe optimisés pour atteindre l'objectif de maximiser la productivité (Q) sont, V_c=50m/min, f=0.4mm/tr, et a_p=3mm respectivement. La durée de vie de l'outil a été présente par des temps d'impact (N). A cet objectif, les paramètres de coupe optimaux obtenus étaient V_c=100m/min, f=0,4mm/r, a_p=3mm. Les résultats des expériences permettent de conclure que les facteurs suivants : V_c= 50m/min, f= 0,4mm/tr, et a_p= 3mm, assurent l'efficacité d'usinage et la durée de vie de l'outil quadratique en carbure revêtu GC4235. Les modèles mathématiques empiriques (Eq1, 2, et 3) des relations entre (Q), (N), et l'effort de coupe (F_n) en fonction des facteurs de coupe ont été établis. Le mécanisme d'usure a été déduit, à faible vitesse de coupe, l'usure abrasive et l'écaillage du revêtement ont été les principales formes de défaillance des outils GC4235. Cependant, l'écaillage du revêtement et l'usure adhésif ont été les principales formes de défaillance pour les vitesses plus élevées. **La figure (I.24)** représente une analyse de la variation de (Q) et (N) en fonction des facteurs de coupe, dans laquelle K est la moyenne des résultats expérimentaux des différents niveaux de chaque facteur, et R est la plage de K.

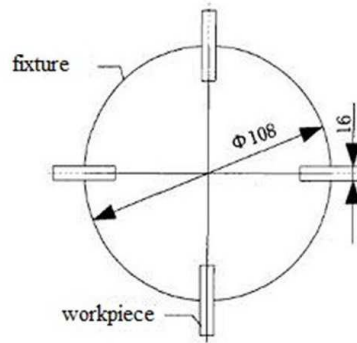


Figure I.23 Illustration de la fixation des éprouvettes.

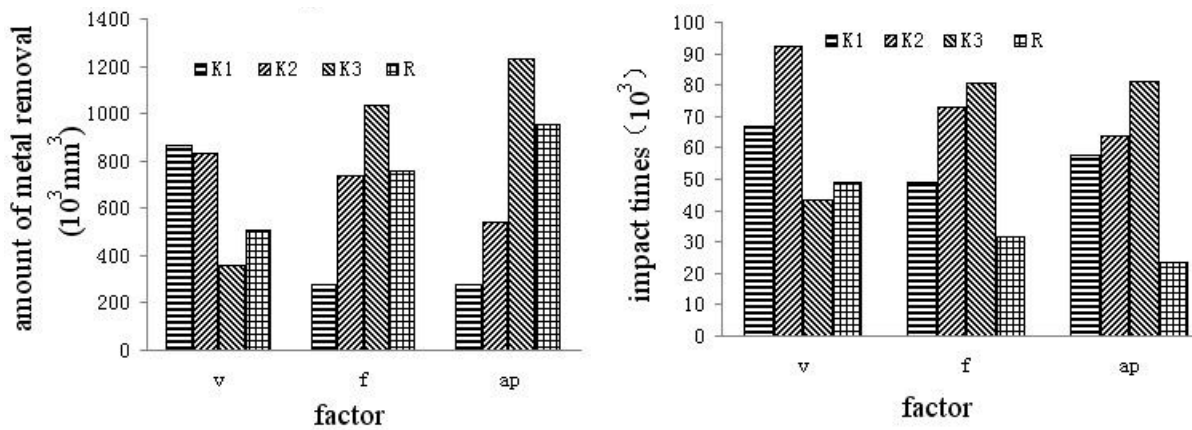


Figure I.24 Variation de Q et N en fonction des facteurs d'entrée

$$Q = 3085,9Vc^{-1,2269} \times f^{0,2943} \times ap^{0,2943} \quad (\text{Eq I.1})$$

$$N = 601,3Vc^{-0,2725} \times f^{0,9287} \times ap^{0,1341} \quad (\text{Eq I.2})$$

$$F_n = 578,42Vc^{0,22} \times f^{0,51} \times ap^{0,77} \quad (\text{Eq I.3})$$

E.M. Rubio et al.[8] ont mené une étude lors du tournage intermittent pour investiguer la rugosité de surface (Ra) d'une pièce en alliage de magnésium (UNS111917) (**figure I.25**) en relation avec une profondeur de coupe de valeur fixe de 0,25 mm, une avance (f) qui varie entre 0,051 et 0,1mm/tr, une vitesse de rotation (N) allant de 500 à 800 tr/min, une largeur d'interruption variant entre 0, 15, et 30 mm, et l'utilisation de la Lubrification Minimum (MQL) qui varie entre 0, 4,5, et 9 ml/h. Deux types d'outils de coupe (HX) et (TP 2500) ont été utilisés pour l'exécution de ces expériences.

Le traitement des résultats affirme que (f) est le facteur le plus dominant et que (Ra) diminue lorsque la valeur de (f) est très faible. L'utilisation de l'outil (HX) donne des valeurs de (Ra) favorables par rapport à l'outil de coupe TP 2500. Une relation proportionnelle entre la largeur d'interruption et (Ra) a été observée (**figure I.26**).



Figure I.25 Types de pièces utilisées.

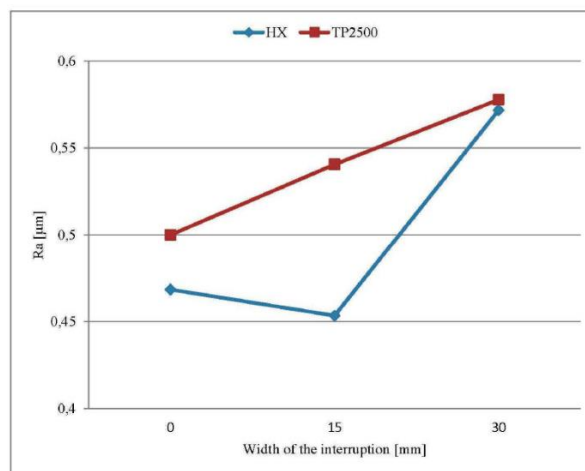


Figure I.26 Ra attendue par rapport à la largeur des interruptions pour les outils testés HX et TP2500.

D. Carou et al.[9] ont mené des expériences lors de (TI) de l'alliage de magnésium UNS M11917 avec un outil de coupe en carbure cémenté de Sandvik Coromant (TPGN 16 03 04 H13A). Les effets de l'avance (f), de la Lubrification Minimum Quantité (C) et du type d'interruption de la géométrie de la pièce (i) (**figure I.27**) sur les accélérations pendant l'usinage ont été évalués. Les valeurs sélectionnées pour ces facteurs étaient : 0,1 et 0,2 mm/tr, 0 (usinage à sec) et 30 ml/h, et 0, 15 et 30 mm pour (f), (c) et (i), respectivement, avec (V_c) constante de 200m/min et (a_p) fixe de 0,25mm.

Les résultats trouvés démontrent que les accélérations mesurées dans le processus (TI) dépend fortement de MQL et de (f). De plus, aucune influence significative du type d'interruption n'est identifiée (**figure I.28**). L'effet de (f) sur les vibrations diffère selon l'environnement de coupe utilisé. En particulier, l'augmentation de (f) entraîne des vibrations plus élevées dans le cas des essais d'usinage à sec, par contre des vibrations plus faibles lors de l'utilisation du système MQL. Une rugosité de surface également plus élevée est mesurée dans les tests d'usinage à sec, la relation entre l'accélération et la rugosité de surface est clairement définie (**figure I.29**).

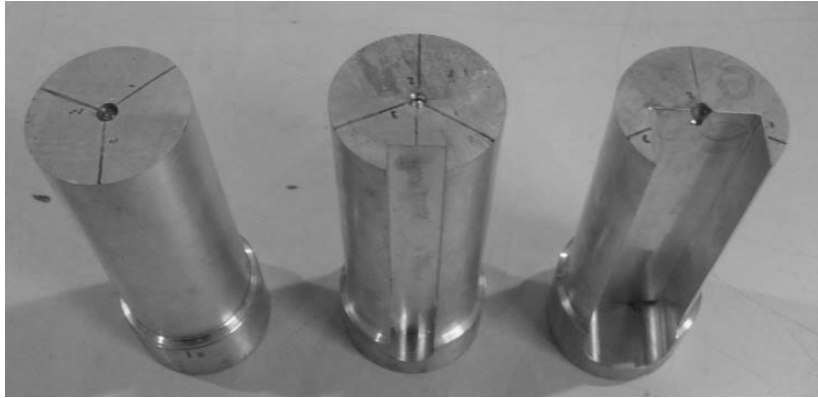


Figure I.27 Éprouvettes utilisées.

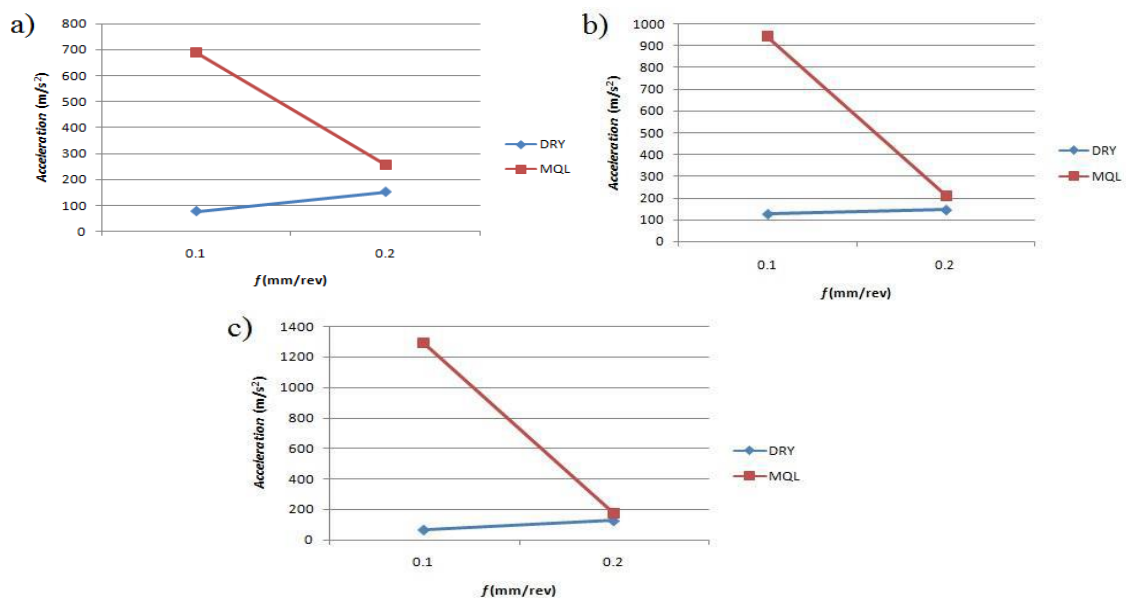


Figure I.28 Vibration en fonction de (f) pour les trois types d'interruption

a) $i = 0$ mm, b) $i = 15$ mm et c) $i = 30$ mm.

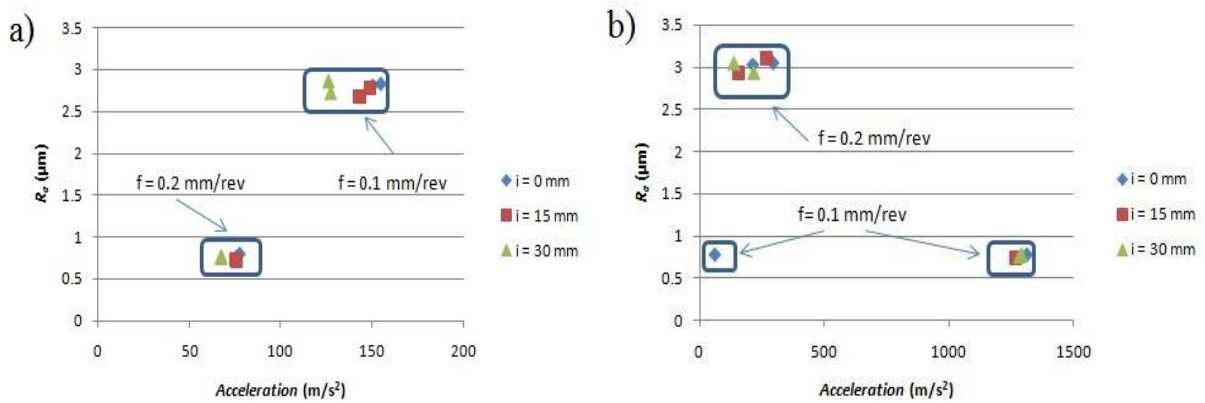


Figure I.29 R_a en fonction des accélérations : (a) sec et (b) MQL.

Une étude expérimentale a été réalisée par **F. Gong et al. [46]** dans le but d'évaluer les efforts de coupe et les mécanismes de défaillance des outils en fonction de différentes conditions de coupe dans l'usinage de l'acier trempé 20CrMnTi dans le contexte (TI), par un outil en céramique (Al_2O_3-TiC) fabriqué par la société SANDVIK, (grade CC650). Quatre blocs rectangulaires de dimensions 150× 16× 40 mm ont été fixés dans le dispositif spécial (**figure I.30**). Les paramètres de coupe sélectionnés sont les suivants : (V_c) à trois niveaux (80, 130 et 162 m/min), (f) variant entre 0,1, 0,15 et 0,2 mm/tr, et (a_p) variant entre 0,1, 0,15 et 0,20 mm. Les résultats indiquent une augmentation progressive de l'effort de coupe avec l'usure de l'outil, tandis que l'impact des paramètres de coupe sur l'effort de coupe diminue progressivement. Initialement, (V_c) est la plus influente (**figure I.31**), mais avec l'usure, la profondeur de coupe devient prépondérante. Les mécanismes de propagation des fissures de fatigue ont été examinés en détail.

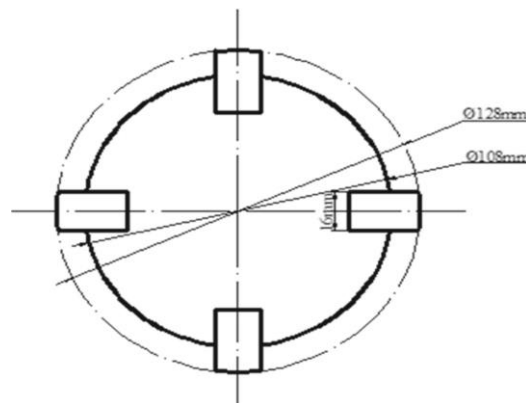


Figure I.30 Les quatre pièces fixées sur le dispositif.

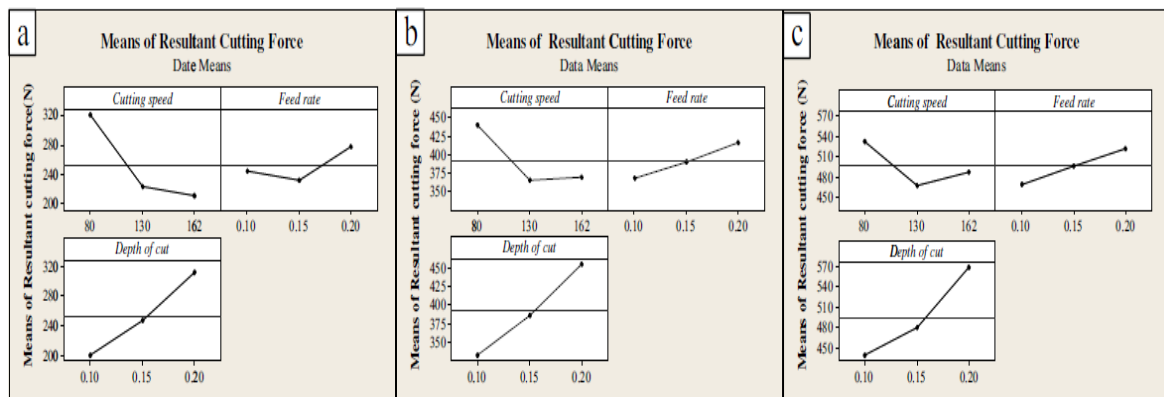


Figure I.31 Effort de coupe en fonction de (V_c), (f) et (a_p). **a)** la phase d'usure initiale, **b)** la phase d'usure normale, **c)** phase d'usure rapide.

D. Carou et al. [47] ont surveillé la qualité de surface pendant l'usinage intermittent d'un alliage de magnésium UNS M11917 avec l'aide d'une émission acoustique. Les résultats ont identifié que (f) est le facteur influent sur (R_a), tandis que (V_c) et la géométrie de la pièce (i) ont des effets insignifiants (**figure I.32**). De plus lorsque (f) augmente, (R_a) augmente et l'amplitude crête-à-crête diminue (**figure I.33**), ce qu'il donne la possibilité de contrôler la rugosité de surface par intensité sonore engendrée de l'opération d'usinage (**figure I.34**).



Figure I.32 Éprouvettes à usiner.

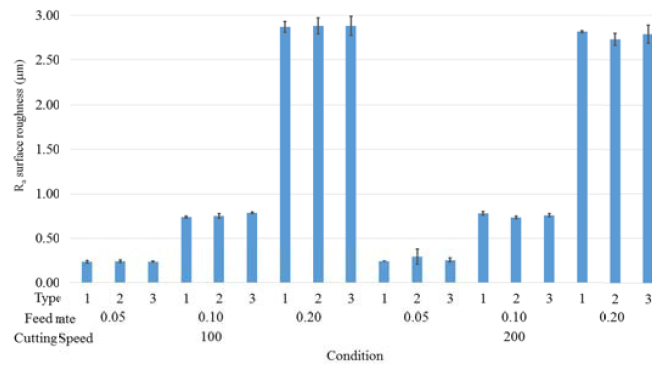


Figure I.33 Ra en fonction de (Vc), (f), (i).

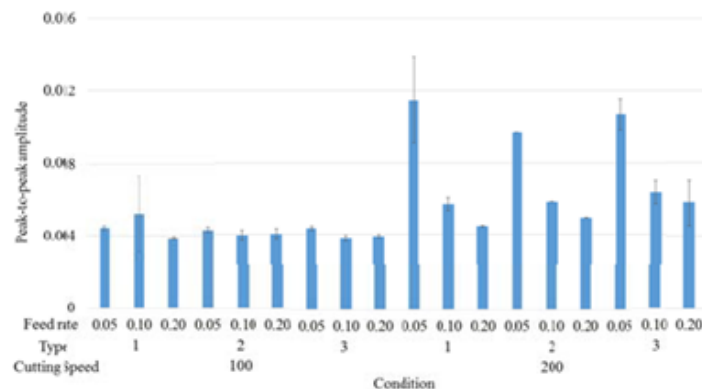


Figure I.34 Crête à crête de chaque essai.

X. Cui et al.[10] ont réalisé une enquête expérimentale pour optimiser l'énergie spécifique de coupe, la contrainte équivalente de dommage et la rugosité de surface dans le processus de (TI) de l'acier AISI 1045 en utilisant un outil de coupe en céramique. Deux paramètres de coupe sont choisis, (Vc) qui varie entre (80, 95, 110, 125, et 140 m/min) et (f) qui varie entre (0,1, 0,15, 0,2, 0,25, et 0,3 mm/tr) utilisées dans le tournage intermittent (**figure I.35**). Une zone optimale pour les trois paramètres étudiés a été trouvée sur la base des résultats fournis (**figure I.36**).

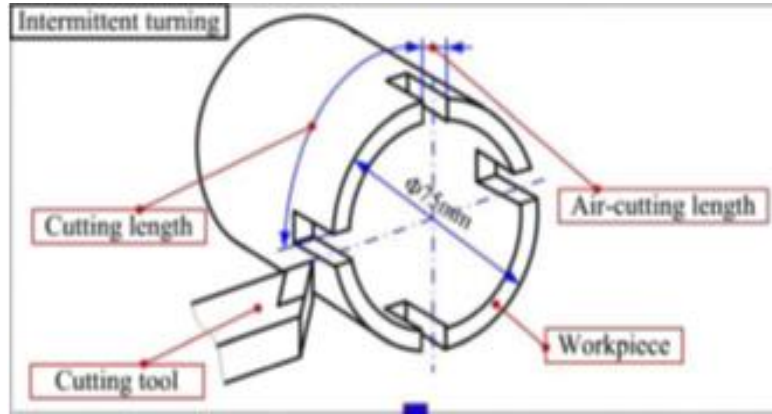


Figure I.35 Éprouvette à usiner.

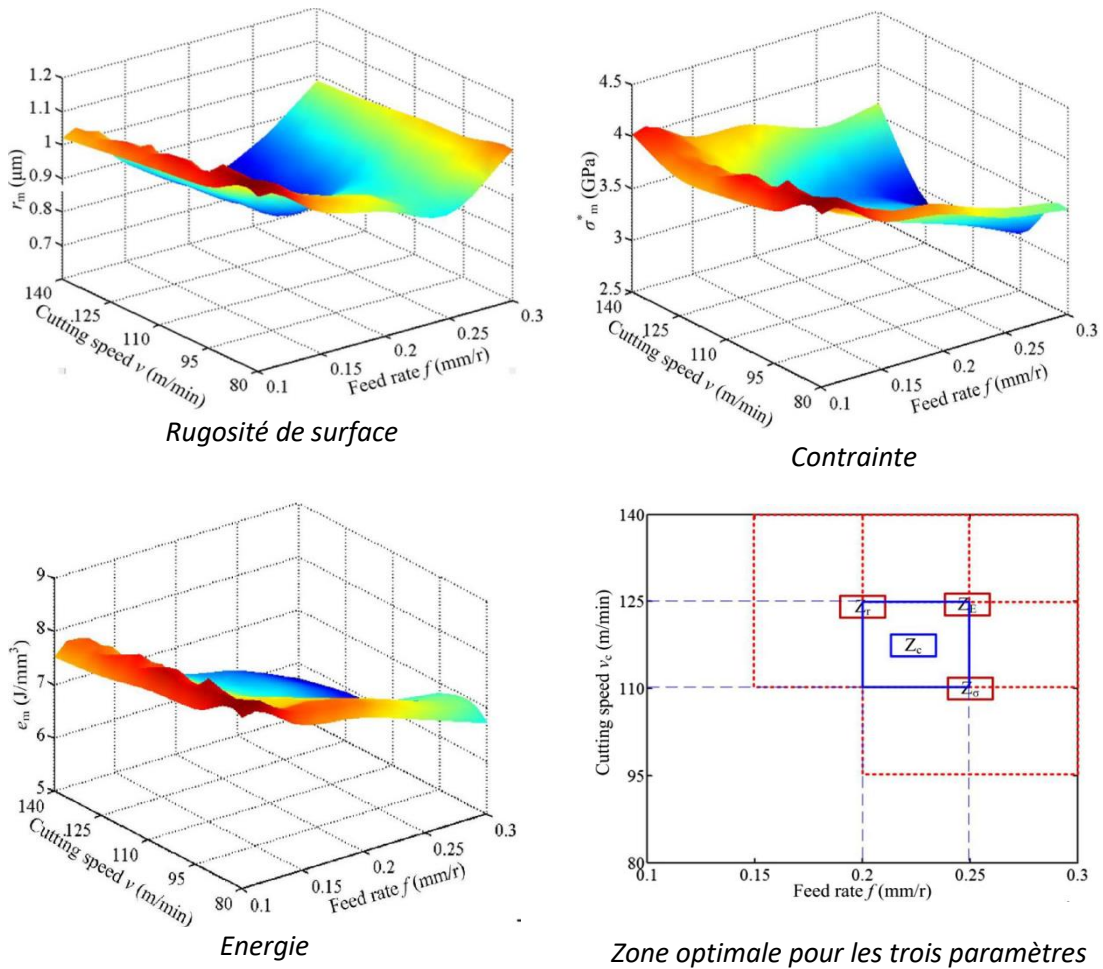


Figure I.36 Surface 3D des trois paramètres et la zone optimale.

Une autre étude expérimentale dans (TI) a été menée par **A. Kudryashova et al. [48]** se concentrant sur l'amélioration de la stabilité de l'outil de coupe sur des surfaces complexes. Des tests sont réalisés avec des deux outils de coupe (standard et avec amortissement) dans différentes conditions, lors de l'usinage d'un arbre en acier 5135 (**Figure I.37**). Dans les tests, la rugosité (R_a) est comparée. Les conditions de coupe utilisées en tournage sont : $V = 90-150$ m/min ; avance $F = 0,05-0,15$ mm/tr ; et $a_p = 0,05-0,10$ mm. Le traitement des résultats confirme que le remplacement de l'outil standard par un outil équipé d'un élément d'amortissement (**figure I.38**), améliore (R_a) de 20% jusqu'à 70% (**figure I.39**)

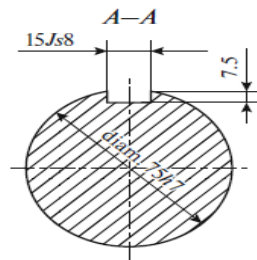


Figure I.37 Éprouvette à usiner.

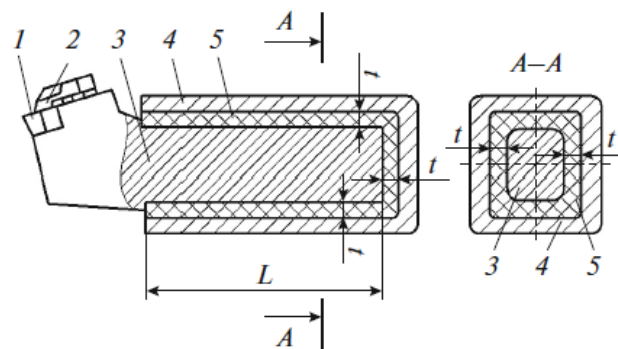


Figure I.38 Outil d'amortissement : (1) plaque de coupe ; (2) ressort ; (3) support ; (4) boîtier ; (5) matériau de remplissage auto vulcanisant.

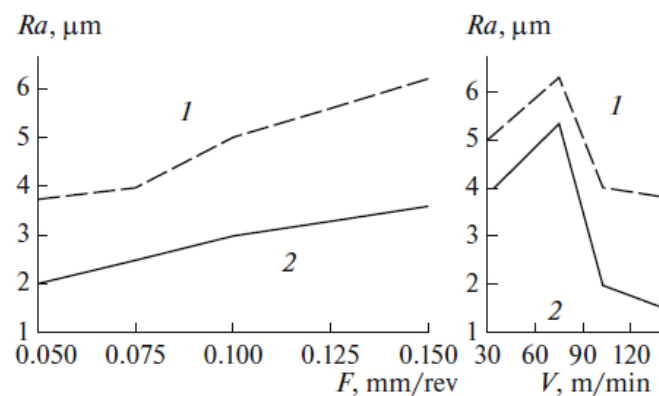


Figure I.39 Rugosité de surface en fonction de (V) et (F) ; (1) outil standard (2) outil avec amortissement.

Weiwei Yu et al.[49] ont mené une étude expérimentale en tournage intermittent (TI) dans le but d'évaluer les performances de coupe et de comprendre la force de l'impact et la force de coupe et le mécanisme d'usure lors du tournage intermittent d'une pièce en superalliage à base de nickel GH4169 (**figure I.40**). Un outil de coupe en céramique avec une structure en nid d'abeille (CNGN 120408T01020) a été utilisé. Une expérience à facteur unique avec la vitesse de coupe comme variable a été utilisée. (V_c) étaient de 100 m/min, 150 m/min, 200 m/min, 250 m/min et 300 m/min, (a_p) était de 0,1 mm, et (f) était de 0,1 mm/tr. Les résultats indiquent que (V_c) a un impact significatif sur l'effort de coupe et la force de l'impact dans le tournage intermittent des superalliages (**figure I.41**). De plus, les mécanismes d'usure prédominants observés comprennent l'usure par adhérence, l'usure par abrasion et l'usure par diffusion (**figure I.42**).

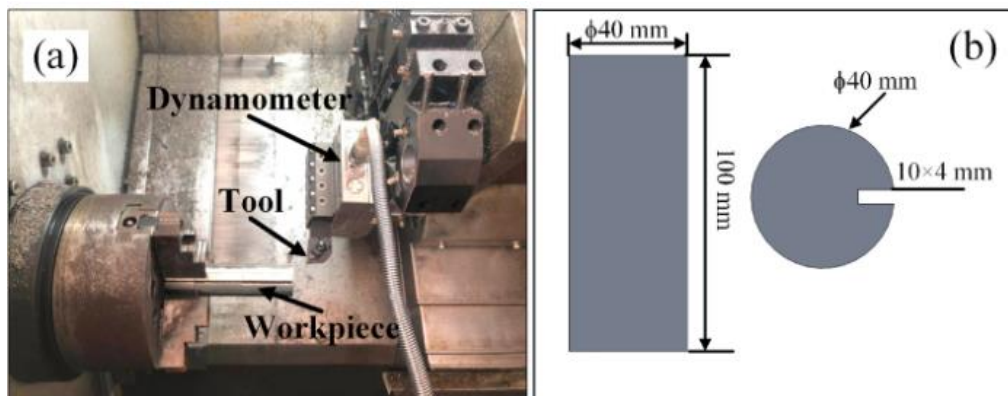


Figure I.40 (a) Procédure de coupe (b) Dimension de la pièce à usiner.

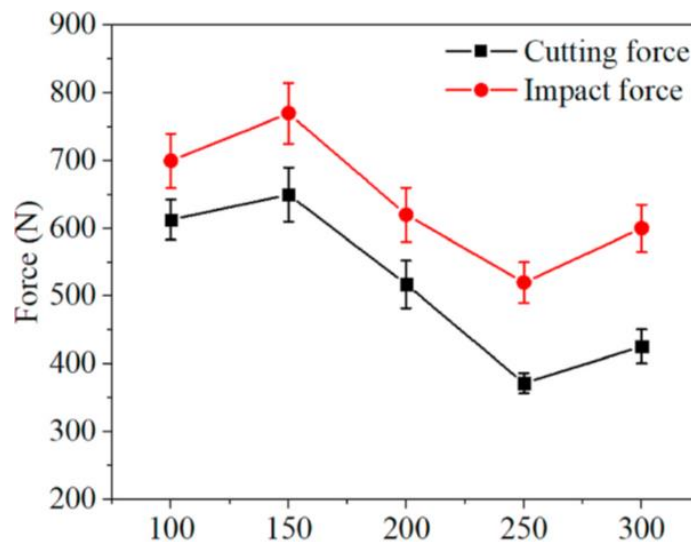


Figure I.41 L'effort moyenne et de l'impact en fonction de (V_c).

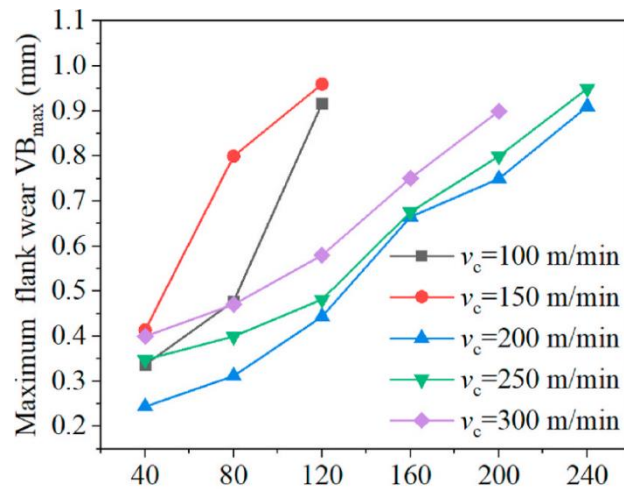


Figure I.42 Usure en fonction de Vc.

De plus, **Nayak et al. [50]** ont mené une étude comparative entre le (CT) et intermittent de l'acier à outils D6 avec trois outils de coupe ayant un faible pourcentage de CBN, (CBN-1, CBN-2, CBN-3). Les performances sont évaluées, notamment (Ra), (Fz), (Fx), (Tc) et (VB). En outre, des modèles mathématiques sont élaborés pour ces facteurs. Les facteurs de coupe sélectionnés pour exécuter les expériences sont : (Vc) qui varie entre 42, 73, et 102 m/min, (f) variant entre 0,08 0,133, 0,21 mm/tr. Les résultats indiquent que (f) ayant un impact significatif influençant (Ra), tandis que la température est impactée par (Vc). De plus, il est observé que (f) est le facteur prédominant sur (Fz) (**figure I.43**). Cette étude montre aussi que dans les opérations de (TI), l'usure du cratère est manifeste, tandis que l'abrasion et la diffusion à faible intensité sont confirmées comme mécanismes d'usure.

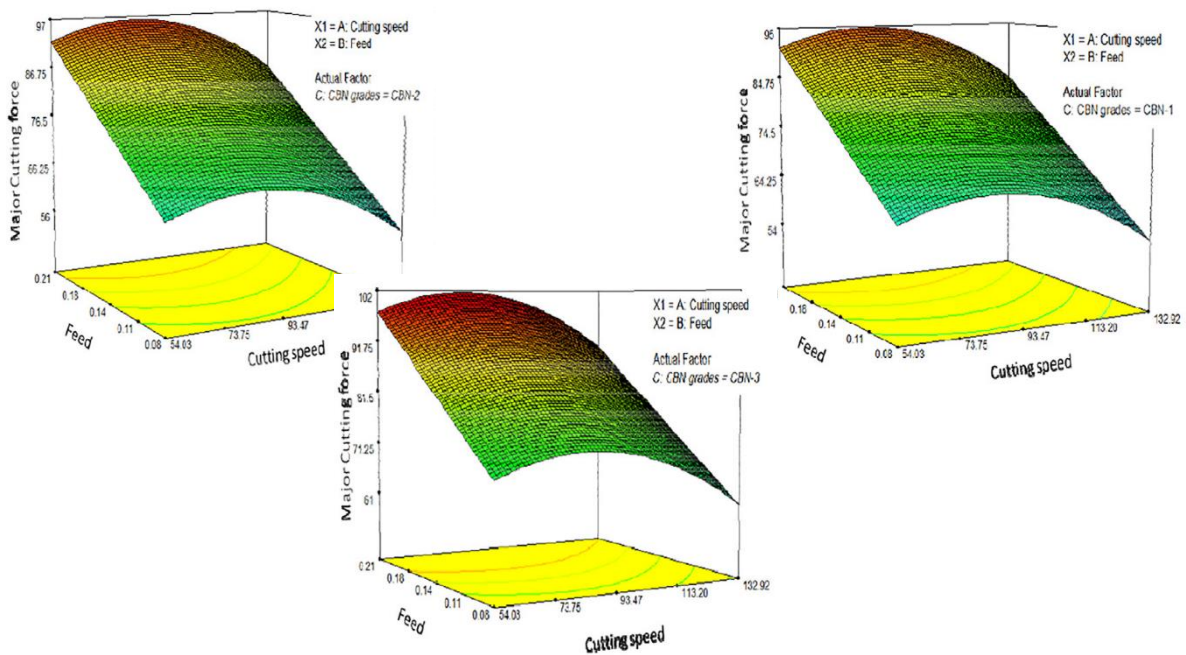


Figure I.43 Surface 3D de l'effort de coupe en fonction de (f) et (Vc).

Une évaluation du processus du tournage intermittent MQL plus durable à base d'huile végétale a été conduit par **Cui, X et al [51]** afin de réduire efficacement l'huile végétale vierge et l'usure des outils de coupe dans le processus (TI) de l'acier AISI52100 qui ont incorporé la VNMQL et la microstructure biomimétique multifonctionnelle de l'outil de coupe $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$. Les facteurs de coupe appliqués étaient ; $(V_c) = 82 \text{ m/min}$ et $f = 0,2 \text{ mm/tr}$. Un système d'alimentation en huile a été utilisé pour fournir le biolubrifiant nano fluide préparé. Quatre rainures ont été fabriquées sur la surface de la pièce pour reproduire le contact interrompu entre l'outil et la pièce lors de l'usinage (TI) (**figure I.44**). Les résultats révèlent que le procédé proposé a permis de réduire efficacement la quantité d'huile végétale vierge utilisée et minimiser l'usure de l'outil de coupe par rapport au procédé MQL conventionnel, utilisant la combinaison optimale trouvée du volume ration $V_r = 0.5$ et d'angle de coin de microstructure $A_w = 55^\circ$ (**figure I.45**).

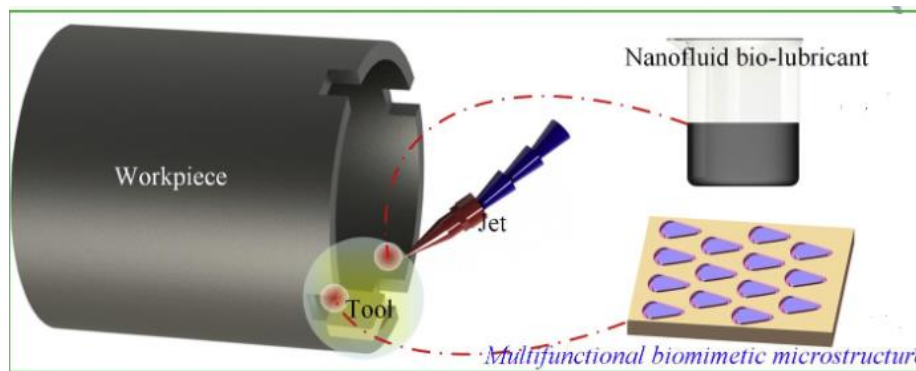


Figure I.44 Conception d'un processus du tournage intermittent plus durable.

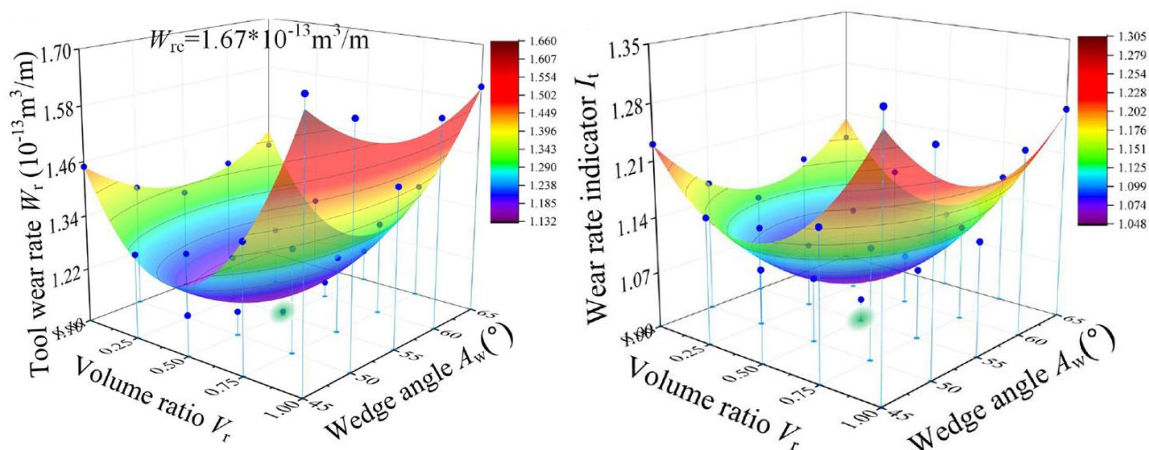


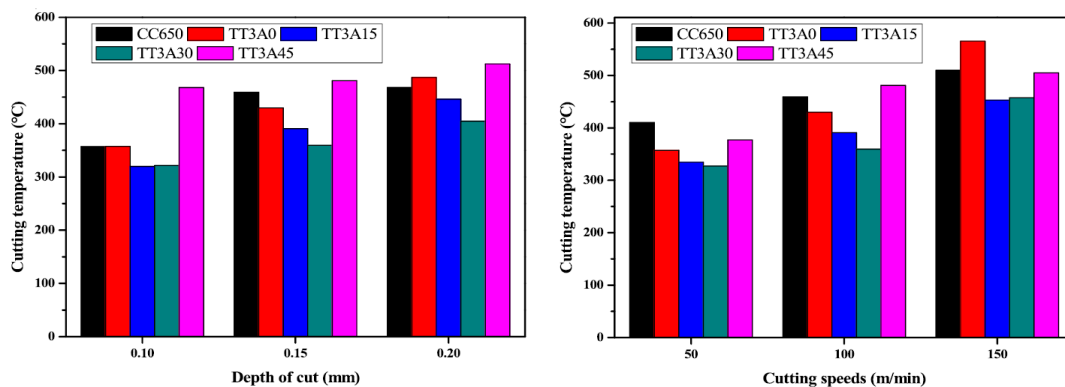
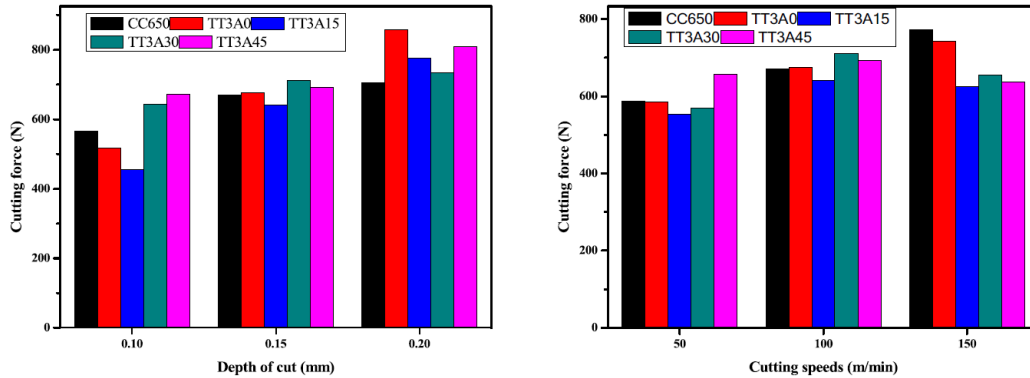
Figure I.45 Taux d'usure W_r et I_t de l'outil en fonction de V_r et A_w .

Gong, F et al [52], ont réalisé une étude expérimentale dans le tournage intermittent d'une éprouvette de quatre blocs rectangulaires d'acier trempé SKD11 d'une dimension de $140 \times 16 \times 45 \text{ mm}$ ont été installés sur le support (**Figure I.46**). Un outil de coupe en céramique à gradient multidimensionnel $\text{TiB}_2\text{-TiC-Al}_2\text{O}_3$ (MDGCT) a été utilisé. Les performances de coupe, comprenant l'effort de coupe (F), la température de coupe et la morphologie des copeaux, ainsi que les mécanismes de défaillance de (MDGCT) avec différents angles d'orientation comprenant TT3A0 ($\alpha = 0^\circ$), TT3A15 ($\alpha = 15^\circ$), TT3A30 ($\alpha = 30^\circ$) et TT3A45 ($\alpha = 45^\circ$), ont été étudiés en comparaison avec l'outil céramique commercial homogène CC650 en

fonction des paramètres de coupe suivants : (V_c) variant entre 50, 100, 150 m/min, une (f) constante, et (a_p) qui varie entre 0,1 ; 0,15 ; 0,20 mm. Les résultats obtenus montrent clairement que l'effort de coupe augmente avec l'augmentation de (a_p) et (V_c), tandis que celles des outils (MDGCT), augmentent d'abord puis diminuent (**figure I.47**). La température de coupe croît avec l'élévation de (a_p) et (V_c) (figure I.48). La durée de vie de l'outil diminue rapidement avec l'augmentation de (a_p) et n'est pas aussi sensible aux variations de (V_c), ce qui indique que l'effet de (a_p) sur la durée de vie de l'outil est plus important que celui de (V_c) dans (TI) de l'acier trempé SKD11(**figure I.49**). De plus l'angle d'orientation du MDGCT a un impact significatif sur (F) et la température de coupe. L'angle d'orientation de 15 degrés (TT3A15) présente les meilleures performances de coupe dans le (TI) de l'acier trempé SKD11. La durée de vie de (MDGCT) est plus longue que l'outil CC650.



Figure I.46 Éprouvettes installées sur le support.



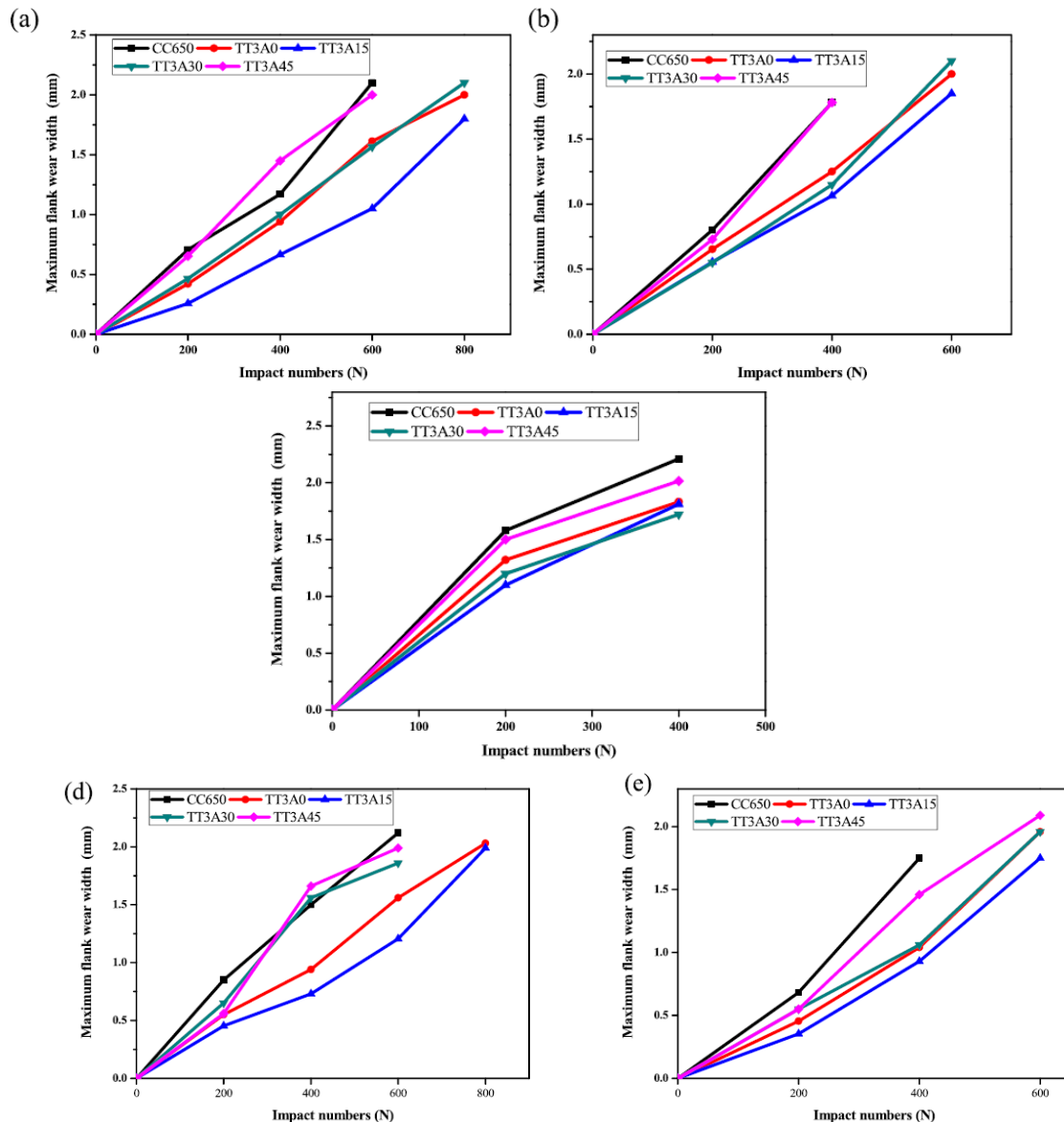


Figure I.49 Usure de flanc (V_B max) en fonction du nombre d'impacts pour les cinq outils.

I.7.2 Méthodes d'optimisation

L'optimisation des processus de fabrication revêt une importance capitale dans l'industrie moderne, où la maximisation de l'efficacité et de la qualité est essentielle pour rester compétitif sur le marché. Dans le domaine spécifique du tournage, qui est une opération d'usinage courante pour produire des pièces de différentes formes, plusieurs approches d'optimisation sont employées pour améliorer les performances du processus. Parmi ces approches, Nous pouvons mentionner l'emploi de techniques telles que la fonction DF (fonction de désirabilité), l'analyse relationnelle grise (GRA), l'optimisation multi-objectif par analyse de ratio (MOORA), VIKOR (Optimisation multicritère par analyse des compromis), et NSGA-II (Algorithme génétique de tri non-dominé II) pour optimiser les performances d'usinage au cours des années 2023/2024.

Tableau I.3 Articles publiés en 2023/2024 dans le domaine de l'usinage utilisant les approches DF, MOORA, GRA, VIKOR et NSGA-II.

Références	Processus	Matériaux	Facteurs d'entrée	Performances	Méthodes
N. Djouambi et al [53]	Tournage	(POM-C GF25%)	Vc, f, ap, r	Fx, Fy, Fz, Ra, Ec, MRR	MABAC, DF , GRA
S. Haoues et al [54]	Tournage	AISI 304	Vc, f, ap	Ra, Fz, MRR, and Pc	DF , CoCoSo
A. Hamdi et al [55]	Tournage	Polypropylène (PP)	Vc, f, ap, r	Ra, T, Ecs	DF
A. Kannan et al [56]	Tournage	Al 6063	Vc, f, ap	Ec, Pc, Ra	GRA
B. Somayaji et al [57]	Tournage	EN8	Vc, f, ap	Ra, MRR	GRA
K. Kalita [58]	Fraisage	Al1100	Vc, f, ap	Ra, MRR	MOORA , MABAC, MARICA
N. Nguyen et al [59]	Tournage	9XC	Vc, f, ap	Ra, MRR	RSM-DA, VIKOR
P. Ramena [60]	Fraisage	Ti-6Al-4V.	Vc, f, ap	Quantité de refroidissement, VB, T, Ra	VIKOR , MOORA , TOPSIS
S. Das et al [61]	Tournage	Cu-Ni alliage	Vc, f, ap	Ra, MRR	GRA , VIKOR , MOORA
S. Yadav et al [62]	Fraisage	Incoloy 925	Vc, f, ap, r	Ra, Fc	ANN, NSGAII, TOPSIS
O. Benkhelifa et al [63]	Tournage	AISI 316L	Vc, f, ap	Ra, Fz, CT	NSGAII , TOPSIS

Conclusion

Ce chapitre a permis d'établir une base solide de connaissances en se référant à une gamme variée de sources bibliographiques. En exposant les principes scientifiques essentiels à la compréhension de cette étude, des concepts de base portant sur l'usinabilité des matériaux, les techniques d'usinage continues et intermittentes, les matériaux utilisés pour les outils, ainsi que les revêtements des outils de coupe ont été abordés. De plus, une section de ce chapitre s'est concentrée sur les paramètres technologiques de l'usinage, englobant la rugosité de surface, la consommation énergétique lors de l'usinage, les efforts de coupe, l'usure des outils de coupe, la température de coupe, les vibrations pendant l'usinage, l'émission acoustique, ainsi que les études antérieures sur le sujet.

Nous avons pu identifier les principaux domaines de recherche, les tendances émergentes et les lacunes actuelles dans la littérature. En outre, cette revue de la littérature a fourni des perspectives critiques et des informations essentielles qui ont guidé la formulation des objectifs de notre propre recherche sur le tournage intermittent. En synthétisant les idées et les résultats présentés dans les diverses études examinées, nous avons pu établir une compréhension approfondie du contexte théorique et pratique dans lequel s'inscrit notre propre travail. Cette analyse bibliographique exhaustive constitue donc un point de départ essentiel pour notre étude.

CHAPITRE II

Procédure expérimentale

II.1 Introduction

Ce chapitre vise à fournir une base solide pour la compréhension de notre étude présentant les éléments clés de notre démarche expérimentale. Dans un premier temps, nous exposerons en détail le matériau que nous avons choisi d'usiner. Il s'agit d'un matériau sélectionné pour sa pertinence par rapport à notre domaine d'étude et à nos objectifs de recherche. Nous expliquerons les caractéristiques mécaniques et les applications industrielles de ce matériau, ainsi que les raisons qui nous ont poussés à le choisir pour nos expériences.

Dans un second temps, nous détaillerons les équipements et les instruments de mesure que nous avons utilisés pour évaluer les performances et les résultats de nos opérations d'usinage intermittent. Il s'agit notamment de machines-outils, des appareils de mesure, et d'autres outils essentiels à la collecte de données précises, en mettant l'accent sur les procédures de mesure, et les paramètres de réglage des machines. Cela constitue la clé de voûte de notre démarche scientifique visant à explorer et à comprendre les phénomènes liés à l'usinage intermittent de ce matériau spécifique.

Enfin, nous décrivons la méthodologie que nous avons suivie pour mener nos expérimentations, et les conditions opératoires que nous avons adoptées.

II.2 Procédure expérimentale

II.2.1 Matériau de l'étude

Le matériau examiné dans cette étude expérimentale est un acier à outil fortement allié AISI D3. Sa désignation selon plusieurs normes mondiales est répertoriée dans le tableau (II.1). Il est principalement destiné aux opérations de travail à froid, où la température de surface reste généralement en dessous de 200 °C. Ce matériau se distingue par ses propriétés mécaniques particulières, notamment une résistance exceptionnelle à l'usure, une grande durabilité en coupe, une ténacité modérée, une stabilité dimensionnelle et une résistance élevée à la compression. Il a trouvé une large gamme d'applications industrielles, notamment dans la fabrication d'outils d'usinage et de formage, tels que les poinçons, les matrices et les filières, ainsi que dans la production d'instruments de mesure comme les calibres, les tampons et les jauges. Le tableau (II.2) donne la composition chimique de l'acier AISI D3

L'éprouvette utilisée est d'une dimension de 185mm de longueur et de 70 mm de diamètre. Afin d'obtenir un usinage intermittent, nous avons réalisé trois paliers égaux de 23 mm sur une longueur d'usinage de 85 mm séparés par des gorges de 5 mm de largeur comme il est illustré dans la figure (II.1.a, b, c).

La recherche et l'étude de l'usinabilité de l'acier à outils D3 peuvent ouvrir la voie à des avancées dans le domaine des matériaux et de la technologie des outils, conduisant à des applications encore plus performantes de ce matériau.

Tableau II.1 Désignation de l'acier utilisé.

Normes	AISI	JIS	DIN	AFNOR	BS	ISO
Désignation	D3	SKD1	1.2080	Z200CR12	BD3	X210Cr12

Tableau II.2 Composition chimique de l'acier AISI D3.

Composition chimique	C	Si	Ni	Mo	Mn	S	P	Cu	Cr
Pourcentage (%)	2	0,31	0,259	0,124	0,29	0,009	0,011	0,162	12

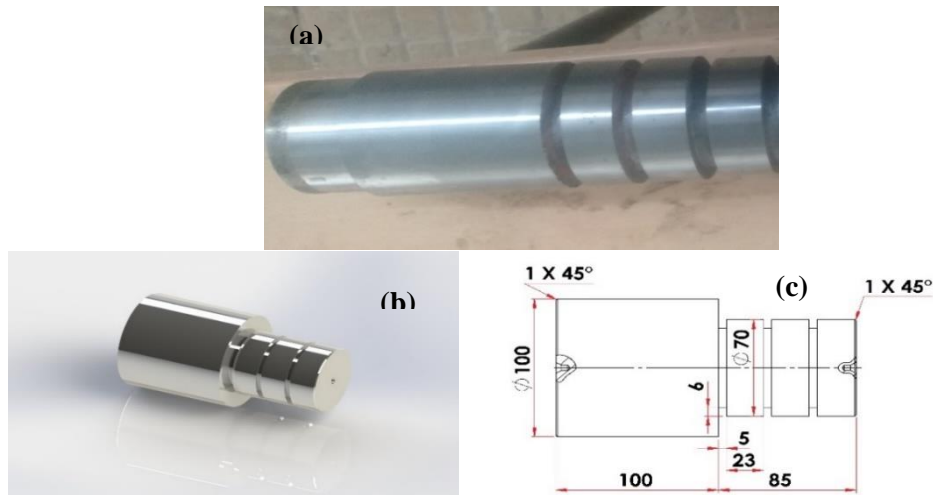


Figure II.1 Eprouvette utilisée.

II.2.2 Machine - outil

Les expériences liées au tournage intermittent (TI) ont été conduites en utilisant un tour de la marque Tos Trenčín SN40C, d'une puissance de 6,6 kW, comme indiqué dans la Figure (II.2). Le tour est équipé d'une broche offrant des vitesses de rotation de (45 ; 63 ; 90 ; 125 ; 180 ; 250 ; 355 ; 500 ; 710 ; 1000 ; 1400 et 2000) tr/min, et les avances proposées sont de (0,08 ; 0,10 ; 0,11 ; 0,12 ; 0,14 ; 0,16 ; 0,18 ; 0,20 ; 0,22 ; 0,24 ; ...0,8 ; ... ; 6,4) mm/tr. Pour ajuster le nombre de tours exactement calculé, le tour est équipé d'un variateur de fréquence de la marque ABB, comme illustré dans la Figure (II.3), qui nous permet de régler les vitesses de rotation en fonction des valeurs sélectionnées.



Figure II.2 Machine-outil modèle SN40C.



Figure II.3 Variateur de fréquence ABB.

II.2.3 Outil de coupe utilisé et porte outil

Après avoir une évaluation attentive des conditions opératoire de coupe choisis pour nos expériences dans ce contexte d'usinage spécifique, et une consultation des recommandations du fabricant des outils de coupe SANDVIK ; une plaquette de coupe de nuance (GC4215) composée de huit (08) arrêtes tranchantes en carbure métallique à triple revêtements ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}/\text{TiCN}$) a été choisie pour réaliser les essais du tournage intermittent (TI) comme illustré dans la figure II.4.a. L'insert a été monté sur un porte-outil de désignation ISO (PSBNR 2525M 12), (**Figure II.4.b.c**), ce dernier est fixé aussi sur la plateforme kistler par trois (03) vis de serrage comme représenté dans la figure (II.4.c.d), le tableau (II.3) présente les caractéristiques géométriques de porte outil utilisé. Suivant la géométrie de la pièce, la plaquette de coupe subit trois (03) chocs successivement pour chaque essai d'usinage, ce qui assure l'intermittence en tournage.

Tableau II.3 Géométrie de l'outil de coupe utilisé.

Porte outil	Section	χ_r	α	Υ	λ
PSBNR 2525 M12	25*25	75°	6°	-6°	-6°



Figure II.4 Outil de coupe, porte outil et plaquette.

II.3 Instruments de mesure des performances

Les méthodes de mesure des paramètres technologiques de performance, ainsi que les instruments de mesure utilisés, ont été définis de la manière suivante :

II.3.1 Rugosité de surface (Ra)

Le critère de la rugosité de surface (Ra) a été mesuré à l'aide d'un rugosimètre portable de la marque MITUTOYO SJ-210, où l'unité d'avance est séparée de l'unité d'affichage qui nous permet de mesurer facilement et avec précision la rugosité de la surface, et d'effectuer des mesures dans n'importe quelle position (**figure II.5**). L'opération de mesure a été répétée trois fois suivant une position angulaire de 120° pour chaque essai. La rugosité moyenne des trois mesures a été prise en considération dans notre étude.

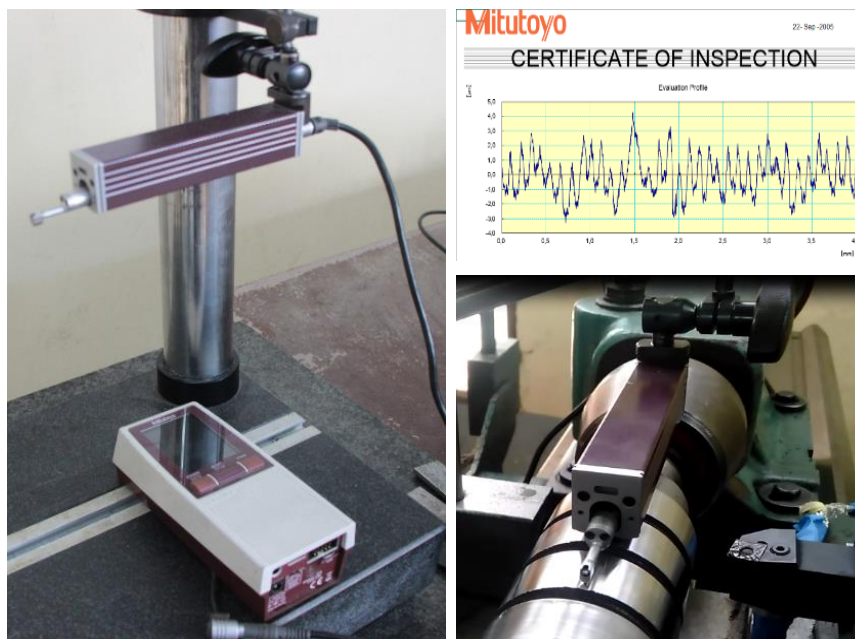


Figure II.5 Rugosimètre surfptest 210-SJ.

II.3.2 Effort de coupe tangentiel (F_z)

Pendant l'usinage intermittent, la mesure des efforts de coupe selon les trois axes (X, Y, Z) (**figure II.6**) a été réalisée en temps réel à l'aide d'un dynamomètre piézoélectrique Kistler de type 9257 B (**figure I.7**). Les dimensions de plaque supérieure 100x170 mm, avec des forces maximales F_x , F_y , F_z de ± 5 kN, et de fréquence propre $f_n(x)$, $f_n(y)$, $f_n(z)$ égale à 3,5 kHz relié par un connecteur à bride Fischer à 9 broches. Car l'effort tangentiel (F_z) est prédominant par rapport aux efforts F_x et F_y , nous avons choisi dans le cadre de cette étude, de retenir sa valeur moyenne.

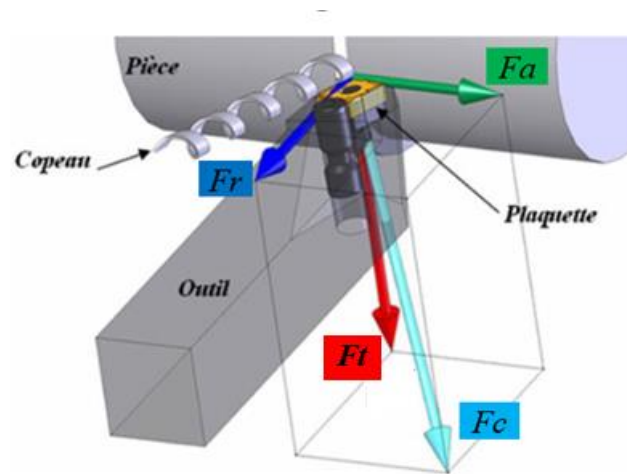


Figure I.6 Composantes de l'effort de coupe.

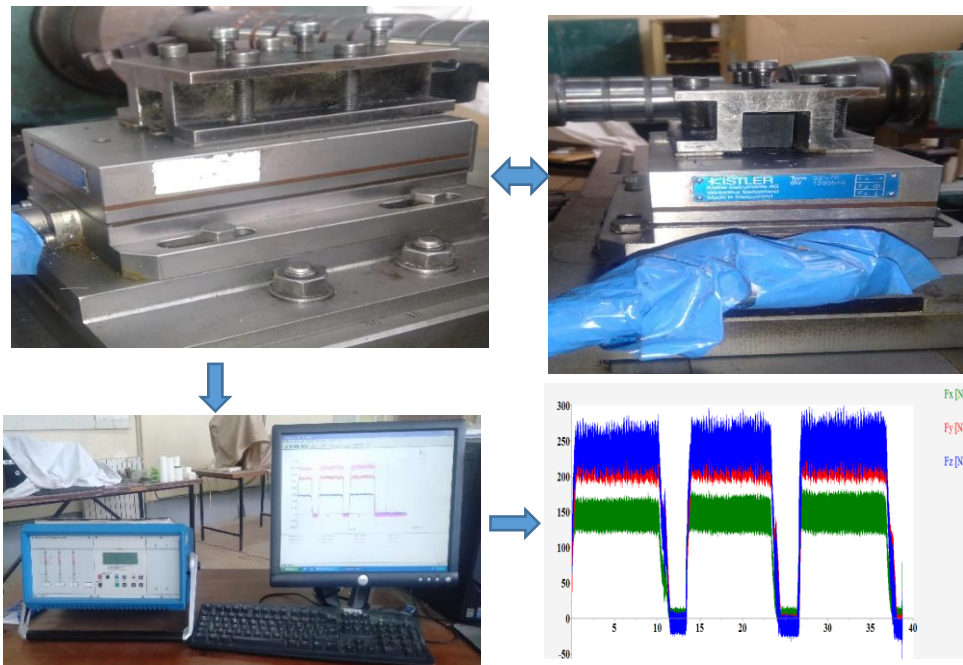


Figure II.7 Acquisition des efforts par le dynamomètre Kistler type 9257 B.

II.3.3 Puissance consommée par le moteur (P_m)

La puissance du moteur (P_m) a été mesurée et enregistrée pour chaque essai via un analyseur de puissance triphasé de la marque LUTRON de type DW-6095, comme illustré dans la figure (II.8.a). L'installation de l'analyseur avec ses trois pinces pour les trois phases est montrée dans les figures (II.8.b) et (II.8.c). Les enregistrements de la consommation ont été effectués toutes les deux secondes en temps réel, couvrant l'intégralité de l'opération (TI). Pour notre analyse, nous avons pris en considération la consommation de la puissance maximale du moteur comme facteur à modéliser et optimiser.



Figure II.8 Mesure de la puissance par analyseur Lutron type DW- 6095.

II.3.4 Température de coupe (Ct)

La température de coupe (Ct) a été mesurée par une caméra thermographie I.R de la marque Raycam C.A 1884 destinée à un usage industriel, comme illustrée la figure (II.9.a). Un réglage spécifique des paramètres de mesure a été effectué. L'émissivité a été fixée à (0,9) sur une échelle de (0,01-1) données, qui correspond à l'émissivité du matériau usiné. La caméra thermique affiche la température maximale dans la zone de coupe. L'enregistrement de la température a été effectuée au cours de l'opération d'usinage au temps réel aux points particuliers, la caméra est d'une forme de pistolet pour une parfaite maniabilité qui facilite l'opération de mesure, et l'accès direct aux fonctions permet l'utilisation d'une seule main. La visée laser cible rapidement et précisément la zone de coupe (**figure II.9.b**). L'écran couleur orientable simplifie la visualisation des zones de coupe. Pour plus de précision (**figure II.9.c**).

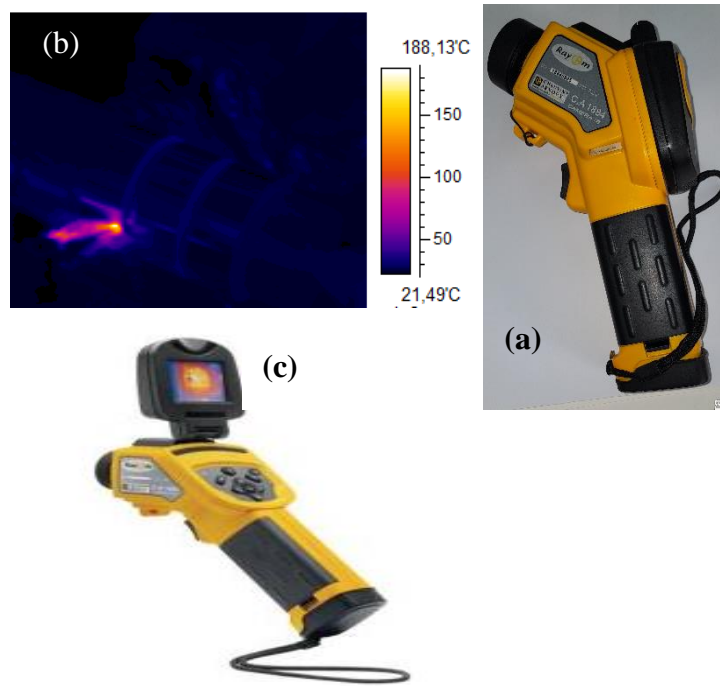


Figure II.9 Mesure de la température de coupe par caméra thermographique.

II.3.5 Usure d'outil de coupe (V_B)

L'usure en dépouille (V_B) sur la surface en dépouille de l'outil de coupe utilisé pour réaliser nos expériences a été mesurée via un microscope de la marque VISUEL GAGE 250 comme illustré la figure (II.10.a). Un logiciel de cet appareillage installé sur un micro-ordinateur relié avec un micro-ordinateur donné la possibilité de visualisé et mesuré l'usure (**figure II.10.b**). Après le positionnement de la plaquette sur un support spécial sous l'objectif du microscope, un réglage de vue par le déplacement de la table a mouvements selon les trois axe (X, Y, Z) et un réglage précis par le zoom, permettent de donner une mesure précise de (V_B) comme présenté la figure (II.10.c). L'opération de mesure est répétée pour chaque arête de coupe pour les trois rayons de bec (0,4 1,2 1,6) mm.

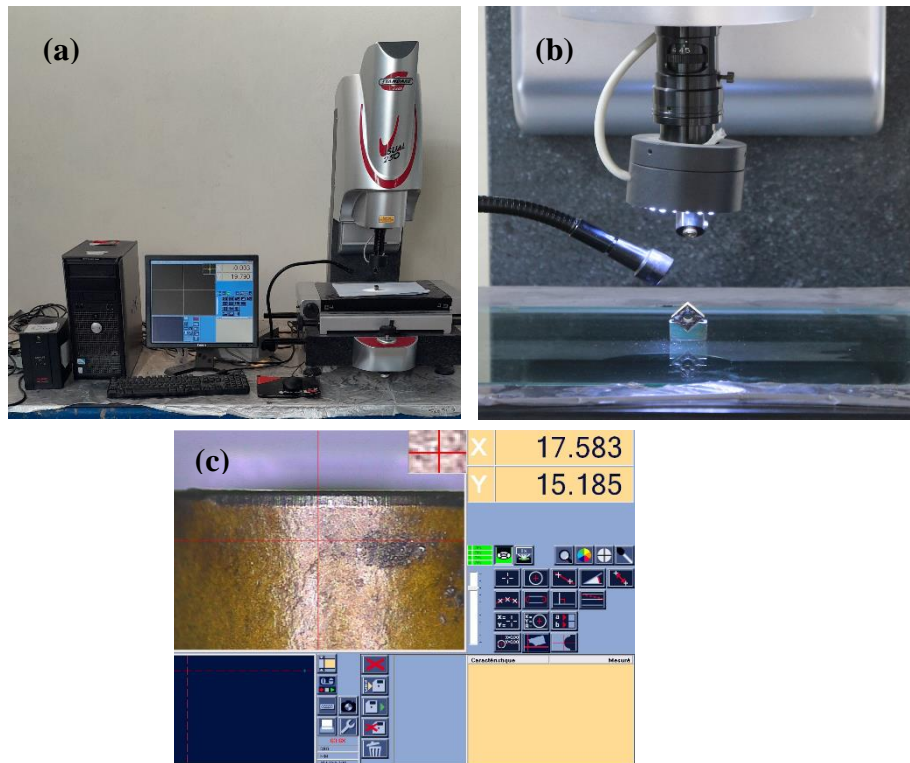


Figure II.10 Mesure de l'usure V_B .

II.3.6 Mesure des vibrations

Les vibrations en termes d'accélération ont été mesurées dans les trois directions principales A_X , A_Y et A_Z via un accéléromètre Bruel & Kjaer comme illustré dans la figure (II.11.a). Le Pulse 16.1 (Figure II.11.b) et son logiciel d'acquisition LABSHOP ont été utilisés afin de pouvoir collecter et traiter les signaux mesurés. Dans ce travail seules les valeurs (RMS) de la vibration tangentielle a été retenue.

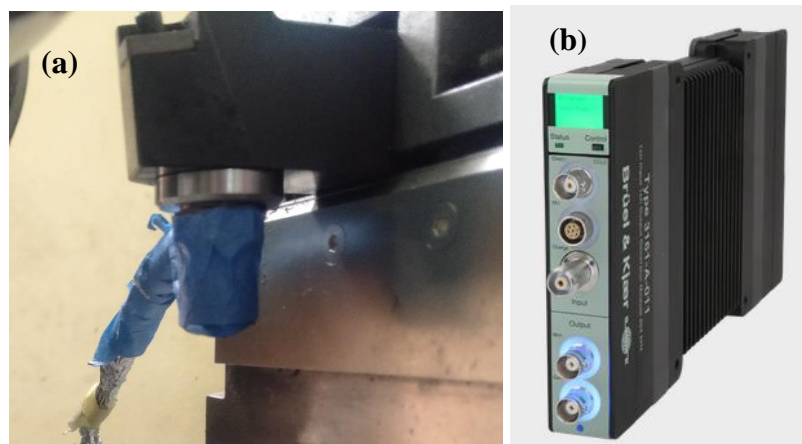


Figure II.11 Mesure de vibration.

II.3.7 Mesure de l'intensité sonore

La mesure en temps réel de l'intensité sonore (L_p) générée par le contact entre la pièce et l'outil pendant l'usinage a été réalisée à l'aide du sonomètre 2236 Bruel & Kjaer, comme illustré dans la figure (II.12.a). Le sonomètre est positionné sur un support mobile permettant de suivre la zone de coupe à une distance de 100 mm, comme le montre la figure (II.12.b). Après avoir calibré l'instrument et sélectionné la plage de mesure, des réglages spécifiques des paramètres d'acquisition et d'enregistrement ont été effectués. Les résultats enregistrés ont été transférés vers un ordinateur via le câble RS 232, en utilisant le logiciel Noise Explorer pour cette opération.

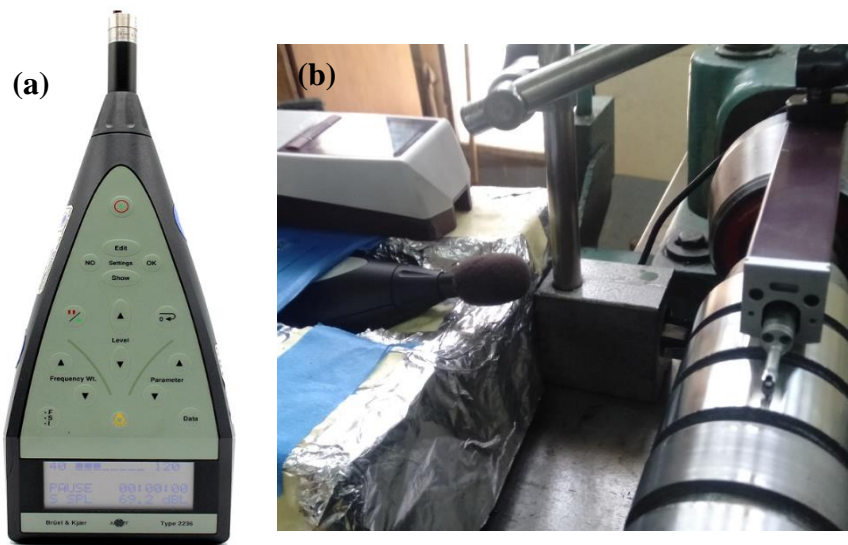


Figure II.12 Mesure de l'intensité sonore.

II.3.8 Calcul du taux de la matière enlevée

Le débit de la matière enlevée (MRR) qui représente un indice de productivité est calculé selon l'équation suivante :

$$[MRR] = \frac{V_c * a_p * f * 1000}{60} \quad (\text{mm}^3/\text{s}) \quad (\text{Eq. II.1})$$

Où : V_c en (m/min), a_p en (mm), f en (mm/rev).

II.3.9 Calcul de la puissance de coupe (P_c)

La puissance de coupe (P_c) est la puissance nécessaire pour effectuer une opération de coupe, calculée par la formule suivante :

$$[P_c] = \frac{F_z * V_c}{60} \quad (\text{Watt}) \quad (\text{Eq. II.2})$$

Où : F_z en (N).

II.4 Paramètres de coupe, plan d'expérience et conditions opératoire

Le choix judicieux des paramètres de coupe, du plan d'expérience, et des conditions opératoires revêt une importance cruciale dans le cadre de la recherche et de l'expérimentation. Dans notre étude le choix des paramètres de coupe, du plan d'expérience ainsi que les conditions opératoires est effectué par l'équipe du laboratoire (LMS) en se basant sur son expertise, et sur une analyse approfondie de ce contexte de coupe (TI), s'appuyant sur une lecture attentive de la littérature des travaux antérieures, ainsi qu'une évaluation des équipements disponibles au sein du laboratoire en vue de la réalisation de nos expériences.

II.4.1 Choix des paramètres de coupe

Afin d'évaluer l'impact des facteurs de coupe sur les performances technologiques au contexte du tournage intermittent (TI), quatre (04) facteurs d'entrés sont choisis ; (r), (Vc), (f), et (ap). Chaque facteur d'entrée a été varié trois fois, ce qui a mené au plan de Taguchi L9. Sept (07) paramètres de sortie ont été évalués et mesurés. (Ra), (Fz), (Pm), (V_B), (Ct), (Az) et (Lp) généré par la contacte du couple pièce-outil (Lp), et deux facteurs calculés le taux de la matière enlevée (MRR), et la puissance du coupe (Pc). Les facteurs de coupe choisis sont organisés dans le tableau (II.4).

Tableau II.4 Facteurs d'entrée et les niveaux adoptés.

Paramètres	Niveaux		
	1	2	3
r (mm)	0,4	1,2	1,6
Vc (m/min)	240	280	320
f (mm/rev)	0,08	0,12	0,16
ap (mm)	0,3	0,6	0,9

II.4.2 Choix du plan d'expérience

En raison du nombre élevé des facteurs d'entrés et de sorties à études nous avons adopté dans notre étude un plan d'expérience L9 (3⁴) de Taguchi, le plan de Taguchi L9 est un outil puissant pour concevoir des expériences efficaces, économiques et robustes, particulièrement utile dans le cadre de l'optimisation des processus et de l'amélioration de la qualité, qui simplifier le protocole expérimental et minimiser le coût global de nos essais. Le tableau (II.5) présente le plan d'expérience choisi (plan de Taguchi).

Tableau II.5 Plan de Taguchi L9 (3⁴).

N°	Facteurs d'entrés			
	r	Vc	f	ap
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

II.4.3 Choix des conditions opératoires

Les conditions opératoires choisies liées directement aux objectifs fixés par l'équipe de recherche au niveau du laboratoire (LMS), le tournage intermittent est le contexte choisi qui diffère du tournage continu. L'environnement de coupe à sec est notre choix afin de bien comprendre tous les effets engendrés par ce processus d'usinage, toutes les conditions opératoires sont organisées dans le tableau (II.6).

Tableau II.6 Conditions opératoires.

Elements	Description
Tour	SN40C (6.6 kW)
Matériau usiné	Acier fortement allié (AISI D3)
Environnement de coupe	Sec
Procédure	Tournage Intermittent
Outil de coupe	(CVD) Carbide insert, (Al ₂ O ₃ /TiC /TiNC)
Porte outil	PSBNR 2525M 12 ($\alpha_c = +6^\circ, \gamma = -6^\circ, \lambda = -6^\circ$) de SANDVIK
Paramètres d'entrés	V _c , a _p , f et r
Réponses étudiées	P _m (Watt), C _t (°C), V _B (mm), MRR (mm ³ /s), A _z (m/s ²), L _p (dB), Ra (µm), F _z (N), P _c (Watt)

II.5 Démarche scientifique

Après avoir sélectionné les paramètres de coupe, le plan d'expérience pertinent, ainsi que toutes les conditions opératoires pour l'exécution de nos essais, une démarche scientifique a été établie afin d'aboutir les objectifs visés basé sur :

1. Collection de données : après l'exécution des essais, des mesures expérimentales sont faites pour sept (07) réponses à savoir (Ra), (Fz), (Pm), (V_B), (Ct), (Az), (Lp) et des calculs sont effectués pour les deux paramètres (Pc) et (MRR), les résultats sont collectés et organisés.
2. Analyse des données : Une fois les données collectées, une application des techniques et des approches statistiques appropriées pour analyser les données et évaluer l'impact des facteurs d'entrés sur les performances étudiées telles que l'analyse de variance (ANOVA) et (RSM).
3. Interprétation des résultats : Après avoir analysé les données, il est nécessaire d'interpréter les résultats obtenus. Cela implique de comprendre les effets principaux, les relations et l'impact de chaque paramètre d'entrée sur les sorties.
4. Modélisation : des modèles mathématiques sont établis basés sur des équations statistiques exécutées par les deux logiciels MINITAB et Design expert, à l'objectif de prédire les performances étudiées.
5. Optimisation multi-objective : une optimisation multi-objective a été établie afin de trouver la meilleure formulation des paramètres et un régime optimal des facteurs visés exploitant plusieurs méthodes comme la fonction de désirabilité (DF), analyse de la relation grise (GRA), ...etc.

6. Comparaison des résultats : une comparaison des résultats en fonction des besoin industriels a été faite afin d'extraire le régime le plus pertinent pour chaque objectif de fabrication.
7. Conclusion : Sur la base de l'interprétation des résultats, il est important de formuler une conclusion qui répond à la question de recherche. La conclusion doit être basée sur des preuves et être cohérente avec les résultats obtenus.
8. Discussion des limites et suggestions pour des recherches futures : Il est important de reconnaître les limites de l'étude et de discuter des suggestions pour des recherches futures. Des recommandations pour des améliorations méthodologiques, des domaines de recherche non explorés ou des pistes pour de futures études. En suivant ces étapes, il est possible de mener une recherche solide et fiable dans le domaine du tournage intermittent, en utilisant une démarche scientifique rigoureuse comme illustrée la figure (II.13).

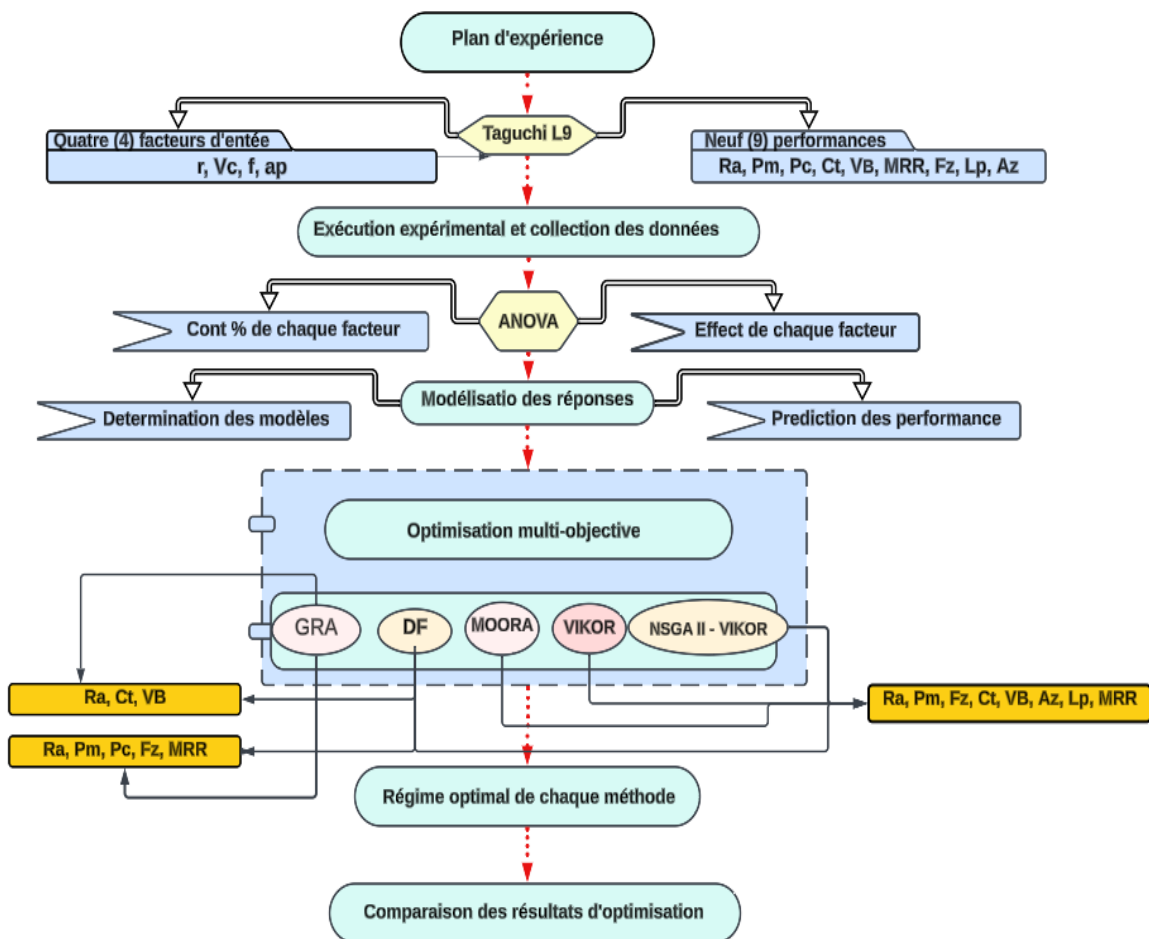


Figure II.13 Organigramme de la démarche scientifique.

II.6 Conclusion

En conclusion de ce chapitre expérimental, nous avons présenté en détail la méthodologie adoptée pour notre étude. À travers une analyse minutieuse des caractéristiques du matériau, de la configuration géométrique de l'éprouvette, des paramètres de coupe, du plan d'expérience, ainsi que des conditions opératoires, nous avons établi un cadre rigoureux pour nos essais. De plus, nous avons souligné l'importance des équipements et des instruments de mesure sélectionnés pour garantir la précision de mesure des performances visées. Nous sommes à présent prêts à analyser les résultats obtenus dans le chapitre suivant, afin de tirer des conclusions éclairées et de répondre aux objectifs de notre recherche.

CHAPITRE III

**Analyse statistique et modélisation du processus
du tournage intermittent**

III.1 Introduction

Ce chapitre est dédié à la présentation des résultats issus de nos expériences, dans le but de mener une analyse statistique visant à quantifier l'influence de chaque paramètre de coupe à savoir : (r), (V_c), (f), et (a_p) sur les performances étudiées suivantes : la qualité de surface représentée par la rugosité arithmétique (R_a), la puissance consommée par le Moteur (P_m), la puissance de la coupe (P_c), l'usure d'outil de coupe (V_B), la température de coupe (C_t), l'effort tangentiel de coupe (F_z), les vibration tangentielle (A_z), l'intensité sonore (L_p), et la productivité représentée par le taux de la matière enlevé (MRR) lors de l'usinage intermittent de l'acier AISI D3. Nous avons adopté une approche méthodique en utilisant la méthode de la surface de réponse (MSR) associée à l'ANOVA pour estimer l'impact relative de chaque paramètre d'entrés sur les résultats des performances. Aussi, Le processus de traitement vise à établir des modèles statistiques prédictifs.

III.2 Analyse et modélisation statistique par la méthode MSR

L'analyse statistique des variables en fonction d'autres variables est une approche fondamentale pour comprendre les relations entre différentes caractéristiques d'un ensemble de données. Cette analyse permet de déterminer comment une variable (la variable dépendante) est influencée par une ou plusieurs autres variables (les variables indépendantes), de détecter des tendances, ou des relations, et d'effectuer des inférences sur une population plus large à partir d'un échantillon donné. Les méthodes d'analyse statistique dépendent de la nature des données et des objectifs de l'analyse [64].

Afin d'évaluer l'influence de chaque facteur de coupe choisis sur divers paramètres technologiques d'usinage intermittent visés, nous avons choisi d'appliquer le plan de Taguchi (L9), comprenant neuf (9) essais en raison du nombre élevé des paramètres étudiés. L'analyse des résultats expérimentaux selon le plan de Taguchi (L9) nous permettra de quantifier la corrélation entre les différentes performances étudiées et les facteurs d'entrée sélectionnés. De plus, ce traitement des données nous permettra d'établir des modèles mathématiques prédictives pour mieux comprendre les relations entre les variables d'entrée et de sortie.

III.2.1 Analyse de la variance (ANOVA)

L'ANOVA constitue une méthode permettant d'interpréter et de classer les résultats issus d'expériences en fonction des facteurs d'entrée choisis, r , V_c , f , et a_p . Cette approche vise à identifier les influences significatives de ces paramètres sur des paramètres de sortie technologiques visés R_a , P_m , P_c , V_B , C_t , F_z , A_z , L_p , et MRR.

Dans le cadre de cette étude, l'ANOVA a été réalisée avec un niveau de signification (α) établi à 0,05, correspondant à un niveau de confiance de 95%. Cela signifie que les conclusions tirées de l'ANOVA sont considérées comme significatives si la probabilité P obtenue à partir du tableau ANOVA est inférieure à (α). Les tableaux ANOVA contiennent les paramètres suivants [65]:

❖ Le degré de liberté (DL)

- DL entre les groupes = $k-1$; (où k est le nombre de groupes ou de niveaux de traitement).

- DL résiduel = N-k (où N est le nombre total d'observations).

❖ Les sommes des carrés (SC) par rapport aux moyennes sont calculées par la formule :

$$SC = \frac{N}{N_f} \sum_{i=1}^{N_f} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (\text{Eq. III.1})$$

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (\text{Eq. III.2})$$

Où :

\bar{y} : la moyenne des réponses.

\bar{y}_i : la réponse moyenne remarquée dans les essais où le facteur (f) tiens son ieme niveau.

N : nombre total d'expériences.

N_f : niveau de chaque facteur f.

❖ Carrés moyens (CM) est calculée en divisant (SC) sur le (DL) par la formule :

$$CM_i = \frac{SC_i}{DL_i} \quad (\text{Eq. III.3})$$

❖ F-value est calculée par la formule :

$$F_i = \frac{CM_i}{CM_e} \quad (\text{Eq. III.4})$$

Avec CM_e : les carrés moyens des erreurs.

❖ P-value est la probabilité (allant de 0 à 1) que les résultats observés dans une étude ont pu se produire par hasard.

✚ Si $P > 0,05$, le facteur n'ayant pas un impact significatif.

✚ Si $P < 0,05$, le facteur ayant un impact significatif.

❖ (Cont. %), Cette partie révèle la proportion de variation totale attribuée à chaque facteur en pourcentage, offrant ainsi une indication précise de leur impact sur le résultat final.

$$\text{Cont \%} = \frac{SC_f}{SC_T} \times 100 \quad (\text{Eq. III.5})$$

III.3 Résultats expérimentaux

Les résultats des réponses étudiées en tournage intermittent (TI) pour l'acier AISI D3, en fonction des différentes conditions opératoires, ont été soigneusement recueillis et structurés dans le tableau (III.1). L'analyse de ces informations révèle une gamme variée de valeurs pour divers paramètres clés. Par exemple, la sortie mesurée (R_a) oscille entre 0,825 et 1,201 μm , illustrant une certaine variabilité dans les qualités de surfaces usinées. De même, le paramètre (F_z) affiche une plage de variation allant de 42,23 à 240,45 N, témoignant des différentes forces appliquées durant les opérations. Le paramètre énergétique (P_m) présente des fluctuations entre 2900 et 4900 Watt, indiquant des niveaux de puissance variables. De même pour l'autre facteur énergétique (P_c) qui varie entre 168,92 et 1282,40 Watt. Plus, le taux d'enlèvement de matière (MRR) montre une variabilité significative, s'étalant de 96 à 768 mm^3/s . Concernant les autres paramètres d'intérêt, la température de coupe (C_t) varie entre 198 et 235 $^\circ\text{C}$, l'usure de l'outil (V_B) varie de 0,064 à 0,074 mm. Par ailleurs, l'accélération tangentielle (A_z) présente une plage de variation s'étendant de 15,01 à 28,50 m/s^2 . Enfin, en ce qui concerne l'intensité sonore généré (L_p), elle varie entre 107,03 et 111,37 dB, soulignant la diversité des conditions opératoires et leurs effets sur les paramètres étudiés. Finalement, la réponse MRR, nous ne l'avons pas incluse dans l'analyse ANOVA ni dans la modélisation, car elle est directement calculée à l'aide d'une formule spécifique (II.1).

Tableau III.1 Résultats expérimentaux selon le plan de Taguchi L9.

N°	Paramètres d'entrée				Réponses								
	r (mm)	Vc (m/min)	f (mm/rev)	ap (mm)	Ra (μm)	V_B (mm)	C_t ($^\circ\text{C}$)	P_m (Watt)	P_c (Watt)	MRR (mm^3/s)	F_z (N)	A_z (m/s^2)	L_p (dB)
1	0,4	240	0,08	0,3	0,867	0,064	198	2900	168,92	96	42,23	20,53	109,18
2	0,4	280	0,12	0,6	1,034	0,070	220	3652	679,89	336	145,69	24,18	109,75
3	0,4	320	0,16	0,9	1,201	0,074	235	4900	1282,40	768	240,45	28,50	111,37
4	1,2	240	0,12	0,9	0,934	0,068	225	3912	623,40	432	155,85	27,19	108,83
5	1,2	280	0,16	0,3	1,060	0,071	223	3804	664,35	224	142,36	18,45	107,68
6	1,2	320	0,08	0,6	0,873	0,070	224	4120	774,67	256	145,25	19,89	110,80
7	1,6	240	0,16	0,6	0,938	0,068	226	3932	712,76	384	178,19	25,55	107,03
8	1,6	280	0,08	0,9	0,825	0,069	228	4355	758,47	336	162,53	25,96	110,92
9	1,6	320	0,12	0,3	0,878	0,072	229	4100	589,97	192	110,62	15,01	109,92

III.4 Analyse des résultats par la méthode MSR

III.4.1 ANOVA pour les réponses de coupe (R_a , C_t , V_B)

- **ANOVA de R_a**

Le tableau (III.2) présente en détail les conclusions tirées de l'analyse ANOVA de la réponse spécifique (R_a). Lorsqu'on se penche sur cette analyse, il devient évident que certains facteurs jouent un rôle prédominant dans la variation de la réponse étudiée. En particulier, le facteur (f) émerge comme un élément majeur, avec une contribution significative représentant 57,86% de la variabilité observée dans (R_a). De manière similaire, le facteur (r) ne doit pas être négligé, car il affiche une influence considérable, contribuant à hauteur de 29,63%. Par ailleurs, bien que le facteur (Vc) n'atteigne pas les mêmes niveaux d'influence que (f) et (r), il reste néanmoins pertinent, contribuant à 6,53% de la variabilité de la réponse. En revanche, le facteur (ap) ne semble pas exercer une influence notable sur (R_a), comme en témoigne sa contribution

Chapitre III Analyse statistique et modélisation du processus du tournage intermittent

relative de 3,46%, le classant ainsi parmi les facteurs non significatifs dans cette analyse spécifique. Les résultats trouvés sont confirmés par d'autres études [66] [11], [67] indiquant que les facteurs (f et r) sont les plus significatifs.

Tableau III.2 ANOVA de Ra.

ANOVA de (Ra)							
Source	DL	SC	Cont %	SC Ajust	CM Ajust	Valeur F	Valeur p
r	1	0,034304	29,63%	0,034304	0,034304	46,96	0,002
Vc	1	0,007562	6,53%	0,007561	0,007561	10,35	0,032
f	1	0,066993	57,86%	0,066993	0,066993	91,7	0,001
ap	1	0,004004	3,46%	0,004004	0,004004	5,48	0,079
Erreur	4	0,002922	2,52%	0,002922	0,000731		
Total	8	0,115784	100,00%				

Pour évaluer l'importance relative et la pertinence statistique des effets normalisés, la figure (III.1) présente un diagramme de Pareto de (Ra). Ce diagramme classe les facteurs de coupe en fonction de leurs valeurs absolues, les disposant dans un ordre décroissant. La ligne de référence du diagramme, positionnée au seuil de signification de 0,05, identifie les effets jugés statistiquement significatifs.

À partir de ces données, il est notable que (f), (r) et (Vc) démontrent une importance statistique. De manière spécifique, (f) se distingue clairement comme l'effet le plus prononcé, illustré par la barre la plus étendue sur le diagramme. À l'opposé, (Vc) est associée à la barre la plus courte. En revanche, l'effet associé à (ap) est considéré comme non significatif, étant positionné au dessous de la ligne de référence.

Terme

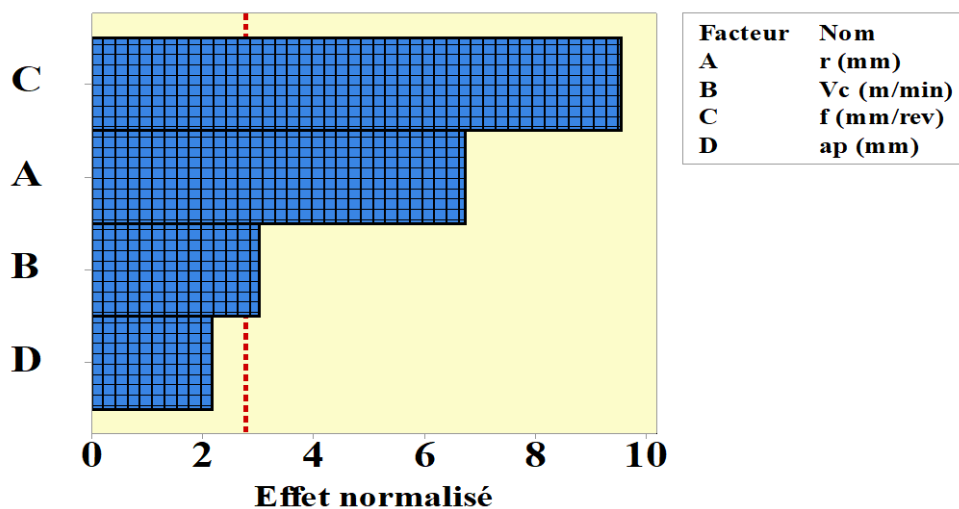


Figure III.1 Diagramme de Pareto des effets normalisés pour (Ra).

La figure (III.2) illustre la droite de Henry affiche clairement que l'effet du (r) est négatif car il est situé au côté gauche du graphique et les effets de (Vc), de (f) et (ap) sont positifs qui se situent au côté droit du graphique.

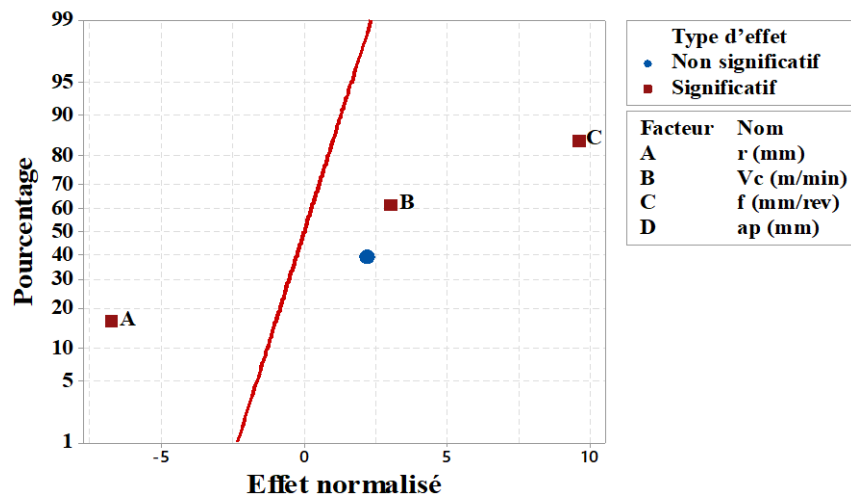


Figure III.2 Droite de Henry des effets normalisés de (Ra).

■ ANOVA de Ct

L'analyse de variance (ANOVA) relative à la température (Ct), présentée dans le tableau (III.3), offre des informations précieuses sur l'impact des différents facteurs d'entrée sur cette variable spécifique. D'emblée, il est clair que tous les facteurs d'entrée examinés dans cette étude présentent une importance statistique, signifiant ainsi leur pertinence dans la détermination de la température (Ct). Parmi ces facteurs, (Vc) se distingue en tant que facteur prédominant, affichant une influence notable avec une contribution de 29,72% à la variation observée de (Ct). Juste derrière lui, le facteur (ap) suit de près, avec une contribution significative de 28,22%, témoignant de son rôle crucial dans la modulation de la température. Ensuite, le facteur (f), bien qu'important, se classe en troisième position en termes d'influence, avec une contribution de 22,59%. En revanche, le facteur (r) présente une influence moindre par rapport aux autres, mais demeure tout de même pertinent, en contribuant à hauteur de 17,98% à la variabilité de la température (Ct). Ces observations soulignent l'importance de chaque facteur dans le contexte de l'analyse, permettant ainsi une compréhension approfondie des mécanismes influençant la température étudiée. Des résultats similaires sont rapportés dans la littérature indiquant que les facteurs (Vc) et (ap) sont les facteurs essentiels responsables de l'accroissement de la température de coupe (Ct) [68-70]

Tableau III.3 ANOVA de Ct.

ANOVA de (Ct)							
Source	DL	SC	Cont %	SC Ajust	CM Ajust	Valeur F	Valeur p
r	1	153,34	17,98%	153,34	153,341	48,24	0,002
Vc	1	253,5	29,72%	253,5	253,5	79,75	0,001
f	1	192,67	22,59%	192,67	192,667	60,61	0,001
ap	1	240,67	28,22%	240,67	240,667	75,72	0,001
Erreur	4	12,71	1,49%	12,71	3,179		
Total	8	852,89	100,00%				

La figure (III.3) montre le diagramme de Pareto. Ce graphique ordonne les facteurs de coupe en se basant sur leurs valeurs absolues, les disposant ainsi en ordre décroissant. En examinant ce diagramme, il est clair que tous les facteurs de coupe présentent une pertinence statistique. Plus précisément, la vitesse de coupe (Vc) et la profondeur de coupe (ap) ressort nettement avec la barre la plus longue sur le graphique. Suivi par (f) et en dernier lieu, (r) qui se caractérise par la barre la plus concise.

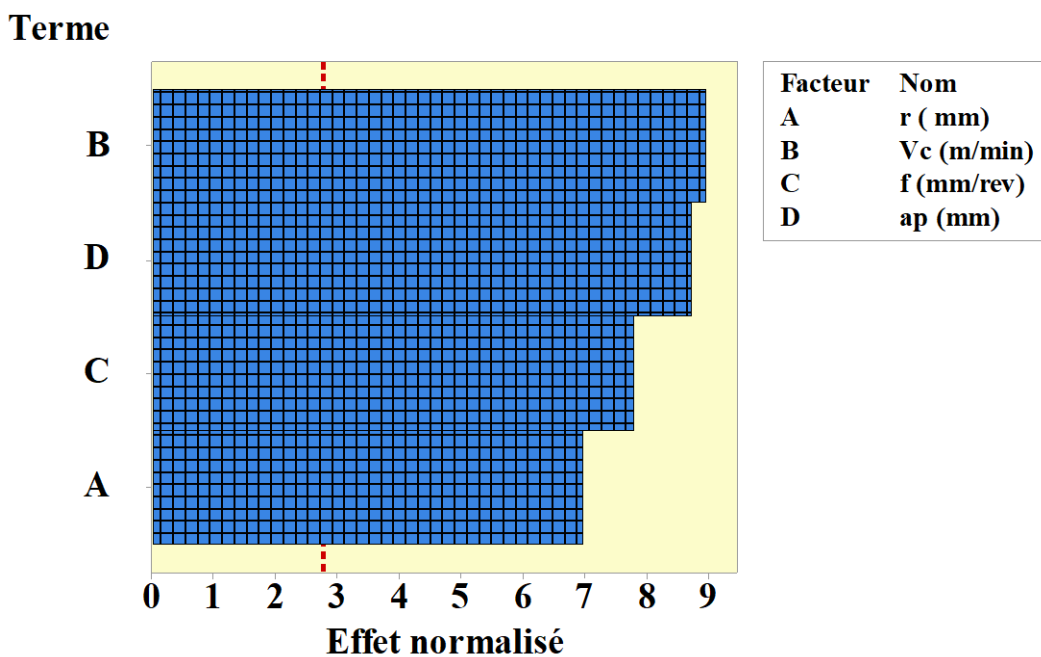


Figure III.3 Diagramme de Pareto des effets normalisés pour (Ct).

La figure (III.4) présente la droite de Henry, mettant en évidence distinctement que les effets liés aux tous les paramètres de coupe sont positifs, étant tous situés du côté droit de cette représentation.

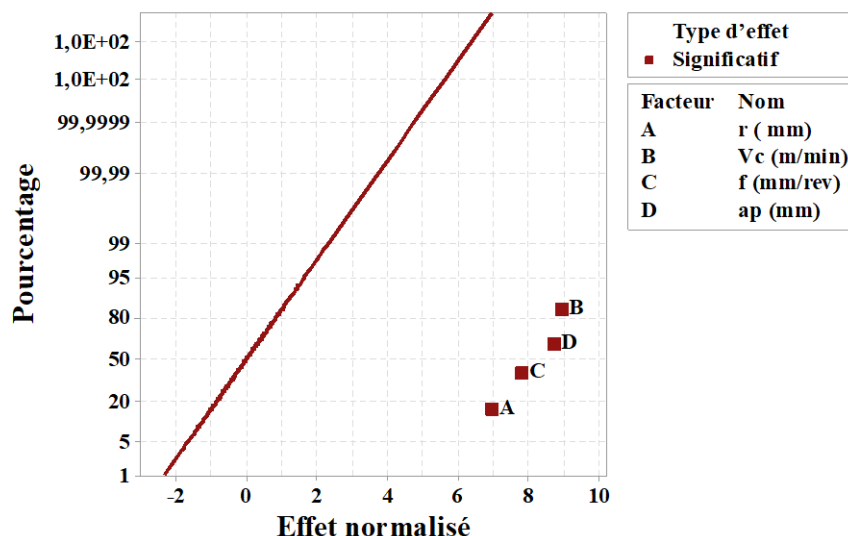


Figure III.4 Droite de Henry des effets normalisés de (Ct).

▪ ANOVA de V_B

L'ANOVA relative à la variable (V_B), mise en évidence dans le tableau (III.4), offre des perspectives intéressantes sur l'importance des différents facteurs étudiés en relation avec cette variable spécifique. Il est manifeste, de cette analyse, que les facteurs (V_c) et (f) se distinguent nettement comme les principaux contributeurs influençant la variable (V_B). Plus précisément, le facteur (V_c) se positionne en tête avec une contribution significative, représentant 66,44% de la variabilité observée de (V_B). De manière similaire, bien que dans une moindre mesure, le facteur (f) conserve une influence notable, contribuant à 25,95% à la variation de (V_B). Toutefois, il est important de noter que d'autres facteurs tels que (r) et (ap) ne parviennent pas à démontrer une influence statistiquement significative sur (V_B) dans le contexte de cette étude. Cela est appuyé par les valeurs de probabilité associées, qui sont respectivement de $p=0,565$ pour (r) et $p=0,083$ pour (ap), suggérant ainsi que ces facteurs ne jouent pas un rôle déterminant dans la modulation de la variable (V_B) dans le cadre de cette analyse spécifique. Ces résultats correspondent parfaitement à ceux de [71],[72].

Tableau III.4 ANOVA de V_B .

ANOVA de (V_B)							
Source	DL	SC	Cont %	SC Ajust	CM Ajust	Valeur F	Valeur p
r	1	0	0,31%	0	0	0,39	0,565
V_c	1	0,000043	66,44%	0,000043	0,000043	84,33	0,001
f	1	0,000017	25,95%	0,000017	0,000017	32,94	0,005
ap	1	0,000003	4,15%	0,000003	0,000003	5,27	0,083
Erreur	4	0,000002	3,15%	0,000002	0,000001		
Total	8	0,000064	100,00%				

D'après le diagramme de Pareto présenté dans la figure (III.5), il est clair que (V_c) et (f) affichent une importance statistique notable. Plus précisément, (V_c) se démarque nettement

comme l'effet le plus marqué, comme le montre la barre la plus longue sur le diagramme, elle est suivie par (f). En revanche, les effets associés à (ap) et (r) sont considérés comme négligeables, car ils se trouvent en dessous de la ligne de référence.

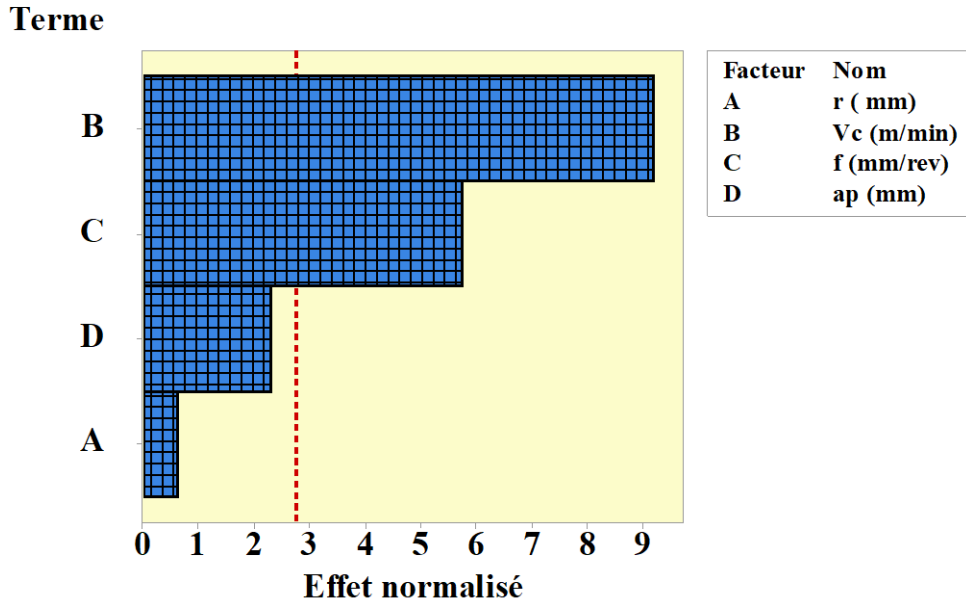


Figure III.5 Diagramme de Pareto des effets normalisés pour (V_B).

La figure (III.6) illustre clairement la droite de Henry, indiquant que tous les effets associés aux paramètres de coupe sont positifs, puisqu'ils se trouvent tous du côté droit de cette représentation.

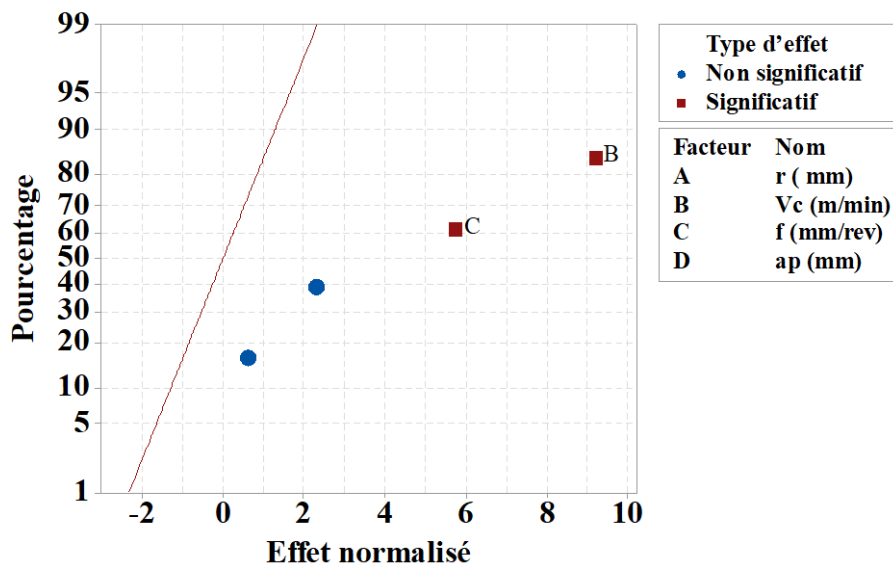
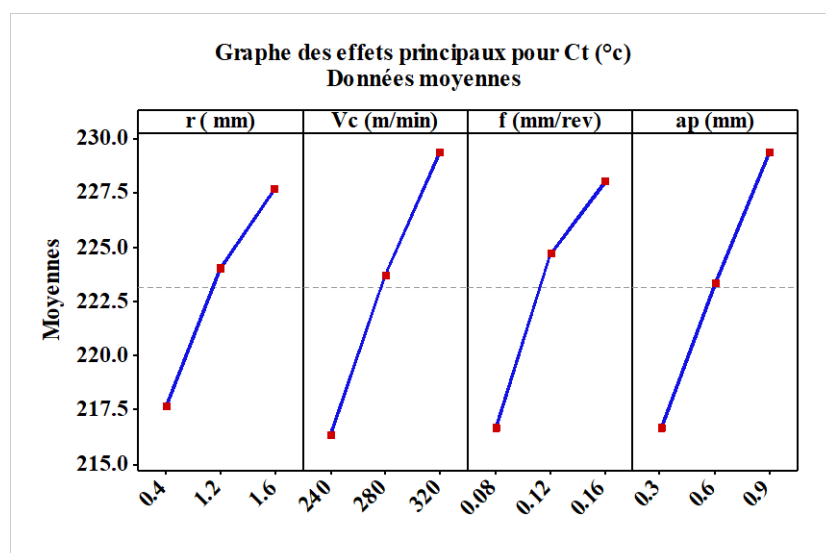
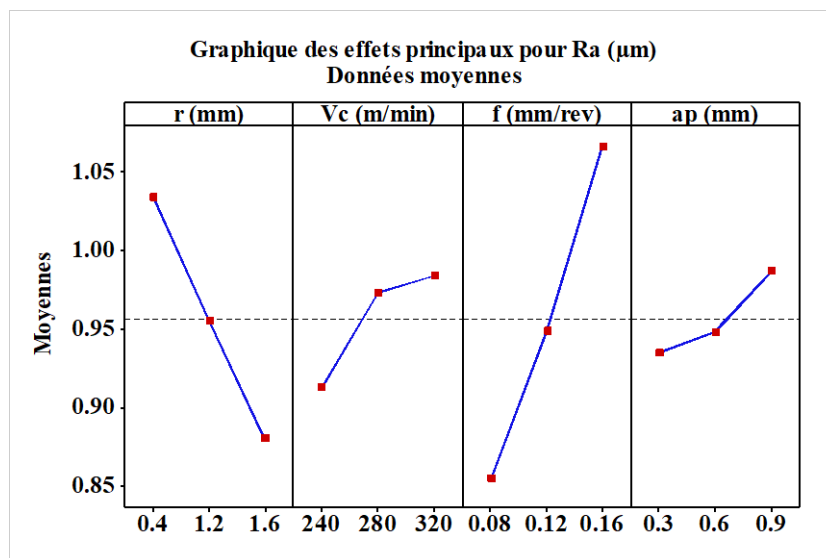


Figure III.6 Droite de Henry des effets normalisés de (V_B).

III.4.2 Graphes des effets principaux (Ra, Ct, V_B)

La figure (III.7) met en évidence graphiquement les effets principaux des paramètres de sortie, à savoir (Ra), (Ct) et (V_B), tout en tenant compte des fluctuations des facteurs d'entrée tels que (r), (Vc), (f) et (ap). Une observation attentive de cette représentation graphique permet de déduire que le facteur affichant la pente la plus prononcée détient la plus grande influence sur le paramètre de sortie analysé. En d'autres termes, la raideur ou l'inclinaison du graphique pour chaque facteur d'entrée sert de mesure visuelle de son impact relatif sur la réponse correspondante. Ainsi, en identifiant le facteur associé à la pente la plus marquée, on peut déterminer de manière concluante son rôle prédominant ou sa contribution significative à la variation du paramètre étudié. Cette visualisation graphique offre donc un moyen efficace d'évaluer et de comparer l'importance relative de chaque facteur d'entrée par rapport aux paramètres de sortie considérés.



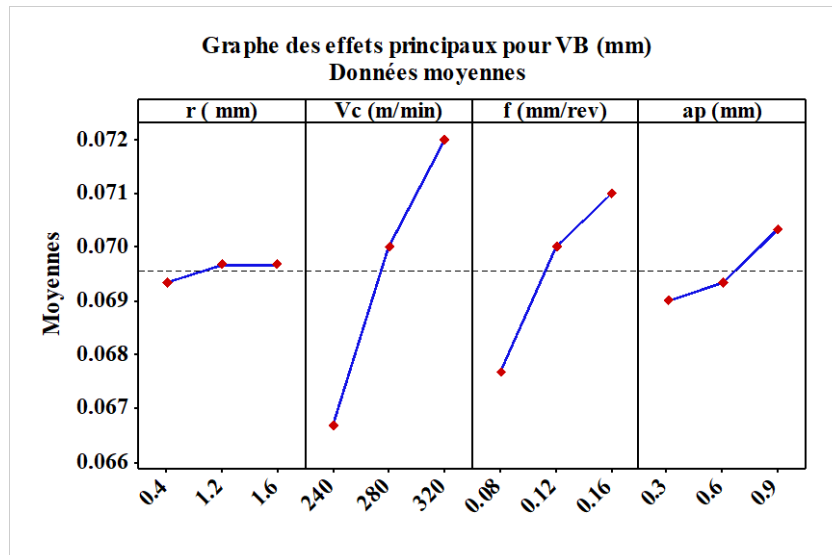


Figure III.7 Graphes des effets principaux des réponses (Ra), (Ct), et (VB).

III.4.3 ANOVA pour les réponses de coupe (Pm, Pc)

▪ ANOVA de Pm

D'après l'ANOVA portant sur la puissance consommée par le moteur, notée (Pm) et représentée dans le tableau (III.5), il apparaît que l'ensemble des facteurs d'entrée étudiés détiennent une importance statistique manifeste. En scrutant de plus près ces résultats, deux facteurs se distinguent nettement par leur influence prédominante sur (Pm). En premier lieu, le facteur (Vc) émerge comme un contributeur majeur, détenant une cont% significative s'élevant à 40,37%. De manière presque équivalente, le facteur (ap) suit de très près, avec une contribution substantielle de 39,93%, soulignant ainsi son rôle crucial dans la détermination de la puissance consommée par le moteur. Par ailleurs, bien que leur impact soit moindre en comparaison, les facteurs (f) et (r) ne doivent pas être négligés. Ils affichent respectivement des contributions de 11,37% et 5,79%, attestant ainsi de leur pertinence relative dans cette étude. Les résultats obtenus concordent avec ceux présentés par R. Kumar et al [73] et de C. Camposeco-Negrete [29].

▪ ANOVA de Pc

L'ANOVA relative à la puissance de coupe, notée (Pc) et exposée dans le tableau (III.5), il ressort des informations significatives concernant l'impact des différents facteurs d'entrée. Plusieurs observations méritent d'être soulignées. Premièrement, les facteurs (Vc), (f) et (ap) se distinguent nettement en termes d'influence sur (Pc). Le facteur (ap) prend la tête avec une contribution notable de 39,50%, suivi de près par le facteur (Vc) qui détient une cont% de 33,45%. De son côté, le facteur (f) ne reste pas en marge, affichant une influence significative avec une cont% de 23,51%. Toutefois, il est essentiel de noter qu'une des variables d'entrée, à savoir le facteur (r), ne semble pas jouer un rôle déterminant dans cette étude. En effet, sa contribution s'avère minime, se chiffrant à seulement 0,15%. Une étude comparable de Safi et al. [74], G. Rechar. [75], ont indiqué que les facteurs (Vc et ap) sont les premiers facteurs responsables sur l'accroissement de (Pc).

Tableau III.5 ANOVA de Pm et Pc.

Source	DL	SC	Cont %	SC Ajust	CM Ajust	Valeur F	Valeur p
ANOVA de (Pm)							
r	1	134979	5,79%	134979	134979	9,14	0,039
Vc	1	940896	40,37%	940896	940896	63,73	0,001
f	1	265020	11,37%	265020	265020	17,95	0,013
ap	1	930628	39,93%	930628	930628	63,04	0,001
Erreur	4	59053	2,53%	59053	14763		
Total	8	2330577	100,00%				
ANOVA de (Pc)							
r	1	966	0,15%	966	966	0,18	0,697
Vc	1	217345	33,45%	217345	217345	39,47	0,003
f	1	152784	23,51%	152784	152784	27,75	0,006
ap	1	256694	39,50%	256694	256694	46,62	0,002
Erreur	4	22026	3,39%	22026	5507		
Total	8	649815	100,00%				

Les graphiques sous dessous (figure III.8) montrent les diagrammes de Pareto pour (Pm) et (Pc). L'examen de ces graphiques révèle que tous les facteurs ont une importance significative pour la réponse (Pm). Cependant, pour la réponse (Pc), le facteur (r) n'est pas significatif. De plus, parmi les facteurs, (Vc) et (ap) se distinguent comme étant les plus influents pour ces réponses, comme le suggèrent leurs barres les plus longues.

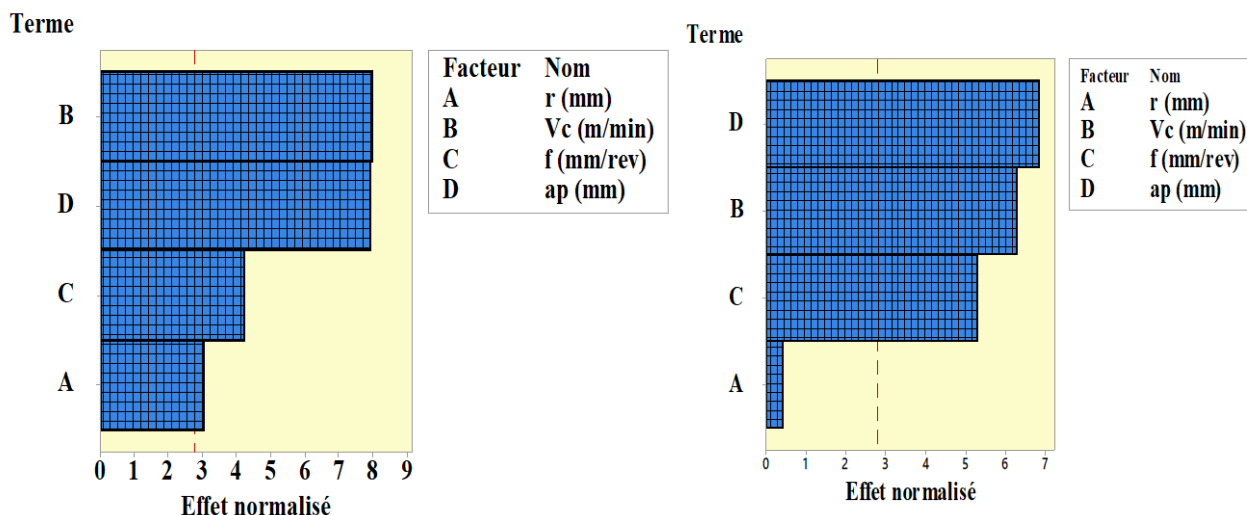


Figure III.8 Diagramme de Pareto des effets normalisés pour (Pm) et (Pc).

La figure (III.9) présente la droite de Henry, montrant que tous les effets liés aux paramètres de coupe sont positifs, étant donné qu'ils sont tous positionnés sur le côté droit de cette illustration, que ce soit pour la réponse (Pm) ou (Pc).

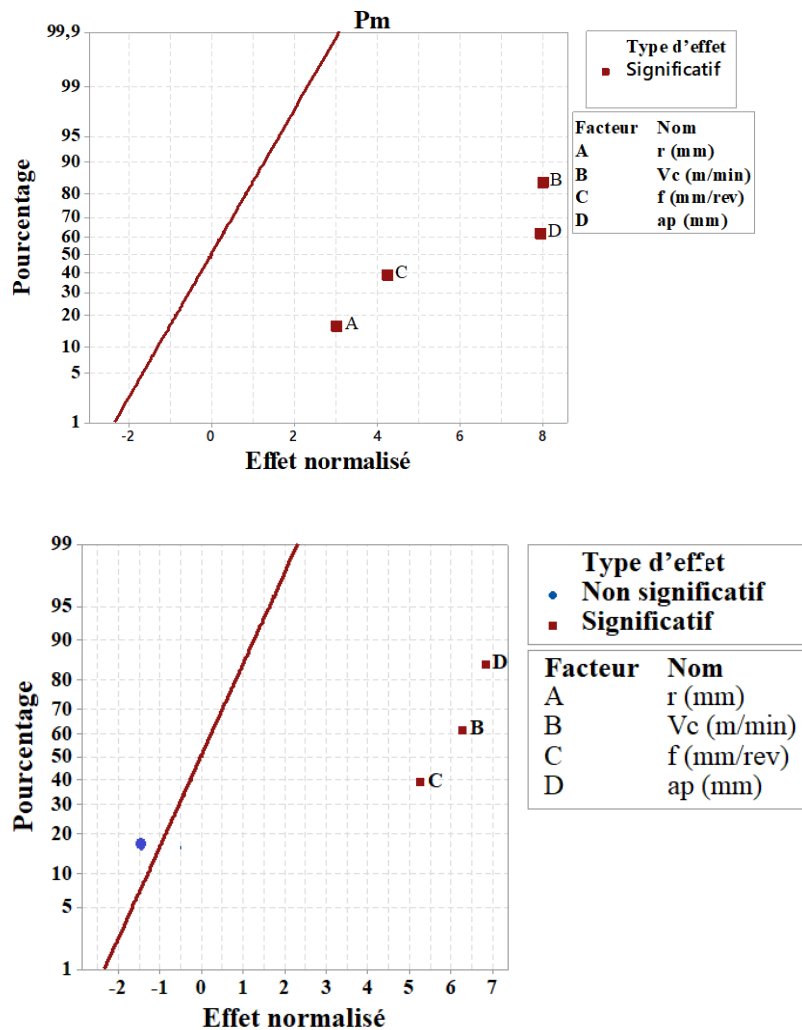


Figure III.9 Droite de Henry des effets normalisés de (Pm) et (Pc).

III.4.4 Graphes des effets principaux (Pm, Pc)

La figure (III.10) offre une représentation visuelle détaillée des effets principaux associés aux paramètres de sortie, (Pm) et (Pc), en fonction des variations des facteurs d'entrée identifiés précédemment : (r), (Vc), (f) et (ap). En observant attentivement ces graphiques, un élément clé émerge : la pente de chaque courbe associée à un facteur d'entrée donne une indication directe de son influence sur le paramètre de sortie correspondant. En d'autres termes, plus la pente d'une courbe est prononcée, plus le facteur d'entrée correspondant exerce une influence significative sur le paramètre de sortie étudié. La figure (6) offre une perspective essentielle pour comprendre la dynamique et les interactions entre les variables d'entrée et de sortie dans le contexte de cette étude en tournage intermittent de l'acier AISI D3.

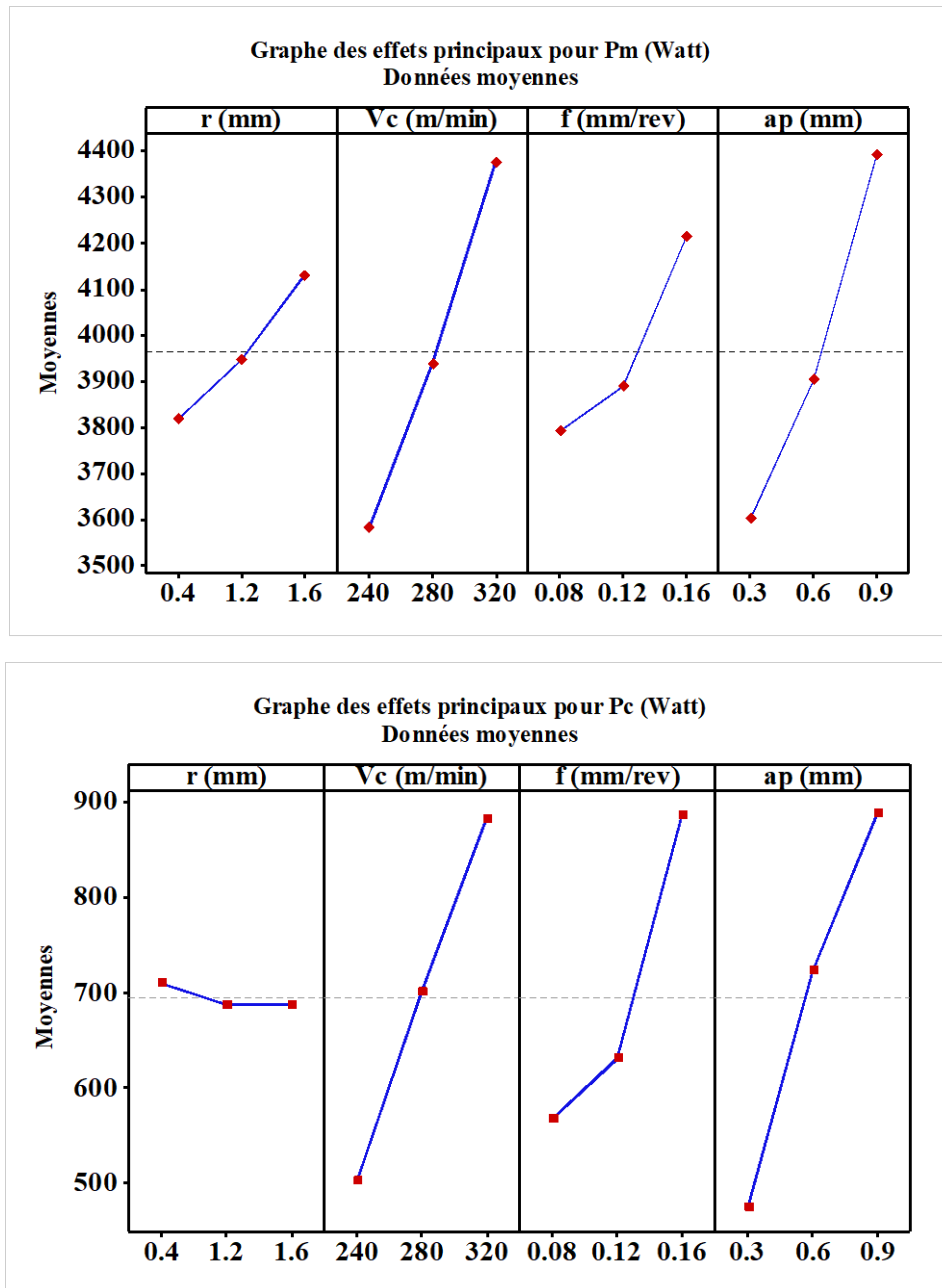


Figure III.10 Graphes des effets principaux des réponses (Pm) et (Pc).

III.4.5 ANOVA pour les réponses de coupe (Fz, Az, Lp)

- ANOVA de Fz

D'après l'ANOVA relative à la réponse (Fz), dont les détails sont consignés dans le tableau (III.6), il est possible de discerner les facteurs d'entrée ayant une influence prédominante sur cette variable spécifique. Une analyse approfondie révèle que les facteurs (ap) et (f) se démarquent nettement comme étant les principaux contributeurs influençant la réponse (Fz). Plus précisément, le facteur (ap) se positionne en tête, exerçant une influence significative avec une cont% impressionnante de 51,82%. Juste derrière, le facteur (f) maintient une influence notable, contribuant à hauteur de 33,19% à la variation observée de (Fz). Ensuite, bien que son impact soit moindre par rapport aux deux précédents, le facteur (Vc) conserve néanmoins une

Chapitre III Analyse statistique et modélisation du processus du tournage intermittent

certain importance, affichant une cont% de 10,75%. Toutefois, il convient de souligner que le facteur (r) ne semble pas jouer un rôle décisif dans cette étude, comme en témoigne son insuffisance statistique avec un niveau de signification (P) supérieur à 0,05. Des résultats similaires ont été reportés par M. kuntoglu et al. [72], G. zheng et al.[76], F. Gong et al. [46], X.B. Cui et al. [77] indiquant que l'accroissement des deux facteurs (ap et f) provoque l'augmentation de l'effort (Fz).

Tableau III.6 ANOVA Fz.

Source	DL	SC	Cont %	SC Ajust	CM Ajust	Valeur F	Valeur p
r	1	90,8	0,41%	90,8	90,8	0,42	0,551
Vc	1	2402,0	10,75%	2402,0	2402,0	11,21	0,029
f	1	7419,5	33,19%	7419,5	7419,5	34,63	0,004
ap	1	11582,6	51,82%	11582,6	11582,6	54,07	0,002
Erreur	4	856,9	3,83%	856,9	214,2		
Total	8	22351,8	100,00%				

Dans la figure (III.11), nous avons un diagramme de Pareto qui nous offre des informations intéressantes. En examinant ce graphique, on constate que les entrés de coupe (ap), (f) et (Vc) jouent des rôles importants. Notamment, le facteur (ap) se démarque comme étant le plus influent. Cependant, le facteur (r) ne semble pas avoir d'effet significatif, car il se situe en dessous de la ligne de référence.

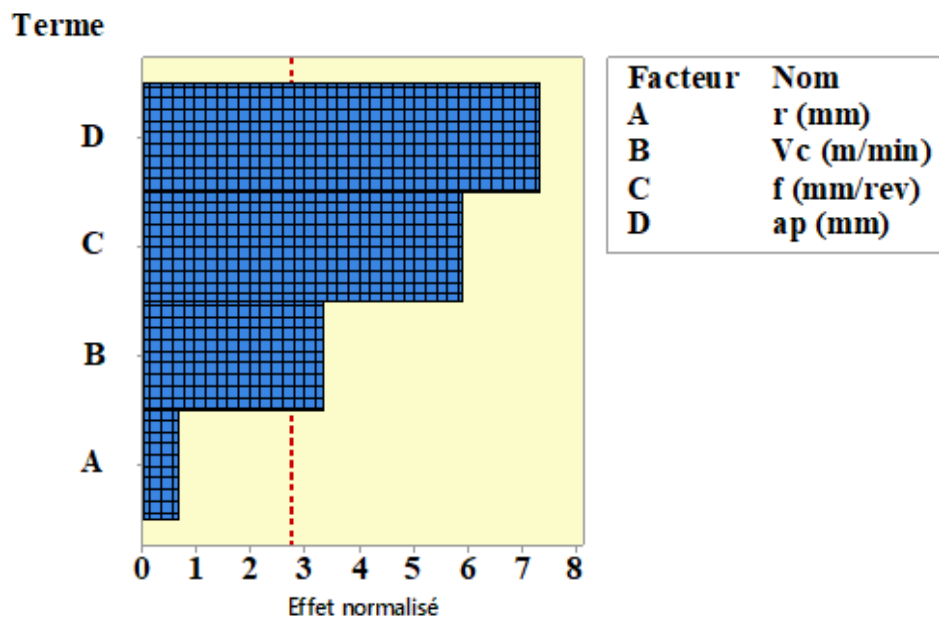


Figure III.11 Diagramme de Pareto des effets normalisés pour (Fz).

Dans la figure (III.12), on peut observer la droite de Henry. On remarque que tous les impacts associés aux paramètres de coupe sont orientés positivement. Notant que le facteur (r) est non significatif.

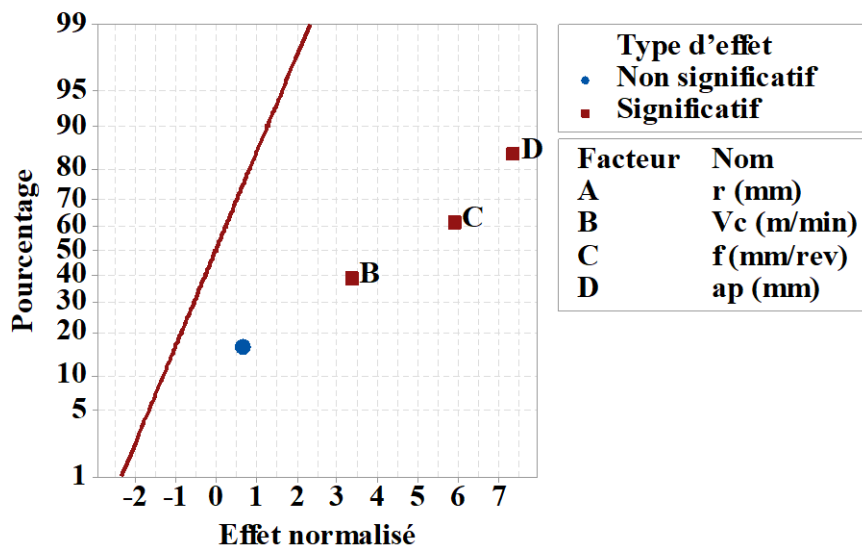


Figure III.12 Droite de Henry des effets normalisés de (Fz).

▪ **ANOVA de Az**

L'analyse ANOVA portant sur la vibration tangentielle de l'outil, (Az) représentée dans le tableau (III.7), dévoile des informations intéressantes. Il apparaît clairement que le facteur (ap) se positionne en tête de facteurs avec une contribution significative de 74,07%. Cette valeur met en évidence l'importance et l'influence prédominante de ce facteur spécifique dans le contexte étudié. Toutefois, il est à noter que les facteurs (Vc), (r) et (f), malgré leur présence, n'affichent pas une pertinence statistiquement significative dans cette étude particulière. Ces résultats sont cohérents avec ceux de A, Sahinoglu et al [78], Z, Hessainia [79], et V. Wayal [80].

Tableau III.7 ANOVA de Az.

Source	DL	SC	Cont %	SC Ajust	CM Ajust	Valeur F	Valeur p
r	1	9,388	5,71%	9,388	9,388	3,48	0,136
Vc	1	16,218	9,87%	16,218	16,218	6,01	0,07
f	1	6,227	3,79%	6,227	6,227	2,31	0,0203
ap	1	121,732	74,07%	121,732	121,732	45,13	0,003
Erreur	4	10,789	6,56%	10,789	2,697		
Total	8	164,354	100,00%				

Dans la figure (III.13), le diagramme de Pareto nous révèle des informations précieuses. L'observation attentive indique que le facteur de coupe (ap) est prédominant. En revanche, les facteurs (Vc), (f) et (r) ne semblent pas avoir d'impact majeur, car ils se trouvent en dessous de la ligne de référence.

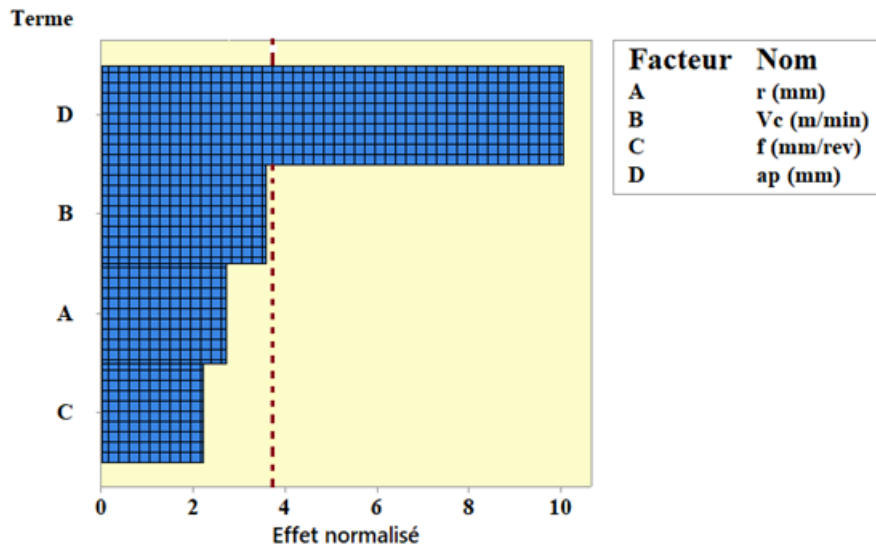


Figure III.13 Diagramme de Pareto des effets normalisés pour (Az).

La figure (III.14), illustre la droite de Henry. Il est clair que les facteurs (ap) et (f) montrent une orientation positive. Cependant, il est important de noter que les facteurs (r) et (Vc) affichent une tendance négative, étant positionnés à gauche de la référence et ne semblent pas avoir une importance significative.

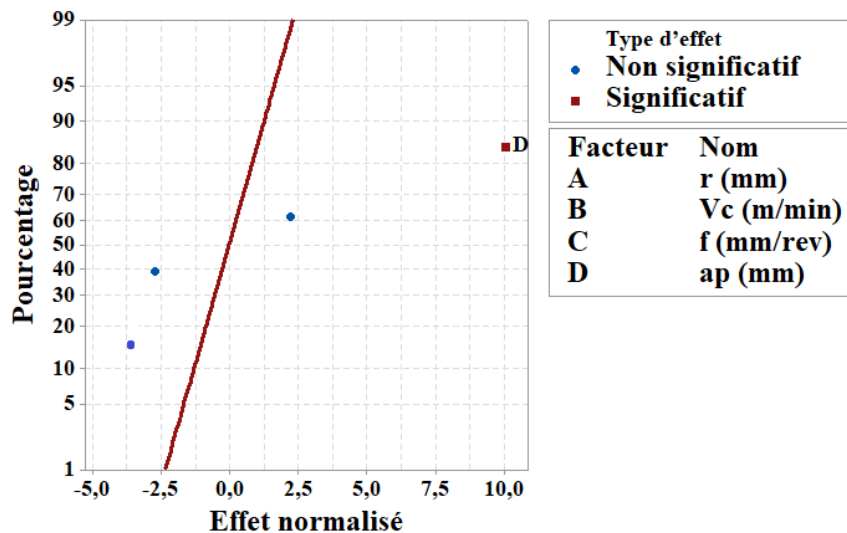


Figure III.14 Droite de Henry des effets normalisés de (Az).

▪ ANOVA de Lp

Selon l'ANOVA concernant l'intensité sonore, notée (Lp) et présentée de manière détaillée dans le tableau (III.8), divers facteurs d'entrée ont été évalués quant à leur impact sur cette variable spécifique. Une inspection approfondie de ces données révèle clairement une hiérarchie dans l'influence des facteurs. En tête de liste, le facteur (Vc) se démarque nettement avec une cont% significative, représentant 47,64% de la variation observée de l'intensité sonore (Lp). Juste après, les entrés (f) et (ap) suivent avec des contributions respectives de 22,28% et

Chapitre III Analyse statistique et modélisation du processus du tournage intermittent

18,01%, soulignant ainsi leur rôle substantiel dans la modulation de (L_p). Cependant, même si sa contribution est moindre par rapport aux autres facteurs, le facteur (r) ne doit pas être totalement négligé. En effet, malgré son absence de significativité majeure, il maintient une certaine influence avec une cont% mesurée à 7,32%, les résultats sont en accord avec ce de D,Carou et al [47].

Tableau III.8 ANOVA de L_p .

Source	DL	SC	Cont %	SC Ajust	CM Ajust	Valeur F	Valeur p
r	1	1,2748	7,32%	1,2748	1,2748	6,18	0,068
Vc	1	8,2916	47,64%	8,2916	8,2916	40,19	0,003
f	1	3,8784	22,28%	3,8784	3,8784	18,8	0,012
ap	1	3,1348	18,01%	3,1348	3,1348	15,19	0,018
Erreur	4	0,8253	4,74%	0,8253	0,2063		
Total	8	17,4048	100,00%				

Dans la figure (III.15), présenté le diagramme de Pareto pour la réponse (L_p). En examinant ce graphique, on découvre que tous les paramètres de coupe jouent un rôle important. Notamment, il est clair que la vitesse de coupe (V_c), se distingue comme étant le facteur le plus crucial parmi eux.

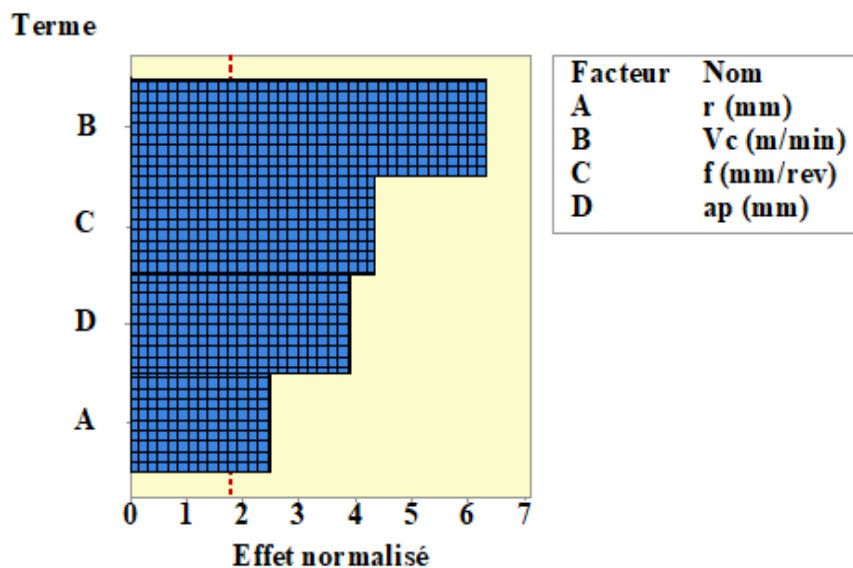


Figure III.15 Diagramme de Pareto des effets normalisés pour (L_p).

La figure (III.16), montre la droite de Henry pour la réponse (L_p), on peut déduire quelques éléments intéressants. Deux des facteurs (V_c) et (ap) se trouvent du côté positif, tandis que les deux autres (r) et (f) sont du côté négatif, étant situés à gauche de la ligne de référence.

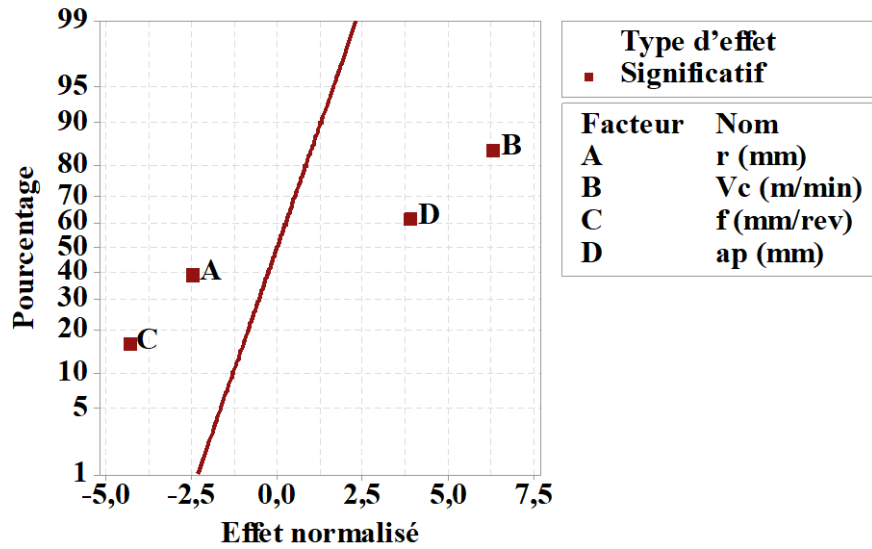
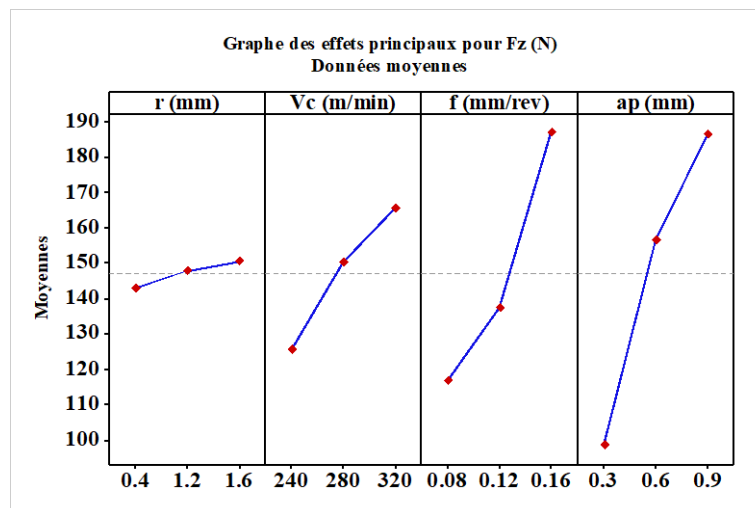


Figure III.16 Droite de Henry des effets normalisés de (Lp).

III.4.6 Graphes des effets principaux (Fz, Az, Lp)

La figure (III.17) offre une visualisation des effets principaux des paramètres de performance, notamment (Fz), (Az), et (Lp), en relation avec les variations des facteurs d'entrée identifiés comme (r), (Vc), (f), et (ap). Une analyse détaillée des pentes des courbes révèle que le facteur (ap) présente une influence significative et notable sur les paramètres (Fz) et (Az). En revanche, l'influence du facteur (Vc) se distingue particulièrement sur la variable (Lp).



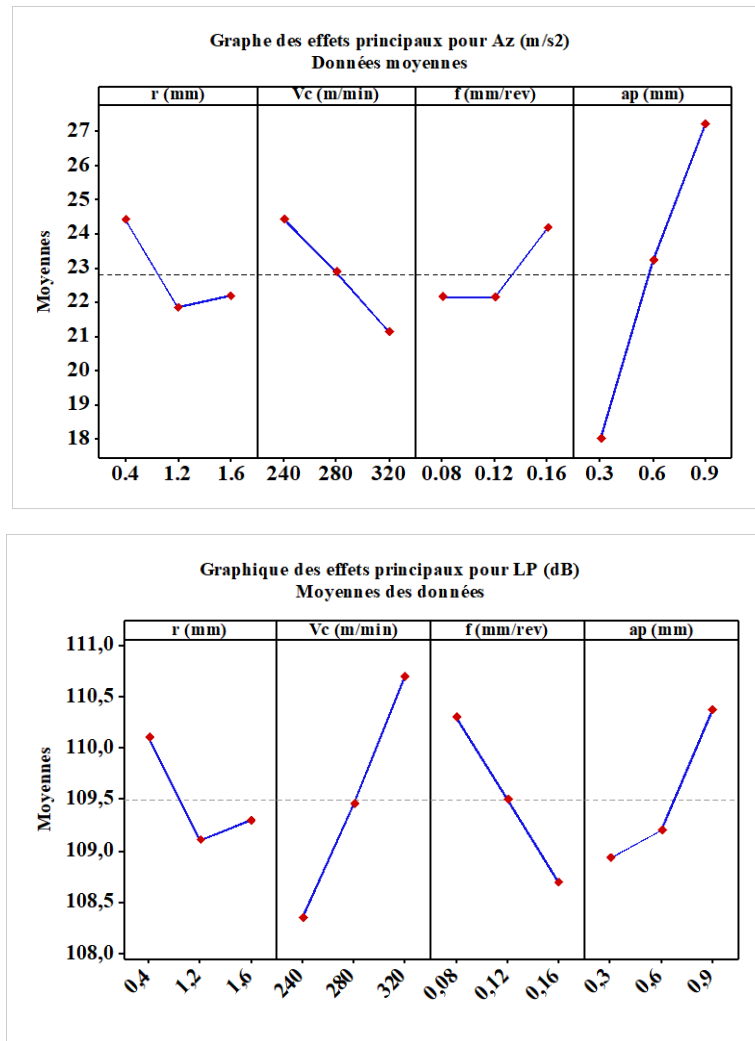


Figure III.17 Graphes des effets principaux des réponses (Fz) (Az) et (Pc).

III.5 Modélisations des réponses de coupe

Le fondement de la méthodologie (MSR) repose sur la capacité à modéliser de manière adéquate les données issues d'expérimentations [81]. Le plan expérimental spécifiquement choisi est conçu pour évaluer non seulement les effets linéaires, mais aussi les effets quadratiques, ainsi que les interactions entre les variables étudiées. Dans cette approche, nous avons opté pour l'application d'un modèle mathématique de nature linéaire [82]. Ce modèle spécifique est structuré de la manière suivante [83] :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (\text{Eq. III.6})$$

Où :

- Y : est la réponse ou la variable de sortie.
- β_0 : est l'intercept de la ligne de régression.
- $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$: sont les coefficients des variables d'entrée x_1, x_2, \dots, x_k respectivement.
- x_1, x_2, \dots, x_k : représentent les variables d'entrée.

- ε : est l'erreur résiduelle ou le terme d'erreur.
- ❖ Les formules de régression sont dérivées à l'aide du logiciel statistique Minitab 2018. Les modèles proposés mettent en évidence la corrélation statistique entre les variables d'entrée choisies r , V_c , f , et ap avec les réponses visées à savoir, R_a , P_m , P_c , V_B , C_t , F_z , A_z , et L_p , offrant ainsi la capacité de prédire les résultats de futures expérimentations. La pertinence statistique du modèle de régression, ainsi que l'adéquation globale du modèle dépendent d'un coefficient de corrélation (R^2).
- ❖ Le coefficient de détermination (R^2) est une mesure statistique qui représente la proportion de la variance de la réponse expliquée par les facteurs dans un modèle de régression. Il indique à quel point les paramètres sont capables d'expliquer la variabilité de la réponse mesurée. Le coefficient R^2 est mesuré par la formule :

$$R^2 = \frac{\sum(y_i - \bar{y})^2}{\sum(\bar{y}_i - \bar{y})^2} \quad (\text{Eq. III.7})$$

✚ $R^2=1$: Cela signifie que 100 % de la variabilité de la réponse est expliquée par le modèle. C'est le meilleur scénario.

✚ $R^2=0$: Cela n'indique qu'aucune des variations de la réponse n'est expliquée par le modèle.

III.5.1 Modèles proposés

a. La rugosité de surface :

$$R_a = 0,4715 - 0,1238 r + 8,88 \times 10^4 V_c + 2,642 f + 00861 ap \quad (\text{Eq. III.8})$$

Avec un coefficient de corrélation ($R^2=97,48$)

b. La température de coupe :

$$C_t = 139,12 + 8,27 r + 0,1625 V_c + 141,7 f + 21,11 ap \quad (\text{Eq. III.9})$$

Avec un coefficient de corrélation ($R^2=98,51$)

c. L'usure d'outil de coupe :

$$V_B = 0,04424 + 2,98 \times 10^4 r + 6,7 \times 10^5 V_c + 0,04167 f + 2,222 ap \quad (\text{Eq. III.10})$$

Avec un coefficient de corrélation ($R^2=96,85$)

d. La puissance du moteur :

$$P_m = -488 + 245,5 r + 9,90 V_c + 5254 f + 1313 ap \quad (\text{Eq. III.11})$$

Avec un coefficient de corrélation ($R^2=97,47$)

e. La puissance de la coupe :

$$P_c = -1508 - 20,8 r + 4,758 V_c + 3989 f + 689 ap \quad (\text{Eq. III.12})$$

Avec un coefficient de corrélation ($R^2=96,61$)

f. L'effort tangentiel

$$F_z = -193,2 + 6,37 r + 0,500 V_c + 879 f + 146,5 ap \quad (\text{Eq. III.13})$$

Avec un coefficient de corrélation ($R^2=96,1$)

g. La vibration tangentielle :

$$A_z = 25,42 - 2,047 r - 0,041 V_c + 25,468 f + 7,514 ap \quad (\text{Eq. III.14})$$

Avec un coefficient de corrélation ($R^2=96,34$)

h. L'intensité sonore :

$$L_p = 103,33 - 0,75439 r + 0,02938 V_c - 20,099 f + 1,08 ap \quad (\text{Eq. III.15})$$

Avec un coefficient de corrélation ($R^2=92,28$)

Chapitre III Analyse statistique et modélisation du processus du tournage intermittent

Les équations Eq (IV.8) à (Eq IV.14) ont été exploitées afin de tracer les surfaces de réponse (3D) pour les paramètres de réponses étudiés, en prenant en compte les deux paramètres d'entrée les plus influant (**figure III.18**).

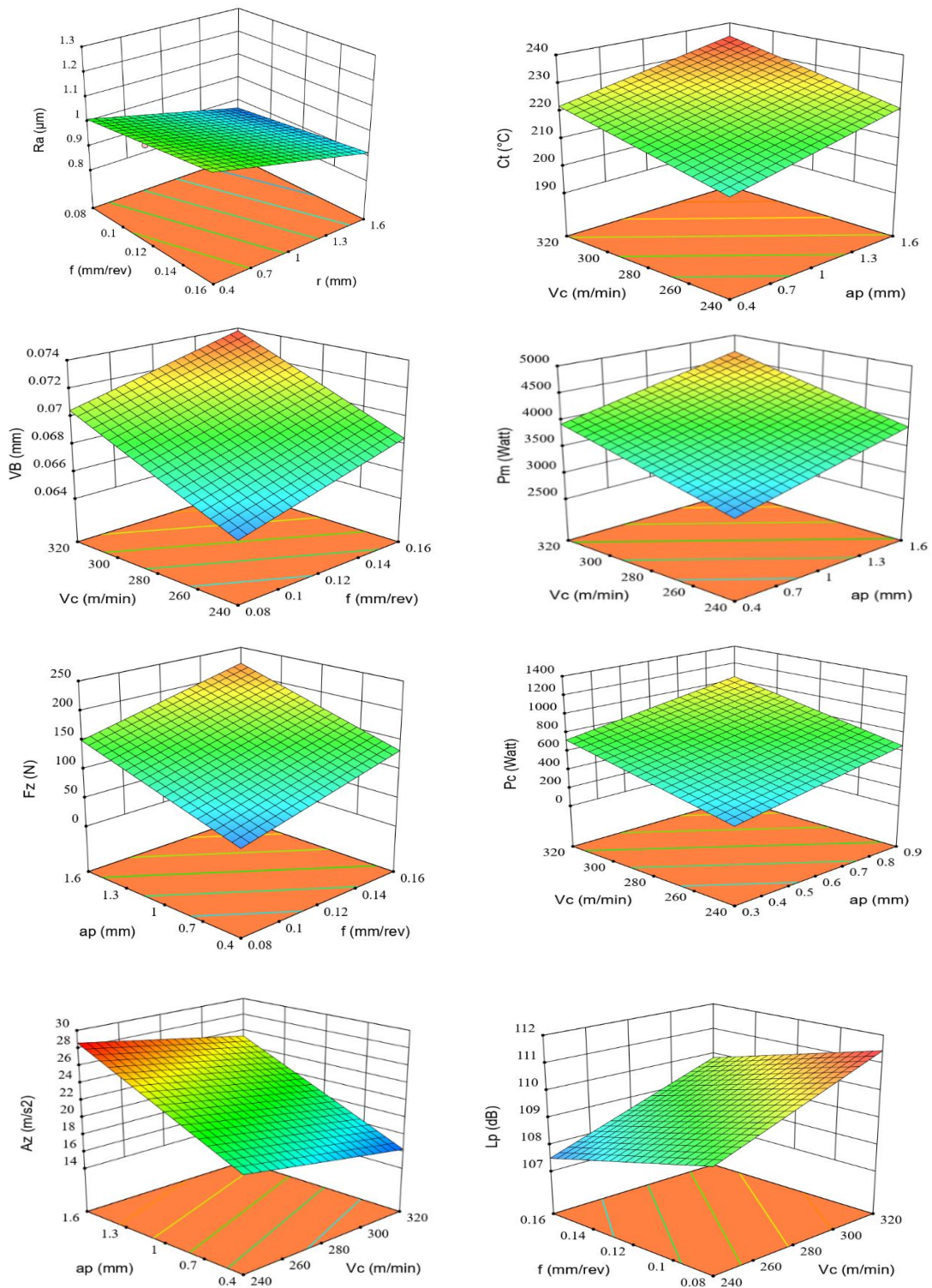


Figure III.18 Graphes (3D) des performances étudiées.

III.5.2 Diagnostic de validation de Modèles

Le diagnostic de la validité des modèles proposés par la méthode (SR) est une étape cruciale dans le processus d'optimisation et de validation. Cette méthode vise à modéliser et à analyser la relation entre les variables d'entrée et la réponse d'intérêt tout en explorant l'espace de conception. Lors de l'élaboration de ces modèles, plusieurs aspects doivent être soigneusement évalués. En somme, un diagnostic rigoureux des modèles de surface de réponse garantit leur fiabilité, leur précision et leur applicabilité dans des conditions réelles [84].

III.5.2.1 Examen de la distribution normale des résidus

Les résidus permettent d'évaluer la qualité de l'ajustement du modèle. Idéalement, les résidus devraient être petits, indiquant que le modèle prévoit correctement les données observées [85].

- **Examen de Ra, V_B, et Ct**

La figure (III.19) présente les plans normaux des résiduels de la réponse (Ra), (V_B) et (Ct). Le plan de (Ra) révèle une tendance linéaire générale des résidus, indiquant une certaine normalité de la distribution. Cependant, une légère déviation est observée à l'extrémité. Concernant le plan normal des résiduels de la réponse (V_B) il est important de noter que la majorité des résidus suit une distribution normale, renforçant ainsi la validité des résultats du modèle. Des légères déviations sont observées au centre et à l'extrémité. Ensuite la lecture du plan normal des résidus de la réponse (Ct) donne l'information que la distribution est normalisée qui suit la droite, cependant une simple déviation à l'extrémité. On conclue la distribution des résidus des trois réponses indique que les trois modèles offrent la possibilité de prédire les réponses correctement avec précision notable.

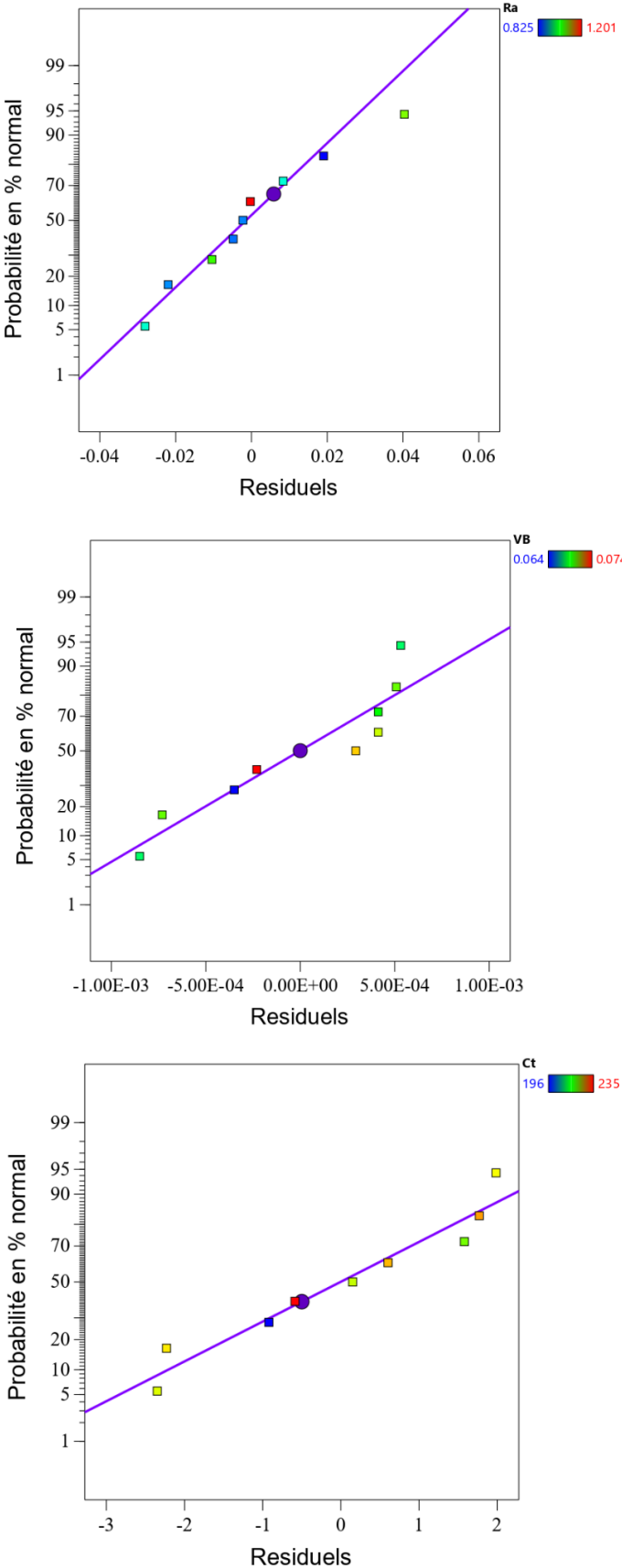


Figure III.19 Plan normal des résiduels de la réponse (Ra), (VB), et (Ct).

Examen de Pm et Pc

La figure (III.20) illustre les plans normaux des distributions des résiduels des deux réponses de la consommation de la puissance que ce soit du moteur (Pm) ou de coupe (Pc). La lecture du plan normal de (Pm) montre que la totalité des résidus suit une orientation linéaire malgré qu'il y a une déviation légère à l'extrémité. La même information proposée par le plan de (Pc) avec une simple déviation au centre de plus. L'examen de la distribution des résidus confirme que les modèles garantissent une fiabilité pour prévoir les deux réponses.

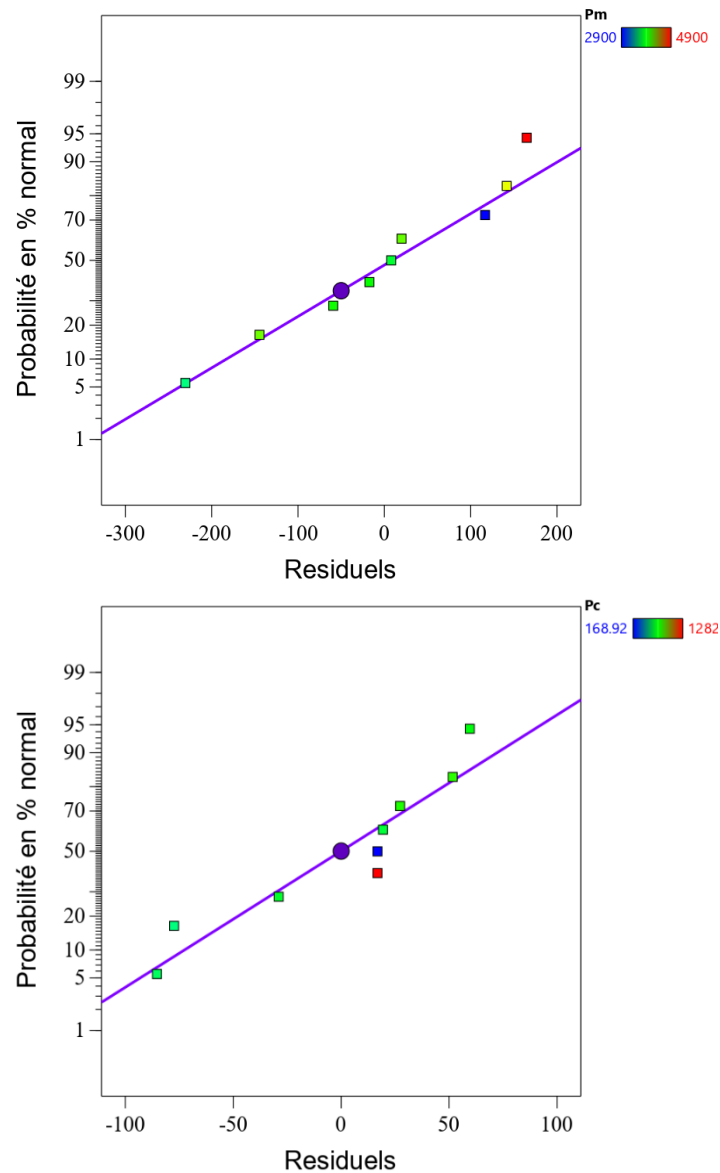


Figure III.20 Plan normal des résiduels de la réponse (Pm), et (Pc).

▪ Examen de Fz, Az, et Lp

La figure (III.21) présente les plans normaux des résiduels de la réponse (Fz), (Az) et (Lp). Les trois plans démontrent des tendances linéaires, indiquant une normalité de la distribution. Cependant, une légère déviation est considérée aux extrémités pour la réponse (Fz). Concernant le plan normal des résiduels de la réponse (Az) il est important de noter qu'il y a simple dispersion au début de la ligne normale. Une légère déviation est observée à l'extrémité du plan normal de la réponse (Lp). L'analyse de la distribution des résidus pour les trois réponses conduit à conclure les trois modèles sont applicables et capables de prédire les réponses de manière fiable.

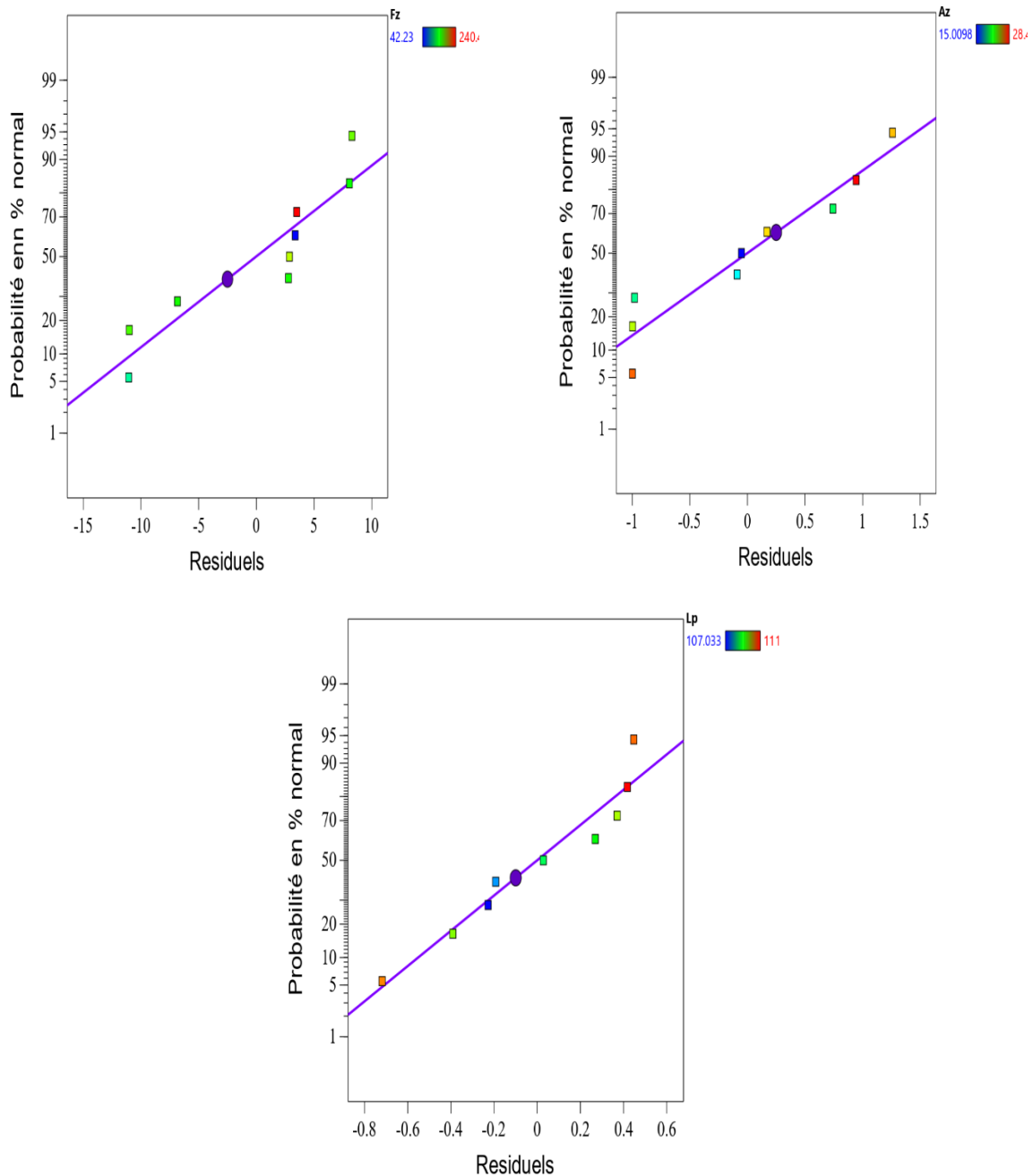


Figure III.21 Plan normal des résiduels de la réponse (Fz), (Az) et (Lp).

III.5.2.2 Evaluation de l'homoscédasticité

- Pour les réponses (Ra), (VB), et (Ct)

La figure (III.22) présente le plan de distribution des résidus par rapport aux valeurs prédites. Il est clair que la dispersion régulière des points autour de la ligne horizontale zéro. Ce qui montre une homoscédasticité, indiquant que la variance des résidus reste persévérante sur la totalité de la plage des valeurs prédites.

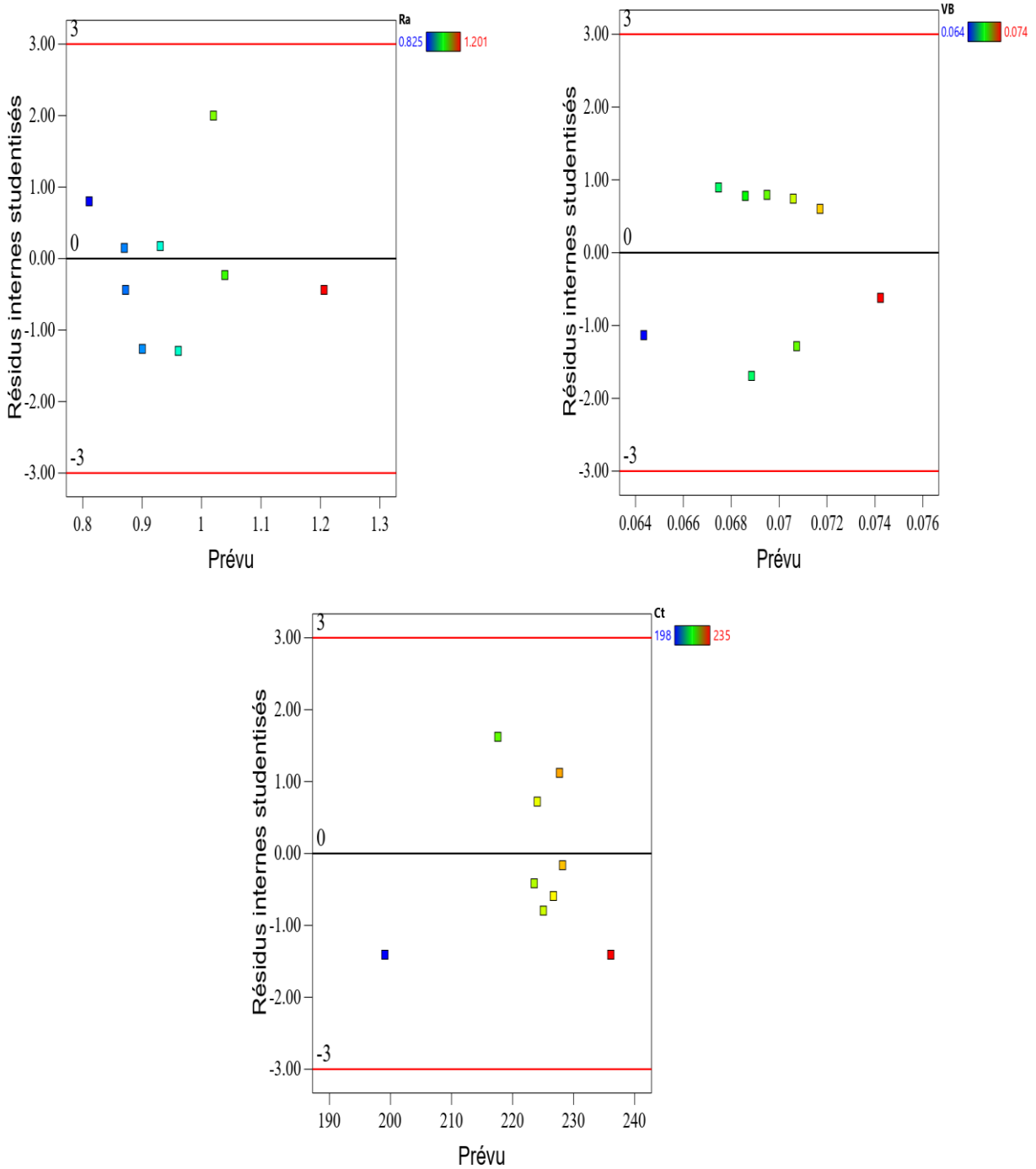


Figure III.22 Plan de distribution des résiduels par rapport aux prédites pour (Ra), (VB), et (Ct).

▪ Pour les réponses (Pm), et (Pc)

La figure (III.23) illustre le graphe des résidus par rapport aux valeurs prédites des réponses (Pm) et (Pc). Il est évident qu'il y a une dispersion homogène des points autour de la ligne horizontale zéro. Cela suggère que la variance des résidus reste constante sur l'ensemble de la plage des valeurs prédites. Qui présente une bonne adéquation du modèle.

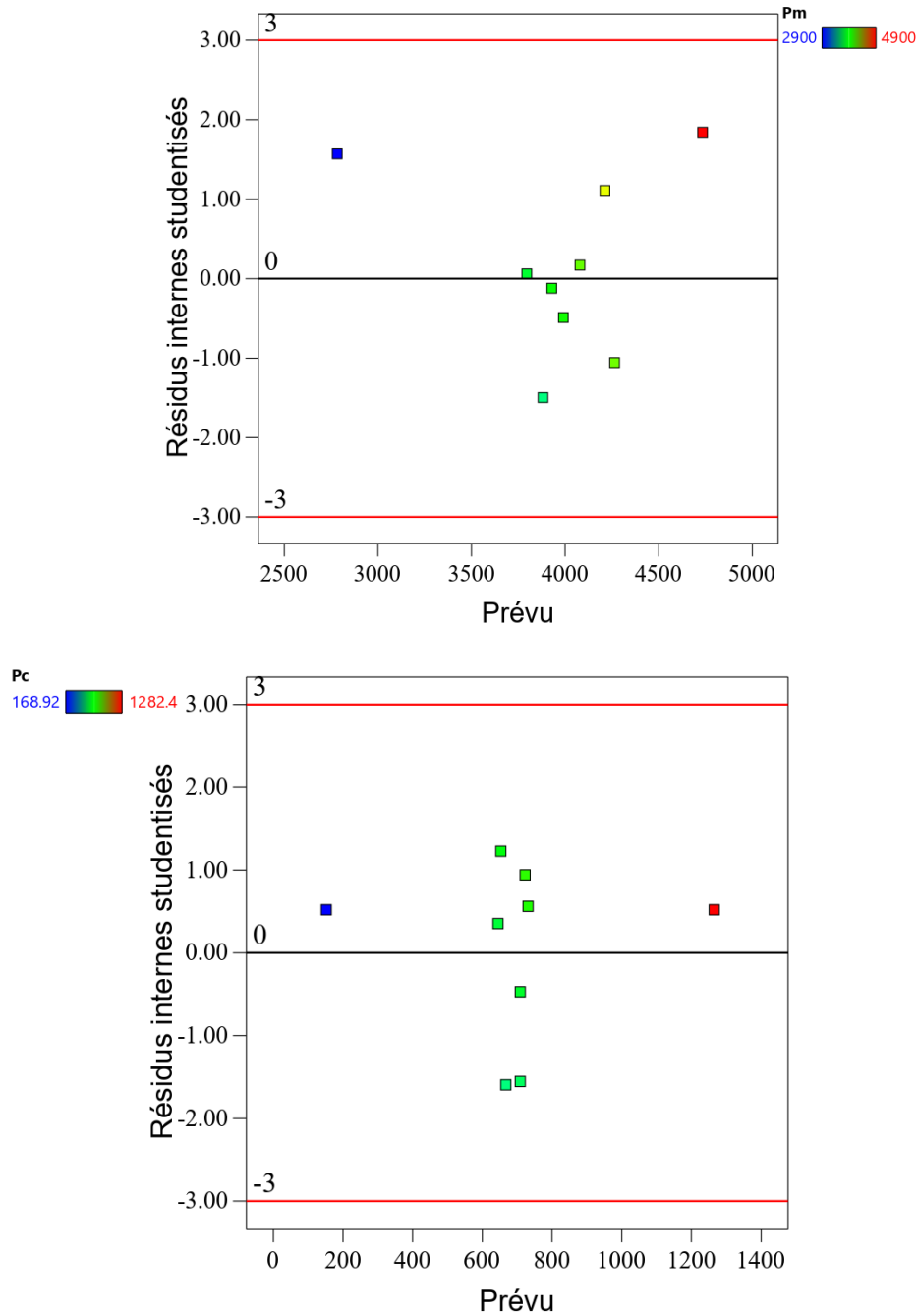


Figure III.23 Plan de distribution des résiduels par rapport aux prédites pour (Pm) et (Pc).

▪ Pour les réponses (Fz), (Az), et (Lp)

Une lecture de la figure (III.24) qui présente le graphe de distribution des résidus par rapport aux valeurs prédites des réponses (Fz), (Az), et (Lp) montre que les points sont uniformément distribués autour de la ligne horizontale zéro. Ce qui indique une homoscedasticité, et que la variation des résidus est constante pour la totalité des valeurs prédites.

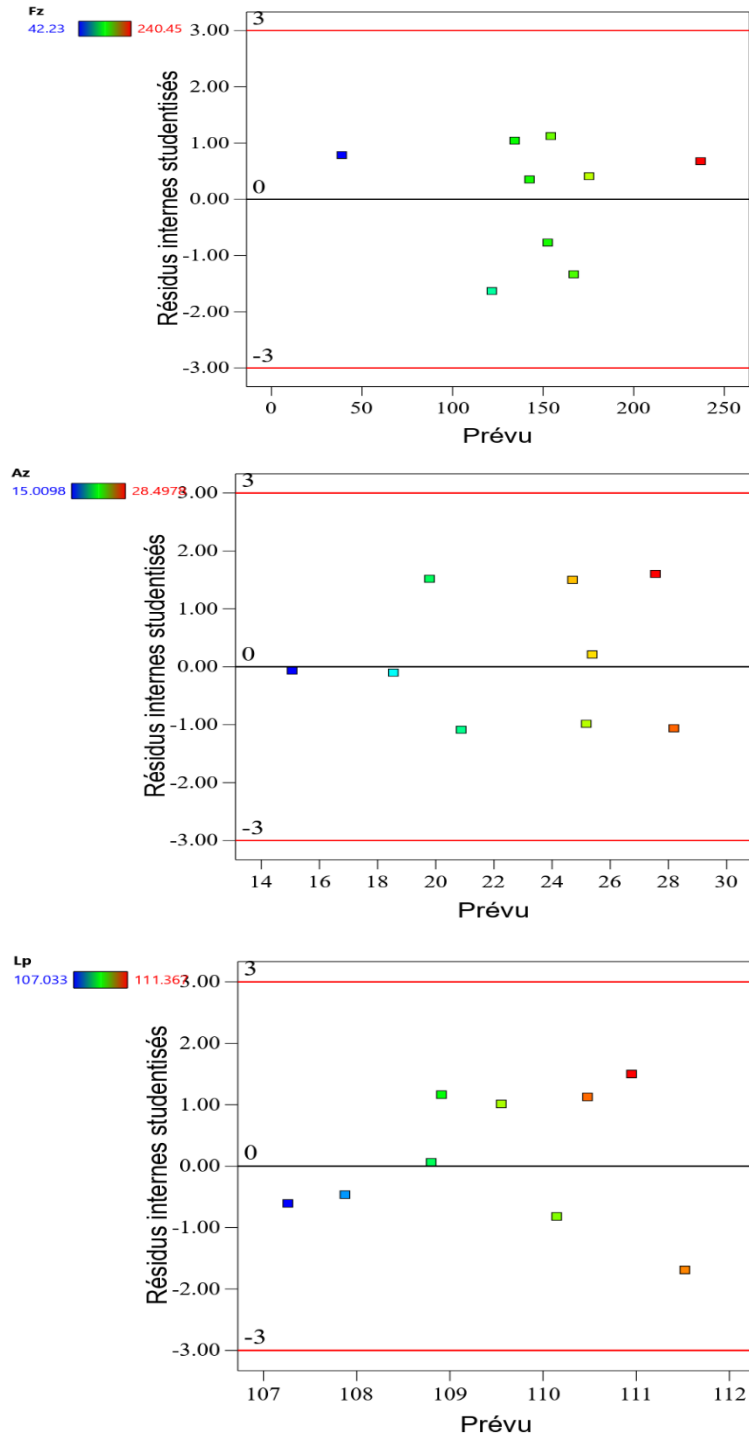


Figure III.24 Plan de distribution des résiduels par rapport aux prédites pour (Fz), (Az) et (Lp).

III.6 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'explorer les résultats obtenus de nos expériences via une analyse statistique approfondie. L'exploitation de la méthode de la surface de réponse (MSR) en parallèle avec l'ANOVA nous a donné la possibilité d'évaluer l'influence de chaque paramètre de coupe sur les performances technologiques visées. Les modèles statistiques prédictifs ainsi fournis permettant de prédire avec précision les facteurs technologiques recherchés ce qui signifie que les modèles sont fiables et applicables. Cette approche méthodique renforce notre capacité à optimiser les facteurs de coupe pour atteindre les performances souhaitées.

CHAPITRE IV

Optimisation des paramètres de performance

IV.1 Introduction

Ce chapitre représente une étape fondamentale dans notre étude, il est consacré à l'optimisation des paramètres de coupe à travers l'utilisation de plusieurs approches statistiques. Cette section vise à explorer diverses méthodologies statistiques pour déterminer la meilleure combinaison des paramètres choisis (r , V_c , f , ap) qui optimise les performances technologiques recherchées à savoir : R_a , P_m , P_c , V_B , C_t , F_z , A_z , L_p , MRR .

Cette analyse d'optimisation repose sur l'exploitation de plusieurs approches statistiques, telles que DF, GRA, MOORA, VIKOR, NSGAI couplé avec VIKOR, où chacune de ces dernières apporte sa contribution à la recherche des conditions idéales de coupe. L'objectif est de faire une optimisation multi objective de toutes les performances pour garantir des opérations plus efficaces et des résultats optimaux. Cette démarche renforce notre engagement envers une approche scientifique rigoureuse dans la quête de l'excellence opérationnelle industrielle.

IV.2 Optimisation multi objective

L'optimisation multi-objective est largement utilisée dans de nombreux domaines, notamment en ingénierie, en planification urbaine, en finance, en gestion de l'environnement, en biologie, et en informatique [86]. Elle permet aux décideurs de prendre des décisions éclairées en prenant en compte plusieurs objectifs simultanément [87]. Dans notre cas et en raison du nombre élevé de paramètres étudiés (entrés et sortie) et afin de proposer une solution optimale qui optimise les paramètres de performance, une optimisation multi-objective des facteurs de sortie est demandée. À cet effet, des méthodes d'optimisation sont exploitées et comparées. (DF), (GRA), (MOORA), (VIKOR) et (NSGA II).

IV.2.1 Méthode de la fonction de désirabilité (DF)

La fonction de désirabilité (DF) est une approche d'optimisation qui vise à trouver la combinaison optimale des paramètres d'un système en évaluant simultanément plusieurs critères. Elle permet de transformer des objectifs multiples, souvent contradictoires, en une seule fonction globale de désirabilité [88]. L'objectif de cette approche est d'intégrer plusieurs critères pour trouver une solution qui satisfait au mieux l'ensemble des objectifs. Pour faciliter la prise de décision une condensation des informations en une seule mesure globale, simplifiant ainsi la prise de décision [89]. Par l'équilibrage de critères on prend en compte la pondération relative des critères pour équilibrer les objectifs contradictoires. La méthode d'exécution passe par :

- a) **Identification des Objectifs** : Définir clairement les objectifs du processus et les critères à optimiser.
- b) **Attribution des Poids** : Assigner des poids relatifs à chaque critère en fonction de son importance.
- c) **Normalisation des Critères** : Mettre à l'échelle les valeurs des critères pour les rendre comparables.
- d) **Fonction de Désirabilité** : Créer une fonction de désirabilité qui combine les critères pondérés pour représenter la qualité globale.
- e) **Optimisation** : Utiliser des méthodes d'optimisation (par exemple, méthodes numériques, algorithmes génétiques) pour trouver les valeurs des paramètres qui maximisent ou minimisent la fonction de désirabilité.

- f) **Validation** : Vérifier la validité des résultats obtenus en les comparant aux valeurs cibles ou aux normes établies.
- g) **Analyse de Sensibilité** : Évaluer la sensibilité des résultats aux variations des poids attribués aux critères.

La méthode de la fonction de désirabilité offre une approche systématique et robuste pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes en prenant en compte la diversité des objectifs du système. Elle facilite la recherche de solutions qui équilibrent de manière efficace des critères multiples et parfois contradictoires. Aussi, la (DF) est exploitée en raison de son efficacité, simplicité et sa possibilité d'offrir aux fabricants plusieurs solutions afin de choisir les paramètres de coupe optimaux. Les équations expliquent la démarche de la (DF) [90] :

$$Des(y) = \begin{cases} 0 & y < low \\ \left(\frac{y-low}{Tar-low}\right)^w & low \leq y \leq Tar \\ 1 & y > Tar \end{cases} \quad (\text{Eq. IV.1})$$

$$Des(y) = \begin{cases} 0 & y < Tar \\ \left(\frac{Up-y}{Up-Tar}\right)^w & Tar \leq y \leq Up \\ 1 & y > Up \end{cases} \quad (\text{Eq. IV.2})$$

$$Des_{comb} = (Des_1 \times Des_2 \times \dots \times Des_i \times \dots \times Des_n)^{\frac{1}{n}} = \left(\prod_{i=1}^n Des_i\right)^{\frac{1}{n}} \quad (\text{Eq. IV.3})$$

L'approche (DF) a été exploitée dans trois cas d'optimisations. Le premier cas, concernant les variables (Ra, V_B et Ct), le deuxième cas concernant les performances (Ra, Pm, Pc, Fz, et MRR) et troisième cas est un cas général qui comprend toutes les performances étudiées dans notre étude (Ra, Pm, V_B, Ct, Fz, Az, Lp, et MRR).

IV.2.1.1 Graphes 3D et les rampes de la fonction de désirabilité

Les graphes 3D de la fonction de désirabilité sont des représentations visuelles tridimensionnelles qui illustrent comment la désirabilité de la réponse varie en fonction des niveaux des différents facteurs d'entrée. Ces graphiques permettent de visualiser la surface de réponse dans un espace tridimensionnel, montrant comment la performance du système change en fonction des combinaisons de paramètres. Ils sont utiles pour comprendre les interactions entre les variables et pour identifier les conditions optimales qui maximisent la désirabilité de la réponse. Cette vue holistique facilite la compréhension des relations entre les paramètres choisis. Les régions où la désirabilité est maximale sont clairement identifiables dans l'espace 3D. Cela permet une localisation précise des combinaisons de paramètres d'entrées qui conduisent aux performances les plus souhaitées dans le premier. Les rampes de la fonction de désirabilité peuvent être visualisées comme des lignes qui montrent les trajectoires des facteurs optimaux où la fonction de désirabilité est maximale. Ces graphiques sont essentiels pour comprendre les interactions complexes entre les variables et pour déterminer les conditions optimales pour maximiser la performance du système.

IV.2.1.2 Cas des performances (Ra, V_B, Ct)

Dans le premier cas étudié, trois scénarios sont proposés. La minimisation de (Ra) comme objective principal, avec une importance de (5). Le deuxième scénario vise à minimiser (Ra) et (V_B) en même temps, tout en attribuant le paramètre (Ct) une importance de (1). Finalement, le troisième scénario d'optimisation considère les trois paramètres de sortie (Ra, Ct et V_B) simultanément avec la même importance de (5). Dans le tableau (IV.1), sont consignés les contraintes d'optimisation, les objectifs souhaités ainsi que l'importance choisie pour les paramètres de sortie, qui varie de (1) à (5) selon les scénarios étudiés.

Le tableau (IV.2) présente les premières solutions proposées par l'approche (DF) comprenant la meilleure configuration des facteurs de coupe ainsi les performances optimales liées à cette configuration pour les trois scénarios examinés.

Tableau IV.1 Contraintes d'optimisation et importances.

Paramètres (P)		Valeurs des paramètres (V)		Objectifs	Poids		Importance		
		Inf	Sup		(V)Inf	(V)Sup	1 ^{er} cas	2 ^{eme} cas	3 ^{eme} cas
Entrées	r	0,4	1,6	$Inf \leq V \leq Sup$	1	1	3	3	3
	Vc	240	320		1	1	3	3	3
	f	0,08	0,16		1	1	3	3	3
	ap	0,3	0,9		1	1	3	3	3
Sorties	Ra	0,825	1,201	Minimiser	1	1	5	5	5
	Ct	198	235		1	1	1	1	5
	V _B	0,064	0,074		1	1	1	5	5

Tableau IV.2 Solutions proposées par la (DF) selon les trois scénarios étudiés.

	Facteurs d'entrée				Paramètres de performance			Désirabilité
	r	Vc	f	ap	Ra	Ct	V _B	
1 ^{er} scén	0,781	240	0,08	0,3	0,825	202,25	0,064	0,976
2 ^{eme} scén	0,782	240	0,08	0,3	0,825	202,267	0,064	0,967
3 ^{eme} scén	0,781	240	0,08	0,3	0,825	202,255	0,064	0,945

La figure (IV.1) expose la méthode de présentation par bar de la fonction de désirabilité, offrant une visualisation claire de la désirabilité souhaitée. Cette représentation permet d'identifier les combinaisons de paramètres de coupe sélectionnées r, Vc, f, et ap qui minimise les performances visés Ra, V_B et Ct dans les trois scénarios étudiés.

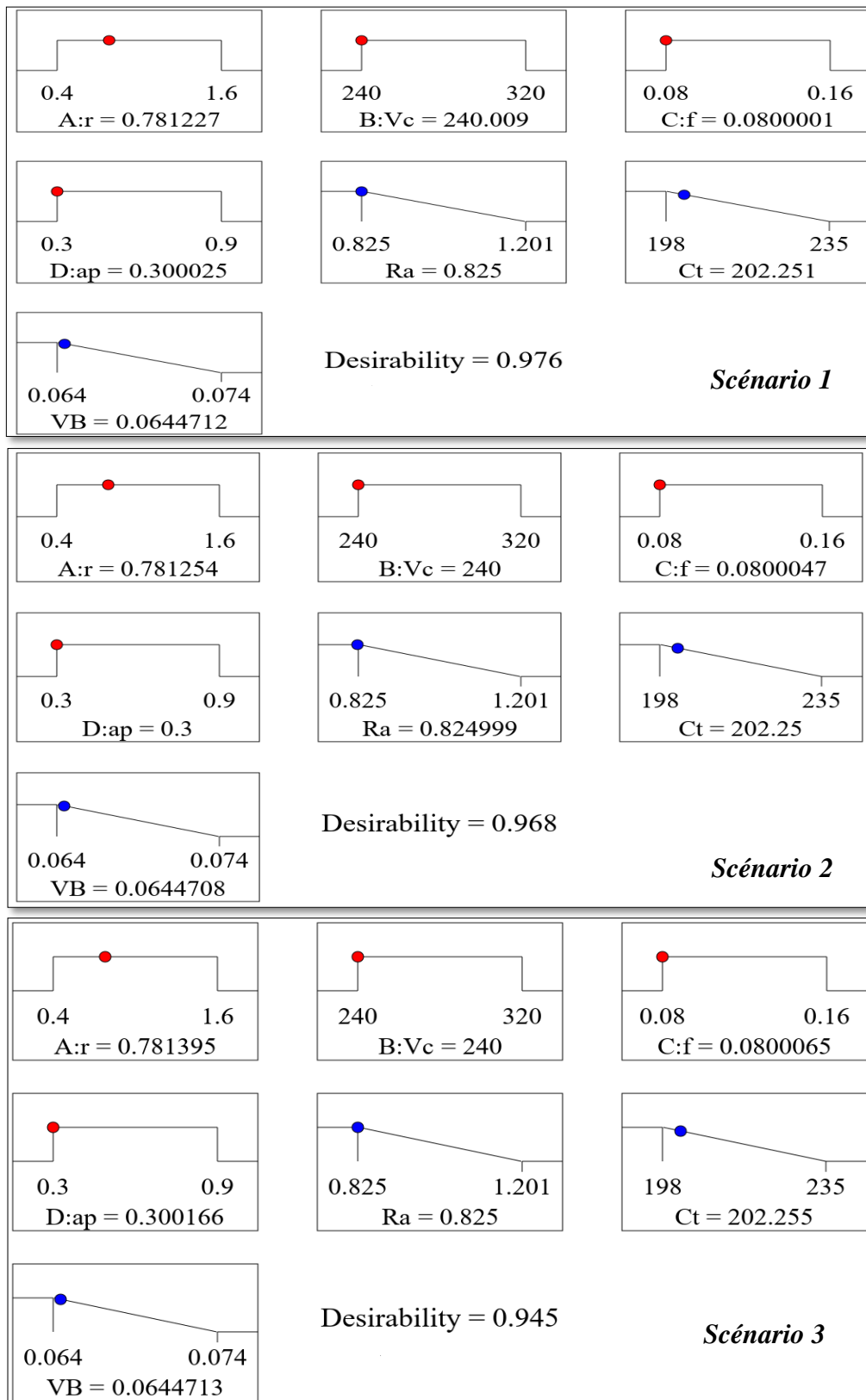


Figure IV.1 Graphiques de bar de désirabilité pour les trois scénarios d'optimisation.

IV.2.1.3 Cas des performances (Ra, Pm, Pc, Fz, MRR)

Dans le deuxième cas étudié, quatre scénarios d'optimisations favorisant le choix des conditions de coupe optimal lors de l'usinage intermittent d'AISI D3 sont considérés. Dans le premier scénario, on favorise la performance de la qualité de surface présenté par l'indice de rugosité (Ra) avec une importance maximale qui est égale à 5, et les autres performances prennent la valeur d'importance 1. Dans le deuxième scénario on s'intéresse particulièrement aux trois paramètres (Ra), (Pm) et (MRR) on leur donnant une importance de 5 et 1 pour (Pc) et (Fz). Pour le troisième scénario, on donne une importance maximale pour toutes les performances. Finalement, pour le quatrième scénario on s'intéresse de (Ra) et (MRR) particulièrement.

Dans le tableau (IV.3), sont consignés les contraintes de l'optimisation, les objectifs souhaités ainsi que l'importance choisie pour les paramètres de sortie, qui varie de 1 à 5 selon (04) scénarios étudiés. Le tableau (IV.4) englobe les solutions avancées par l'approche DF.

Tableau IV.3 Contraintes d'optimisation et importances.

Paramètres (P)		Valeurs des paramètres (V)		Objectifs	Poids		Importance			
		Inf	Sup		(V)Inf	(V)Sup	1 ^{er} scén	2 ^{eme} scén	3 ^{eme} scén	4 ^{eme} scén
Entrées	r	0,4	1,6	$Inf \leq V \leq Sup$	1	1	3	3	3	3
	Vc	240	320		1	1	3	3	3	3
	f	0,08	0,16		1	1	3	3	3	3
	ap	0,3	0,9		1	1	3	3	3	3
Sorties	Ra	0,825	1,201	Minimiser	1	1	5	5	5	5
	Fz	42,23	240,45		1	1	1	1	5	1
	Pm	2900	4900		1	1	1	5	5	1
	Pc	168,92	1282,4		1	1	1	1	5	1
	MRR	96	768	Maximiser	1	1	1	5	5	5

Tableau IV.4 Solutions proposées par la (DF) selon les quatre scénarios étudiés.

	Facteurs d'entrée				Paramètres de performance					Dés
	r	Vc	f	ap	Ra	Fz	Pm	Pc	MRR	
1 ^{er} scén	1,6	240	0,087	0,574	0,825	91,5	3359,077	310,936	200,591	0,754
2 ^{eme} scén	1,6	240	0,109	0,711	0,887	130,991	3665,08	494,119	309,145	0,556
3 ^{eme} scén	1,6	240	0,084	0,639	0,846	95,983	3376,428	330,741	216,009	0,603
4 ^{eme} scén	1,6	240,001	0,143	0,706	0,908	168,533	4003,508	670,966	404,918	0,56

Une présentation par rampes de la fonction de désirabilité illustrée dans la figure (IV.2) montre les combinaisons adéquates pour chaque scénario examiné ainsi que les valeurs des performances optimisées. Une analyse des solutions proposée montre clairement que les valeurs minimales de Ra, Fz, Pm et Pc sont assurées par le scénario 1, alors que la valeur maximale du MRR est assurée par le scénario 4.

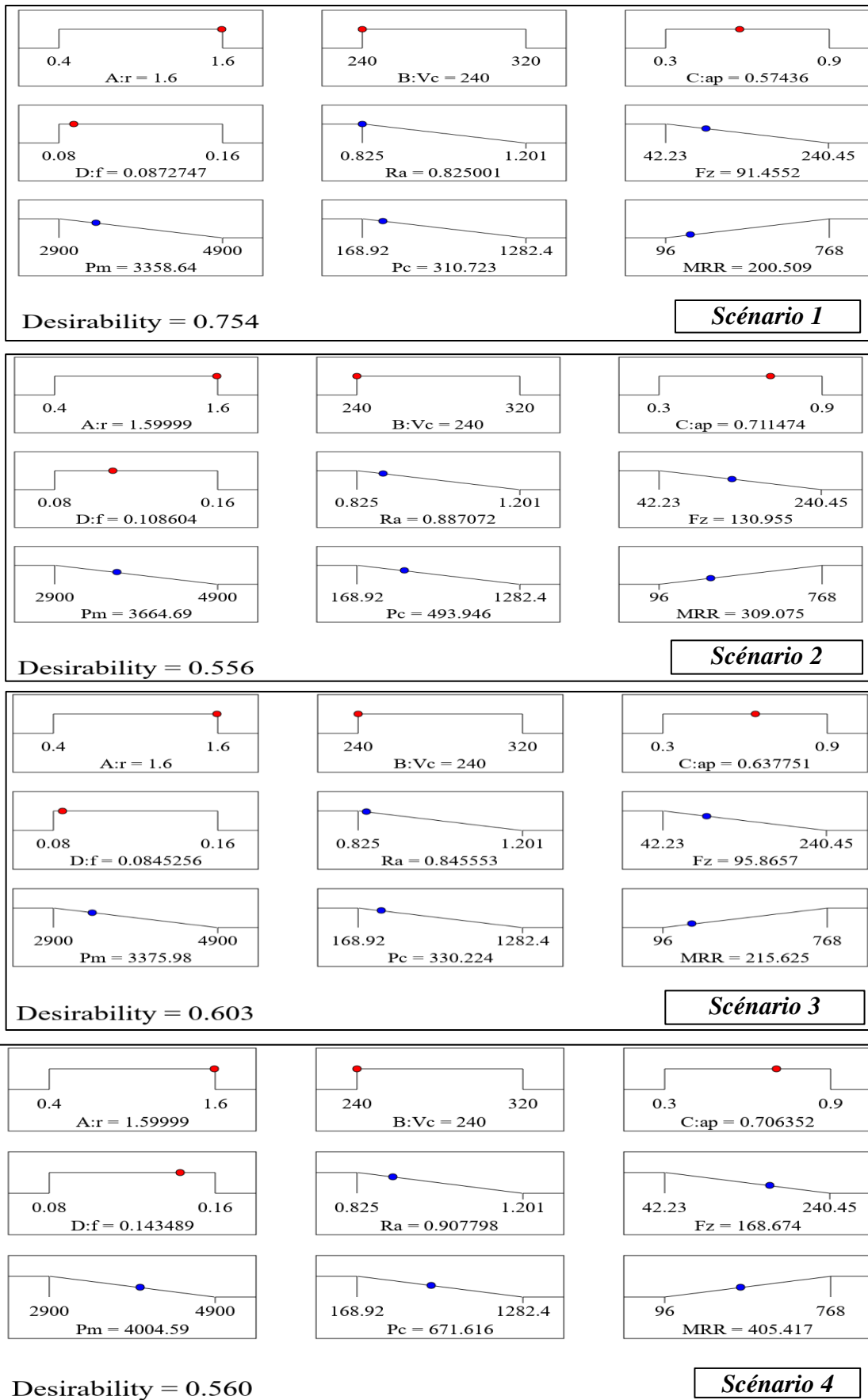


Figure IV.2 Graphiques de bar de désirabilité pour les quatre scénarios examinés.

IV.2.1.4 Cas des performances (Ra, Pm, V_B, Ct, Fz, Az, Lp, et MRR)

Dans ce cas d'étude, l'optimisation de toutes les réponses mesurées et calculées sont considérées avec le même degré d'importance qui égale à (5), favorisant le choix des conditions de coupe optimal lors de l'usinage intermittent de l'acier AISI D3. Dans le tableau (IV.5) sont consignés les contraintes de l'optimisation ainsi que les objectifs souhaités. Les paramètres de sortie (Ra, Pm, V_B, Ct, Fz, Az et Lp) sont à minimiser par contre le (MRR) qui représente un indice de productivité est à maximiser. Le régime optimal qui correspond à l'optimisation simultanée des huit (08) sorties est illustré au tableau (IV.6) avec une valeur de désirabilité de 0,601. Les sorties prennent les valeurs suivantes : (Ra) minimale égale à (0,825 μm), les paramètres (V_B, Pm, Ct, Fz, Az, et Lp) prennent les valeurs (0,066 mm, 3282,085Watt, 211,683 °C, 82,837 N, 20,636 m/s², 108,158dB) respectivement. Finalement, la maximisation du (MRR) se traduit par la valeur de (274,301mm³/s). La figure (IV.3) présente la surface de réponse en 3D de la désirabilité en fonction des facteurs d'entrée les plus influent.

Tableau IV.5 Contraintes d'optimisation et importances.

Paramètres		Valeurs des Paramètres (V)		Objectif	Poids		Importance
		Inf	Sup		(V)Inf	(V)Sup	
Entrées	r	0,4	1,6	$Inf \leq V \leq Sup$	1	1	3
	Vc	240	320		1	1	3
	f	0,08	0,16		1	1	3
	ap	0,3	0,9		1	1	3
Sorties	Ra	0,825	1,201	Minimiser	1	1	5
	Pm	2900	4900	Minimiser	1	1	5
	V _B	0,064	0,074	Minimiser	1	1	5
	Ct	198	235	Minimiser	1	1	5
	MRR	96	768	Maximiser	1	1	5
	Fz	42,23	240,45	Minimiser	1	1	5
	Az	15,01	28,50	Minimiser	1	1	5
	Lp	107,03	111,37	Minimiser	1	1	5

Tableau IV.6 Solutions proposées par la (DF) selon les quatre scénarios étudiés.

N°	Paramètres d'entrée				Performance								Des
	r	Vc	f	ap	Ra	Pm	V _B	Ct	MRR	Fz	Az	Lp	
1	1,29	240	0,1	0,689	0,825	3282,085	0,066	211,683	274,301	82,837	20,636	108,158	0,601

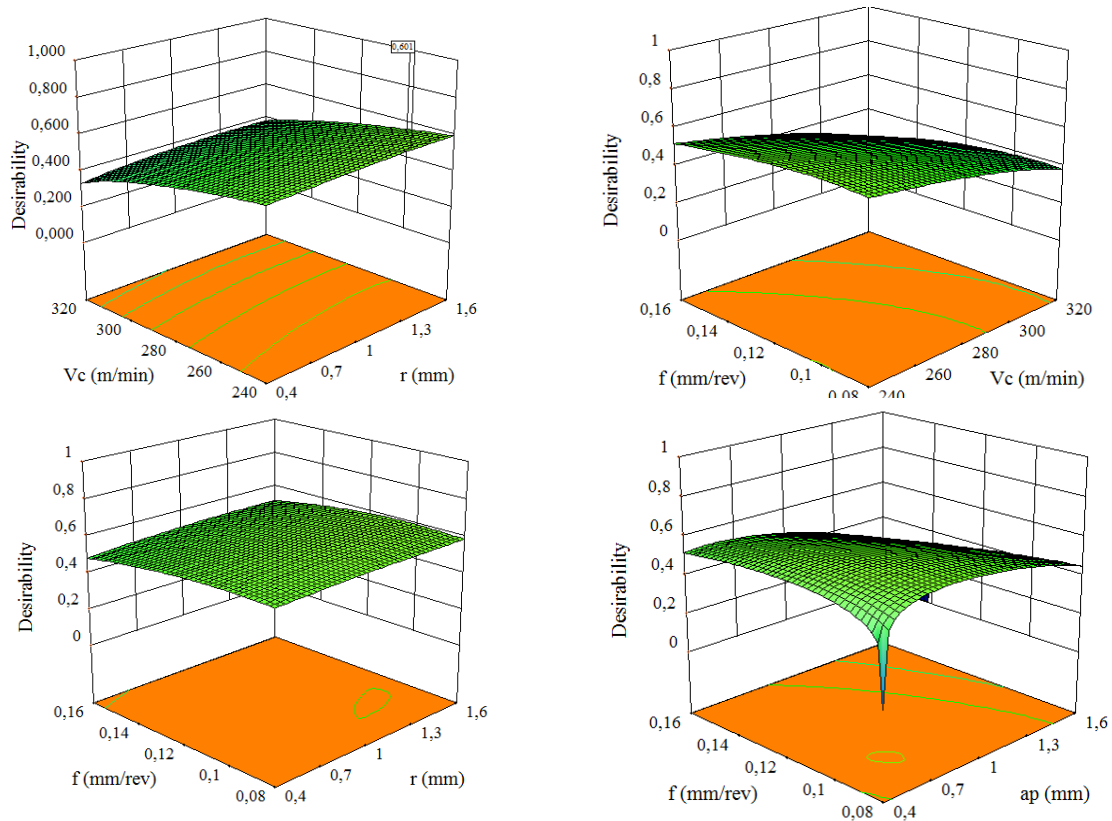


Figure IV.3 Graphes (3D) de la fonction Désirabilité.

IV.2.2 Méthode de l'analyse relationnelle grise (GRA)

La méthode GRA (Grey Relational Analysis) fait partie de la famille des méthodes (MCDM) [91], elle est appropriée pour résoudre les problèmes multi-objectifs. La méthode GRA est souvent utilisée dans des domaines tels que l'ingénierie, la gestion de la qualité, la finance, la logistique et d'autres domaines où il est important d'analyser les relations entre plusieurs facteurs pour prendre des décisions efficaces. L'approche GRA s'appuie sur des étapes illustrées dans la Figure (IV.4). Les étapes de la méthode GRA, les équations utilisées pour les calculs ainsi que les significations de chaque terme des équations sont mentionnées et détaillées ensuite [92].

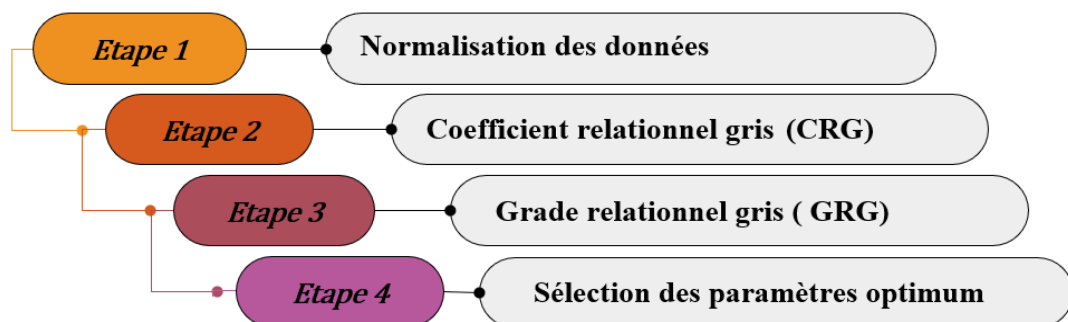


Figure IV.4 Étapes de la méthode GRA.

➤ **Etape 1 : Normalisation des données**

La normalisation qui consiste à une conversion des résultats d'expérience de zéro (0) à un (1), afin d'avoir des grandeurs sans unités. Cette étape est donnée par deux formules mathématiques, soit le minimum est le meilleur (Eq IV.4) ou le maximum est le meilleur (Eq IV.5).

$$x_i(k) = \frac{\max x_i^0(k) - x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (\text{Eq. IV.4})$$

$$x_i(k) = \frac{y_i(k) - \min y_i(k)}{\max y_i(k) - \min y_i(k)} \quad (\text{Eq. IV.5})$$

Où : $x_i(k)$: valeur Normalisée , $x_i^0(k)$: valeur résulte

$\max(x_i^0(k))$: Valeur Maximale de ($k^{\text{ième}}$) réponse $x_i^0(k)$

$\min(x_i^0(k))$: Valeur minimale de ($k^{\text{ième}}$) réponse $x_i^0(k)$

➤ **Etape 2 : Coefficient relationnel gris (GRC)**

Cette étape consiste à calculer le coefficient relationnel grise (GRC), après le calcul de la déviation séquentielle (Δ_{0i}), selon les équations (Eq IV.6) et (Eq IV.7).

$$GRC = \frac{\Delta_{min} + \varphi \Delta_{max}}{\Delta_{0i}(k) + \varphi \Delta_{max}(k)} \quad (\text{Eq. IV.6})$$

$$\Delta_{0i}(k) = \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (\text{Eq. IV.7})$$

Où :

$\Delta_{0i}(k)$: Déviation séquentielle, différence absolue entre les valeurs $x_0^k(k)$ et $x_i^k(k)$

Δ_{min} : La petite valeur de $\Delta_{0i}(k)$. Δ_{max} : La grande valeur de $\Delta_{0i}(k)$.

φ : Le coefficient de distinction définie dans l'intervalle : $0 \leq \varphi \leq 1$ dans notre cas

$$\varphi = 0,5$$

➤ **Etape 3 : Grade relationnel gris (GRG)**

La troisième étape est réservée au calcul du grade (GRG) par l'équation (Eq IV.8) le facteur essentiel pour savoir à quel essai le régime optimal se trouve.

$$GRG = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n GRC \quad (\text{Eq. IV.8})$$

➤ **Etape 4 : Détermination des paramètres optimums**

Classification des valeurs de GRG d'ordre décroissant, la plus grande valeur de GRG présente la meilleure gamme des paramètres optimaux.

IV.2.2.1 Cas des performances (Ra, VB, Ct)

Le tableau (IV.7) récapitule tous les résultats donnés par la GRA, il est clair que la première expérience a la plus grande valeur de GRG (0.939) ce qui implique que les conditions de coupe ($r=0.4\text{mm}$ $V_c=240\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$, et $a_p=0.3\text{mm}$) sont les paramètres optimaux qui donnent les valeurs des paramètres de performances suivantes $Ra=0.867\mu\text{m}$, $V_B=0.064$, et $Ct=198^\circ\text{C}$. La représentation graphique du (GRG) pour chaque essai est donnée par la figure (IV.5) qui montre clairement le régime optimal.

Tableau IV.7 Résultats de la méthode GRA.

N° EXP	Valeur normalisée de la réponse ; xi(k)			Déviation séquentielle $\Delta_{0i}(k)$			Coefficient GRC			GRG	Range
	Ra	VB	Ct	Ra	VB	Ct	Ra	VB	Ct		
1	0,888	1	1	0,112	0	0	0,817	1	1	0,939	1
2	0,444	0,4	0,405	0,556	0,6	0,595	0,473	0,454	0,456	0,461	7
3	0	0	0	1	1	1	0,333	0,333	0,333	0,333	9
4	0,71	0,6	0,27	0,29	0,4	0,73	0,632	0,555	0,406	0,531	4
5	0,375	0,3	0,324	0,625	0,7	0,676	0,444	0,416	0,425	0,428	8
6	0,872	0,4	0,297	0,128	0,6	0,703	0,796	0,454	0,415	0,555	3
7	0,699	0,6	0,243	0,301	0,4	0,757	0,624	0,555	0,397	0,525	5
8	1	0,5	0,189	0	0,5	0,811	1	0,5	0,381	0,627	2
9	0,859	0,2	0,162	0,141	0,8	0,838	0,78	0,384	0,373	0,512	6

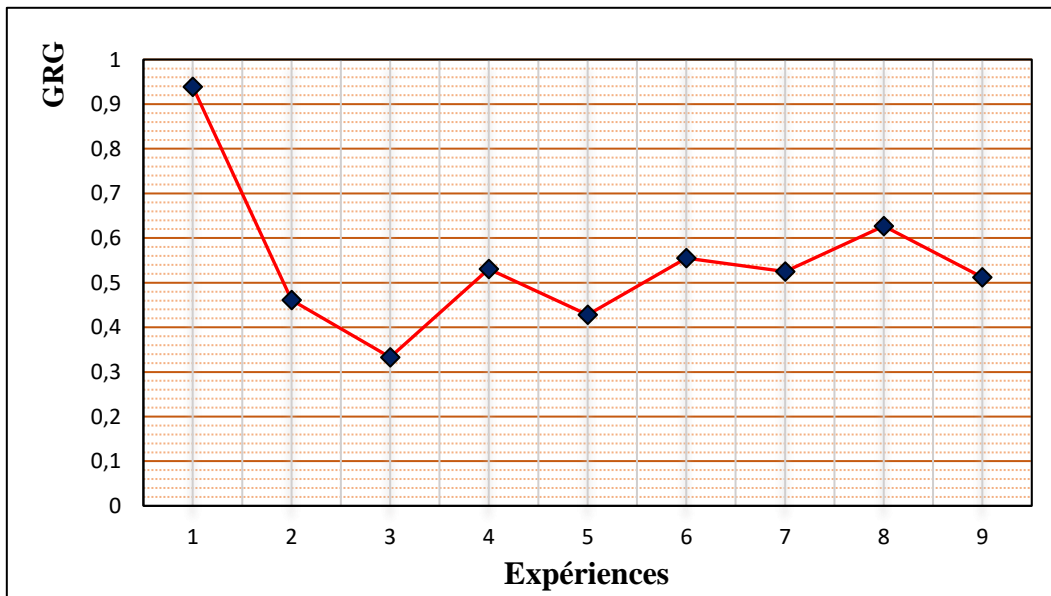


Figure IV.5 GRG pour chaque essai du 1^{er} cas étudié.

IV.2.2.2 Cas des performances (Ra, Pm, Pc, Fz, MRR)

Dans ce cas d'étude, la méthode GRA est appliquée pour l'optimisation des conditions de coupe en usinage intermittent et cela dans le but de maximiser le (MRR) et minimiser les paramètres de sortie (Ra, Fz, Pm et Pc) simultanément. Dans cette étude, l'exploitation de la méthode GRA

est réalisée en fixant les mêmes objectifs que le troisième cas d'optimisation étudié par la DF, qui s'intéresse à optimiser les cinq (05) les paramètres de performance simultanément avec une importance identique.

Le tableau (IV.8) montre les coefficients et les grades de la Relation Grise pour chaque expérience du plan Taguchi L9. Après l'application de l'équation (IV.8), on observe clairement que l'essai numéro (1) a la plus grande valeur de GRG (0.830), le régime optimal proposée par cette méthode est celle de l'expérience numéro (1) : ($r=0.4\text{mm}$, $V_c=240\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$, $a_p=0.3\text{mm}$).

Tableau IV.8 Résultats obtenus par l'approche GRA et classification.

N° Exp	GRC					GRG	Rank
	Ra	Fz	Pm	Pc	MRR		
1	0,817	1,000	1,000	1,000	0,333	0,830	1
2	0,474	0,489	0,571	0,521	0,438	0,499	7
3	0,333	0,333	0,333	0,333	1,000	0,467	9
4	0,633	0,466	0,497	0,551	0,500	0,529	4
5	0,444	0,497	0,525	0,529	0,382	0,476	8
6	0,797	0,490	0,450	0,479	0,396	0,523	5
7	0,625	0,422	0,492	0,506	0,467	0,502	6
8	1,000	0,452	0,407	0,486	0,438	0,556	2
9	0,780	0,592	0,455	0,569	0,368	0,553	3

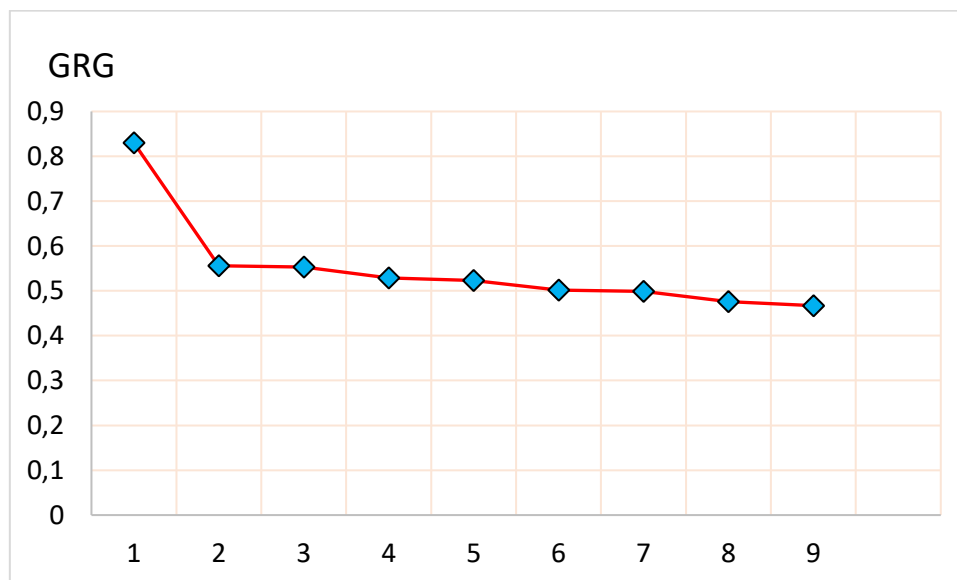


Figure IV.6 GRG pour chaque essai du 2^{ème} cas étudié.

Étant donné l'importance industrielle du processus d'usinage intermittent de l'acier AISI D3, ainsi que le grand nombre de paramètres de coupe sélectionnés et en particulier le nombre considérable de performances examinées dans le troisième cas, notre étude d'optimisation a exploité trois autres approches dans le but d'obtenir des résultats d'une importance industrielle cruciale. L'objectif était de proposer plusieurs solutions aux fabricants, répondant aux exigences en offrant les meilleures combinaisons de paramètres de coupe visant des performances

optimales. Afin d'atteindre l'objectif tracé nous avons exploité trois approches de plus à savoir MOORA, VIKOR, et NSGAII couplé avec VIKOR.

IV.2.3 Approche MOORA

La méthode MOORA (Optimisation Multi-Objectif par Analyse de Ratio) est une technique de prise de décision multicritères (MCDM) utilisée pour résoudre des problèmes de prise de décision impliquant plusieurs critères contradictoires. Brauers et Zavadskas ont développé cette méthode en 2006 [93]. Cette méthode commence par une matrice de décision présentant les performances de différentes alternatives par rapport à divers critères. La figure (IV.7) présente les étapes d'exécution de cette méthode.

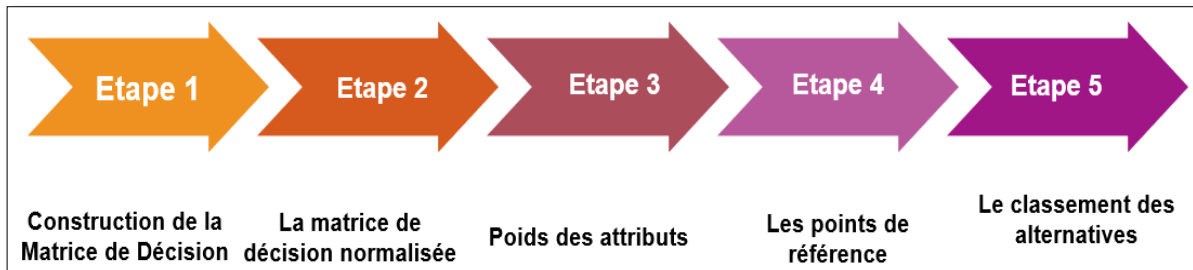


Figure IV.7 Étapes de la méthode MOORA.

- **Etape1 : construction de la matrice de décision** : Former une matrice de décision $X = x_{ij}$, avec "m" alternatives et "n" critères, $i = 1, 2, 3, \dots, m$ et $j = 1, 2, 3, \dots, n$

$$X = [x_{ij}]_{m \times n} \quad (\text{Eq. IV.9})$$

- **Etape 2 : La matrice de décision normalisée** :

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{[\sum_{i=0}^m x_{ij}^2]}} \quad (\text{Eq. IV.10})$$

$i = 1, 2, 3, \dots, m$ et $j = 1, 2, 3, \dots, n$

Où i = nombre d'essais, j = nombre de réponses et n_{ij} = valeur normalisée de la $i^{\text{ème}}$ série expérimentale liée à la $j^{\text{ème}}$ réponse.

- **Etape 3 : Poids des attributs** : Recherche de la matrice normalisée pondérée : ($w_i = 0.25$, pour tous les facteurs de sortie)

$$\vartheta_{ij} = n_{ij} \times \omega_i \quad (\text{Eq. IV.11})$$

Où : w_j indique le poids du $j^{\text{ème}}$ critère.

- **Etape 4 : Les points de référence** : Calculer les valeurs de préférence finales

$$p_i^* = \sum_{j=1}^g \vartheta_{ij} - \sum_{j=1+g}^n \vartheta_{ij} \quad (\text{Eq. IV.12})$$

Où $j = 1, 2, 3, \dots, g$: sont les critères qui doivent être maximisés et

$j = g+1, g+2, \dots, n$ sont les critères restants à minimiser.

- **Etape 5 : Le classement des alternatives :** Les alternatives sont classées en fonction des valeurs de préférence de p_i^* dans l'ordre décroissant.

La méthode MOORA a été utilisée pour optimiser le même cas que celui traité par la méthode DF. Il convient également de noter que, dans cette étude, la pondération pour les huit critères de sortie est uniforme ($w_i=1/8=0,125$). Les valeurs normalisées de la matrice sont présentées dans le tableau (IV.9), tandis que les solutions proposées par cette approche sont classées dans le tableau (IV.10). Il est clairement observé que la valeur maximale est de (0,0838), indiquant que le régime optimal correspond à l'essai 9. Les paramètres optimaux suggérés par cette méthode sont présentés dans le tableau (IV.11).

Tableau IV.9 Matrice normalisée.

Matrice normalisée							
Ra	Fz	Pm	MRR	V _B	Ct	Az	Lp
0,3	0,091	0,242	0,084	0,306	0,296	0,295	0,332
0,358	0,313	0,305	0,293	0,335	0,328	0,347	0,334
0,416	0,516	0,409	0,671	0,354	0,351	0,409	0,339
0,323	0,335	0,326	0,377	0,326	0,336	0,391	0,331
0,367	0,306	0,317	0,196	0,34	0,333	0,265	0,328
0,302	0,312	0,344	0,224	0,335	0,334	0,286	0,337
0,325	0,383	0,328	0,335	0,326	0,337	0,367	0,326
0,285	0,349	0,363	0,293	0,33	0,34	0,373	0,338
0,304	0,238	0,342	0,168	0,345	0,342	0,216	0,335

Tableau IV.10 Matrice normalisée pondérée et classement final.

EXP N°	Matrice normalisée pondérée								Classement	
	Ra	Fz	Pm	MRR	V _B	Ct	Az	Lp	Valeur p_i^*	Rank
1	0,002	0,000	0,000	0,047	0,000	0,000	0,010	0,001	0,0472	6
2	0,009	0,028	0,008	0,000	0,004	0,004	0,016	0,001	0,0278	9
3	0,016	0,053	0,021	0,037	0,006	0,007	0,024	0,002	0,0532	5
4	0,005	0,030	0,011	0,059	0,002	0,005	0,022	0,001	0,0594	3
5	0,010	0,027	0,009	0,056	0,004	0,005	0,006	0,000	0,0559	4
6	0,002	0,028	0,013	0,042	0,004	0,005	0,009	0,001	0,0419	8
7	0,005	0,036	0,011	0,047	0,002	0,005	0,019	0,000	0,0472	6
8	0,000	0,032	0,015	0,063	0,003	0,006	0,020	0,001	0,0629	2
9	0,002	0,018	0,013	0,084	0,005	0,006	0,000	0,001	0,0838	1

Tableau IV.11 Solution proposée et combinaison de facteurs.

N°	Paramètres d'entrée				Performances							
	r	Vc	f	ap	Ra	Pm	V _B	Ct	MRR	Fz	Az	Lp
9	1,6	320	0,12	0,3	0,878	4100	0,072	229	192	110,62	15,01	109,92

IV.2.4 Approche VIKOR

La méthode VIKOR vient du nom serbe (Vlase Kriterijumska Optimizacija Kompromisno Resenje), ce qui signifie l'optimisation multicritère et la solution de compromis, Cette méthode a été établie pour la première fois par Zeleny, en 1982. VIKOR est applicable à la prise de décision multicritères, en particulier dans les cas où le décideur ne peut pas ou ne sait pas comment exprimer sa propre opinion. La méthode VIKOR consiste à normaliser la matrice de décision par l'équation (IV.13), le calcul de la mesure de l'utilité (S_i) et de la mesure du regret (R_i) par les équations (IV.14) et (IV.15), respectivement, Ensuite, l'indice VIKOR a été calculé à l'aide de l'équation (IV.16). Enfin, sur la base de la valeur Q_i , l'alternative ayant une valeur Q_i minimale est classée au premier rang [94, 95]. La figure (IV.8) présente les étapes d'exécution de cette méthode.

$$X = [R_{ij}] = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & x_{n2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

$$R_{ij} = \frac{x_j^+ - x_{ij}}{x_j^+ - x_j^-} \quad (\text{Eq. IV.13})$$

R_{ij} et x_{ij} sont les éléments de la matrice de décision,

S_i est une mesure de l'utilité, x_j^+ et x_j^- sont les critères de la meilleure et de la pire valeur.

$$S_i = \sum_{j=1}^n (w_j \frac{x_j^+ - x_{ij}}{x_j^+ - x_j^-}) \quad (\text{Eq. IV.14})$$

$$R_i = \text{Max}(w_j \frac{x_j^+ - x_{ij}}{x_j^+ - x_j^-}) \quad (\text{Eq. IV.15})$$

R_i est une mesure de regret et W_j est le poids de chaque critère.

$$Q_i = v \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} + (1 - v) \frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \quad (\text{Eq. IV.16})$$

S^* Est le min de S_i et R^* est le min R_i et S^- est le max S_i et R^- est le max R_i et $v = 0,5$.

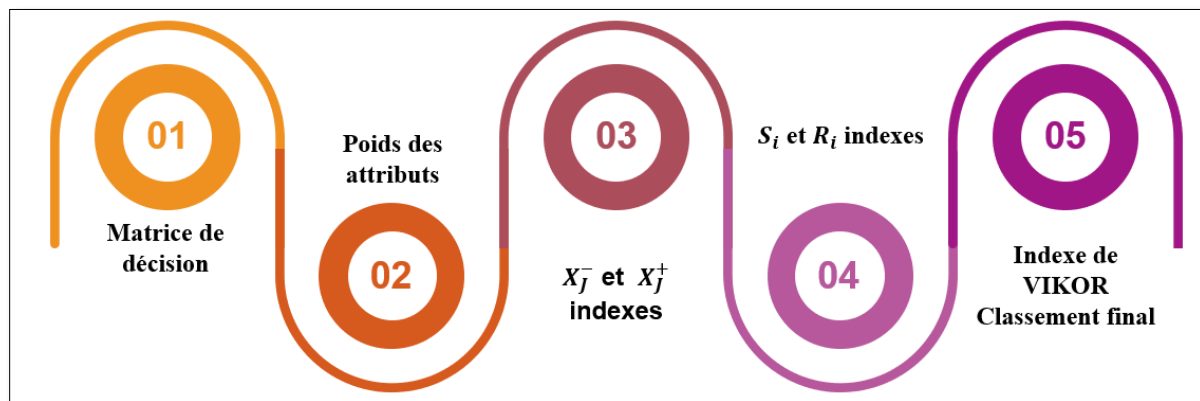


Figure IV.8 Étapes de la méthode VIKOR.

La matrice de normalisation est exposée dans le tableau (IV.12). Les solutions issues de l'application de la méthode VIKOR sont présentées dans le tableau (IV.13) et sont classées par ordre croissant de la valeur (Q_i). Le tableau (IV.14) met en évidence la solution optimale correspondant à l'essai numéro (2) avec les paramètres suivants : $r = 0,4$ mm, $V_c = 280$ m/min, $f = 0,12$ mm/tr, et $a_p = 0,6$ mm.

Tableau IV.12 Matrice normalisée.

Matrice normalisée							
Ra	Fz	Pm	MRR	V _B	Ct	Az	Lp
0,3	0,091	0,242	0,084	0,306	0,296	0,295	0,332
0,358	0,313	0,305	0,293	0,335	0,328	0,347	0,334
0,416	0,516	0,409	0,671	0,354	0,351	0,409	0,339
0,323	0,335	0,326	0,377	0,326	0,336	0,391	0,331
0,367	0,306	0,317	0,196	0,34	0,333	0,265	0,328
0,302	0,312	0,344	0,224	0,335	0,334	0,286	0,337
0,325	0,383	0,328	0,335	0,326	0,337	0,367	0,326
0,285	0,349	0,363	0,293	0,33	0,34	0,373	0,338
0,304	0,238	0,342	0,168	0,345	0,342	0,216	0,335

Tableau IV.13 Matrice normalisée pondérée et classement final.

Exp N°	Matrice normalisée pondérée								Classement final			
	Ra	Fz	Pm	MRR	V _B	Ct	Az	Lp	S _i	R _i	Q _i	Range
1	0,014	0	0	0,125	0	0	0,051	0,062	0,252	0,125	0,500	4
2	0,069	0,065	0,047	0,08	0,075	0,074	0,085	0,078	0,575	0,085	0,259	1
3	0,125	0,125	0,125	0	0,125	0,125	0,125	0,125	0,875	0,125	1,000	9
4	0,036	0,072	0,063	0,063	0,05	0,091	0,113	0,052	0,540	0,113	0,579	7
5	0,078	0,063	0,057	0,101	0,088	0,084	0,032	0,019	0,522	0,101	0,419	3
6	0,016	0,065	0,076	0,095	0,075	0,088	0,045	0,109	0,569	0,109	0,549	6
7	0,038	0,086	0,065	0,071	0,05	0,095	0,098	0	0,501	0,098	0,359	2
8	0	0,076	0,091	0,08	0,063	0,101	0,101	0,112	0,625	0,112	0,637	8
9	0,018	0,043	0,075	0,107	0,1	0,105	0	0,083	0,531	0,107	0,501	5

Tableau IV.14 Solution proposée et combinaison de facteurs.

N°	Paramètres d'entrée				Performances							
	r	Vc	f	ap	Ra	Pm	V _B	Ct	MRR	Fz	Az	Lp
2	0,4	280	0,12	0,6	1,034	3652	0,07	220	336	145,69	24,18	109,75

IV.2.5 Méthode NSGA II couplée avec VIKOR

NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) est un algorithme d'optimisation multi-objectif utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation qui impliquent plusieurs critères contradictoires [96]. Cet algorithme est dérivé de l'algorithme génétique standard et a été développé par Kalyanmoy [97]. Il présente trois caractéristiques particulières : une approche de tri, d'estimation, et de comparaison très simple et rapide. Dans le domaine d'usinage les paramètres du processus sont considérés comme des variables de décision pour minimiser ou maximiser les performances d'usinage qui sont les valeurs d'aptitude. L'algorithme mathématique de l' NSGA-II peut être décrit suivant les étapes de la figure (IV.9) [98].

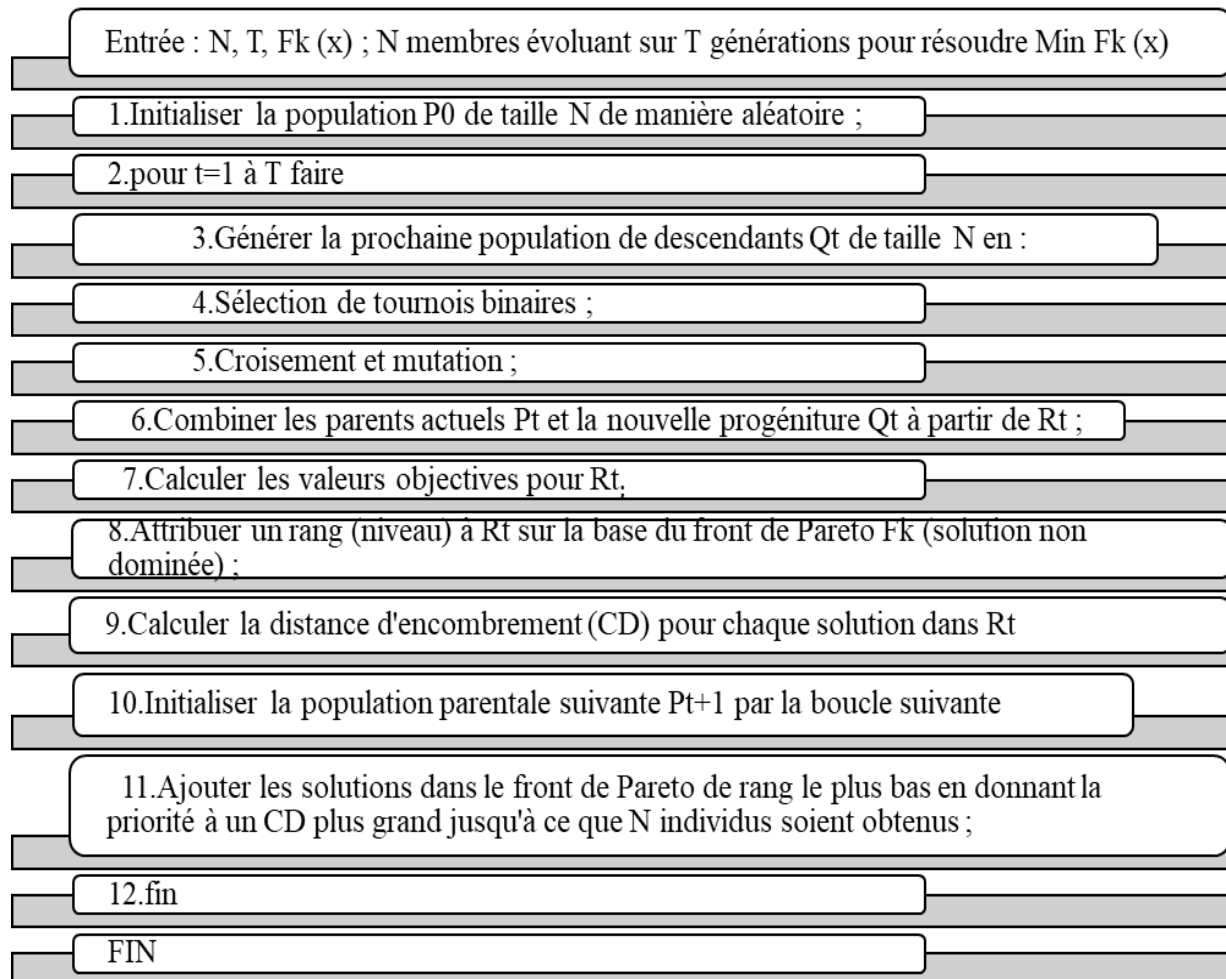


Figure IV.9 Étapes de la méthode NSGA II.

L'approche NSGA-II a été exécutée dans l'environnement MATLAB. Après plusieurs exécutions, la meilleure taille de population initiale, qui donne la meilleure solution, est fixée à 50. Le nombre de générations est de 500, la probabilité de croisement est de 0,9 et la probabilité de mutation est de 0,33. Les solutions optimales de Pareto, ainsi que les valeurs correspondantes des mesures de performance sont rapportées dans le Tableau (IV.15). Étant donné que chaque paramètre du premier groupe à minimiser (R_a , P_m , V_B , C_t , F_z , et A_z) varie en sens inverse par rapport au MRR, une représentation bidimensionnelle du front de Pareto de chaque paramètre de sortie à minimiser en fonction de $(1/MRR)$ est faite sur la figure (IV.10). La figure (IV.10.a) montre $1/MRR$ en fonction de (R_a) . Étant donné que (R_a) et (MRR) sont contradictoires par nature, la qualité de surface diminue lorsque le MRR augmente et le même comportement est observé pour les autres mesures de performance (Fig IV.10.b, c, d, e, et f). Étant donné qu'aucune des solutions de l'ensemble de Pareto n'est absolument meilleure que les autres, le choix d'une solution plutôt qu'une autre est une tâche très délicate et dépend des besoins de l'ingénieur de processus. L'utilisation d'une technique MCDM de sélection facilite le choix pour les ingénieurs. Dans ce travail la technique VIKOR est appliquée pour choisir une solution. Les équations (IV.13), (IV.14), (IV.15) et (IV.16) de la méthode VIKOR sont appliquées aux solutions proposées par la méthode NSGA II. Le tableau (IV.16) présente la matrice de normalisation, tandis que le tableau (IV.17) illustre la matrice de poids, et le classement final des solutions, le poids w_i est égal pour toutes les sorties étudiées ($w_i=1/8=0,125$). Les solutions sont classées à partir de l'indice de VIKOR. Le tableau (IV.18) présente la solution (43) qui a été classée en première qui propose la meilleure combinaison de paramètres d'entrée, avec les valeurs suivantes : ($r = 0,4$ mm, $V_c = 242,421$ m/min, $f = 0,146$ mm/tr et $a_p = 0,683$ mm). Cette combinaison garantit l'optimisation des performances ciblées.

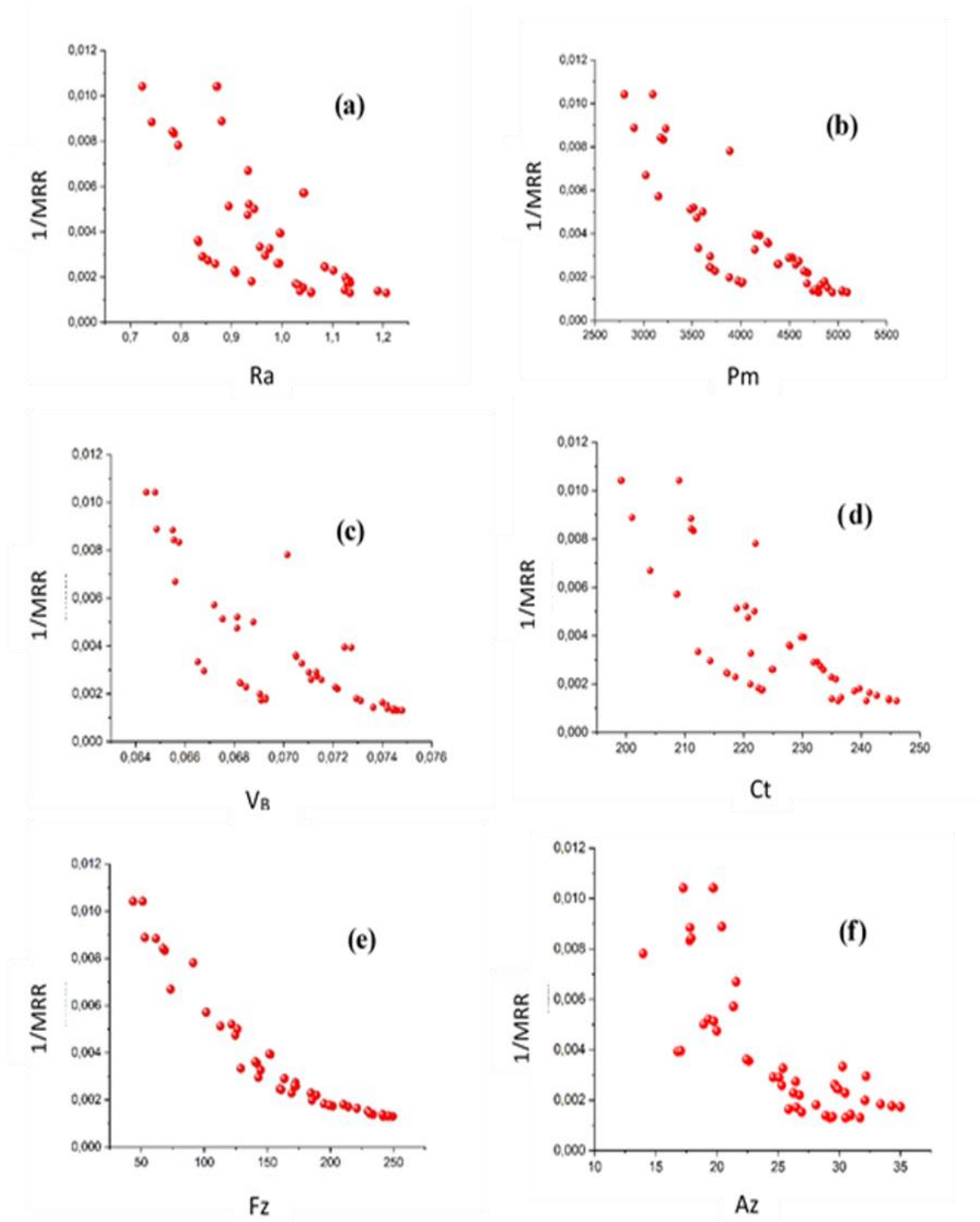


Figure IV.10 Courbes de Pareto des réponses (Ra, Pm, V_B, Ct, Fz, et Az,) en fonction de (1/MRR).

Tableau IV.15 Solutions proposées par l'approche NSGAI.

Solution N°	Facteurs d'entrée				Performances							
	r	Vc	f	ap	Ra	Fz	Pm	MRR	V _B	Ct	Az	Lp
1	0,98	320,00	0,16	0,90	1,14	245,52	4942,26	768,00	0,08	240,87	30,53	110,66
2	1,60	320,00	0,08	0,30	0,80	91,26	3887,02	128,00	0,07	222,02	13,98	110,35
3	1,60	240,00	0,16	0,30	0,94	121,58	3515,34	192,00	0,07	220,36	19,30	106,39
4	0,40	240,00	0,08	0,30	0,87	43,62	2800,42	96,00	0,06	199,10	19,72	108,91
5	0,40	240,00	0,08	0,30	0,87	43,62	2800,42	96,00	0,06	199,10	19,72	108,91
6	1,60	240,00	0,08	0,30	0,72	51,26	3095,02	96,00	0,07	209,02	17,26	108,00
7	0,40	240,00	0,16	0,90	1,14	201,84	4008,54	576,00	0,07	223,10	35,00	108,74
8	0,40	320,00	0,16	0,90	1,21	241,84	4800,54	768,00	0,07	236,10	31,71	111,10
9	0,40	320,00	0,08	0,90	1,00	171,52	4380,22	384,00	0,07	224,76	29,67	112,70
10	0,42	240,00	0,08	0,30	0,87	43,72	2804,15	96,00	0,06	199,22	19,69	108,90
11	1,60	320,00	0,16	0,90	1,06	249,48	5095,14	768,00	0,08	246,02	29,25	110,19
12	1,60	240,08	0,14	0,34	0,90	112,89	3481,43	195,10	0,07	218,86	19,76	106,83
13	0,45	319,89	0,08	0,71	0,98	144,73	4145,31	306,47	0,07	221,25	25,40	112,18
14	1,60	320,00	0,08	0,30	0,80	91,26	3886,94	128,00	0,07	222,02	13,98	110,35
15	1,54	302,65	0,16	0,74	1,03	214,12	4681,73	585,30	0,07	238,86	26,50	109,41
16	0,40	246,66	0,09	0,78	0,96	129,00	3564,78	300,03	0,07	212,23	30,29	109,96
17	1,56	248,99	0,08	0,34	0,74	61,71	3226,99	113,10	0,07	211,05	17,81	108,37
18	0,40	244,76	0,16	0,84	1,13	194,83	3971,58	545,62	0,07	222,52	33,39	108,73
19	1,60	314,88	0,16	0,79	1,04	229,67	4890,65	657,43	0,07	242,67	26,93	109,78
20	0,43	243,61	0,08	0,34	0,88	52,99	2903,88	112,59	0,07	201,02	20,40	109,04
21	0,43	240,21	0,16	0,71	1,10	169,27	3736,24	437,74	0,07	218,58	30,50	108,35
22	1,60	314,93	0,16	0,74	1,03	221,13	4819,66	610,91	0,07	241,42	25,86	109,71
23	0,41	243,32	0,16	0,78	1,13	185,41	3881,94	503,57	0,07	221,12	32,11	108,54
24	1,60	240,00	0,16	0,33	0,93	124,63	3548,30	210,78	0,07	220,76	20,00	106,52
25	1,50	320,00	0,10	0,85	0,91	188,94	4689,43	454,90	0,07	235,69	26,76	111,33
26	1,44	315,26	0,15	0,32	1,00	152,56	4196,62	254,36	0,07	230,26	16,80	108,99
27	0,44	240,00	0,15	0,30	1,04	101,68	3154,72	174,96	0,07	208,71	21,33	107,56
28	1,48	320,00	0,10	0,82	0,91	184,58	4649,63	438,13	0,07	234,91	26,26	111,30
29	1,60	320,00	0,12	0,90	0,94	210,27	4860,75	553,86	0,07	239,70	28,11	111,09
30	1,49	313,46	0,08	0,67	0,84	141,79	4282,97	281,25	0,07	227,93	22,62	111,12
31	1,59	249,71	0,16	0,30	0,95	126,36	3608,47	199,77	0,07	221,83	18,93	106,69
32	1,49	313,76	0,08	0,66	0,83	140,38	4272,83	276,67	0,07	227,73	22,43	111,12
33	0,42	320,00	0,16	0,87	1,19	233,81	4743,87	722,73	0,07	235,00	30,94	111,11
34	0,42	240,00	0,15	0,30	1,04	101,63	3150,67	175,05	0,07	208,57	21,37	107,57
35	1,59	316,78	0,09	0,79	0,87	172,68	4564,91	386,78	0,07	233,58	25,31	111,20
36	1,51	243,24	0,10	0,30	0,79	68,75	3203,90	120,02	0,07	211,48	17,79	107,79
37	1,51	320,00	0,08	0,86	0,85	172,34	4597,13	365,77	0,07	233,06	26,45	111,76
38	0,78	312,97	0,15	0,90	1,12	231,19	4767,55	700,02	0,07	236,57	30,94	110,82
39	0,43	320,00	0,08	0,90	0,99	171,73	4387,70	384,13	0,07	225,01	29,61	112,68
40	1,60	320,00	0,08	0,78	0,84	163,78	4529,40	343,75	0,07	232,51	24,59	111,45
41	0,41	246,60	0,10	0,86	0,97	142,97	3687,12	338,82	0,07	214,33	32,19	110,12
42	0,43	241,73	0,10	0,37	0,93	73,28	3024,52	149,47	0,07	204,09	21,57	108,65
43	0,40	242,42	0,15	0,68	1,08	159,79	3679,39	405,64	0,07	217,06	29,79	108,56
44	1,53	317,33	0,16	0,90	1,06	245,93	5041,31	751,90	0,08	244,74	29,45	110,20
45	1,59	314,87	0,08	0,79	0,84	163,30	4494,56	345,27	0,07	231,92	25,10	111,32
46	1,52	240,00	0,10	0,30	0,78	67,35	3175,13	118,65	0,07	211,05	17,91	107,68
47	0,40	242,49	0,15	0,69	1,09	161,06	3690,28	410,50	0,07	217,25	29,95	108,57
48	1,45	310,19	0,15	0,32	1,00	151,55	4157,88	253,45	0,07	229,75	17,05	108,81
49	0,41	244,83	0,16	0,88	1,13	199,26	4020,82	565,77	0,07	223,22	34,28	108,88
50	1,60	319,94	0,15	0,89	1,04	241,23	5042,24	722,88	0,07	244,71	28,89	110,34

Tableau IV.16 Matrice normalisée.

Matrice normalisée							
Ra	Fz	Pm	MRR	V _B	Ct	Az	Lp
0,165	0,212	0,172	0,253	0,151	0,152	0,169	0,143
0,116	0,079	0,135	0,042	0,142	0,140	0,077	0,142
0,136	0,105	0,122	0,063	0,138	0,139	0,107	0,137
0,127	0,038	0,097	0,032	0,130	0,126	0,109	0,141
0,127	0,038	0,097	0,032	0,130	0,126	0,109	0,141
0,105	0,044	0,108	0,032	0,131	0,132	0,096	0,139
0,165	0,174	0,139	0,190	0,140	0,141	0,194	0,140
0,175	0,209	0,167	0,253	0,151	0,149	0,176	0,143
0,145	0,148	0,152	0,126	0,144	0,142	0,164	0,145
0,127	0,038	0,097	0,032	0,130	0,126	0,109	0,141
0,154	0,215	0,177	0,253	0,151	0,155	0,162	0,142
0,130	0,097	0,121	0,064	0,137	0,138	0,109	0,138
0,142	0,125	0,144	0,101	0,143	0,140	0,141	0,145
0,116	0,079	0,135	0,042	0,142	0,140	0,077	0,142
0,149	0,185	0,163	0,193	0,148	0,151	0,147	0,141
0,139	0,111	0,124	0,099	0,135	0,134	0,168	0,142
0,108	0,053	0,112	0,037	0,133	0,133	0,099	0,140
0,165	0,168	0,138	0,180	0,140	0,140	0,185	0,140
0,152	0,198	0,170	0,217	0,150	0,153	0,149	0,142
0,128	0,046	0,101	0,037	0,131	0,127	0,113	0,141
0,160	0,146	0,130	0,144	0,139	0,138	0,169	0,140
0,150	0,191	0,168	0,201	0,150	0,152	0,143	0,142
0,164	0,160	0,135	0,166	0,140	0,139	0,178	0,140
0,136	0,108	0,123	0,069	0,138	0,139	0,111	0,137
0,132	0,163	0,163	0,150	0,146	0,149	0,148	0,144
0,145	0,132	0,146	0,084	0,147	0,145	0,093	0,141
0,151	0,088	0,110	0,058	0,136	0,132	0,118	0,139
0,132	0,159	0,162	0,144	0,146	0,148	0,145	0,144
0,137	0,181	0,169	0,182	0,148	0,151	0,156	0,143
0,121	0,122	0,149	0,093	0,143	0,144	0,125	0,143
0,137	0,109	0,125	0,066	0,139	0,140	0,105	0,138
0,121	0,121	0,149	0,091	0,143	0,144	0,124	0,143
0,173	0,202	0,165	0,238	0,150	0,148	0,171	0,143
0,152	0,088	0,110	0,058	0,136	0,132	0,118	0,139
0,126	0,149	0,159	0,127	0,145	0,147	0,140	0,143
0,114	0,059	0,111	0,040	0,133	0,133	0,099	0,139
0,124	0,149	0,160	0,120	0,144	0,147	0,146	0,144
0,163	0,199	0,166	0,231	0,149	0,149	0,171	0,143
0,144	0,148	0,153	0,127	0,144	0,142	0,164	0,145
0,123	0,141	0,157	0,113	0,144	0,147	0,136	0,144
0,141	0,123	0,128	0,112	0,135	0,135	0,178	0,142
0,136	0,063	0,105	0,049	0,133	0,129	0,119	0,140
0,158	0,138	0,128	0,134	0,138	0,137	0,165	0,140
0,154	0,212	0,175	0,248	0,151	0,154	0,163	0,142
0,122	0,141	0,156	0,114	0,144	0,146	0,139	0,144
0,114	0,058	0,110	0,039	0,133	0,133	0,099	0,139
0,158	0,139	0,128	0,135	0,138	0,137	0,166	0,140
0,145	0,131	0,145	0,083	0,147	0,145	0,094	0,140
0,164	0,172	0,140	0,186	0,140	0,141	0,190	0,140
0,151	0,208	0,175	0,238	0,151	0,154	0,160	0,142

Tableau IV.17 Classement final.

EXP N°	Matrice pondérée normalisée								Indice VIKOR			Range
	Ra	Fz	Pm	MRR	V _B	Ct	Az	Lp	Si	Ri	Qi	
1	0,106	0,123	0,117	0,000	0,123	0,111	0,098	0,085	0,763	0,123	0,956	48
2	0,018	0,029	0,059	0,119	0,069	0,061	0,000	0,078	0,434	0,119	0,594	32
3	0,055	0,047	0,039	0,107	0,044	0,057	0,032	0,000	0,381	0,107	0,356	11
4	0,038	0,000	0,000	0,125	0,000	0,000	0,034	0,050	0,247	0,125	0,518	27
5	0,038	0,000	0,000	0,125	0,000	0,000	0,034	0,050	0,247	0,125	0,518	27
6	0,000	0,005	0,016	0,125	0,004	0,026	0,020	0,032	0,228	0,125	0,500	24
7	0,107	0,096	0,066	0,036	0,056	0,064	0,125	0,047	0,596	0,125	0,838	42
8	0,125	0,120	0,109	0,000	0,121	0,099	0,105	0,093	0,772	0,125	1,000	50
9	0,070	0,078	0,086	0,071	0,081	0,068	0,093	0,125	0,673	0,125	0,909	44
10	0,038	0,000	0,000	0,125	0,000	0,000	0,034	0,050	0,247	0,125	0,518	26
11	0,087	0,125	0,125	0,000	0,125	0,125	0,091	0,075	0,753	0,125	0,982	49
12	0,044	0,042	0,037	0,107	0,037	0,053	0,034	0,009	0,363	0,107	0,330	7
13	0,065	0,061	0,073	0,086	0,076	0,059	0,068	0,115	0,603	0,115	0,681	36
14	0,018	0,029	0,059	0,119	0,069	0,061	0,000	0,078	0,434	0,119	0,594	33
15	0,079	0,104	0,102	0,034	0,105	0,106	0,074	0,060	0,664	0,106	0,596	34
16	0,060	0,052	0,042	0,087	0,025	0,035	0,097	0,071	0,468	0,097	0,274	2
17	0,005	0,011	0,023	0,122	0,013	0,032	0,023	0,039	0,268	0,122	0,486	22
18	0,106	0,092	0,064	0,041	0,058	0,062	0,115	0,046	0,586	0,115	0,676	35
19	0,083	0,113	0,114	0,021	0,118	0,116	0,077	0,067	0,708	0,118	0,822	41
20	0,041	0,006	0,006	0,122	0,005	0,005	0,038	0,052	0,275	0,122	0,494	23
21	0,098	0,076	0,051	0,061	0,049	0,052	0,098	0,039	0,524	0,098	0,345	8
22	0,080	0,108	0,110	0,029	0,115	0,113	0,071	0,066	0,691	0,115	0,772	39
23	0,104	0,086	0,059	0,049	0,055	0,059	0,108	0,042	0,563	0,108	0,534	29
24	0,054	0,049	0,041	0,104	0,044	0,058	0,036	0,002	0,388	0,104	0,306	6
25	0,048	0,088	0,103	0,058	0,093	0,097	0,076	0,098	0,662	0,103	0,546	30
26	0,071	0,066	0,076	0,096	0,100	0,083	0,017	0,051	0,560	0,100	0,408	15
27	0,082	0,035	0,019	0,110	0,033	0,026	0,044	0,023	0,373	0,110	0,399	12
28	0,047	0,086	0,101	0,061	0,092	0,095	0,073	0,097	0,653	0,101	0,503	25
29	0,056	0,101	0,112	0,040	0,103	0,108	0,084	0,093	0,697	0,112	0,727	37
30	0,029	0,060	0,081	0,091	0,073	0,077	0,051	0,094	0,555	0,094	0,300	5
31	0,057	0,050	0,044	0,106	0,052	0,061	0,029	0,006	0,405	0,106	0,355	10
32	0,029	0,059	0,080	0,091	0,073	0,076	0,050	0,094	0,552	0,094	0,298	4
33	0,121	0,115	0,106	0,008	0,118	0,096	0,101	0,093	0,758	0,121	0,918	45
34	0,083	0,035	0,019	0,110	0,033	0,025	0,044	0,023	0,373	0,110	0,399	13
35	0,037	0,078	0,096	0,071	0,086	0,092	0,067	0,095	0,623	0,096	0,402	14
36	0,016	0,015	0,022	0,121	0,016	0,033	0,023	0,028	0,273	0,121	0,470	20
37	0,034	0,078	0,098	0,075	0,083	0,090	0,074	0,106	0,639	0,106	0,580	31
38	0,104	0,114	0,107	0,013	0,111	0,100	0,101	0,088	0,737	0,114	0,790	40
39	0,069	0,078	0,086	0,071	0,081	0,069	0,093	0,125	0,672	0,125	0,901	43
40	0,031	0,073	0,094	0,079	0,083	0,089	0,063	0,100	0,612	0,100	0,456	18
41	0,063	0,060	0,048	0,080	0,028	0,041	0,108	0,074	0,502	0,108	0,486	21
42	0,054	0,018	0,012	0,115	0,014	0,013	0,045	0,045	0,317	0,115	0,423	17
43	0,093	0,071	0,048	0,067	0,046	0,048	0,094	0,043	0,510	0,094	0,265	1
44	0,087	0,123	0,122	0,003	0,122	0,122	0,092	0,075	0,745	0,123	0,941	47
45	0,031	0,073	0,092	0,079	0,079	0,087	0,066	0,098	0,605	0,098	0,410	16
46	0,015	0,014	0,020	0,121	0,014	0,032	0,023	0,026	0,265	0,121	0,467	19
47	0,094	0,071	0,048	0,066	0,046	0,048	0,095	0,043	0,512	0,095	0,282	3
48	0,070	0,066	0,074	0,096	0,097	0,082	0,018	0,048	0,550	0,097	0,347	9
49	0,105	0,095	0,066	0,038	0,058	0,064	0,121	0,049	0,596	0,121	0,770	38
50	0,081	0,120	0,122	0,008	0,121	0,121	0,089	0,078	0,740	0,122	0,925	46

Tableau IV.18 Solution proposée par la méthode NSGA II couplée avec VIKOR.

N°	Paramètres d'entrée				Performance							
	r	Vc	f	ap	Ra	Pm	V _B	Ct	MRR	Fz	Az	Lp
43	0,4	242,422	0,147	0,684	1,084	3679,391	0,068	217,061	405,637	159,793	29,794	108,559

IV.3 Comparaison entre les résultats

La comparaison des résultats des différentes méthodes d'optimisation exploitées dans notre étude est essentielle et d'un intérêt crucial pour sélectionner la méthode adéquate et la plus appropriée en fonction des objectifs spécifiques visé, des contraintes rencontrées et des ressources disponibles afin de répondre aux exigences industrielles. L'efficacité et la fiabilité du processus d'usinage est assurer via l'obtention des meilleures combinaisons des facteurs de coupe qui donnent des performances optimales souhaitées. Dans notre première phase d'étude on va comparer les résultats obtenus par les deux méthodes exploitées la DF et la GRA pour les deux cas examinés et finalement une comparaison des résultats du cas global par l'exploitation des approches DF, MOORA, VIKOR, et NSGAII couplé avec VIKOR.

IV.3.1 Comparaison des résultats pour le cas des performances (Ra, Ct, V_B)

Les résultats obtenus par l'application de deux méthodes d'optimisation sont illustrés dans le tableau (IV.19). L'analyse des deux régimes optimaux montre que les deux méthodes (DF et GRA) proposent la même combinaison optimale pour les facteurs (Vc=240m/min), (f=0,08mm/rev), (ap=0,3mm) cependant, une minimisation de (-48,784%) pour le facteur (r). Deux paramètres de sortie (Ra) et (Ct) possèdent des valeurs différentes, soit d'un pourcentage de différence de (5,091%) et (-2,089%) respectivement. Une valeur semblable pour le facteur (V_B) égale à (0,064mm). L'optimisation simultanée en minimisant (Ra), (Ct) et (V_B) est assurer par les deux méthodes, ce qui offre aux industrielles d'exploiter les deux régimes proposés.

Tableau IV.19 Résultats de l'optimisation par DF et GRA.

Méthodes	Paramètres d'entrée				Performances		
	r	Vc	f	ap	Ra	Ct	V _B
DF	0,781	240	0,08	0,3	0,825	202,225	0,064
GRA	0,4	240	0,08	0,3	0,867	198	0,064
DIFF (%)	-48,784	0	0	0	5,091	-2,089	0

IV.3.2 Comparaison des résultats pour le cas des performances (Ra, Pm, Pc, Fz, MRR)

Les résultats obtenus avec les deux méthodes d'optimisation multi-objective concernant les régimes de coupe optimaux ainsi que les paramètres de performance optimisés sont regroupés dans le tableau (IV.20). Le but de cette comparaison et d'établir les performances de chaque méthode et de laisser le choix aux industriels pour décider l'application de telle ou telle approche. Il est clair que la DF favorise les paramètres (Ra) et (MRR) en même temps, où (Ra) est minimale et (MRR) est maximale (Ra =0,846µm) et le (MRR=216,009mm³/s). Par contre, pour les facteurs (Fz) (Pm) et (Pc), ils prennent des valeurs maximales. De sa part, la méthode GRA propose un régime optimal favorisant la minimisation de (Fz) d'un pourcentage de (56,003%) par rapport à la DF, ainsi qu'une minimisation de consommation de l'énergie de (14,110%) et (48,927%) pour (Pm) et (Pc) respectivement. La valeur de la qualité de surface

($R_a=0,867\mu\text{m}$) trouvée est presque comparable à celle trouvée par DF avec une faible augmentation de (2,482%) seulement, cependant le paramètre de productivité est très faible ($MRR=96\text{ mm}^3/\text{s}$) soit une forte diminution de (55,557%) par rapport à la DF. Finalement, les deux méthodes proposent aux industriels deux régimes optimaux avec la même vitesse ($V_c=240\text{ m/min}$), et presque la même avance ($f=0,08\text{ mm/rev}$), tandis que les deux facteurs (r et a_p) diffèrent totalement.

Tableau IV.20 Résultats de l'optimisation par DF et GRA.

Méthodes	Paramètres d'entrée				Performances				
	r	Vc	f	ap	Ra	Fz	Pm	Pc	MRR
DF	1,6	240	0,084	0,639	0,846	95,983	3376,428	330,741	216,009
GRA	0,4	240	0,08	0,3	0,867	42,23	2900	168,92	96
DIFF (%)	-75	0	-4,762	-53,052	2,482	-56,003	-14,11	-48,927	-55,557

IV.3.3 Comparaison des résultats pour le cas des performances (R_a , P_m , V_B , C_t , F_z , A_z , L_p , MRR)

Le tableau (IV.21), récapitule les régimes optimaux proposés par les quatre (04) approches d'optimisation appliquées à savoir : (DF), (MOORA), (VIKOR) et NSGA II / VIKOR en tournage intermittent de l'acier AISI D3, ainsi que les réponses optimisées.

L'analyse des résultats montre que le régime optimal ($r=1,29\text{ mm}$, $V_c=240\text{ m/min}$, $f=0,1\text{ mm/rev}$, $a_p=0,689\text{ mm}$) issu de l'approche (DF) génère des réponses optimisées minimales des six (06) paramètres de sorties (R_a , P_m , V_B , C_t , F_z , et L_p) avec des valeurs de ($0,825\mu\text{m}$, $3282,085\text{ Watt}$, $0,066\text{ mm}$, $211,683\text{ }^\circ\text{C}$, $82,837\text{ N}$, $108,158\text{ dB}$) respectivement. La méthode NSGAII/VIKOR a proposé une combinaison des facteurs d'entrés ($r=0,4\text{ mm}$, $V_c=242,421\text{ m/min}$, $f=0,146\text{ mm/rev}$, $a_p=0,683\text{ mm}$) qui maximise la productivité (MRR) de manière très significative avec une valeur maximale de $405,636\text{ mm}^3/\text{s}$. La méthode MOORA a permis d'obtenir une valeur minimale de vibration ($A_z=15,01\text{ mm/s}^2$) et une qualité de surface respectable ($R_a=0,878\mu\text{m}$), proposant un régime de coupe suivant : ($r=1,6\text{ mm}$, $V_c=320\text{ m/min}$, $f=0,12\text{ mm/rev}$, et $a_p=0,3\text{ mm}$). Par contre, le (MRR) prend la valeur la plus basse des quatre méthodes ($MRR=192\text{ mm}^3/\text{s}$), ainsi que la consommation d'énergie trouvée par cette méthode est très élevée $P_m=4100\text{ Watts}$. On peut dire que la méthode MOORA ne considère pas la maximisation de la productivité ni la minimisation de l'énergie consommée. Finalement, la méthode VIKOR fournit la combinaison suivante : ($r=0,4\text{ mm}$, $V_c=280\text{ m/min}$, $f=0,12\text{ mm/rev}$, $a_p=0,6\text{ mm}$) qui donne des performances modérées. Les cinq (05) paramètres de sortie (P_m , V_B , C_t , MRR , et L_p) sont améliorés comparativement à la méthode MOORA.

Le tableau (IV.22) présente les pourcentages des différences entre les régimes proposés par les quatre (04) méthodes d'optimisation appliquées. La comparaison entre les résultats des régimes optimaux suggère d'abord que DF est la méthode qui fournit la meilleure solution d'optimisation multi-objective, favorisant la minimisation des performances (R_a , P_m , V_B , C_t , F_z , et L_p) à la fois. Une faible importance donnée à la productivité (MRR) et à la vibration tangentielle (A_z) indiquée par les pourcentages 32,38% et 37,48% respectivement par rapport aux valeurs optimales proposée par la méthode NSGA II / VIKOR et MOORA. La méthode MOORA accorde la valeur optimale à (A_z), cependant, on enregistre une augmentation des

paramètres (Ra, Pm, V_B, Ct, Fz, et Lp) de (6,42%, 24,92%, 9,09%, 8,18%, 33,54% et 1,63%) par rapport aux valeurs optimales proposées par la méthode (DF). Une différence de 52.67% du paramètre (MRR) est enregistrée par rapport à la valeur optimale donnée par la méthode NSGA II / VIKOR. La méthode VIKOR offre des performances modérées mais avec des augmentations importantes de (Fz et Az) soit d'une valeur de 75,88 % et 61,09% respectivement par rapport à la solution optimale proposée par la méthode DF. Par contre, on enregistre des augmentations plus faibles pour les paramètres (Ra, Pm, V_B, Ct et Lp) de (25,33%, 11,27%, 6,06%, 3,93% et 1,47%) respectivement. La méthode NSGA II / VIKOR a identifié la combinaison des facteurs d'entrée qui maximise la productivité d'une manière optimale par rapport aux autres méthodes avec une valeur de débit maximale de 405,636 mm³/s. Cependant, cette méthode génère des valeurs très élevées de l'effort (Fz) et la vibration (Az), avec des différences de 92,90% et 98,49% par rapport aux valeurs optimales proposées par la méthode DF. Pour les autres paramètres, on enregistre des augmentations de (Ra, Pm, V_B, Ct et Lp) de (31,39%, 12,11%, 3,03%, 2,54% et 0,36%) respectivement.

Pour conclure, on peut dire que l'exploitation de ces approches selon un cas favorable qui répond aux exigences industrielles en termes de qualité, coûts, consommation d'énergie et productivité nous a donné la possibilité de choisir le régime optimal qui correspond à une meilleure solution d'optimisation envisagée. Par conséquent, la méthode DF basée sur l'utilisation des modèles de régression a donné des résultats très satisfaisants pour six (06) paramètres de performance avec des valeurs du (MRR) et (Az) moyennes. Les conditions de coupe optimales proposées par cette méthode peuvent être exploitées pour le tournage intermittent de finition. Cependant, lorsque le contexte d'usinage exige une vibration minimale, les conditions de coupe optimales proposées par la méthode MOORA sont prioritaires. Finalement, lorsque l'utilisateur préfère la productivité avec la maximisation du (MRR) sans tenir compte des autres performances, dans ce cas le régime de coupe proposé par la méthode NSGAI / VIKOR est privilégié.

Tableau IV.21 Régimes optimaux proposés par les quatre méthodes.

Méthodes	Solution N°	Paramètres d'entrée				Performances							
		r	Vc	f	ap	Ra	Pm	V _B	Ct	MRR	Fz	Az	Lp
DF	1	1,29	240	0,1	0,689	0,825	3282,085	0,066	211,68	274,30	82,837	20,636	108,15
MOORA	9	1,6	320	0,12	0,3	0,878	4100	0,072	229	192	110,62	15,01	109,92
VIKOR	2	0,4	280	0,12	0,6	1,034	3652	0,07	220	336	145,69	24,18	109,75
NSGA II / VIKOR	43	0,4	242,4	0,147	0,684	1,084	3679,391	0,068	217,061	405,63	159,793	29,794	108,55

Tableau IV.22 Variation en (%) des paramètres de sortie pour les quatre méthodes comparativement aux valeurs optimales trouvées.

		Performances							
		Ra	Pm	V _B	Ct	MRR	Fz	Az	Lp
Var (%)	DF	Optimale	Optimale	Optimale	Optimale	↓ 32,38%	Optimale	↑ 37,48%	Optimale
	MOORA	↑ 6,42%	↑ 24,92%	↑ 9,09%	↑ 8,18%	↓ 52,67%	↑ 33,54%	Optimale	↑ 1,63%
	VIKOR	↑ 25,33%	↑ 11,27%	↑ 6,06%	↑ 3,93%	↓ 17,17%	↑ 75,88%	↑ 61,09%	↑ 1,47%
	NSGA II / VIKOR	↑ 31,39%	↑ 12,11%	↑ 3,03%	↑ 2,54%	Optimale	↑ 92,90%	↑ 98,49%	↑ 0,36%

Augmentation: ↑

Diminution: ↓

IV.4 Conclusion

Ce chapitre a été dédié à l'optimisation multi-objective dans le contexte spécifique de l'usinage intermittent des pièces en acier AISI D3. En examinant trois cas distincts, nous avons offert aux industriels et fabricants un aperçu détaillé des performances à améliorer. Le premier cas ciblait l'optimisation de R_a , V_B et C_t , tandis que le deuxième se concentrait sur R_a , P_m , P_c , F_z et MRR . Enfin, le troisième cas englobait l'ensemble des paramètres étudiés (R_a , P_m , V_B , C_t , F_z , A_z , L_p et MRR) simultanément. Pour chaque cas examiné, différentes méthodes d'optimisation ont été utilisées : DF et GRA pour les deux premiers cas, tandis que MOORA, VIKOR, NSGAI couplé avec VIKOR et DF ont été employées pour le troisième cas. Les résultats obtenus fournissent des informations précieuses pour les ingénieurs, les fabricants et les chercheurs afin de mieux comprendre les compromis entre les différentes performances de l'usinage et de guider le processus de sélection des paramètres optimaux pour améliorer la fabrication des pièces dans ce contexte d'usinage. En outre, cette étude met en évidence le potentiel des méthodes d'optimisation multi-objectif pour résoudre des problèmes complexes dans le domaine de la fabrication, offrant ainsi des perspectives prometteuses pour l'amélioration continue des processus d'usinage et des performances des composants fabriqués.

CHAPITRE

V

**Etude du comportement vibratoire de l'outil
lors du tournage intermittent**

V.1 Introduction

Dans le processus du tournage intermittent, les vibrations sont un phénomène crucial qui peut avoir un impact significatif sur la qualité de la pièce usinée ainsi que sur la durée de vie de l'outil de coupe. Les vibrations peuvent être causées par divers facteurs, en tournage intermittent, où l'outil entre et sort périodiquement de la pièce en rotation, les vibrations peuvent être aggravées en raison des changements brusques dans les forces appliquées sur l'outil et la pièce.

Dans le contexte du tournage intermittent (TI) peu de travaux de recherche portant sur les vibrations, **D. Carou et al [9]** ont été effectués lors du (TI) de l'alliage (UNS M11917) par un outil de coupe en carbure métallique non revêtu. Les effets de l'avance (f), de la lubrification (MQL) et du type d'interruption de la forme géométrique de la pièce sur les vibrations durant l'usinage ont été évalués. Les résultats indiquent qu'une partie des vibrations dépend du débit du système MQL et de son interaction avec la vitesse d'avance, sans trouver de dépendance par rapport au type d'interruption. Un modèle de simulation est développé par **G. Zhang et al [99]** pour étudier les caractéristiques dynamiques des opérations du tournage intermittent de l'acier AISI 1040 avec les facteurs de coupe suivants ; (V_c) variant entre 600 et 1200m/min, (f) =0,3mm/rev et (a_p) =0,45mm. La charge du copeau, la vibration libre du porte-outil et la distribution de dureté non homogène dans le matériau à usiner sont incorporés dans le modèle. Les résultats démontrent qu'une augmentation de la rigidité statique de la structure du porte-outil peut contrôler le mouvement vibratoire de l'outil. La détermination de la probabilité de rupture de l'outil sous différents réglages de vitesse de broche est approuvée. D'autre part **G. Urbikain et al [100]** ont proposé un modèle de stabilité pour les vibrations dans le tournage interrompu. La méthode nécessite le calcul d'un facteur de déplacement dynamique qui dépend de la fréquence de vibration de l'outil. Pour la validation du modèle, des tests expérimentaux ont été réalisés sur de l'acier AISI 1045 en utilisant des plaquettes carrées (SNMG 120416-PR). Le modèle proposé est très pratique dans l'usinage interrompu pour les outils avec une géométrie complexe.

Dans cette étude, nous essayons de voir l'influence des conditions de coupe (r , V_c , f , a_p) sur la phase d'engagement et de déengagement de l'outil de la matière usinée. Le but est d'analyser le phénomène d'intermittence lors de l'usinage en tournage.

V.2 Présentation de la méthodologie de travail

Pour des différents essais, on a mesuré en continu le signal vibratoire le long des trois paliers, en utilisant un accéléromètre triaxial fixé près du bec de l'outil dans sa direction tangentielle. Les différentes mesures sont effectuées dans la bande de fréquence (0-6400Hz), qui couvre au moins deux fréquences propres de l'outil, voir les figures (V.1-V.9). La résolution fréquentielle $\Delta F = 1Hz$ et la résolution temporelle $\Delta t = 6,10352E - 05 (s)$, sont suffisamment fines pour permettre d'étudier de près les phénomènes physiques qui se produisent lors de l'engagement et du déengagement de l'outil de coupe de la matière usinée de chaque palier, voir figure (V.10).

L'analyse vibratoire des différentes phases des signaux mesurés dans les zones d'engagement de l'outil dans la matière, nous permet d'étudier le comportement vibratoire de l'outil au moment de son entrée en contact avec la matière, pour les différentes conditions de coupe, voir les figures (V.11-V.19). Le but est de trouver une corrélation entre les vibratoires de l'outil et l'évolution de l'usure des plaquettes utilisées dans l'usinage.

Dans les zones de dégagement de l'outil de la matière usinée, l'analyse du comportement de l'outil en vibration libre, nous permet de déterminer certaines de ses caractéristiques dynamiques, tels que le calcul du décrément logarithmique, l'amortissement structural de l'outil et ses fréquences propres. Les réponses en vibration libre de l'outil permettent, d'un côté de calculer les paramètres cités ci-dessus et d'un autre côté, l'identification expérimentale du temps de relaxation (T_r) de l'outil, qui représente la durée entre le moment de sortie de l'outil de l'usinage et le moment de son stabilisation totale, voir les figures (V.1-V.9). Le temps de relaxation du mouvement de l'outil dépend principalement des conditions de sortie de l'outil de la matière usinée, donc des conditions de coupe d'une part et du degré de l'usure (V_B) de l'outil d'autre part, autrement dit, des conditions initiales de passage de l'outil des vibrations forcées aux vibrations libre (r , V_c , f , a_p et V_B).

Dans le cas où, on fixe tous les paramètres de coupe et on mesure les signaux vibratoires de l'outil pour différentes valeurs de l'usure (V_B) variant de 0 à 0,3mm. On pense que l'état de l'usure de la plaquette aura un impact direct sur le temps de relaxation de l'outil (T_r), ce qui nous permet de le considérer comme un critère de suivi de l'évolution de l'usure des plaquettes de coupe.

En résumé, on a deux objectifs dans ce travail, dans le premier, on étudie le comportement vibratoire de l'outil dans la phase d'engagement dans la matière, ce qui permet d'optimiser son comportement vibratoire et par conséquent minimiser l'usure des plaquettes. Dans le deuxième objectif, on va essayer de trouver un critère d'évaluation de l'usure de l'outil par l'étude de son comportement vibratoire dans la zone de son dégagement de la matière usinée.

V.3 Interprétations des signaux

Le plan expérimental réalisé et étudié dans les précédents chapitres de cette thèse n'est pas bien adapté à l'analyse du phénomène d'intermittence, que l'on veut étudier par l'analyse vibratoire du comportement de l'outil lors de son engagement et dégagement dans la matière usinée, vu que dans chaque essai, plusieurs paramètres sont variés à la fois.

Afin de tirer le maximum d'information des signaux mesurés pour les différents essais, on a constaté que la variation du rapport (R) entre la profondeur de passe (a_p) et le rayon de courbure de l'outil (r), a une influence directe sur le temps de relaxation (T_r) de l'outil en vibration libre (zones de dégagements de l'outil) et le temps de stabilisation (T_s) de l'outil dans les zones d'engagements de la matière.

Sur la base des zooms d'observations des zones d'engagements et de dégagements de l'outil, présentées sur les figures (V.11-V.19), on prélève approximativement les temps de relaxations et de stabilisations sur chaque palier et pour les différents essais, voir tableau (V.1). Les analyses des différents signaux mesurés sont basées sur les valeurs des rapports ($R = \frac{a_p}{r}$).

Sur les figures (V.1), (V.2), et (V.3), où (r) est faible ($r=0,4\text{mm}$), on constate que le passage de la valeur de $R=75\%$ à $R=225\%$ provoque une augmentation significative des amplitudes de vibration des pics d'engagement de l'outil dans la matière.

Pour la figure (V.1), où le rapport $R=75\%$, le pic d'amplitude vibratoire maximale apparaît sur le premier palier. Pour la figure (V.2) où $R=150\%$, c'est -à-dire la profondeur de passe est supérieur au rayon du bec de l'outil, l'amplitude vibratoire maximale apparaît sur le

deuxième palier, alors que pour $R=225\%$, (**figure V.3**), l'amplitude vibratoire maximale apparaît sur le palier trois. Donc l'augmentation de (R) a une influence directe sur les amplitudes d'engagement de l'outil de coupe dans la matière.

Pour mieux voir ce que se produit durant l'engagement de l'outil dans la matière, on présente les zooms d'observations des zones d'engagements sur les figures (V.11), (V.12) et (V.13). Dans le cas de déengagement de l'outil de coupe, on présente sur les mêmes figures les zooms correspondants. A partir de ces zooms d'observations, on prélève (T_r) pour chaque palier et pour chaque essai, les valeurs sont présentées dans le tableau (V.1). On constate que (T_r) est influencé par le rapport (R) .

Dans le cas où les profondeurs de passe (a_p) sont inférieures au rayon du bec de l'outil (r) , on constate que le rapport (R) permet de bien expliquer le comportement vibratoire de l'outil lors de son engagement et déengagement de la matière usinée.

Sur la figure (V.5), où $R=25\%$, $(a_p=0,3\text{mm})$, très faible devant le bec de l'outil $(r=1,2\text{mm})$, on constate presque l'absence des chocs dans les zones des engagements de l'outil dans les trois paliers. Le passage de R à 50% , figure (V.6), où la profondeur de passe est égale $0,6\text{mm}$, on remarque l'augmentation de l'amplitude vibratoire du pic d'engagement du deuxième palier qui atteint $(\pm 200 \text{ m}^2/\text{s})$, ce qu'est dû à l'augmentation progressive de l'usure durant le premier palier. Pour $R=75\%$, figure (V.4), où la profondeur de passe est égale $0,9\text{mm}$, on note une augmentation croissante des amplitudes vibratoires des trois pics d'engagements, où sa valeur maximale atteint $(\pm 260 \text{ m}^2/\text{s})$ sur le troisième palier.

Malgré la variation de (V_c) et (f) dans les trois essais, on constate que le rapport (R) a une influence significative sur les amplitudes de vibration des pics d'engagements de l'outil dans la matière. L'augmentation de (R) est proportionnelle avec l'augmentation du niveau vibratoire sur les pics d'engagements (voir les zooms des zones d'entrées de chaque palier figures (V.11-V.19). Les valeurs de (R) sont aussi proportionnelle avec les valeurs efficaces calculées pour les différents signaux (RMS, Root Mean Square), voir tableau (V.1), ce qui conforte notre choix du rapport (R) pour faire une analyse vibratoire des zones d'engagements et de déengagements de l'outil de la matière usinée.

D'autre part, l'analyse des zooms des signaux de déengagement de l'outil montre que le temps de relaxation (T_r) est proportionnel avec (R) , voir le tableau (V.1). Cela s'explique par, plus la surface de contact de l'outil avec la matière usinée est importante plus le temps de l'oscillation de l'outil après sa libération est long. Le temps de relaxation (T_r) passe de $0,22 \text{ s}$ pour $R=25\%$ à $0,53 \text{ s}$ pour $R=50\%$, et enfin à $1,04 \text{ s}$ pour $R=75\%$.

Pour les figures (V.7), (V.8) et (V.9), le rayon du bec de l'outil $(r=1,6\text{mm})$, largement supérieur aux profondeurs de passe des trois essais. Pour $(a_p=0,3\text{mm})$ très faible devant le rayon, la valeur de $R=18,75\%$, on constate l'absence totale des chocs d'engagement de l'outil sur les différents paliers, malgré que (V_c) et (f) sont élevées, figure (V.9), ce qui confirme les résultats précédents.

Le passage de R à $37,5\%$, pour $(a_p=0,6\text{mm})$, figure (V.7), provoque une augmentation de l'amplitude vibratoire du pic d'engagement du palier (2), qui atteint $(\pm 300 \text{ m}^2/\text{s}^2)$, malgré la diminution de (V_c) . Enfin, pour $R=56,25\%$, pour une profondeur de passe $a_p=0,9\text{mm}$, figure (V.8), l'amplitude de vibration du pic d'engagement sur le palier (3) atteint $(\pm 360 \text{ m}^2/\text{s})$. En conclusion, l'augmentation du rapport (R) provoque une augmentation progressive des

amplitudes des pics d'engagement, du premier au troisième palier respectivement. De même pour ces essais, les valeurs de (R) sont proportionnelles avec les valeurs des RMS, voir tableau (V.1).

Pour les mêmes essais, pour les zones de dégagements de l'outil, figures (V.11-V.19), on constate que le temps de relaxation de l'outil en vibration libre passe de 0,29 s pour $R=18,75\%$ à 0,46 s pour $R=37,5\%$ et enfin atteint 0,68 s pour $R=56,25\%$.

V.4 Signaux mesurés pour les 9 essais

Les différents signaux mesurés durant toutes les opérations d'usinage le long des trois paliers, par un accéléromètre triaxial fixé près du bec de l'outil dans sa direction tangentielle, sont présentés sur les figures (V.1-V.9).

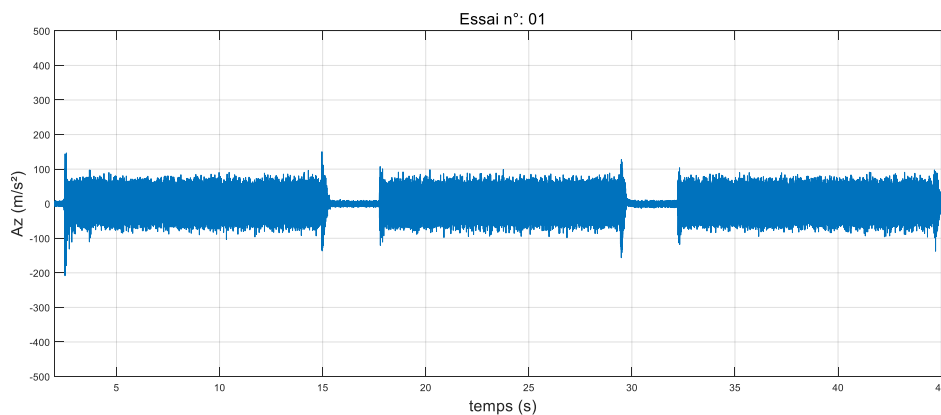


Figure V.1 Signal de vibration de l'essai n° :01.

RMS= 20,53 m/s², Vc=240m/min, f=0,08mm/rev, ap=0,3mm, r=0,4mm

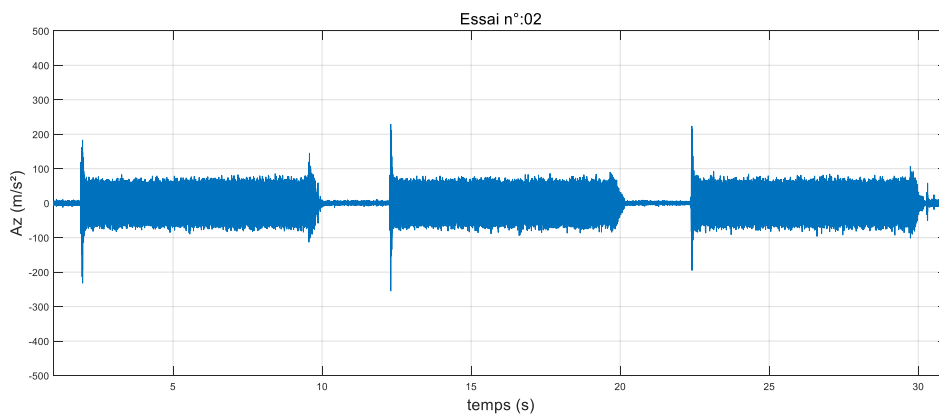


Figure V.2 Signal de vibration de l'essai n° :02.

RMS=24,18m/s², Vc=280m/min, f=0,12mm/rev, ap=0,6mm, r=0,4mm

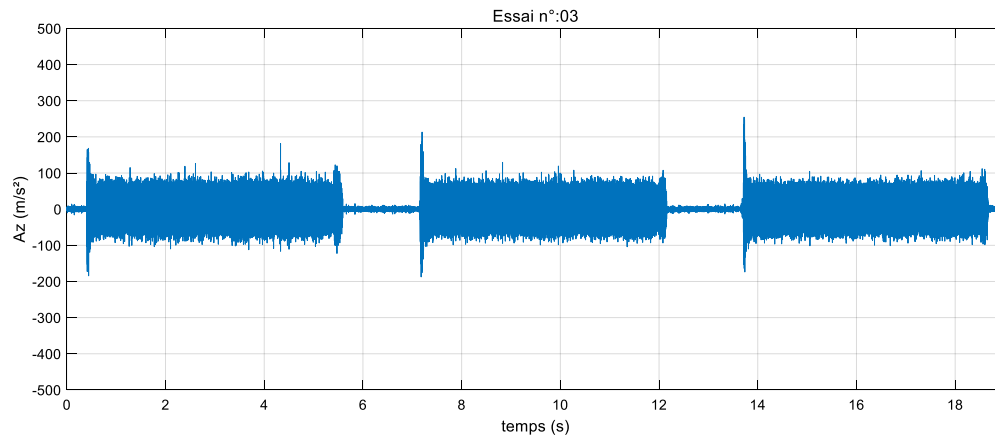


Figure V.3 Signal de vibration de l'essai n° :03.

RMS=28,50m/s², Vc=320m/min, f=0,16mm/rev, ap=0,9mm, r=0,4mm

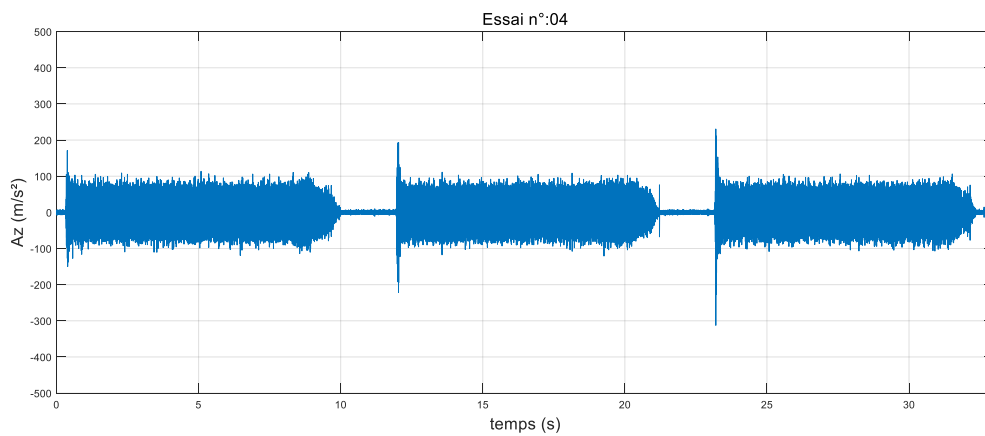


Figure V.4 Signal de vibration de l'essai n° :04.

RMS=27.19m/s², Vc=240m/min, f=0,12mm/rev, ap=0,9mm, r=1,2mm

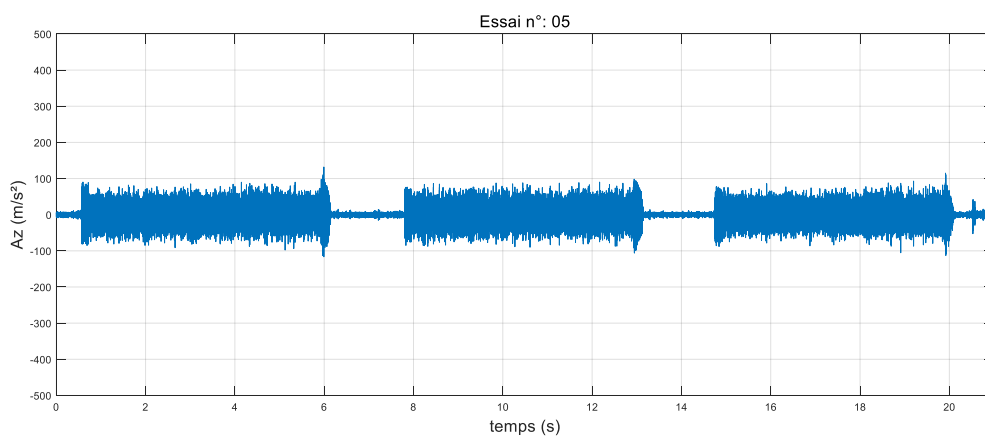


Figure V.5 Signal de vibration de l'essai n° :05.

RMS=18.45m/s², Vc=280m/min, f=0,16mm/rev, ap=0,3mm, r=1,2mm

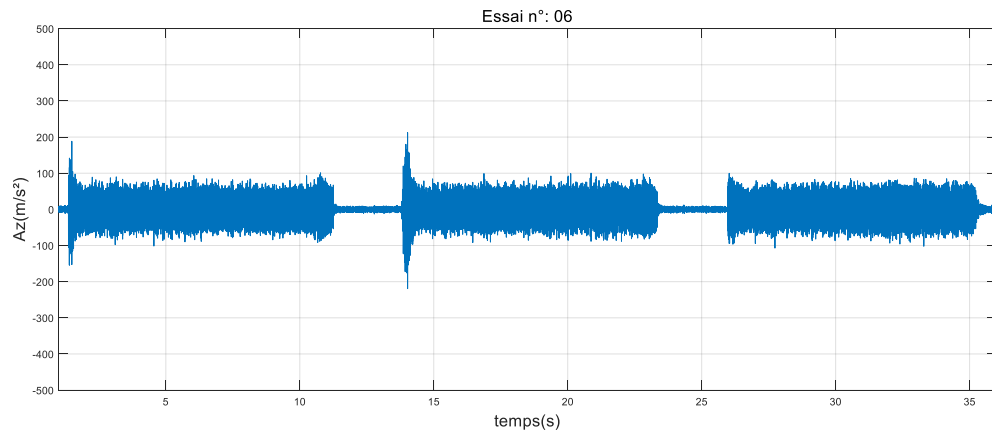


Figure V.6 Signal de vibration de l'essai n° :06.

RMS=19,89m/s², Vc=320m/min, f=0,08mm/rev, ap=0,6mm, r=1,2mm

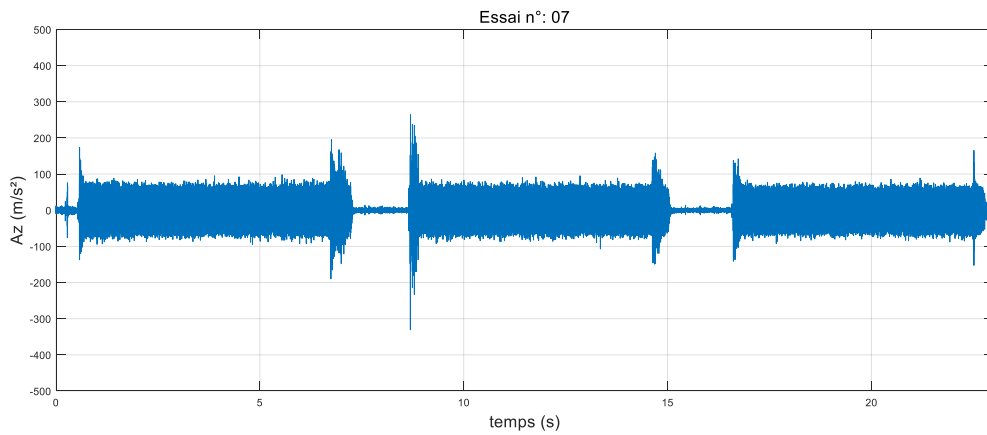


Figure V.7 Signal de vibration de l'essai n° :07.

RMS=25,55m/s², Vc=240m/min, f=0,16mm/rev, ap=0,6mm, r=1,6mm

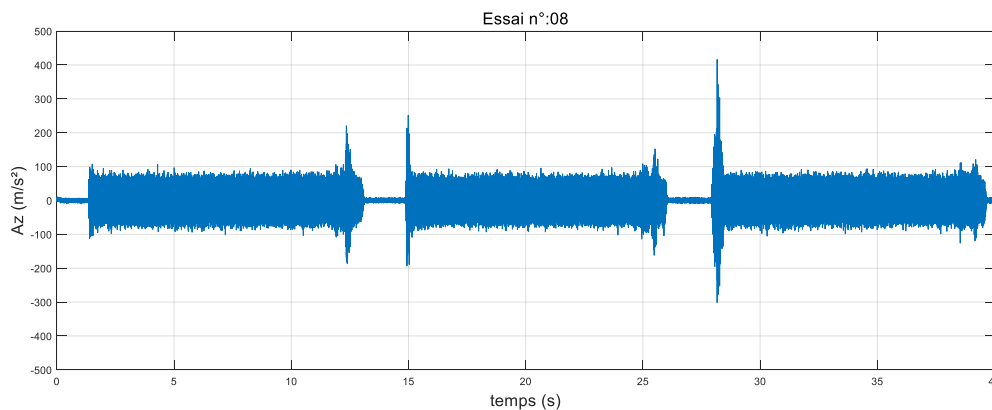


Figure V.8 Signal de vibration de l'essai n° :08.

RMS=25.96m/s², Vc=280m/min, f=0,08mm/rev, ap=0,9mm, r=1,6mm

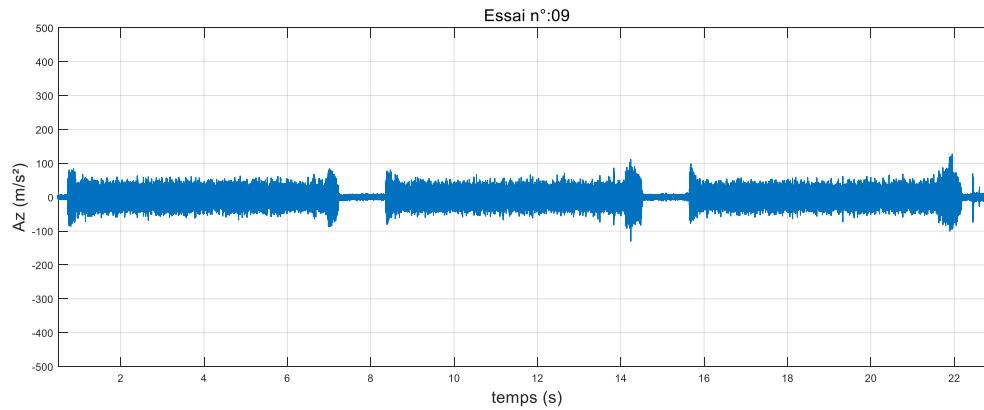


Figure V.9 Signal de vibration de l'essai n° :09.

RMS=15,01m/s², Vc=320m/min, f=0,12mm/rev, ap=0,3mm, r=1,6mm

V.5 Zooms sur les engagements et les déagements lors du tournage intermittent

Les zones d'engagements et de déagements de l'outil de la matière usinée, pour chaque palier sont présentées sur la figure V.10. Afin d'étudier de près le comportement vibratoire de l'outil au moment d'entrer et de sortie de chaque palier, nous présentons sur les figures (V.11 – V.19), les différents zooms.

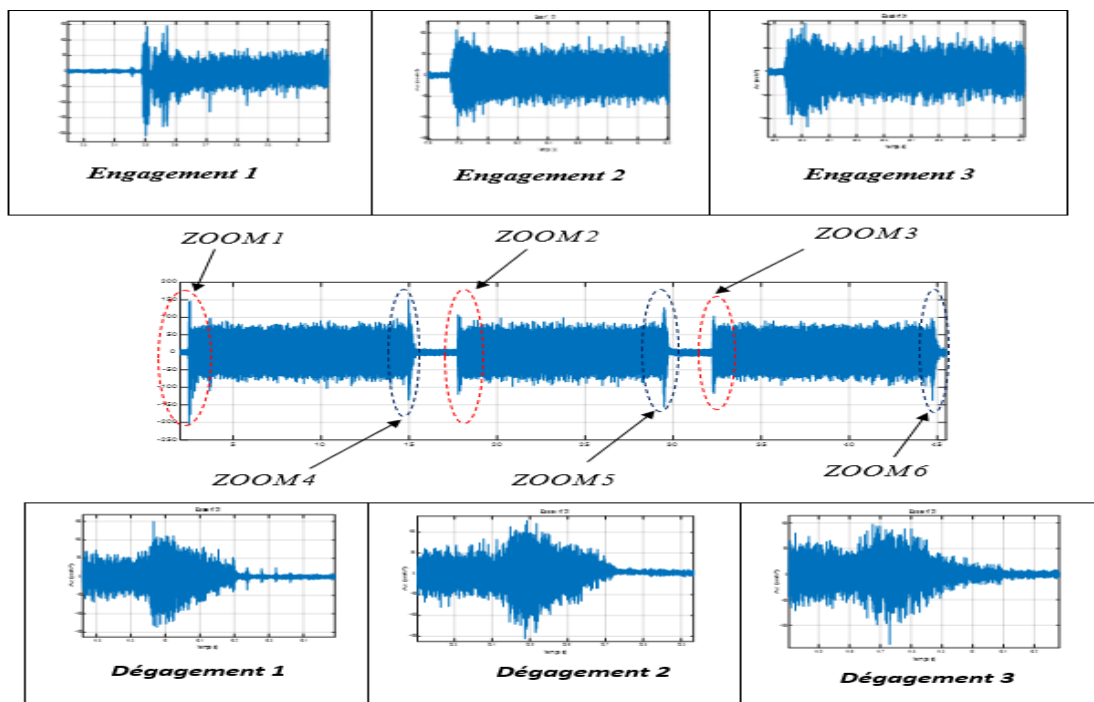


Figure V.10 Engagements et déagements lors du tournage intermittent.

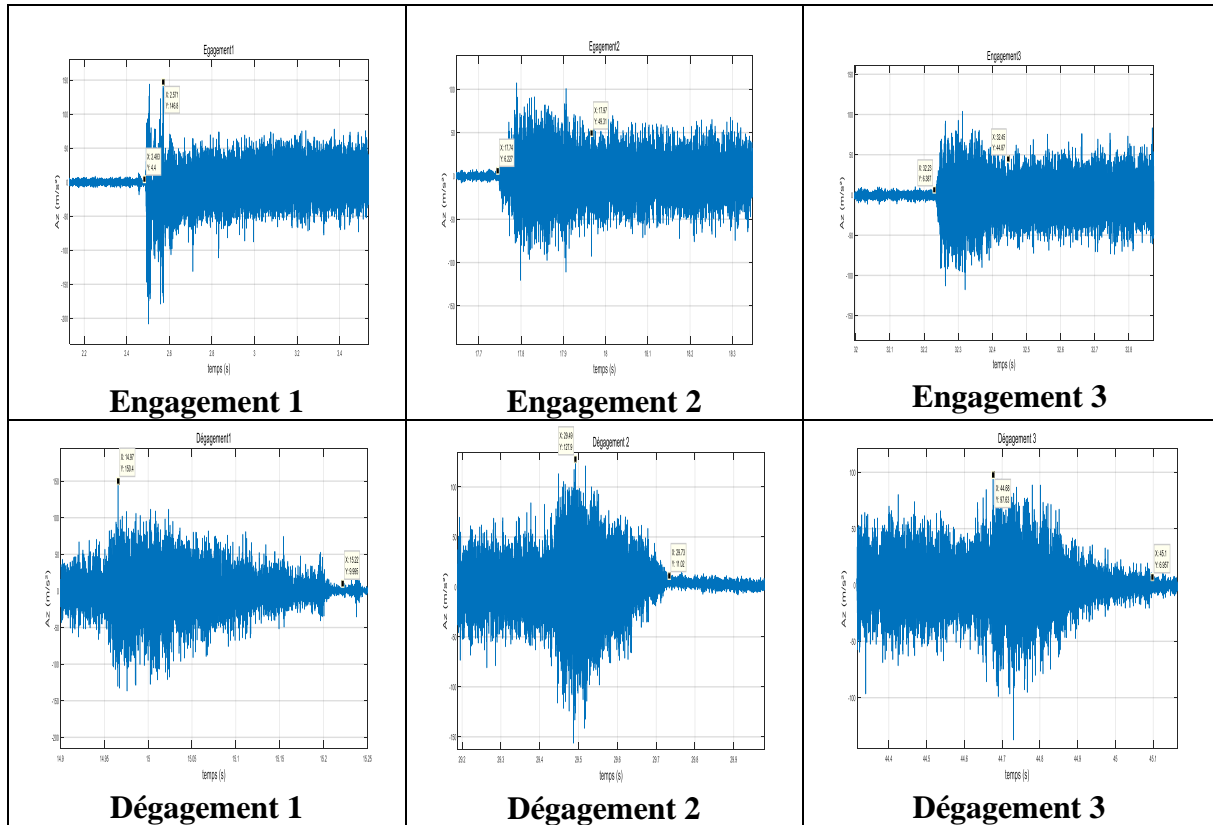


Figure V.11 Engagements et déagements de l'essai n° :01.

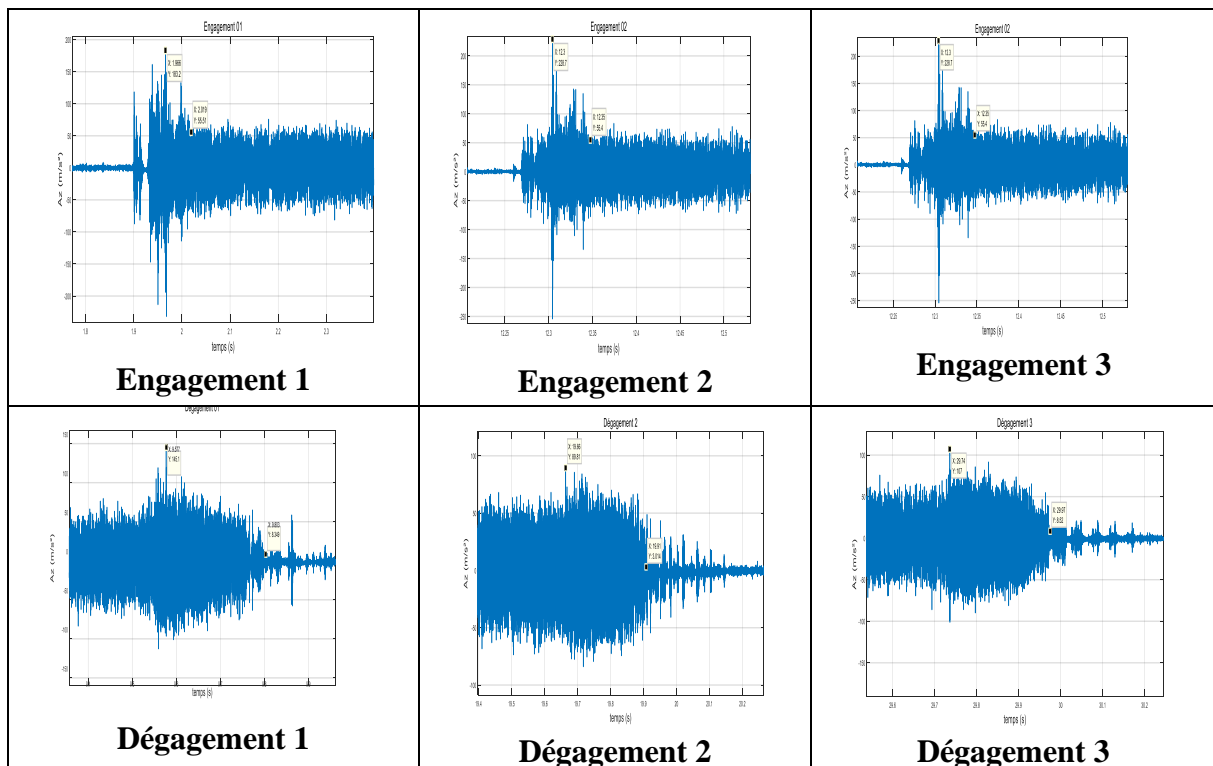


Figure V.12 Engagements et déagements de l'essai n° :02.

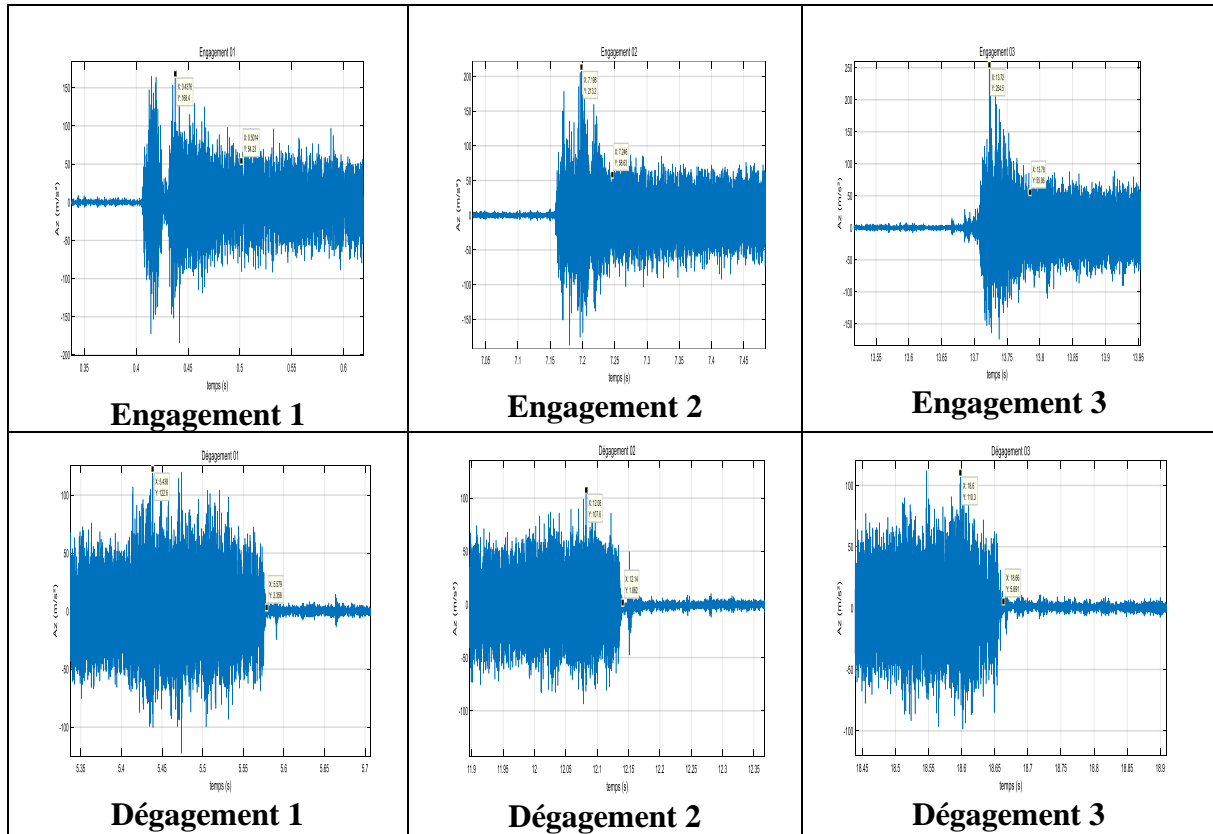


Figure V.13 Engagements et dégagements de l'essai n° :03.

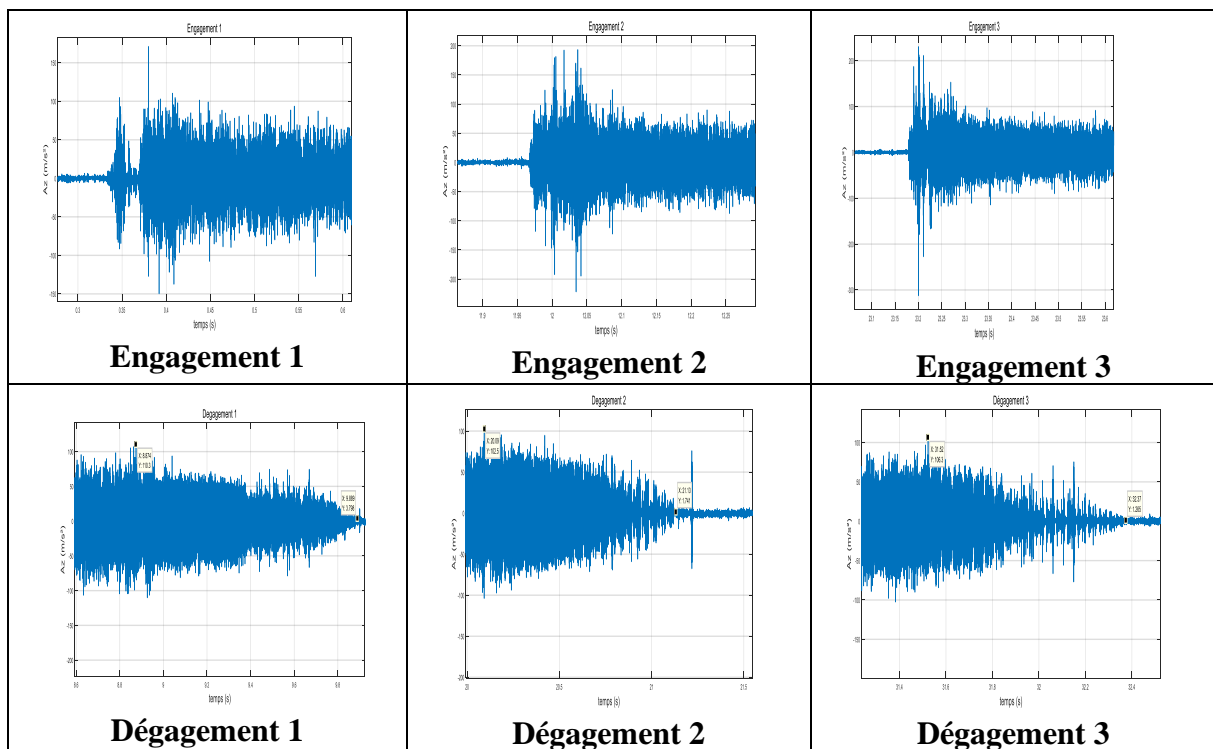


Figure V.14 Engagements et dégagements de l'essai n° :04.

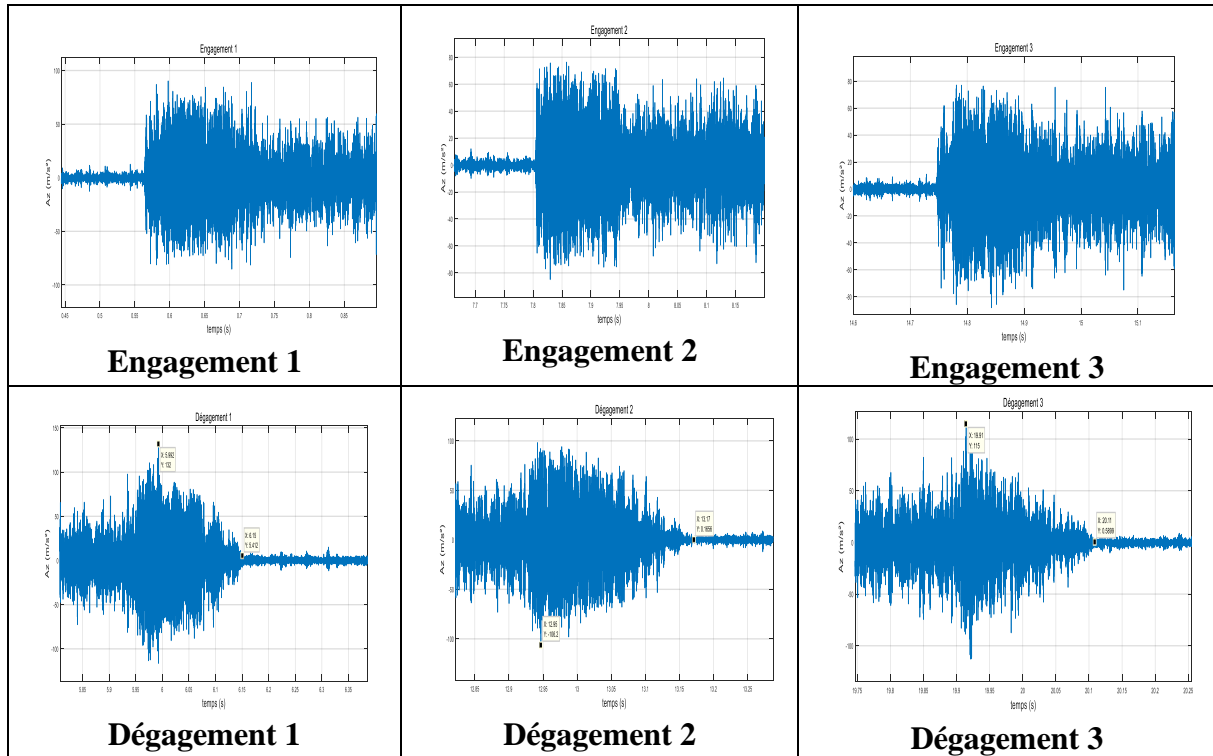


Figure V.15 Engagements et déagements de l'essai n° :05.

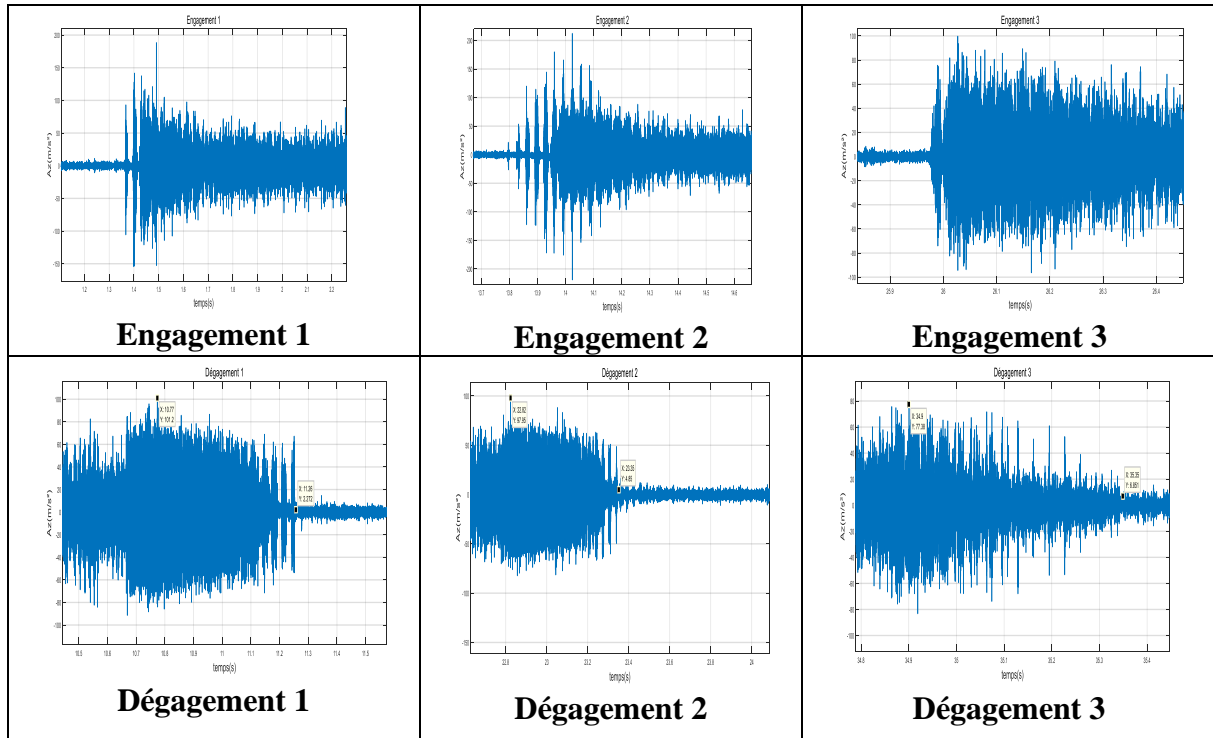


Figure V.16 Engagements et déagements de l'essai n° :06.

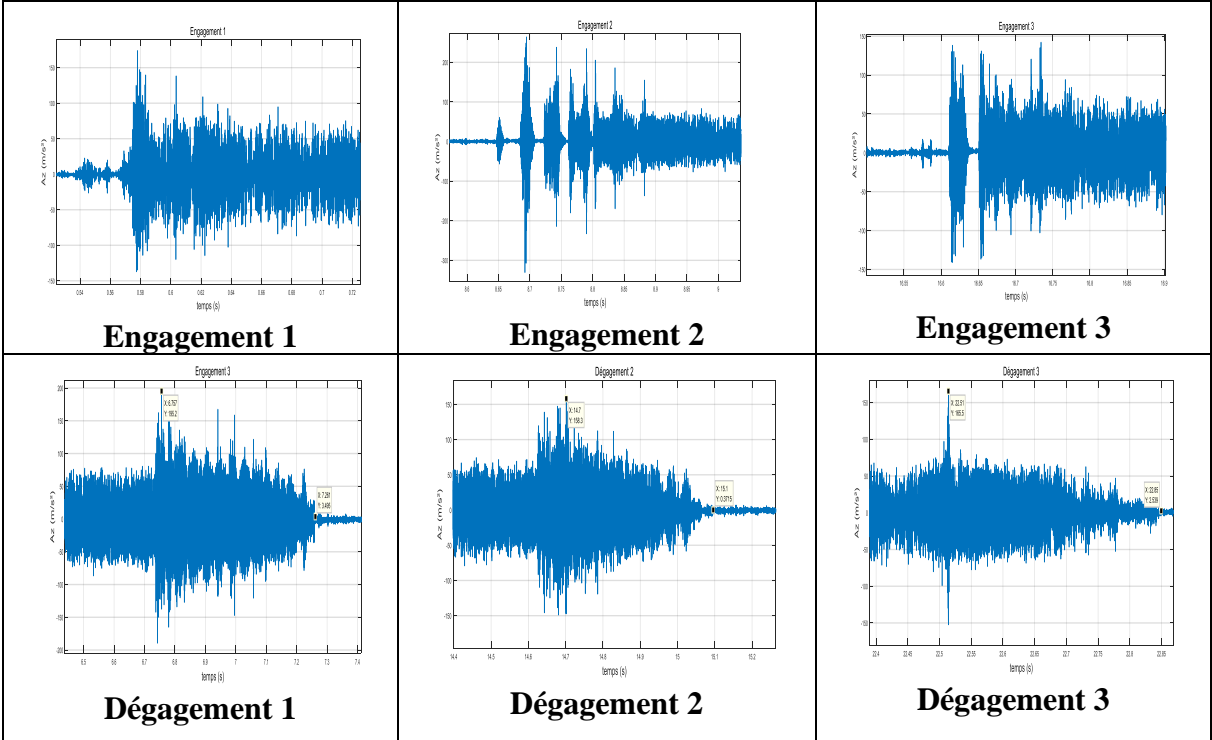


Figure V.17 Engagements et déagements de l'essai n° :07.

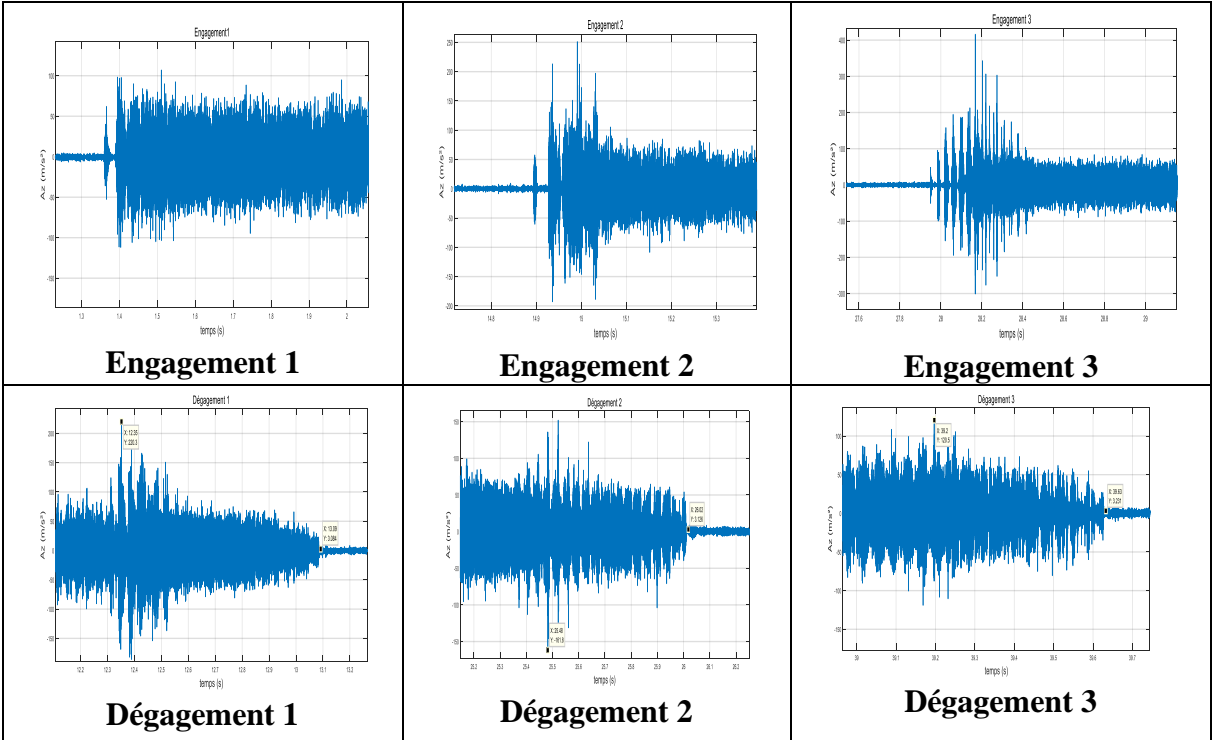


Figure V.18 Engagements et déagements de l'essai n° :08.

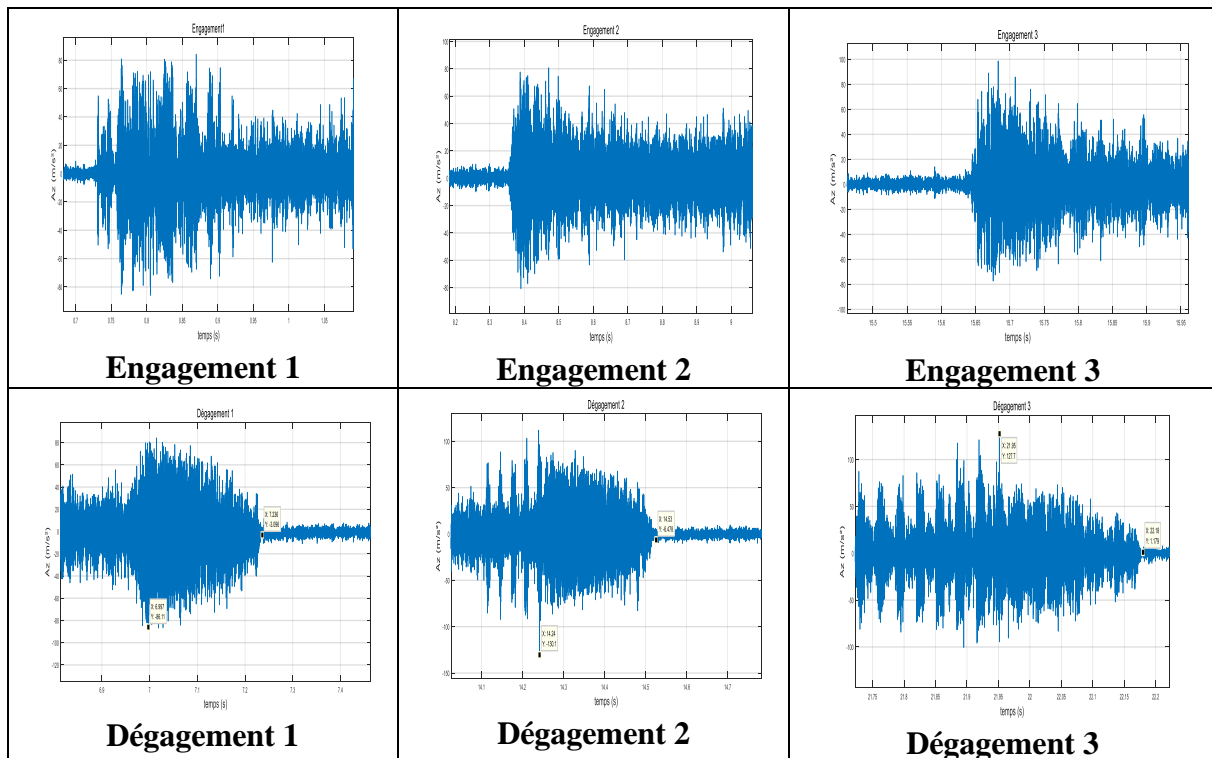


Figure V.19 Engagements et déagements de l'essai n° :09.

V.6 Temps de relaxations et de stabilisations

Les différents temps de relaxations et de stabilisations sont prélevés directement des différents zooms sur les zones d'engagements et de déagements pour les neuf essais, voir les figures V.20-21). Les résultats sont présentés dans le tableau (V.1).

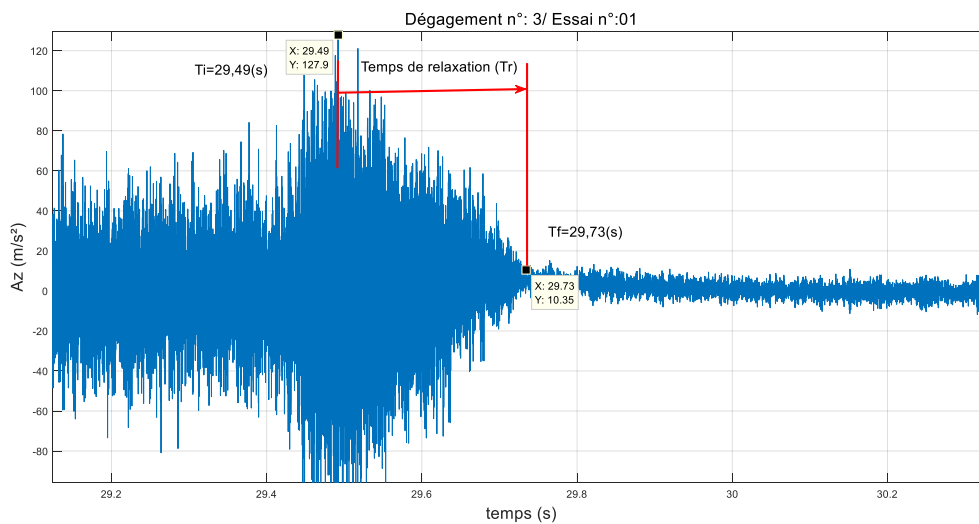


Figure V.20 Zoom sur la zone de déagement de l'outil de la matière usinée.

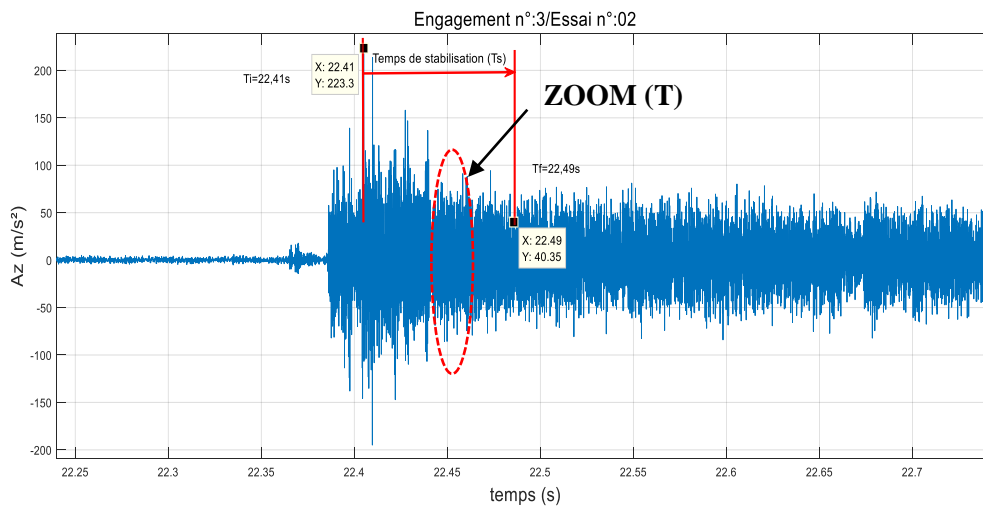


Figure V.21 Zoom sur la zone d'engagement de l'outil dans la matière usinée.

V.7 Phénomène de Broutage

Lors de l'usinage par différents procédés peut apparaître le phénomène de broutage, qui peut être dû soit : à un outil défectueux, mauvais procédés de fixation de la pièce, à la présence de jeu dans certains organes de la machine où à un mauvais réglage de cette dernière. Dans notre cas le phénomène de broutage apparaît d'une manière très claire sur palier (2) de l'essai (6) et le palier (3) de l'essai (8), voir les zooms sur les figures (V.22) et (V.23), où on constate le premier cas l'apparition d'une périodicité d'environ 0,033s correspondant à la fréquence de rotation de la broche de 30,3 Hz (1820 tr/min). Pour le deuxième cas, l'apparition d'une périodicité d'environ 0,036 s correspondant à la fréquence de rotation de la broche de 27,77 Hz (1664 tr/min). Donc, on est en présence d'un jeu dans la broche, ce jeu permet à la pièce de s'écarter imperceptiblement de la pointe de l'outil, de ce fait l'outil glissent sur la pièce durant une partie de sa rotation, puis il revient à nouveau, occasionnant le broutage. Pour résoudre ce problème, il faut procéder au réglage de la butée de la broche.

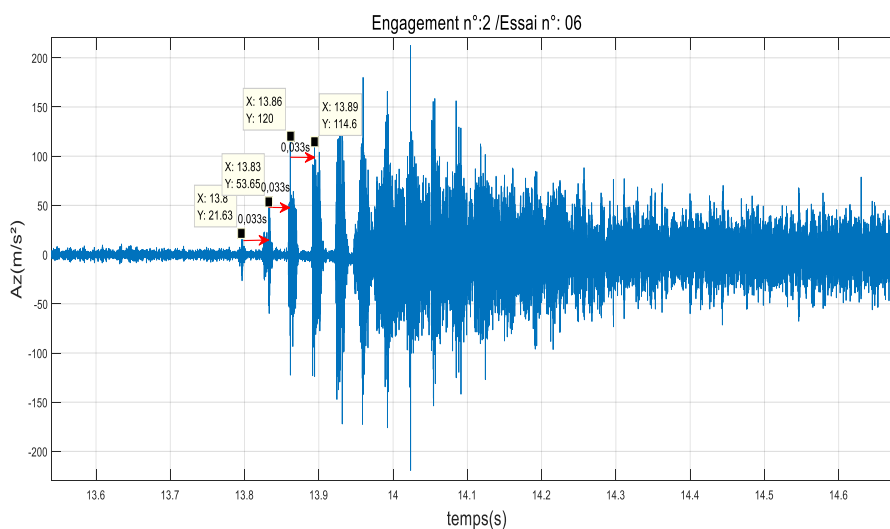


Figure V.22 Zoom sur l'engagement du palier 2 de l'essai n° :6.

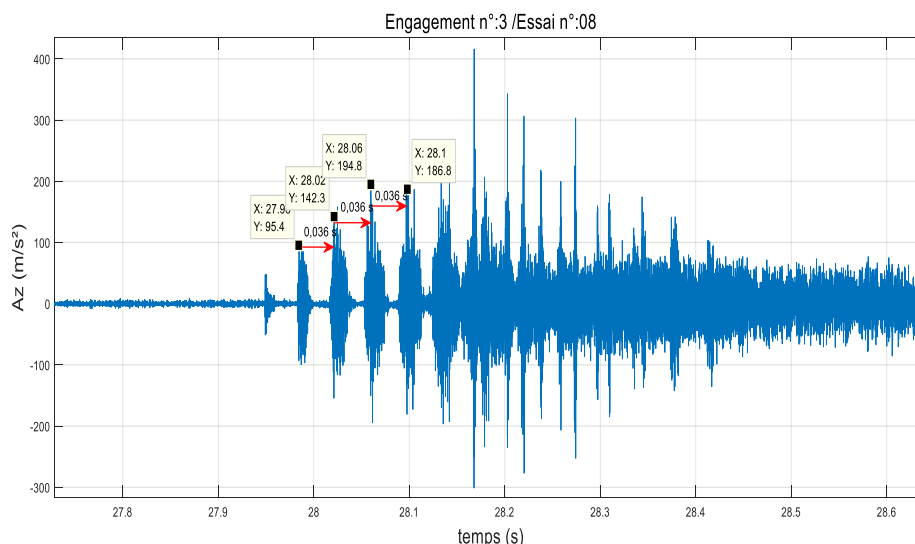


Figure V.23 Zoom sur l'engagement du palier 3 de l'essai n° :8.

Tableau V.1 Temps de relaxation et de stabilisation.

Essai n° :	Temps de relaxation (T_r) (s)			Temps de stabilisation (T_s) (s)			R=ap/r (%)	RMS (m/s^2)
	t1	t2	T_r	t1	t2	T_s		
1	14,99	15,22	0,230	2,571	2,613	0,042	75	20,53
	29,49	29,73	0,240	17,79	17,85	0,060		
	44,73	45,04	0,310	32,31	32,38	0,070		
2	9,577	9,803	0,226	1,927	1,99	0,063	150	24,18
	19,66	19,91	0,250	12,3	12,37	0,070		
	29,7	29,97	0,270	22,41	22,49	0,080		
3	5,438	5,579	0,141	0,4287	0,4833	0,054	225	28,50
	12,08	12,155	0,075	7,198	7,28	0,082		
	18,55	18,67	0,120	13,72	13,81	0,090		
4	8,874	9,886	1,012	0,3798	0,6553	0,2755	75	27,19
	20,09	21,13	1,040	12,02	12,31	0,290		
	31,3	32,37	1,070	23,2	23,53	0,330		
5	5,933	6,15	0,217	0,5977	0,7125	0,115	25	18,45
	12,95	13,17	0,220	7,858	7,97	0,112		
	19,88	20,11	0,230	14,78	14,91	0,130		
6	10,77	11,26	0,490	1,402	1,663	0,261	50	19,89
	22,82	23,35	0,530	14,02	14,27	0,250		
	34,8	35,34	0,540	26,03	26,33	0,300		
7	6,75	7,161	0,411	0,5779	0,653	0,075	37,5	25,55
	14,6	15,07	0,470	0,695	0,771	0,076		
	22,35	22,85	0,500	16,62	16,71	0,090		
8	12,37	12,98	0,610	1,395	1,563	0,168	56,25	25,96
	25,4	26,02	0,620	14,99	15,2	0,210		
	38,8	39,63	0,830	28,17	28,44	0,270		
9	6,997	7,236	0,239	0,8695	0,9096	0,040	18,75	15,01
	14,24	14,53	0,290	8,388	8,45	0,062		
	21,85	22,18	0,330	15,68	15,75	0,070		

V.8 Détermination des caractérisations dynamique de l'outil

On peut modéliser l'outil de coupe en vibrations discrétisées par un système à un degré de liberté : une masse (m), un ressort de raider (k) et d'amortisseur (c). Les efforts de coupe sont représentés au second membre de l'équation de mouvement forcé (Eq. V.1). L'équation du mouvement d'un système simple masse-ressort avec amortissement, qui peut d'écrire :

$$m\ddot{v}(t) + c\dot{v}(t) + kv(t) = p(t) \tag{Eq. V.1}$$

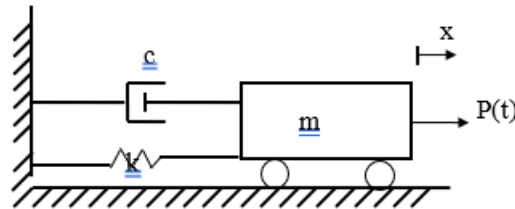


Figure V.24 Système élémentaire à un degré de liberté.

V.8.1 Résolution de l'équation du mouvement en vibration libre amortie

La solution de l'équation en vibration libre est obtenue en annulant le second membre de l'équation (Eq. V.1) :

$$m\ddot{v}(t) + c\dot{v}(t) + kv(t) = 0 \tag{Eq. V.2}$$

Les mouvements du système en l'absence de changement sont appelés oscillations libres. La solution d'équation (Eq. V.2) s'écrit :

$$v(t) = Ge^{st} \tag{Eq. V.3}$$

En substituant cette expression dans l'équation (Eq. V.2), on obtient :

$$(ms^2 + cs + k)Ge^{st} = 0 \tag{Eq. V.4}$$

En simplifiant par mGe^{st} et en posant :

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \tag{Eq. V.5}$$

L'équation (Eq. V.4) devient :

$$s^2 + \frac{c}{m}s + \omega^2 = 0 \tag{Eq. V.6}$$

La valeur de s calculée à partie de cette équation dépend de la valeur de c . Le type de mouvement représente par l'équation (Eq. V.6) dépendra donc de l'amortissement présent dans le système.

$$s = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \omega^2} \tag{Eq. V.7}$$

Trois types de mouvements sont présents dans cette expression, suivant que la quantité sous le radical est positive, négative ou nulle.

V.8.2 Système sous-amortis

Si l'amortissement est inférieur à l'amortissement critique, il est évident d'après (Eq. V.7) que $c < 2 m \omega$, et le terme sous le radical de l'équation (Eq. V.7) est donc négatif.

$$\xi = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2 m \omega} \quad \xi: \text{Coefficient d'amortissement}$$

$$\text{L'équation (Eq. V. 7) devient } s = -\xi \omega \pm \sqrt{(\xi \omega)^2 - \omega^2} \quad \text{(Eq. V.8)}$$

$$s = -\xi \omega \pm i \omega_D \quad \text{(Eq. V.9)}$$

$$\text{avec } \omega_D = \omega \sqrt{1-\xi^2} \quad \text{(Eq. V.10)}$$

ω_D : Pseudo fréquence angulaire en oscillations amorties.

La réponse d'un système sous amorti en oscillations libres peut être calculée en reportant l'équation (Eq. V.9) dans l'équation (Eq. V.3) :

$$v(t) = e^{-\xi \omega t} (G_1 e^{i \omega_D t} + G_2 e^{-i \omega_D t}) \quad \text{(Eq. V.11)}$$

Le terme entre parenthèses représente une oscillation harmonique simple.

$$v(t) = e^{-\xi \omega t} (A \sin \omega_D t + B \cos \omega_D t) \quad \text{(Eq. V.12)}$$

En fin, en introduisant les conditions initiales $v(0)$ et $\dot{v}(0)$, on peut calculer les constantes de l'équation (Eq. V.12).

$$v(t) = e^{-\xi \omega t} \left(\frac{\dot{v}(0) + v(0) \xi \omega}{\omega_D} \sin \omega_D t + v(0) \cos \omega_D t \right) \quad \text{(Eq. V.13)}$$

Cette réponse peut également s'écrire sous la forme d'un vecteur tournant :

$$v(t) = \rho e^{-\xi \omega t} \cos (\omega_D t - \varphi) \quad \text{(Eq. V.14)}$$

$$\text{Où } \rho = \left\{ \left[\frac{\dot{v}(0) + v(0) \xi \omega}{\omega_D} \right]^2 + [v(0)]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \text{(Eq. V.15)}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\dot{v}(0) + v(0) \xi \omega}{\omega_D v(0)}$$

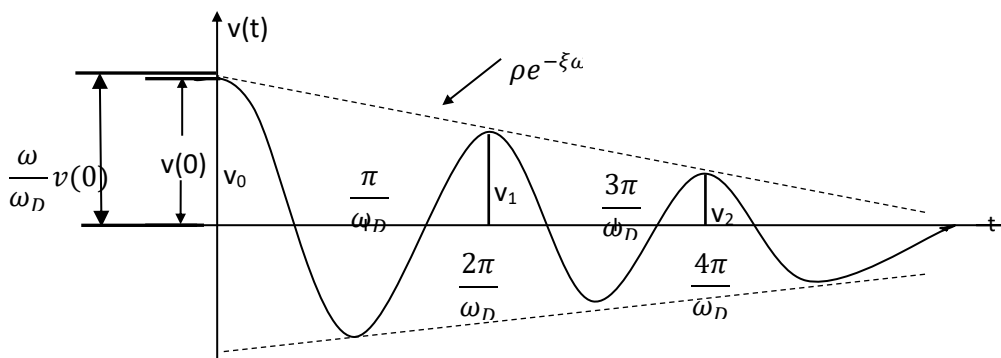


Figure V.25 Réponse en oscillation libre d'un système sous-amorti.

La figure (V.25) représente un tracé de la réponse d'un système sous-amorti à un déplacement initial non nul $v(0)$, mais une vitesse initiale nulle $\dot{v}(0) = 0$.

* Considérons deux pics positifs successifs de la réponse représentée à la figure (V.25) :

v_n et v_{n+1} . De l'équation (Eq. V.14), on tire le rapport des amplitudes de ces deux pics :

$$\frac{v_n}{v_{n+1}} = \exp\left(2\pi\xi\frac{\omega}{\omega_D}\right) \quad (\text{Eq. V.16})$$

En prenant le logarithme népérien des deux nombres de cette équation, on obtient le décrement logarithmique δ .

$$\delta \equiv \ln \frac{v_n}{v_{n+1}} = 2\pi\xi \frac{\omega}{\omega_D} \quad (\text{Eq. V.17})$$

Soit avec l'équation (Eq. V.17):
$$\delta = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (\text{Eq. V.18})$$

Pour de faible amortissement l'équation (Eq. V.18) peut s'approcher par :

$$\delta = 2\pi\xi \quad (\text{Eq. V.19})$$

On peut alors développer l'équation (Eq. V.16) en série :

$$\frac{v_n}{v_{n+1}} = e^\delta \approx e^{2\pi\xi} = 1 + 2\pi\xi + \frac{(2\pi\xi)^2}{2!} + \dots \quad (\text{Eq. V.20})$$

$$\text{Donc : } \xi \approx \frac{v_n - v_{n+1}}{2\pi v_{n+1}} \quad (\text{Eq. V.21})$$

V.8.3 Détermination expérimentale du décrement logarithmique

En prenant un zoom sur le zoom de la figure (V.26) pour prendre les amplitudes de deux pics successifs et la période d'oscillation de l'outil en vibration libre.

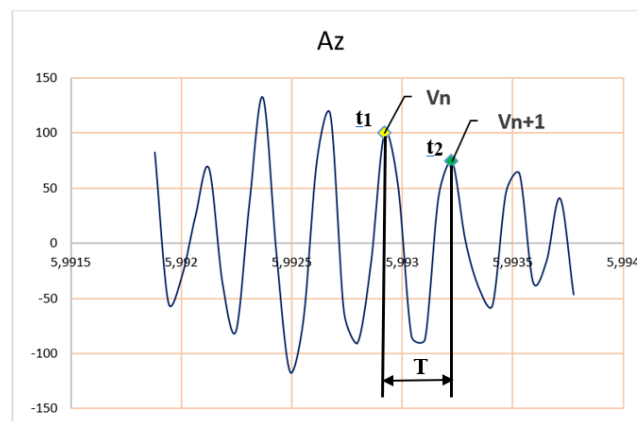


Figure V.26 Zoom dans la zone de dégagement.

- **Décrement logarithmique (δ_i)** : Le décrement logarithmique est calculé par la formule :

$$\delta_i = \ln\left(\frac{V_n}{V_{(n+1)}}\right)$$

V_n : l'amplitude a l'instant (t1) ;

V_{n+1} : l'amplitude a l'instant (t2) ;

▪ **Coefficient d'amortissement (ξ) :**

Il peut être calculé en fonction du décrement logarithmique (Eq. V.19) ou par (Eq. V.21).

▪ **Fréquence propre de l'outil de coupe : $F = \frac{1}{T}$ (Hz)**

A partir des différents zooms sur les zones de dégagement de l'outil, figures (V.11-V.19), on calcul les différents coefficients d'amortissement et les fréquences propres de l'outil. Les résultats sont reportés dans le tableau (V.2). On constate que dans la plupart des essais la fréquence propre dominante de l'outil, c'est sa première fréquence propre dans la direction tangentielle environ 4100 Hz, voir [101].

Tableau V.2 : Période, fréquence propre, décrement et coefficient d'amortissement.

Essai n°	Palier n°	δ	ξ	T (s)	F (Hz)
Essai 1	Palier1	0,5855203	0,0932357	0,0001831	5461,4964
	Palier2	0,9353845	0,1489466	0,0002441	4096,0105
	Palier 3	0,5081032	0,0809082	0,0002383	4196,6729
Essai 2	Palier 1	0,1939901	0,0308901	0,0002441	4096,0256
	Palier 2	0,6850998	0,1090923	0,0002441	4095,8427
	Palier 3	0,0635017	0,0101117	0,0002441	4096,0256
Essai 3	Palier 1	0,1182176	0,0188245	0,0002441	4095,9937
	Palier 2	0,5573321	0,0887472	0,0002441	4096,0105
	Palier 3	0,4415765	0,0703147	0,0002441	4095,8427
Essai 4	Palier 1	0,738083	0,1175291	0,0002441	4095,9937
	Palier 2	0,6436249	0,102488	0,0002383	4196,6729
	Palier 3	0,313024	0,0498446	0,0002441	4095,9937
Essai 5	Palier 1	0,1288589	0,0205189	0,0001831	5461,3473
	Palier 2	0,6973505	0,1110431	0,0002441	4096,0105
	Palier 3	0,1734381	0,0276175	0,0002383	4196,6729
Essai 6	Palier 1	0,0994033	0,0158285	0,0002441	4096,0105
	Palier 2	0,6554177	0,1043659	0,0001831	5461,4964
	Palier 3	0,1475572	0,0234964	0,0002383	4196,6729
Essai 7	Palier 1	1,0548571	0,1679709	0,0001831	5461,3473
	Palier 2	1,1283028	0,1796661	0,0001831	5461,1982
	Palier 3	0,2801798	0,0446146	0,0001831	5461,1982
Essai 8	Palier 1	0,9766253	0,1555136	0,0002387	4189,7978
	Palier 2	0,5215116	0,0830432	0,0002441	4096,0105
	Palier 3	0,0369119	0,0058777	0,0002387	4189,7978
Essai 9	Palier 1	0,216597	0,03449	0,0002441	4095,9937
	Palier 2	0,6282889	0,100046	0,0002441	4096,0105
	Palier 3	0,1910977	0,0304296	0,0002441	4096,0105

V.9 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons étudié le phénomène d'intermittence lors du tournage de l'acier AISI D3, en s'appuyant sur une analyse vibratoire dans les zones d'engagements et de dégagements de l'outil de la matière usinée. Malgré que le plan expérimental n'ai pas très favorable à l'étude de ce phénomène, néanmoins, nous avons proposé un indicateur (R) obtenu par le calcul du rapport entre la profondeur de passe et le rayon du bec de l'outil. En utilisant (R) pour l'analyse des différents signaux, nous avons montré que :

- Le rapport (R) est proportionnel au temps de relaxation de vibration libre de l'outil lorsqu'il quitte la zone d'usinage,
- Le rapport (R) est aussi proportionnel au temps de stabilisation de l'outil lorsqu'il s'engage dans la zone d'usinage,
- Le Rapport (R) proposé est proportionnel avec la valeur efficace du signal (RMS) pour tous les signaux mesurés,
- On a montré l'existence du phénomène de broutage, principalement dans le palier (2) de l'essai (6) et le palier (3) de l'essai (8), qui est dû à la présence d'un jeu dans la broche, ce qui provoque le glissement de l'outil sur la pièce durant une partie de sa rotation. Dans ces zones de glissement l'accéléromètre enregistre l'absence d'usinage.

Pour une étude plus approfondie du phénomène d'intermittence, on doit fixer tous les paramètres de coupe (V_c , f , a_p et r) et on mesure les signaux vibratoires de l'outil pour différentes valeurs de l'usure (V_B) variant de 0 à 0.3mm. D'autres part pour voir l'influence de l'intermittence, il faut que les interruptions dans l'opération d'usinage doivent être liées à la vitesse de coupe, donc réalisées sur la direction circonférentielle de la pièce et non pas dans la direction axiale. Dans ce cas-là, on voit l'influence de l'usure des plaquettes sur le temps de relaxation de l'outil.

Conclusion générale

Le travail de recherche réalisé dans le cadre de cette thèse de doctorat s'intéresse à l'évaluation des paramètres de performance à savoir ; l'usure, la rugosité de surface, la température de coupe, les vibrations, l'intensité sonore, l'effort de coupe et la puissance consommée lors de l'usinage intermittent de l'acier AISI D3. Une analyse statistique suivie par une modélisation des paramètres de sortie a été réalisée. Enfin, une étude visant à optimiser les paramètres de coupe est menée en utilisant plusieurs approches, telles que DF, GRA, VIKOR et NSGAII couplé avec VIKOR. Les résultats obtenus ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

L'application de la modélisation par (RSM) sur les paramètres de coupe de rugosité de surface (R_a), la puissance totale consommée (P_m), la puissance de coupe (P_c), l'effort de coupe (F_z), la température (C_t), l'usure (V_B), les vibration (A_z), l'intensité sonore (L_p), en fonction de quatre paramètres de coupe qui varient en trois niveaux, en utilisant une plaquette de coupe en carbure métallique revêtues de (CVD), lors d'essais du tournage intermittent à sec, a conduit aux conclusions suivantes :

- ✓ La flexibilité que présente le plan d'expérience de Taguchi en termes de temps alloué ainsi que le coût des expériences, dans notre cas d'étude (L_9) 3^4 , quatre (4) facteurs d'entrée variant entre trois (3) niveaux, afin de mesurer sept (7) performance technologique, lors de l'usinage intermittent, présente un avantage certain.
- ✓ L'ANOVA de (R_a) montre que le facteur (f) est l'élément dominant, avec une contribution de 57,86%. Cependant, le facteur (r) affiche une influence importante, contribuant de 29,63%. Par ailleurs, le facteur (Vc), contribuant de 6,53%. En revanche, et le facteur (ap) n'a pas d'effet significatif sur (R_a).
- ✓ L'ANOVA de (C_t) montre que le facteur (Vc) est prédominant, avec une contribution de 29,72%. Juste derrière lui, le facteur (ap) avec une contribution de 28,22%, témoignant de son rôle crucial. Ensuite, le facteur (f), en troisième position avec une contribution de 22,59%. En revanche, une faible influence présentée par le facteur (r) avec une contribution de 17,98% à la variabilité de la température (C_t).
- ✓ L'ANOVA de (V_B) révèle que (Vc) et (f) sont les importants facteurs influençant l'usure (V_B), représentés par des contributions de 66,44% et 25,95% respectivement. En revanche, les facteurs (r) et (ap) ne montrent pas d'influence statistique significative, comme le suggèrent les valeurs de probabilité associées 0,565 et 0,083 respectivement.
- ✓ L'ANOVA de (P_m), met en évidence l'importance statistique de tous les facteurs étudiés. Tout d'abord, le facteur (Vc) se démarque avec une contribution notable de 40,37%, suivi de près par le facteur (ap) avec 39,93%. Bien que de moindre impact, les facteurs (f) et (r) présentent également des contributions significatives de 11,37% et 5,79% respectivement.

- ✓ L'ANOVA (Pc), montre l'influence significative de trois facteurs d'entrée. Le facteur (Vc) se positionne en tête avec une contribution notable de 39,50%, suivi de près par (f) avec 33,45% et (ap) avec 23,51%. En revanche, le facteur (r) semble avoir un faible effet, avec une contribution de 0,15%.
- ✓ L'ANOVA de (Fz), révèle que les facteurs (ap) et (f) se distinguent comme les principaux contributeurs affectant (Fz). Le facteur (ap) se positionne en tête suivi par (f) avec des contributions de 51,82%, avec 33,19% respectivement. Bien que le facteur (Vc) se place en troisième position avec une contribution de 10,75%. Cependant, (r) ne semble pas jouer un rôle significatif, comme en témoigne son facteur de probabilité qui égale à $p=0.551$.
- ✓ L'ANOVA de (Az), démontre que le facteur (ap) domine avec une contribution significative de 74,07%. Cela prouve l'importance majeure de ce facteur. Par contre, les facteurs (Vc), (r) et (f) ne montrent pas de pertinence statistiquement significative dans cette analyse.
- ✓ L'ANOVA de (Lp), révèle une hiérarchie dans l'impact des facteurs d'entrée. En tête, (Vc) avec une contribution significative de 47,64%, suivi par, (f) et (ap) qui contribuent respectivement de 22,28% et 18,01%. Bien que, (r) maintient une certaine influence avec une contribution de 7,32%.
- ✓ Des modèles statistiques sont élaborés avec un coefficient de corrélation variant de 92,28% à 98,54%, ce qui suscite un intérêt industriel en visant la prédiction des performances ciblées selon les exigences industrielles, notamment en ce qui concerne les performances (Ra et Pm) qu'ayant un impact direct sur le rapport qualité-prix. Le diagnostic de la validité des modèles, réalisé par la méthode de Surface de Réponse (RSM), en tenant compte de la distribution normale des résidus et de l'homoscédasticité, confirme la crédibilité et la validité des modèles proposés.

L'optimisation multi objectif à travers les méthodes (DF, GRA, MOORA, VIKOR et NSGAI couplé avec VIKOR) lors du processus du tournage intermittent de l'acier AISI D3 avec une plaquette à de coupe en carbure revêtu a conduit aux conclusions suivantes :

- L'optimisation simultanée des performances (Ra, V_B , et Ct) par les méthodes DF, GRA nous a permis d'obtenir les régimes de coupe optimaux et les performances optimisées suivantes :

 DF:

- Régime : $V_c=240$ m/min, $f=0,08$ mm/rev, $a_p=0,3$ mm, $r=0,781$ mm ;
- Performance : $R_a=0,825\mu\text{m}$, $C_t=202,225^\circ\text{C}$, $V_B=0,064$ mm ;

 GRA :

- $V_c=240$ m/min, $f=0,08$ mm/rev, $a_p=0,3$ mm, $r=0,4$ mm;

- Performance : $R_a=0,867\mu\text{m}$, $C_t=198^\circ\text{C}$, $V_B=0,064\text{ mm}$;

La méthode GRA présente une réduction de (-48,784%) pour le facteur (r). Les paramètres de sortie (R_a) et (C_t) diffèrent légèrement, avec des variations de (5,091%) et (-2,089%) respectivement, tandis que (V_B) reste constant à (0,064 mm). C'est au besoin des industriels la possibilité d'exploiter les deux régimes proposés.

➤ L'optimisation des performances (R_a , P_m , P_c , F_z , et MRR) par les méthodes DF, GRA a donné les combinaisons optimales et les performance suivantes :

✚ DF:

- Régime : $V_c=240\text{ m/min}$, $f=0,084\text{ mm/rev}$, $a_p=0,639\text{ mm}$, $r=1,6\text{ mm}$;
- Performances: $R_a=0,846\mu\text{m}$, $F_z=95,983\text{N}$, $P_m=3376,428\text{Watt}$
 $P_c=330,741\text{Watt}$, $MRR=216,009\text{ mm}^3/\text{s}$,

✚ GRA :

- Régime : $V_c=240\text{ m/min}$, $f=0,08\text{mm}$, $a_p=0,3\text{mm}$, $r=0,4\text{ mm}$;
- Performances: $R_a=0,867\mu\text{m}$, $F_z=42,23\text{ N}$, $P_m= 2900\text{ Watt}$,
 $P_c=168,92\text{Watt}$, $MRR=96\text{ mm}^3/\text{s}$;

La méthode GRA propose un régime optimal qui permet de réduire l'effort de coupe (F_z) de (56%), ainsi qu'une diminution de la consommation d'énergie de (14,11 %) et de (48,927%) pour (P_m) et (P_c) respectivement. Une légère augmentation de (2,482%) de (R_a). Cependant, une forte diminution de (55,557%) du facteur de productivité (MRR).

➤ L'optimisation des performances (R_a , P_m , V_B , C_t , F_z , A_z , L_p et MRR) par les méthodes DF, MOORA, VIKOR, NSGA couplé avec VIKOR a proposé le régime optimal suivant :

✚ DF:

- Régime : $V_c=240\text{ m/min}$, $f=0,1\text{ mm/rev}$, $a_p=0,689\text{ mm}$, $r=1,29\text{ mm}$
- Performance: $R_a=0,825\mu\text{m}$, $P_m=3282,085\text{ Watt}$, $V_B=0,066\text{ mm}$,
 $C_t=211,68^\circ\text{C}$, $MRR=274,30\text{ mm}^3/\text{s}$, $F_z=82,837\text{ N}$, $A_z=20,636\text{ m/s}^2$,
 $L_p=108,15\text{dB}$;

✚ MOORA:

- Régime : $V_c=320\text{ m/min}$, $f=0,12\text{ mm/rev}$, $a_p=0,3\text{ mm}$, $r=1,6\text{ mm}$
- Performances: $R_a=0,878\mu\text{m}$, $P_m=4100\text{ Watt}$, $V_B=0,072\text{ mm}$, $C_t=229^\circ\text{C}$,
 $F_z=192\text{ N}$, $MRR=110,62\text{ mm}^3/\text{s}$, $A_z=15,01\text{ m/s}^2$, $L_p=109,92\text{ dB}$;

✚ VIKOR:

- Régime : $V_c=280\text{ m/min}$, $f=0,12\text{ mm/rev}$, $a_p=0,6\text{ mm}$, $r=0,4\text{ mm}$

- Performances: $R_a=1,034 \mu\text{m}$, $P_m=3652 \text{ Watt}$, $V_B=0,07\text{mm}$, $C_t=220 \text{ }^\circ\text{C}$, $F_z=336 \text{ N}$, $MRR=145,69 \text{ mm}^3/\text{s}$, $A_z=24,18 \text{ m/s}^2$, $L_p=109,75 \text{ dB}$;

NSGAI/VIKOR:

- Régime : $V_c=242,4 \text{ m/min}$, $f=0,147 \text{ mm/rev}$, $a_p=0,684 \text{ mm}$, $r=0,4 \text{ mm}$
- Performance: $R_a=1,084 \mu\text{m}$, $P_m=3679,391 \text{ Watt}$, $V_B=0,068 \text{ mm}$, $C_t=217,061 \text{ }^\circ\text{C}$, $MRR=405,63 \text{ mm}^3/\text{s}$, $F_z=159,793 \text{ N}$, $A_z=29,794 \text{ m/s}^2$, $L_p=108,55 \text{ dB}$;

La méthode (DF) offre la meilleure solution d'optimisation multi-objective, en minimisant simultanément les performances (R_a , P_m , V_B , C_t , F_z et L_p). La méthode MOORA minimise (A_z), la méthode VIKOR offre des performances modérées. La méthode NSGA II / VIKOR la productivité.

- L'Analyse vibratoire du comportement de l'outil de coupe lors du tournage intermittent démontrent les résultats suivants :
 - Le rapport (R) est proportionnel au temps de relaxation et stabilisation de l'outil lorsqu'il quitte ou s'engage dans la zone d'usinage.
 - Le Rapport (R) proposé est proportionnel avec la valeur efficace du signal (RMS) pour tous les signaux mesurés.

Cette étude statistique, de modélisation et d'optimisation ouvre la voie à plusieurs perspectives prometteuses pour les développements futurs dans le domaine du tournage intermittent :

- Intégration de paramètres de coupe supplémentaires, avec différents environnements ;
- L'utilisation d'approches alternatives pour développer des modèles avancés pouvant fournir des prédictions de performance encore plus précises ;
- L'utilisation d'autres pièces présentant des motifs intermittents variables ;
- Intégration de la simulation numérique ;

Cela contribuera sans aucun doute à repousser les limites de l'usinage intermittent et à favoriser l'amélioration continue de cette technique dans l'industrie manufacturière.

REFERENCES

1. Wang, B., et al., Advancements in material removal mechanism and surface integrity of high speed metal cutting: a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2021. **166**: p. 103744.
2. BOUROUIS, F., B. HAMADI, and Y. CHIKH, ANALYSE THERMIQUE ET ETUDE DE LA FORMATION DES COPEAUX EN TOURNAGE DE L'ACIER AISI 1045.
3. Wagri, N.K., et al., An overview of the machinability of alloy steel. *Materials Today: Proceedings*, 2022. **62**: p. 3771-3781.
4. Liao, Z., et al., Review of current best-practices in machinability evaluation and understanding for improving machining performance. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2024. **50**: p. 151-184.
5. Trifunović, M., M. Madić, and N. Vitković, CUTTING PARAMETERS OPTIMIZATION FOR MINIMIZING ENERGY CONSUMPTION IN MULTI-PASS TURNING OF GREY CAST IRON.
6. Shukla, A., V. Dubey, and A.K. Sharma, Comparative study of dry machining with MQL assisted soybean oil in turning operation of AISI 304 steel. *Materials Today: Proceedings*, 2023.
7. Cui, X., et al., A review of high-speed intermittent cutting of hardened steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017. **93**: p. 3837-3846.
8. Rubio, E.M., et al. Surface roughness analysis of magnesium pieces obtained by intermittent turning. in *Materials Science Forum*. 2014. Trans Tech Publ.
9. Carou, D., et al., The effect of minimum quantity lubrication in the intermittent turning of magnesium based on vibration signals. *Measurement*, 2016. **94**: p. 338-343.
10. Cui, X. and J. Guo, Identification of the optimum cutting parameters in intermittent hard turning with specific cutting energy, damage equivalent stress, and surface roughness considered. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018. **96**: p. 4281-4293.
11. Carou, D., et al., Experimental investigation on finish intermittent turning of UNS M11917 magnesium alloy under dry machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014. **75**: p. 1417-1429.
12. Diniz, A.E., D.M. Gomes, and A. Braghini Jr, Turning of hardened steel with interrupted and semi-interrupted cutting. *Journal of materials processing technology*, 2005. **159**(2): p. 240-248.
13. Niu, J., et al., A comprehensive method for selecting cutting tool materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020. **110**: p. 229-240.
14. Grigoriev, S.N., S.V. Fedorov, and K. Hamdy, Materials, properties, manufacturing methods and cutting performance of innovative ceramic cutting tools– a review. *Manufacturing review*, 2019. **6**: p. 19.
15. Dröder, K., et al., A comparative analysis of ceramic and cemented carbide end mills. *Production Engineering*, 2020. **14**: p. 355-364.
16. Rajabi, A., et al., Development and application of tool wear: A review of the characterization of TiC-based cermets with different binders. *Chemical Engineering Journal*, 2014. **255**: p. 445-452.
17. Zhang, X., et al., Microstructure and mechanical properties of TiC–TiN–Zr–WC–Ni–Co cermets. *Ceramics International*, 2009. **35**(3): p. 1187-1193.
18. Rakshit, R. and A.K. Das, A review on cutting of industrial ceramic materials. *Precision Engineering*, 2019. **59**: p. 90-109.

19. Carou, D., E. Rubio, and J. Davim, DISCONTINUOUS CUTTING: FAILURE MECHANISMS, TOOL MATERIALS AND TEMPERATURE STUDY-A REVIEW. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2014. **38**(2).
20. Kumar, P., et al., Influence of different grades of CBN inserts on cutting force and surface roughness of AISI H13 die tool steel during hard turning operation. *Materials*, 2019. **12**(1): p. 177.
21. Li, G., et al., The manufacturing and the application of polycrystalline diamond tools—A comprehensive review. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020. **56**: p. 400-416.
22. Revuru, R.S., V.K. Pasam, and N.R. Posinasetti, Performance of coated cutting tools in machining: A review. 2020.
23. Badaluddin, N.A., et al., Coatings of cutting tools and their contribution to improve mechanical properties: a brief review. *Int. J. Appl. Eng. Res*, 2018. **13**(14): p. 11653-11664.
24. Keblouti, O., L. Boulanouar, and R.B.M. AZIZI, Impact du revêtement et des conditions de coupe sur le comportement à l'usure des outils et sur la rugosité de la surface usinée. 2017, UPB Sci. Bull., Series D.
25. BOUZID, L., Optimisation des conditions de coupe et analyse de leur effet sur les paramètres technologiques d'usinage—Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13. 2015.
26. Roberts, G.A., R. Kennedy, and G. Krauss, Tool steels. 1998: ASM international.
27. Bhushan, B., Surface roughness analysis and measurement techniques, in *Modern tribology handbook*, two volume set. 2000, CRC press. p. 79-150.
28. O'driscoll, E. and G.E. O'donnell, Industrial power and energy metering—a state-of-the-art review. *Journal of cleaner production*, 2013. **41**: p. 53-64.
29. Camposeco-Negrete, C., Optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption in turning of AISI 6061 T6 using Taguchi methodology and ANOVA. *Journal of cleaner production*, 2013. **53**: p. 195-203.
30. Zhao, G., et al., Energy consumption in machining: Classification, prediction, and reduction strategy. *Energy*, 2017. **133**: p. 142-157.
31. Laouissi, A., et al., Investigation, modeling, and optimization of cutting parameters in turning of gray cast iron using coated and uncoated silicon nitride ceramic tools. Based on ANN, RSM, and GA optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019. **101**(1): p. 523-548.
32. Cook, N.H., Tool wear and tool life. 1973.
33. Suhail, A.H., et al., Optimization of cutting parameters based on surface roughness and assistance of workpiece surface temperature in turning process. *American journal of engineering and applied sciences*, 2010. **3**(1): p. 102-108.
34. Patil, S., P. Jadhav, and S. Kumar, Literature Review of Hard Turning and It's Thermal Aspects. *Advanced Manufacturing and Materials Science: Selected Extended Papers of ICAMMS 2018*, 2018: p. 245-254.
35. Khayal, O., Literature review on turning operations. Researchgate, August, 2019.
36. Atlati, S., Development of a new hybrid approach for modelling heat exchange at the tool–chip interface: application to machining aeronautical aluminium alloy AA2024-T351 [Ph. D. thesis]. University of Lorraine, Nancy, France, 2012.
37. Varade, A.N. and K.P. Kadia, An Investigation of Temperature, Surface Roughness and Material Removal Rate During Hard Turning of EN19 Material-A Review. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 2015. **1**(8): p. 9-13.
38. Siddhpura, M. and R. Paurobally, A review of chatter vibration research in turning. *International Journal of Machine tools and manufacture*, 2012. **61**: p. 27-47.

39. Li, X., A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2002. **42**(2): p. 157-165.
40. Gholizadeh, S., Z. Leman, and B. Baharudin, A review of the application of acoustic emission technique in engineering. *Struct. Eng. Mech*, 2015. **54**(6): p. 1075-1095.
41. Ko, T. and H. Kim, Surface integrity and machineability in intermittent hard turning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2001. **18**: p. 168-175.
42. Diniz, A.E. and A.J. de Oliveira, Hard turning of interrupted surfaces using CBN tools. *Journal of materials processing technology*, 2008. **195**(1-3): p. 275-281.
43. De Godoy, V.A.A. and A.E. Diniz, Turning of interrupted and continuous hardened steel surfaces using ceramic and CBN cutting tools. *Journal of Materials processing technology*, 2011. **211**(6): p. 1014-1025.
44. Liu, H.L., et al., Tools optimization in efficient intermittent cutting of 2.25 Cr1Mo0.25V steel. *Advanced Materials Research*, 2011. **188**: p. 469-474.
45. Liu, H.L., et al., Experimental study on intermittent turning 2.25 Cr-1mo-0.25 V steel with coated cemented carbide tool. *Advanced Materials Research*, 2012. **500**: p. 128-133.
46. Gong, F., J. Zhao, and J. Pang, Evolution of cutting forces and tool failure mechanisms in intermittent turning of hardened steel with ceramic tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017. **89**: p. 1603-1613.
47. Carou, D., et al., Study based on sound monitoring as a means for superficial quality control in intermittent turning of magnesium workpieces. *Procedia Cirp*, 2017. **62**: p. 262-268.
48. Kudryashov, E., et al., Stabilizing tool for intermittent turning of complex surfaces. *Russian Engineering Research*, 2019. **39**: p. 141-146.
49. Yu, W., et al., Cutting performance and wear mechanism of honeycomb ceramic tools in interrupted cutting of nickel-based superalloys. *Ceramics International*, 2021. **47**(13): p. 18075-18083.
50. Nayak, M., R. Sehgal, and R. Kumar, Investigating machinability of AISI D6 tool steel using CBN tools during hard turning. *Materials Today: Proceedings*, 2021. **47**: p. 3960-3965.
51. Cui, X., et al., Analysis of a sustainable MQL machining process combining modified waste cooking oil and multifunctional biomimetic microstructure. *Sustainable Materials and Technologies*, 2021. **29**: p. e00311.
52. Gong, F., et al., Cutting performance and failure mechanisms of TiB₂-TiC-Al₂O₃ multi-dimensional gradient ceramic tool in intermittent turning of hardened steel. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2024. **118**: p. 106438.
53. Djouambi, N., et al., Predictive modeling and multi-response optimization of cutting parameters using DF, GRA and MABAC techniques while turning POM-C GF 25% composite polymer. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024. **130**(3): p. 1987-2007.
54. Haoues, S., et al., Investigation on machining of GFRP through ANOVA, DFA, and CoCoSo method combined with Taguchi approach. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2024: p. 07316844241239249.
55. Hamdi, A., et al., Investigation of MQL and CNC turning parameters on the machinability of unreinforced polypropylene: study of surface roughness, temperature, and specific cutting energy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024. **130**(1): p. 717-730.

56. Kannan, A. and N. Sivaram, Evaluation and Performance Improvement of Environmentally Friendly Sustainable Turning of 6063 Aluminum Alloy in Dry Conditions Using Grey Relational Analysis. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 2024. **21**(1): p. 11085-11098.
57. Somayaji, B.S., et al., Optimization of Turning Parameters and Cooling Techniques for Enhanced Machining Performance of EN8 Steel Using L9 Orthogonal Array. *Engineering Proceedings*, 2024. **59**(1): p. 243.
58. Kalita, K., et al., Experimental investigation and parametric optimization of a milling process using multi-criteria decision making methods: a comparative analysis. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2023. **17**(1): p. 453-467.
59. Nguyen, N.T., A.T. Nguyen, and T.S. Nguyen, USING VIKOR AND RSM-DA IN THE OPTIMIZATION OF DRY TURNING OF 9XC STEEL. *Journal of Applied Engineering Science*, 2024: p. 1-9.
60. Ramena, P.D., et al., Optimization of responses in single and multi-point machining processes using Dragon-fly algorithm coupled with TOPSIS and VIKOR decision-making approaches. *Engineering Research Express*, 2024.
61. Das, S., et al., Optimization of CNC turning parameters of copper–nickel (Cu–Ni) alloy using VIKOR, MOORA and GRA techniques. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2024: p. 1-10.
62. Yadav, S.K., S. Ghosh, and A. Sivanandam, An intelligent hybrid optimization approach to improve the end milling performance of Incoloy 925 based on ANN-NSGA-II-ETOPSIS. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2024: p. 1-23.
63. Oussama, B., et al., Assessment of turning AISI 316L stainless steel under MWCNT-reinforced nanofluid-assisted MQL and optimization of process parameters by NSGA-II and TOPSIS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023. **127**(7): p. 3855-3868.
64. SAFI, K., Etude statistique des performances des matériaux de coupe avec différents revêtements lors du tournage dans un environnement à sec et lubrifié. 2024.
65. Singh, B., et al., Modeling and Optimization of Turning Hastelloy C-276 under Sustainable Machining Environments. *Solid State Phenomena*, 2024. **356**: p. 21-31.
66. Rubio, E.M., et al., Inserts selection for intermittent turning of magnesium pieces. *Applied Mechanics and Materials*, 2012. **217**: p. 1581-1591.
67. Cakir, M.C., C. Ensarioglu, and I. Demirayak, Mathematical modeling of surface roughness for evaluating the effects of cutting parameters and coating material. *Journal of materials processing technology*, 2009. **209**(1): p. 102-109.
68. Ghodam, S.D. and M. Student, Temperature measurement of a cutting tool in turning process by using tool work thermocouple. *Int. J. Res. Eng. Technol*, 2014. **3**: p. 831-835.
69. Chinchankar, S. and S. Choudhury, Evaluation of chip-tool interface temperature: effect of tool coating and cutting parameters during turning hardened AISI 4340 steel. *Procedia Materials Science*, 2014. **6**: p. 996-1005.
70. Elsadek, A.A., et al., Prediction and optimization of cutting temperature on hard-turning of AISI H13 hot work steel. *SN Applied Sciences*, 2020. **2**: p. 1-12.
71. Lima, J., et al., Hard turning: AISI 4340 high strength low alloy steel and AISI D2 cold work tool steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005. **169**(3): p. 388-395.
72. Kuntoğlu, M. and H. Sağlam, Investigation of progressive tool wear for determining of optimized machining parameters in turning. *Measurement*, 2019. **140**: p. 427-436.

73. Kumar, R., P.S. Bilga, and S. Singh. Optimization and modeling of active power consumption for turning operations. in ISME 19th Conference on advances in mechanical engineering (mechanical systems and sustainability), Dr. BR Ambedkar National Institute of Technology Jalandhar, Punjab, India. 2018.
74. Safi, K., et al., Parametric study and multi-criteria optimization during turning of X210Cr12 steel using the desirability function and hybrid Taguchi-WASPAS method. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2022. **236**(15): p. 8401-8420.
75. Geo, R. and J.S. D'cotha, Effect of turning parameters on power consumption in EN 24 alloy steel using different cutting tools. Int. J. Engg Research and general service, 2014. **2**(6): p. 691-702.
76. Zheng, G., et al., Effect of cutting parameters on wear behavior of coated tool and surface roughness in high-speed turning of 300M. Measurement, 2018. **125**: p. 99-108.
77. Cui, X.B., et al., Cutting forces and tool wear in intermittent turning processes with Al₂O₃-based ceramic tools. Key Engineering Materials, 2012. **499**: p. 205-210.
78. Şahinoğlu, A. and M. Rafighi, Investigation of vibration, sound intensity, machine current and surface roughness values of AISI 4140 during machining on the lathe. Arabian Journal for Science and Engineering, 2020. **45**: p. 765-778.
79. Hessainia, Z., et al., On the prediction of surface roughness in the hard turning based on cutting parameters and tool vibrations. Measurement, 2013. **46**(5): p. 1671-1681.
80. Wayal, V., et al., Investigation on cutting force and vibration signals in turning: mathematical modeling using response surface methodology. Journal of Mechanical Engineering and Automation, 2015. **5**(3B): p. 64-68.
81. Gurusamy, M. and S. Sriram, Investigations on the choice of Johnson–Cook constitutive model parameters for the orthogonal cutting simulation of inconel 718. Journal of Advanced Manufacturing Systems, 2023. **22**(01): p. 1-25.
82. Özden, G., M.Ö. Öteyaka, and F.M. Cabrera, Modeling of cutting parameters in turning of PEEK composite using artificial neural networks and adaptive-neural fuzzy inference systems. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2023. **36**(2): p. 493-509.
83. Li, R., et al., Modeling and optimizing the specific cutting energy of medium density fiberboard during the helical up-milling process. Wood Material Science & Engineering, 2023. **18**(2): p. 464-471.
84. Chikhi, M. and M. Chavance, Estimation du Modèle Linéaire Généralisé et Application. Sciences & Technology. A, exactes sciences, 2012: p. 13-21.
85. Caussinus, H., Sur l'analyse des résidus dans le modèle linéaire. Statistique et analyse des données, 1980. **5**(3): p. 29-39.
86. Luong, X.T.H. and C. Liang, Evaluation of atrazine degradation by iron persulfate activation process in aqueous phase using Taguchi approach. Environmental Engineering Research, 2024. **29**(2): p. 27-38.
87. Lakshmanan, S., M.P. Kumar, and M. Dhananchezian, Optimization of turning parameter on surface roughness, cutting force and temperature through TOPSIS. Materials Today: Proceedings, 2023. **72**: p. 2231-2237.
88. Bhirud, N., et al., Multi-objective optimization of cutting parameters and helix angle for temperature rise and surface roughness using response surface methodology and desirability approach for Al 7075. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 2023: p. 1-20.
89. Labidi, A., et al., Cutting conditions modeling and optimization in hard turning using RSM, ANN and desirability function. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2018. **18**: p. 1017-1033.

90. Aggarwal, A., et al., Optimization of multiple quality characteristics for CNC turning under cryogenic cutting environment using desirability function. *Journal of materials processing technology*, 2008. **205**(1-3): p. 42-50.
91. El-Araby, A., I. Sabry, and A. El-Assal, A comparative study of using MCDM methods integrated with entropy weight method for evaluating facility location problem. *Operational research in engineering sciences: theory and applications*, 2022. **5**(1): p. 121-138.
92. Mukherjee, D., R. Ranjan, and S. Moi, Multi-response optimization of surface roughness and MRR in turning using Taguchi Grey Relational Analysis (TGRA). *Int. Res. J. Multidiscip. Scope (IRJMS)*, 2022. **3**: p. 1-7.
93. Singaravel, B., T. Selvaraj, and S. Vinodh, Multi-objective optimization of turning parameters using the combined moora and entropy method. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 2016. **40**(1): p. 101-111.
94. Ingle, S.V. and D.N. Raut, Performance evaluation of process parameters using MCDM methods for Titanium Alloy (Ti6al4v) in turning operation. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 2023: p. 1-15.
95. Kumar, R., et al., Optimization of process parameters during CNC turning by using AHP & VIKOR method. *Int. J. Eng. Res. Technol*, 2013. **2**(12): p. 3478-3480.
96. Klancnik, S., et al., Multi-objective optimization of the turning process using a Gravitational Search Algorithm (GSA) and NSGA-II approach. *Advances in Production Engineering & Management*, 2016. **11**(4): p. 366.
97. Oussama, B., et al., Assessment of turning AISI 316L stainless steel under MWCNT-reinforced nanofluid-assisted MQL and optimization of process parameters by NSGA-II and TOPSIS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023: p. 1-14.
98. Nguyen, A.-T., et al., A hybridization of machine learning and NSGA-II for multi-objective optimization of surface roughness and cutting force in AISI 4340 alloy steel turning. *Journal of Machine Engineering*, 2023. **23**.
99. Zhang, G., et al., Simulation of intermittent turning processes. 1991.
100. Urbikain, G., L.L. De Lacalle, and A. Fernández, Regenerative vibration avoidance due to tool tangential dynamics in interrupted turning operations. *Journal of Sound and Vibration*, 2014. **333**(17): p. 3996-4006.
101. Babouri, M.K. and N. Ouelaa. Application de l'Analyse Multirésolution en Ondelettes Pour la Prédiction de l'Usure des Outils de Coupe. in 10ème Congrès Français d'Acoustique. 2010.