



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université de Tissemsilt



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences et de la Technologie

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme
de Master académique en

Filière : **Génie mécanique**

Spécialité : **Fabrication mécanique et productique**

Présenté par : **MEDDAS Mohamed**

Thème

Optimisation mono et multi-objective des paramètres de coupe lors du tournage d'acier

Soutenu le, 02/07/2023

Devant le Jury :

El Hannani Abdelhak	Président	M.A.B	Univ-Tissemsilt
Hamdi Amine	Encadreur	M.C.A.	Univ-Tissemsilt
Satla Zouaui	Examinatrice	M.C.B.	Univ-Tissemsilt

Année universitaire : 2022-2023

Dédicace

« Nous tenons à remercier notre dieu **ALLAH** le tout puissant de nous
avoir donné la force et le courage ».

C'est avec un grand plaisir que je dédie ce travail fruit De mes études :

A Ma chère mère

Pour toute l'affection qu'elle m'a donnée, la source de la tendresse.

A mon cher père

Qui a veillé sur moi, qui se suis inquiété pour que je sois tranquille et

s'est Privé

pour me satisfaire.

A ma femme

A mes enfants

A mon frère

A mes sœurs

Que dieu vous garde en bonne santé

A tous mes amis(es) Qui m'ont aidé à poursuivre ce modeste travail

A Toute la promotion de master II Fabrication mécanique et

productique2022/2023

Remerciement

Je tiens remercier du fond du cœur

Dieu le tout puissant

Qui m'a aidé jusqu'à l'atteint de ce niveau

Et qui m'a donné l'inspiration, la volonté, le courage et
la Persévérance dans mes études.

Nous remercions

Chaleureusement notre encadreur

Dr. HAMDI AMINE

Pour avoir accepté de diriger ce mémoire, pour sa
disponibilité et sa gentillesse et surtout pour ces
conseils et son énorme confiance des nous.

Nous remercions les membres du jury trouvent ici
pour avoir accepté d'honorer par leur présence et mes
enseignants.

Nous remercions aussi toute personne ayant
contribué

De près ou de loin à la réalisation de
Ce modeste travail.

Liste des figures

Figure 1.1- Classification des procédés d'usinage	15
Figure 1.2- Cinématique d'usinage par coupe	16
Figure 1.3- Environnement du processus d'abrasion en rectification	17
Figure 1.4- Schéma cinématique d'une machine de rodage	18
Figure 1.5- Types de l'usinage par érosion.	19
Figure 1.6- Procédés d'usinage assistés.....	21
Figure 1.7- Opération de tournage	21
Figure 1.8- Opérations d'usinage autres que le tournage effectuées sur un tour: (a).....	22
Figure 1.9- Outils standard et leurs applications	23
Figure 1.10- Perçage : (a) sur une perceuse, et (b) sur un tour	24
Figure 1.11- Mouvements de perçage	25
Figure 1.12- Extrémité arrière de foret	25
Figure 1.13- Variables d'un processus d'usinage	27
Figure 2.1- Vue du tour utilisé	32
Figure 2.2- Vue de la plaquette utilisée	33
Figure 2.3- Vue de porte-outils utilisés	34
Figure 2.4- Vue d'une pièce usinée.....	34
Figure 2.5- Rugosimètre utilisé.....	36
Figure 2.6- Interface de logiciel Minitab 18.....	36
Figure 2.7- Interface du logiciel Design-expert 11.....	37
Figure 3.1- Impact des conditions de coupe sur le rapport S/N pour le paramètre R_{pk}	55
Figure 3.2- Impact des conditions de coupe sur le rapport S/N pour le paramètre R_k	55
Figure 3.3- Impact des conditions de coupe sur le rapport S/N pour le paramètre R_{vk}	56
Figure 3.4- Impact des conditions de coupe sur le rapport S/N pour le paramètre $Mr1$	57

Figure 3.5- Impact des conditions de coupe sur le rapport S/N pour le paramètre $Mr2$	57
Figure 3.6- Grade relationnel grise (GRG)	61
Figure 3.7- Graphiques de contour de désirabilité pour les paramètres R_{pk} , R_k , R_{vk}	64
Figure 3.8- Barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe, des trois réponses individuelles ainsi que la désirabilité combinée (DF = 0,713)	64
Figure 3.9- Graphique de l'optimisation combinée de R_{pk} , R_k , R_{vk}	65
Figure 3.10- Graphiques de contour de désirabilité pour les paramètres de sortie R_{pk} , R_k , R_{vk} , $Mr1$ et $Mr2$	66
Figure 3.11- Barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe, des réponses individuelles ainsi que la désirabilité combinée (DF = 0,638)	67
Figure 3.12- Graphique de l'optimisation combinée de R_{pk} , R_k , R_{vk} , $Mr1$ et $Mr2$	67

Liste des Tableaux

Tableau 1.1- Désignation des outils de tournage	23
Tableau 2.1- Caractéristiques des plaquettes utilisées	33
Tableau 2.2- Composition chimique d'acier C45.....	34
Tableau 2.3- Propriétés mécaniques et physiques d'acier C45	35
Tableau 2.4- Équivalence de la nuance d'acier C45	35
Tableau 2.5- Conditions de coupe pour les essais et les paramètres de sortie	37
Tableau 2.6- Tableau orthogonale de Taguchi $L_{16} (4^3 \times 2^2)$	37
Tableau 2.7- Paramètres de coupe et leurs niveaux	38
Tableau 2.8- Paramètre de coupe et leurs niveaux pour un plan de 16 essais.....	39
Tableau 2.9- Exemples de plans d'expériences	42
Tableau 3.1- Résultats expérimentaux des paramètres de sortie (R_{pk} , R_k , R_{vk} , $Mr1$ et $Mr2$) et leurs rapports S/N.....	52
Tableau 3.2 : Table des réponses pour les rapports signal/bruit	54
Tableau 3.3- Résultats expérimentales normalisés ($x_i(k)$)	59
Tableau 3.4- Coefficients du GR ($\eta_i(k)$)	60
Tableau 3.5- Niveau relationnel gris et son ordre	61
Tableau 3.6- Réponses pour la catégorie relationnelle grise	62
Tableau 3.7- Conditions de l'optimisation multi-objectifs (DF)	63
Tableau 3.8- Optimisation des trois réponses R_{pk} , R_k , R_{vk}	63

Tableau 3.9- Optimisation des cinq réponses R_{pk} , R_k , R_{vk} , $Mr1$ et $Mr2$ 66

Nomenclature

V_c	Vitesse de coupe	[m/min]
N	Vitesses de rotation de la pièce	[tr/min]
f	Vitesse d'avance	[mm/min]
a_p	Profondeur de passe	[mm]
R_{pk}	Hauteur des pics saillants	[μm]
R_k	Profondeur de rugosité du cœur	[μm]
R_{vk}	Profondeur des creux profonds	[μm]
S/N	Rapport signal sur bruit	[dB]
MRR	Le taux d'enlèvement matière	
P	Probabilité d'obtenir du résultat par hasard	
r_ε	Rayon du bec	[mm]
X_r	Angle de coupe principal	[$^\circ$]
$Mr1$	Limite supérieure du noyau de rugosité	[%]
$Mr2$	Limite inférieure du noyau de rugosité	[%]

Abréviations

HRC	Dureté de Rockwell
ANOVA	Analyse de la variance
RSM	Méthodologie de surface de réponse
GRA	Analyse relationnelle grise
GRC	Coefficient relationnel gris
GRG	Grade relationnel gris
DF	Méthode de la fonction de désirabilité
ANN	Réseau de neurones artificiels

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction générale 13

Chapitre 1 Généralités sur l'usinage

1.1- Introduction	15
1.2- Classification des procédés d'usinage	15
1.2.1- Usinage par coupe	15
1.2.2- Usinage par abrasion	17
1.2.3- Usinage par érosion	18
1.2.4- Usinage hybride.....	19
1.2.5- Micro-usinage.....	19
1.2.6- Procédés d'usinage assisté.....	20
1.3- Coupe de surfaces cylindriques.....	21
1.3.1- Tournage.....	21
1.3.2- Perçage	24
1.3.3- Alésage.....	26
1.4- Usinage de matériaux difficiles à couper.....	26
1.5- Variables des processus d'usinage.....	27
1.5.1- Variables d'entrée.....	27
1.5.2- Variables de sortie (dépendantes)	27
1.6- Sélection du processus d'usinage	28
1.7- Etat de l'art	29

Chapitre 2 Matériau, appareils et méthodes utilisées

2.1- Introduction	32
2.2- Matériels utilisés	32
2.2.1- Machine-outil, porte-outils et les plaquettes	32
2.2.2- Matériau usiné	34
2.2.3- Rugosimètre	35

2.2.4- Moyens de calcul	36
2.3- Conditions de coupe	37
2.4- Plans d'expériences	39
2.4.1- Définition	39
2.4.2- Terminologie	40
2.5- Type des plans d'expérience	41
2.5.1- Plans factoriels complète	41
2.5.2- Plans factoriels fractionnaires	43
2.5.3- Matrices d'expériences fractionnaires de Taguchi	43
2.5.4- Plan d'expériences de surface de réponse.....	44
2.6- Méthode d'optimisation.....	44
2.6.1- Méthode mono-objective (Taguchi)	44
2.6.2- Méthode multi objectives	45
2.7- Conclusion	49

Chapitre 3 Optimisation mono et multi-objective

3.1- Introduction.....	51
3.2- Optimisation mono-objectif.....	51
3.3- Optimisation multi-objective.....	58
3.3.1- Optimisation multi-objective par GRA.....	58
3.3.2- Optimisation multi-objective par DF.....	62
3.4- Conclusion.....	68
Conclusion générale.....	70
Références	73
Résumé.....	76

Introduction générale

Introduction générale

Aujourd'hui, il existe de nombreux procédés d'usinage et de finition des surfaces fonctionnelles par enlèvement de matière, tels que le tournage, le fraisage, la rectification, le tournage dur, le toilage, ...etc. Bien que le tournage soit un procédé intéressant en termes d'usinage à sec, il présente un avantage majeur pour réduire le coût total de l'usinage des pièces mécaniques de précision. Le tournage est largement utilisé dans l'industrie de la mécanique de précision. La caractérisation de la texture de surface fonctionnelle selon la norme ISO 13565 (courbe d'Abbott-Firestone) joue un rôle important dans l'industrie automobile. Dans cette étude, l'objectif principal est d'optimiser de manière mono-objectif et multi-objectif les conditions de coupe (vitesse de coupe (V_c), vitesse d'avance (f), profondeur de passe (ap), rayon du bec d'outil (r_ϵ) et angle de coupe principal (X_r)) lors du tournage de l'acier C45, en se basant sur les cinq paramètres de la courbe du taux de portance (la hauteur des pics saillants R_{pk} , la profondeur de rugosité du cœur R_k , la profondeur des creux profonds R_{vk} , la limite supérieure du noyau de rugosité $Mr1$ et la limite inférieure du noyau de rugosité $Mr2$). Pour atteindre cet objectif, ce mémoire de master est divisé en trois chapitres.

Le premier chapitre se consacre à la classification des procédés d'usinage, y compris une nouvelle technique d'usinage. Dans un premier temps, nous présentons les procédés de coupe des surfaces cylindriques. Ensuite, nous abordons les différentes variables des processus d'usinage, la manière de sélectionner un procédé, et nous terminons par un état de l'art.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les équipements utilisés (tour, outil de coupe, rugosimètre, matériau usiné, etc.) pour mener les expériences, ainsi que les conditions de coupe. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous abordons les méthodes permettant d'optimiser les conditions de coupe.

Le chapitre trois est consacré à l'optimisation des conditions de coupe lors du tournage de l'acier C45. Dans ce chapitre, nous utilisons deux techniques : l'optimisation mono-objective et l'optimisation multi-objective. Pour l'optimisation mono-objective, nous avons utilisé l'approche de la technique Taguchi L_{18} basée sur l'analyse du rapport signal/bruit (S/N).

En revanche, l'optimisation multi-objective a été réalisée à l'aide de la méthode de l'analyse relationnelle grise (GRA) et de la méthode de la fonction de désirabilité (DF).

CHAPITRE 1 :

Généralités sur l'usinage

1.1- Introduction

L'usinage consiste à enlever la surépaisseur de matière pour obtenir une pièce finie conforme en termes de taille, de forme et de qualité de surface. Différents types d'outils de coupe sont utilisés pour enlever cette surépaisseur de matière. Le développement de nouveaux matériaux pour ces outils a entraîné des avancées significatives dans l'industrie de l'usinage, accompagnées du développement de machines-outils. Ces techniques offrent des méthodes alternatives pour usiner des pièces complexes dans des matériaux plus durs, plus résistants et plus solides, qui sont difficiles à couper. L'usinage est apprécié pour sa polyvalence, sa précision et sa qualité de surface élevées, le tout de manière économique. Les avantages de l'usinage comprennent :

- ❏ Il peut être utilisé pour tous les matériaux d'ingénierie.
- ❏ L'usure des outils est limitée et les outils sont abordables.
- ❏ Les nombreux paramètres d'usinage peuvent être contrôlés pour surmonter les difficultés techniques et économiques. L'usinage est généralement utilisé comme opération finale pour les pièces produites par moulage.

1.2- Classification des procédés d'usinage

L'usinage traditionnel repose sur l'utilisation d'un outil plus dur que la pièce à usiner. Cet outil pénètre dans la pièce à une certaine profondeur de coupe. Le mouvement relatif entre l'outil et la pièce permet d'effectuer la coupe et de générer les formes, les dimensions et la qualité de surface requises. Ce type d'usinage englobe les procédés d'enlèvement de copeaux et d'abrasion mécanique. Cependant, il existe d'autres procédés non traditionnels qui ne nécessitent pas d'outil dur ou de contact direct avec la pièce à usiner, tels que les procédés d'érosion électrochimique et d'usinage électrochimique et thermique (voir figure 1.1) [1].

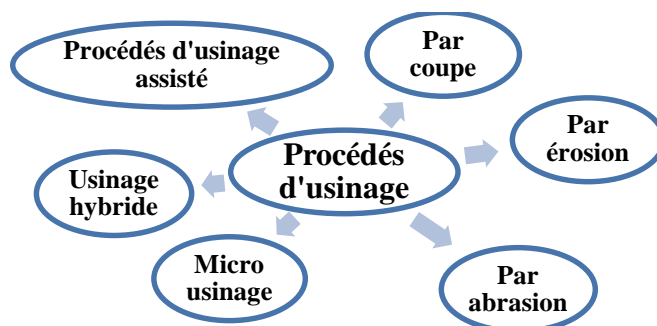


Figure 1.1- Classification des procédés d'usinage.

1.2.1- Usinage par coupe

Le processus d'usinage par coupe implique trois éléments essentiels : l'outil, la pièce et la machine-outil qui contrôle leurs mouvements. Lors de l'usinage par enlèvement de

copeaux, l'outil pénètre dans la pièce jusqu'à une certaine profondeur de coupe. Les outils de coupe ont un nombre défini d'arêtes tranchantes avec une géométrie spécifique. Pendant le processus, la surépaisseur de matière est enlevée sous forme de copeaux visibles. La forme de la pièce finale dépend des mouvements relatifs de l'outil et de la pièce [1, 2]. À cet égard, différentes configurations de coupe sont possibles, comme présenté la figure 1.2.

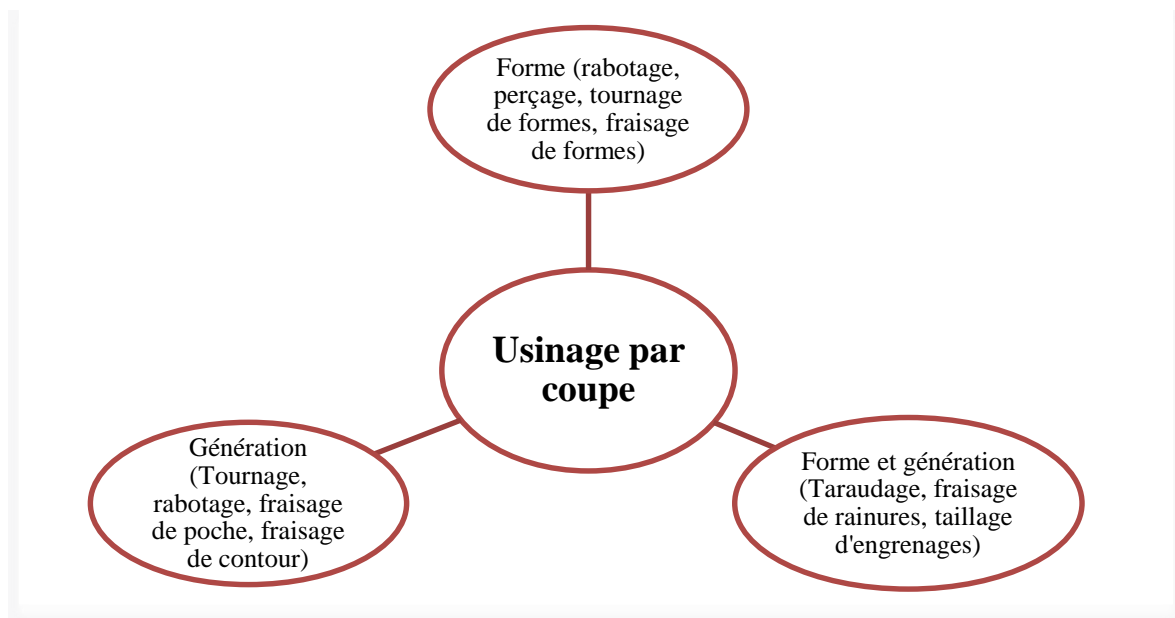


Figure 1.2- Cinématique d'usinage par coupe.

1.2.1.1- Coupe de forme

Le profil de la pièce est déterminé par la forme finale de l'outil de coupe. Il est formé par la rotation principale de la pièce combinée à l'avance de l'outil en profondeur. La qualité de la surface usinée dépend de la précision de l'outil utilisé. Cependant, un inconvénient majeur de ce dispositif est la nécessité d'exercer une force considérable lors de la coupe, ce qui peut entraîner des vibrations, en particulier lorsque le profil de coupe est complexe [1, 2].

1.2.1.2- Coupe par génération

Pour façonner la pièce, un mouvement principal est appliqué à la pièce tandis que la pointe de l'outil se déplace dans une direction d'avance. La pièce tourne autour de son axe pendant que l'outil est ajusté à une vitesse d'avance appropriée pour obtenir le profil souhaité. Lors de l'usinage, l'outil de coupe effectue le mouvement de coupe principal, tandis que la pièce avance pour créer le profil de la surface coupée. Lors du fraisage de contours, la fraise verticale (en bout) tourne selon le mouvement principal, tandis que la pièce avance à une vitesse de coupe correspondant au profil requis [1, 2].

1.2.1.3- Coupe de la forme et de la génération

Lors du filetage, l'outil spécialement conçu en forme de filet avance axialement à la vitesse appropriée pendant que la pièce tourne autour de son axe (mouvement principal). De la même manière, pour réaliser des fentes, des queues d'aronde ou des engrenages, la pièce est alimentée tout en faisant tourner la fraise de forme correspondante. Lors du taillage des engrenages, une fraise-mère est utilisée pour progressivement générer le profil des dents de l'engrenage pendant que la fraise-mère et la pièce tournent simultanément.

1.2.2- Usinage par abrasion

L'usinage par abrasion consiste à enlever une fine couche de matériau à l'aide de nombreux grains abrasifs durs, petits et anguleux, dont le nombre et la forme sont variés. Ces grains abrasifs peuvent être soit détachés, soit liés ensemble pour former un outil tel qu'une meule, les grains de coupe sont orientés de manière aléatoire et la profondeur de pénétration varie pour chaque grain en contact avec la pièce. L'usinage se produit par l'effet de micro-abrasion où la fine couche de matériau est enlevée sous forme de minuscules copeaux qui sont généralement invisibles à l'œil [1, 2]. L'analyse des procédés d'abrasion peut se décomposer en différentes approches, issues des trois sous systèmes pouvant être isolés dans l'environnement du procédé : la meule, la pièce et les grains abrasifs comme représente-la figure 1.3 [3].

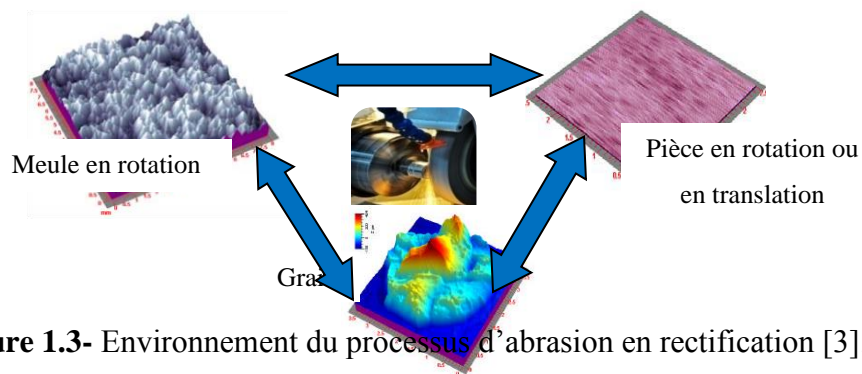


Figure 1.3- Environnement du processus d'abrasion en rectification [3].

Les mouvements combinés de rotation et de translation de l'outil sont conçus pour faire la moyenne de l'enlèvement de matière par abrasion et produire un motif de caractéristique privilégié (texturer la surface du fût (ou chemise)) pour la rétention d'huile dans les alésages des cylindres du moteur. La figure 1.4 représente le schéma cinématique d'une machine de rodage [3].

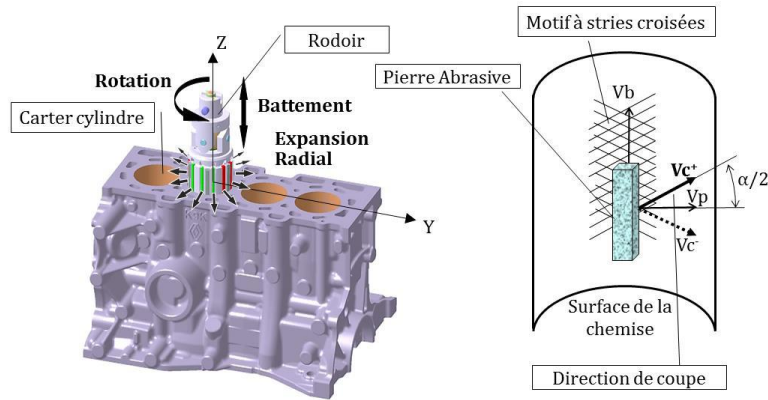


Figure 1.4- Schéma cinématique d'une machine de rodage [3].

1.2.3- Usinage par érosion

L'usinage traditionnel comprend des processus de coupe et d'abrasion qui présentent certains inconvénients inhérents, tels que [1, 4] :

- ✧ Coût élevé en raison de la consommation d'énergie importante nécessaire pour enlever une certaine quantité de matériau de la pièce.
- ✧ Déformation de la pièce due à la chaleur générée lors de la coupe et de l'abrasion.
- ✧ Apparition d'un écrouissage indésirable et de contraintes résiduelles, qui peuvent nécessiter un traitement ultérieur pour atténuer leurs effets négatifs.
- ✧ Limitations liées à la taille et à la complexité de la forme de la pièce qui peuvent rendre difficile l'usinage précis.
- ✧ Nécessité d'opérateurs hautement qualifiés, de personnel spécialisé et d'équipements de mesure sophistiqués.

Pour surmonter ces limitations, les procédés d'usinage par érosion sont utilisés, lesquels n'engendrent ni copeaux ni motifs sur la surface usinée. Cependant, les taux d'enlèvement de matière sont considérablement plus faibles par rapport à l'usinage par enlèvement de copeaux et l'abrasion. L'usinage par érosion élimine la surépaisseur de matière en enlevant progressivement des couches superficielles du matériau usiné par dissolution, fusion ou vaporisation [1, 4]. Il existe deux types d'usinage par abrasion, à savoir : érosion chimique (électrochimique) et érosion thermique (voir figure 1.5).

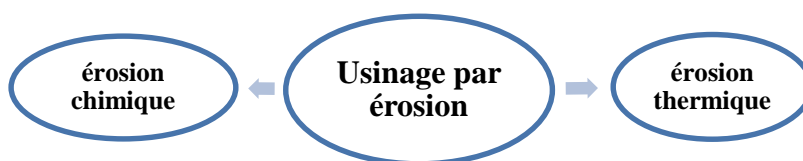


Figure 1.5- Types de l'usinage par érosion.

1.2.4- Usinage hybride

Pour améliorer les performances de certains processus d'érosion thermique, il est possible d'ajouter un processus d'érosion secondaire, ce qui donne lieu à des techniques telles que l'usinage par décharge électrochimique hybride ou l'usinage par électroérosion et dissolution hybride. Dans d'autres cas, l'usinage par abrasion peut être combiné à l'usinage par électroérosion pour former des techniques comme le meulage hybride par électroérosion abrasive ou le meulage hybride par décharge électrochimique. De même, l'érosion électrochimique peut être améliorée en la combinant avec l'usinage assisté par ultrasons, ce qui donne lieu à des procédés tels que le meulage électrochimique hybride ou l'érosion ultrasonique [4].

1.2.5- Micro-usinage

Le micro-usinage est la fabrication miniaturisée d'objets en enlevant de la matière. Pour cela, on utilise des méthodes d'usinage conventionnelles et non conventionnelles. Cette technique est devenue récemment essentielle pour réduire la taille des pièces. Elle permet de créer des pièces en trois dimensions, ainsi que des formes, structures et dispositifs en 3D à l'échelle micrométrique. L'objectif principal du micro-usinage est d'intégrer des circuits microélectroniques dans des structures micro-usinées, afin de produire des systèmes totalement intégrés [5].

Les méthodes classiques de micro-usinage utilisent des outils fixes et contrôlés pour donner forme à des objets en 3D grâce à une trajectoire et une surface d'outil bien conçues. Ces méthodes permettent d'enlever des quantités minuscules de matériau, parfois aussi petites que quelques dizaines de nanomètres, ce qui convient à de nombreuses applications de micro-usinage. L'unité d'enlèvement, qui représente le volume ou la taille de matériau enlevé lors du micro-usinage mécanique, est déterminée par des paramètres tels que l'avance, la profondeur de coupe et la longueur du copeau. Cependant, pour des niveaux de précision plus fins, il existe des méthodes non conventionnelles où l'unité d'enlèvement peut être aussi petite qu'un atome [5].

Le tournage, le perçage et le fraisage sont des exemples de techniques utilisées dans le micro-usinage de formes à l'échelle micrométrique grâce à la miniaturisation des outils requis. La rectification par électro-décharge à fil a également considérablement progressé dans la production de micro-outils. Les méthodes conventionnelles de micro-usinage, telles que le tournage, le perçage et le meulage, ont déjà été appliquées à divers matériaux tels que les alliages de cuivre et d'aluminium, l'or, l'argent, le nickel et les plastiques à base de méthacrylate de méthyle [5].

1.2.6- Procédés d'usinage assisté

Les performances de certains procédés d'usinage peuvent être améliorées en termes de taux d'enlèvement de matière, de précision et de qualité de surface en introduisant une assistance thermique, vibratoire ou magnétique. Par exemple, dans le tournage et le fraisage assistés par laser, une source thermique externe, telle qu'un faisceau laser, est utilisée pour chauffer le matériau de la pièce devant l'outil de coupe. Cela permet d'améliorer les performances du processus. De même, le chauffage par faisceau de plasma est utilisé dans des applications telles que le tournage assisté par plasma, où la puissance de coupe peut être réduite tout en augmentant la durée de vie de l'outil [4, 5].

Par ailleurs, l'utilisation de vibrations mécaniques peut également améliorer les performances de processus tels que le marquage par coupe, l'abrasion ou l'érosion. Les vibrations mécaniques permettent d'optimiser le processus par rapport à une coupe continue sans vibrations. Ainsi, des techniques telles que le tournage assisté par ultrasons, l'assistance par ultrasons et l'assistance à l'usinage peuvent être employées pour améliorer les performances globales du processus d'usinage [4, 5].

Le perçage, le fraisage assisté par ultrasons et le meulage assisté par ultrasons sont des exemples courants de l'utilisation de l'assistance ultrasonique dans les processus d'usinage. D'autres techniques d'abrasion combinent le champ magnétique avec l'action d'abrasion, comme la finition par abrasion magnétique, le polissage flottant magnétique, la finition magnéto rhéologique et la finition par flux abrasif magnéto rhéologique. L'usinage par électroérosion et l'usinage par jet d'eau abrasif sont également assistés par des vibrations mécaniques pour améliorer leurs performances [4, 5]. Ces techniques sont représentées dans la figure 1.6.

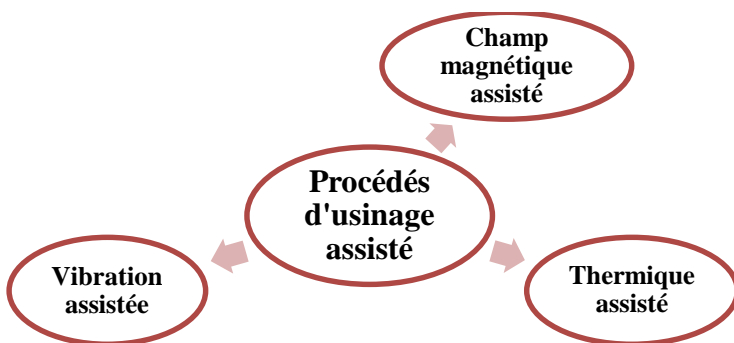


Figure 1.6- Procédés d'usinage assistés.

1.3- Coupe de surfaces cylindriques

Les surfaces cylindriques externes sont usinées en faisant tourner la pièce et en avançant l'outil selon le profil souhaité. Pour créer des formes cylindriques, on utilise des outils de

forme qui passent à travers la pièce rotative. Pour les formes comme les filets, un outil de forme est utilisé pour couper et générer simultanément la forme. Les surfaces cylindriques internes sont usinées en utilisant des techniques de perçage, d'agrandissement et d'alésage pour les finitions [6].

1.3.1- Tournage

Le tournage est un processus d'usinage où la pièce en rotation est taillée par un outil se déplaçant de manière linéaire. Il est utilisé pour usiner les surfaces externes et internes. Les mouvements fondamentaux du processus de tournage sont les suivants (voir figure 1.7) :

- 1) Le mouvement principal est la rotation de la pièce autour de son axe.
- 2) Le MVT auxiliaire est le déplacement linéaire de l'outil, également appelé avance.

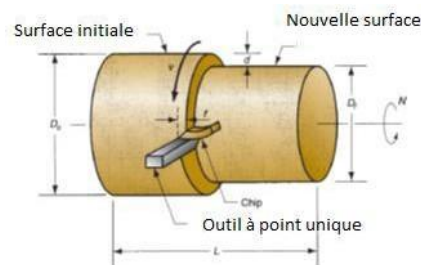


Figure 1.7- Opération de tournage [7].

Les processus de tournage peuvent être classés selon la direction de l'avance de l'outil (voir figure 1.8):

- ☞ Le tournage droit se produit lorsque l'avance se fait parallèlement à l'axe de rotation.
- ☞ Le tournage conique se produit lorsque l'avance de l'outil croise l'axe de rotation.
- ☞ Le tournage transversal se produit lorsque l'avance de l'outil est perpendiculaire à l'axe de rotation. La figure 1.7 présente les différentes formes effectués par le procédé de tournage.

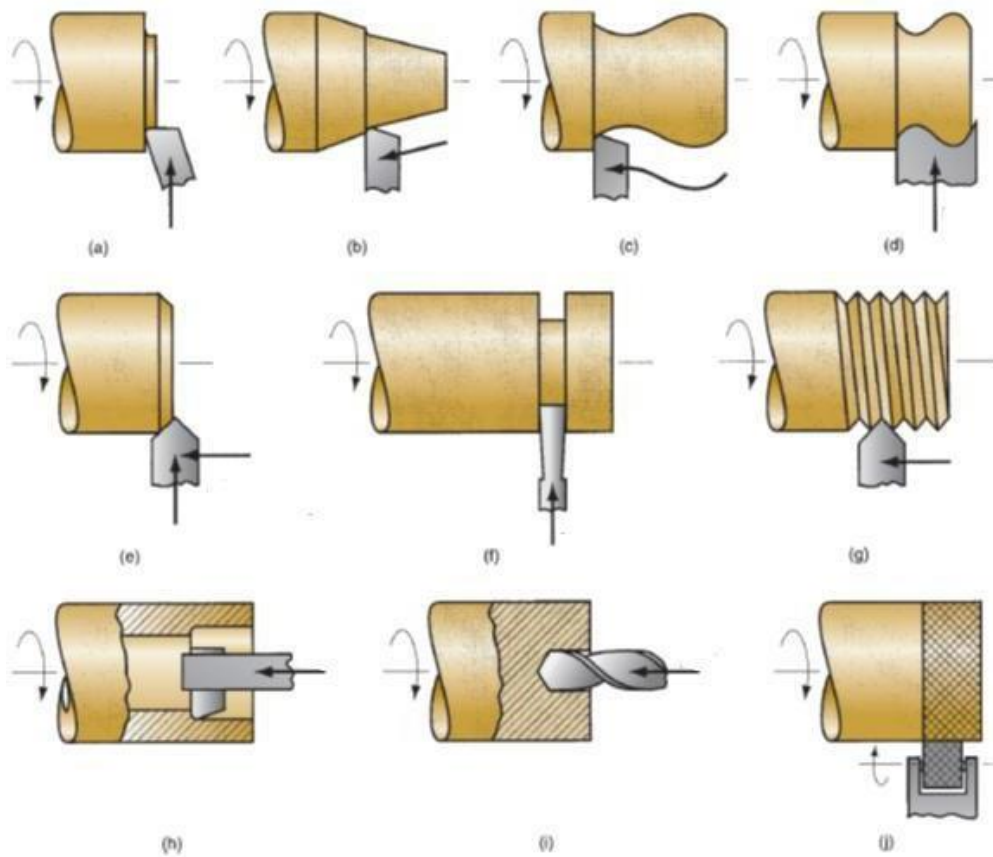


Figure 1.8- Opérations d'usinage autres que le tournage effectuées sur un tour: (a) dressage, (b) tournage conique, (c) tournage de contours, (d) tournage de forme, (e) chanfreinage, (f) coupe, (g) filetage, (h) alésage, (i) perçage et (j) moletage [8].

La figure 1.9 met en évidence les applications courantes de certains outils de tournage standard. Le tableau 1.1 fournit les désignations des outils utilisés.

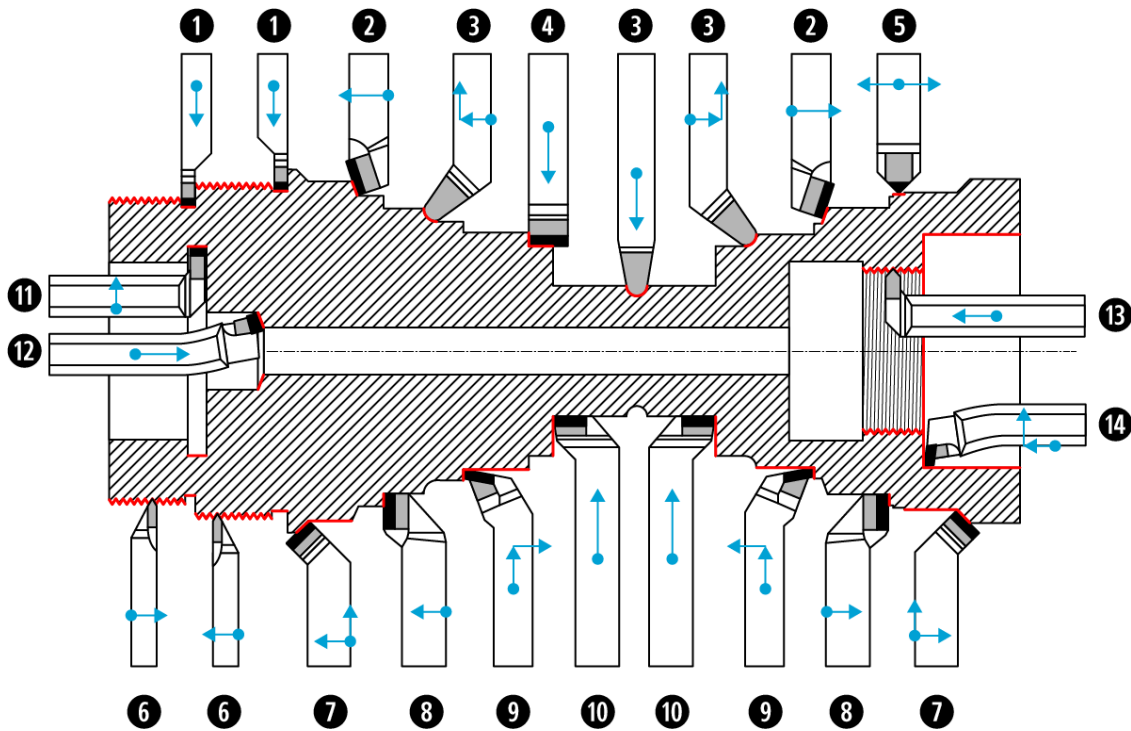


Figure 1.9- Outils standard et leurs applications[9].

Tableau 1.1- Désignation des outils de tournage.

No. outil	Désignation outil
1	Outil saigner
2	Outil à charioter droit
3	Outil à retoucher
4	Outil pelle
5	Outil à retoucher
6	Outil à fileter (extérieur)
7	Outil à charioter coudé
8	Outil couteau
9	Outil à dresser d'angle
10	Outil à dresser les faces
11	Outil à chambrer
12	Outil à aléser
13	Outil à fileter (intérieur)
14	Outil à aléser et dresser

1.3.2- Perçage

Le perçage est une méthode d'usinage qui permet de faire des trous en enlevant des copeaux à l'aide de forets hélicoïdaux. Ce processus implique deux mouvements principaux : la rotation et l'avancement. Dans le perçage horizontal, la pièce tourne tandis que l'outil se déplace linéairement pour avancer. Cette méthode est utilisée pour percer des trous longs en utilisant des tours automatiques, des tours à tourelle ou des tours à centre.

Dans le cas du perçage vertical, l'outil effectue à la fois la rotation et l'avancement grâce aux machines de perçage standard [3, 6]. Il s'agit du type de perçage le plus important et le plus couramment utilisé (voir figure 1.10).

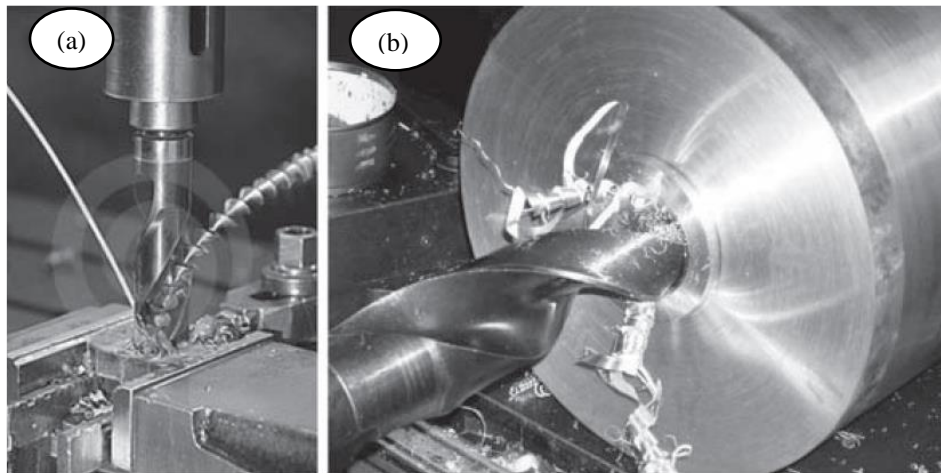


Figure 1.10- Perçage : (a) sur une perceuse, et (b) sur un tour [3].

L'outil de perçage est un foret d'extrémité utilisé pour usiner des trous. Il possède deux arêtes de coupe principales et une ou plusieurs cannelures pour évacuer les copeaux. Le mouvement principal lors de la coupe est la rotation du foret, tandis que le mouvement d'avance consiste en un déplacement rectiligne le long de l'axe du foret, appliqué soit à l'outil lui-même, soit à la pièce (voir figure 1.11).

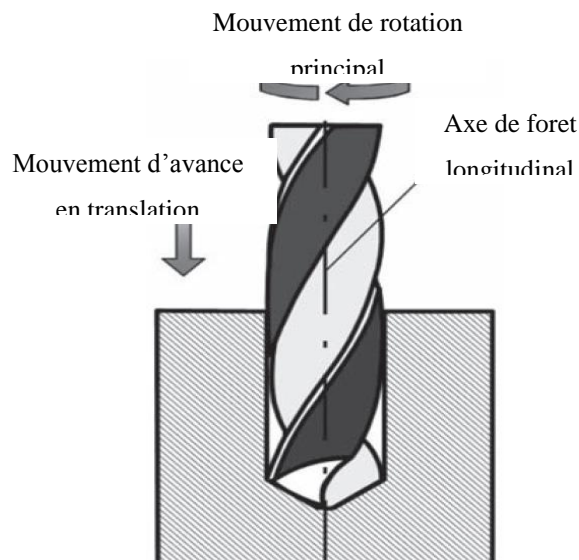


Figure 1.11- Mouvements de perçage [3].

Un outil de perçage est défini comme un outil de coupe d'extrémité dentelée. Un tel outil a l'extrémité terminale (de travail) et l'extrémité arrière pour son emplacement dans un porte-outil (voir figure 1.12).

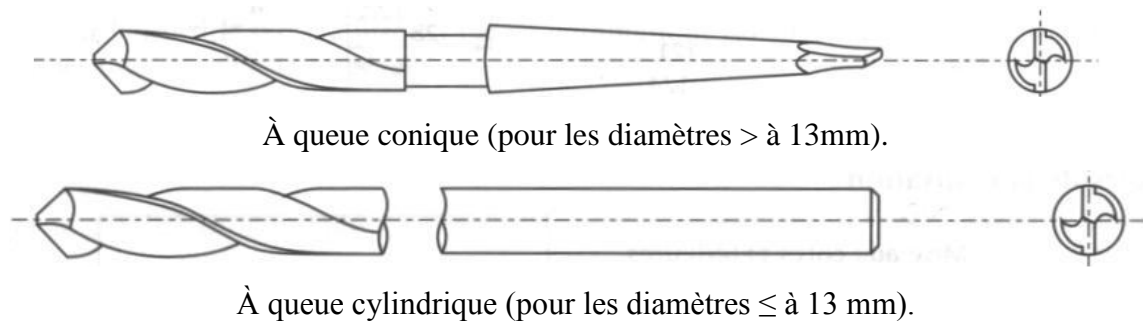


Figure 1.12- Extrémité arrière de foret [3].

Le perçage est une opération principalement utilisée pour enlever rapidement la matière, ce qui signifie que la précision et l'état de surface ne sont pas les priorités. Afin d'obtenir une meilleure précision et une meilleure qualité de surface, il est nécessaire de suivre le perçage avec d'autres opérations telles que l'alésage, le forage ou la rectification interne.

La détérioration de la rugosité de la surface résultant du perçage est principalement causée par les facteurs suivants :

- ❖ L'écoulement des copeaux à travers les rainures du foret, ce qui peut rayer la surface usinée.
- ❖ Les particules de copeaux qui se collent à la surface du foret et forment une accumulation de matière.
- ❖ Les marques d'avance laissées par le foret.
- ❖ La conicité du foret vers la partie arrière.

Afin d'obtenir une meilleure qualité de surface, il est recommandé d'utiliser des techniques d'usinage supplémentaires après le perçage, comme l'alésage ou la rectification interne [6].

1.3.3- Alésage

L'alésage est une méthode utilisée pour obtenir des trous finis en utilisant un outil de coupe multipoint appelé alésoir. La cinématique de l'alésage est similaire à celle du perçage, où l'outil tourne et avance vers la pièce.

En termes de précision d'usinage, l'alésage peut être divisé en deux catégories : l'alésage préliminaire, qui permet d'obtenir une ébauche et une précision moyenne, et l'alésage de finition, utilisé pour obtenir des trous avec une grande précision. L'alésage préliminaire et l'alésage de finition sont souvent utilisés après le perçage pour améliorer la précision des trous [3].

En ce qui concerne les niveaux de précision obtenus, lors du perçage, ils se situent entre les classes 14 et 10, avec une rugosité de surface comprise entre 2,5 et 3,0 $\mu\text{m Ra}$. L'alésage préliminaire permet d'obtenir des classes de précision de 12 à 9, avec une rugosité de surface de 2,5 $\mu\text{m Ra}$. Cela est dû au fait que l'alésoir possède un plus grand nombre

d'arêtes de coupe (>2), ce qui permet d'appliquer des forces de coupe plus uniformes, réduisant ainsi la déviation possible de l'outil [6].

1.4- Usinage de matériaux difficiles à couper

Les matériaux durs tels que les aciers trempés, les verres, les plastiques renforcés de fibres de carbone, les composites métalliques et les céramiques sont connus pour leur grande dureté, leur résistance élevée à l'usure et leur faible ténacité à la rupture. Ils sont largement utilisés dans diverses industries telles que l'aérospatiale, l'automobile, l'électronique, les soins dentaires, l'optique, ...etc. Cependant, en raison de leurs propriétés mécaniques exceptionnelles, l'usinage traditionnel de ces matériaux est difficile. Pour remédier à ce problème, l'usinage assisté par ultrasons a été développé. L'utilisation de l'assistance ultrasonique permet généralement de réduire les forces et le couple de coupe, tout en améliorant la rugosité de la surface [10].

1.5- Variables des processus d'usinage

Tout processus d'usinage comprend deux types de variables liées entre elles : les variables d'entrée (indépendantes : facteurs) et les variables de sortie (dépendantes : réponses) (voir figure 1.13) [11].

1.5.1- Variables d'entrée

- ✦ Matériau de la pièce, incluant sa composition et ses caractéristiques métallurgiques.
- ✦ Géométrie initiale de la pièce, comprenant les processus précédents.
- ✦ Sélection du procédé, pouvant être conventionnel ou non conventionnel.
- ✦ Matériau de l'outil.
- ✦ Paramètres d'usinage.
- ✦ Dispositifs de fixation de la pièce, allant des étaux aux gabarits et montages spécifiques.
- ✦ Fluides de coupe.

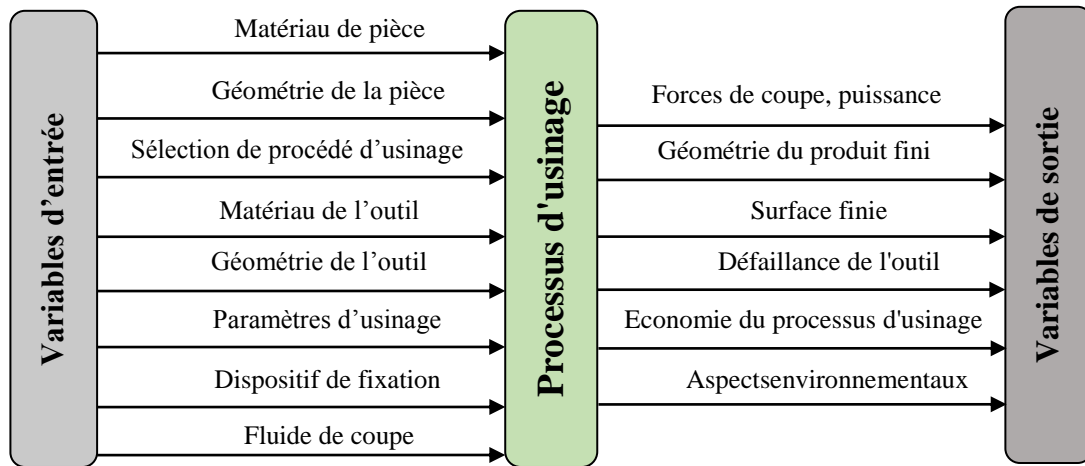


Figure 1.13- Variables d'un processus d'usinage [10].

1.5.2- Variables de sortie (dépendantes)

- ✘ Force de coupe et puissance : La force de coupe affecte la déformation et les vibrations, qui ont un impact sur la taille et la précision des pièces. La puissance influence la génération de chaleur et, par conséquent, l'usure de l'outil.
- ✘ Géométrie du produit fini : permettant d'obtenir une surface usinée avec la forme, la tolérance et les propriétés mécaniques souhaitées.
- ✘ Surface finie : Il peut être nécessaire d'effectuer plusieurs passes pour obtenir l'état de surface désiré.
- ✘ Défaillance de l'outil due à une augmentation de la consommation d'énergie.
- ✘ L'économie du processus d'usinage est influencée par la vitesse de coupe et d'autres variables, ainsi que par des considérations économiques et de coûts. L'aspect économique de l'usinage est important.
- ✘ Les aspects environnementaux et les risques pour la santé doivent être pris en compte et éliminés en prenant les mesures nécessaires.

1.6- Sélection du processus d'usinage

Le choix d'un procédé d'usinage pour produire un composant spécifique, en respectant la forme, la taille, le degré de précision et la qualité de surface requis, dépend de divers facteurs, notamment [10, 11] :

- ➡ La forme de la pièce.

- La taille de la pièce.
- Le matériau de la pièce.
- Les caractéristiques dimensionnelles et géométriques.
- La texture de la surface.
- La quantité de production.
- Le coût de production.
- Les impacts sur l'environnement.

Ces facteurs doivent être soigneusement pris en compte lors de la sélection du procédé d'usinage le plus approprié pour répondre aux exigences spécifiques du composant.

L'état de surface est un critère essentiel pour évaluer la capacité d'usinage d'un matériau. Un mauvais état de surface indique une usinabilité médiocre, tandis qu'un bon état de surface indique une meilleure usinabilité. L'état de surface est influencé par plusieurs facteurs, tels que le type de formation des copeaux, le rayon du nez de l'outil, ainsi que les conditions d'usinage telles que l'avance, la vitesse de coupe et la profondeur de coupe [11]. Lorsqu'un copeau est discontinu, il peut provoquer des fissures qui se propagent jusqu'à la surface usinée. Cela entraîne des vibrations et des stries sur la surface, détériorant ainsi l'état de surface. D'autre part, un copeau continu avec une arête rapportée entraîne également une détérioration de l'état de surface. En effet, des fragments se cassent périodiquement et se déposent sous forme de petites particules sur la surface usinée [10,11]. Pour obtenir un meilleur état de surface, il est préférable d'avoir un copeau continu. Cela permet d'assurer des conditions de coupe stables et minimiser les fluctuations de force. En conséquence, une meilleure qualité de surface est obtenue [10, 11].

1.7- Etat de l'art

Comme montre la littérature scientifique, des publications récentes ont été consacrées à l'étude du tournage dur sous l'effet des paramètres de coupe et de la géométrie d'outil de coupe. Laouissi et al. [9] ont réalisé une étude comparative entre deux méthodes de modélisation mathématique (ANN et RSM) des variables dépendantes (R_a , F_z , P_c et MRR) dont le but de déterminer la précision des résultats prédites. L'étude expérimentale du tournage de la fonte EN-GJL-250 ($H = 250$ HB) à été effectué par deux inserts en céramique de nitrure de silicium revêtues et non revêtues (Si_3N_4). De plus, la conception de Taguchi (L_{27}) a été appliquée. Les auteurs ont montré l'efficacité et la précision de

prédiction de la technique ANN par rapport à l'autre méthode, le RSM peut être plus utile dans la détermination de la signification statistique des variables indépendantes (V_c , f et ap). En outre, Laouissi et al. [10] ont usiné le même matériau (fonte EN-GJL-250) par les mêmes conditions de coupe, la différence entre ce papier et le papier précédant [12] est l'utilisation de la méthode de surface de réponse (RSM) et l'analyse de la variance (ANOVA) pour prédire les différents paramètres de la texture de surface (2D et 3D). En guise de synthèse, les recherches antérieures [12, 13] indiquent que les deux vitesses d'avance et de coupe (V_c et f) influencées significativement la rugosité de surface, tandis que l'autre variable de coupe (ap) influencé la force de coupe tangentielle (F_z). De plus, l'outil de coupe en céramique revêtue présente une meilleure texture de surface par rapport au deuxième outil en céramique non revêtue.

Très souvent, la caractérisation et l'analyse de la texture de surface finie est complexe [14]. De plus, toute une évaluation expérimentale ou numérique de la texture de surface sera influencée par la distribution aléatoire des aspérités, ce qui produit différents profils de la surface contrôlés sur la même surface d'un objet manufacturé. Par conséquent, un nombre limité des paramètres de rugosité fournit une description moins précise et incompréhensible de la fonctionnalité de surface [14, 15]. Selon Coba-Salcedo et al. [16], pour le bon fonctionnement des parois intérieures des moteurs à combustion interne, l'application de la technique de la courbe de portance est nécessaire afin de caractériser la texture de surface fonctionnelle. Cette courbe utile surtout dans l'usure de surface des moteurs à combustion interne [16]. D'après Zhu et al. [17], les paramètres surfaciques (S_a , S_q , S_{sk} et S_{ku}) produisent une explication incomplète du mécanisme de frottement et d'usure de la surface en contact. De ce point de vue, ils sont faits une corrélation entre les paramètres surfaciques de la courbe de portance (S_{pk} , S_k , S_{vk}) et deux cas de frottement (sec et lubrifié). Donc, la caractérisation de surface par la courbe Abbott-Firestone est complexe car la mesure sur la même surface donne différentes valeurs [16]. Selon King et al. [18], la norme ISO 13565-2:1996 est développée la première fois en Allemagne (DIN 4776) pour expliquer la texture de la surface des cylindres de moteurs à combustion interne. Comme le souligne Grzesik et al. [14], les cinq paramètres de rapport de matériau (BAC) sont développés par l'industrie automobile allemande. Dans la littérature technique, cette norme est définie sous le nom de groupe de paramètres R_k [19].

CHAPITRE 2

Matériau, appareils

et

méthodes utilisées

2.1- Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les différentes méthodes utilisées pour mener nos expériences visant à caractériser le comportement du couple (outil-matière) lors du tournage de l'acier à C45 avec des plaquettes de coupe en carbure non revêtu (SNMG 120404, $r_{\epsilon} = 0.4 \text{ mm}$, SNMG 120408, $r_{\epsilon} = 0.8 \text{ mm}$). Nous décrivons les équipements utilisés pour la coupe générée et la mesure de la rugosité des surfaces obtenues. Toutes les mesures ont été réalisées au laboratoire d'optique appliquée (LOA) de l'Institut d'Optique et Mécanique de Précision de l'Université Ferhat Abbas, Sétif 1, en Algérie.

Nous donnons également un rappel théorique détaillé sur les plans d'expériences, qui constituent une méthodologie efficace pour mener des études paramétriques avec un nombre limité d'expériences. Enfin, nous présentons les méthodes d'optimisation proposées pour compléter cette approche.

2.2- Matériels utilisés

Les essais de tournage ont été effectués dans un atelier privé de la wilaya de Tissemsilt, où un tourneur était disponible. Le procédé de tournage spécifique étudié était le chariotage.

2.2.1- Machine-outil, porte-outils et les plaquettes

L'usinage est réalisé sur un tour conventionnel de la société tchèque "LMO Microweily TY-1640S" de caractéristiques :

- ✓ Passage au-dessus de la glissière transversale 240 mm,
- ✓ Alésage de la broche 52 mm,
- ✓ Distance entre les centres 1016 mm,
- ✓ Vitesse de rotation 30 - 2000 tr/min,
- ✓ Cône de la contre-pointe 4MT,
- ✓ Puissance du moteur 3.75 kW,
- ✓ Poids 1750 kg,
- ✓ Surface au plancher (l x l x h) 2240 mm x 980mm x 1205 mm (voir figure 2.1).



Figure 2.1- Vue du tour utilisé

- Deux plaquettes de coupe en carbure non revêtu (SNMG12 04 04, $r_\epsilon = 0.4 \text{ mm}$, SNMG 120408, $r_\epsilon = 0.8 \text{ mm}$) ayant une bonne tenue de coupe, une forte ténacité et une grande résistance à l'usure (voir tableau 1.1 et figure 2.2).

Tableau 2.1- Caractéristiques des plaquettes utilisées.

Type d'opération	tournage
Forme de la plaquette	SNMG
Dimension de la plaquette	120404
Matière	Carbure
Désignation ISO	SNMG 120404-PM
Matière usinée	ACIER - FONTE
Epaisseur de plaquette (mm)	4,76
Longueur arête (mm)	12
Cercle inscrit plaquette (mm)	12,7
Rayon plaquette (mm)	0,4
Nuance	GC4325
Fixation plaquette	trou central
Modèle brise-copeaux	PM
Angle de dépouille (°)	0
Angle et forme plaquette	90°S
Classe de tolérance	M
Nombre d'arêtes de coupe	8
Type de plaquette	Négative
Revêtement	Oui
Marque	SANDVIK

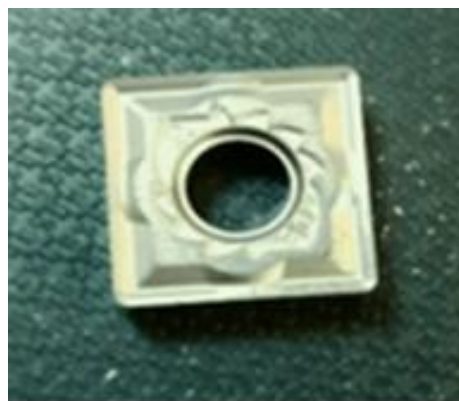


Figure 2.2- Vue de la plaquette utilisée.

- Deux porte-outils : (PSBNR 2525 M12X $r=75^\circ$; PSSNR 2525 M12 X $r=45^\circ$)(figure 2.3).



Figure 2.3- Vue de porte-outils utilisés.

2.2.2- Matériau usiné

L'acier C45 est un acier fin non allié au carbone à teneur plus élevée que pour les aciers C35 et destiné pour les traitements [20].

Les essais d'usinage ont été réalisés sur trois pièces en acier C45 de diamètre 65 mm et de longueur 250 mm contiennent huit gorges de 5 mm, entre chaque deux gorge 20 mm (figure 2.4).



Figure 2.4- Vue d'une pièce usinée.

La composition chimique de l'acier utilisé est donnée par le tableau 2.2 [21].

Tableau 2.2- Composition chimique d'acier C45.

Nuance d'acier	C	Si ≤	Mn	P ≤	S ≤	Cr ≤	Ni ≤	Mo ≤	Cr+Mo +Ni ≤
C45	0.42-0.50	0.40	0.50-0.80	0.045	0.045	0.40	0.40	0.10	0.63

Le tableau 2.3 donne les caractéristiques mécaniques et physique de l'acier C45 telles que la charge de rupture en traction et module d'élasticité, allongement a la rupture, densité, température de fusion, dureté limite d'élasticité [22].

Tableau 2.3- Propriétés mécaniques et physiques d'acier C45.

Rm (N/mm ²)	Rr (N/mm ²)	Re (N/mm ²)	A (%)	Dureté HB
630 ÷ 760	750 ÷ 850	275 ÷ 350	14 ÷ 17	150 ÷ 220

Les nuances d'acier équivalentes à l'acier C45 sont répertoriées dans le tableau 2.4, y compris les normes chinoises GB, les normes américaines ASTM AISI et SAE, les normes japonaises JIS et ISO [21].

Tableau 2.4- Équivalence de la nuance d'acier C45.

Acier C45							
Chine		US		Japon		ISO	
Norme	Nuance d'acier	Norme	Nuance d'acier	Norme	Nuance d'acier	Standard	Nuance d'acier
GB/T 699	45 steel	A29/A29M	1045 steel	JIS G4051	S45C		C45E4

2.2.3- Rugosimètre

Le testeur de rugosité de surface de la série S-100 de Surtronic offrent une solution polyvalente pour tous vos besoins de mesure de l'état de surface. Les accessoires spécifiques à l'application peuvent être adaptés avec une variété de fixations pour répondre à vos besoins spécifiques. Les testeurs numériques d'analyse d'état de surface à stylet de la série S-100 de Surtronic existent en deux variantes : le S-116 est notre offre standard, tandis que le S-128 offre une plage de mesure et une capacité d'analyse étendues, l'inclusion d'un élévateur de stylet de 50 mm avec fixation à angle droit et d'une portée de stylet de plus de 70 mm signifie que même les surfaces les plus difficiles peuvent être mesurées sans qu'il soit nécessaire d'utiliser des blocs éleveurs, des supports ou des fixations coûteux, le support de la tête de lecture est monté sur une glissière pour le réglage vertical et peut également être tourné pour obtenir différentes positions de mesure, y compris la mesure à angle droit. Mesurez n'importe quelle surface, à n'importe quelle hauteur, grâce à l'élévateur de stylet inclus, Connectivité USB pour le chargement, le stockage externe ou l'impression, les pieds en V antidérapants

permettent d'utiliser le système sur des surfaces planes ou incurvées. 2000 mesures à partir d'une seule charge [23].



Figure 2.5- Rugosimètre utilisé.

2.2.4- Moyens de calcul

Les logiciels utilisés dans notre étude sont :

- ❏ Logiciel Minitab 18 (figure 2.6).
- ❏ Logiciel Design-expert 11 (figure 2.7).

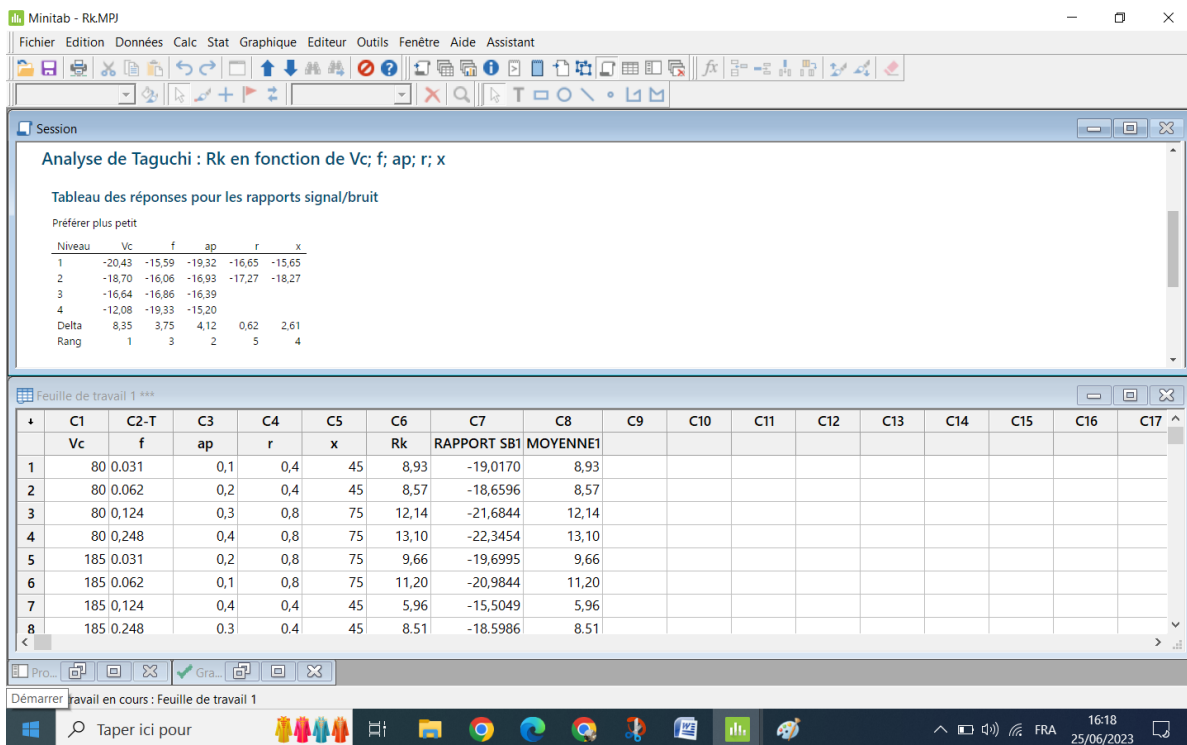


Figure 2.6- Interface de logiciel Minitab 18.

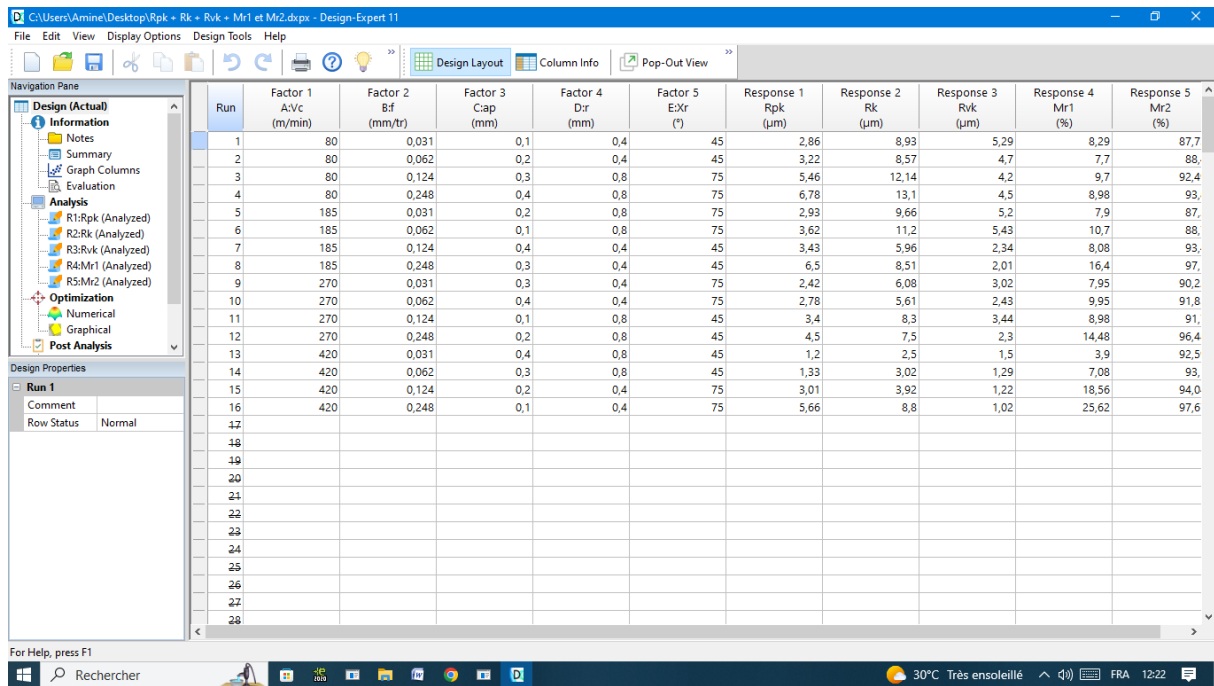


Figure 2.7- Interface du logiciel Design-expert 11.

2.3- Conditions de coupe

Méthode uni-factorielle :

L’objectif de la méthode uni-factorielle est l’analyse comparative du comportement de la rugosité, d’efforts de coupe et l’usure en fonction des paramètres de coupe (V_c , f , ap , r_ϵ et X_r) [24].

Les paramètres de sortie sont les Cinq critères de rugosité (R_{pk} , R_k , R_{vk} , $Mr1$ et $Mr2$), Le tableau regroupe les conditions de coupe en uni-factoriel et les paramètres de sortie.

Tableau 2.5- Conditions de coupe pour les essais et les paramètres de sortie.

N ⁰	Facteurs	Valeurs	Paramètres de sortie
1	Avance f (mm/tr)	0.031, 0.062, 0.124, 0.248	R_{pk} , R_k , R_{vk} , $Mr1$ et $Mr2$
2	Vitesse de coupe V_c (mm/min)	80, 185, 270, 420	
3	Profonde de passe ap (mm)	0.1, 0.2, 0.3, 0.4	
4	Rayon du bec r_ϵ (mm)	0.4, 0.8	
5	Angle de coupe principal X_r (°)	45, 75	

Méthode multifactorielle :

Dans notre étude, nous avons trois facteurs à quatre niveaux de variation ($q = 4^3$) et deux facteurs à deux niveaux ($q = 2^2$). Nous avons donc un nombre d'essai $N = 256 (4^3 \times 2^2)$ selon la méthode de plan factoriel complet. Pour diminuer le nombre d'essais sans pour autant diminuer la précision des résultats, nous avons opté pour un plan de Taguchi suivant la table orthogonale standard $L_{16} (4^3 \times 2^2)$. Les essais sont numérotés de 1 à 16. La matrice de planification, ainsi que la codification des facteurs sont illustrées dans le tableau 2.5 et le tableau 2.6 qui présente les paramètres de coupe et leurs niveaux. La matrice de planification donne les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les différents régimes de coupe est représentée par le tableau 2.5 et Paramètre de coupe et leurs niveaux pour un plan de 16 essais par le tableau 2.7.

Tableau 2.6- Tableau orthogonale de Taguchi $L_{16} (4^3 \times 2^2)$.

Trail n°	V_c	f	ap	r_ϵ	X_r
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	1	1
3	1	3	3	2	2
4	1	4	4	2	2
5	2	1	2	2	2
6	2	2	1	2	2
7	2	3	4	1	1
8	2	4	3	1	1
9	3	1	3	1	2
10	3	2	4	1	2
11	3	3	1	2	1
12	3	4	2	2	1
13	4	1	4	2	1
14	4	2	3	2	1
15	4	3	2	1	2
16	4	4	1	1	2

Tableau 2.7- Paramètres de coupe et leurs niveaux.

Niveau	$V_c (m/min)$	$f (mm/tr)$	$ap (mm)$	$r_\epsilon (mm)$	$X_r (^\circ)$
--------	---------------	-------------	-----------	-------------------	----------------

1	80	0.031	0.1	0.4	45
2	185	0.062	0.2	0.8	75
3	270	0.124	0.3	-	-
4	420	0.248	0.4	-	-

Tableau 2.8- Paramètre de coupe et leurs niveaux pour un plan de 16 essais.

Trail n°	V_c (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	r_e (mm)	X_r (°)
1	80	0.031	0.1	0.4	45
2	80	0.062	0.2	0.4	45
3	80	0.124	0.3	0.8	75
4	80	0.248	0.4	0.8	75
5	185	0.031	0.2	0.8	75
6	185	0.062	0.1	0.8	75
7	185	0.124	0.4	0.4	45
8	185	0.248	0.3	0.4	45
9	270	0.031	0.3	0.4	75
10	270	0.062	0.4	0.4	75
11	270	0.124	0.1	0.8	45
12	270	0.248	0.2	0.8	45
13	420	0.031	0.4	0.8	45
14	420	0.062	0.3	0.8	45
15	420	0.124	0.2	0.4	75
16	420	0.248	0.1	0.4	75

2.4- Plans d'expériences

2.4.1- Définition

Les plans d'expériences sont des méthodologies puissante qui permet d'optimiser la mise au point d'un produit ou d'un procédé industriel. Cet ouvrage explique comment appliquer cet outil pour la mise au point de mélanges (composition d'une colle, d'un médicament, d'un cocktail, etc.). Il explique de façon concrète les contraintes spécifiques aux mélanges et les types de plans disponibles pour mener à bien une étude. De nombreuses études de cas "grandeur nature" viennent illustrer le propos [25].

Les trois aspects essentiels du processus d'acquisition des connaissances sont les suivantes :

a) Choix de la méthode d'expérimentation

La méthode d'expérimentation choisie doit faciliter l'interprétation des résultats. Elle doit également minimiser le nombre des essais sans toutefois sacrifier la qualité. La théorie des plans d'expériences assure les conditions pour lesquelles on obtient la meilleure précision possible avec le minimum d'essais. On a donc le maximum d'efficacité avec le minimum d'expériences et par conséquent le coût minimum.

b) Analyse des résultats

L'analyse des résultats d'expériences est facilitée par le choix initial des expériences. Les résultats seront faciles à interpréter et riches d'enseignement si l'on a bien préparé les expériences. Grâce aux ordinateurs et aux logiciels la construction des plans d'expériences et les calculs nécessaires à leur interprétation sont devenus très simples. Ces outils favorisent également les représentations graphiques qui illustrent de manière spectaculaire les résultats et améliorent la compréhension des phénomènes

c) Acquisition progressive de la connaissance

L'expérimentateur qui entreprend une étude ne connaît pas les résultats, il est donc sage d'avancer progressivement pour pouvoir réorienter les essais en fonction des premiers résultats. Une première ébauche permettra de mieux orienter les essais vers les seuls aspects intéressants de l'étude et d'abandonner les voies sans issues. Une première série d'expériences conduit à des conclusions provisoires ; en fonction de ces conclusions provisoires, on lance une nouvelle série d'essais. L'ensemble des deux séries d'expériences est utilisé pour obtenir un contour précis des résultats d'étude. L'expérimentateur accumule ainsi les seuls résultats dont il a besoin et s'arrête dès qu'il a obtenu ce qu'il cherche

2.4.2- Terminologie

La grandeur d'intérêt, qui est généralement notée y , porte le nom de réponse. Les variables qui peuvent modifier la réponse sont appelées facteurs. On parle donc des Facteurs qui influent sur une réponse. Les termes facteur et réponse sont universellement employés dans le domaine des plans d'expériences.

1) Facteurs continus

La pression est un exemple de facteur continu. Dans un intervalle de pression donné, on peut choisir toutes les valeurs possibles. Il en est de même d'une longueur, d'une concentration ou d'une température. Les valeurs prises par les facteurs continus sont donc représentées par des nombres continus.

2) Facteurs discrets

Au contraire, les facteurs discrets ne peuvent prendre que des valeurs particulières. Ces valeurs ne sont pas forcément numériques : on peut représenter un facteur discret par un nom, une lettre, une propriété ou même par un nombre qui n'a alors en soi aucune valeur numérique mais qu'une signification de repère. Par exemple, on peut s'intéresser aux couleurs d'un produit : bleu, rouge et jaune sont des facteurs discrets.

3) Niveau de facteur

Vous pouvez utiliser des facteurs pendant une expérience afin de déterminer leur effet sur la variable de réponse. Un facteur n'admet qu'un nombre limité de valeurs possibles, connues sous le nom de niveaux de facteurs. Un facteur peut être une variable de catégorie ou peut être basé sur une variable continue, mais n'utiliser que quelques valeurs contrôlées dans l'expérience.

2.5- Type des plans d'expérience

2.5.1- Plans factoriels complète

Un plan factoriel complet est un plan pour lequel toutes les combinaisons possibles aux limites du domaine d'étude auront été réalisées : c'est le nombre maximal d'essais pour un plan d'expériences factoriel. Le nombre d'essais N se calcule d'après la formule suivante :

$N = 2^k$ où k est le nombre de facteurs. Le nombre d'essais est exactement égal au nombre de coefficients du modèle à déterminer. On vérifie bien ceci pour les plans 2^2 et 2^3 .

Plan 2^2 : facteurs A et B 4 expériences

Plan 2^3 : facteurs A, B et C 8 expériences

Plan 2^4 : facteurs A, B, C et D 16 expériences

Les matrices d'expériences se construisent selon les tableaux suivants pour les cas des plans 2^2 et 2^3 avec des facteurs A, B et C.

Niveau	A	B
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1

Tableau 2.9- Exemples de plans d'expériences.

Niveau	A	B	C
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1

Plus généralement, la matrice d'expériences comporte k colonnes pour les facteurs principaux et 2^k lignes soit 2^k essais. Elle se construit selon la règle suivante : colonne Du 1er facteur : alternance de $-1^{et} +1$

- ✧ colonne du 2eme facteur : alternance de -1 et $+1$ de 2 en 2
- ✧ colonne du 3eme facteur : alternance de -1 et $+1$ de 4 en 4
- ✧ colonne du 4eme facteur : alternance de -1 et $+1$ de 8 en 8

et ainsi de suite pour un nombre plus élevé de facteurs [26].

Avantages et inconvénients des plans factoriels complets

Les plans factoriels complets sont des plans dits sans risque car ils permettent de déterminer tous les effets et toutes les interactions sans ambiguïtés. Le nombre d'essais nécessaire est au moins égal au nombre total de coefficients à déterminer. Les essais sont réalisés de telle sorte que les coefficients sont estimés avec une variance minimale. Leur simplicité d'exploitation

assure un bon "rendement" par rapport aux résultats obtenus. Néanmoins ils présentent une limite essentielle : le nombre d'essais augmente très rapidement avec le nombre de facteurs. On atteint déjà 128 expériences (2^7) pour 7 facteurs ce qui devient donc très vite difficile à réaliser dans la pratique.

2.5.2- Plans factoriels fractionnaires

Les plans fractionnaires ont été conçus pour remédier à l'inflation rapide du nombre d'essais dans les plans complets. L'objectif des plans fractionnaires va consister à réduire le nombre d'expériences à réaliser par rapport au nombre maximum donné par le plan complet. Les plans fractionnaires utilisent les matrices des effets des plans complets. Leurs matrices des effets ont donc également toutes les qualités des matrices d'Hadamard On parlera de plan 2^{k-p} (p entier) pour indiquer un plan fractionnaire issu du plan complet 2^k avec k facteurs à 2 niveaux. Par exemple le plan 2^{4-1} est un plan fractionnaire permettant l'étude de 4 facteurs en utilisant la matrice des effets du plan complet 2^3 : 2^3 expériences sont à réaliser au lieu des 24 expériences du plan complet. Le nombre d'expériences est divisé par 2, il correspond à la réalisation d'un demi plan complet 2^4 . De la même manière il est possible de réaliser des plans 2^{k-2} , 2^{k-p} (p entier < k). Le plan 2^{7-3} permettra une étude de 7 facteurs avec seulement 24 expériences au lieu de 2^7 : il s'agit donc de 1/8ème du plan complet 2^7 .

Néanmoins les plans fractionnaires nécessitent une phase de conception plus longue car l'interprétation qui résultera des résultats dépend essentiellement du choix de p. Plus le nombre p augmente, plus la charge expérimentale va diminuer mais au détriment d'un risque de plus en plus grand sur la qualité des informations tirées du plan. Il faudra donc évaluer les risques avant de démarrer l'expérimentation et les minimiser en construisant le plan fractionnaire adéquat. C'est le pari du plan fractionnaire.

2.5.3- Matrices d'expériences fractionnaires de Taguchi

La mise au point d'une matrice d'expériences fractionnaire orthogonale, spécialement adaptée à la réalisation d'une expérimentation donnée, n'est pas à la portée des non spécialistes. Une des contributions majeures de G.Taguchi est d'avoir mis au point des outils qui simplifient, et, surtout, fiabilisent considérablement cette tâche notamment une collection des matrices d'expériences fractionnaires orthogonales standard, qui s'avèrent suffisantes pour la quasi-totalité des situations industrielles. Chaque matrice est désignée par un symbole Par exemple:

L8 (2⁷) signifie que l'on étudie 7 facteurs à 2 niveaux et qu'il faut réaliser 8essais.

L18 (2¹ x 3⁷) signifie que l'on étudie 1 facteur à 2 niveaux et 7 facteurs à 3niveaux et qu'il faut réaliser 18 essais.

2.5.4- Plan d'expériences de surface de réponse

- a) Plans composites centrés : Les plans composites centrés font appel à la méthodologie des surfaces de réponses, leur construction consiste à ajouter des points en étoile à partir d'un plan factoriel complet. Ils sont cependant assez "gourmands" en termes de nombre d'essais par rapport à d'autres types de plans mais ce nombre reste raisonnable lorsque le nombre de facteurs étudiés est faible (entre 2 et 4). Le nombre d'expériences dans un plan composite centré est donné par la relation suivante :

$$N = 2^K + 2k + n_0 \quad (2.1)$$

- b) Plan composite centré ordinaire : Dans ce type de plan, chaque facteur prend 5 niveaux et le domaine expérimental est un domaine sphérique.

2.6- Méthode d'optimisation

La méthode d'optimisation permet d'optimiser l'agencement et l'exécution des expériences, dans le but d'arriver à une modélisation mathématique, pour simuler des processus systèmes complexes. Mais cette méthode selon qu'elle soit mono objective ou multi-objectives, le nombre d'essais et la manière de traitement peut différer.

2.6.1- Méthode mono-objective (Taguchi)

La méthode de Taguchi a été largement utilisée dans l'analyse des systèmes d'ingénieries et se compose d'un plan d'expériences avec l'objectif d'acquérir des données d'une manière contrôlée, afin d'obtenir des informations sur le comportement d'un processus donné. L'objectif du paramètre de conception est d'optimiser les valeurs et les paramètres d'un procédé pour améliorer les caractéristiques et les performances optimales de ces valeurs. [31] En outre, il est probable que les valeurs des paramètres du procédé optimales obtenues à partir du modèle de paramètres ne sont pas sensibles aux variations des conditions d'environnement et d'autres facteurs de bruit. Par conséquent, la conception des paramètres est l'étape clé dans la méthode Taguchi pour atteindre la haute qualité sans augmenter les coûts. Taguchi est une méthode de conception robuste et un outil de haute qualité, puissant pour les plans d'expériences. Elle envisage trois étapes dans un processus et le développement de produits: conception des systèmes, la conception des paramètres et la conception de la tolérance. Dans

la conception du système, l'ingénieur utilise des principes scientifiques et des techniques pour déterminer la configuration fondamentale. Dans l'étape de conception des paramètres, des valeurs spécifiques pour les paramètres du système sont déterminées. La conception de la tolérance est utilisée pour déterminer les meilleures tolérances des paramètres [27].

2.6.2- Méthode multi objectives

L'optimisation multi-objectifs fait partie intégrante des activités d'optimisation et a une importance pratique considérable, car presque tous les problèmes d'optimisation du monde réel sont parfaitement adaptés pour être modélisés à l'aide de plusieurs objectifs conflictuels. Il contient deux types de méthodes :

a) Méthode d'analyse relationnelle grise (GRA)

L'analyse relationnelle en gris est une technique proposée pour résoudre le problème de l'optimisation complexe en convertissant le multi-objectif en un objectif unique pour obtenir une combinaison optimale de paramètres pour l'amélioration simultanée de plusieurs caractéristiques d'usinage [28].

L'utilisation de cette méthode contient les étapes suivantes:

Étape 1: Génération relationnelle grise

Selon l'optimisation de l'objectif visé pour minimiser ou maximiser les résultats expérimentaux, la normalisation du rapport S/N pour les résultats expérimentaux dans la plage entre zéro et un est nécessaire pour la génération relationnelle grise. En fonction de l'optimisation de la fonction objective, la normalisation peut être effectuée dans deux cas. Si le plus petit le meilleur est la caractéristique sélectionnée dans la séquence originale pour la minimisation, alors il devrait être normalisé en la formule suivante:

$$x_i(k) = \frac{\max(x_i^0(k)) - x_i^0(k)}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (2.2)$$

Si la réponse doit être maximisée, alors les caractéristiques préférées plus grands sont destinées à être normalisées pour être mises à l'échelle dans une plage acceptable en la formule suivante [26] :

$$x_i(k) = \frac{x_i^0(k) - \min(x_i^0(k))}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (2.3)$$

Où :

x est la valeur souhaitée. $i = 1, \dots, m$; $k = 1, \dots, n$; m est le nombre de données expérimentales et n est le nombre de réponses.

$x_i^0(k)$: désigne la séquence originale.

$x_i(k)$: désigne la séquence après le prétraitement des données.

$\max(x_i^0(k))$: représente la plus grande valeur de $x_i^0(k)$.

$\min(x_i^0(k))$: représente la plus petite valeur de $x_i^0(k)$.

La plus grande valeur des résultats normalisés indique la meilleure caractéristique de performance et les résultats les mieux normalisés seront égaux à un.

Étape 2: Coefficient Relationnel Gris (GRC)

Le coefficient de corrélation gris ($\eta_i(k)$) décrit la corrélation entre les résultats idéaux et expérimentaux obtenus. Il peut être calculé comme suit [33] :

$$\eta_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \omega \Delta_{max}}{\Delta_{oi} + \omega \Delta_{max}} \quad (2.4)$$

$$0 < \eta_i(k) \leq 1$$

- $\Delta_{oi}(k)$ est la différence absolue entre la séquence de référence $x_0^k(k)$ et le rapport S/N de la suite mesurée $x_i^k(k)$.
- ω est le coefficient de distinction ou d'indentification est comprise entre 0 et 1.

- Δ_{min} et Δ_{max} sont les valeurs minimales et maximales des différences absolues $\Delta_{0i}(k)$ de toutes les séquences de comparaison.

$$\Delta_{0i}(k) = \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (2.5)$$

Étape 3: Grey Relationnel Grade (GRG)

La note relationnelle grise représente la corrélation entre les séries, elle est donnée par la formule suivante:

$$\alpha_i = \frac{1}{n} + \sum_{k=1}^n \eta_i(k) \quad (2.6)$$

Où

- n est le nombre de réponses.
- α_i est le degré de relation gris requis pour l'expérience

Étape 4: Détermination des paramètres d'usinage optimum

Une fois la note relationnelle grise calculée, la sélection de la combinaison des niveaux Optimaux est basée sur le graphique des effets principaux pour (GRG). La plus grande valeur de nuance relationnelle grise trouvée près de la valeur normalisée idéale correspond à la combinaison optimale. Par conséquent, le niveau optimal des paramètres de processus est le niveau ayant la plus grande valeur GRG.

Étape 5: tests de confirmation

Afin d'améliorer les performances du système, le test de vérification est effectué à la dernière étape pour s'assurer que la fiabilité des niveaux optimaux est suggérée par une analyse de gris relationnelle. En comparant la valeur du rapport S / N du GRG obtenu à partir du test optimal avec celle prédite par la formule suivante en utilisant des niveaux optimaux [28].

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{i=1}^q \hat{\eta}_i - \eta_m \quad (2.7)$$

Où

η_m : est la moyenne totale du rapport S/N,

$\hat{\eta}_i$: est la moyenne du rapport S/N au niveau optimal,

q : est le nombre de facteurs d'entrée principaux qui ont un effet significatif sur les réponses en sortie.

b) Méthode de la fonction de désirabilité (DF)

L'approche de fonction de désirabilité est en effet appropriée à la méthodologie de la surface de réponse, son principe est d'dimensionner toutes les réponses $Y_j(x), j = 1, 2, 3, \dots, p$, obtenues à partir de différentes échelles de mesure, en des fonctions $d_j(Y_j(x))$ d'échelle identique, appelées fonctions de désirabilité individuelle variant de 0 à 1. On entend par x le vecteur des facteurs $x^T = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ [34].

Après avoir défini les fonctions pour chaque réponse individuellement, une fonction objective globale est définie comme une moyenne géométrique des différentes désirabilités.

$$D(x) = [d_1(Y_1(x)).d_2(Y_2(x)) \dots \dots]^{\frac{1}{p}} \quad (2.8)$$

La fonction de désirabilité $d_j(Y_j(x))$ a été proposée originalement par de deux façons : [28]

$$d_j(Y_j(x)) = e^{Y_j(x)} \quad (2.9)$$

$$d_j(Y_j(x)) = e^{-|Y_j(x)|} \quad (2.10)$$

Puisque les transformations (2.9) ou (2.10) ne sont pas très flexibles dans le sens où ces fonctions ne peuvent pas assumer une variété de formes, [28] et autres ont proposé deux autres fonctions :

$$d_j(Y_j(x)) = \begin{cases} 0 & \text{si } Y_j(x) \leq Y_{\min j} \\ \left(\frac{Y_j - Y_{\min j}}{Y_{\max j} - Y_j}\right)^r & \text{si } Y_{\min j} \leq Y_j(x) \leq Y_{\max j} \\ 1 & \text{si } Y_j(x) \geq Y_{\max j} \end{cases} \quad (2.11)$$

$$d_j(Y_j(x)) = \begin{cases} \left(\frac{Y_j - Y_{\min j}}{T_j - Y_{\min j}}\right)^s & \text{si } Y_{\min j} \leq Y_j(x) \leq T_j \\ \left(\frac{Y_j - Y_{\max j}}{T_j - Y_{\max j}}\right)^t & \text{si } T_j \leq Y_j(x) \leq Y_{\max j} \\ 0 & \text{si } Y_j(x) \notin [Y_{\min j}; Y_{\max j}] \end{cases} \quad (2.12)$$

T_j la valeur cible pour une réponse j

$Y_{\min j}$ et $Y_{\max j}$ les limites de désirabilité

Pour la réponse j , s et t sont des variables définies par l'utilisateur en fonction de leur expérience permettant à celui-ci d'indiquer les limites de la fonction de désirabilité autour de la valeur cible (T_j) pour une réponse j .

L'étape qui suit consiste à remplacer les polynômes $Y_j(x)$ développé par la méthodologie de surface de réponse dans les fonctions de désirabilités individuelles, qui seront eux-mêmes remplacés dans la fonction objective globale. Finalement, il ne reste qu'à maximiser la fonction objective globale $D(x)$

Pour la méthodologie de la surface de réponse l'utilisation des variables codées (ou des variables centrées réduites) pour trouver le modèle de régression pour p variables est une pratique courante. La relation la plus répandue pour la transformation des variables réelles en variable codées a été proposée par [30].

$$x = \frac{2t-(u+1)}{u-1} \quad (2.13)$$

Pour laquelle :

u : est la valeur supérieure pour t

l : est la valeur inférieure pour t

t : est la valeur cible étudiée avec $1 \leq t \leq u$

x : est la valeur codée qui correspond à t

2.7- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements utilisés lors de nos travaux. Les caractéristiques des matériaux de coupe, les instruments de mesure utilisés, la méthodologie des plans d'expériences qui à l'objectif de minimiser le plus possible le nombre d'essais à mener sans sacrifier la précision sur les résultats. Une attention particulière aux méthodes d'optimisations par deux méthodes d'amélioration, Le premier est une méthode mono-objective basée sur l'approche Taguchi, et la seconde est une méthode multi-objective basée

sur deux méthodes : Méthode d'analyse relationnelle grise (GRA) et Méthode de la fonction de désirabilité (DF).

CHAPITRE 3 :

Optimisation mono et multi-objective

3.1- Introduction

De nos jours, l'optimisation des conditions de coupe dans le secteur manufacturier, en particulier pour les opérations d'enlèvement de matière telles que le tournage, le fraisage, la rectification,...etc., revêt une importance considérable. Cela a un impact économique direct, notamment en termes d'économies d'échelle. Par conséquent, ce chapitre se concentre sur l'application de deux méthodes d'optimisation différentes pour les paramètres de coupe (V_c , f , ap , r_ϵ et X_r) lors du tournage d'acier C45. Les paramètres de sortie sont de la courbe d'Abbott-Firestone (R_{pk} , R_k , R_{vk} , $Mr1$ et $Mr2$)

Les méthodes d'optimisation utilisées dans ce chapitre sont les suivantes :

- * Optimisation mono-objective : Utilisation de la méthode de Taguchi.
- * Optimisation multi-objective : Utilisation de l'analyse relationnelle grise (GRA).
- * Optimisation multi-objective : Utilisation de la fonction de désirabilité (DF).

Ces méthodes permettent d'obtenir les meilleures combinaisons de paramètres de coupe pour améliorer les performances lors de l'usinage de l'acier C45, en prenant en compte les paramètres de la courbe du taux de portance (BAC).

3.2- Optimisation mono-objective

Dans cette méthode d'optimisation des conditions de coupe, l'objectif est de maximiser le rapport signal/bruit (S/N) de la méthode de Taguchi pour les cinq paramètres de la courbe d'Abbott-Firestone (R_{pk} , R_k , R_{vk} , $Mr1$ et $Mr2$). Le rapport S/N est évalué à l'aide de trois équations distinctes [24, 25], ce qui permet de le classer en trois catégories distinctes. L'optimisation de ces paramètres vise à améliorer la qualité du signal par rapport au bruit, ce qui conduit à des conditions de coupe plus efficaces et performantes.

☞ Nominal est le meilleur :

$$S/N = 10 * \log \left(\frac{\bar{y}}{s_y^2} \right) \quad (3.1)$$

☞ Le plus petit est le meilleur :

$$S/N = -10 * \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3.2)$$

☞ Le plus grand est le meilleur :

$$S/N = -10 * \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3.3)$$

Le rapport signal/bruit (S/N) des paramètres R_{pk} , R_k et $Mr1$ est calculé à l'aide de l'équation (3.2), qui suit le principe "Le plus petit est le meilleur" (minimisation). En revanche, les deux

autres paramètres, R_{vk} et $Mr2$ sont calculés à l'aide de l'équation (3.3), qui suit le principe "Le plus grand est le meilleur" (maximisation). Les résultats expérimentaux des paramètres d'Abbott-Firestone ainsi que leurs rapports signal/bruit S/N sont présentés dans le tableau 3.1. Ce tableau fournit une vue d'ensemble des performances des paramètres étudiés et de leur adéquation aux critères de qualité spécifiés.

Tableau 3.1- Résultats expérimentaux des paramètres de sortie (R_{pk} , R_k , R_{vk} , $Mr1$ et $Mr2$) et leurs rapports S/N.

Trail n°	R_{pk} (μm)	S/N (dB)	R_k (μm)	S/N (dB)	R_{vk} (μm)	S/N (dB)	$Mr1$ (%)	S/N (dB)	$Mr2$ (%)	S/N (dB)
1	2,86	-9,12	8,93	-19,01	5,29	14,46	8,29	-18,37	87,73	38,86
2	3,22	-10,15	8,57	-18,65	4,70	13,44	7,70	-17,72	88,40	38,92
3	5,46	-14,74	12,14	-21,68	4,20	12,46	9,70	-19,73	92,49	39,32
4	6,78	-16,62	13,10	-22,34	4,50	13,06	8,98	-19,06	93,80	39,44
5	2,93	-9,33	9,66	-19,69	5,20	14,32	7,90	-17,95	87,20	38,81
6	3,62	-11,17	11,20	-20,98	5,43	14,69	10,70	-20,58	88,70	38,95
7	3,43	-10,70	5,96	-15,50	2,34	7,38	8,08	-18,14	93,40	39,40
8	6,50	-16,25	8,51	-18,59	2,01	6,06	16,40	-24,29	97,10	39,74
9	2,42	-7,67	6,08	-15,67	3,02	9,60	7,95	-18,00	90,22	39,10
10	2,78	-8,88	5,61	-14,97	2,43	7,71	9,95	-19,95	91,83	39,25
11	3,40	-10,62	8,30	-18,38	3,44	10,73	8,98	-19,06	91,70	39,24
12	4,50	-13,06	7,50	-17,50	2,30	7,23	14,48	-23,21	96,48	39,68
13	1,20	-1,58	2,50	-7,95	1,50	3,52	3,90	-11,82	92,59	39,33
14	1,33	-2,47	3,02	-9,60	1,29	2,21	7,08	-17,00	93,10	39,37
15	3,01	-9,57	3,92	-11,86	1,22	1,72	18,56	-25,37	94,04	39,46
16	5,66	-15,05	8,80	-18,88	1,02	0,17	25,62	-28,17	97,67	39,79

Les rapports S/N du tableau 3.1 révèlent que les meilleures valeurs des paramètres d'Abbott-Firestone sont les suivantes : $R_{pk} = 1,20 \mu\text{m} (-1,58 \text{ dB})$, $R_k = 2,50 \mu\text{m} (-7,95 \text{ dB})$, $R_{vk} = 5,43 \mu\text{m} (14,69 \text{ dB})$, $Mr1 = 3,90\% (-11,82 \text{ dB})$ et $Mr2 = 97,67\% (39,79 \text{ dB})$. En revanche, les paramètres les moins favorables de la courbe de portance (BAC) sont les suivantes : $R_{pk} = 6,78 \mu\text{m} (-16,62 \text{ dB})$, $R_k = 13,10 \mu\text{m} (-22,34 \text{ dB})$, $R_{vk} = 1,02 \mu\text{m} (0,17 \text{ dB})$, $Mr1 = 18,56\% (-25,37 \text{ dB})$ et $Mr2 = 87,20\% (38,81 \text{ dB})$. Ces résultats indiquent les performances relatives des différents paramètres, avec des valeurs plus élevées de S/N correspondant à des

performances optimales et des valeurs plus faibles de S/N correspondant à des performances moins satisfaisantes. Le tableau 3.2 présente les niveaux optimaux des variables dépendantes (V_c , f , ap , r_ε et X_r) correspondant aux valeurs optimales des cinq paramètres de la courbe du taux de portance (R_{pk} , R_k , R_{vk} , $Mr1$ et $Mr2$).

À partir du tableau 3.2 et des figures 3.1-3.5, il est possible de déterminer facilement les conditions de coupe optimales pour minimiser trois paramètres de BAC (R_{pk} , R_k et $Mr1$) et maximiser les deux autres paramètres (R_{vk} et $Mr2$). Les niveaux optimaux sont associés à des valeurs plus élevées du rapport signal/bruit (S/N) pour tous les paramètres de sortie. Par conséquent, les niveaux et les rapports S/N des cinq facteurs (A : V_c , B : f , C : ap , D : r_ε et E : X_r) qui produisent les meilleures valeurs des cinq paramètres de la courbe d'Abbott-Firestone sont : pour R_{pk} (facteur A (niveau 4, S/N = -7,17), facteur B (niveau 1, S/N = -6,93), facteur C (niveau 4, S/N = -9,44), facteur D (niveau 2, S/N = -9,95) et facteur E (niveau 1, S/N = -9,25)), pour R_k (facteur A (niveau 4, S/N = -12,08), facteur B (niveau 1, S/N = -15,59), facteur C (niveau 4, S/N = -15,20), facteur D (niveau 1, S/N = -16,65) et facteur E (niveau 1, S/N = -15,65)), pour R_{vk} (facteur A (niveau 1, S/N = 13,36), facteur B (niveau 1, S/N = 10,47), facteur C (niveau 1, S/N = 10,01), facteur D (niveau 2, S/N = 9,78) et facteur E (niveau 2, S/N = 9,22)), pour $Mr1$ (facteur A (niveau 1, S/N = -18,73), facteur B (niveau 1, S/N = -16,54), facteur C (niveau 4, S/N = -17,25), facteur D (niveau 2, S/N = -18,56) et facteur E (niveau 1, S/N = -18,71)) et pour $Mr2$ (facteur A (niveau 4, S/N = 39,49), facteur B (niveau 4, S/N = 39,67), facteur C (niveau 3, S/N = 39,39), facteur D (niveau 1, S/N = 39,32) et facteur E (niveau 1, S/N = 39,32)).

Tableau 3.2 : Table des réponses pour les rapports signal/bruit.

Niveau	A : V_c (m/min)	B : f (mm/tr)	C : ap (mm)	D : r_ε (mm)	E : X_r (°)
(a) Paramètre R_{pk} : le plus petit est le meilleur					
1	-12,66	-6,93	-11,49	-10,92	-9,25

2	-11,86	-8,17	-10,53	-9,95	-11,63
3	-10,06	-11,41	-10,28		
4	-7,17	-15,25	-9,44		
Delta	5,49	8,32	2,04	0,97	2,38
Rang	2	1	4	5	3
(b) Paramètre R_k : le plus petit est le meilleur					
1	-20,43	-15,59	-19,32	-16,65	-15,65
2	-18,70	-16,06	-16,93	-17,27	-18,27
3	-16,64	-16,86	-16,39		
4	-12,08	-19,33	-15,20		
Delta	8,35	3,75	4,12	0,62	2,61
Rang	1	3	2	5	4
(c) Paramètre R_{vk} : le plus grand est le meilleur					
1	13,36	10,47	10,01	7,57	8,13
2	10,61	9,51	9,18	9,78	9,22
3	8,81	8,07	7,58		
4	1,90	6,63	7,92		
Delta	11,45	3,84	2,43	2,20	1,08
Rang	1	2	3	4	5
(d) Paramètre $Mr1$: le plus petit est le meilleur					
1	-18,73	-16,54	-21,55	-21,26	-18,71
2	-20,25	-18,82	-21,07	-18,56	-21,11
3	-20,06	-20,58	-19,76		
4	-20,59	-23,69	-17,25		
Delta	1,87	7,15	4,30	2,70	2,40
Rang	5	1	2	3	4
(e) Paramètre $Mr2$: le plus grand est le meilleur					
1	39,14	39,03	39,22	39,32	39,32
2	39,23	39,13	39,22	39,27	39,27

3	39,33	39,36	39,39		
4	39,49	39,67	39,36		
Delta	0,35	0,64	0,17	0,05	0,05
Rang	2	1	3	5	4

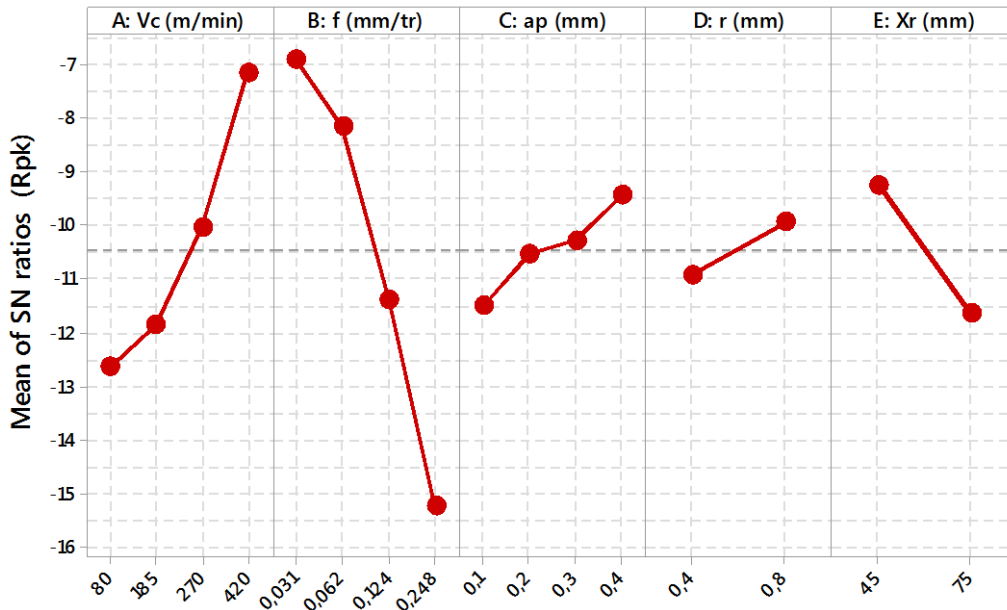


Figure 3.1- Impact des conditions de coupe sur le rapport S/N pour le paramètre R_{pk} .

L'analyse de la figure 3.1 révèle que la pente de la vitesse d'avance (f) est plus grande que celle des autres facteurs, ce qui suggère que la vitesse f a le plus grand impact. Elle est suivie par la vitesse de coupe (V_c), puis par la profondeur de coupe (ap) et l'angle de coupe principal (X_r). Le rayon du bec (r_ϵ) est le moins influent, car sa pente est la plus faible. Par conséquent, les valeurs optimales des variables indépendantes pour minimiser R_{pk} sont les suivantes : $V_c = 420 \text{ m/min}$, $f = 0.031 \text{ mm/tr}$, $ap = 0.4 \text{ mm}$, $r_\epsilon = 0.8 \text{ mm}$ et $X_r = 45^\circ$.

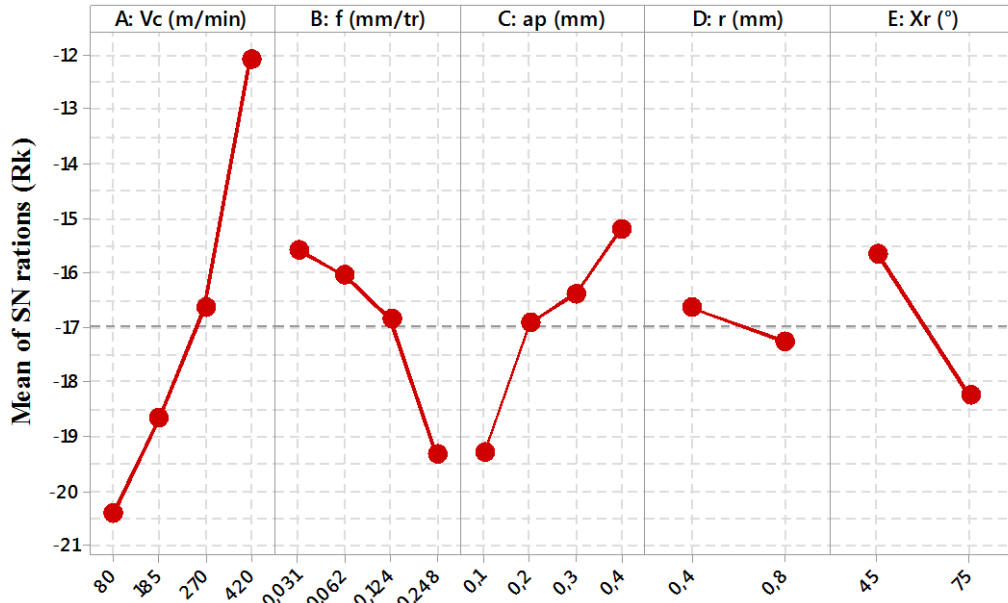


Figure 3.2- Impact des conditions de coupe sur le rapport S/N pour le paramètre R_k .

D'après la figure 3.2, on observe que la vitesse de coupe (V_c) a le plus grand impact sur la variation de R_k , avec la pente la plus élevée. Elle est suivie par la profondeur de coupe (ap), puis par la vitesse d'avance (f) et l'angle de coupe principal (X_r). En revanche, le rayon du bec d'outil (r_ϵ) a le moins d'impact, avec la plus faible pente. Ainsi, les paramètres d'entrée optimaux pour minimiser R_k sont les suivants : $V_c = 420 \text{ m/min}$, $f = 0.031 \text{ mm/tr}$, $ap = 0.4 \text{ mm}$, $r_\epsilon = 0.4 \text{ mm}$ et $X_r = 45^\circ$.

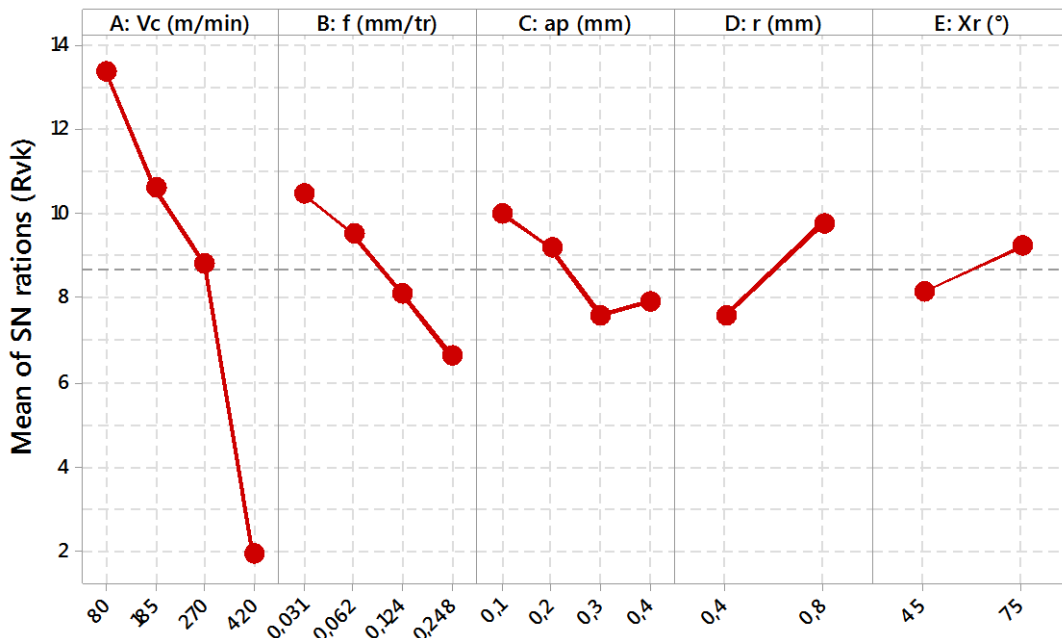


Figure 3.3- Impact des conditions de coupe sur le rapport S/N pour le paramètre R_{vk} .

L'analyse de la figure 3.3 indique que la vitesse de coupe (V_c) est le principal facteur influençant la variation de R_{vk} , en raison de sa pente plus prononcée. Ensuite, la vitesse

d'avance (f) joue un rôle important, suivie de la profondeur de passe (ap) et le rayon du bec d'outil (r_ϵ), l'angle de coupe principale, dont la pente est la plus faible. Par conséquent, les paramètres d'entrée optimaux pour maximiser R_{vk} sont les suivants : $V_c = 80 \text{ m/min}$, $f = 0.031 \text{ mm/tr}$, $ap = 0.4 \text{ mm}$, $r_\epsilon = 0.8 \text{ mm}$ et $X_r = 45^\circ$.

L'observation des pentes de la figure 3.4 révèle que la vitesse d'avance (f) est le principal facteur affectant la variation de $Mr1$, étant donné que la pente du rapport S/N est la plus élevée. Ensuite, la profondeur de passe (ap) a un impact significatif sur cette variation, selon sa pente. Les deux paramètres de la géométrie de l'outil (r_ϵ et X_r) ont un impact similaire, car leurs pentes sont presque identiques. En revanche, la vitesse de coupe (V_c) a le moins d'effet, car sa pente est la plus faible. Par conséquent, les paramètres d'entrée optimaux pour maximiser $Mr1$ sont les suivants : $V_c = 80 \text{ m/min}$, $f = 0.031 \text{ mm/tr}$, $ap = 0.4 \text{ mm}$, $r_\epsilon = 0.8 \text{ mm}$ et $X_r = 45^\circ$.

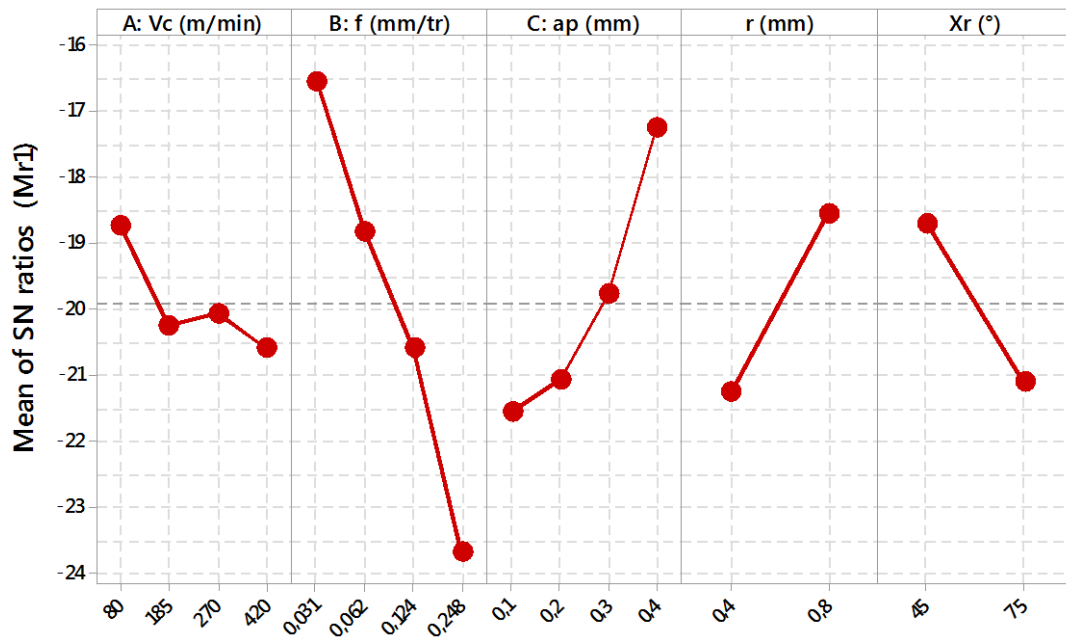


Figure 3.4- Impact des conditions de coupe sur le rapport S/N pour le paramètre $Mr1$.

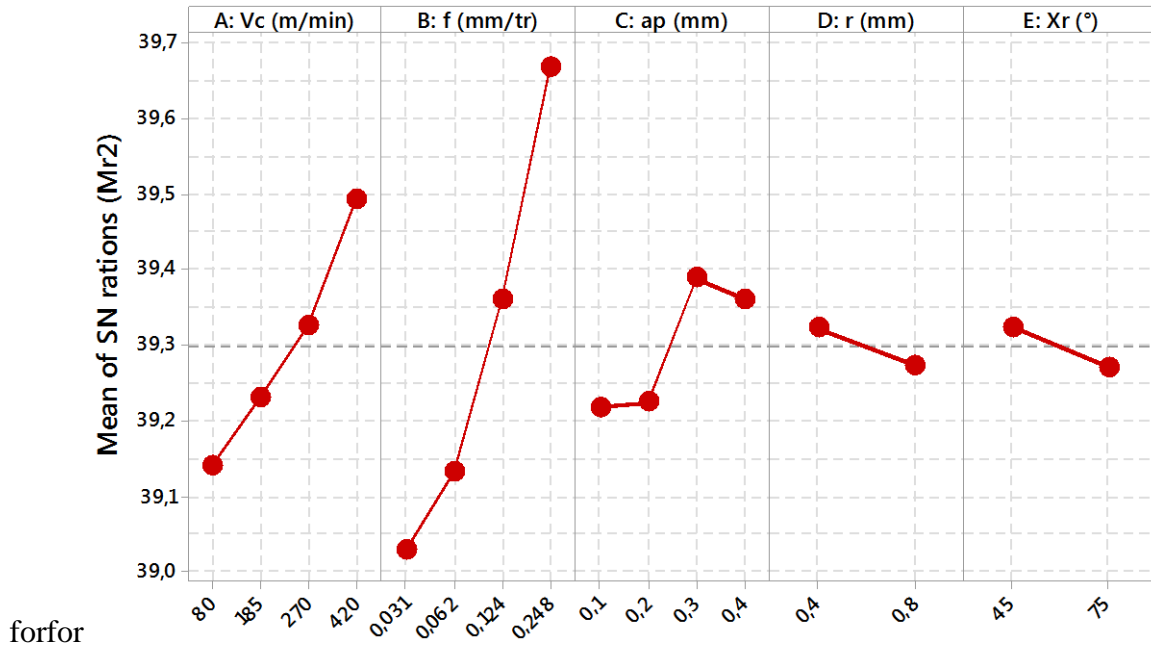


Figure 3.5- Impact des conditions de coupe sur le rapport S/N pour le paramètre $Mr2$.

L'analyse des pentes des paramètres de coupe de la figure 3.5 révèle que la vitesse d'avance (f) présente la pente la plus importante, ce qui indique que ce facteur est le plus déterminant dans la variation de $Mr2$. Ensuite, la vitesse de coupe (V_c) influence cette réponse en fonction de sa pente dans le rapport S/N. Le troisième facteur est la profondeur de coupe (ap), qui affecte également cette réponse. Les deux facteurs de la géométrie de l'outil ont un effet négligeable, car leurs pentes sont presque plates. Par conséquent, les paramètres d'entrée optimaux pour maximiser $Mr1$ sont les suivants : $V_c = 420 \text{ m/min}$, $f = 0.248 \text{ mm/tr}$, $ap = 0.3 \text{ mm}$, $r_\epsilon = 0.4 \text{ mm}$ et $X_r = 45^\circ$.

3.3- Optimisation multi-objective

3.3.1- Optimisation multi-objective par GRA

3.3.1.1- Normalisation

Pour normaliser les variables dépendantes expérimentales (R_{pk} , R_k , R_{vk} , $Mr1$ et $Mr2$) dans l'intervalle $[0, 1]$, une analyse est effectuée en fonction de l'objectif d'optimisation (minimisation ou maximisation). Cela permet d'obtenir une échelle uniforme pour toutes les réponses, ce qui facilite la transition vers l'étape suivante de la méthode GRA.

- Pour la minimisation des critères tels que la hauteur des pics saillants (R_{pk}), la profondeur de rugosité du cœur (R_k) et la partie de la matière $Mr1$, la séquence originale est normalisée de la manière suivante :

$$x_i(k) = \frac{\max(x_i^0(k)) - x_i^0(k)}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (3.4)$$

- Pour la maximisation des critères tels que la profondeur des creux profonds (R_{vk}) et la partie de la matière $Mr2$, la séquence originale est normalisée de la manière suivante :

$$x_i(k) = \frac{x_i^0(k) - \min(x_i^0(k))}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (3.5)$$

Où :

- * $x_i(k)$: la valeur normalisée de la séquence,
- * $\max(x_i^0(k))$: la plus grande valeur de $x_i^0(k)$ de la $k^{\text{ième}}$ réponse,
- * $\min(x_i^0(k))$: la plus petite valeur de $x_i^0(k)$ de la $k^{\text{ième}}$ réponse.

Les résultats obtenus par la normalisation sont présentés dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3- Résultats expérimentaux normalisés ($x_i(k)$).

N° d'essai. (i)	R_{pk}	R_k	R_{vk}	$Mr1$	$Mr2$
Valeur idéale	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
1	0,703	0,393	0,968	0,798	0,051
2	0,638	0,427	0,834	0,825	0,115
3	0,237	0,091	0,721	0,733	0,505
4	0,000	0,000	0,789	0,766	0,630
5	0,690	0,325	0,948	0,816	0,000
6	0,566	0,179	1,000	0,687	0,143
7	0,600	0,674	0,299	0,808	0,592
8	0,050	0,433	0,224	0,424	0,946
9	0,781	0,662	0,454	0,814	0,288
10	0,717	0,707	0,320	0,721	0,442
11	0,606	0,453	0,549	0,766	0,430
12	0,409	0,528	0,290	0,513	0,886
13	1,000	1,000	0,109	1,000	0,515
14	0,977	0,951	0,061	0,854	0,564
15	0,676	0,866	0,045	0,325	0,653
16	0,201	0,406	0,000	0,000	1,000

3.3.1.2- Calcul des coefficients du relationnel gris

Les coefficients du relationnel gris (Grey Relationnel) ($\eta_i(k)$) peuvent être calculés en utilisant les formules suivantes :

$$\eta_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \omega\Delta_{max}}{\Delta_{0i}(k) + \omega\Delta_{max}} \quad 0 < \eta_i(k) \leq 1 \quad (3.6)$$

Où :

- * $\Delta_{0i}(k)$: la différence en valeur absolue entre $x_0^k(k)$ et $x_i^k(k)$,
- * Δ_{min} : la plus petite valeur de $\Delta_{0i}(k)$,
- * Δ_{max} : la plus grande valeur de $\Delta_{0i}(k)$, coefficient de distinction et sa valeur est comprise entre 0 à 1.

$$\Delta_{0i}(k) = \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (3.7)$$

$$\Delta_{min} = \min_{\forall j \in i} \min_{\forall k} \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (3.8)$$

$$\Delta_{max} = \max_{\forall j \in i} \max_{\forall k} \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (3.9)$$

La valeur généralement utilisée pour ω est 0,5 [Kal2018]. Pour le coefficient η , une valeur de 0,5 a été utilisée. Les valeurs des coefficients du relationnel gris (Grey Relational Coefficients) sont présentées dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4- Coefficients du GR ($\eta_i(k)$).

N° d'essai. (i)	R_{pk}	R_k	R_{vk}	$Mr1$	$Mr2$
1	0,627	0,452	0,940	0,712	0,345
2	0,580	0,466	0,751	0,741	0,361
3	0,396	0,355	0,642	0,652	0,503
4	0,333	0,333	0,703	0,681	0,575
5	0,617	0,425	0,906	0,731	0,333
6	0,536	0,379	1,000	0,615	0,369
7	0,556	0,605	0,416	0,722	0,551
8	0,345	0,469	0,392	0,465	0,902
9	0,696	0,597	0,478	0,728	0,413
10	0,638	0,630	0,424	0,642	0,473
11	0,559	0,477	0,526	0,681	0,467
12	0,458	0,515	0,413	0,507	0,815
13	1,000	1,000	0,359	1,000	0,508
14	0,955	0,911	0,348	0,774	0,534

15	0,607	0,789	0,344	0,426	0,591
16	0,385	0,457	0,333	0,333	1,000

3.3.1.3- Calcul de grade relationnel gris

Après le calcul des coefficients du relationnel gris (Grey Relationnel Coefficients), les grades relationnels gris (α_i : Grey Relationnel Grade) peuvent être obtenus par la formule suivante :

$$\alpha_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \eta_i(k) \quad (3.10)$$

- Où : n est le nombre des caractéristiques de performance (dans notre cas $n = 5$).

La plus grande valeur du grade relationnel gris (Grey Relationnel Grade) est considérée comme indiquant la relation la plus forte entre la séquence idéale ($x_0(k)$) et la séquence donnée ($x_i(k)$). La séquence idéale ($x_0(k)$) représente la meilleure réponse dans le processus expérimental. Par conséquent, le grade relationnel supérieur correspond à la combinaison de paramètres la plus proche de l'optimal [Kac2012, Uma2018].

D'après le tableau 3.5 et la figure 3.6, on observe que la combinaison des paramètres de coupe de l'expérience 13 a obtenu le plus haut niveau de qualité grise (GRG). Cela indique que cette expérience présente la combinaison optimale de paramètres qui conduit à une hauteur minimale des pics saillants, une profondeur minimale de la rugosité du cœur, une profondeur maximale des creux, une partie de la position limite supérieure de profil de noyau de rugosité minimale ($Mr1$) et une partie de la position limite inférieure du profil de noyau de rugosité ($Mr2$).

Tableau 3.5- Niveau relationnel gris et son ordre.

<i>N° Essai. (i)</i>	GRG (α_i)	Ordre
1	0,615	3
2	0,580	6
3	0,510	15
4	0,525	13
5	0,602	4
6	0,580	7
7	0,570	8
8	0,515	14

9	0,582	5
10	0,561	9
11	0,542	11
12	0,542	12
13	0,773	1
14	0,704	2
15	0,551	10
16	0,502	16

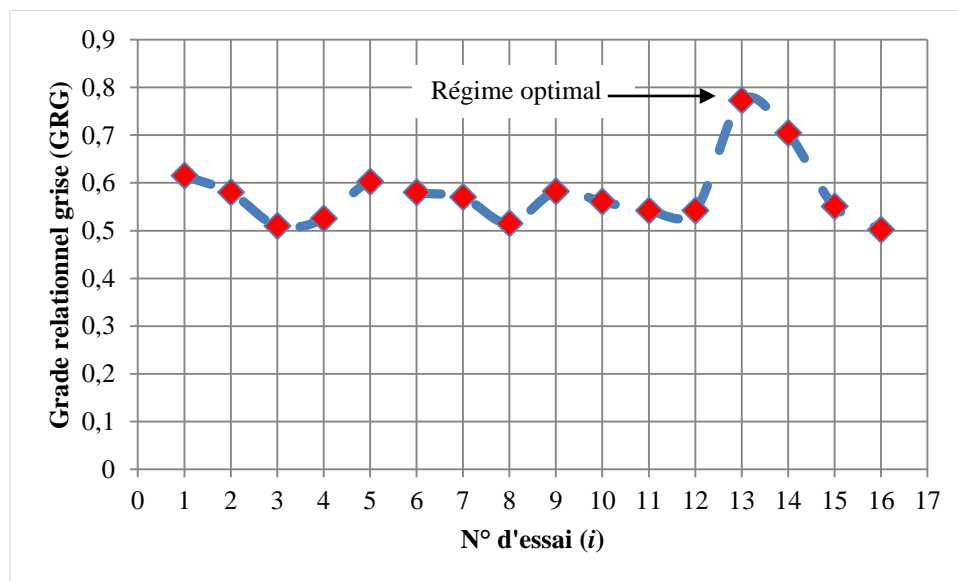


Figure 3.6- Grade relationnel grise (GRG).

La combinaison optimale des paramètres de coupe pour le tournage de l'acier C45 est présentée dans le tableau 3.6. Cette combinaison est la suivante :

- ☒ Vitesse de coupe optimale (niveau 4),
- ☒ Vitesse d'avance (niveau 1),
- ☒ Profondeur de passe optimale (niveau 4),
- ☒ Rayon du bec (niveau 2),
- ☒ Angle de coupe principal (niveau 1).

Tableau 3.6- Réponses pour la catégorie relationnelle grise.

Niveau	V_c (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	r_ε (mm)	X_r (°)
1	80	0.031	0.1	0.4	45
2	185	0.062	0.2	0.8	75
3	270	0.124	0.3	–	–

4	420	0.248	0.4	–	–
---	------------	-------	------------	---	---

Donc, la combinaison optimale pour les cinq réponses est la suivante : $V_c 4 f 1 a p 4 r_\epsilon 2 X_r 1$. Les valeurs des paramètres de coupe optimaux sont : vitesse de coupe $V_c = 420 \text{ m/min}$, avance $f = 0.031 \text{ mm/tr}$, profondeur de passe $ap = 0.4 \text{ mm}$, rayon du bec d'outil $r_\epsilon = 0.8 \text{ mm}$ et angle de coupe principal $X_r = 45^\circ$.

3.3.2- Optimisation multi-objective par DF

Dans cette section, l'objectif principal de l'optimisation est d'utiliser la fonction de désirabilité (DF) pour trouver les valeurs optimales des conditions de coupe du tournage de l'acier C45. L'objectif est de minimiser les trois paramètres du BAC ($R_{pk} \searrow$, $R_k \searrow$ et $Mr1 \searrow$) et maximiser les autres paramètres ($R_{vk} \nearrow$ et $Mr2 \nearrow$). Les conditions d'optimisation sont résumées dans le tableau 3.7.

Tableau 3.7- Conditions de l'optimisation multi-objective (DF).

Conditions	But	Limite inférieure	Limite supérieure
Vitesse de coupe V_c (m/min)	Dans la gamme	80	420
Vitesse d'avance f (mm/tr)	Dans la gamme	0,031	0,248
Profondeur de coupe ap (mm)	Dans la gamme	0,1	0,4
Rayon du bec r_ϵ (mm)	Dans la gamme	0,4	0,8
Angle de coupe principal X_r ($^\circ$)	Dans la gamme	45	75
Paramètre R_{pk} (μm)	Minimiser	1,20	6,78
Paramètre R_k (μm)	Minimiser	2,50	13,10
Paramètre R_{vk} (μm)	Maximiser	1,02	5,43
Limite supérieure du noyau de rugosité $Mr1$ (%)	Minimiser	3,90	25,62
Limite inférieure du noyau de rugosité $Mr2$ (%)	Maximiser	87,20	97,67

3.3.2.1- Optimisation de trois réponses

Le tableau 3.8 présente les 10 premiers résultats de l'optimisation des paramètres $R_{pk} \searrow$, $R_k \searrow$ et $R_{vk} \nearrow$ à l'aide de la fonction de désirabilité (DF). La figure 3.7 affiche les graphiques de contour de désirabilité correspondants. La figure 3.8 représente les barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe, des trois réponses individuelles, ainsi que la désirabilité combinée $DF = 0,713$. Enfin, la figure 3.9 illustre l'optimisation des trois variables dépendantes.

Tableau 3.8- Optimisation des trois réponses R_{pk} , R_k , R_{vk} .

Sol n°.	$V_c(m/min)$	$f(mm/tr)$	$ap(mm)$	$r_\epsilon(mm)$	$X_r(^\circ)$	$R_{pk}(\mu m)$	$R_k(\mu m)$	$R_{vk}(\mu m)$	DF
1	308,08	0,031	0,10	0,8	45	1,56	6,15	3,62	0,713
2	299,71	0,031	0,10	0,8	45	1,61	6,26	3,68	0,712
3	297,01	0,031	0,11	0,8	45	1,61	6,24	3,67	0,712
4	294,13	0,031	0,10	0,8	45	1,64	6,38	3,74	0,712
5	284,05	0,031	0,11	0,8	45	1,68	6,45	3,79	0,711
6	294,28	0,031	0,11	0,8	45	1,63	6,25	3,68	0,711
7	291,67	0,031	0,10	0,8	45	1,65	6,34	3,73	0,711
8	304,48	0,031	0,11	0,8	45	1,57	6,09	3,59	0,711
9	296,38	0,031	0,11	0,8	45	1,62	6,27	3,68	0,711
10	285,04	0,031	0,13	0,8	45	1,67	6,33	3,73	0,711

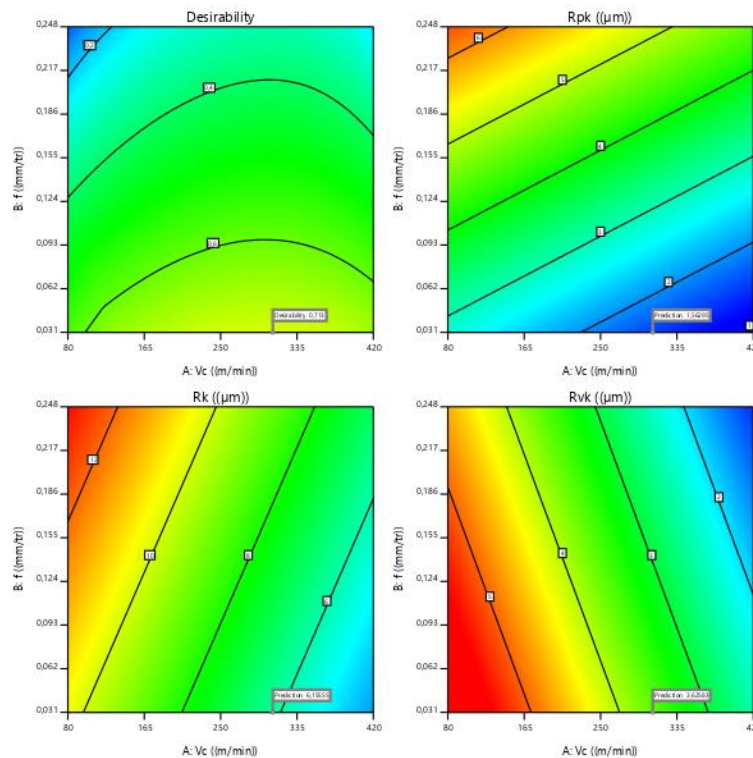


Figure 3.7- Graphiques de contour de désirabilité pour les paramètres R_{pk} , R_k , R_{vk} .

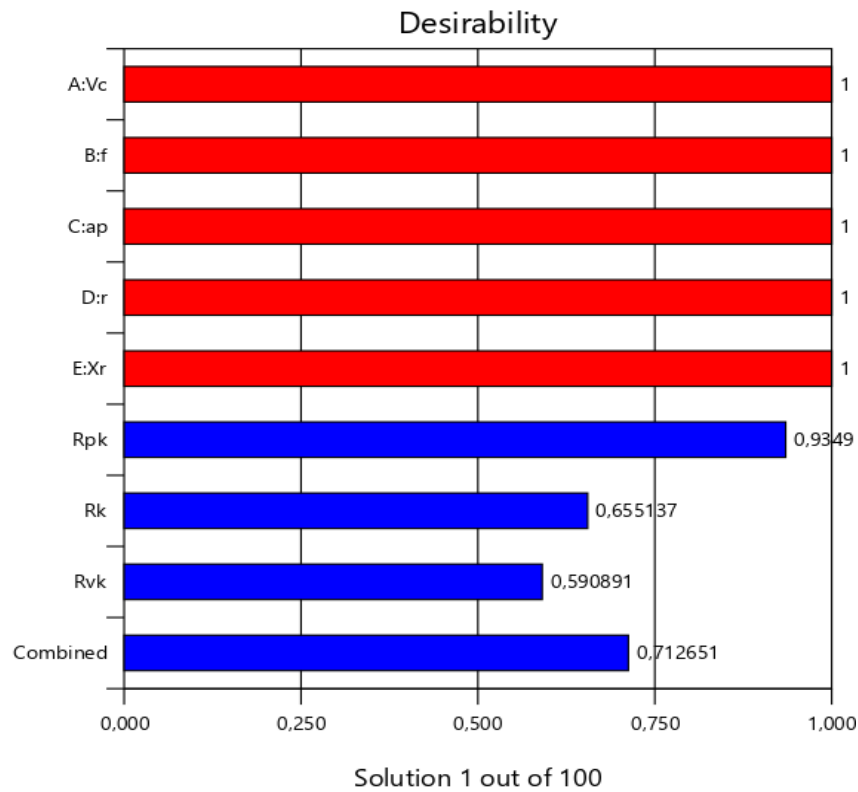


Figure 3.8- Barres analogues des désirabilités des conditions de coupe, des trois réponses individuelles ainsi que la désirabilité combinée (DF = 0,713).

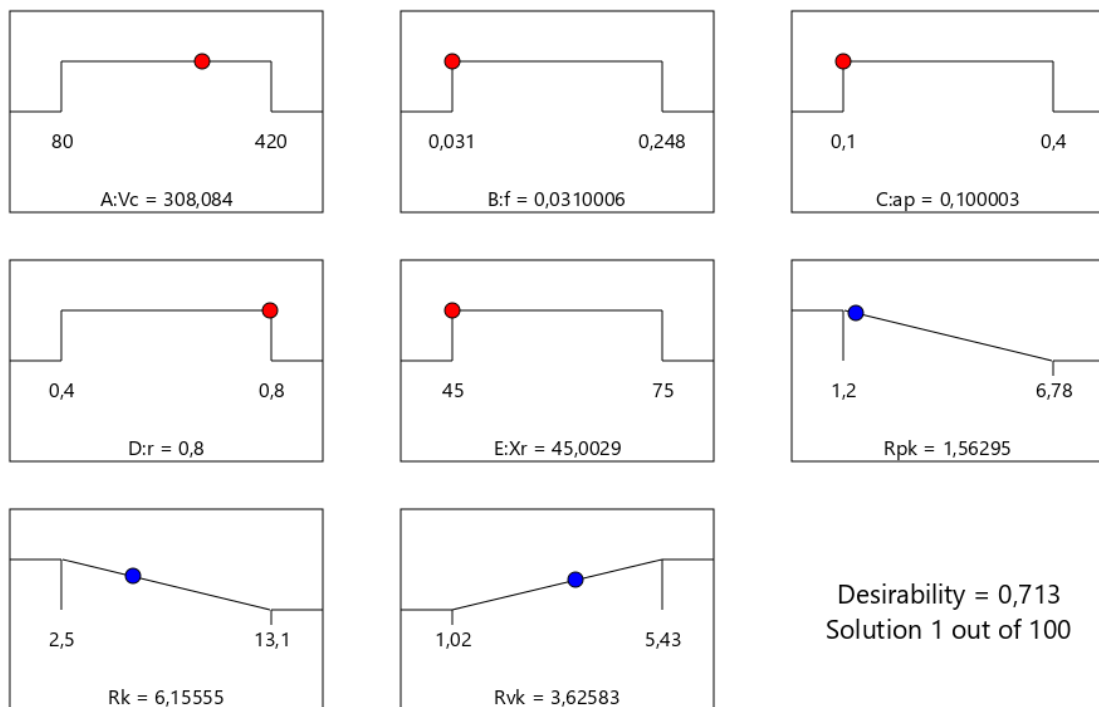


Figure 3.9- Graphique de l'optimisation combinée de R_{pk} , R_k , R_{vk} .

D'après le tableau 3.8 et les figures (3.7-3.9), les paramètres de coupe optimaux sont les suivants : la vitesse de coupe (V_c) de 308,08 m/min, l'avance (f) de 0,031 mm/tr et la

profondeur de coupe (ap) de 0,1 mm. De plus, le rayon du bec (r_ϵ) de 0,8 mm et l'angle de coupe principal (X_r) est de 45° . Les valeurs des paramètres du BAC sont les suivants : $R_{pk} = 1,56\mu\text{m}$, $R_k = 6,15\mu\text{m}$ et $R_{vk} = 3,62\mu\text{m}$.

3.3.2.2- Optimisation de cinq réponses

L'optimisation combinée présente un avantage intéressant en garantissant une bonne qualité de la courbe du taux de portance ($R_{pk} \searrow$, $R_k \searrow$, $R_{vk} \nearrow$, $Mr1 \searrow$ et $Mr2 \nearrow$), ce qui est recherché dans l'industrie automobile. Les résultats des solutions proposées obtenues grâce à l'optimisation combinée sont présentés dans le tableau 3.9. La figure 3.10 illustre le graphique de contour de désirabilité pour les cinq critères de la courbe d'Abbott Firestone. De plus, la figure 3.11 présente les barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe, des cinq réponses, ainsi que la désirabilité combinée $DF = 0,638$. Enfin, la figure 3.12 présente les résultats de l'optimisation combinée des paramètres R_{pk} , R_k , R_{vk} , $Mr1$ et $Mr2$.

Tableau 3.9- Optimisation des cinq réponses R_{pk} , R_k , R_{vk} , $Mr1$ et $Mr2$.

Sol n°.	$V_c(m/min)$	$f(mm/tr)$	$ap(mm)$	$r_\epsilon(mm)$	$X_r(^\circ)$	$R_{pk}(\mu\text{m})$	$R_k(\mu\text{m})$	$R_{vk}(\mu\text{m})$	$Mr1(\%)$	$Mr2(\%)$	DF
1	278,47	0,033	0,40	0,8	45	1,61	4,46	2,70	1,66	91,03	0,638
2	280,06	0,034	0,39	0,8	45	1,61	4,46	2,69	1,74	91,05	0,638
3	275,68	0,038	0,40	0,8	45	1,70	4,57	2,70	1,81	91,14	0,638
4	283,68	0,033	0,40	0,8	45	1,57	4,36	2,65	1,71	91,08	0,638
5	273,97	0,037	0,39	0,8	45	1,69	4,60	2,73	1,76	91,08	0,638
6	275,93	0,039	0,40	0,8	45	1,72	4,58	2,69	1,86	91,18	0,638
7	283,27	0,033	0,39	0,8	45	1,59	4,43	2,68	1,87	91,04	0,637
8	286,02	0,032	0,40	0,8	45	1,55	4,31	2,63	1,72	91,08	0,637
9	281,66	0,036	0,39	0,8	45	1,64	4,51	2,69	1,98	91,08	0,637
10	269,39	0,039	0,40	0,8	45	1,75	4,70	2,76	1,78	91,12	0,637

Sur la base du tableau 3.9 et les figures (3.10-3.12), les valeurs des paramètres de coupe optimaux pour obtenir une meilleure qualité de la courbe du taux de portance sont les suivantes : $V_c = 278,47 m/min$, $f = 0,033 mm/tr$, $ap = 0,4 mm$, $r_\epsilon = 0,8 mm$ et $X_r = 45^\circ$. Toutefois, pour ce régime de coupe, les paramètres de la courbe d'Abbott Firestone sont

les suivants : $R_{pk} = 1,61 \mu m$, $R_k = 4,46 \mu m$, $R_{vk} = 2,70 \mu m$, $Mr1 = 1,66\%$ et $Mr2 = 91,03\%$.

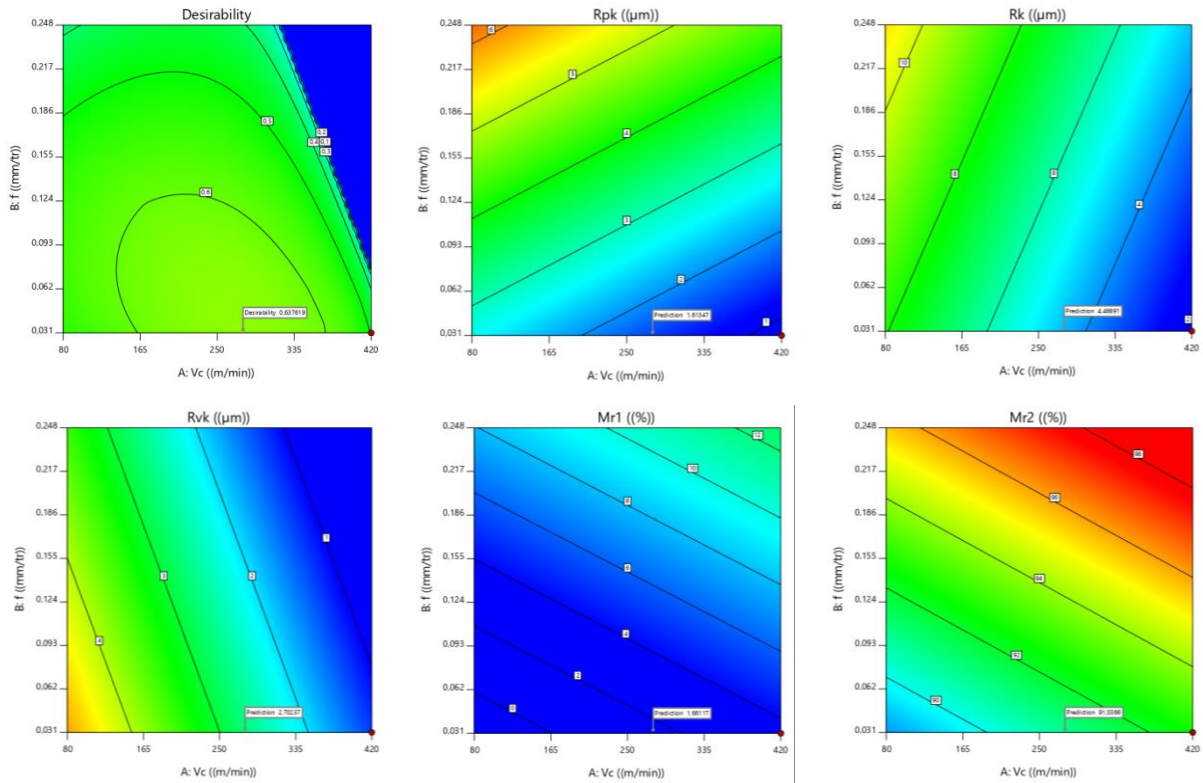


Figure 3.10- Graphiques de contour de désirabilité pour les paramètres de sortie R_{pk} , R_k , R_{vk} , $Mr1$ et $Mr2$.

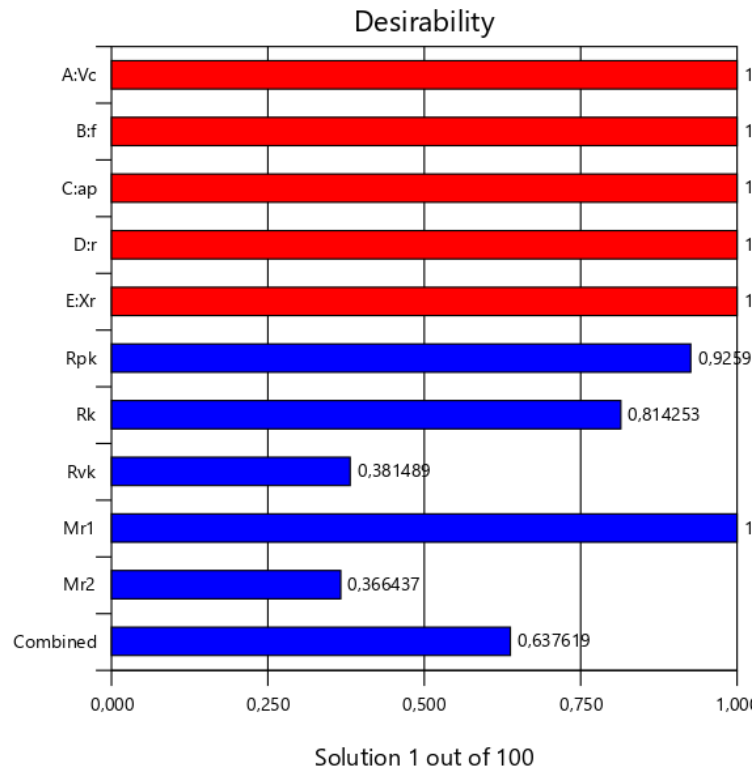


Figure 3.11- Barres analogiques des désirabilités des conditions de coupe, des réponses individuelles ainsi que la désirabilité combinée (DF = 0,638).

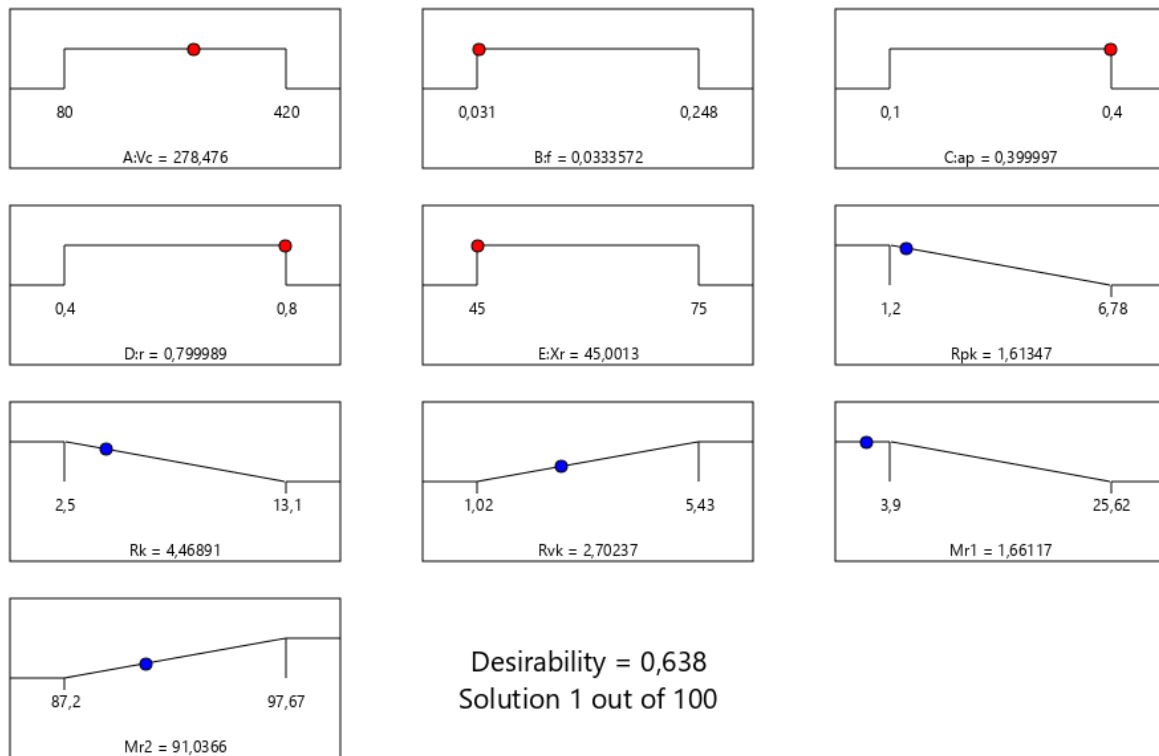


Figure 3.12- Graphique de l'optimisation combinée de R_{pk} , R_k , R_{vk} , $Mr1$ et $Mr2$.

3.4- Conclusion

Dans ce chapitre, notre objectif est d'optimiser de manière mono et multi-objectif les conditions de coupe (V_c , f , ap , r_ϵ et X_r) afin d'améliorer la qualité de la courbe du taux de portance (R_{pk} , R_k , R_{vk} , $Mr1$ et $Mr2$). Nous utilisons deux méthodes d'optimisation différentes. La première méthode utilise le rapport signal/bruit (S/N) de Taguchi. La seconde méthode est une approche multicritères de l'analyse relationnelle grise (GRA) et de la fonction de désirabilité (DF) de la méthodologie de surface de réponse (RSM). L'optimisation multi-objectif utilisant ces deux techniques (GRA et DF) nous permet de rechercher simultanément les conditions de coupe optimales pour trois paramètres de sortie ($R_{pk} \searrow$, $R_k \searrow$ et $R_{vk} \nearrow$) et cinq paramètres de sortie ($R_{pk} \searrow$, $R_k \searrow$, $R_{vk} \nearrow$, $Mr1 \searrow$ et $Mr2 \nearrow$).

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de cette étude était d'étudier l'impact des paramètres de tournage (vitesse de coupe (V_c), vitesse d'avance (f), profondeur de passe (ap), rayon du bec (r_ε) et l'angle de coupe principal (X_r)) sur les paramètres de la courbe d'Abbott-Firestone (R_{pk} , R_k , R_{vk} , $Mr1$ et $Mr2$). Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

- ✧ La méthode de Taguchi L_{18} a été utilisée avec succès pour réduire le nombre d'expériences nécessaires. De plus, le rapport signal/bruit (S/N) est un critère important dans l'optimisation mono-objective par cette méthode.
- ✧ La méthode de désirabilité de fonction (DF) est utilisée pour l'optimisation multi-objective. Cependant, la méthode de Taguchi peut être plus efficace dans le cas d'optimisation mono-objectif.
- ✧ Sur la base de l'approche d'optimisation mono-objective de Taguchi, les paramètres de coupe optimaux sont les suivants :
 - ✖ Minimiser la hauteur des pics saillants R_{pk} : $V_c = 420 \text{ m/min}$, $f = 0.031 \text{ mm/tr}$, $ap = 0.4 \text{ mm}$, $r_\varepsilon = 0.8 \text{ mm}$ et $X_r = 45^\circ$.
 - ✖ Minimiser la profondeur de rugosité du cœur R_k : $V_c = 420 \text{ m/min}$, $f = 0.031 \text{ mm/tr}$, $ap = 0.4 \text{ mm}$, $r_\varepsilon = 0.4 \text{ mm}$ et $X_r = 45^\circ$.
 - ✖ Maximiser la profondeur des creux profonds R_{vk} : $V_c = 80 \text{ m/min}$, $f = 0.031 \text{ mm/tr}$, $ap = 0.4 \text{ mm}$, $r_\varepsilon = 0.8 \text{ mm}$ et $X_r = 45^\circ$.
 - ✖ Minimiser la limite supérieure du noyau de rugosité $Mr1$ sont les suivants : $V_c = 80 \text{ m/min}$, $f = 0.031 \text{ mm/tr}$, $ap = 0.4 \text{ mm}$, $r_\varepsilon = 0.8 \text{ mm}$ et $X_r = 45^\circ$.
 - ✖ Maximiser la limite inférieure du noyau de rugosité $Mr2$ sont les suivants : $V_c = 420 \text{ m/min}$, $f = 0.248 \text{ mm/tr}$, $ap = 0.3 \text{ mm}$, $r_\varepsilon = 0.4 \text{ mm}$ et $X_r = 45^\circ$.
- ✧ L'analyse relationnelle grise (GRA) a été utilisée pour résoudre le problème complexe d'optimisation simultanée des cinq réponses en transformant l'optimisation multi-objectif en un unique objectif d'optimisation équivalent. La combinaison optimale est la suivante : vitesse de coupe $V_c = 420 \text{ m/min}$, vitesse d'avance $f = 0.031 \text{ mm/tr}$, profondeur de passe $ap = 0.4 \text{ mm}$, rayon du bec d'outil $r_\varepsilon = 0.8 \text{ mm}$ et angle de coupe principal $X_r = 45^\circ$.

- ✧ L'approche de la fonction de désirabilité est appropriée à la méthodologie de la surface de réponse, car elle permet de prendre en compte toutes les réponses. Les valeurs optimales obtenues sont les suivantes : $V_c = 278,47 \text{ m/min}$, $f = 0,033 \text{ mm/tr}$, $ap = 0,4 \text{ mm}$, $r_\varepsilon = 0,8 \text{ mm}$ et $X_r = 45^\circ$. Cependant, pour ce régime de coupe, les paramètres de la courbe d'Abbott-Firestone sont les suivants : $R_{pk} = 1,61 \mu\text{m}$, $R_k = 4,46 \mu\text{m}$, $R_{vk} = 2,70 \mu\text{m}$, $Mr1 = 1,66\%$ et $Mr2 = 91,03\%$.

References

References:

- [1] Kaczmarek, J: Principles of Machining by Cutting, Abrasion and Erosion, Stevenage, UK: Peter Peregrines, 1976.
- [2] Arshinov, V. and G. Alekseev: Metal Cutting Theory and Cutting Tool Design, Moscow, Russia: Mir Publishers, 1970.
- [3] Hamdi, A: Cours de coupe des métaux 1. 2021.
- [4] Jain, V. K. 2004. Advanced Machining Processes, New Delhi, India: Allied Publishers PVT.
- [5] Kalpakjian, S: Manufacturing Process for Engineering Materials, Menlo Park, CA: Addison-Wesley, 1997.
- [6] Schey, J. A: Introduction to Manufacturing Processes, 3rd edn., Boston, MA: McGraw Hill, 2000.
- [7]M.A. Chowdhurya, U.K. Debnatha, Md. Kamruzzamana, D.M. Nuruzzamanb, Md. Shahin Miaa :Analysis and Optimization of Turned Surfaces of AISI 1060 using ANOVA and Regression , 2019
- [8]<https://www.inoxcast.com/turning/>
- [9] TILBI, Hamza :INFLUENCE DE L'USURE DES OUTILS DE COUPE SUR LA QUALITED'USINAGE DISCONTINUE, 2019/2020
- [10] Ostwald, P. F. and J. Munoz: Manufacturing Processes and Systems, New York: Wiley, 1997.
- [11] Nurul Amin, A. K. M. and T. L. Ginta. 2014. Heat-assisted machining. In: Comprehensive Materials Processing. Advanced Machining Technologies, 11, Amsterdam: Elsevier Ltd., pp. 297–331.
- [12] Laouissi, A., Yallese, M.A., Belbah, A.S., Belhadi, A. Haddad: 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. Int J AdvManufTechnol 101, 523–548 (2019a).
- [13] A. Laouissi, M.A. Yallese, A. Belbah, A. Khellaf, A. Haddad : Comparative study of the performance of coated and uncoated silicon nitride (Si₃N₄) ceramics when machining EN-GJL-250 cast iron using the RSM method and 2D and 3D roughness functional parameters. J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 41:205 (2019b).
- [14] W. Grzesik: Surface Integrity. In: Advanced machining processes of metallic materials: Theory, Modelling, and Applications. Second Edition, Opole University of Technoloy, Poland, pp 533–561 (2017).

- [15] E.S. Gadelmawla, M.M. Koura, T.M.A. Maksoud, I.M. Elewa, H.H. Soliman: Roughnessparameters. *Journal of Materials Processing Technology* 123, 133-145 (2002).
- [16] M. Coba Salcedo, I. Buj Coral, G. Valencia Ochoa: Characterization of Surface Topography with Abbott Firestone Curve. *Contemporary Engineering Sciences*, 11/68, 3397 – 3407 (2018).
- [17] S. Zhu, P. Huang: Influence mechanism of morphological parameters on tribological behaviors based on bearing ratio curve. *Tribology International* 109, 10–18, (2017).
- [18] T.G. King, N.E. Houghton: Describing distribution shape: RK and central moment approaches compared. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 35/2, 247–252, (1995).
- [19] G.P. Petropoulos, C.N. Pandazaras, J. Paulo Davim: Surface Texture Characterization and Evaluation Related to Machining. In: Paulo Davim J (ed) *Surface Integrity in Machining*. University of Aveiro, Portugal, pp 37-66 (2009).
- [20] Etude et caractérisation mécanique de deux aciers C45 et le 100Cr6, Simulation numérique en traction
- [21] [<https://matieredumonde.com/>]
- [22] [<http://weerg.com>]
- [23] <https://www.directindustry.com/prod/taylor-hobson/product-7159-1703937.html>
- [24] AZIZI, Mohamed Walid. Utilisation des plans d'expériences en TD pour quantifier l'influence des paramètres de coupe sur les indicateurs de performance d'usinage. Diss. 2014.
- [25] <https://www.dunod.com/entreprise-et-economie/plans-d-experiences-melanges>
- [26] Goupy Jacques. Introduction aux plan d'expérience .Dunod, Paris, pp 303 (2001) ;
- [27] BOUSSAHA Soufyane BOUKANSOUS Mouhamed Thème : Calibrage du modèle "HardeningSoil Model (HSM)" à partir de l'essai triaxial, en utilisant les plans d'expériences et la méthode des surfaces de réponses Sous la direction de : Dr. LAFIFI Brahim Septembre 2020
- [28] Yang, M. W. Wei, C. H. Lin, "Selection of blended amine for CO₂ capture in a packedbed scrubber using the Taguchimethod"; *Int J of GreenhouseGas Control*, (2016), 45:245–252.
- [29] G. Derringer, Simultaneous optimization of several response variables, *JQT*, tome 12 (1980);
- [30] Bouzidi Adlane , Modélisation et optimisation nono et multi objectif des paramètres de coupe Lors de tournage d'un acier inoxydable 304L. 2019 ;

Références

- [31] E. Mohamed, Investigation expérimentale sur l'effet de la géométrie de l'outil et des conditions de coupe en tournage en utilisant les techniques statistiques (2015) ;
- [32] G. Derringer, Simultaneous optimization of several response variables, JQT, tome 12 (1980);
- [33] A.I. Khuri and J. Cornell, Response Surface Design and Analysis, Marcel Dekker, New York (1987) ;

Résumé :

Le tournage est l'opération d'usinage la plus usuelle exécutée dans n'importe quel atelier d'usinage. Le choix des conditions de coupe de ce procédé intervient directement sur la texture de surface de la pièce et le temps d'usinage, donc, sur le coût total d'usinage. Dans ce contexte, les travaux de ce mémoire s'inscrivent. L'objectif de ce travail est de faire une optimisation mono et multi-objective des conditions de coupe par rapport aux objectifs visés (maximisation ou minimisation) de la courbe d'Abbott-Firestone. L'investigation expérimentale de tournage d'acier est basée sur la plan d'expérience L_{16} de Taguchi afin de diminuer le nombre des expériences. Les essais de coupe utilisent un outil de coupe en carbure. L'optimisation mono-objective utilise la méthode de Taguchi et l'optimisation multi-objective utilise deux méthodes, à savoir, la fonction de désirabilité (DF) et l'analyse relationnelle grise (GRA).

Mots-clés : Optimisation, Courbe d'Abbott-Firestone, Taguchi, GRA.

ملخص:

الخراطة هي أكثر عمليات التشغيل المستخدمة في أي ورشة صنع. اختيار شروط القطع لهذه العملية يؤثر مباشرة على سطح القطعة ووقت التشغيل، وبالتالي على التكلفة الإجمالية للتشغيل. في هذا السياق، تندرج أعمال هذه الأطروحة. الهدف من هذا العمل هو إجراء تحسين أحادي ومتعدد الأهداف لظروف القطع بالنسبة إلى الأهداف المرجوة (تعظيم أو تقليل) منحنى ابوت-فايرستون. التحقيق التجريبي لعملية خراطة الصلب يستند إلى خطة تجربة تاكيشي لـ 16 عدد التجارب. تستخدم اختبارات القطع أداة قطع من الكربيد. يستخدم التحسين أحادي الهدف طريقة تاكيشي والتحسين متعدد الأهداف يستخدم طريقتين، وهما وظيفة الاستحسان والتحليل ألعلائقي الرمادي.

كلمات مفتاحية: التحسين، منحنى ابوت-فايرستون، تاكيشي وظيفة الاستحسان

Abstract:

Turning is the most common machining operation performed in any machine shop. The choice of cutting conditions for this process has a direct impact on the surface texture of the part and machining time, and therefore on the total machining cost. This is the background to the work presented in this thesis. The aim of this work is to carry out a single- and multi-objective optimization of cutting conditions in relation to the objectives sought (maximization or minimization) of the Abbott-Firestone curve. The experimental investigation of steel turning is based on Taguchi's L_{16} experimental design in order to reduce the number of experiments. Cutting tests use a carbide cutting tool. Single-objective optimization uses Taguchi's method and multi-objective optimization uses two methods, namely, desirability function (DF) and grey relational analysis (GRA).

Keywords: Optimization, Abbott-Firestone curve, Taguchi, GRA.