



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**

Présentée par : **OUERAD Youcef**

*Thème*

---

**Prédiction des paramètres de la courbe du taux  
de portance en tournage d'acier par les méthodes  
RSM et ANN**

---

Soutenu le, .....02-07-2023.....

**Devant le Jury :**

SATLA Zouaoui	Président	M.C.B	Univ-Tissemsilt
HAMDI Amine	Encadreur	M.C.A.	Univ-Tissemsilt
TALEB BENDIAB Hicham	Examineur	M.A.A.	Univ-Tissemsilt

**Année universitaire : 2022-2023**

## DEDICACE

Au meilleur des pères

A ma très chère maman

Qu'ils trouvent en moi la source de leur fierté A qui je dois tout

A ma sœur KHADIDJA et mes frères

A toute ma famille

A BW MNEA 38

A mes amis

A tous ceux qui me sont chers.



## Remerciement

Au terme de ce travail du mémoire de master, les mots justes sont difficiles à trouver pour exprimer nos remerciements à "Allah", le tout puissant, qui m'a accordé le courage afin de me permettre d'élaborer ce modeste travail.

A Mon encadreur monsieur le Dr. **HAMDI Amine** Je suis très honoré de vous avoir comme promoteur de mon mémoire.

Je vous remercie pour la gentillesse et la spontanéité avec lesquelles vous avez bien voulu diriger ce travail.

J'ai eu le grand plaisir de travailler sous votre direction.

Mes remerciements aux membres de jury.

**QUE DIEU VOUS ACCORDE SA GRACE...**

Je n'oublie pas de remercier tous mes chers professeurs qui ont travaillé dur pour nous tout au long de ce parcours académique(GMF).

## Liste des figures

Figure 1.1- Facteurs affectant la sélection d'une procédé d'usinage.....	13
Figure 1.2- Critères d'évaluation de l'usinabilité.....	17
Figure 1.3- Divers facteurs d'état de matériau affectant l'usinabilité.....	19
Figure 1.4- Propriétés physiques de la matière à usiner qui affectent l'usinabilité.....	22
Figure 1.5- Paramètres de coupe affectant l'usinabilité.....	23
Figure 2.1- Vue du tour utilisé.....	31
Figure 2.2- Vue de la plaquette de coupe utilisé.....	31
Figure 2.3- Vue de porte-outil utilisé .....	31
Figure 2.4- Vue de la pièce usiné .....	32
Figure 2.5- Rugosimètre utilisé.....	34
Figure 2.6- Interface de logiciel Minitab 18.....	35
Figure 2.7- Interface de logiciel JMP 11(SW).....	35
Figure 2.8- Paramètres d'entrés/des sorties .....	38
Figure 2.9- Entrées et sorties d'une expérience .....	39
Figure 2.10- Résumé de manière plus simple cette terminologie.....	40
Figure 2.11- Niveau bas du facteur est noté par -1 et le niveau haut par +1.....	41
Figure 2.12- Structure de réseau de neurone artificiel (ANN) .....	45
Figure 3.1- Surface de réponse en 2D et 3D des paramètres et pour les interactions .....	52
Figure 3.2- Surface de réponse en 2D et 3D de paramètre pour les interactions .....	53
Figure 3.3- Surface de réponse en 2D et 3D des paramètres 1 et pour les interactions .....	54
Figure 3.4- Comparaison des résultats expérimentales et prédites des réponses .....	56
Figure 3.5- Comparaison des résultats expérimentales et prédites des réponses.....	57
Figure 3.6- Structure de ANN des modèles .....	58
Figure 3.7- Comparaison des résultats expérimentales et prédites des réponses .....	60
Figure 3.8- Comparaison entre les résultats expérimentales et prédites par RSM et ANN.....	61
Figure 3.9- Comparaison entre les résultats expérimentales et prédites par RSM et ANN.....	64
Figure 3.10- Comparaison entre les résultats expérimentales et prédites par RSM et ANN...65	

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1-</b> Critères d'usinabilité dans l'ébauche et la finition.....	18
<b>Tableau 2.1-</b> Composition chimique d'acier C45.....	32
<b>Tableau 2.2-</b> Propriété mécanique et physique d'acier C45.....	33
<b>Tableau 2.3-</b> Equivalence de la nuance d'acier C45.....	33
<b>Tableau 2. 4-</b> Conditions de coupe pour les essais et les paramètres de sortie .....	36
<b>Tableau 2.5-</b> Tableau orthogonale de Taguchi $L_{16} (4^3)$ .....	37
<b>Tableau 2.6-</b> Paramètres de coupe et leurs niveaux.....	38
<b>Tableau 2.7-</b> Paramètre de coupe et leurs niveaux pour un plan de 16 essais.....	38
<b>Tableau 3. 1 -</b> Analyse de la variance de paramètre. ....	47
<b>Tableau 3. 2 -</b> Analyse de la variance de paramètre. ....	48
<b>Tableau 3. 3 -</b> Analyse de la variance de paramètre. ....	48
<b>Tableau 3.4-</b> Analyse de la variance de paramètre.....	49
<b>Tableau 3.5-</b> Analyse de la variance de paramètre.....	50
<b>Tableau 3.6-</b> Résultats des essais de validation expérimentale. ....	62
<b>Tableau 3.7-</b> pour les modèles obtenus par RSM et ANN. ....	63

## Nomenclature

Vc	Vitesse de coupe [m/min]
N	Vitesses de rotation de la pièce [tr/min]
f	Vitesse d'avance [mm/min]
ap	Profondeur de passe [mm]
Rpk	Hauteur des pics saillants [ $\mu\text{m}$ ]
Rk	Profondeur de rugosité du cœur [ $\mu\text{m}$ ]
Rvk	Profondeur des creux profonds [ $\mu\text{m}$ ]
S/N	Rapport signal sur bruit [dB]
MRR	Le taux d'enlèvement matière
P	Probabilité d'obtenir du résultat par hasard
$r_\varepsilon$	Rayon du bec [mm]
$X_r$	Angle de coupe principal [°]
Mr1	Limite supérieure du noyau de rugosité [%]
Mr2	Limite inférieure du noyau de rugosité [%]

## Abréviations

ANOVA	Analyse de la variance
RSM	Méthodologie de surface de réponse
ANN	Réseau de neurones artificiels
PEX	Plans d'expériences

## Sommaire

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Nomenclature**

**Introduction générale** ..... 10

### Chapitre 1 : Choix du procédé de coupe et l'usinabilité

1.1- Introduction .....	13
1.2- Facteurs influençant le choix du procédé.....	13
1.2.1- Caractéristiques des pièces.....	14
1.2.2- Matériau de la pièce.....	14
1.2.3- Caractéristiques dimensionnelles et géométriques.....	14
1.2.4- Texture de la surface.....	14
1.2.5- Intégrité de la surface.....	15
1.2.6- Productivité.....	15
1.2.7- Coût de production.....	15
1.2.8- Impacts sur l'environnement .....	16
1.3-Définition de l'usinabilité.....	16
1.4- Évaluation de l'usinabilité.....	16
1.4.1- Durée de vie de l'outil .....	16
1.4.2- Finition de surface .....	17
1.4.3- Efforts de coupe et consommation d'énergie .....	17
1.4.4- Forme des copeaux .....	18
1.5- Facteurs affectant l'usinabilité .....	19
1.5.1- État du matériau.....	19
1.5.2- Propriétés physiques du matériau.....	21
1.5.3- Paramètres d'usinage .....	22
1.6- Usinabilité des matériaux d'ingénierie .....	24

1.6.1- Usinabilité des aciers .....	24
1.6.2- Usinabilité des fontes .....	25
1.6.3- Usinabilité des métaux et alliages non ferreux .....	25
1.6.4- Usinabilité des matériaux non métalliques .....	26
1.7- Etat de l'art .....	27

## **Chapitre 2 : Matériau, appareils et méthodes utilisées**

2.1- Introduction.....	30
2.2- Matériels utilisés.....	30
2.2.1- Machine-outil, porte outil et la plaquette .....	30
2.2.2- Matériau à usiné.....	32
2.2.3- Rugosimètre.....	33
2.2.4- Moyens de calcul.....	34
2.3- Conditions de coupe .....	35
2.4- Plans d'expériences.....	38
2.4.1- Définition.....	38
2.4.2- Terminologie .....	40
2.4.3- Type des plans d'expérience.....	43
2.5- Méthode de modélisation .....	43
2.5.1- Méthodologie de surface de réponse (RSM).....	43
2.5.2- Réseau de neurones artificiels.....	44

## **CHAPITRE 3 : Modélisation des paramètres de BAC**

3.1- Introduction.....	47
3.2- Modélisation par la méthodologie de surface de réponse (RSM).....	47
3.2.1- Analyse de la variance (ANOVA).....	47
3.2.2- Analyse de régression.....	50



3.2.3- Surface de réponse 3D.....	51
3.2.4- Comparaison entre les résultats expérimentales et prédites par RSM.....	55
3.3- Modélisation par le réseau de neurones artificiels (ANN).....	57
3.3.1- Comparaison entre les résultats expérimentales et prédites par ANN.....	59
3.4- Validation expérimentale.....	61
3.5- Comparaison entre les résultats expérimentales et prédites par RSM et ANN.....	63
3.6- Conclusion.....	65
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>67</b>
<b>Références.....</b>	<b>69</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>72</b>



## Introduction générale

De nos jours, le tournage est l'un des procédés de fabrication les plus couramment utilisés pour produire des pièces mécaniques de précision. Ce procédé est utilisé dans l'usinage de surfaces de révolution, qu'elles soient extérieures ou intérieures, en enlevant de la matière à l'aide d'outils à arête de coupe unique. Il existe deux configurations principales de cette technique d'enlèvement de matière : le chariotage, qui correspond à une coupe tridimensionnelle, et la coupe orthogonale, qui correspond à une coupe bidimensionnelle.

Actuellement, les recherches scientifiques se concentrent sur les techniques de tournage avancées, telles que le tournage à grande vitesse (UGV), le tournage dur (TD), le tournage à sec ou avec une quantité minimale de lubrification (MQL),...etc. Ces avancées visent à améliorer les performances et l'efficacité du processus de tournage pour répondre aux exigences croissantes de l'industrie.

La caractérisation de la texture de surface à l'aide des cinq paramètres de la courbe d'Abbot-Firestone ( $R_{pk}$ ,  $R_k$ ,  $R_{vk}$ ,  $Mr1$  et  $Mr2$ ) a suscité l'intérêt de nombreux chercheurs et de l'industrie automobile. Étant donné la complexité du processus de caractérisation de la texture de surface fonctionnelle, l'objectif principal de cette étude est de déterminer l'impact des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $ap$ ,  $r_\epsilon$  et  $X_r$ ) sur les paramètres de la courbe de portance lors du tournage de l'acier C45.

À cet égard, ce mémoire de master est divisé en trois chapitres, qui abordent les points suivants :

Le premier chapitre est consacré au choix du procédé de coupe et à l'usinabilité, y compris une définition de ce concept. Dans un premier temps, nous présentons les différentes méthodes pour évaluer l'usinabilité, ainsi que les paramètres qui influent sur celle-ci pour différents matériaux. Nous examinons les critères utilisés pour mesurer et évaluer l'usinabilité, tels que la durée de vie de l'outil, la qualité de la surface usinée, la puissance de coupe, etc. Ensuite, nous terminons ce chapitre par un état de l'art, où nous passons en revue les recherches antérieures sur le sujet.

Dans le deuxième chapitre, nous décrivons les équipements utilisés, tels que le tour, l'outil de coupe, le rugosimètre, ainsi que le matériau usiné, afin de réaliser les expériences. Nous présentons également en détail les conditions de coupe qui ont été utilisées. Dans la deuxième

partie de ce chapitre, nous abordons les méthodes utilisées pour modéliser les réponses. Nous discutons en particulier de deux approches : le réseau de neurones artificiels (ANN) et la méthodologie de surface de réponse (RSM).

Dans le chapitre trois, nous procédons à l'identification des facteurs et des interactions qui ont un impact statistiquement significatif sur les paramètres étudiés de la courbe d'Abbott-Firestone. Nous utilisons l'analyse ANOVA pour déterminer l'importance de chaque facteur et de chaque interaction. À la fin de ce chapitre, nous réalisons une comparaison entre les modèles mathématiques obtenus à l'aide du réseau de neurones artificiels (ANN) et de la méthode de régression.

Enfin, nous incluons une introduction générale qui situe le contexte de l'étude. Nous fournissons également une conclusion générale qui résume les principales découvertes et conclusions de l'étude. Enfin, une liste de références bibliographiques est incluse.



# **CHAPITRE 1 :**

## **Choix du procédé de coupe et l'usinabilité**

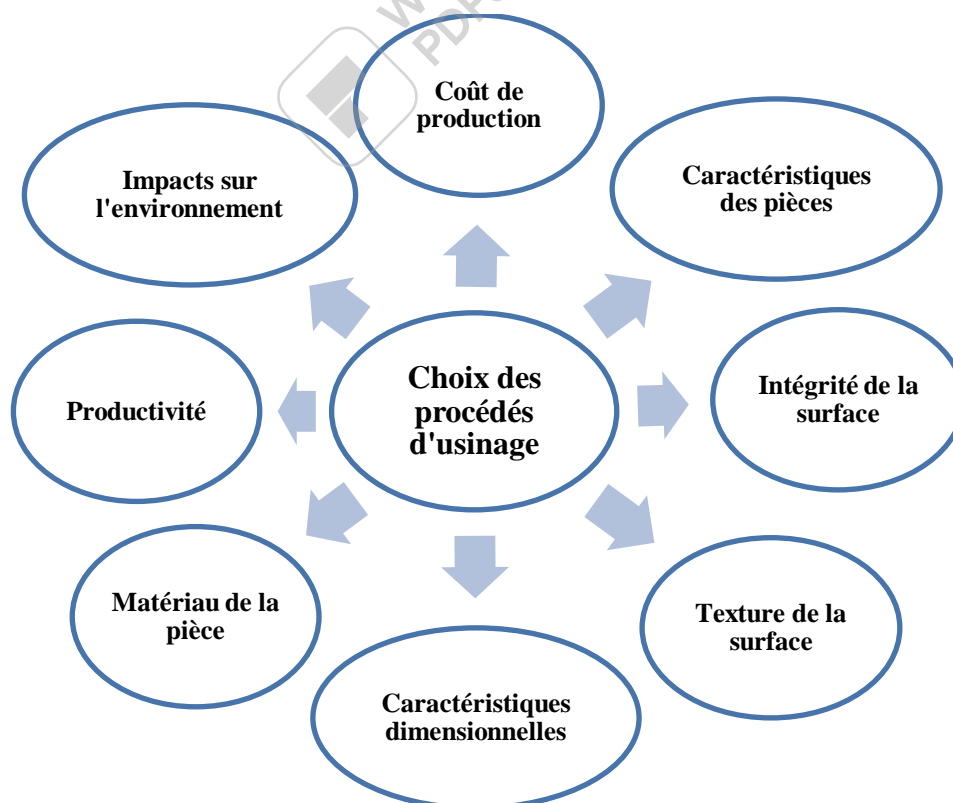


## 1.1- Introduction

L'objectif principal des ingénieurs et de l'industrie est d'utiliser un processus de fabrication qui permet d'usiner les composants de manière économique et à un rythme de production élevé. De plus, les pièces doivent être usinées avec une précision, une texture de surface et une intégrité qui répondent aux exigences du concepteur du produit et qui évitent les problèmes d'usure. Le terme "usinabilité" se réfère à la facilité avec laquelle un métal peut être usiné pour obtenir une surface acceptable. Les matériaux dotés d'une bonne usinabilité nécessitent moins de puissance pour enlever la matière, peuvent être coupés à grande vitesse, permettent d'obtenir facilement une finition de qualité et n'usent pas rapidement les outils. Les facteurs qui améliorent généralement les performances d'un matériau ont souvent un impact négatif sur son usinabilité. Par conséquent, pour usiner des pièces de manière économique, les ingénieurs doivent trouver des moyens d'améliorer l'usinabilité sans compromettre les performances. La prédiction de l'usinabilité peut être difficile en raison des nombreuses variables impliquées dans le processus d'usinage.

## 1.2- Facteurs influençant le choix du procédé

Les facteurs qui influencent le choix des procédés d'usinage (voir figure 1.1) sont :



**Figure 1.1-** Facteurs affectant la sélection d'un procédé d'usinage.

### **1.2.1- Caractéristiques des pièces**

La forme d'une pièce est déterminée par sa fonction. Étant donné que tous les procédés d'usinage ne conviennent pas de manière égale à la production d'une pièce spécifique, les concepteurs modifient souvent la forme de la pièce, tout en préservant sa fonction principale, afin de la rendre plus facile à usiner à l'aide d'un ensemble spécifique de procédés d'usinage [1].

### **1.2.2- Matériau de la pièce**

Le choix du processus d'usinage est influencé par le matériau spécifié pour la pièce. La plupart des matériaux peuvent être usinés en utilisant une variété de procédés, tandis que d'autres nécessitent une sélection plus restreinte. Dans tous les cas, le choix du processus d'usinage est déterminé par la forme et la taille souhaitées de la pièce, les tolérances dimensionnelles, l'état de surface requis et la quantité désirée. Ce choix doit prendre en compte non seulement les considérations techniques, mais aussi les aspects économiques et environnementaux de la fabrication [2].

### **1.2.3- Caractéristiques dimensionnelles et géométriques**

Les tolérances dimensionnelles jouent un rôle crucial, car elles définissent les variations admissibles ou acceptables des dimensions d'une pièce, influençant à la fois la conception du produit et la sélection du processus d'usinage. Il est essentiel que les tolérances spécifiées se situent dans la plage réalisable par le processus d'usinage choisi, afin d'éviter des opérations de finition supplémentaires et une augmentation des coûts de production. La précision des pièces usinées indique à quel point leur taille se rapproche des dimensions requises, généralement exprimées en termes de tolérances dimensionnelles. Chaque processus d'usinage présente ses propres limites de précision, qui dépendent de la machine-outil utilisée et des conditions d'usinage [2].

### **1.2.4- Texture de la surface**

La texture de surface englobe des aspects tels que la rugosité, l'ondulation, les couches superficielles et les défauts. Lors de l'usinage d'un composant, il est important de répondre aux exigences techniques relatives à la surface, en termes de qualité de surface et de réduction des inconvénients pouvant découler du processus d'usinage. En fonction de la rugosité de surface spécifiée dans les exigences de conception, la méthode d'usinage optimale peut être

choisie. Chaque procédé d'usinage est capable de produire un état de surface particulier et une plage de tolérance sans coûts supplémentaires. Il est donc essentiel de sélectionner le procédé qui correspond le mieux aux exigences de surface requises tout en minimisant les coûts [1].

### **1.2.5- Intégrité de la surface**

L'intégrité de surface se réfère à l'état global d'une surface produite lors d'une opération d'usinage. Elle englobe les effets résultant du processus d'usinage sous la surface visible. Lors de l'usinage par des méthodes conventionnelles, les forces de coupe et de frottement, la génération de chaleur et l'écoulement plastique exercent une pression sur le matériau, entraînant des modifications des propriétés physiques de la couche superficielle par rapport au reste de la pièce en métal [2].

### **1.2.6- Productivité**

La quantité produite est un facteur clé dans le choix du processus d'usinage. Pour améliorer la productivité, différentes méthodes peuvent être utilisées, notamment [3] :

- ✗ Utiliser des vitesses d'usinage élevées.
- ✗ Augmenter les avances.
- ✗ Utiliser des outils de coupe multiples.
- ✗ Mettre en place des dispositifs permettant l'usinage de plusieurs pièces simultanément.
- ✗ Minimiser le temps de travail non lié à la coupe.
- ✗ Utiliser des mécanismes d'alimentation et de changement d'outils automatiques.
- ✗ Travailler avec des densités de puissance élevées.

Ces méthodes visent à accélérer le processus d'usinage, réduire les temps d'arrêt et augmenter le rendement global de la production.

### **1.2.7- Coût de production**

Les aspects économiques des processus d'usinage prennent en compte le coût total d'un produit, y compris les coûts des matériaux, de l'outillage, ainsi que les coûts fixes, directs et indirects de la main-d'œuvre. Pour les petites séries, il est courant d'utiliser des machines polyvalentes capables de produire différentes formes et tailles, mais cela entraîne des coûts de main-d'œuvre directs plus élevés. Pour les quantités plus importantes (lots moyens), on utilise généralement des machines à commande numérique (CNC), des gabarits et des montages pour

réduire les coûts de main-d'œuvre. Pour des volumes encore plus importants, les coûts de main-d'œuvre peuvent être réduits en utilisant des centres d'usinage [1].

### **1.2.8- Impacts sur l'environnement**

La technologie d'usinage sélectionnée comporte des dangers potentiels qui peuvent avoir un impact sur la santé de l'opérateur, la machine-outil et l'environnement. Réduire ces risques nécessite une surveillance, une analyse, une compréhension et un contrôle minutieux. Il est important d'évoluer vers des technologies d'usinage respectueuses de l'environnement. Les risques associés aux fluides de coupe ont conduit à l'introduction de techniques telles que la lubrification par quantité minimale (MQL), l'usinage cryogénique et les techniques d'usinage à sec. Ces approches permettent de minimiser les impacts sur l'environnement tout en préservant la sécurité des opérateurs et des machines [1].

### **1.3-Définition de l'usinabilité**

Un matériau ayant une bonne usinabilité se caractérise par une faible consommation d'énergie, une longue durée de vie de l'outil et une bonne finition de surface sans dommages. Cependant, il est important de noter que l'usinabilité n'est pas intrinsèque au matériau lui-même, mais plutôt dépendante du processus d'usinage choisi. Un matériau peut être facilement usiné selon un certain procédé, mais pas avec un autre. De plus, un procédé d'usinage qui fonctionne bien dans des conditions données peut ne pas être aussi efficace pour usiner le même matériau dans d'autres conditions. Enfin, l'interprétation de l'usinabilité peut varier selon le point de vue de la personne l'utilisant [4].

### **1.4- Évaluation de l'usinabilité**

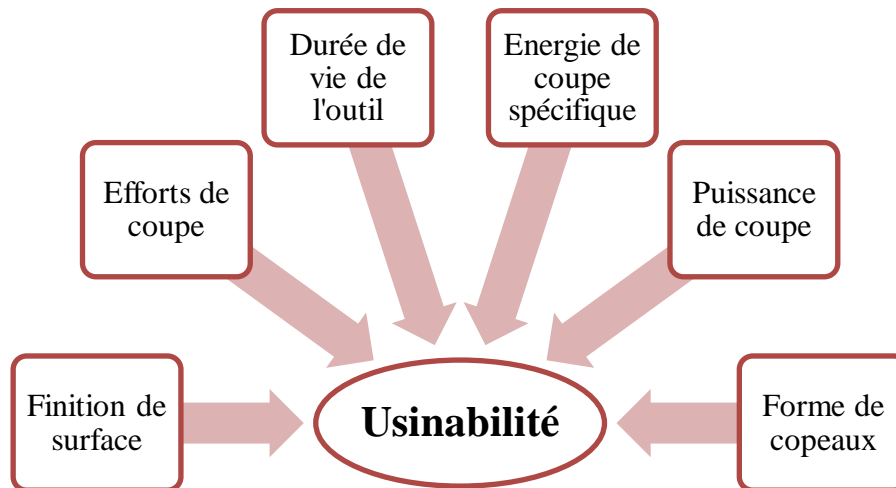
En générale, les méthodes utilisées pour évaluer l'usinabilité d'un matériau sont les suivantes (voir figure 1.2) :

#### **1.4.1- Durée de vie de l'outil**

Les métaux qui peuvent être coupés sans usure rapide de l'outil sont généralement considérés comme faciles à usiner, et inversement. Cependant, il est important de noter que la présence de petites inclusions dures dans un matériau à usiner peut donner l'impression d'une durée de vie plus longue par rapport à d'autres matériaux. Il peut sembler avoir des propriétés mécaniques similaires à celles d'un métal moins abrasif et nécessiter la même quantité d'énergie lors de la coupe. Cependant, la réalité est que sa capacité d'usinabilité est plus faible



en raison de ses propriétés abrasives, qui provoquent une usure rapide des outils. Un problème lié à l'utilisation de la durée de vie de l'outil comme indicateur d'usinabilité est sa sensibilité au matériau de l'outil utilisé [4].



**Figure 1.2-** Critères d'évaluation de l'usinabilité.

#### 1.4.2- Finition de surface

La qualité de la surface d'une pièce finie lors de l'usinage peut parfois être utilisée pour évaluer l'usinabilité. La principale cause de rugosité de surface est la formation de l'arête rapportée sur l'outil. Cependant, dans de nombreux cas, l'état de surface n'est pas un critère significatif pour évaluer l'usinabilité d'une pièce. Par exemple, lors des coupes d'ébauche, il n'est pas nécessaire de se préoccuper de l'état de surface. De plus, dans de nombreuses coupes de finition, les conditions permettant d'obtenir les dimensions souhaitées sur la pièce garantissent généralement une bonne finition. Les évaluations de l'usinabilité basées sur les mesures de l'état de surface ne correspondent pas toujours à la réalité. Les mesures de l'état de surface ne sont pas toujours en accord avec les forces de coupe, la puissance de coupe et la durée de vie de l'outil [4].

#### 1.4.3- Efforts de coupe et consommation d'énergie

L'utilisation des forces de coupe ou de la consommation d'énergie peut servir de critère pour évaluer l'usinabilité d'un matériau. Lorsque les forces de coupe sont faibles, cela indique généralement une bonne usinabilité du métal. De même, l'utilisation de la consommation d'énergie spécifique pendant l'usinage est similaire à l'utilisation de la force de coupe comme indicateur. On peut présenter l'usinabilité en termes d'énergie spécifique, qui décrit la puissance nécessaire pour couper un certain volume dans une unité de temps. Les matériaux

dont l'énergie spécifique pour l'enlèvement de métal est élevée sont moins usinables que ceux dont l'énergie spécifique est plus faible [4].

L'avantage d'utiliser l'énergie de coupe spécifique (SCE) pour évaluer l'usinabilité est que cela dépend principalement des propriétés du matériau de la pièce et est moins sensible au matériau de l'outil. En revanche, la durée de vie de l'outil dépend fortement du matériau de l'outil lui-même. Un facteur d'enlèvement de métal, qui est l'inverse de l'énergie spécifique, peut être utilisé directement comme indicateur d'usinabilité si les forces de coupe ou la consommation d'énergie sont utilisées pour définir l'usinabilité. En d'autres termes, on peut dire que les métaux ayant un facteur d'enlèvement de métal élevé ont une usinabilité élevée [4].

L'importance relative de ces trois facteurs (forces de coupe, consommation d'énergie et durée de vie de l'outil) dépend principalement de la nature de l'usinage, qu'il s'agisse de l'ébauche ou de la finition. Dans la production réelle, la durée de vie de l'outil est généralement considérée comme le critère d'usinabilité le plus important pour les coupes d'ébauche, tandis que l'état de surface est privilégié pour les coupes de finition (voir tableau 1.1).

**Tableau 1.1-** Critères d'usinabilité dans l'ébauche et la finition.

Ordre du critère d'usinabilité	Coupe d'ébauche	Coupe de finition
1	Durée de vie de l'outil	Finition de surface
2	Consommation d'énergie	Durée de vie de l'outil
3	Finition de surface	Consommation d'énergie

#### 1.4.4- Forme des copeaux

Un autre critère d'usinabilité qui mérite parfois d'être pris en compte est celui de l'enlèvement des copeaux. Les copeaux longs, minces et enroulés peuvent poser un problème s'ils ne sont pas brisés, car ils peuvent interférer avec l'opération d'usinage et créer une zone de coupe dangereuse. Ce critère est essentiel dans le fonctionnement des machines-outils automatiques. La formation de copeaux, le frottement à l'interface entre l'outil et le copeau, ainsi que le phénomène d'arête rapportée sont des facteurs déterminants pour l'usinabilité [3].

Un matériau ductile qui a tendance à adhérer à la surface de l'outil ou à former une arête rapportée est susceptible de produire une mauvaise finition de la pièce. Cela a été observé avec des matériaux tels que l'acier à faible teneur en carbone, l'aluminium pur, le cuivre et l'acier inoxydable. Cependant, la formation de copeaux dépend à la fois des variables de la

machine et du matériau de la pièce, et les valeurs obtenues en utilisant ce critère peuvent être modifiées en utilisant une machine appropriée ou un brise-copeaux adapté [4].

## 1.5- Facteurs affectant l'usinabilité

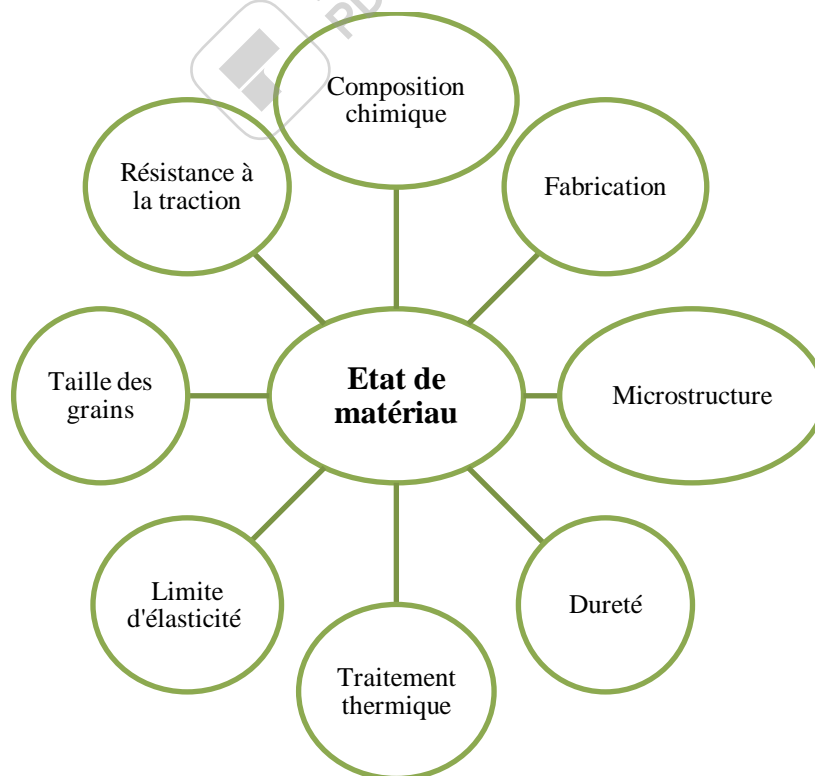
Les propriétés mécaniques et physiques jouent un rôle crucial dans l'ampleur de la consommation d'énergie et des températures générées lors de la coupe. Parmi ces propriétés, on peut citer :

### 1.5.1- État du matériau

Les facteurs suivants décrivent l'état de la matière à usiner qui affecte l'usinabilité (voir figure 1.3) sont [4, 5] :

#### a) Taille des grains :

La taille des grains est un indicateur important de l'usinabilité d'un matériau. Les grains plus petits et non déformés dans un métal ont tendance à faciliter la coupe et à obtenir une bonne finition de surface. Les métaux avec une taille de grain intermédiaire offrent un compromis en permettant à la fois une coupe efficace et un état de surface satisfaisant.



**Figure 1.3-** Divers facteurs d'état de matériau affectant l'usinabilité.

## b) Microstructure :

La microstructure fait référence à la structure cristalline ou granulaire du matériau. Les métaux présentant des microstructures similaires ont tendance à avoir des propriétés d'usinage similaires. Les variations de la microstructure d'un matériau donné utilisé pour une pièce à usiner peuvent avoir un impact sur son usinabilité.

## c) Composition chimique :

La composition chimique est un facteur essentiel dans la détermination de l'usinabilité d'un matériau. Les effets de la composition dépendent de la manière dont les éléments se combinent pour former un alliage. Pour les aciers, il est possible de faire certaines généralisations sur la composition chimique et son impact sur l'usinabilité. Cependant, les alliages non ferreux sont trop nombreux et variés pour permettre de telles généralisations.

## d) Traitement thermique :

Un matériau peut être soumis à un traitement thermique pour réduire sa fragilité, éliminer les contraintes, améliorer la ductilité ou la ténacité, augmenter la résistance, ou obtenir une microstructure spécifique. Ces traitements thermiques peuvent également être utilisés pour modifier la dureté du matériau ou apporter d'autres modifications qui ont un impact direct sur l'usinabilité.

## e) Fabrication :

Lorsqu'un métal est soumis à différents procédés tels que le laminage à chaud, le laminage à froid, l'étirage à froid ou le forgeage, cela a un impact sur ses propriétés telles que la taille des grains, la ductilité, la résistance, la dureté, la structure et par conséquent, son usinabilité.

## f) Dureté :

La dureté d'un métal est liée à la taille de ses grains et est souvent utilisée comme un indicateur de l'usinabilité d'un matériau. Un matériau plus dur est généralement considéré comme plus difficile à usiner.

## g) Limite d'élasticité :

Une limite d'élasticité élevée indique une mauvaise usinabilité du matériau en raison de l'augmentation de sa résistance à la traction. Cela entraîne une augmentation de l'énergie de coupe spécifique, des forces de coupe et de la consommation d'énergie nécessaires pour l'usinage.

## h) Résistance à la traction :

Une résistance à la traction élevée est un indicateur de difficulté d'usinage et donc d'une mauvaise usinabilité du matériau.

### 1.5.2- Propriétés physiques du matériau

Les propriétés physiques d'un matériau comprennent le module d'élasticité, la conductivité thermique, la dilatation thermique et l'écroutissage (voir figure 1.4) [5].

a) Module d'élasticité :

Le module d'élasticité est une propriété intrinsèque d'un matériau qui indique sa résistance à la déformation lorsqu'il est soumis à une force externe. Une valeur élevée du module d'élasticité correspond à une faible usinabilité du matériau, c'est-à-dire qu'il sera plus difficile à usiner.

b) Conductivité thermique :

Les matériaux conducteurs ont la capacité de transférer rapidement la chaleur d'un objet chaud vers un objet froid. La conductivité thermique mesure précisément cette capacité de transfert thermique. En ce qui concerne le titane (Ti), il présente une mauvaise usinabilité en raison de sa conductivité thermique médiocre, ce qui entraîne une accumulation de chaleur lors de l'usinage. De plus, le titane a tendance à adhérer à l'outil de coupe, ce qui aggrave encore sa capacité à être usiné efficacement.

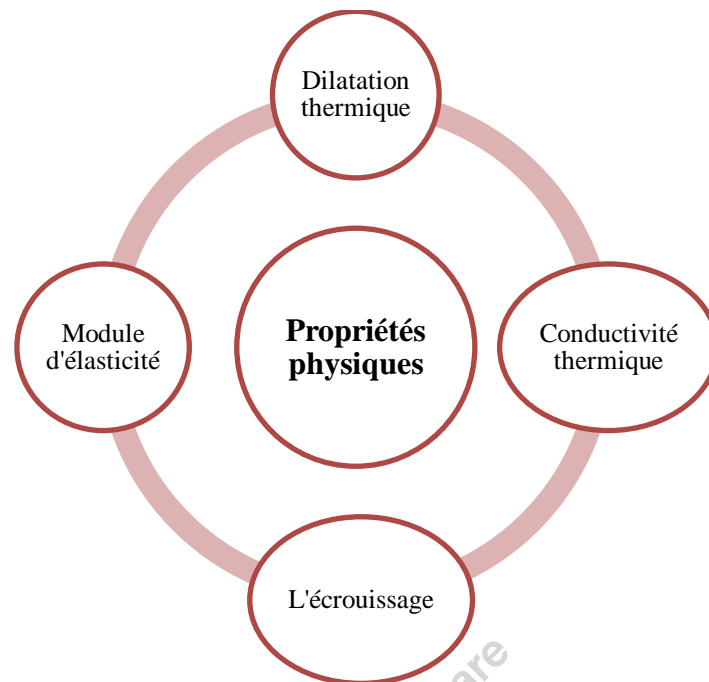
c) Dilatation thermique :

La vitesse de dilatation d'un métal est déterminée par son coefficient de dilatation thermique. Un coefficient plus élevé indique que le matériau se dilate davantage lorsqu'il est soumis à une augmentation de température. Les matériaux ayant un coefficient de dilatation élevé ont une usinabilité plus difficile en raison des défis associés à la maîtrise des dimensions de la pièce pendant l'usinage. Il peut être difficile de maintenir les dimensions souhaitées de la pièce en raison de la variation de taille causée par la dilatation thermique.

d) L'écroutissage :

Certains métaux présentent une caractéristique physique qui entraîne une augmentation significative de leur dureté lorsqu'ils sont soumis à un travail à froid, c'est-à-dire une déformation plastique à température ambiante. Lorsque ces métaux sont usinés, des contraintes internes se développent, ce qui a pour effet de durcir la pièce. La vitesse et l'ampleur de ce durcissement interne varient considérablement d'un matériau à l'autre. De plus, la chaleur générée pendant l'usinage joue un rôle important

dans le phénomène d'écrouissage d'un matériau. Un taux d'écrouissage élevé pendant l'usinage indique une faible usinabilité du matériau.



**Figure 1.4-** Propriétés physiques de la matière à usiner qui affectent l'usinabilité.

### 1.5.3- Paramètres d'usinage

Selon l'usinabilité d'un matériau, il est nécessaire d'ajuster les paramètres de coupe afin d'obtenir les meilleurs résultats lors de l'usinage d'une pièce jusqu'à la finition requise, tout en prenant en compte la productivité et les coûts associés à l'usinage (voir figure 1.5) [5].

a) Matériau de l'outil :

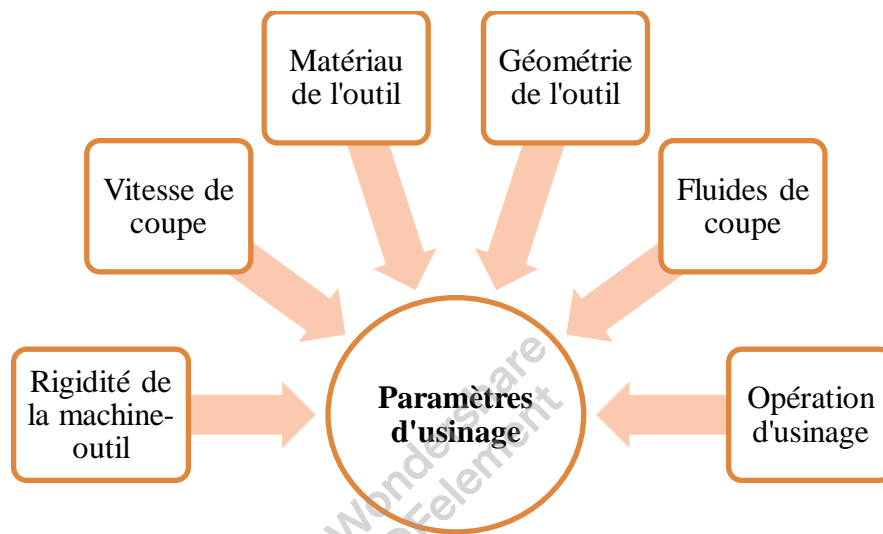
Lorsque l'indice d'usinabilité d'un matériau est faible, il est nécessaire d'utiliser des outils de coupe plus durs et résistants. Dans de tels cas, il est recommandé d'opter pour des nuances de carbure cémenté, des outils revêtus de carbure, du nitrure de bore cubique (CBN) ou des outils en céramique. Ces matériaux d'outil sont particulièrement adaptés pour l'usinage de matériaux plus durs.

b) Géométrie de l'outil :

Le choix de l'angle de coupe de l'outil de coupe ainsi que la conception appropriée du brise-copeaux sont également des éléments importants à prendre en compte, en fonction de l'usinabilité du matériau. Ces aspects influent sur la gestion des copeaux générés lors de l'usinage, ce qui peut avoir un impact significatif sur la qualité de l'usinage, la durée de vie de l'outil et la productivité globale du processus.

## c) Vitesse de coupe :

La vitesse de coupe doit être soigneusement équilibrée en fonction du matériau de l'outil et de l'usinabilité du matériau à usiner, dans le but d'obtenir une durée de vie optimale de l'outil. Des vitesses de coupe trop élevées peuvent entraîner un mauvais état de surface de la pièce usinée, une usure rapide de l'outil, une perte de contrôle du processus et des dimensions non conformes. Il est important de trouver le bon équilibre pour garantir des performances d'usinage optimales tout en maximisant la durée de vie de l'outil.



**Figure 1.5-** Paramètres de coupe affectant l'usinabilité.

## d) Rigidité de la machine-outil :

L'utilisation de machines-outils à puissance limitée peut représenter un défi lors de l'usinage de certains matériaux, ce qui peut entraîner une usinabilité réduite. Dans de tels cas, il devient nécessaire de passer à des machines-outils à commande numérique par ordinateur (CNC) équipées de guides de mouvement linéaires et d'entraînements à vis à billes. Cette transition vers des machines CNC dotées de systèmes d'entraînement puissants peut être justifiée lors de l'usinage de matériaux très durs nécessitant des tolérances très strictes et des exigences élevées en termes de finition de surface.

## e) Fluides de coupe :

L'utilisation de fluides de coupe présente plusieurs avantages dans le processus d'usinage. Ces fluides ont pour rôle de refroidir à la fois l'outil et la pièce, assurant ainsi une lubrification efficace entre l'outil et la pièce, ainsi qu'entre l'outil et le copeau. Cela contribue à réduire les forces de frottement et la puissance nécessaire pour l'usinage. De plus, les fluides de coupe permettent de prévenir la formation de

bavures indésirables. Dans ces conditions, l'usinabilité du matériau peut être améliorée en termes de rugosité de surface, de puissance de coupe et de durée de vie de l'outil.

## **1.6- Usinabilité des matériaux d'ingénierie**

En raison de la complexité de l'usinabilité mentionnée précédemment, il est très difficile d'établir une mesure précise de l'usinabilité d'un matériau. Il est donc conseillé de se référer à des recommandations d'usinage basées sur des essais approfondis, l'expérience pratique et des données issues de la fabrication et de manuels spécialisés. Dans cette section, nous présenterons brièvement des indications sur l'usinabilité de différents métaux et matériaux non métalliques [6].

### **1.6.1- Usinabilité des aciers**

Dans l'acier, l'ajout de soufre jusqu'à 0,35 % contribue à briser les copeaux et à améliorer l'usinabilité. Le plomb agit comme un lubrifiant à la pointe de l'outil, facilitant ainsi l'usinage. La présence d'azote est également souhaitable pour une meilleure usinabilité. De plus, la présence de phosphore améliore également l'usinabilité. Les aciers sont des matériaux d'ingénierie essentiels, mais leur usinabilité est fortement influencée par l'ajout d'éléments d'alliage. L'ajout d'aluminium (Al) et de silicium (Si) dans les aciers est toujours préjudiciable, car ces éléments réagissent avec l'oxygène (O<sub>2</sub>) pour former de l'oxyde d'aluminium et des silicates. Ces composés sont durs et abrasifs, ce qui augmente l'usure des outils et réduit l'usinabilité [6, 7].

La teneur en carbone et en manganèse a des effets variables sur l'usinabilité des aciers, en fonction de leur composition. En général, plus la teneur en carbone est élevée, meilleure est l'usinabilité. Cependant, les aciers simples à faible teneur en carbone (moins de 0,15 % de C) peuvent produire une faible qualité de surface. Les aciers à outils et à matrices sont difficiles à usiner et nécessitent généralement un recuit avant l'usinage. L'usinabilité de la plupart des aciers est généralement améliorée par le travail à froid [6].

D'autres éléments d'alliage tels que le nickel (Ni), le chrome (Cr), le molybdène (Mo) et le vanadium (V) améliorent les propriétés des aciers, mais réduisent leur usinabilité. Le rôle des éléments gazeux tels que l'oxygène (O<sub>2</sub>), l'hydrogène (H<sub>2</sub>) et l'azote (N<sub>2</sub>) n'a pas été clairement établi.



### 1.6.2- Usinabilité des fontes

La présence de cémentite primaire rend les fontes blanches très difficiles à usiner. Les zones de refroidissement dans les pièces moulées réduisent l'usinabilité et provoquent l'écaillage ou la rupture de l'outil, ce qui nécessite des outils à haute ténacité. Les fontes grises sont en principe faciles à usiner car la lamelle de graphite brise les copeaux. Cependant, la surface usinée est rugueuse car des particules de graphite s'en détachent. L'affinage des particules de graphite améliore la finition sans nuire aux propriétés d'usinage libre. Les fontes grises sont souvent coupées à sec, car les copeaux fins obstruent les filtres. Les fontes nodulaires et malléables sont ductiles et plus résistantes, mais elles sont usinables et peuvent étonnamment avoir une durée de vie plus longue [6, 7].

### 1.6.3- Usinabilité des métaux et alliages non ferreux

L'usinabilité de certains métaux et alliages non ferreux importants peut être résumée de la manière suivante [6, 7] :

- 1) Magnésium (Mg) et ses alliages : En raison de sa faible ductilité, le magnésium présente une grande facilité d'usage. Il permet d'obtenir de bonnes finitions de surface et une durée de vie prolongée des outils.
- 2) Alliages de zinc : En raison de leur faible résistance et de leur faible ductilité, ils sont très faciles à usiner.
- 3) Aluminium (Al) et ses alliages : En général, l'aluminium est facile à usiner. Cependant, Les alliages d'aluminium contenant une forte teneur en silicium ou des alliages corroyés peuvent être abrasifs, nécessitant ainsi l'utilisation d'outils plus durs tels que le nitrure de bore cubique polycristallin (PCBN) ou le diamant polycristallin (PCD). Le contrôle dimensionnel peut être un défi lors de l'usinage de l'aluminium en raison de son faible module d'élasticité et de sa dilatation thermique relativement élevée. Les outils en acier rapide (HSS) peuvent être utilisés, mais l'application d'un fluide de coupe est essentielle pour le refroidissement. Des vitesses de coupe très élevées allant jusqu'à 4200 m/min sont possibles avec des carbures.
- 4) Cuivre (Cu) et ses alliages : Cuivre pur est difficile à usiner en raison de la formation de copeaux adhérents, mais les alliages de cuivre coulés sont plus faciles à usiner. Tout comme l'aluminium pur, le cuivre pur est mieux usiné à froid ou à l'état écroui. Les laitons (alliages de cuivre et de zinc) sont faciles à usiner.

- 5) Alliages à base de nickel : Ces alliages sont abrasifs, durcissent par écrouissage et résistent aux températures élevées. Leur usinabilité est similaire à celle des aciers inoxydables. L'usinage doit être réalisé à l'état recuit ou surmoulé.
- 6) Titane (Ti) et ses alliages : Ils ont une conductivité thermique faible, la plus basse parmi les métaux, ce qui entraîne une augmentation significative de la température et la formation de copeaux adhérents, les rendant ainsi difficiles à usiner. À basse vitesse, les outils en acier rapide (HSS) sont utilisés avec des fluides de coupe à base d'huile. À des vitesses plus élevées (30-60 m/min), les carbures cémentés ou les cermets sont préférés. Des avances plus élevées sont préférables, car elles réduisent la chaleur de frottement et permettent une meilleure évacuation de la chaleur dans les copeaux.

#### 1.6.4- Usinabilité des matériaux non métalliques

- 1) Polymères : Ils peuvent être thermoplastiques ou thermodurcissables [7].
  - Les thermoplastiques présentent généralement une faible conductivité thermique, un faible module d'élasticité et une faible température de ramollissement. Leur usinage requiert l'utilisation d'outils avec un angle de coupe positif et des angles de dépouille importants pour réduire les forces de coupe. Une faible profondeur de coupe et d'avance, ainsi qu'une vitesse relativement élevée, sont nécessaires, tout comme un bon support des pièces à usiner en raison de leur manque de rigidité. Les outils doivent être bien affûtés. Un refroidissement externe de la zone de coupe est essentiel pour éviter que les copeaux ne deviennent collants et ne s'agglutinent sur l'outil. Le refroidissement peut être réalisé à l'aide d'un jet d'air, d'un brouillard de vapeur ou d'une émulsion.
  - Les thermodurcissables sont fragiles et sensibles aux gradients thermiques lors de l'usinage. Cependant, leur usinabilité est similaire à celle des thermoplastiques.
  - Les plastiques renforcés sont hautement abrasifs et difficiles à usiner. La déchirure et l'arrachement des fibres constituent des problèmes majeurs.
- 2) Composites renforcés par des fibres : Ils sont difficiles à usiner en raison des différentes propriétés des fibres et de la matrice, de l'orientation des fibres, de l'inhomogénéité et de la nature du matériau. Les composites renforcés de verre, de graphite et de bore sont particulièrement difficiles à usiner en raison de l'usure rapide des outils. Les outils en carbure cémenté s'usent rapidement, ce qui peut nécessiter l'utilisation d'outils imprégnés de diamant, bien que cela puisse réduire la durée de vie

de l'outil. Différentes opérations d'usinage sont utilisées pour ce matériau, telles que le perçage, l'alésage, le chanfreinage, le fraisage et le sciage, en utilisant des outils imprégnés de diamant ou plaqués de diamant. Les vitesses de perçage recommandées sont généralement entre 60 et 200 m/min, avec une vitesse d'avance comprise entre 0,01 et 0,12 mm/tour. L'utilisation de fluides de coupe et la protection de la machine contre les poussières abrasives sont recommandées.

- 3) Céramiques : Les céramiques sont réputées pour leur résistance aux températures élevées, leur dureté, leur résistance à la corrosion et leurs propriétés électriques. L'usinage des céramiques requiert une combinaison appropriée de machines-outils, d'outils de coupe, de gestion thermique, d'expérience et de conception pour la fabrication. Différents procédés abrasifs tels que la rectification, le rodage, le polissage, l'usinage par ultrasons (USM) et l'usinage par jet d'eau abrasif (AWJM) sont utilisés pour la finition et la mise en forme des pièces céramiques (y compris le verre) [7].

### 1.7- Etat de l'art

Au cours des dernières années, la caractérisation de la texture de surface par les cinq paramètres de courbe d'Abbot-Firestone ( $R_{pk}$ ,  $R_k$  et  $R_{vk}$ ,  $Mr1$  et  $Mr2$ ) a attiré l'attention de plusieurs chercheurs. Sivatte-adroer et al. [8, 9] ont exploité trois paramètres de cette courbe lors du rodage grossier d'acier St-52. Le ANN a été utilisé afin de donner un modèle indirect entre chaque paramètre de sortie ( $R_{pk}$ ,  $R_k$  et  $R_{vk}$ ) et cinq paramètres d'entrée. Egalement, Krolczyk et al. [10] ont enquêté l'intégrité de la surface par la courbe de la surface de portance (BAC) lors de l'usinage des pièces par modélisation de dépôt fondu (Fused Deposition Modelling : FDM). Selon Strøbæk-Nielsen en 1988 [11], l'évaluation de la rugosité de surface d'une pièce rodée peut être déterminée par la profondeur de rugosité du cœur (paramètre  $R_k$ ). Pareillement, Grzesik en 2016 [12], a observé que la résistance à la corrosion peut également être liée à la forme de la courbe de surface d'appui (BAC). Il convient de noter que la surface d'une pente équivalente presque linéaire est plus résistante que celle avec une pente équivalente dégressive-progressive. En outre, cette pente est en relation avec le taux d'usure, le frottement et la durée de vie de la pièce mécanique [12, 13]. De plus, Kumar et al. [14] ont développé une nouvelle méthode d'évaluer deux paramètres d'usure (profondeur et volume) de la chemise du moteur à partir de la courbe d'Abbott-Firestone. Dans un même aspect, Pawlus et al. [15, 16] ont conduit une comparaison approfondie entre les normes ISO 13565-2

(groupe  $R_k$ ) et ISO 13565-3 (groupe  $R_q$ ) lors du processus de rodage de plateau de chemise moteur (cylinder liner plateau honing process CLP-HP). Ainsi, le travail de Anderberg et al. [17], présentent une étude comparative entre la famille de paramètre  $R_k$  (paramètres de l'ISO 13565-2) et la famille de paramètre  $R_q$  (paramètres de l'ISO 13565-3) lors de la finition du chemise de cylindre. Les deux chercheurs précédents [15-17] indiquent que chaque norme ne remplace pas une autre afin de caractériser la texture de surface. Alors, Sedlaček et al. [18] ont trouvé que les deux paramètres de la courbe de portance ( $R_{pk}$  et  $R_{vk}$ ) pourraient avoir une influence sur le coefficient de frottement pour les quatre procédés d'usinage les plus utilisés en mécanique automobile (tournage, fraisage, rectification et polissage). Tomov et al. [19] ont réalisé une modélisation mathématique dont le but de déterminer l'effet de quatre paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $ap$  et  $r_e$ ) sur la profondeur de rugosité du cœur ( $R_k$ ) et un nouveau coefficient (noté :  $K_{Rk}$ ) lors du tournage dur. Le couple d'usinage utilisé dans cette étude est plaquette de coupe en céramique HC2/Acier C 55 (DIN) traité thermiquement à une dureté de  $52 \pm 2$  HRC. En ce qui concerne le paramètre  $R_k$ , les auteurs indiquent que l'avance ( $f$ ) et le rayon de la pointe de l'outil ( $r_e$ ) sont les seuls grandeurs d'entrée significatifs. Concernant le coefficient  $K_{Rk}$ , aucune variable d'entrée ayant un effet sur la valeur finale.

# **CHAPITRE 2**

## **Matériau, appareils et méthodes utilisées**

## 2.1- Introduction

Lors de l'usinage de pièces en acier C45, il est essentiel de mesurer la rugosité de surface afin de garantir la qualité et les performances de la pièce finie. La rugosité est une caractéristique importante qui détermine l'aspect, la texture et la fonctionnalité de la surface usinée, l'utilisation doit être faite rugosimètre. Dans cette étude, nous avons présenté les conditions de coupe utilisées pour tournage de l'acier C45. Ces conditions comprennent des paramètres tels que la ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ,  $X_r$ ,  $r_\xi$ ), le type d'outil. Nous avons soigneusement sélectionné ces conditions de coupe pour obtenir les paramètres de la courbe du taux de portance. En plus de cela, nous avons mis en place des plans d'expériences mono-factorielle pour évaluer l'effet de ces conditions de coupe sur les paramètres de la courbe d'Abbott-Feristone. Dans un plan d'expérience mono-factorielle nous a permis de mesurer la rugosité en variant un facteur à la fois tout a maintenant les autres constantes. Cela nous a permis d'analyser l'effet individuel de chaque facteur sur la rugosité de la pièce En utilisant ces plans d'expériences, nous avons collecté des données précises sur la rugosité de surface de l'acier C45 usiné. Ces données, est nous ont permis d'évaluer l'influence de chaque condition de coupe sur la rugosité.

## 2.2- Matériels utilisés

### 2.2.1- Machine-outil, porte outil et la plaquette

Les essais d'usinage ont été réalisés sur un tour conventionnel de la société tchèque 'LMO MICROWELY' modèle TY 16405 avec une puissance de 6.6 KW avec une vitesse minimale de tour 25 tr/min et une vitesse maximale de 2000 tr/min (figure 2.1). Les échantillons en acier C45 sont usinés à l'aide d'une plaquette de coupe en carbure (SNGM 12 04 04,  $r_\xi=0.4$  ; SNGM 12 04 08,  $r_\xi=0.8$ ) ayant une bonne tenue de coupe, une forte ténacité et une grande résistance à l'usure (figure 2.2). Toutefois, la désignation du porte-outil utilisé est (PSBNR 25 25 M12  $X_r=75^\circ$  ; PSSNR 25 25 M12  $X_r=45^\circ$ ) (figure 2.). Sa désignation selon la norme ISO.



**Figure 2.1-** Vue du tour utilisé.



**Figure 2.2-** Vue de la plaquette de coupe utilisé.

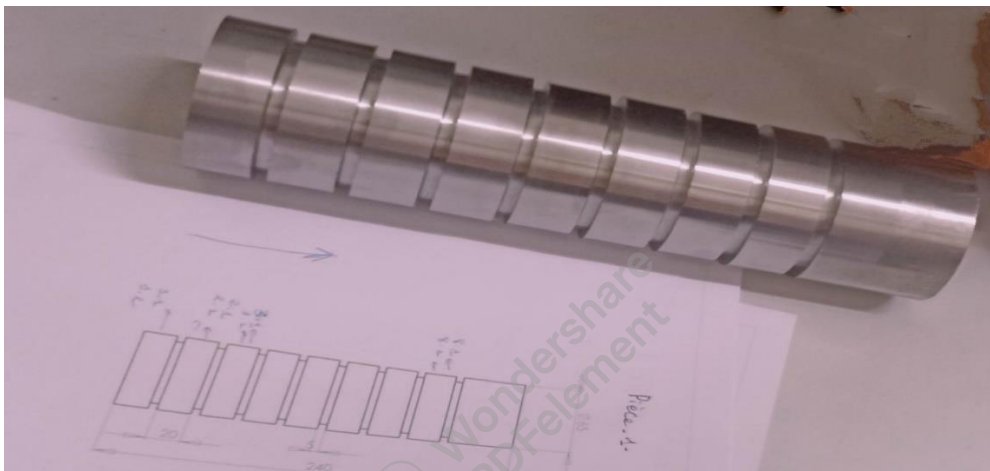


**Figure 2.3-** Vue du porte-outil utilisé.

### 2.2.2- Matériau à usiné

Ce matériau présente une faible conductivité thermique et une faible ductilité parmi les aciers au carbone corroyés. Avec une résistance à la traction relativement élevée de 630MPa, il est utilisé pour les vis, les pièces forgées, les forêts, les arbres, etc. La combinaison de la précision dimensionnelle, de la rectitude et de la concentricité permet une usure minimale dans les applications à grande vitesse.[30]

Les échantillons en acier C45 à diamètre de 65 mm et longueur de 250 mm contiennent huit gorges de 5 mm, entre chaque deux gorges 20 mm (figure 2.4).



**Figure 2.4-** Vue de la piece usiné.

La composition chimique de l'acier utilisé est donnée par le tableau 2.1 [20]

**Tableau 2.1-** Composition chimique d'acier C45.

Composition chimique %										
Norme	Nuance d'acier	C	Si ≤	Mn	P ≤	S ≤	Cr ≤	Ni ≤	Mo ≤	Cr+Mo +Ni ≤
En 10083-2	C45	0.42-0.50	0.40	0.50-0.80	0.045	0.045	0.40	0.40	0.10	0.63

#### Propriétés mécaniques et physique :

Le tableau suivant 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 [21] :



**Tableau 2.2-** Propriété mécanique et physique d'acier C45.

Propriétés d'acier C45	
Charge de rupture en traction	650 MPa
Module d'élasticité	210 GPa
Allongement a la rupture	15%
Densité	7.87 g/cm <sup>3</sup>
Température de fusion	1495 °C
Dureté	205 Brinell
Limite d'élasticité	300 MPa

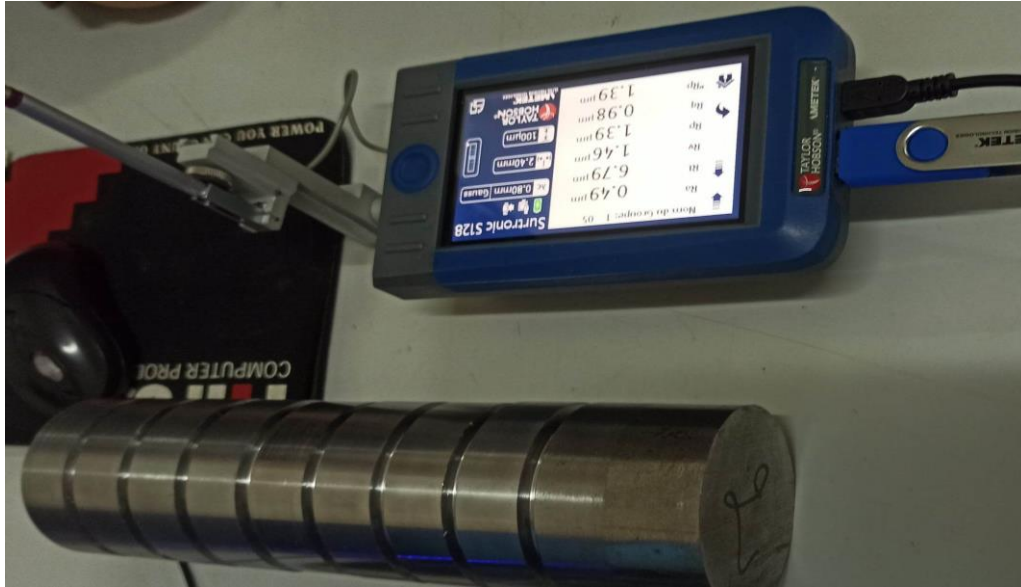
Les nuances d'acier équivalentes à l'acier C45 sont répertoriées dans le tableau 2.3- suivant, y compris les normes chinoises GB, les normes américaines ASTM AISI et SAE, les normes japonaises JIS et ISO[20].

**Tableau 2.3-** Equivalence 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

Testeur de finition de surface portable/Testeur de mesure de rugosité de surface Surtronic S-100 Série est une gamme de testeurs de finition de surface robuste, portable et manuel. Il suffit d'appuyer sur le bouton de mesure pour afficher en quelques secondes un jeu complet de résultats de mesure entièrement traçables, y compris un graphique de profil détaillé. Le testeur/appareil de mesure de rugosité de surface à palpeur Surtronic S-100. Le dernier venu de la famille Surtronic, le Surtronic S-100 Série correspond à une série d'instruments de mesure de rugosité basés sur les fonctionnalités du Surtronic 25. [22].



**Figure 2.5-** Rugosimètre utilisé.

Les mesures des paramètres de la courbe de portance sont faites sur un profilomètre 2D TAYLOR HOBSON doté d'un palpeur avec une pointe en diamant de rayon de courbure  $2 \mu\text{m}$  (PRECISION MEASUREMENT SYSTEM FORM TALYSURF 120), Chaque surface est caractérisée par trois mesures dans différents endroits et la valeur moyenne est utilisée dans l'étude. Les paramètres fonctionnels  $R_{PK}$ ,  $R_K$ ,  $R_{VK}$ ,  $Mr_1$ ,  $Mr_2$  se déterminent à partir de la courbe d'Abbott Firestone "courbe du taux de portance".

#### 2.2.4- Moyens de calcul

Dans notre étude sont Les logiciels utilisés :

- Logiciel Minitab 18 (figure 2.6).
- Logiciel JMP 11 SW (figure 2.7).

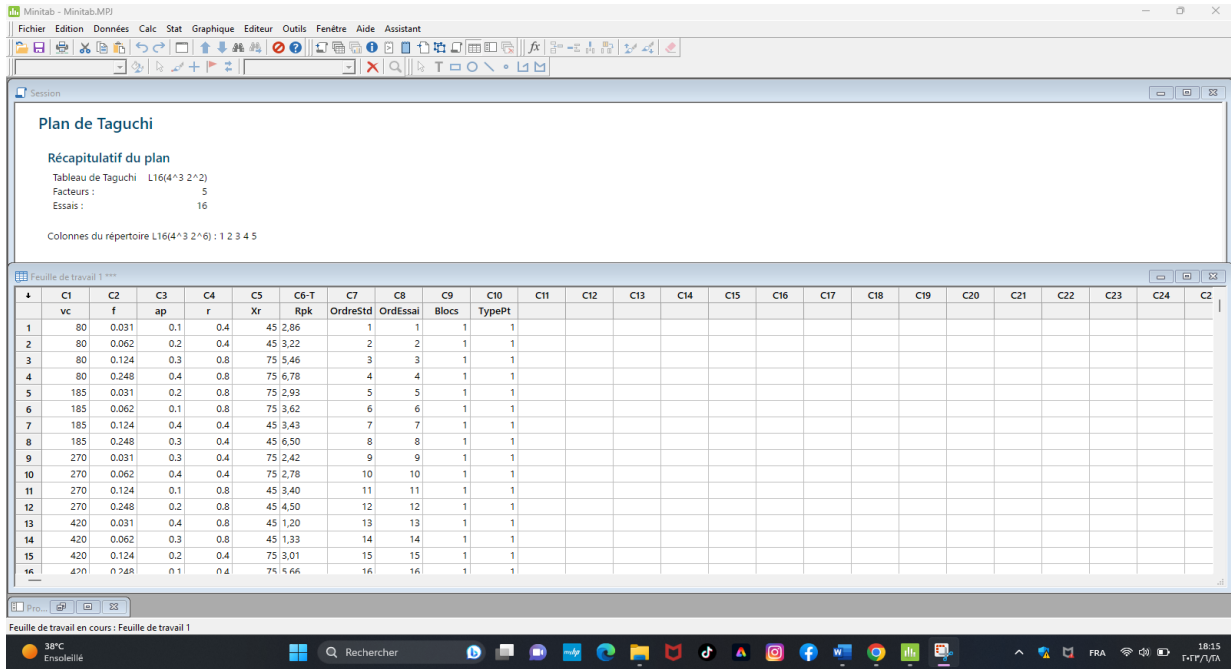


Figure 2.6- Interface de logiciel Minitab 18.

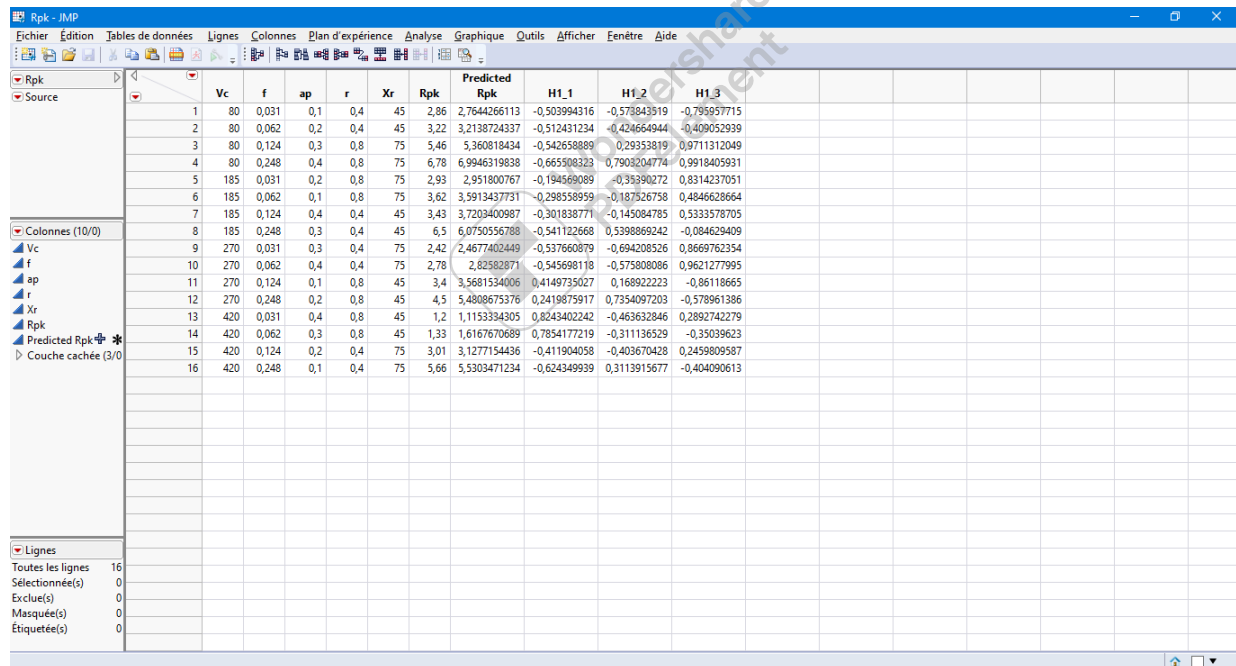


Figure 2.7- Interface de logiciel JMP 11.

### 2.3- Conditions de coupe

Parmi les facteurs les plus significatifs affectant le système de coupe, on peut citer les éléments du système de coupe (Vc, f, ap,  $r_c$ ,  $X_r$ ), le temps de fonctionnement, les conditions de travail...etc. [23]

Considérant  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ , comme paramètres d'entrée et  $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$  comme paramètres de sortie. L'influence d'un ou de plusieurs facteurs ( $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ ) sur un paramètre  $Y$ , peut être obtenue en utilisant les deux méthodes suivantes :

- Une méthode uni-factorielle,
- Une méthode multifactorielle.

### 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 ( $V_c, f, a_p, Mr_1, Mr_2$ ). [24].

Cette méthode est d'évaluer l'action d'un seul facteur  $X$  sur un paramètre  $Y$ . L'opération consiste à varier la valeur du facteur examiner  $X$ , tout en maintenant tous les autres facteurs constants. Pour chaque  $X = X_i$ , on réalise un essai et on mesure la valeur correspondante de  $Y_i$ . [24] Pour étudier et optimiser un processus technologique on utilise souvent cette méthode qui permet d'obtenir la relation (2.1) :

$$Y = f(f, V_c, a_p, \dots \text{etc}) \quad (2.1)$$

Où  $F$  est la fonction de réponse et  $Y$  est la réponse correspondante ( $R_{pk}, R_k$  et  $R_{vk}$ ). Dans ce cas, on varie seulement le facteur  $X$ , tout en maintenant les autres facteurs constants. Dans notre étude, nous avons varié la vitesse de coupe, ensuite nous avons varié la profondeur de passe et en troisième lieu nous avons varié l'avance. Les paramètres de sortie sont les Cinq critères de rugosité ( $R_{pk}, R_k$  et  $R_{vk}, Mr_1, Mr_2$ ), Le tableau regroupe les conditions de coupe en uni-factoriel et les paramètres de sortie.

**Tableau 2. 4-** Conditions de coupe pour les essais et les paramètres de sortie.

N <sup>0</sup>	Facteurs	Valeurs	Paramètres de sortie
1	Avance $f$ (mm/tr)	0.031, 0.062, 0.124, 0.248	$R_{pk}, R_k, R_{vk},$ $Mr_1$ et $Mr_2$
2	Vitesse de coupe $V_c$ (mm/min)	80, 185, 270, 420	
3	Profonde de passe $a_p$ (mm)	0.1, 0.2, 0.3, 0.4	
4	Rayon du bec $r_\epsilon$ (mm)	0.4, 0.8	
5	Angle de coupe principal $X_r$ (°)	45, 75	

### Méthode multifactorielle

Cette méthode permet de déterminer l'action simultanée de plusieurs facteurs sur le paramètre Y. Pour déterminer le nombre d'essais nécessaire, nous appliquons la formule (2.2) suivante : [24]

$$N = q^k \quad (2.2)$$

Où : N : Nombre d'essai, q : Nombre de niveau de variation des facteurs de base, k : Nombre de facteurs de base.

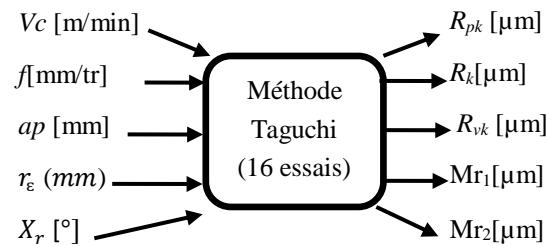
Dans notre étude, nous avons trois facteurs à quatre niveaux de variation ( $q = 4^3$ ) et deux facteurs à deux niveaux ( $q = 2^2$ ). Nous avons donc un nombre d'essai  $N = 256 (4^3 \times 2^2)$  selon la méthode de plan factoriel complet. Pour diminuer le nombre d'essais sans pour autant diminuer 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. Le tableau 2.6 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.

**Tableau 2.5-** Tableau orthogonale de Taguchi  $L_{16} (4^3)$ .

Trail n°	Vc	f	ap	$r_{\xi}$	$X_r$
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 2.6-** Paramètres de coupe et leurs niveaux.

Niveau	Vc[m/min]	f[mm/tr]	ap [mm]	$r_{\epsilon}$ (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	-	-

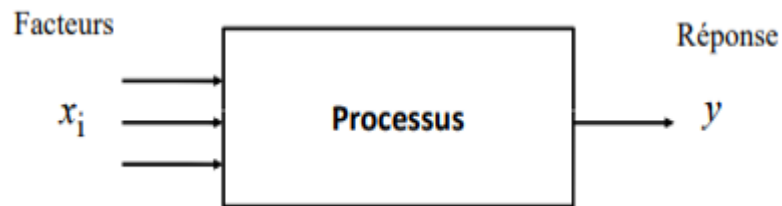
**Figure 2.8-** Paramètres d'entrées/de sorties.**Tableau 2.7-** Paramètre de coupe et leurs niveaux pour un plan de 16 essais.

Trail n°	Vc	f	ap	$r_{\epsilon}$	$X_r$
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

PEX est une méthode mathématique utilisée pour planifier et mener des études scientifiques très avancées qui modifient en même temps les variables d'entrée (X) appelées facteurs car elles révèlent leurs effets sur la variable de sortie (ou plus) (Y) qui est appelé la réponse (Voir figure 1.1). Les plans des expériences (PEX) Il s'agit d'une branche des statistiques appliquées, qui à son tour se concentre toujours sur l'utilisation de la méthode scientifique pour planifier, mettre en œuvre, analyser et interpréter les données d'expériences contrôlées.



**Figure 2.9-** Entrées et sorties d'une expérience.

En combinant plusieurs variables dans une étude au lieu de créer une étude pour chacune, le nombre d'essais requis sera considérablement réduit et une meilleure compréhension du processus est obtenue. Ceci est en contraste direct avec l'approche typique d'un facteur à la fois (UFAF), qui limite la compréhension et gaspille les données. En outre, les études UFAF ne peuvent pas assurer la détection des effets de combinaisons des facteurs (une condition qui sera ultérieurement définie comme une interaction) [25].

Une propriété peut toujours être décrite par une expression mathématique telle que :

$$Y = f(x_1, x_2, x_3 \dots \dots x_n) \quad (2.3)$$

Y grandeur (ici appelé variable de sortie) qui exprime la propriété à laquelle s'intéresse l'expérimentateur.

$x_i$  variable (ici appelé paramètre d'entrée) choisie par l'expérimentateur qui en maîtrise les valeurs.

La mise en place d'un plan d'expérience demande donc de suivre le processus d'élaboration suivant : [26]

- **Identification des critères :** Définition des limites des objectifs des variables grandeurs étudiées.
- **Déterminer les variables de l'étude :** Paramètres d'entrée.

- **Choix du critère d'arrêt :** Paramètre mesurable permettant de définir une limite à l'expérimentation.
- **Choix du type de plan :** Choix à priori de la forme mathématique de la propriété étudiée.
- **Expérimentation :** Identification des expériences à effectuer.
- **Analyse des résultats :**Explicitation complète des expressions mathématiques des variables de sorties en fonction des paramètres d'entrée.
- **Validation des résultats :**Tracés des graphiques vérifiant la fiabilité de la réponse.
- **Optimisation :** Recherche de l'optimum (variable d'entrer en fonction de la sortie).
- **Conclusion.**

### 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.[27]



**Figure 2.10-** Résumé de manière plus simple cette définition.

Avant de commencer à développer un plan d'expérience, vous acquérez des connaissances sur certains termes tels que :

#### **Facteurs :**

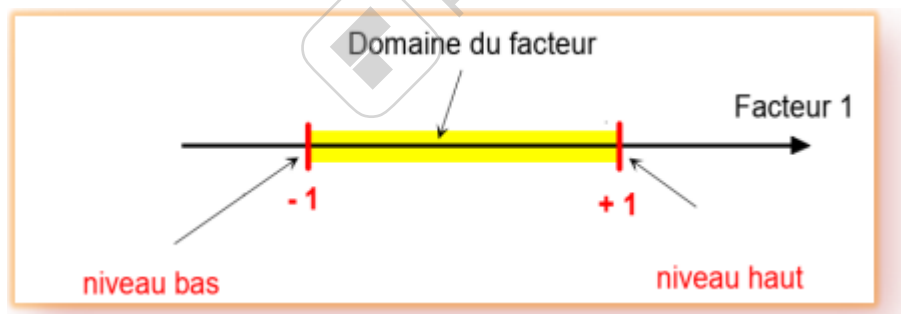
Les facteurs caractérisant les conditions expérimentales peuvent être très variés. Il existe [27] :

- Des facteurs quantitatifs continus tels qu'une température, un débit, une pression, une concentration, une vitesse etc.
- Des facteurs quantitatifs discontinus comme le nombre de vis d'un montage etc.



- Des facteurs qualitatifs comme la nature d'un procédé (discontinu ou continu), le type de climat etc. Les facteurs peuvent également être classés selon d'autres critères dont :
- Des facteurs contrôlés, auxquels il est possible d'imposer un état déterminé à l'avance. C'est ce type de facteurs que l'expérimentateur fait varier lors du processus expérimental.
- Des facteurs mesurables, auxquels il n'est pas possible d'imposer un état donné, mais dont le niveau peut être connu précisément (exemple : température extérieure).
- Des facteurs constants, qui sont maintenus dans un état fixe tout au long des différentes expériences.
- Des facteurs bruits, dont l'effet ne s'exerce que sur la dispersion ou la qualité des résultats (Exemple : vieillissement du matériel, fatigue de l'opérateur).

**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. [27]



**Figure 2.11-** Niveau bas du facteur est noté par -1 et le niveau haut par +1.

**Domaine expérimental :** Le champ expérimental est tracé par polyédrique avec des dimensions de  $k$ , où  $k$  est le nombre de facteurs considérés. Chaque aspect de ce polyèdre est déterminé par deux niveaux extrêmes qui distinguent le facteur correspondant de ce côté [26].

**Réponses :** Dans le contexte des plans d'expériences, la "réponse" fait référence à la variable dépendante ou au résultat que l'on cherche à mesurer ou à observer. Il s'agit de la caractéristique ou du comportement spécifique du processus, du produit ou du système étudié qui est influencé par les facteurs indépendants. La réponse peut prendre différentes formes en

fonction de la nature de l'expérience. Il peut s'agir d'une mesure quantitative telle que la taille, le poids, la vitesse, le temps de réaction, le rendement, etc. Ou bien, la réponse peut être une mesure qualitative telle que la qualité, l'acceptabilité, la présence/absence d'un défaut, la performance subjective, etc. [25]

**Effet :** L'effet du facteur X sur la réponse Y est obtenu en examinant les différences dans les valeurs de Y en fonction de ce X. Si le facteur X a une interaction avec lui-même, nous parlons d'un effet carré. L'effet peut être positif, nul ou négatif. Il est exprimé par le multiplicateur de X dans un modèle mathématique de réponse. L'importance de l'effet de X sur Y est donnée par des tests statistiques. [26]

**Interaction :** Nous disons qu'il existe une interaction entre les facteurs X et X "si l'effet de X dépend du niveau X" et vice versa. Cette réaction est appelée réaction XX 'ou X'X.

### **Type de facteurs :**

**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. [27]

**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. [27]

**Facteurs ordonnables :** Il s'agit de facteurs discrets que l'on peut mettre dans un ordre logique. Par exemple, grand, moyen, petit, ou encore premier, deuxième, troisième et quatrième. [27]

**Facteurs booléens :** Les facteurs booléens sont des facteurs discrets qui ne peuvent prendre que deux valeurs : haut ou bas, ouvert ou fermé, blanc ou noir, etc. La compréhension des plans d'expériences s'appuie sur la notion essentielle d'espace expérimental des grandeurs étudiées. Nous allons examiner en détail ce concept fondamental. Nous insisterons sur les facteurs continus qui sont les plus couramment utilisés. [27]

### 2.4.3- Type des plans d'expérience

#### a) 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.[27]

#### b) 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.[27]

### 2.5- Méthode de modélisation

#### 2.5.1- Méthodologie de surface de réponse (RSM)

La méthode appliquée pour la détermination des modèles mathématiques est la méthodologie de surface de réponse (MSR), en utilisant un logiciel de statistique, Design-Expert 10. Cette méthode a pour objectifs de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif. Pour cela on a choisi un niveau de signification  $\alpha$  fixé à ( $\alpha = 0.05$ ). La méthodologie de surface de réponse (MSR) est une procédure qui comprend six étapes[29] :

Définir les variables d'entrée indépendantes et les réponses de sortie voulues ;

- 1) Choisir un plan de conception expérimentale ;
- 2) Effectuer une analyse de régression avec le modèle mathématique de (MSR) ;
- 3) Analyser par (ANOVA) les variables d'entrée indépendantes, afin de trouver les paramètres qui affectent considérablement la réponse ;

4) Déterminer la forme du modèle mathématique appropriée ;

5) Optimiser les paramètres d'entrée et faire les tests de confirmation afin de vérifier les performances prédites. [29]

L'utilisation de la méthodologie de la surface de réponse permet d'une part de modéliser une variable dépendante  $\Psi$ , dite variable de réponse, en fonction d'un certain nombre de variables indépendantes (facteurs),  $X_1, X_2, \dots, X_k$ , d'autre part, d'analyser l'influence et l'interaction de ces dernières sur la réponse. On peut ainsi écrire le modèle pour une réponse donnée ( $\Psi$ ) sous la forme suivante :

$$\Psi = c_0 + \sum_{i=1}^k c_i X_i + \sum_{i=1}^k c_{ii} X_i^2 + \sum_{i,j} c_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (III-1)$$

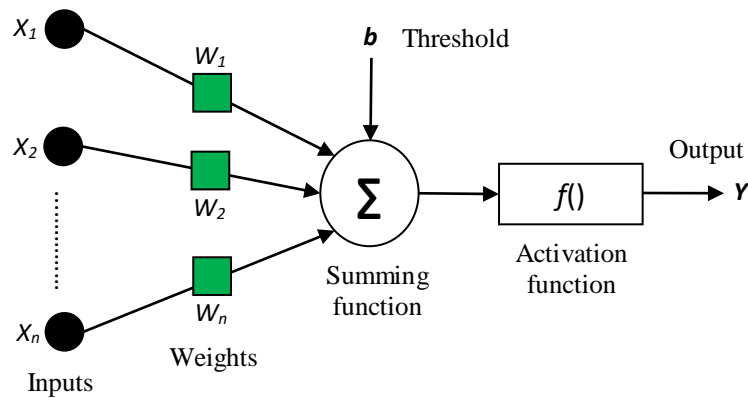
- $\Psi$  est la grandeur à laquelle s'intéresse l'expérimentateur. C'est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée ;
- $X_i$  représente le niveau attribué au facteur  $i$ . C'est la valeur de la coordonnée du facteur  $i$  retenue par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On supposera même, par la suite, que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression) ;
- $c_0, c_i, c_{ij}, c_{ii}$  représentent respectivement le terme constant, les coefficients des termes linéaires, des termes représentant les interactions entre variables et des termes quadratiques. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

### 2.5.2- Réseau de neurones artificiels

Le réseau de neurone artificiel ANN est une méthode de modélisation non-conventionnelle basée sur l'intelligence artificielle. Cette technique d'informatique douce est très schématiquement inspirée du fonctionnement de vrais neurones humains [31, 32]. Un neurone artificiel simple est composé de (voir figure 2.7) :

- Un ensemble des valeurs d'entrée  $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  discrètes  $\{0, 1\}$  ou réelles  $[-1, 1]$ ,
- Un ensemble de poids réels  $\{W_1, W_2, \dots, W_n\}$  entre les neurones,
- Une fonction de sommation  $\sum$  qui calcule la somme pondérée des entrées,
- Un biais  $b$  associé au neurone,

- Une fonction d'activation  $f$  qui calcule l'activité du neurone,
- Et enfin une sortie  $Y$ .



**Figure 2.12-** Structure de réseau de neurone artificiel (ANN) [33].

Dans cette section, le perceptron multicouche de type Feed-forward a été utilisé afin de modéliser les trois paramètres de la courbe du taux de portance ( $R_{pk}$ ,  $R_k$ ,  $R_{vk}$ ,  $Mr1$  et  $Mr2$ ). De plus, les données expérimentales présentées dans le tableau 3 ont été exploitées pour établir les cinq modèles. A l'étape de l'apprentissage du réseau, l'algorithme de rétro-propagation basé sur le gradient descendant a été choisi. La valeur de coefficient de corrélation  $R^2$  est analysée sur la base du niveau de signification  $\alpha = 0,05$ , c'est-à-dire pour un niveau de confiance de 95%. L'étape qui reste est de déterminer l'architecture optimal.

# **CHAPITRE 3**

## **Modélisation des paramètres de BAC**



### 3.1- Introduction

Ce chapitre présente une étude statistique des cinq paramètres de la courbe du taux de portance ( $R_{pk}$ ,  $R_k$ ,  $R_{vk}$ ,  $Mr1$  et  $Mr2$ ) en relation avec les variables de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $ap$ ,  $r_\varepsilon$  et  $X_r$ ) lors du tournage de l'acier C45 d'une dureté de 205 Brinell. Cette étude utilise deux méthodes de modélisation : la méthode de surface de réponse (RSM) et l'utilisation d'un réseau de neurones artificiels (ANN). L'objectif est d'identifier les facteurs et les interactions qui ont un impact statistiquement significatif sur les paramètres étudiés de la courbe d'Abbott-Firestone. À la fin de ce chapitre, une comparaison est effectuée entre les modèles mathématiques obtenus à l'aide du réseau de neurones artificiels et de la méthode de régression.

### 3.2- Modélisation par la méthodologie de surface de réponse (RSM)

#### 3.2.1- Analyse de la variance (ANOVA)

Les tableaux 3.1-3.5 fournissent l'analyse de variance (ANOVA) pour cinq paramètres de la courbe de taux de portance (BAC). Ces paramètres, à savoir  $R_{pk}$ ,  $R_k$ ,  $R_{vk}$ ,  $Mr1$  et  $Mr2$ , sont examinés en détail dans ce chapitre.

**Tableau 3.1-** Analyse de la variance de paramètre  $R_{pk}$ .

Source	DL	SC	MC	F	P	Cont. %	Remarques
Modèle	5	39.5674	7.9135	42.46	<0.0001	95.50	Signifiant
$V_c$	1	7.4100	7.4100	39.76	<0.0001	17.89	Signifiant
$f$	1	29.6621	29.6621	159.17	<0.0001	71.59	Signifiant
$ap$	1	0.0500	0.0500	0.27	0.616	0.12	Insignifiant
$r_\varepsilon$	1	0.0272	0.0272	0.15	0.710	0.07	Insignifiant
$X_r$	1	2.4180	2.4180	12.98	0.005	5.84	Signifiant
Erreur	10	1.8636	1.8636			4.50	
Total	15	41.431				100.00	

En se basant sur la valeur de probabilité ( $P_f < 0.05$ ) et leur contribution significative (71,59%) du tableau 3.1, il est évident que la vitesse d'avance ( $f$ ) est le facteur le plus déterminant dans la variation de la hauteur des pics saillants ( $R_{pk}$ ). Ensuite, la vitesse de coupe ( $V_c$ ) se révèle être la deuxième variable indépendante influençant cette réponse, selon

les mêmes critères précédents ( $P_{V_c} + \text{Cont.}\%$ ). L'angle de coupe principal présente une signification statistique ( $P_{X_r} < 0.05$ ), bien qu'avec une faible contribution (5,84%). Par ailleurs, les deux autres paramètres d'entrée, à savoir le rayon du bec ( $r_\varepsilon$ ) et la profondeur de coupe ( $ap$ ), n'ont aucun impact sur la variation de  $R_{pk}$ .

**Tableau 3.2-** Analyse de la variance de paramètre  $R_k$ .

Source	DL	SC	MC	F	P	Cont.%	Remarques
Modèle	5	136.959	27.3918	47.47	<0.0001	95.96	Signifiant
$V_c$	1	82.449	82.4486	142.88	<0.0001	57.77	Signifiant
$f$	1	17.50	17.0497	29.55	<0.0001	11.95	Signifiant
$ap$	1	11.310	11.3101	19.60	0.001	7.92	Signifiant
$r_\varepsilon$	1	7.618	7.6176	13.20	0.005	5.34	Signifiant
$X_r$	1	18.533	18.5330	32.12	<0.0001	12.98	Signifiant
Erreur	10	5.770	0.5770			4.04	
Total	15	142.729				100.00	

L'analyse de variance (ANOVA) du tableau 3.2 révèle que tous les paramètres d'entrée ( $V_c$ ,  $f$ ,  $ap$ ,  $r_\varepsilon$  et  $X_r$ ) sont significatifs dans la variation de la profondeur de rugosité du cœur ( $R_k$ ) selon leur probabilité ( $< 0.05$ ). Cependant, la vitesse  $V_c$  se révèle être le facteur le plus important influençant  $R_k$ , avec une contribution de 57.77% selon la colonne avant dernière (Cont.%). Les autres facteurs,  $X_r$ ,  $f$ ,  $ap$  et  $r_\varepsilon$ , ont des contributions respectives de 12.98%, 11.95%, 7.92% et 5.34%.

**Tableau 3.3-** Analyse de la variance de paramètre  $R_{vk}$ .

Source	DL	SC	MC	F	P	Cont.%	Remarques
Modèle	5	35.719	7.1438	54.35	<0.0001	96.45	Signifiant
$V_c$	1	25.454	25.4539	193.66	<0.0001	68.73	Signifiant
$f$	1	3.812	3.8120	29.00	<0.0001	10.29	Signifiant
$ap$	1	3.252	3.2522	24.74	0.001	8.78	Signifiant
$r_\varepsilon$	1	2.124	2.1243	16.16	0.002	5.74	Signifiant
$X_r$	1	1.076	1.0764	8.19	0.017	2.91	Signifiant
Erreur	10	1.314	0.1314			3.55	
Total	15	37.033				100.00	



Selon les résultats présentés dans le tableau 3.3, l'analyse de variance (ANOVA) a révélé que toutes les variables indépendantes ( $V_c$ ,  $f$ ,  $ap$ ,  $r_\varepsilon$  et  $X_r$ ) sont significativement liées à la variation de la profondeur des creux profonds ( $R_{vk}$ ), avec des valeurs de probabilité inférieures à 0,05. Parmi ces variables, la vitesse  $V_c$  a été identifiée comme ayant la contribution la plus importante, représentant près de 70% de l'influence totale. Par conséquent, ce vitesse est le facteur le plus déterminant. Les autres facteurs, à savoir  $f$ ,  $ap$ ,  $r_\varepsilon$  et  $X_r$ , ont contribué respectivement à hauteur de 10,29%, 8,79%, 5,74% et 2,91%.

**Tableau 3.4-** Analyse de la variance de paramètre ***Mr1***.

Source	DL	SC	MC	F	P	Cont.%	Remarques
Modèle	5	413.73	82.747	39.90	<0.0001	95.23	Signifiant
$V_c$	1	48.64	48.639	23.45	<0.0001	11.19	Signifiant
$f$	1	196.98	196.978	94.97	<0.0001	45.34	Signifiant
$ap$	1	71.35	71.348	34.40	<0.0001	16.42	Signifiant
$r_\varepsilon$	1	59.41	59.406	28.64	<0.0001	13.67	Signifiant
$X_r$	1	37.36	37.363	18.01	0.002	8.60	Signifiant
Erreur	10	20.74	2.074			4.77	
Total	15	434.47				100.00	

Sur la base des résultats de l'analyse ANOVA présentés dans le tableau 3.4, ils est évident que tous les paramètres d'entrée ( $V_c$ ,  $f$ ,  $ap$ ,  $r_\varepsilon$  et  $X_r$ ) jouent un rôle déterminant dans la variation de la partie de la position limite supérieure de profil de noyau de rugosité ( $Mr1$ ). Notamment, la vitesse  $f$  est le facteur le plus influent sur  $Mr1$ , contribuant à hauteur de 45.34%. Ensuite, le paramètre  $ap$  se révèle être le deuxième facteur ayant un effet significatif sur cette réponse. Les autres facteurs  $r_\varepsilon$ ,  $V_c$  et  $X_r$ , contribuent respectivement à hauteur de 13.67%, 11.19% et 8.60%.

En se basant sur les colonnes de probabilité ( $P$ ) et de contribution (Cont.%) du tableau 3.5, il est évident que la variation de la partie de la position limite inférieure du profil de noyau de rugosité ( $Mr2$ ) est influencée par les paramètres classiques de coupe, à savoir  $V_c$ ,  $f$  et  $ap$ . Plus précisément, la vitesse  $f$  est le principal facteur qui affecte  $Mr1$ , avec une contribution d'environ 70%. Ensuite, la vitesse  $V_c$  contribue d'environ 20%. Par conséquent, la contribution combinée de ces deux paramètres ( $f + V_c$ ) est d'environ de 90%. La profondeur de coupe ( $ap$ ) a également une influence significative, bien que sa contribution soit faible

(4.70%). En revanche, les paramètres de la géométrie de l'outil de coupe ( $r_\varepsilon + X_r$ ), n'ont aucun impact sur la variation de  $Mr2$ .

**Tableau 3.5-** Analyse de la variance de paramètre  $Mr2$ .

Source	DL	SC	MC	F	P	Cont. %	Remarques
Modèle	5	149.387	29.877	41.64	<0.0001	95.42	Signifiant
$V_c$	1	3.429	30.429	42.41	<0.0001	19.44	Signifiant
$f$	1	109.142	109.142	152.12	<0.0001	69.71	Signifiant
$ap$	1	7.351	7.351	10.25	0.009	4.70	Signifiant
$r_\varepsilon$	1	1.172	1.172	1.63	0.230	0.75	Signifiant
$X_r$	1	1.294	1.294	1.80	0.209	0.83	Signifiant
Erreur	10	7.175	0.717			4.58	
Total	15	156.562				100.00	

### 3.2.2- Analyse de régression

L'analyse de régression est une technique utilisée pour étudier la relation fonctionnelle entre une variable dépendante ( $R_{pk}$  ou  $R_k$  ou  $R_{vk}$  ou  $Mr1$  ou  $Mr2$ ) et les variables indépendantes ( $V_c$ ,  $f$ ,  $ap$ ,  $r_\varepsilon$  et  $X_r$ ). À partir des résultats expérimentaux, une régression linéaire est utilisée pour déterminer la relation entre les conditions de coupe et les cinq paramètres de la courbe de portance. Dans cette approche, le coefficient de détermination multiple  $R^2$  est utilisé pour mesurer la proportion de variation des points de données. Si la valeur de  $R^2$  est très proche de +1 (100%), cela indique que l'équation de régression est significative et bien ajustée aux données.

L'équation (3.1) fournit le modèle mathématique de régression linéaire pour la hauteur des pics saillants, notée  $R_{pk}$ .

$$R_{pk} = 1.789 - 0.00547V_c + 16.38f - 0.5a_p - 0.206r_\varepsilon + 0.02592X_r \quad (3.1)$$

$$(R_{R_{pk}}^2 = 95.50\%)$$

L'équation (3.2) présente le modèle de forme linéaire utilisé pour la régression de la profondeur de rugosité du cœur, notée  $R_k$ .

$$R_k = 6.15 - 0.01825V_c + 12.42f - 7.52a_p + 3.45r_\varepsilon + 0.0717X_r \quad (3.2)$$

$$(R_{R_k}^2 = 95.96\%)$$

L'équation (3.3) exprime la relation linéaire utilisée pour décrire le modèle de la profondeur des creux profonds, notée  $R_{vk}$ .

$$R_{vk} = 5.099 - 0.010138V_c - 5.87f - 4.033a_p + 1.822r_\varepsilon + 0.01729X_r \quad (3.3)$$

$$(R_{R_{vk}}^2 = 96.45\%)$$

L'équation (3.4) établit la forme linéaire utilisée pour le modèle de la position limite supérieure du profil de noyau de rugosité, noté  $Mr1$ .

$$Mr1 = 7.03 + 0.01401V_c + 42.22f - 18.89a_p - 9.63r_\varepsilon + 0.1019X_r \quad (3.4)$$

$$(R_{Mr1}^2 = 95.23\%)$$

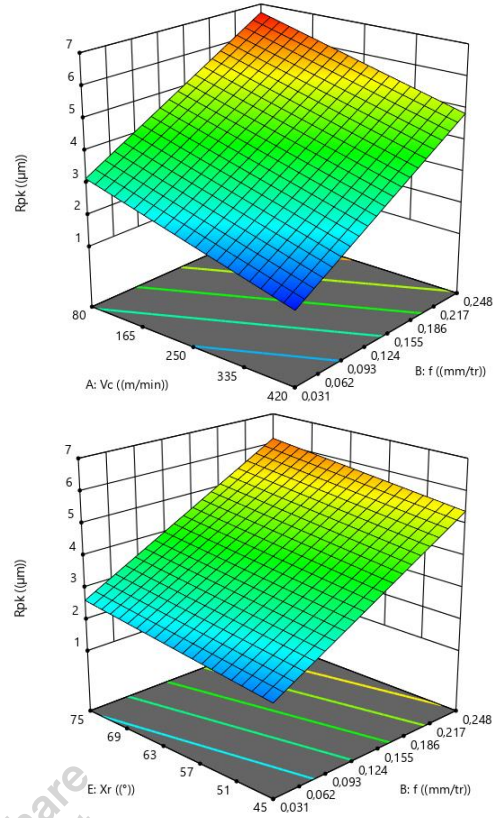
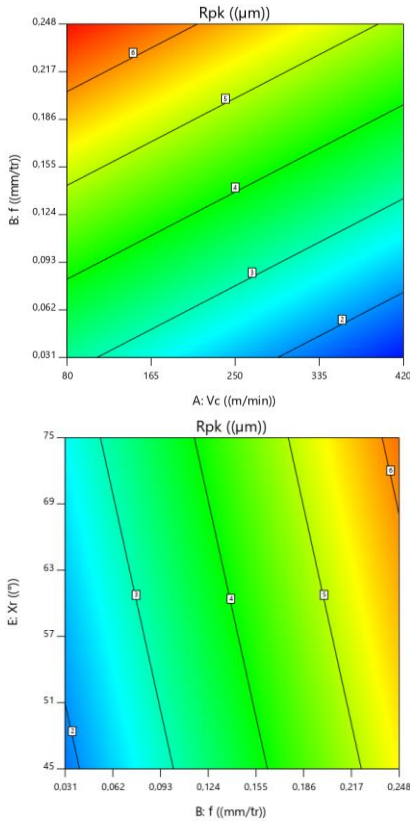
L'équation (3.5) définit la forme linéaire utilisée pour le modèle de la position limite inférieure du profil de noyau de rugosité, noté  $Mr2$ .

$$Mr2 = 86.41 + 0.01108V_c + 31.43f + 6.06a_p - 1.35r_\varepsilon - 0.019X_r \quad (3.5)$$

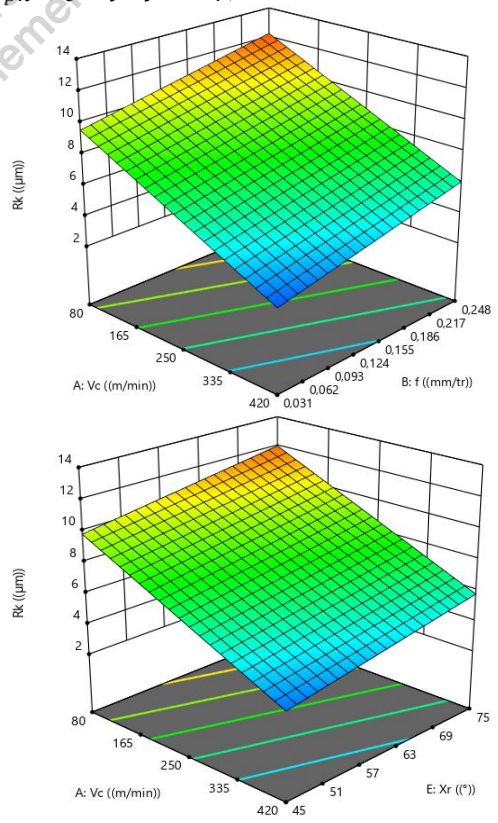
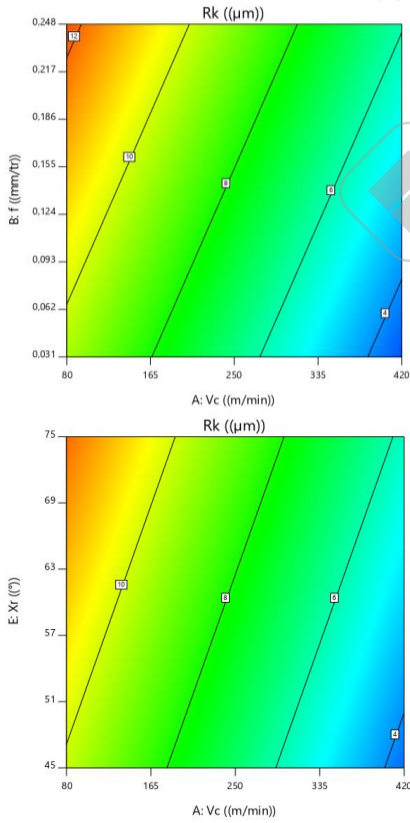
$$(R_{Mr2}^2 = 95.42\%)$$

### 3.2.3- Surface de réponse 3D

Les figures 3.1-3.3 présentent les surfaces de réponse en 2D et 3D pour cinq variables dépendantes ( $R_{pk}$ ,  $R_k$ ,  $R_{vk}$ ,  $Mr1$  et  $Mr2$ ) en fonction des interactions de cinq variables opératoires ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ,  $r_\varepsilon$  et  $X_r$ ). Ces interactions représentent les impacts les plus importants identifiés par l'analyse de variance (ANOVA) des tableaux précédents. Les interactions suivantes sont possibles : pour  $R_{pk}$  ( $V_c \times f$  et  $f \times X_r$ , figure 3.1(a)), pour  $R_k$  ( $V_c \times f$ ,  $V_c \times X_r$ , figure 3.1(b)), pour  $R_{vk}$  ( $V_c \times f$  et  $V_c \times X_r$ , figure 3.2), pour  $Mr1$  ( $f \times a_p$  et  $f \times r_\varepsilon$ , figure 3.3(a)) et pour  $Mr2$  ( $V_c \times f$  et  $f \times a_p$ , figure 3.3(b)). Par ailleurs, le facteur de contrôle non représenté est maintenu constant au niveau 2, c'est-à-dire  $V_c = 185 \text{ m/min}$ ,  $f = 0.062 \text{ mm/tr}$ ,  $a_p = 0.2 \text{ mm}$ ,  $r_\varepsilon = 0.8 \text{ mm}$  et  $X_r = 75^\circ$ .

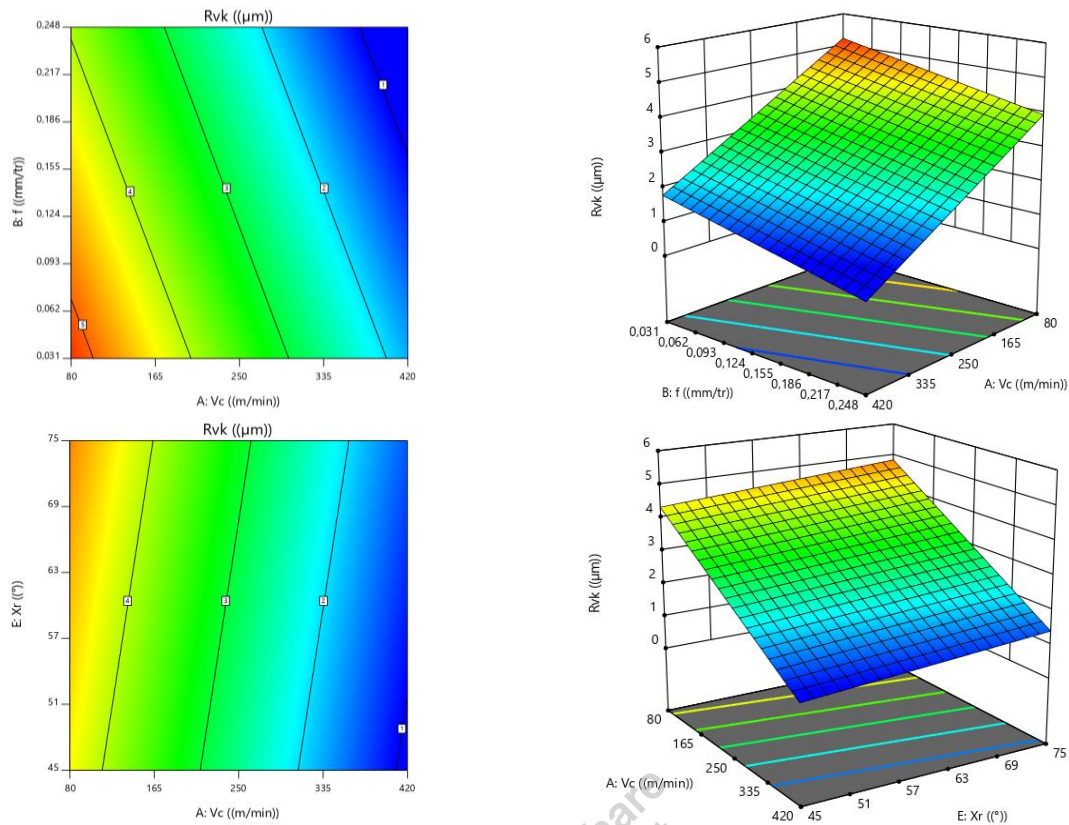


(a) Paramètre  $R_{pk}$  ( $V_c \times f$ ,  $f \times X_r$ )



(b) Paramètre  $R_k$  ( $V_c \times f$ ,  $V_c \times X_r$ )

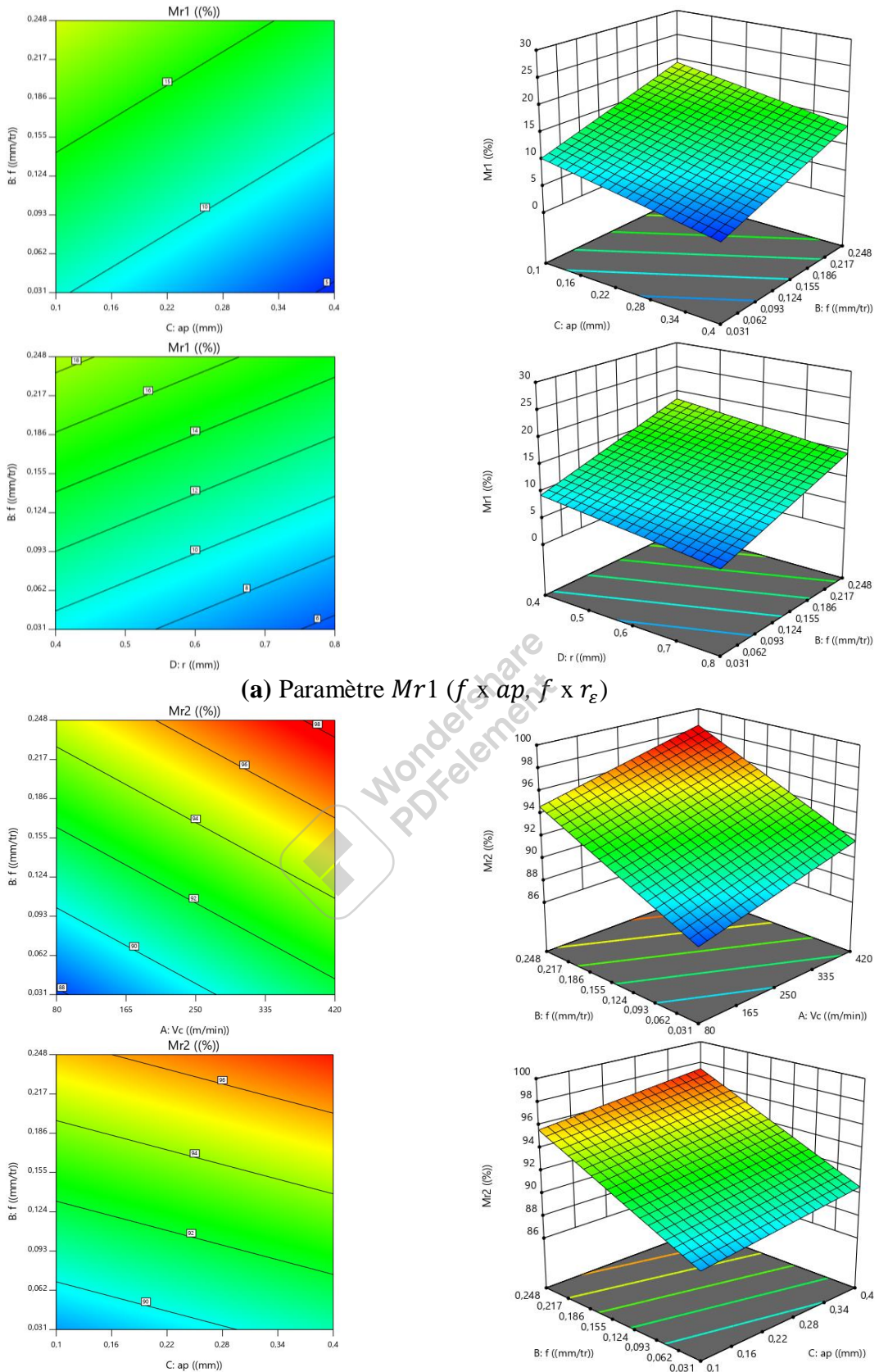
Figure 3.1- Surface de réponse en 2D et 3D des paramètres  $R_{pk}$  et  $R_k$  pour les interactions les plus importantes.



**Figure 3.2-** Surface de réponse en 2D et 3D de paramètre  $R_{vk}$  pour les interactions les plus importantes.

D'après la figure 3.1(a), la vitesse d'avance ( $f$ ) a une pente plus élevée que les deux autres facteurs de contrôle ( $V_c$  et  $X_r$ ), ce qui indique que la vitesse  $f$  est le premier facteur qui influence la hauteur des pics saillants ( $R_{pk}$ ). Le deuxième paramètre important est la vitesse de coupe ( $V_c$ ), suivi de l'angle de coupe principal ( $X_r$ ). On observe la même tendance pour la profondeur de rugosité du cœur ( $R_k$ ), où  $V_c$  en premier, suivi de  $f$  en deuxième position, et  $X_r$  en troisième position (figure 3.2(b)).

Les deux premières variables indépendantes ( $V_c$  et  $f$ ) ont également un effet sur la profondeur des creux profonds ( $R_{vk}$ ). La différence par rapport au paramètre  $R_k$  réside dans la troisième variable, où le rayon du bec ( $r_\epsilon$ ) influence  $R_{vk}$  (voir figure 3.2). En ce qui concerne la position limite supérieure du profil de noyau de rugosité ( $Mr1$ ), tous les facteurs sont significatifs, mais le plus important est la vitesse d'avance ( $f$ ) en raison de sa pente plus élevée, suivi par  $ap$  et  $r_\epsilon$ . La dernière réponse ( $Mr2$ ) est influencée par les mêmes paramètres d'entrée qui influencent la variable dépendante  $R_{vk}$ , mais avec un classement différent des deux premiers facteurs, à savoir  $f$  et  $V_c$ .



(a) Paramètre  $Mr1$  ( $f \times ap, f \times r_{\epsilon}$ )

(b) Paramètre  $Mr2$  ( $V_c \times f, f \times ap$ )

**Figure 3.3-** Surface de réponse en 2D et 3D des paramètres  $Mr1$  et  $Mr2$  pour les interactions les plus importantes.

### 3.2.4- Comparaison entre les résultats expérimentales et prédites par RSM

Les figures 3.4 et 3.5 présentent une comparaison entre les résultats expérimentales (représentés par des points bleus) et les prédictions des cinq modèles mathématiques (représentées par une courbe de tendance linéaire rouge) pour les réponses  $R_{pk}$ ,  $R_k$ ,  $R_{vk}$ ,  $Mr1$  et  $Mr2$ . La grande majorité des points bleus se superposent à la courbe de tendance, à l'exception de quelques points légèrement éloignés. Les coefficients de détermination ( $R^2$ ) pour les paramètres de la courbe d'Abbott-Firestone ( $R_{pk}$ ,  $R_k$ ,  $R_{vk}$ ,  $Mr1$  et  $Mr2$ ) sont respectivement de 0.955, 0.959, 0.964, 0.952 et 0.954. De plus, les erreurs moyennes absolues en pourcentage (MAPE) sont de 8.48%, 6.86%, 5.75%, 8.3% et 0.45% respectivement. Tous les coefficients  $R^2$  dépassent le seuil de confiance de 0.95, et toutes les valeurs MAPE sont inférieures à 10%. Par conséquent, ces cinq modèles de courbe du taux de portance sont efficaces et précis pour estimer d'autres valeurs.



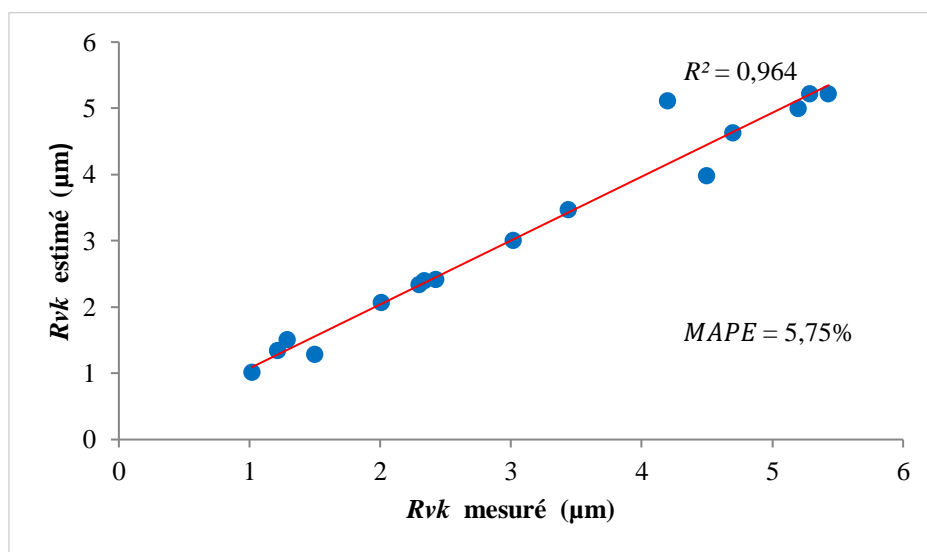
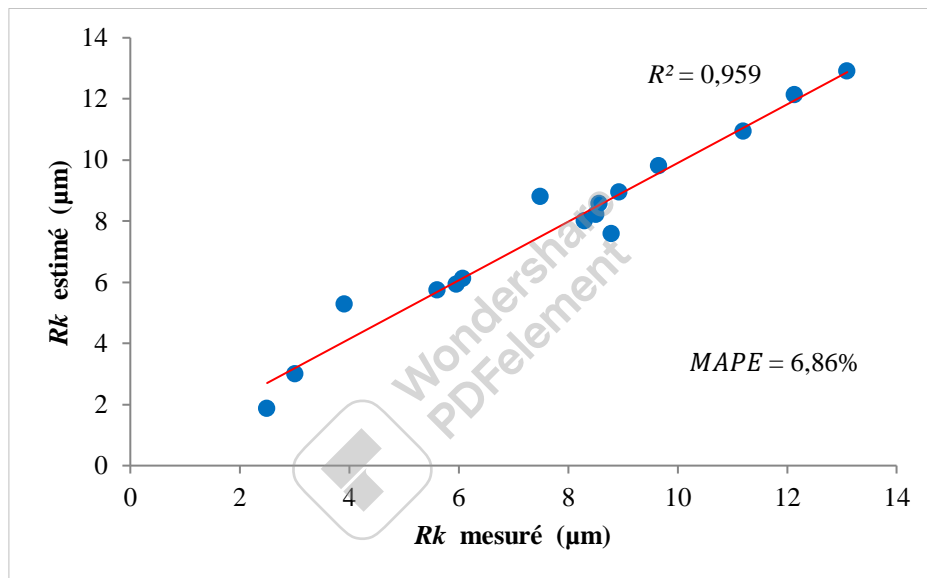
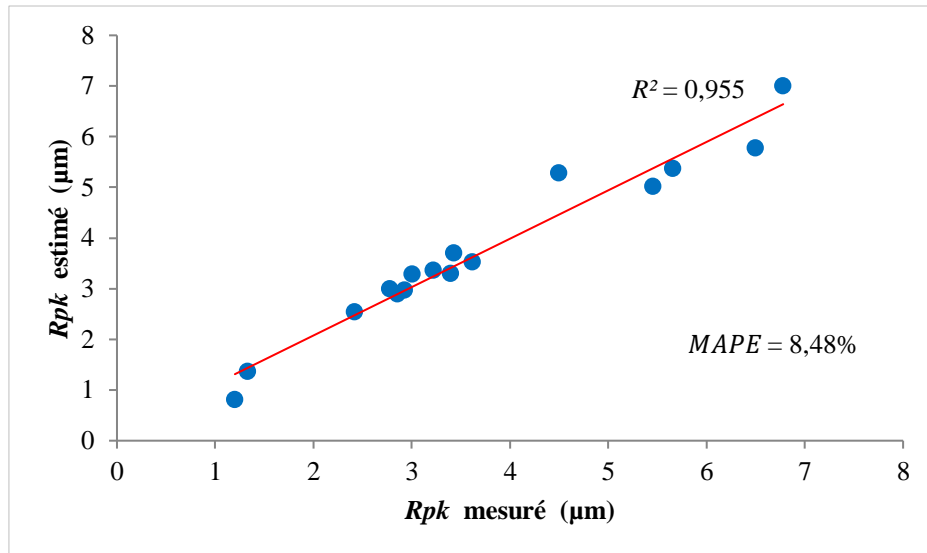
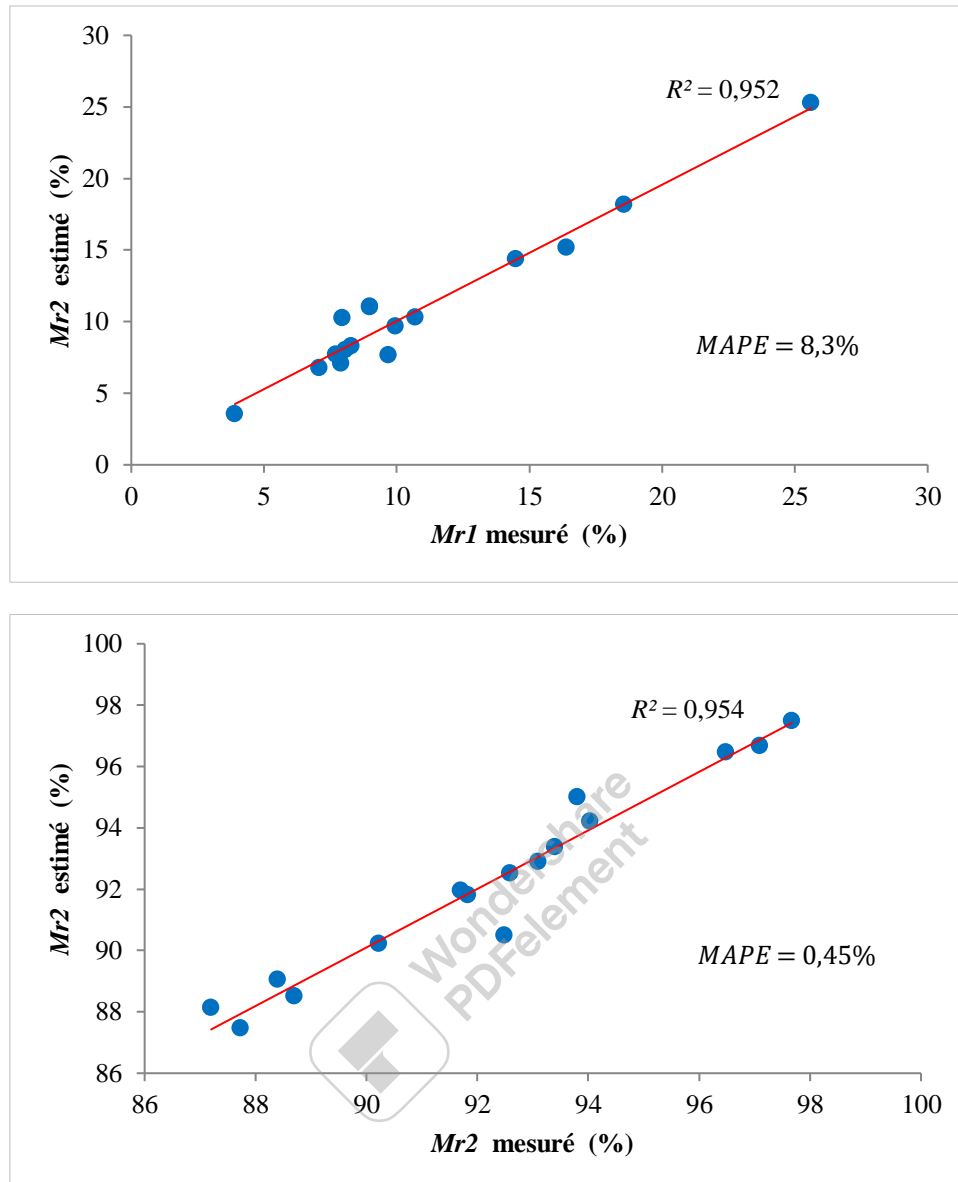


Figure 3.4- Comparaison des résultats expérimentaux et prédites des réponses  $R_{pK}$ ,  $R_k$  et  $R_{vk}$ .

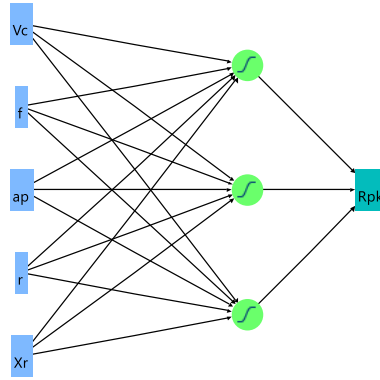




**Figure 3.5-** Comparaison des résultats expérimentales et prédites des réponses  $Mr1$  et  $Mr2$ .

### 3.3- Modélisation par le réseau de neurones artificiels (ANN)

Dans cette étape, plusieurs structures de la couche cachée ont été testées pour chaque paramètre de sortie, la structure ayant donnée les meilleurs résultats a été choisie où la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) tend vers 0 et la valeur de coefficient de détermination ( $R^2$ ) supérieure à 0,95 (95%). L'architecture neurale optimale pour les cinq paramètres de sortie  $R_{pk}$ ,  $R_k$ ,  $R_{vk}$ ,  $Mr1$  et  $Mr2$  est 5–3–1 (figure 3.6). Cette structure est composée d'une couche d'entrée à 5 nœuds (au nombre de paramètres d'entrée), une seule couche cachée à 3 nœuds ayant une fonction d'activation tangente hyperbolique et une couche de sortie à 1 nœud ayant une fonction de transfert linéaire.



**Figure 3.6-** Structure de ANN des modèles :  $R_{pk}$ ,  $R_k$ ,  $R_{vk}$ ,  $Mr1$  et  $Mr2$ .

L'équation 3.6 représente le modèle mathématique de la couche cachée (de  $H_1$  à  $H_3$ ) pour la hauteur des pics saillants ( $R_{pk}$ ).

$$R_{pK} = -1.48623H_1 + 2.92113H_2 + 0.00293H_3 + 0.00293 \quad (3.6)$$

$$(R_{R_{pk}}^2 = 99.61\%)$$

Où :

$$\begin{cases} H_1 = \tanh(0.5(0.00528V_c - 3.9429f + 0.9948ap + 3.3897r_\varepsilon - 0.043156X_r - 0.92282)) \\ H_2 = \tanh(0.5(-0.00176V_c + 12.25776f + 0.19739ap + 2.10571r_\varepsilon - 0.00368X_r - 2.24196)) \\ H_3 = \tanh(0.5(-0.00527V_c - 0.34385f + 13.16679ap + 1.53142r_\varepsilon + 0.10615X_r - 8.44881)) \end{cases}$$

L'équation 3.7 représente le modèle mathématique de la couche cachée (de  $H_1$  à  $H_3$ ) pour la profondeur de rugosité du cœur ( $R_k$ ).

$$R_k = -24.44316H_1 + 13.36771H_2 + 3.180709H_3 + 7.98446 \quad (3.7)$$

$$(R_{R_k}^2 = 98.75\%)$$

Où :

$$\begin{cases} H_1 = \tanh(0.5(0.00092V_c - 0.69569f + 0.37435ap - 0.19925r_\varepsilon + 0.00348X_r + 0.10136)) \\ H_2 = \tanh(0.5(-0.00090V_c + 0.68718f - 0.42732ap + 0.19311r_\varepsilon + 0.00336X_r - 0.07989)) \\ H_3 = \tanh(0.5(-0.00027V_c + 0.19392f - 0.11082ap + 0.06201r_\varepsilon + 0.00100X_r - 0.02821)) \end{cases}$$

L'équation 3.8 représente le modèle mathématique de la couche cachée (de  $H_1$  à  $H_3$ ) pour la profondeur des creux profonds ( $R_{vk}$ ).

$$R_{vk} = 0.81232H_1 + 0.26582H_2 - 1.56723H_3 + 2.71484 \quad (3.8)$$

$$(R_{R_{vk}}^2 = 98.14\%)$$

Où :

$$\begin{cases} H_1 = \tanh(0.5(-0.00803V_c + 6.64833f - 0.15023ap + 2.99090r_\varepsilon + 0.03585X_r - 0.36829)) \\ H_2 = \tanh(0.5(-0.01500V_c - 25.47650f - 4.81179ap - 7.64863r_\varepsilon + 0.09738X_r + 7.90124)) \\ H_3 = \tanh(0.5(0.01519V_c + 4.89236f + 7.72906ap - 2.89443r_\varepsilon - 0.00412X_r - 4.39111)) \end{cases}$$

L'équation 3.9 représente le modèle mathématique de la couche cachée (de  $H_1$  à  $H_3$ ) pour la limite supérieure du noyau de rugosité  $Mr1$  (%).

$$Mr1 = -8.67812H_1 + 2.92194H_2 + 2.23562H_3 + 14.79801 \quad (3.9)$$

$$(R_{Mr1}^2 = 99.19\%)$$

Où :

$$\begin{cases} H1 = \tanh(0.5(-0.00367V_c - 10.23136f + 4.19813ap + 3.34453r_\varepsilon + 0.00218X_r + 0.07237)) \\ H2 = \tanh(0.5(0.00198V_c + 0.14216f - 1.99192ap - 0.89739r_\varepsilon + 0.03877X_r - 1.74029)) \\ H3 = \tanh(0.5(-0.00048V_c + 7.19807f - 0.47686ap + 0.27952r_\varepsilon + 0.04008X_r - 3.05427)) \end{cases}$$

L'équation 3.10 représente le modèle mathématique de la couche cachée (de  $H_1$  à  $H_3$ ) pour la limite inférieure du noyau de rugosité  $Mr2$  (%).

$$Mr2 = -0.65167H_1 - 3.11981H_2 - 2.05727H_3 + 92.20614 \quad (3.10)$$

$$(R_{Mr2}^2 = 99.65\%)$$

Où :

$$\begin{cases} H1 = \tanh(0.5(-0.01019V_c + 9.99628f - 0.82932ap + 5.65898r_\varepsilon + 0.09290X_r - 7.95095)) \\ H2 = \tanh(0.5(-0.00241V_c - 30.38051f - 3.13297ap - 5.63293r_\varepsilon - 0.01444X_r + 9.15050)) \\ H3 = \tanh(0.5(-0.01387V_c - 21.88219f - 12.49567ap + 7.84277r_\varepsilon + 0.01482X_r + 3.47868)) \end{cases}$$

### 3.3.1- Comparaison entre les résultats expérimentales et prédites par ANN

Les figures 3.7 et 3.8 illustrent la comparaison entre les valeurs expérimentales et les prédictions des cinq modèles mathématiques ANN. Les points rouges du nuage de points représentent les 16 résultats expérimentaux, tandis que la courbe de tendance bleue représente les valeurs estimées par les équations (3.6-3.10). Dans toutes les figures, 15 points se superposent parfaitement à la ligne de tendance linéaire, tandis qu'un seul point est légèrement éloigné. De plus, les coefficients de détermination ( $R^2$ ) pour les paramètres  $R_{pk}$ ,  $R_k$ ,  $R_{vk}$ ,  $Mr1$  et  $Mr2$  sont respectivement de 0.969, 0.969, 0.99, 0.993 et 0.975. Les erreurs moyennes absolues en pourcentage (MAPE) sont respectivement de 4.43%, 4.68%, 4.7%, 3.4% et 0.34%. A cet égard, tous les coefficients  $R^2$  dépassent le niveau de confiance de 0.95 et sont proches de 1, tandis que toutes les erreurs MAPE sont inférieures à 5%. En conséquence, les cinq modèles ANN sont hautement précis et sont capables de prédire facilement de nouvelles valeurs pour les paramètres de la courbe du taux de portance.

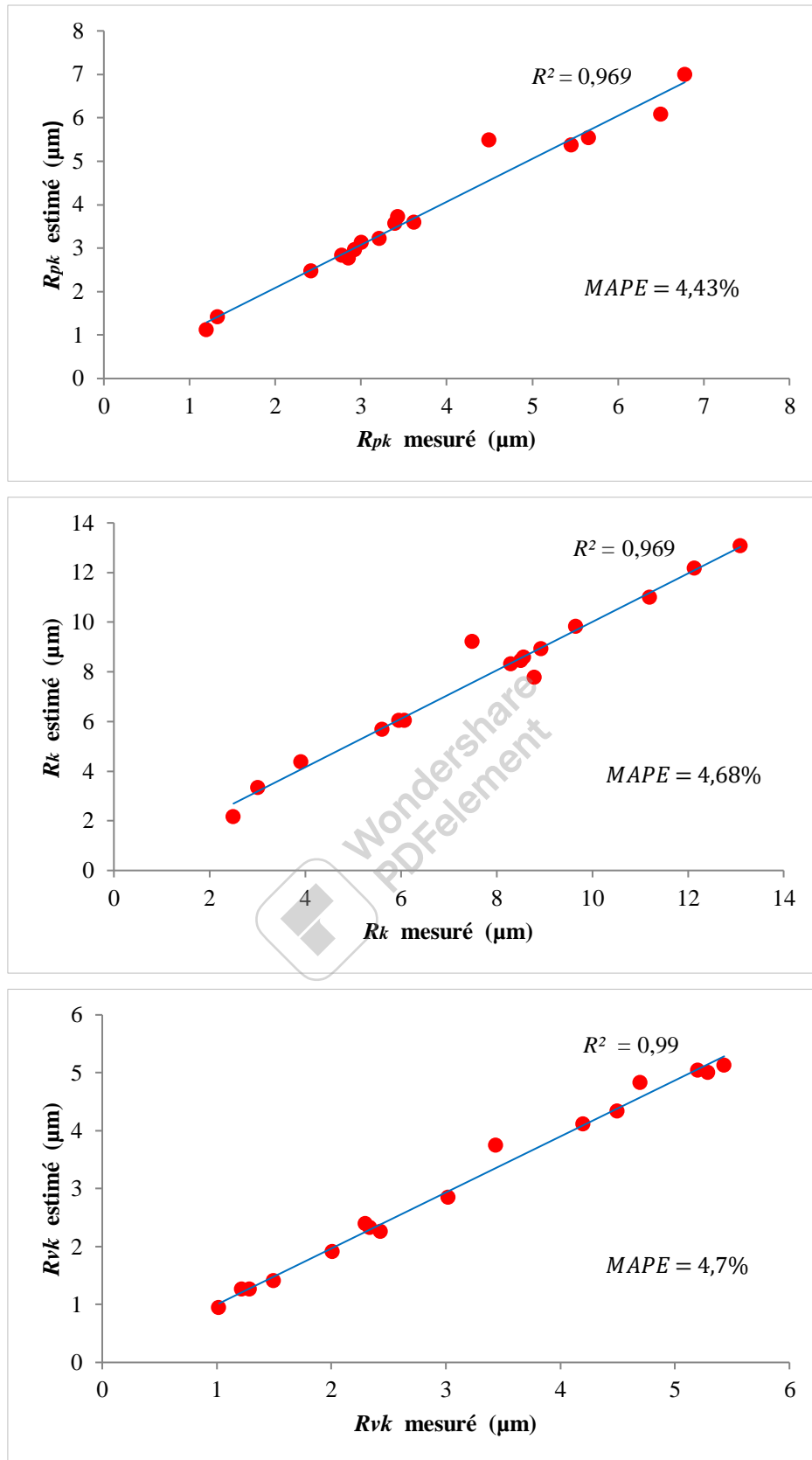
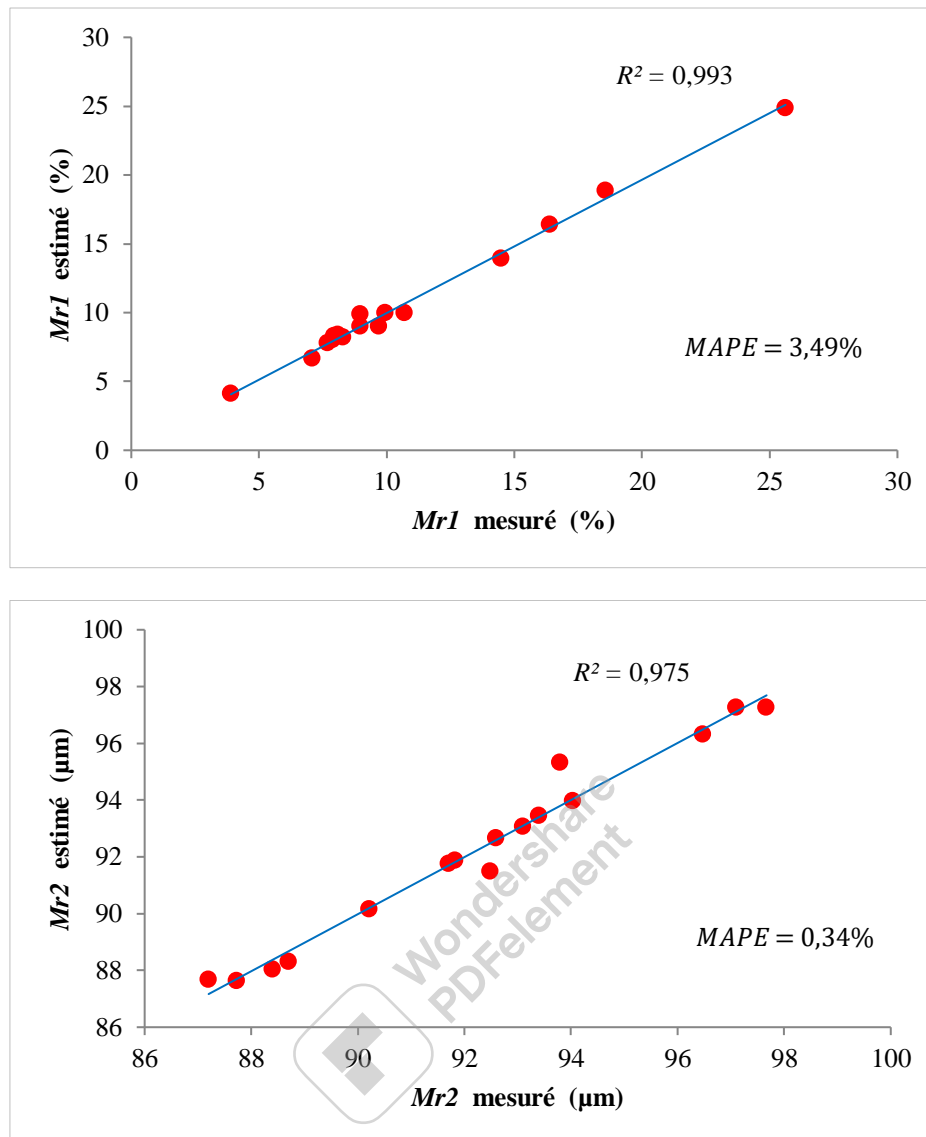


Figure 3.7- Comparaison des résultats expérimentales et prédites des réponses  $R_{pK}$ ,  $R_k$  et

$R_{vk}$ .



**Figure 3.8-** Comparaison des résultats expérimentales et prédites des réponses  $Mr1$  et  $Mr2$ .

### 3.4- Validation expérimentale

La validation expérimentale des modèles mathématiques est une étape cruciale pour tester et évaluer les modèles ANN ou RSM. Elle implique de comparer les prédictions du modèle avec les valeurs réelles obtenues lors d'expériences. Dans ce but, nous avons réalisé trois essais supplémentaires en utilisant des conditions de coupe différentes de celles du tableau 2.6. Par ailleurs, l'erreur absolue en pourcentage (APE) a été calculé pour quantifier l'écart entre les mesures et les prédictions.

Le tableau 3.6 représente les valeurs mesurées, les valeurs estimées par les modèles RSM, les valeurs estimées par les modèles ANN et les APEs pour les cinq variables de sortie ( $F_Z$ ,  $P_C$ ,  $E_C$ ,  $MRR$  et  $E_{CS}$ ). Les valeurs d'erreur absolue de prédiction (APE) : pour la hauteur des pics

saillants ( $R_{pk}$ ) : 5,36% et 7,57% pour RSM, 0,43% et 4,50% pour ANN, pour la profondeur de rugosité du cœur ( $R_k$ ) : 0,64% et 5,87% pour RSM, 1,30% et 3,79% pour ANN, pour la profondeur des creux profonds ( $R_{vk}$ ) : 1,26% et 7,69% pour RSM, 3,45% et 4,08% pour ANN, pour la limite supérieure du noyau de rugosité  $Mr1$  (%) : 3,52% et 7,65% pour RSM, 0,35% et 5,23% pour ANN, enfin, pour la limite inférieure du noyau de rugosité  $Mr2$  (%) : 0,01% et 0,44% pour RSM, 1,30% et 3,79% pour ANN.

. La valeur maximale de l'APE des cinq réponses est de 7,69% pour RSM et 5,23% pour ANN, ce qui montre une faible différence entre les valeurs mesurées et prédites. Ces résultats indiquent que les modèles sont fiables pour estimer de nouveaux résultats dans la plage de variation des conditions de coupe présentées dans le tableau 2.6, puisque les résultats expérimentaux concordent avec les prédictions du modèle. A cet égard, les modèles ANN sont plus efficaces et plus précises que les modèles RSM.

**Tableau 3.6-** Résultats des essais de validation expérimentale.

N°	Paramètres d'entrée					Résultats et erreurs				
	$V_c$ (m/min)	$f$ (mm/tr)	$ap$ (mm)	$r_\epsilon$ (mm)	$X_r$ (°)	Expé	RSM	APE (%)	ANN	APE (%)
(a) Hauteur des pics saillants ( $R_{pk}$ )										
1	125	0,041	0,16	0,4	45	4,69	4,36	7,57	4,67	0,43
2	275	0,082	0,28	0,8	75	1,06	1,12	5,36	1,11	4,50
3	420	0,049	0,16	0,8	75	1,37	1,28	7,03	1,42	3,52
(b) Profondeur de rugosité du cœur ( $R_k$ )										
1	125	0,041	0,16	0,4	45	7,4	6,99	5,87	7,13	3,79
2	275	0,082	0,28	0,8	75	4,67	4,7	0,64	4,61	1,30
3	420	0,049	0,16	0,8	75	4,2	4,33	3,00	4,27	1,64
(c) Profondeur des creux profonds ( $R_{vk}$ )										
1	125	0,041	0,16	0,4	45	0,6	0,65	7,69	0,58	3,45
2	275	0,082	0,28	0,8	75	1,61	1,59	1,26	1,55	3,87
3	420	0,049	0,16	0,8	75	1,02	1	2,00	0,98	4,08
(d) Limite supérieure du noyau de rugosité $Mr1$ (%)										
1	125	0,041	0,16	0,4	45	14,39	13,75	4,65	14,98	3,94
2	275	0,082	0,28	0,8	75	7,24	7,84	7,65	6,88	5,23
3	420	0,049	0,16	0,8	75	8,54	8,25	3,52	8,57	0,35

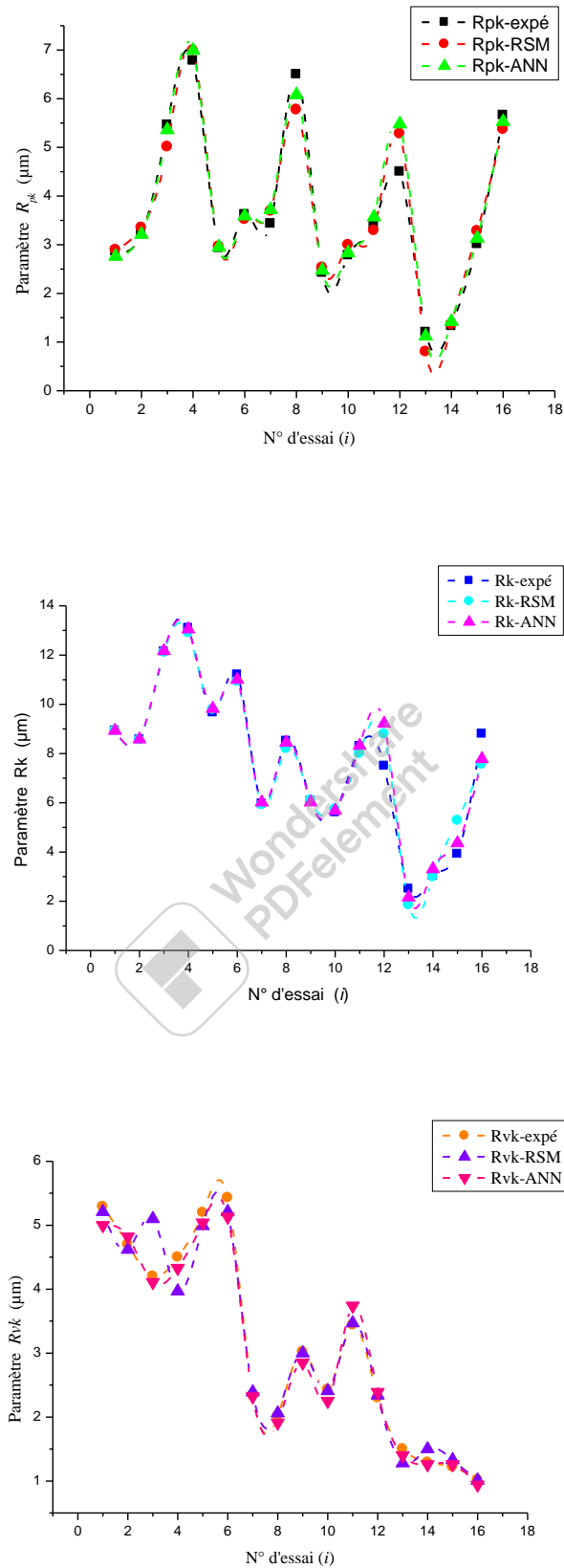
(e) Limite inférieure du noyau de rugosité $Mr2$ (%)										
1	125	0,041	0,16	0,4	45	95,69	95,27	0,44	95,86	0,18
2	275	0,082	0,28	0,8	75	88,81	88,82	0,01	88,75	0,07
3	420	0,049	0,16	0,8	75	90,42	90,4	0,02	90,46	0,04

### 3.5- Comparaison entre les résultats expérimentales et prédites par RSM et ANN

Afin d'évaluer la précision, l'efficacité et la capacité de prédiction des deux principales méthodes de modélisation mathématique (ANN et RSM) couramment utilisées dans le domaine de l'usinage par enlèvement de matière, nous avons comparé les résultats obtenus par les deux modèles avec les valeurs expérimentales. Les coefficients de détermination ( $R^2$ ) du modèle ANN se révèlent supérieurs à ceux du modèle RSM, comme illustré dans le tableau 3.6. Les valeurs élevées de  $R^2$  pour le modèle ANN, se rapprochant de 1 (0,9999), démontrent la fiabilité de cette technique. Pour une analyse plus approfondie, nous avons tracé les résultats expérimentaux et numériques sous forme de courbes (voir figures 3.9 et 3.10). Il est remarquable que les valeurs estimées par le modèle ANN coïncident parfaitement avec les valeurs expérimentales, tandis que le modèle RSM présente une légère divergence. Ainsi, la méthode de modélisation ANN se révèle plus efficace et précise que la méthode RSM. Dans les travaux de Zerti et al. [42, 43], les deux méthodes (ANN et RSM) ont été utilisées pour estimer les paramètres de sortie ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_t$ ,  $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ) lors du tournage de l'acier inoxydable martensitique (AISI 420, 59HRC et plaquette CC6050). Les résultats ont été comparés avec les valeurs expérimentales, et les auteurs ont constaté que le modèle ANN était toujours plus précis que le modèle RSM.

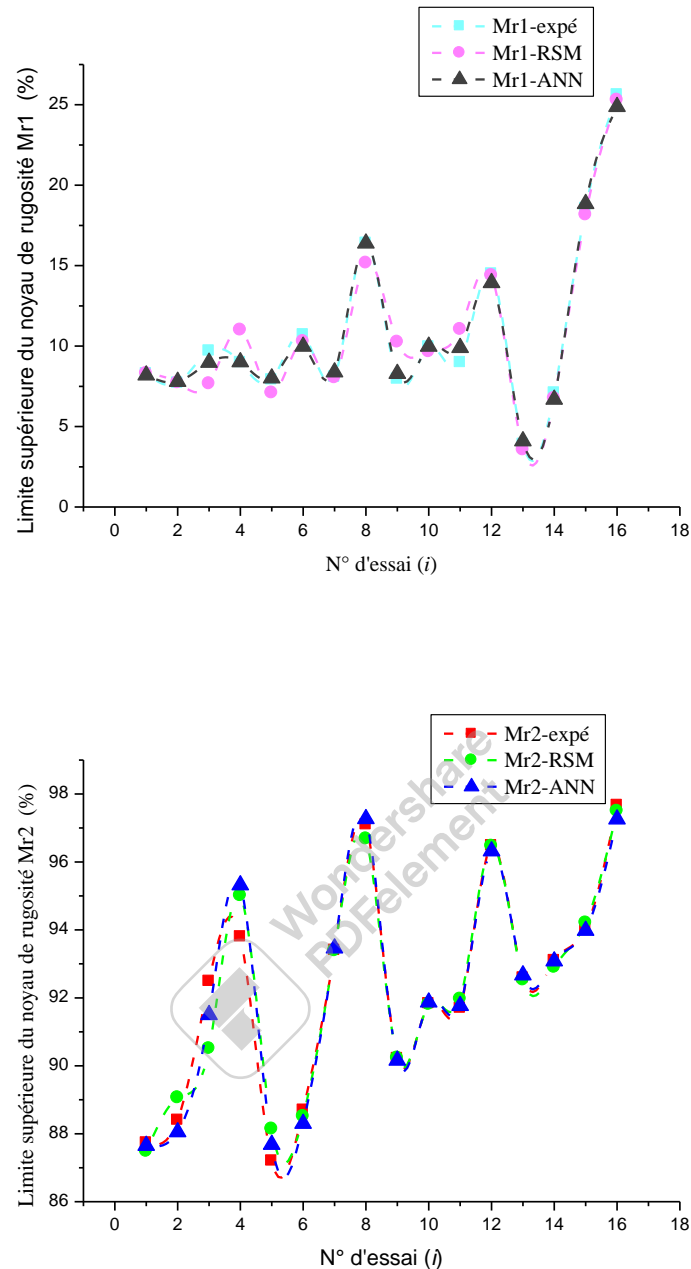
**Tableau 3.7-**  $R^2$  pour les modèles obtenus par RSM et ANN.

	Coefficient de détermination $R^2$ en %	
	RSM	ANN
Hauteur des pics saillants ( $R_{pk}$ )	95,50	99,61
Profondeur de rugosité du cœur ( $R_k$ )	95,96	98,75
Profondeur des creux profonds ( $R_{vk}$ )	96,45	98,14
Limite supérieure du noyau de rugosité $Mr1$ (%)	95,23	99,19
Limite inférieure du noyau de rugosité $Mr2$ (%)	95,42	99,65



**Figure 3.9-** Comparaison entre les résultats expérimentaux et prédites par RSM et ANN des paramètres de sortie  $R_{pK}$ ,  $R_k$  et  $R_{vK}$ .





**Figure 3.10-** Comparaison entre les résultats expérimentales et prédites par RSM et ANN des variables dépendantes  $Mr1$  et  $Mr2$ .

### 3.6- Conclusion

Des expériences ont été réalisées à l'aide du plan de Taguchi  $L_{16}$  dans le but d'identifier les facteurs et les interactions ayant un impact statistiquement significatif sur les paramètres de la courbe d'Abbott Firestone ( $R_{pk}$ ,  $R_k$ ,  $R_{vk}$ ,  $Mr1$  et  $Mr2$ ). Pour cela, une analyse statistique de la variance (ANOVA) a été utilisée. Les résultats indiquent clairement que la vitesse d'avance

(f) a un effet significatif sur les paramètres de BAC, suivi de près par la vitesse de coupe ( $V_c$ ). De plus, les valeurs estimées sont très proches des valeurs mesurées, et les coefficients de détermination ( $R^2$ ) obtenus à l'aide de la méthode ANN sont plus élevés que ceux obtenus avec la méthode RSM. En fait, les valeurs de  $R^2$  obtenues avec les modèles ANN sont presque égales à 1. Par conséquent, la modélisation par ANN se révèle être une méthode plus efficace et précise que la méthode RSM.



## Conclusion générale

Notre travail propose une nouvelle approche pour modéliser les paramètres de la courbe du taux de longueur de portance ( $R_{pk}$ ,  $R_k$ ,  $R_{vk}$ ,  $Mr1$  et  $Mr2$ ) lors du tournage à sec d'acier C45 en utilisant un réseau de neurones artificiels (ANN) et la méthode de surface de réponse (RSM). Les résultats de notre recherche sont très encourageants, et les conclusions suivantes peuvent être formulées :

- ❖ L'utilisation de la courbe de portance (BAC) est essentielle pour caractériser la texture fonctionnelle de la surface intérieure des moteurs à combustion interne. Cette courbe est particulièrement utile pour évaluer l'usure de la surface de ces moteurs.
- ❖ La méthode de Taguchi  $L_{16}$ , qui comprend 16 expériences ( $4^3 \times 2^2$ ), a été utilisée avec succès pour réduire le nombre d'expériences par rapport au plan factoriel complet (FFD) qui en compte 256 ( $4^4 \times 2^2$ ) expériences.
- ❖ L'analyse ANOVA de la hauteur des pics saillants ( $R_{pk}$ ) indique que la vitesse d'avance ( $f$ ) est le paramètre le plus significatif, suivi de près par la vitesse de coupe ( $V_c$ ), tandis que l'angle de coupe principal ( $X_r$ ) montre une faible significativité.
- ❖ L'analyse ANOVA de la profondeur de rugosité du cœur ( $R_k$ ) révèle que tous les paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $ap$ ,  $r_\epsilon$  et  $X_r$ ) ont un effet significatif. Cependant, leur importance est classée dans l'ordre suivant :  $V_c$ ,  $X_r$ ,  $f$ ,  $ap$  et  $r_\epsilon$ .
- ❖ L'analyse ANOVA révèle que tous les facteurs ont une influence significative sur la profondeur des creux profonds ( $R_{vk}$ ). Le facteur le plus significatif est la vitesse de coupe ( $V_c$ ), suivi de près par  $ap$ ,  $r_\epsilon$  et enfin  $X_r$ .
- ❖ L'analyse ANOVA démontre que tous les paramètres d'entrée ( $V_c$ ,  $f$ ,  $ap$ ,  $r_\epsilon$  et  $X_r$ ) jouent un rôle essentiel dans la variation de  $Mr1$ . En particulier, la vitesse ( $f$ ) est le facteur le plus influent, suivi par  $ap$ ,  $r_\epsilon$ ,  $V_c$  et  $X_r$ .
- ❖ La variation de  $Mr2$  est influencée par les paramètres classiques de coupe, à savoir  $V_c$ ,  $f$  et  $ap$ . En revanche, les paramètres de la géométrie de l'outil de coupe ( $r_\epsilon$  et  $X_r$ ) n'ont aucun impact sur cette réponse.
- ❖ La comparaison entre les résultats expérimentaux et les estimations des modèles RSM et ANN démontre clairement que les modèles basés sur les réseaux de neurones artificiels donnent d'excellents résultats ( $R_{R_{pk}}^2 = 99.61\%$ ,  $R_{R_k}^2 = 98.75\%$ ,  $R_{R_{vk}}^2 = 98.14\%$ ,  $R_{Mr1}^2 = 99.19\%$  et  $R_{Mr2}^2 = 99.65\%$ ) par rapport aux modèles basés sur la

méthodologie de surface de réponse ( $R_{R_{pk}}^2 = 95.50\%$ ,  $R_{R_k}^2 = 95.96\%$ ,  $R_{R_{vk}}^2 = 96.45\%$ ,  $R_{Mr1}^2 = 95.23\%$  et  $R_{Mr2}^2 = 95.42\%$ ).

- ❏ Les modèles mathématiques que nous avons trouvés revêtent une grande importance dans les domaines de la mécanique et de l'industrie, car ils permettent de réaliser des prédictions.
- ❏ Dans les futures recherches, nous suggérons de se concentrer sur l'effet d'autres conditions de coupe sur les paramètres fonctionnels tels que  $R_{pk}$ ,  $R_k$ ,  $R_{vk}$ ,  $Mr1$  et  $Mr2$ . Quelques exemples de ces conditions incluent les propriétés du matériau de la pièce, la lubrification (comme la lubrification par quantité minimale (MQL), le refroidissement à haute pression (HPC), le refroidissement cryogénique, les nanofluides, etc.), ainsi que l'outil de coupe (type d'insert, matériau de l'outil, revêtement, rayon du nez, etc.). Il serait intéressant d'explorer ces aspects pour une compréhension plus approfondie des influences sur les performances de coupe.



## References:

- [1] Youssef, H. A. and H. El-Hofy : Machining Technology, Machine Tools and Operations, Boca Raton, FL: CRC Press Co, 2008.
- [2] Schultz, H : High speed machining. Ann. CIRP 41(2): 1992, 637–643.
- [3] Nurul Amin, A. K. M. and T. L. Ginta : Heat-assisted machining. In: Comprehensive Materials Processing. Advanced Machining Technologies, 11, Amsterdam: Elsevier Ltd., 2014, 297–331.
- [4] Kalpakjian, S . Manufacturing Process for Engineering Materials, Menlo Park, CA: Addison-Wesley, 1997.
- [5] Hou, R., T. Wang, Z. Lv, and Y. Liu. 2018. Experimental study of the ultrasonic vibration assisted abrasive waterjet micromachining the quartz glass. Adv. Mater. Sci. Eng., 2018: 1–9.
- [6] Ahmed, S. and Y. Jamal. Machining of Polymer Composites, Boston, MA, Springer, 2009.
- [7] H.A.G. El-Hofy : Fundamentals of Machining Processes: Conventional and Nonconventional Processes. 978-1-138-33490-8 (Hardback), Taylor & Francis Group, LLC, 2019.
- [8] M. Sivatte-Adroer, X. Llanas-Parra, I. Buj-Corral, J. Vivancos-Calvet: Indirect model for roughness in rough honing processes based on artificial neural networks. Precision Engineering 43, 505–513 (2016).
- [9] M. Sivatte-Adroer, I. Buj-Corral, X. Llanas-Parra: Neural network modelling of Abbott-Firestone roughness parameters in honing processes. Int. J. Surface Science and Engineering, Vol. 11, No. 6, 512–530 (2017).
- [10] G. Krolczyk, P. Raos, S. Legutko: Experimental analysis of surface roughness and surface texture of machined and fused deposition modelled parts. Tehničkivjesnik 21(1), 217-221 (2014).
- [11] H. Strøbæk-Nielsen: New approaches to surface roughness evaluation of special surfaces. Precision Engineering 10, 209–213 (1988).
- [12] W. Grzesik: Influence of surface textures produced by finishing operations on their functional properties. Journal of Machine Engineering, Vol. 16, No. 1, 15–23, 2016.
- [13] A. Hamdi, S. M. Merghache, B. Fernini, T. Aliouane: Influence of polymer contacting rollers on surface texture finish in the belt grinding process. Int J Adv Manuf Technol 113, 1377–1388, (2021).

- [14] R. Kumar, S. Kumar, B. Prakash, A. Sethuramiah: Assessment of engine liner wear from bearing area curves. *Wear* 239, 282–286, (2000).
- [15] P. Pawlus, T. Cieslak, T. Mathia: The study of cylinder liner plateau honing process. *Journal of Materials Processing Technology* 209, 6078–6086, (2009).
- [16] P Pawlus, R Reizer, A Lenart : Comparison of parameters describing stratified surface topography. *Journal of Physics: Conference Series* 483, 1–8, (2014).
- [17] C. Anderberg, P. Pawlus, B.-G. Rosén, T.R. Thomas : Alternative descriptions of roughness for cylinder liner production. *Journal of materials processing technology* 209, 1936–1942, (2009).
- [18] M. Sedlaček, B. Podgornik, J. Vižintin: Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear. *Wear* 266, 482–487, (2009).
- [19] M.Tomov, P. Karolczak, H. Skowronek, P. Cichosz, M. Kuzinovski: Mathematical Modelling of Core Roughness Depth during Hard Turning. In: G.M. Królczyk et al. *Industrial Measurements in Machining*. (Eds.): IMM 2019, LNME, 1–9 (2020).
- [20] [Acier C45 Fiche Technique, Matière 1.0503 Caractéristiques Mécaniques]
- [21] [Cours propriétés des matériaux. M. Benghersallah.2012/2013]
- [22] [DIRECT INUSTRY. TAYLOR HOBSON]
- [23] [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.
- [24] [ZAHIA, HESSAINIA. Etude de l'impact des paramètres affectant la rugosité des surfaces et les efforts de coupe en usinage des pièces traitées thermiquement. Diss. GUELMA, 2014.;]
- [25] DAAS, Mohamed Skander. "Plans d'expériences.
- [26] GoupyJacques : Introduction aux plan d'expérience .Dunod, Paris,pp 303 (2001).
- [27] BOUSSAHA\_SOUFYANE\_Géniecivil..\_Géotechnique.pdf
- [28] Mustapha Rguig. Méthodologie des surfaces de réponse pour l'analyse en fiabilité des plates-formes pétrolières offshore fissurées. *Mécanique [physics.med-ph]*. Université de Nantes Faculté des sciences et des techniques, 2005. Français. ffNNT : ff. fftel-01378337f]
- [29] ][BOUHZEM Oussama, Modélisation et optimisation mono et multi des conditions d'usinage de l'objectif 'acier AISI D3 en utilisant les méthodes RMS, Taguchi et la fonction désirabilité. thèse de master. Université du 8 mai 1945\_Guelma.2019]
- [30] Xometry Europe GmbH,2018-2023

- [31] A. Srivastava, A. Sharma, A. Singh Gaur, R. Kumar, Y. Kumar Modi: Prediction of Surface Roughness for CNC Turning of EN8 Steel Bar Using Artificial Neural Network Model. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*. Vol. 52, No. 2, 185–188 (2019).
- [32] İ. Asiltürk, M. Çunkaş: Modeling and prediction of surface roughness in turning operations using artificial neural network and multiple regression method. *Expert Systems with Applications* 38, 5826–5832 (2011).
- [33] Hamdi, A., Merghache, S.M. Application of artificial neural networks (ANN) and gray relational analysis (GRA) to modeling and optimization of the material ratio curve parameters when turning hard steel. *Int J Adv Manuf Technol* 124, 3657–3670 (2023).



**Résumé :**

Jusqu'à ce jour, le tournage apparaît comme un procédé intéressant en usinage mécanique, il présente un avantage majeur pour usiner les pièces mécaniques de révolution. En outre, la caractérisation de la texture de surface fonctionnelle par la norme ISO 13565 standard occupe une place importante dans la mécanique de précision. Dans ce travail, l'objectif principal est d'étudier l'impact des conditions de coupe du procédé de tournage sur les paramètres de la courbe du taux de portance ( $R_{pk}$ ,  $R_k$ ,  $R_{vk}$ ,  $Mr1$  et  $Mr2$ ). Pour cela, nous avons utilisé un outil de coupe en carbure non-revêtu et le plan d'expérience de Taguchi  $L_{16}$ . L'étude statistique repose sur la méthodologie de surface de réponse (RSM), l'analyse de variance (ANOVA), la régression linéaire et le réseau de neurones artificiels (ANN) afin de modéliser les paramètres de sortie. La question de la précision et de la capacité de prédiction des deux méthodes (ANN et RSM) à été étudié.

**Mots-clés :** tournage, courbe du taux de portance, texture de surface, ANOVA, RSM, ANN.

**ملخص:**

إلى يومنا هذا، يبدو أن الخراطة عملية مثيرة للاهتمام في التصنيع الميكانيكي، هذه تقنية لها ميزة كبيرة في تصنيع الأجزاء الميكانيكية الدائرية. بالإضافة إلى ذلك، يحتل توصيف نسيج السطح الوظيفي وفقاً لمعيار ISO 13565 مكاناً مهماً في ميكانيك الدقة. في هذا العمل، الهدف الرئيسي هو دراسة تأثير ظروف القطع لعملية الخراطة على معالم منحني معدل الرفع ( $R_{pk}$ ,  $R_k$ ,  $R_{vk}$ ,  $Mr1$ ,  $Mr2$ ). لهذا الغرض، استخدمنا أداة قطع كربيد غير مصقولة وخطة التجريبية تاكيشي  $L_{16}$ . تعتمد الدراسة الإحصائية على منهجية سطح الاستجابة (RSM)، تحليل التباين (ANOVA)، الانحدار الخطي والشبكة العصبية الاصطناعية (ANN) لنمذجة معالم المخرجات. تمت دراسة مسألة الدقة والقدرة على النمذجة للطريقتين (RSM و ANN).

**الكلمات المفتاحية:** الخراطة، منحني معدل الرفع، نسيج السطح، أنوفا، RSM، ANN.

**Abstract:**

Until now, turning has been considered an interesting process in mechanical machining, as it offers a major advantage for machining rotational mechanical parts. Additionally, the characterization of functional surface texture according to ISO 13565 standard plays an important role in precision mechanics. In this study, the main objective is to investigate the impact of cutting conditions in the turning process on the parameters of the bearing area curve ( $R_{pk}$ ,  $R_k$ ,  $R_{vk}$ ,  $Mr1$ , and  $Mr2$ ). To achieve this, we used an uncoated carbide cutting tool and the Taguchi  $L_{16}$  experimental design. The statistical analysis relies on the response surface methodology (RSM), analysis of variance (ANOVA), linear regression, and artificial neural networks (ANN) to model the output parameters. The accuracy and prediction capability of both methods (ANN and RSM) have been examined.

**Keywords:** turning, bearing area curve, surface texture, ANOVA, RSM, ANN.