

**Université du 8 mai 1945 – Guelma Faculté des
Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique**



**Mémoire de fin d'étude présenté en vue de l'obtention d'un diplôme
de Master**

Option : **Construction Mécanique**
Présenté par : **OMAR-ABDA Anis**

***Modélisation des paramètres technologiques
d'usinage en tournage dur par des méthodes
statistiques***

=====

Sous la direction de :
Dr. BENSOUILAH Hamza
Pr. YALLESE Mouhamed Athman

Année universitaire **2018/2019**

شكر و عرفان

في البداية أحمد الله سبحانه وتعالى الذي أعطاني القوة والصبر للوصول لهذا المستوى واتيامي لهذا البحث المتواضع.

أتوجه بالشكر و التقدير الخالصين للأساتذة بن صويلح حمزة و يلس محمد عثمان لاشرافهم على هذه المذكرة ، وافادتي بالمعلومات والنصائح.

أود أن أشيد بشكري بعائتي الكريمة وخصوصا والدي ووالدي الكريمن ، دعمهم المستمر طوال سنوات دراستي ، وتضحياتهم غير المحدودة ، وتوفيرهم لوسائل الراحة ، و بذلهم للكثير من الجهد من أجل تعليمي.

وفي الأخير وليس آخرا، اود ان أتقدم بتحيات صافية من القلب لجميع أصدقائي ودفعة **MASTER 2019** وشكرهم على المدة اللطيفة التي قضيناها معا، وخصوصا من قدم لي الدعم والتشجيع خلال مشواري الدراسي مع تمنياتي لهم بالنجاح في حياتهم.

وفي النهاية اشكر طاقم الأساتذة و طلبة الدكتوراه وذلك لدعمهم لي اثناء عملي على هذه المذكرة ، و اخص بذلك الطالب عياد احمد لمساعدتي في جزئ لا يتجزأ منها.

اطلب من الله أن يوفقكم جميعا

SOMMAIRE

Remerciement	2
Nomenclature.....	6
Introduction générale.....	7
CHAPITRE I. Etude et analyse bibliographique.....	8
I.1 Introduction :	8
I.2 Généralité sur la coupe des métaux.....	8
I.3 Généralités sur l'usinage.....	8
I.3.1 Le procédé de tournage.....	9
I.3.2 Opérations de bases en tournage.....	9
I.4 Usinabilité et caractéristiques des matériaux.....	10
I.4.1 Définition de l'usinabilité.....	10
I.4.2 Critères d'évaluation de l'usinabilité.....	11
I.4.3 Caractéristiques des matériaux influençant l'usinabilité.....	12
I.5 Matériaux de coupe.....	12
I.5.1 Introduction.....	12
I.5.2 Caractéristiques d'un matériau de coupe.....	12
I.5.3 Classification des matériaux des outils de coupe.....	13
I.6 Endommagement des outils de coupe.....	14
I.6.1 L'usure des outils.....	14
I.7 Etat de surface des pièces mécanique.....	14
I.7.1 Généralités sur les états de surface.....	14
I.7.2 Définitions de l'état de surface des pièces mécaniques.....	14
I.7.3 État de surface en tournage.....	15
I.7.4 Caractéristiques de la surface.....	16
I.8 Efforts de coupe.....	17
I.8.1 Définition et intérêt de leur mesure.....	17
I.9 Choix du couple outil-matière (C.O.M.)	18
I.10 Travaux de recherche réalisés dans le domaine du tournage dur (état de l'art)	19
CHAPITRE II. Montage expérimental et résultat et la modélisation RMS	
II.1 Introduction.....	27
II.2 Matériels utilisés.....	27
II.2.1 Machine-outil	27
II.2.2 Le matériau utilisé pour les essais d'usinage	28
II.2.3 Outils de coupe	29
II.2.3.1 Plaquettes de coupe.....	29
II.2.3.2 Porte outil.....	29
II.2.4 Appareillage des mesures utilisées	30
II.2.4.1 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe.....	30
II.2.4.2 Mesure de la rugosité (Ra)	33
II.3 Planification des expériences.....	34
II.4 Conditions de coupe	34
II.5 Les méthodes de modélisation.....	34

II.5.1 Le plan orthogonal de Taguchi	34
II.5.1.1 Définition et notion pour les plans de Taguchi	34
II.5.1.2 Les étapes de plan Taguchi	36
II.5.2 La méthodologie des surfaces de réponse	36
II.5.2.1 Les principes généraux.....	36
II.5.2.2 Étapes de la méthodologie de surface de réponse.....	36
II.5.3 Analyse de la variance	37
II.6 Résultat et discussion des expériences	39
II.7 Analyse des résultats par la méthodologie de surface de réponse (RMS)	39
II.7.1 La rugosité de surface Ra.....	39
II.7.1.1 Analyse de variance ANOVA pour le rapport de bruit (S/N) de Ra.....	39
II.7.2 Le modèle mathématique et le coefficient de contribution R2.....	40
II.7.3 Teste de la concordance entre les résultats prédits et expérimentaux de Ra....	40
II.7.4 Surface de réponse 3D pour la rugosité de surface	41
II.8 L'effort axial Fa.....	41
II.8.1 Analyse de variance ANOVA pour S/N de Fa.....	42
II.8.2 Le modèle mathématique et le coefficient de contribution R.....	42
II.8.3 Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux de Fa...42	42
II.8.4 Surface de réponse 3D pour l'effort axial.....	43
II.9 L'effort radiale Fr.....	43
II.9.1 Analyse de variance ANOVA pour S/N de Fr.....	43
II.9.2 Le modèle mathématique et le coefficient de contribution R2.....	44
II.9.3 Test de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux de Fr....44	44
II.9.4 Surface de réponse 3D pour l'effort radial.....	44
II.10 L'effort tangentielle Ft.....	45
II.10.1 Analyse de variance ANOVA pour S/N de Ft.....	45
II.10.2 Le modèle mathématique et le coefficient de contribution R2.....	45
II.10.3 Teste de la concordance entre les résultats prévues et expérimentaux de Ft..46	46
II.10.4 Surface de réponse 3D pour l'effort tangentiel Ft.....	46
II.11 Conclusion.....	47

CHAPITRE III. Modélisation par la méthode des réseaux de neurone artificiels ANN

III.1 Introduction.....	45
III.2 Les composants d'un ANN.....	45
III.3 L'apprentissage.....	51
III.4 Le perceptron.....	51
III.5 La rétropropagation.....	52
III.6 Le taux d'apprentissage adaptatif	52
III.7 Modélisation de la rugosité de surface Ra et de l'effort tangentielle Ft basée sur les réseaux de neurones	52
III.7.1 Modélisation de la rugosité de surface Ra par ANN.....	54
III.7.2 Modélisation de l'effort tangentiel Ft par ANN.....	58
III.7.3 Modélisation de la rugosité de surface Ra et l'effort tangentiel Ft simultanément par ANN.....	62
III.8 Comparaison entre les résultats expérimentaux et estimées par les modèles RMS et ANN pour la rugosité de surface (Ra) et l'effort tangentiel (Ft).....	66

III.9 Conclusion.....	69
------------------------------	-----------

CHAPITRE IV. Optimisation des conditions de coupe

IV.1. Introduction.....	70
IV.2. Optimisation des conditions de coupe par la méthode de Taguchi	70
IV.3 Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs	71
IV.3.1 Analyse des effets principaux sur (Ra)	72
IV.3.2 Analyse des effets principaux sur (Fa)	74
IV.3.3 Analyse des effets principaux sur l'effort radial Fr	75
IV.3.4 Analyse des effets principaux sur l'effort radial Ft	76
IV.4 Optimisations des paramètres de coupe par la fonction de désirabilité	77
IV.4.1. Cas d'optimisation étudiés.....	78
IV.4.1.1 Optimisation des conditions de coupe pour Ra minimale (1 er cas).....	78
IV.4.1.2 Optimisation des conditions de coupe pour Fi minimale (2ème cas).....	81
IV.5. Conclusion	83
Conclusion générale.....	85
Reference bibliographique.....	86

Nomenclature :

- **R_a** : Rugosité de surface moyenne arithmétique.
- **F_x ou F_a** : effort axial de coupe.
- **F_y ou F_r** : effort radial.
- **F_z ou F_t** : effort tangentiel.
- **RMS** : Méthodologie de surface de réponse
- **S/N** : Signal sur bruit.
- **ANOVA** : Analyse de la variance.
- **V_c** : Vitesse de coupe.
- **f** : Avance.
- **ap** : Profondeur de passe.
- **DF**: Degré de liberté
- **SS** : Somme des carrée
- **MS** :Moyenne des carrée
- **F-value** : valeur de Ficheur
- **P-value**: valeur de probabilité
- **ANN** : Méthode des réseaux de neurone artificiels
- **RMSE**: Racine carré de l'erreur moyenne

Introduction générale

Dans le domaine des nouvelles technologies mécanique, et vue les obligations et les exigences des nouvelles appareillages, le procédé de tournage dur des matériaux s'impose comme une alternative à la rectification, est présente des avantages qui sont nettement plus remarquables en termes de réduire le nombre d'opération.

Dans ce contexte, et pour approfondir nos connaissances dans ce domaine, un travail a été réalisé pour étudier le comportement d'un matériaux de type AISI D3 d'une dureté de 63 HRC usiné par un outil en céramique (CC650), l'objectif de cette étude est d'essayer de comprendre la variation de la rugosité de surface (Ra) et les composantes de l'effort de coupe (Fa, Fr et Ft) en fonction des paramètres de coupe qui sont : la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de passe, et par la suite de déterminer les régime optimaux qui donnent les bons résultats pour l'utilisateur, à savoir, minimiser ou maximiser les paramètres de sortie.

Ce mémoire se divise en quatre chapitres, qu'on peut donner un aperçu du contenu de chaque chapitre comme suit :

Le premier chapitre est réservé à une recherche bibliographique sur le procédé du tournage et l'usinabilité des matériaux d'une part, d'autre part une recherche sur l'état de l'art des travaux réalisés par les pionniers dans le domaine de tournage dur est présenté, pour bien se situer par rapport aux travaux déjà réaliser.

Dans le deuxième chapitre on a réalisé deux parties, dans la première partie, nous présentons les équipements et les conditions expérimentaux et les gammes d'usinage utilisés pour mener cette recherche ; les dispositifs de mesure et le couple outil - matière choisis sont présentés d'une manière explicite, un plan orthogonal de Taguchi L_{16} est choisi pour construire le tableau expérimental, l'analyse des résultats est effectuée par la méthode de surface de réponse (RMS) et l'analyse de variance ANOVA pour quantifier le pourcentage de contribution de chaque paramètre technologique.

Le troisième chapitre s'intéresse à une modélisation par la méthode des réseaux de neurone artificiel dite en anglais *Artificial Neural Network* (ANN), on s'est limité à la prédiction du critère de la rugosité de surface (Ra) et l'effort de coupe tangentiel (Ft) à l'aide d'un programme *JMP pro 13*, on a réalisé plusieurs architectures (combinaisons neuronales) afin de déterminer le modèle qui a le bon coefficient de détermination et la plus petite racine quadratique de l'erreur moyenne *Root Mean Square Error*(RMSE). Après on a fait une comparaison basée sur le pourcentage d'erreurs des deux méthodes RMS et ANN comparés aux résultats expérimentaux, afin de bien choisir la technique de modélisation fiable.

Dans le quatrième chapitre une optimisation des paramètres d'usinage (Ra et Fa, Fr, Ft) par deux différentes méthodes qui sont : Taguchi et la fonction de désirabilité à l'aide de deux programmes commerciaux Minitab 16 et Design expert a été réalisée. Les deux méthodes ont comme but de minimiser la rugosité de surface et les efforts de coupe afin de donner les régimes optimaux des paramètres d'usinage (V_c, f et a_p) pour être utiliser comme des entrées à des opérations de fabrication lors du tournage dur du couple outil-matière (AISI D3/ CC650).

Le mémoire se veut être un guide pratique pour les utilisateurs qui travaillent dans le domaine du tournage dur.

I.1 Introduction :

Depuis toujours, le souci majeur des fabricants mécanique était de trouver une stratégie d'optimisation des processus d'usinage moderne qui vise l'augmentation de la productivité, l'amélioration de la qualité de surface, réduire les coûts en recherchant à augmenter le taux d'enlèvement de matière, amélioration de la précision de l'usinage, réduire le nombre d'opérations en remplaçant l'opération de la rectification par des technologies nouvelles. Il est important aussi d'utiliser des outils de coupe à une géométrie adaptée à la matière à usiner pour obtenir un processus d'usinage productif.

I.2 Généralités sur la coupe des métaux

La coupe des métaux a pour but d'étudier l'influence de différents facteurs intervenants dans le processus de la coupe sur le comportement d'un matériau (vitesse de coupe, profondeur de passe, avance par tour, arrosage...) en utilisant des outils de compositions variées (acier fondu, acier rapide, carbure, céramique, nitrure de bore cubique CBN) et de géométries différentes. Au contraire, l'étude de l'usinabilité a pour but de comparer le comportement de différentes matières. Celles-ci étant usinées selon une même méthode d'usinage (tournage par exemple) dont des conditions de coupe toujours identiques à elles-mêmes, à l'aide du même outil tant au point de vue de la composition chimique et traitement thermique qu'au point de vue leur forme et leur affûtage [1].

I.3 Généralités sur l'usinage

L'usinage est un procédé de génération de surfaces. Il consiste à créer une nouvelle surface par enlèvement de matière (formation de copeaux) en utilisant un outil coupant. Les caractéristiques de cette surface dépendent du couple outil-matière, c'est-à-dire des paramètres mis en jeu pendant la coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance et profondeur de passe ... etc.). On cherche alors des solutions pour améliorer ses performances, afin de faire face à des défis lancés par les autres technologies de fabrication mécanique.

Les techniques d'usinage sont nombreuses, la plupart pouvant être appliquées aux aciers.

Nous les diviserons dans les catégories suivantes :

- Usinages par méthodes non traditionnelles ;

Ces méthodes sont classées en fonction des mécanismes physiques mis en jeu :

- Méthodes thermiques, utilisant : les faisceaux d'électron, le plasma, le laser ;
- Méthodes chimiques, entre autres la dissolution chimique, l'usinage électrochimique ;
- Méthodes mécaniques, à savoir les jets liquides avec abrasifs, les ultrasons.
- Usinages par outils coupants (méthodes traditionnelles)

L'enlèvement de matière par un outil coupant peut être obtenu par diverses méthodes, principalement fonction des caractéristiques géométriques de la pièce à réaliser : tournage, fraisage, filetage, perçage, alésage, taraudage, opérations de décolletage (chariotage, fonçage, tronçonnage, perçage, ... etc.).

Durant notre étude, nous nous intéresserons plus précisément à la technique d'enlèvement de matière par tournage. La productivité, la qualité des surfaces générées, le temps et les coûts de fabrication sont les critères qui décident le choix de procédé de fabrication le plus adéquat.

I.3.1 Le procédé de tournage

Le tournage est un procédé de mise en forme par enlèvement de matière. Il fait intervenir un outil de coupe à arête unique qui enlève de la matière sur une pièce mise en rotation. La matière enlevée est évacuée sous forme de copeau. Les paramètres de coupe sont les grandeurs que l'on peut contrôler lors d'une opération. Ils conditionnent les phénomènes mécaniques mis en jeu au cours de la coupe sont à l'origine des puissances mécaniques et thermiques dissipées.

En tournage, dans une opération de chariotage axial : la pièce est respectivement animée par un mouvement de rotation autour d'un axe bien défini et par un mouvement de déplacement parallèle à cet axe, figure I.1. La rotation de la pièce définit la vitesse de coupe qui se mesure généralement par (m/min), quant au déplacement de l'outil, il définit la vitesse d'avance ou simplement dite avance, mesurée par (mm/tour). La configuration de ces deux mouvements associés à la géométrie de l'outil permet d'obtenir la création du copeau [2, 3].

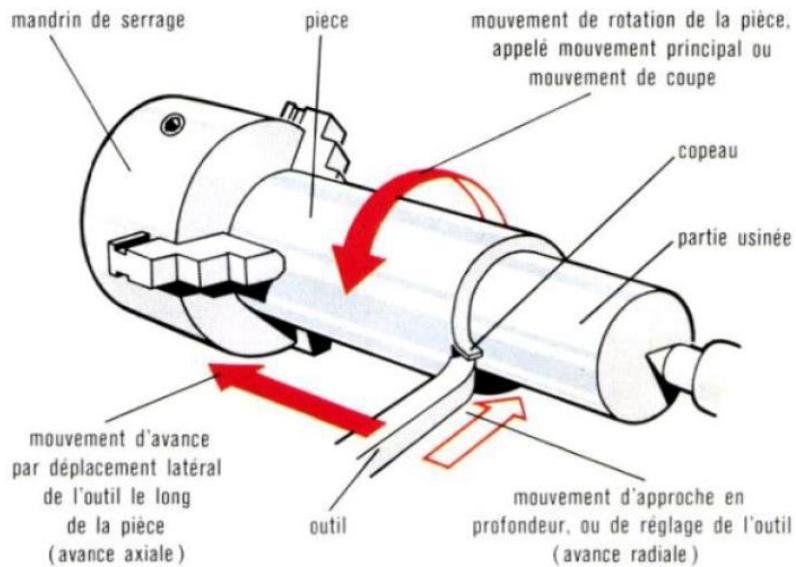


Figure I.1 : Représentation du tournage (chariotage).

I.3.2 Opérations de bases en tournage

En tournage, les pièces complexes sont facilement décomposables en profils de coupe élémentaire. Chacun de ces profils correspondant à une des quatre opérations de bases existant en tournage :

- **Le tournage longitudinal ou chariotage (1) :** où le mouvement d'avance correspond à une translation rectiligne de l'outil parallèlement à l'axe de révolution de la pièce, ce qui permet de réaliser des formes cylindriques.

- **Le dressage (2)** : où le mouvement d'avance est une translation rectiligne de l'outil perpendiculairement à l'axe de révolution de la pièce, ce qui permet d'ajuster la longueur de la pièce et génère un plan orthogonal à l'axe.
- **Le tournage des cônes (3)** : combine les deux types d'opérations précédentes pour générer des cônes de révolution.
- **Le contournage (4)** : consiste à imposer une trajectoire plane quelconque à l'outil, des formes de révolution quelconques peuvent alors être réalisées.

Toutes les opérations présentées dans la figure I.2 correspondent à un usinage dit de génération ou d'enveloppe, car la forme obtenue n'est pas générée par la forme de l'outil. En d'autres termes la forme dépend uniquement de la trajectoire de l'outil. Lorsque des formes sont obtenues par reproduction du profil de l'outil dans la pièce, il s'agit d'usinage de forme. Les travaux de forme classiques sont le filetage ou encore la réalisation de gorges [4].

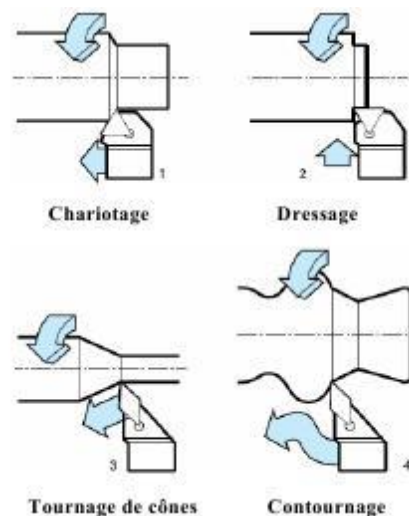


Figure I.2 : Les opérations usuelles en tournage [5].

I.4 Usinabilité et caractéristiques des matériaux

I.4.1 Définition de l'usinabilité

L'usinabilité n'a pas de définition formelle basée sur les nuances ou sur des chiffres. Dans son sens le plus large, l'usinabilité désigne la possibilité d'usiner une matière, l'usure qu'elle occasionne sur les arêtes de coupe et la formation des copeaux qui la caractérise. Dans ce sens, un acier faible en pourcentage de carbone est plus facile à usiner qu'un acier fortement allié. Les aciers faiblement alliés sont généralement considérés comme ayant une meilleure usinabilité que les aciers fortement alliés.

Le concept de « bonne usinabilité » ou « matériau usinable » signifie généralement une action de coupe sans problèmes avec une durée de vie d'outil correcte. Le plus souvent l'évaluation de l'usinabilité d'une matière donnée est faite à partir d'essais et les résultats sont exprimés par rapport à d'autres tests effectués sur d'autres matières sous des conditions comparables.

Selon les chercheurs travaillant dans le domaine de la coupe des métaux, l'usinabilité est définie aussi sous différentes terminologies :

- L'usinabilité est la propriété grâce à laquelle un matériau donné peut subir plus ou moins facilement une opération d'usinage déterminée. Il s'agit donc en principe d'une propriété inhérente à la matière envisagée [6].
- L'usinabilité ou l'aptitude d'un matériau à être amené à des dimensions et formes déterminées avec un état de surface défini par une ou plusieurs opérations d'usinage. Il ne s'agit pas d'une propriété simple de la matière, elle n'est pas une grandeur mesurable. L'usinabilité est une propriété complexe désignant la facilité, plus ou moins grande, d'un matériau à être amené par enlèvement de copeaux à une forme et à des côtes fixes [7].
- La notion d'usinabilité décrit l'aptitude d'un matériau, compte tenu de toutes ses propriétés, à être mis en forme par outil coupant [8].

I.4.2 Critères d'évaluation de l'usinabilité

Les critères pouvant permettre d'évaluer l'usinabilité d'un matériau sont nombreux et dépendent non seulement du type d'opération, mais aussi de l'usineur. Cette notion d'usinabilité reste néanmoins toujours liée à la production au moindre coût. Selon les chercheurs qui ont investigué la notion de l'usinabilité, on trouve une variété des critères pour son évaluation.

➤ Selon CZAPLICKI A. [6] : Les critères d'évaluation de l'usinabilité sont:

- Durée de vie d'outil coupant permettant la production maximale;
- Les efforts de coupe donnant une indication sur la puissance nécessaire à la broche ;
- L'état de surface usinée permettant de choisir les conditions de coupe en fonction de la destination finale de la pièce usinée.

➤ Selon MATHON P. [9] : Les principaux critères sont classés selon l'ordre suivant:

- La qualité de la rugosité de la surface usinée;
- L'effort de coupe définissant la résistance à la coupe;
- La durée de vie de l'outil, ou la vitesse de coupe permettant d'obtenir une durée d'outil donnée ou l'usure pour un temps donné.

Par contre d'autres chercheurs prennent l'usure comme l'effet le plus observable ;

➤ Selon ROBELET M. [10]: Les principaux paramètres pris en compte lors de la caractérisation de l'usinabilité sont:

- L'usure de l'outil ;
- L'effort de coupe;
- La température de coupe;
- La majorité des chercheurs évaluent l'usinabilité par les critères ordonnés comme suit:
- La tenue de l'outil, ou un critère dépendant de l'usure (**VB**);
- Les efforts de coupe engendrés;
- La qualité de la surface usinée;
- L'absence de la température de coupe prouve qu'il s'agit d'un effet perturbateur lié fortement avec les critères:
- Usure ;
- Effort de coupe;

I.4.3 Caractéristiques des matériaux influençant l'usinabilité

Plusieurs Caractéristiques des matériaux influencent l'usinabilité et ce, de plusieurs façons :

- Dureté de la pièce ;
- Propriétés mécaniques et composition chimique de la pièce à usinée;
- Microstructure ;
- Rigidité de la pièce ;
- Susceptibilité à l'écrouissage ;
- Degré de travail à froid ;
- Forme et dimension de la partie usinée ;

I.5 Matériaux de coupe

I.5.1 Introduction

Les matériaux de coupe contemporains sont le résultat d'un long développement. Grâce à ce développement, les opérations d'usinage qui demandent une centaine de minutes en 1900 peuvent prendre actuellement moins d'une minute. L'importance des matériaux à outil de coupe ne peut pas être sous-estimée, parce que le rendement économique des machines-outils dépend en majeure partie des performances des outils de coupe, figure I.3.

Pour choisir un outil de coupe convenable, il faut prendre en compte plusieurs facteurs comme : la nature de l'opération de coupe (ébauche ou finition, précision demandée, coupe continue ou intermittente), la forme et la matière de la pièce (structure, dureté, résistance, état de couche superficielle, affinité chimique, inclusions), le type de machine-outil (puissance, rigidité, capacité), les conditions de coupe (vitesse, avance et profondeur de coupe), l'état de surface demandé (rugosité, contraintes résiduelles) et les coûts associés à cette opération.

Étant donné le nombre de facteurs à considérer et la difficulté de les définir précisément, le choix d'un outil de coupe devient un problème très complexe [11, 12].

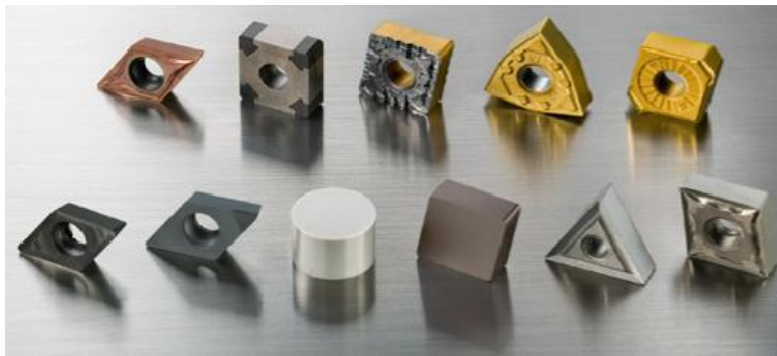


Figure I.3 : Matériaux de coupe.

I.5.2 Caractéristiques d'un matériau de coupe

Les caractéristiques recherchées dans un matériau de coupe peuvent être résumées comme suit [11]:

- Posséder une dureté permettant de résister à l'usure et à la déformation, même à une température élevée, figure I.4,
- Posséder une ténacité élevée pour résister à la rupture,

- Être chimiquement inerte vis à vis du matériau usiné,
- Être chimiquement stable pour résister à l'oxydation et à la dissolution,
- Offrir une bonne conductibilité thermique et une bonne résistance aux chocs thermiques.

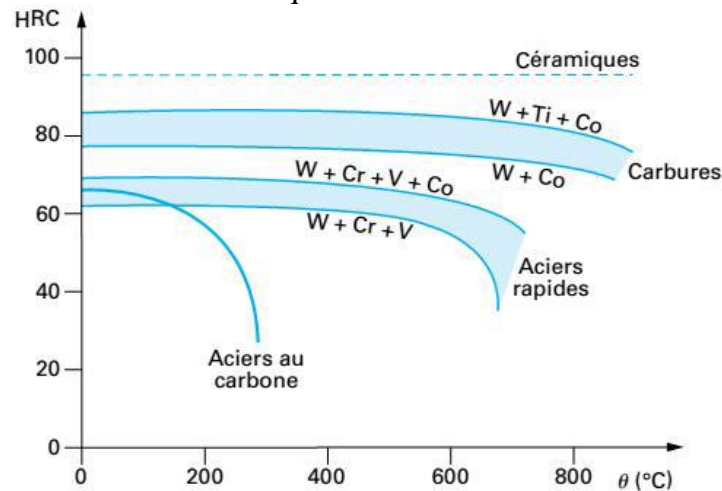


Figure I.4 : Influence de la température sur la dureté des matériaux utilisés pour la fabrication des outils de coupe [13].

I.5.3 Classification des matériaux des outils de coupe

Les matériaux de coupe ont des propriétés différentes en termes de dureté, de ténacité et de résistance à l'usure, figure I.5. Ils sont divisés en un grand nombre de nuances dotées de propriétés spécifiques. De manière générale, les matériaux de coupe doivent posséder les propriétés suivantes :

- Dureté : résistance à l'usure en dépouille et à la déformation ;
- Ténacité : résistance à la rupture ;
- Neutralité chimique : absence de réaction chimique avec la matière à usiner ;
- Stabilité chimique : résistance à l'oxydation et à la diffusion ;
- Résistance aux variations thermiques brusques [14].

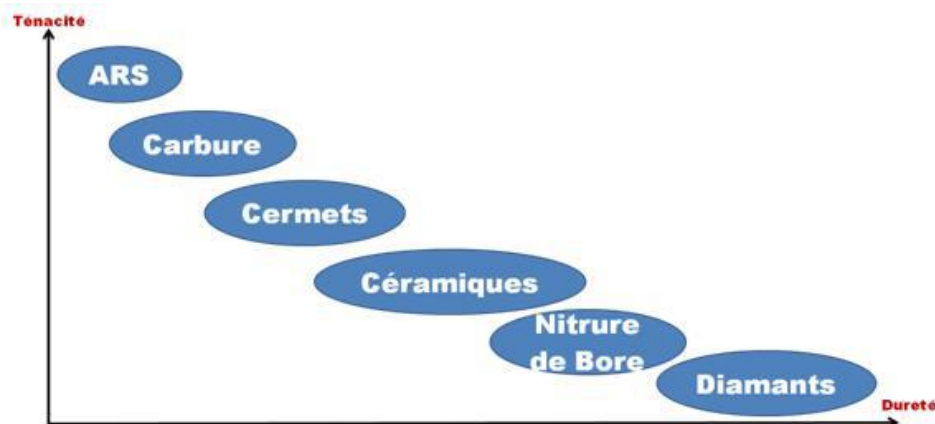


Figure I.5 : Classification des matériaux de coupe.

Les matériaux de coupe utilisés en tournage peuvent être classés en plusieurs groupes : les aciers rapides, les aciers rapides revêtus, les aciers rapides frittés, les carbures métalliques, les carbures micro-grains, les cermets, les céramiques, le Nitrure de Bore Cubique (CBN) et les diamants [11, 15, 16].

I.6 Endommagement des outils de coupe

Les outils de coupe ont une géométrie généralement complexe qui résulte assez souvent de mises au point d'atelier purement empiriques, quelquefois d'études plus analytiques à partir de divers critères (résistance à l'endommagement ou qualité de la surface générée), rarement d'une véritable optimisation qui nécessiterait une modélisation de l'écoulement du ou des copeaux. [17]

I.6.1 L'usure des outils

L'usure est une caractéristique utilisée souvent pour décrire l'état d'un système mécanique, elle est une conséquence due au frottement entre deux pièces en mouvement l'une par rapport à l'autre, figure I.6. Les deux principaux mécanismes de l'usure sont l'adhésion et l'abrasion. Ce phénomène peut entraîner des modifications dimensionnelles, géométriques et structurales par une augmentation des jeux fonctionnels (arrête rapportée), [18].

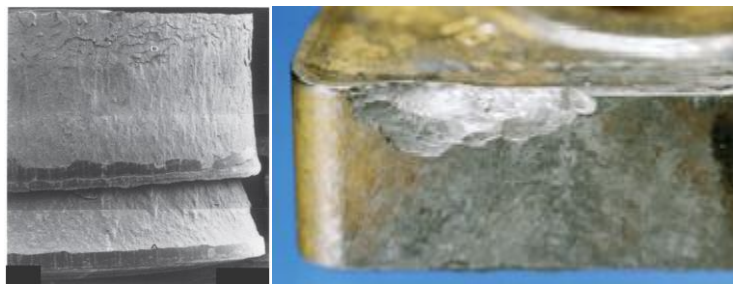


Figure I.6 : Exemple d'usure des outils.

Si l'on fait un inventaire des configurations de coupe que l'on rencontre dans un atelier d'usinage, on observe une très grande diversité des vitesses de coupe (entre 10 et plusieurs milliers de m/min), de la géométrie des copeaux et de leurs conditions d'évacuation, de la rigidité du contact pièce usinée/outil, de la nature et de la géométrie des outils. Dans une telle variété de configurations de coupe, il n'est pas surprenant d'observer une grande variété de faciès de dégradation.

I.7 Etat de surface des pièces mécanique

I.7.1 Généralités sur les états de surface

La structure superficielle lors de l'usinage des métaux par enlèvement de copeaux est déterminée par les irrégularités résultant de la déformation de la face usinée. Elle varie essentiellement selon la méthode d'usinage, les conditions de coupe, la matière à usiner et la stabilité d'ensemble de l'opération.

I.7.2 Définitions de l'état de surface des pièces mécaniques

la rugosité C'est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique. Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière, etc. Le rôle fonctionnel d'une surface dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment de l'état de surface (étanchéité, glissement, etc.).

Plus l'indice de rugosité est faible, plus il est difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication [19, 20].

▪ **Surface géométrique**

Surface parfaite; sur le dessin, elle est définie géométriquement par le bureau d'études, à l'aide de cotes nominales.

▪ **Surface spécifiée**

Surface résultant de la surface géométrique, transformée par le bureau des études qui prescrit les limites de réalisation de cette surface à l'aide de symboles et de valeurs numériques en complément des cotes nominales du dessin.

▪ **Surface mesurée**

Surface déterminée à l'aide des instruments de mesure à partir de la surface réelle. La surface mesurée, résultant de l'exploration de la surface réelle devra être l'image la plus rapprochée de celle-ci.

▪ **Surface réelle**

Surface obtenue au cours de la fabrication, figure I.7.

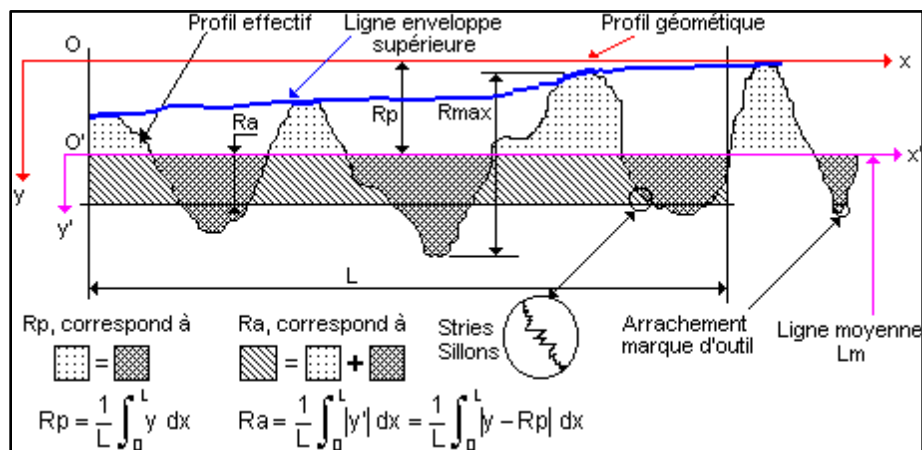


Figure I.7 : Caractéristiques du profil d'une surface.

- ❖ **L** : Longueur de base du profil moyen.
- ❖ **R_p** : Profondeur moyenne de rugosité ; Moyenne arithmétique des valeurs de l'ordonnée y de tous les points du profil sur la longueur de base L.
- ❖ **R_a** : Écart moyen arithmétique ; Moyenne arithmétique des valeurs absolues de l'ordonnée y' (entre chaque point de la courbe et l'axe Ox').

I.7.3 État de surface en tournage

L'état de surface dépend principalement de l'avance et du rayon de bec de l'outil. Le choix de l'outil et des conditions de coupe doit donc tenir compte de ces influences. La rugosité théorique peut être déterminée à partir du profil géométrique idéal donné par la figure I.8. Si le rayon de la plaquette est grand devant l'avance, la hauteur maximale du profil de rugosité R_{max} et donné par la formule (I.1) [21]:

$$R_{\max} = \frac{f^2}{8 \times r} \dots \dots \dots (I.1)$$

R_{max} : Rugosité maximale en (mm) ;
f : Avance en (mm);

r : le rayon de l'outil de coupe maximal en millimètre;

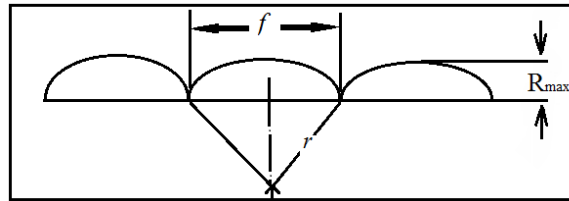


Figure I.8 : Profil d'une surface usinée

I.7.4 Caractéristiques de la surface

La nouvelle norme ISO 25178 définit l'analyse en 3D de l'état de surface, ce qui permet également la caractérisation des surfaces anisotropes ou périodiques difficile avec les anciens paramètres 2D d'état de surface [22].

Paramètres caractéristiques des états de surface :

- ❖ **Rugosité moyenne arithmétique R_a** : Moyenne arithmétique de toutes les distances absolues du profil de rugosité R mesurée à partir de la ligne médiane du profil sur la longueur d'évaluation l_m .

$$R_a = \frac{1}{l_m} \int_{x=0}^{x=l_m} |y(x)| dx \dots \dots \dots (I. 2)$$

- ❖ **Rugosité moyenne profondeurs R_z** : Moyenne des profondeurs de rugosité de cinq zones d'évaluations successives l_e

$$R_z = \frac{1}{5} (R_{z_1} + R_{z_2} + R_{z_3} + R_{z_4} + R_{z_5}) \dots \dots \dots (I. 3)$$

- ❖ **Hauteur maximale des pics R_p** : Hauteur maximale du profil de rugosité R au-dessus de la ligne moyenne sur la longueur d'évaluation l_m

$$R_p = R_{p3} \dots \dots \dots (I. 4)$$

- ❖ **Profondeur maximale des vallées R_v** : Profondeur maximale du profil de rugosité en dessous de la ligne moyenne sur la longueur d'évaluation l_m

- ❖ **Rugosité maximale R_t** : Ecart vertical entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil de rugosité R, sur la longueur totale d'évaluation l_m , figure I.9 [23].

$$R_t = R_p + R_v = R_{p3} + R_{v4} \dots \dots \dots (I. 5)$$

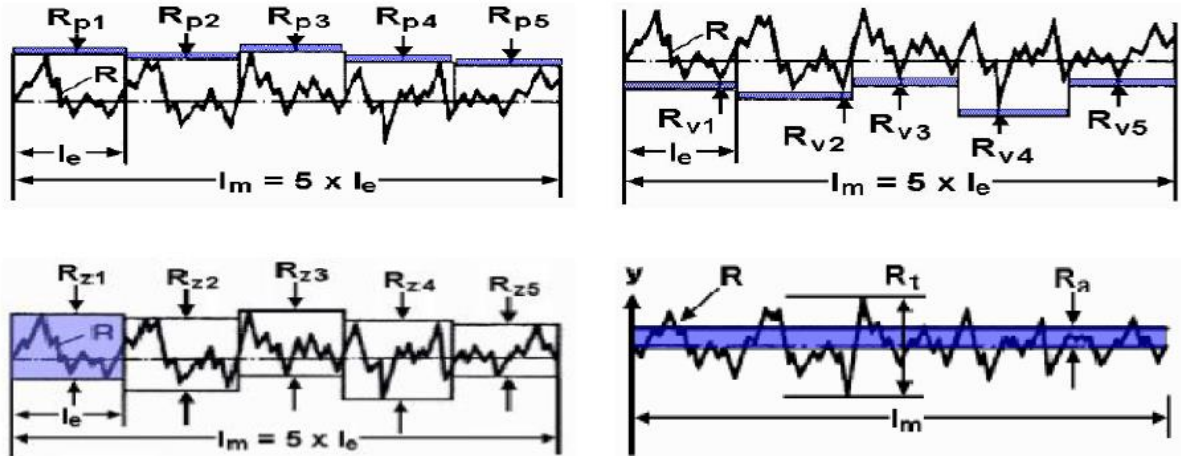


Figure I.9 : Les critères de la rugosité [28]

I.8 Efforts de coupe

Les efforts de coupe sont à l'origine des déformations plastiques et donc des élévations de température qui se produisent au cours de la coupe. Pour toutes autres conditions de coupe égales, l'augmentation de la vitesse de coupe ne s'accompagne pas d'une variation notable des efforts de coupe (10% de baisse environ), alors que l'augmentation de la vitesse d'avance entraîne une augmentation de la valeur de l'effort tangentiel (relation linéaire : l'effort double de valeur quand la vitesse d'avance double) [11].

I.8.1 Définition et des effort de coupe mesure

Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage. La résultante de coupe $F_{rés}$, peu utilisée en pratique, est la somme de trois composantes, figure I.10.

- **F_x ou F_a** : composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance ou effort axial en tournage, joue un rôle fondamental dans le processus de coupe.
- **F_y ou F_r** : composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort de refoulement ou effort radial, son importance est secondaire, est disparaît dans le cas de coupe orthogonale pure.
- **F_z ou F_t** : composante dans le sens de la vitesse de coupe, appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe.

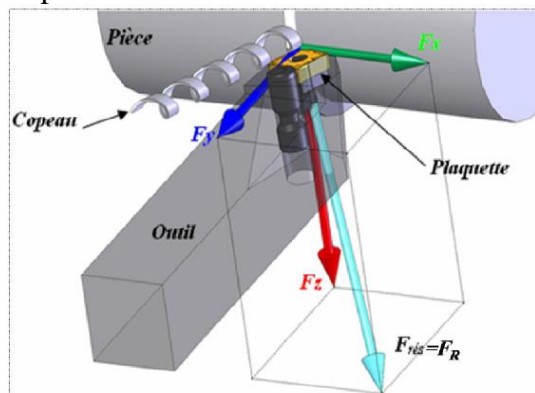


Figure I.10 : Composantes des efforts de coupe

L10 Etat de l'Art sur les travaux de recherche réalisés dans le domaine du tournage dur

Dans cette partie, on cite quelques travaux théoriques et expérimentaux sur le tournage, le but de cette synthèse est de focaliser notre étude sur des points qui n'ont pas été étudiés auparavant, c'est-à-dire, de ramener un apport scientifique plus au mois significatif, et de s'intégrer dans le domaine du tournage dur par la voie des résultats publiés par des chercheurs bien connus.

Plusieurs chercheurs ont adopté l'utilisation de la planification expérimentale dans le but de modéliser et d'optimiser par la suite les paramètres technologiques.

Étude de l'usinabilité de l'acier AISI D3 en tournage dur par outil en céramique revêtu CC6050 en utilisant la méthodologie de la surface de réponse

Aouici et al. [27] ont réalisé une étude expérimentale dont le but est de déterminer l'effet de la vitesse de coupe, la vitesse d'avance et la profondeur de coupe sur la rugosité de surface, l'effort de coupe tangentiel, la puissance de coupe et l'effort spécifique lors du tournage dur du couple d'usinage (céramique mixte/ Acier AISI D3 traité thermiquement à une dureté de 60 HRC). Les auteurs ont choisi un plan factoriel complet de 27 essais (3^3), afin de développer un modèle de prédiction des réponses.

Les résultats trouvés montrent que l'effort de coupe est affecté principalement par l'avance (36.672%) suivie par la profondeur de passe (27.541%) et en dernier lieu par la vitesse de coupe (5.03%). Pour la rugosité de surface, elle est fortement influencée par l'avance avec une contribution de (87.334%), suivie par le terme f^2 avec une contribution de (6.455%). Les auteurs ont déterminé les conditions de coupe optimales en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RSM), figures 12-15, et l'approche de la fonction de désirabilité. L'utilisation de la profondeur minimale, une vitesse de coupe élevée (140 m/min) et en limitant l'avance par tour à 0.12 et 0.13mm/tr assure un effort de coupe minimal et une meilleure rugosité de surface.

Des valeurs plus élevées de la profondeur de coupe sont nécessaires pour minimiser l'effort spécifique. En dernier lieu les auteurs affirment que l'utilisation des modèles mathématiques obtenue peut être utilisée pour optimiser les paramètres de coupe lors l'usinage de l'acier AISI D3 avec la céramique mixte.

Les modèles mathématiques trouvés par les auteurs sont comme suit :

$$F_t = 869.4041 - 11.8788V_c + 188.9881f - 494.6603a_p + 0.2265V_c \times f + 9.0410V_c \times a_p + 2,328.05556 f \times a_p + 0.0368V_c^2 - 1,101.9965f^2 - 1,097.23a_p^2$$

$$R_a = 0.1601 + 0.0411V_c - 24.1438f - 3.4665a_p + 0.1016V_c \times f + 0.0507V_c \times a_p + 4.5834f \times a_p + 0.0003V_c^2 + 74.1319f^2 - 5.0617a_p^2$$

$$K_s = 41,069.3571 - 307.9261V_c - 84,073.9032f - 55,353.482a_p + 191.6098V_c \times f + 306.3561V_c \times a_p + 70,128.6008f \times a_p + 0.6642V_c^2 + 75,921.5053f^2 - 831.5043a_p^2$$

$$P_c = 1,6161368 - 21,12434V_c + 1,0666711 - 1,7217994a_p + 11,5675 V_c \times f + 21,7368V_c \times a_p + 4,8423032 f \times a_p + 0,0624 V_c^2 - 2,0085648 f^2 + 1,6533374 a_p^2$$

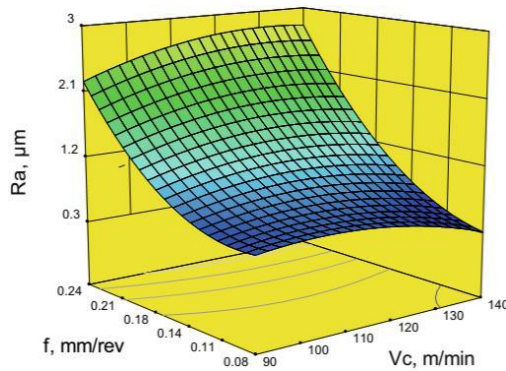


Figure I.12 : Effet de l'avance et de la vitesse de coupe sur la rugosité surface.

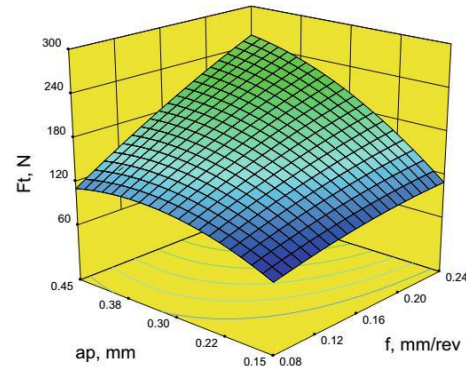


Figure I.13 : Effet de la profondeur de passe et l'avance sur l'effort de coupe.

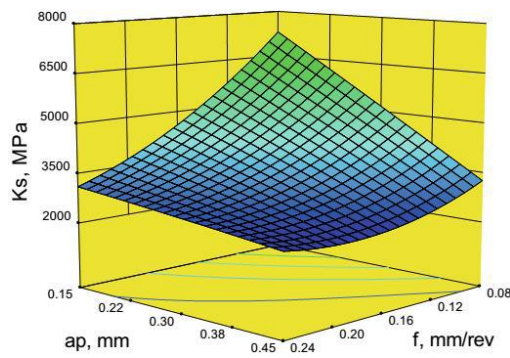


Figure I.14 : Effet de l'avance et la profondeur de passe sur l'effort de coupe spécifique.

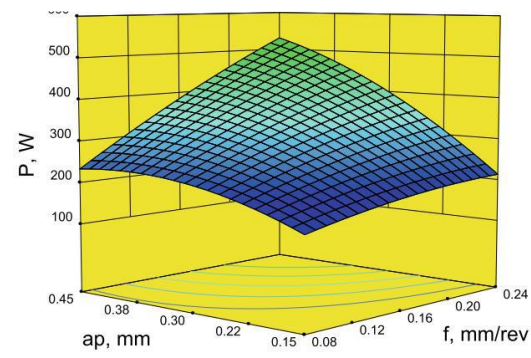


Figure I.15 : Effet de l'avance la profondeur de passe sur la puissance de coupe

Etude comparative des outils en Wiper et céramiques conventionnelles sur la rugosité de surface lors du tournage dur d'un acier AISI 4140

Elbah et all. [29] ont proposé une étude comparative entre deux types de plaquettes, à savoir, des plaquettes conventionnelles et autres utilisant la technologie wiper, lors de tournage d'un acier AISI4140 d'une dureté de 60HRC, les critères misent en étude sont les rugosités de surface Ra, Rz et Rt.

Les auteurs ont adopté un plan d'expérience complet, c-à-d, L_{27} pour la planification de leurs expériences, la méthodologie de surface de réponse (RSM) est employée pour déterminer les modèles mathématiques, aussi, l'analyse de variance (ANOVA) est utilisée par les auteurs pour la quantification des pourcentages des différents paramètres affectant les rugosités de la surface.

Le montage réalisé par les auteurs est représenté sur la figure I.16, où ils ont utilisé une éprouvette de diamètre 72 mm, et de deux types d'outils en céramique de désignation

CC6050WT et CC6050. Une plate-forme métrologique optique 3D (Altisurf 500) serre à visualiser l'état de surface.

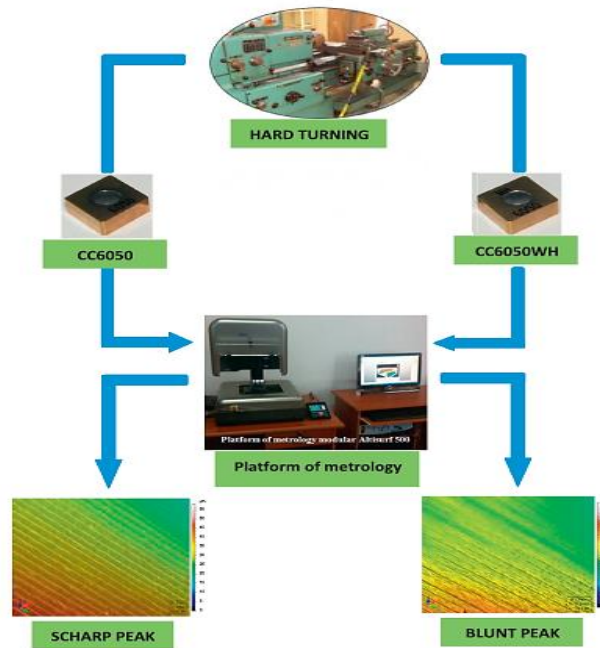


Figure I.16. Montage expérimental pour mesurer la topographie de surface 3D des pièces.

Les auteurs ont montré dans cette étude que :

- Les résultats statistiques issues de l'ANOVA confirment la validité des modèles pour des intervalles de confiance de 95%.
- En générale, les outils en Wiper CC6050WH présentent des performances par rapport aux outils conventionnelles CC6050, des taux de : 2.8; 2.5 et 2.2 ont été enregistré pour les rugosités : Ra, Rz et Rt, respectivement.
- L'ANOVA indique que l'avance et le paramètre le plus signifiant sur la qualité de surface avec des pourcentages de (63.45; 70.47 et 65.67) % pour CC6050WH et de (74.51; 70.96 et 70.61) % pour CC6050, respectivement
- L'avance et le facteur le plus important pour le critère de rugosité de surface. L'usure en dépouille est un facteur important à prendre en compte. Son évolution endommage la finition de surface de la pièce. La visualisation 3D a confirmé certaines caractéristiques des surfaces produites avec les deux outils testés.

Etude et modélisation des efforts de coupe et de la rugosité de surface lors du tournage dur de l'acier AISI 52100 avec un outil en céramique mixte: optimisation des conditions de coupe

Meddour et all. [30] ont étudiés les efforts de coupe et la rugosité de surface lors du tournage dur de l'acier AISI 52100 (59 HRC) par un outil en céramique mixtes CC650 (non revêtue), cette étude expérimentale est réalisée pour étudier l'effet des paramètres technologiques et leurs interactions sur les forces de coupe et la rugosité de surface.

Les paramètres étudiés sont les suivants : vitesse de coupe, profondeur de coupe, l'avance et la géométrie de la plaquette (rayon de l'outil). De plus, les modèles des forces de coupe et de la rugosité de surface sont obtenus par la méthode de surface de réponse. L'objectif final de ce travail est l'optimisation des conditions de coupe.

Dans cette étude les chercheurs ont adopté un plan d'expérience composite central (CCD) à 30 essais. La figure I.17 présente l'organigramme établie par les auteurs afin de collecter les données faisant l'objet des entrées pour tirer les modèles, aussi, les surfaces topologiques sont obtenus par la plateforme métrologique *Altisurf 500*, qui est un appareillage sophistiqué pour visualiser l'état de surface des pièces usinées, et cela pour différent régime de coupe, figure I.17.

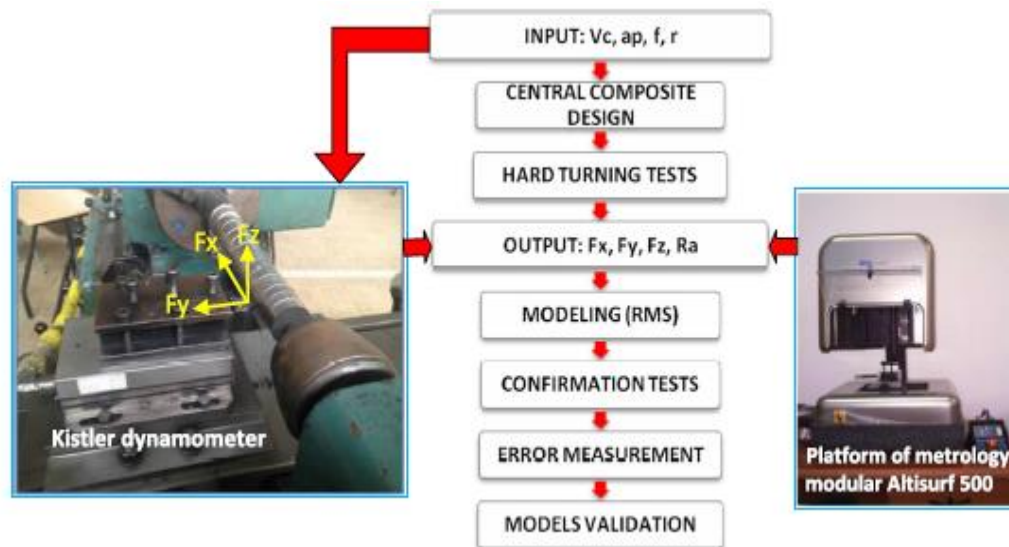


Figure I.17 Montage expérimental

D'après les résultats de ce travail les auteurs ont conclu que :

- Les résultats de l'ANOVA prouvent que la profondeur de passe est le principal paramètre affectant les composantes de la force, suivie par l'avance avec une contribution plus faible, concernant la vitesse de coupe son effet et considéré non significatif.
- La meilleure rugosité de surface est obtenue en utilisant une combinaison entre une faible avance et un grand rayon du bêche de l'outil.
- Une petite divergence entre les valeurs prédites et les valeurs du test de confirmation a été observée.
- Le processus d'optimisation consiste à minimiser la consommation d'énergie et la rugosité de la surface. La plate-forme optique de métrologie modulaire est un outil important dans l'étude de la rugosité de surface en raison des cartes topographiques tridimensionnelles produites des surfaces usinées.

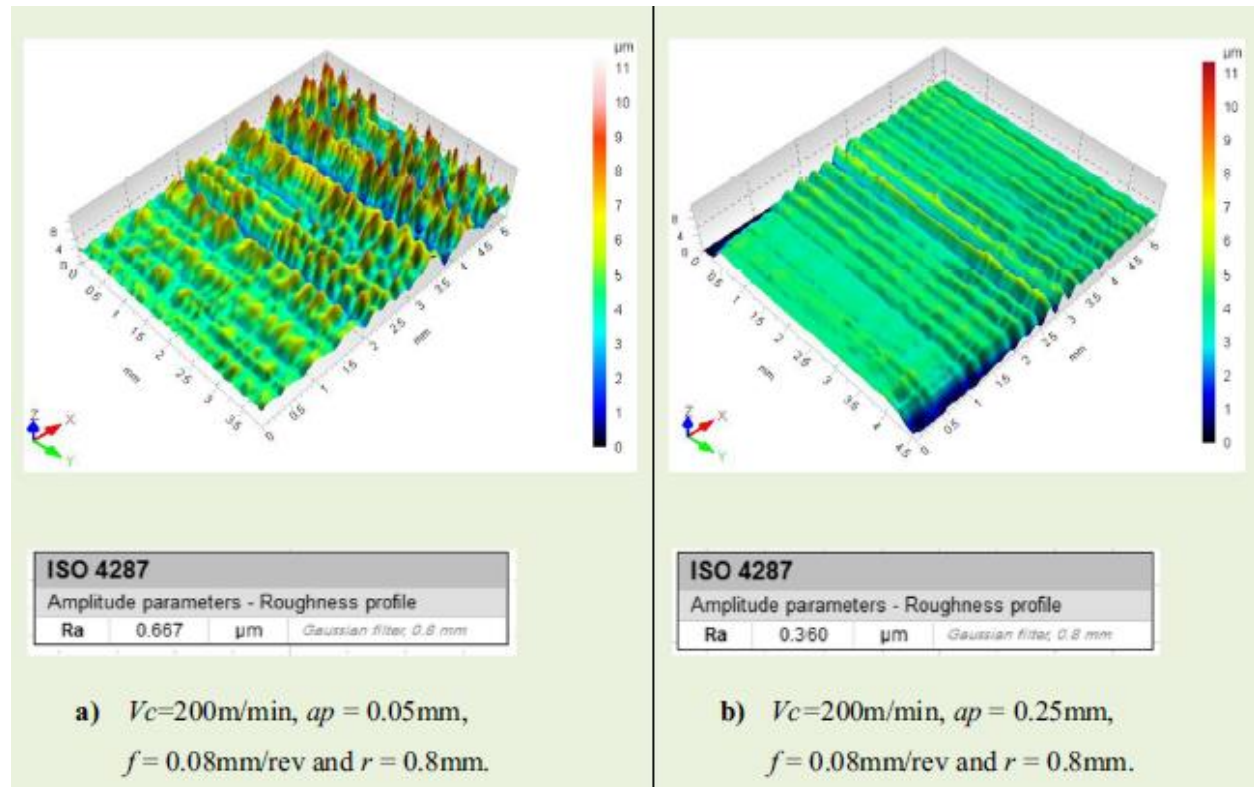


Figure I.18 Topographie des surfaces usinées pour deux régimes de coupe.

Détermination de l'effet des paramètres de coupe sur la rugosité de surface en tournage dur à par la méthode de Taguchi

Ilhan et all. [30] ont présenté une étude de la mesure de la rugosité de surface pendant le tournage de l'acier AISI 1040 en fonction de la variabilité des différents paramètres de coupe tels que la vitesse de coupe (V), l'avance par tours (f) et la profondeur de coupe (a_p).

Un plan d'expérience factoriel complet de 27 essais (L_{27}) est mis en œuvre pour augmenter la limite de confiance et la fiabilité des données expérimentales, Tableau I.1. Les auteurs ont utilisé les réseaux de neurones Artificielles (ANN) et des approches de régression multiple, équation I.11 pour modéliser la rugosité de surface de lors du tournage l'acier AISI 1040 par des plaquettes en carbures avec revêtement.

Tableau I.1 Les valeurs expérimentales pour la construction du modèle L₂₇

Test no.	V (m/min)	f (mm/rev)	a (mm)	Ra (µm)
1	150	0.12	1	1.02
2	150	0.12	2	1.18
3	150	0.12	4	1.12
4	150	0.2	1	1.68
5	150	0.2	2	1.34
6	150	0.2	4	1.83
7	150	0.35	1	3.55
8	150	0.35	2	3.52
9	150	0.35	4	3.5
10	219	0.12	1	0.79
11	219	0.12	2	0.93
12	219	0.12	4	1.13
13	219	0.2	1	1.66
14	219	0.2	2	1.61
15	219	0.2	4	1.85
16	219	0.35	1	3.75
17	219	0.35	2	3.8
18	219	0.35	4	3.86
19	320	0.12	1	0.74
20	320	0.12	2	0.9
21	320	0.12	4	0.97
22	320	0.2	1	1.91
23	320	0.2	2	1.9
24	320	0.2	4	1.93
25	320	0.35	1	3.67
26	320	0.35	2	3.69
27	320	0.35	4	3.82

Ils ont fait une comparaison entre les deux méthodes de modélisation en utilisant des méthodes statistiques telles que la méthode d'analyse de variance (ANOVA).

Les résultats trouvés par les auteurs montrent clairement que les modèles proposés sont capables de faire la prédiction de la rugosité de surface.

Cette étude a confirmé que le modèle ANN estime la rugosité de surface avec une grande précision par rapport au modèle de régression multiple.

$$R_a = 0.130 + 0.00088V + 3.54f - 0.011a + 0.000005V^2 + 14.4f^2 + 0.0174a^2 + 0.00848V \times f + 0.000059V \times a - 0.194f \times a \dots\dots\dots (I.11)$$

Dans cette étude, la structure du réseau ANN choisi pour la modélisation et par la suite la prédiction de la rugosité de surface Ra est illustrée dans la Figure I.19.

L'architecture du ANN adopté ce compose en trois facteurs d'entrée qui sont Vc, f et ap, d'une couche cachée de cinq nœuds, et d'une seule sortie qui représente la rugosité de surface Ra.

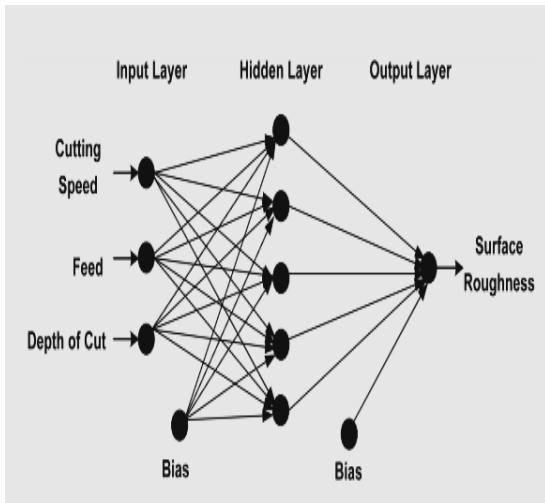


Figure I.19 Architecture de réseau de neurone.

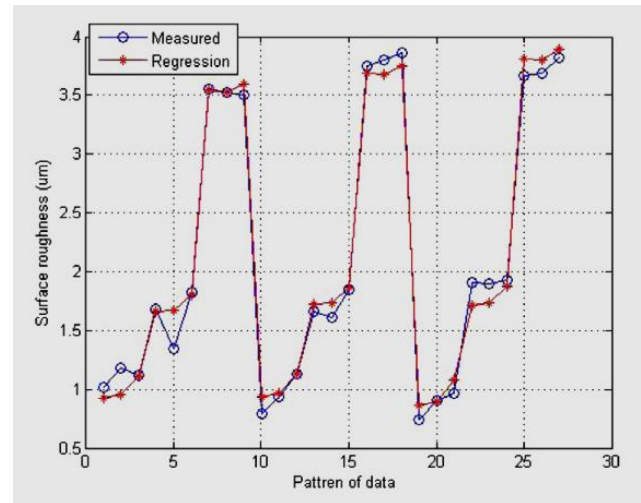


Figure I.20 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites par la méthode de régression de Ra

La Figure I.20 montre la comparaison entre les valeurs mesurées et prédites réalisées par le modèle de régression multiple, il a été bien confirmé la bonne corrélation entre les deux résultats. Les Figures (I.21 et I.22), montrent la comparaison des valeurs mesurées et prédites de la rugosité de surface, lors des phases d'entraînement et de teste du modèle ANN, respectivement.

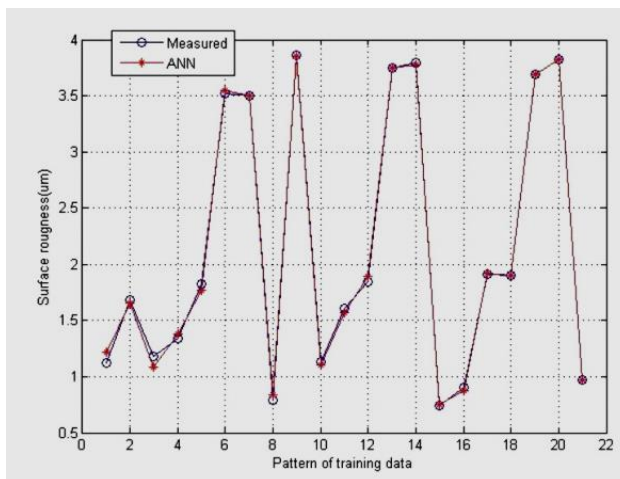


Figure I.21 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de Ra dans la phase d'entraînement du modèle ANN.

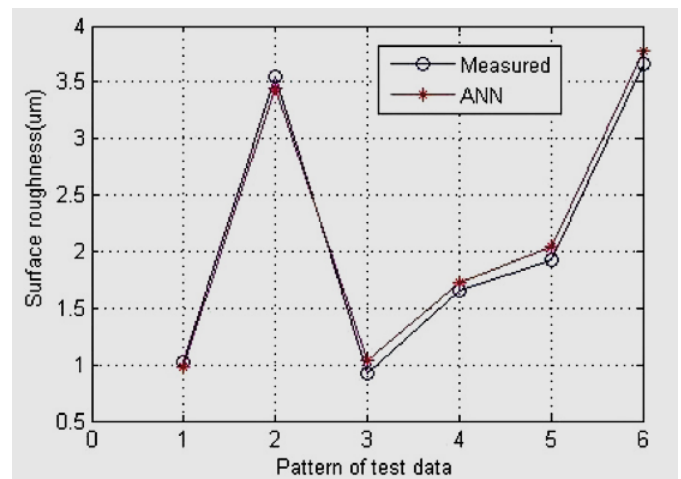


Figure I.22 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de Ra dans la phase du teste du modèle ANN.

I.11 Conclusion :

Dans ce chapitre, une étude bibliographique sur l'usinage des pièces et les outils de coupes est présentée pour bien comprendre le mécanisme du tournage, cette étude bibliographique est suivie par une recherche sur les travaux antécédents réalisés par des chercheurs dans le domaine du tournage dur, le but de tout ça est de présenter un travail original, d'un intérêt économique et industriel certains.

II.1 Introduction

Dans le présent chapitre nous présentons essentiellement, d'une part le montage expérimental nécessaire pour la construction du tableau d'expérience tel que : le modèle du tour utilisé, la nuance et le dimensionnement de l'éprouvette et finalement les outils de coupes.

Et d'autre part nous avons présenté une étude théorique issue des résultats expérimentaux de l'influence de certains facteurs tels que la vitesse de coupe (**Vc**), l'avance par tour (**f**) ainsi que la profondeur de passe (**ap**), susceptibles d'influencer les paramètres technologiques tels que : la rugosité de surface (**Ra**) et les composantes de l'effort de coupe (**Fa**), (**Fr**) et (**Ft**) qui représentent dans notre cas les paramètres de sorties.

Des modèles mathématiques sont déduits, décrivant la relation qualitative et quantitative entre les paramètres de coupe considérés et les paramètres technologiques étudiés.

Pour cela nous avons réalisé l'usinage de l'acier **AISI D3**, avec un outil en céramique (CC650), suivant un plan d'expérience orthogonal de Taguchi du type **L16**.

Les résultats expérimentaux sont traités à l'aide du logiciel d'analyse **MINITAB 16** qui permet de donner le modèle mathématique ainsi que d'établir l'analyse de la variance **ANOVA**, cette analyse détermine le pourcentage de contribution des facteurs, des interactions et les termes carrés sur les paramètres étudiés.

II.2 Matériels utilisés

II.2.1 Machine-outil

Le tour a servi pour effectuer nos essais est un tour parallèle de la société « **TOS TRENCIN** », modèle **SN 40C** de puissance sur la broche égale à 6.6 KW (fig. II.1).

Les fréquences de rotation disponibles sur le tour sont :(45 ; 63 ; 90 ; 125 ; 180 ; 250 ; 355 ; 500 ; 710 ; 1000 ; 1400 et 2000) tr/min.

Les avances disponibles sur la machine sont :(0,08 ; 0,10 ; 0,11 ; 0,12 ; 0,14 ; 0,16 ; 0,18 ; 0,20 ; 0,22 ; 0,24 ; ...0, 8... ; 6.4) mm/min.



Figure II.1 Tour à charioté et à fileter modèle SN40[32]

II.2.2 Le matériau utilisé pour les essais d'usinage

L'acier fortement allié qui porte le nom de AISI D3 sous la désignation ISO et on peut le trouver sous d'autre nom pour différentes désignations per exemple : DIN 1.2080, JIS SKD1, GB Cr12, AFNOR Z200Cr12 ; est un acier à outil à haute teneur en chrome présentant le minimum de risques de déformation et d'altération des dimensions aux traitement thermique. Il a une excellente tenue à l'usure (résistance à l'usure). Les caractéristiques mécaniques et physiques de ce matériau sont :

- Densité : $7,7\text{g/cm}^3$
- Module d'élasticité (module de Young) : 210 Gpa.
- Conductibilité thermique : 20W/mc° .
- Coefficient moyen de dilatation (K^{-1})
 - entre 20°C et 100°C : $10,8 \cdot 10^{-6}$.
 - entre 20°C et 200°C : $11,7 \cdot 10^{-6}$.
 - entre 20°C et 300°C : $12,2 \cdot 10^{-6}$.
 - entre 20°C et 400°C : $12,6 \cdot 10^{-6}$.
 - entre 20°C et 500°C : $12,8 \cdot 10^{-6}$.
 - entre 20°C et 600°C : $13,1 \cdot 10^{-6}$.
 - entre 20°C et 700°C : $13,3 \cdot 10^{-6}$.
- Conductibilité thermique (W/m K) :

- à 20°C: 16,7
- à 350°C: 20,5
- à 700°C: 24,2

L'acier fortement allier AISI D3 est utilisé surtout pour la fabrication des matrices et poinçons de découpage et d'emboutissage outillage d'usinage du bois, outillage de presses à blocs, tiges de fermeture et moules à matières plastiques très résistants à l'usure, rouleaux profilés, filières d'étirage, galets profileurs, etc...

Les éprouvettes utilisées pour les essais sont coupées sur des barre plaines en acier AISI D3 laminées à chaud et qui possèdent un diamètre $D=60\text{mm}$ et une longueur $L=400\text{mm}$ (fig.II.2).

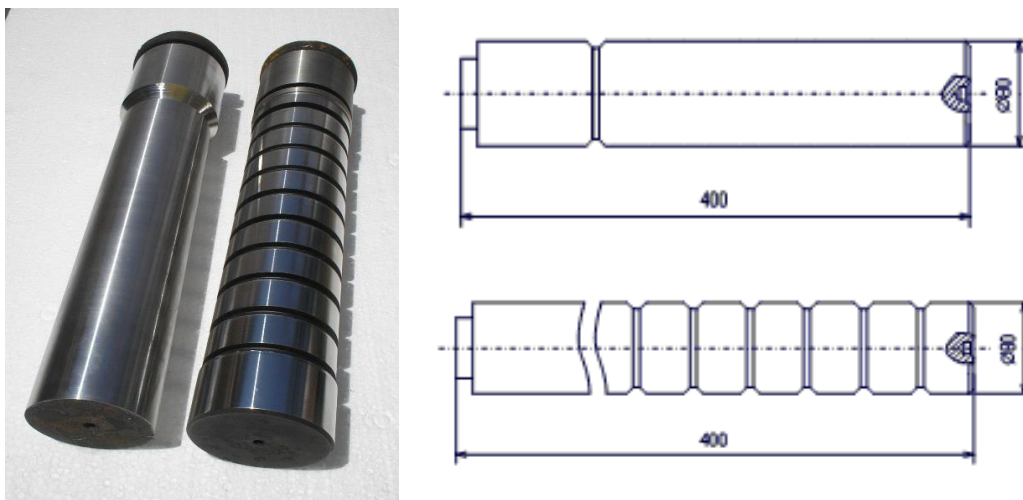


Figure II.2 Les éprouvettes utilisées

✓ Composition chimique

Sa composition chimique est donnée comme suit :

Tableau II.1 Composition chimique de l'acier AISI D3

Elément	C	Si	Mn	Cr	T	P	S	Cu	Mo	Ni
%	2	0.31	0.29	12	0.70	0.011	0.009	0.162	0.124	0.259

II.2.3 Outils de coupe

II.2.3.1 Plaquettes de coupe

La plaquette utilisée pour les essais d'usinage est une plaquette en céramique non revêtue (CC650), elle est amovible de forme carrée figure (II.3) à fixation par trou central, toutes les informations relatives sur la plaquette de coupe sont :

Tableau II.2 Informations relatives aux plaquettes utilisées [33]

Matériau de coupe	Désignation	Désignation ISO	Marque	Composition
Céramique noire	CC650	SNGA120408	Sandvik	70% Al ₂ O ₃ +30% TiC

La céramique non revêtue (CC650), de par leur propriété notamment sa dureté à chaud très élevée, sa très grande stabilité thermique et chimique, sa haute résistance à la chaleur est très appropriée pour le tournage dur.

Elle est ainsi particulièrement recommandée pour toutes les opérations d'usinage à grande vitesse et à sec.

La Propriétés mécanique de matériau à outil sont :

- Masse volumique 4200 (Kg.m³)
- Module d'élasticité 410 (GPa)
- Résistance à la rupture en flexion 700 à 900 (MPa)
- Dureté HV30 2000 à 2600 (daN/mm²)
- Coéf de dilatation 8 à 8.5 (10⁻⁶.k⁻¹)
- Conductivité thermique a 20°C 25 à 30 (w.m⁻¹.k⁻¹)

**Figure II.3** Plaquettes CC650 utilisée [34]

II.2.3.2 Porte outil

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un porte outil sur lequel se fixe la plaquette mécaniquement par trou central figure (II.4). La géométrie du porte outil est donnée au tableau (II.3).

Tableau II.3 Caractéristiques du porte plaquette utilisée

Désignation	Marque	α	γ	χ_r	λ
PSBNR 2525 M12	SANDVIK Coromant	+6°	-6°	75°	-6°

**Figure II.4** Porte outil utilisé

II.2.4 Appareillage des mesures utilisées

II.2.4.1 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe

Pour connaître l'amplitude des efforts de coupe, nous avons utilisé un dispositif moderne dynamomètre de type **KISTLER 9257 B**, qui compte parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des trois composantes de l'effort de coupe.

Ce dispositif comporte plusieurs éléments dont on en site : la plateforme, l'amplificateur de signaux, le PC avec logiciel et enfin un traceur ou une imprimante pour tracer les courbes.

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors de l'opération du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil est animé du mouvement d'avance.

Ce dernier est monté sur la plateforme, appelée aussi table, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine-outil à l'aide de la plaque de fixation.

La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de trois capteurs en quartz figure (II.5)

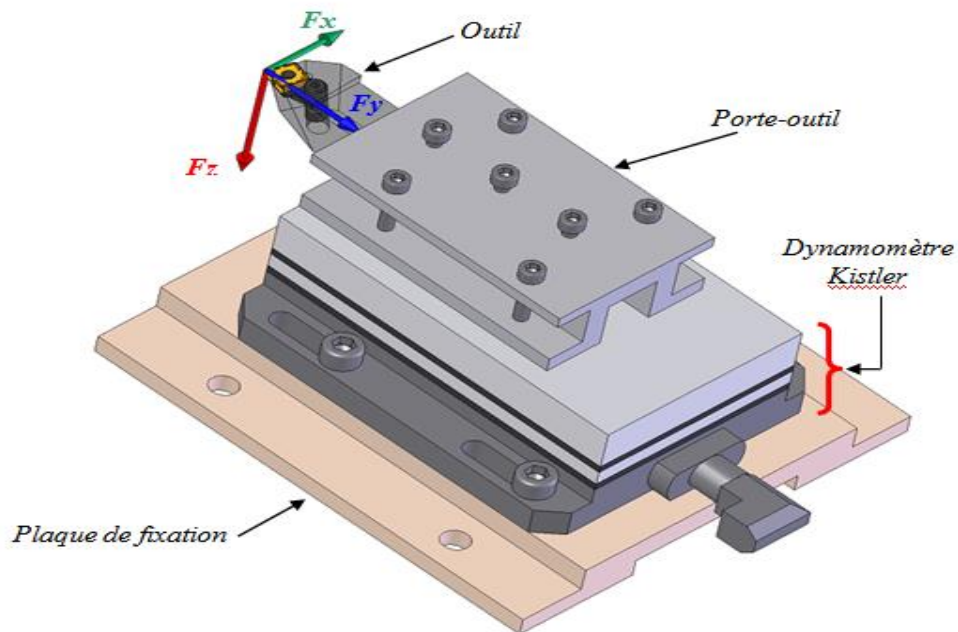


Figure II.5 Montage du dynamomètre sur la table de la machine

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties par les capteurs piézo-électriques qui sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux.

Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier.

Un logiciel (**DYNOWARE**) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimé en trois composantes :

- Force axiale : (F_a) ;
- Force radiale : (F_r) ;
- Force tangentielle : (F_t).

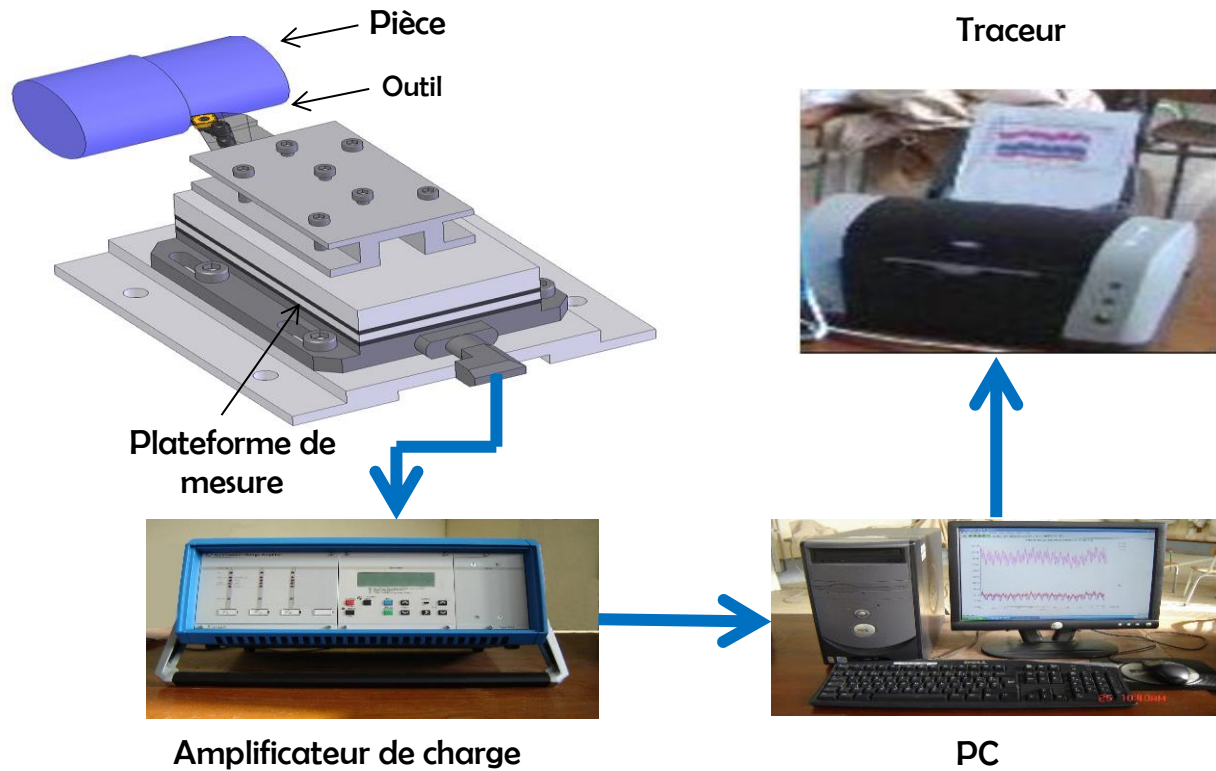


Figure II.6 Chaîne de mesure des efforts de coupe

La figure (II.7) présente un exemple d'acquisition qui montre les profils des trois composantes de l'effort de coupe (Effort axial : F_x , Effort radial : F_y et Effort tangentiel : F_z).

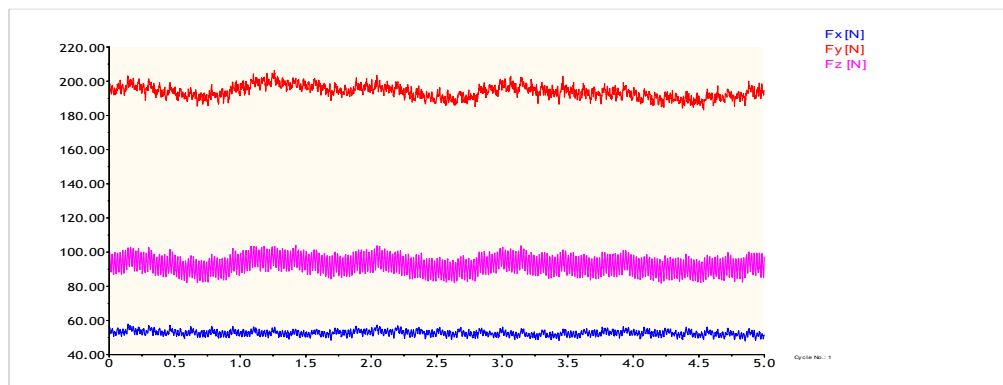


Figure II.7 Exemple d'acquisition du logiciel « DYNOWARE »

II.2.4.2 Mesure de la rugosité (R_a)

Pour la mesure de la rugosité R_a , nous avons utilisé un rugosimètre (2D) SurfTest 201 (Mitutoyo), la plage de mesure des critères de rugosité est de (0.05 à 40 μ m) pour R_a , la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce (fig.II.8).

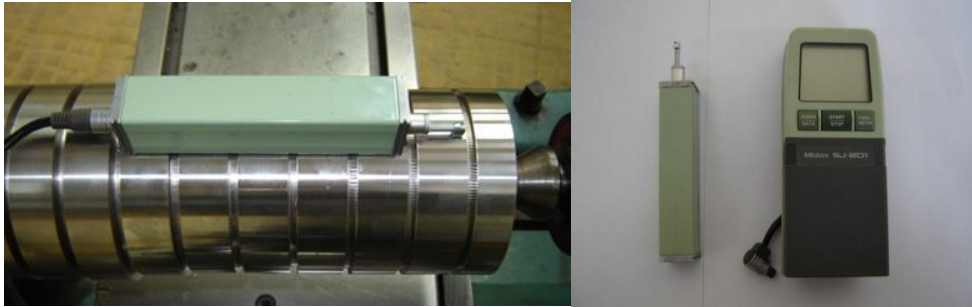


Figure II.8 Mesure de la rugosité sans démontage de la pièce

II.3 Planification des expériences

Parmi le grand nombre de facteurs qui influent sur le système d'usinage, on peut citer, les éléments du régime de coupe (V_c , a_p , f), ainsi que les conditions de travail (la rigidité de la machine...) et suivant les indications du constructeur d'outils, c.-à-d., la plage des vitesses d'usinage employée est bien déterminée par le fabricant. Tous ces facteurs jouent le rôle de paramètre d'entrée du système d'usinage. Les efforts de coupe et la rugosité représentent les paramètres de sortie.

II.4 Conditions de coupe

Vue les indications du fabricant des outils de coupe on a choisit 4 niveaux (variabilité) pour chaque facteur d'entrée (V_c , f et a_p) tableau (II.4), c'est-à-dire, dans le cas d'un plan d'expérience complet on doit effectuer 64 essais (4^3), c'est là où s'avère intéressant de choisir une méthode adéquate pour diminuer le nombre d'essai.

Tableau II.4 Conditions de coupe et leurs régimes

Niveau	Vitesse de coupe V_c (m/min)	Avance par tour f (mm/tr)	Profondeur de coupe a_p (mm)
1	75	0,08	0,1
2	105	0.12	0,2
3	150	0.16	0,3
4	210	0.20	0,4

II.5 Les méthodes de modélisation

II.5.1 Le plan orthogonal de Taguchi

II.5.1.1 Définition et notion pour les plans de Taguchi

La méthode Taguchi est une technique de conception expérimentale, ce qui est utile pour réduire le nombre des expériences de façon spectaculaire, ce qui diminue le temps

d'expérimentation, réduire le coût et enfin trouver des facteurs significatifs dans une période de temps plus courte.

Les tableaux orthogonaux Taguchi (OA) sont efficaces dans l'étude de l'ensemble de l'espace des paramètres avec petit nombre d'expériences seulement. La philosophie de base de cette méthode est d'assurer la qualité dans la phase de conception par identifier les facteurs contrôlables qui minimisent l'effet des facteurs de bruit. Par conséquent, les expériences sont menées par la manipulation des facteurs de bruit afin de provoquer une variabilité qui peut être exprimée par le signal à bruit (S/N), puis en déduire un facteur de contrôle optimal qui rend le processus robuste, dans un autre terme, résistant à la variation des facteurs de bruit.

Les réseaux orthogonaux (OA) sont des arrangements spéciaux de paramètres de facteur largement utilisés dans la conception des expériences pour gagner le maximum d'informations en utilisant le moins nombre d'expériences.

Les types des tableaux orthogonales peuvent être identifié comme $L_x(Z^y)$, où y est le nombre de paramètres d'entrée, Z est le nombre de niveau de paramètres et x est le nombre d'expériences qui doivent être exécutées pour compléter la matrice.

Exemple, un $L_{27}(3^{13})$ signifie que le plan a 27 essais et 13 facteurs avec 3 niveaux de variation pour chaque facteur. [35]

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2	
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3	
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1	
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1	
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2	
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3	
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1	
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2	
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3	
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1	
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1	
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3	
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3	
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1	
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	
28														

Figure. II.9 Exemple d'un plan Taguchi L_{27}

Une autre signification de la méthode Taguchi est le taux de signal-bruit (S/N), qui est la composante essentielle de la conception des paramètres de Taguchi.

Il y a principalement trois types de qualité caractéristiques utilisées pour mesurer la performance, qui sont : minimiser la sortie, rendre la sortie nominale et finalement maximiser la sortie, qui sont classés respectivement :

Pour le premier cas, c.-à-d., le plus petit est le meilleur, le rapport S/N est défini comme :

$$\frac{S}{N} = -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \dots \dots \dots (II.1)$$

Pour le second cas, nominal est meilleur, le rapport S/N est défini comme suite :

$$\frac{S}{N} = 10 \log \frac{\bar{y}}{s^2 y} \dots \dots \dots (II.2)$$

Pour le troisième cas, le plus grand est le meilleur, le rapport S/N s'exprime par :

$$\frac{S}{N} = -\log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \dots \dots \dots (II.3)$$

Dans notre étude, on a pris le premier cas, c.-à-d., l'obtention d'un état de surface acceptable nécessite la minimisation de la rugosité de surface (qualité de surface exigée), d'une part, aussi on a le même cas pour les composantes de l'efforts de coupe (réduire le cout de la consommation électrique).

II.5.1.2 Les étapes de plan Taguchi

Les étapes permettant d'obtenir la combinaison optimale sont présentées dans les étapes suivantes :

1. Formaliser le problème, si possible au moyen d'un modèle graphique ;
2. Sélectionner les paramètres, fixer leurs modalités (niveau de variations des paramètres) et sélectionner leurs interactions ;
3. Construire le plan en fonction des tables de Taguchi ;
4. Réaliser les essais expérimentaux ;
5. Analyser les résultats ;
6. Conclure après choix du réglage des paramètres qui peuvent être maîtrisés et faire des essais de confirmation.

II.5.2 La méthodologie des surfaces de réponse

II.5.2.1 Les principes généraux

La méthode des surfaces de réponse (RMS) est un ensemble de techniques statistiques et mathématiques utilisées pour développer, améliorer et optimiser des procédés. Elle a aussi d'importantes applications dans la conception, le développement et la formulation de nouveaux produits, ainsi que dans l'amélioration de la conception de produits existants.

L'objectif de cette méthode est, plus que de hiérarchiser les effets des différents facteurs, de décrire le plus précisément possible le comportement de la réponse en fonction des variations des facteurs.

II.5.2.2 Étapes de la méthodologie de surface de réponse

La figure. II.10 schématise l'enchaînement des étapes de la méthodologie de surface de réponses. Les phases de construction du plan et de modélisation sont étroitement liées et peuvent être menées de manière itérative. Dans une première étape, on construit un plan d'expérience optimal pour le modèle le plus simple possible. Ensuite, ce plan pourrait, éventuellement, être complété si les phases de modélisation et de validation montrent que le modèle présumé s'avère inadéquat.

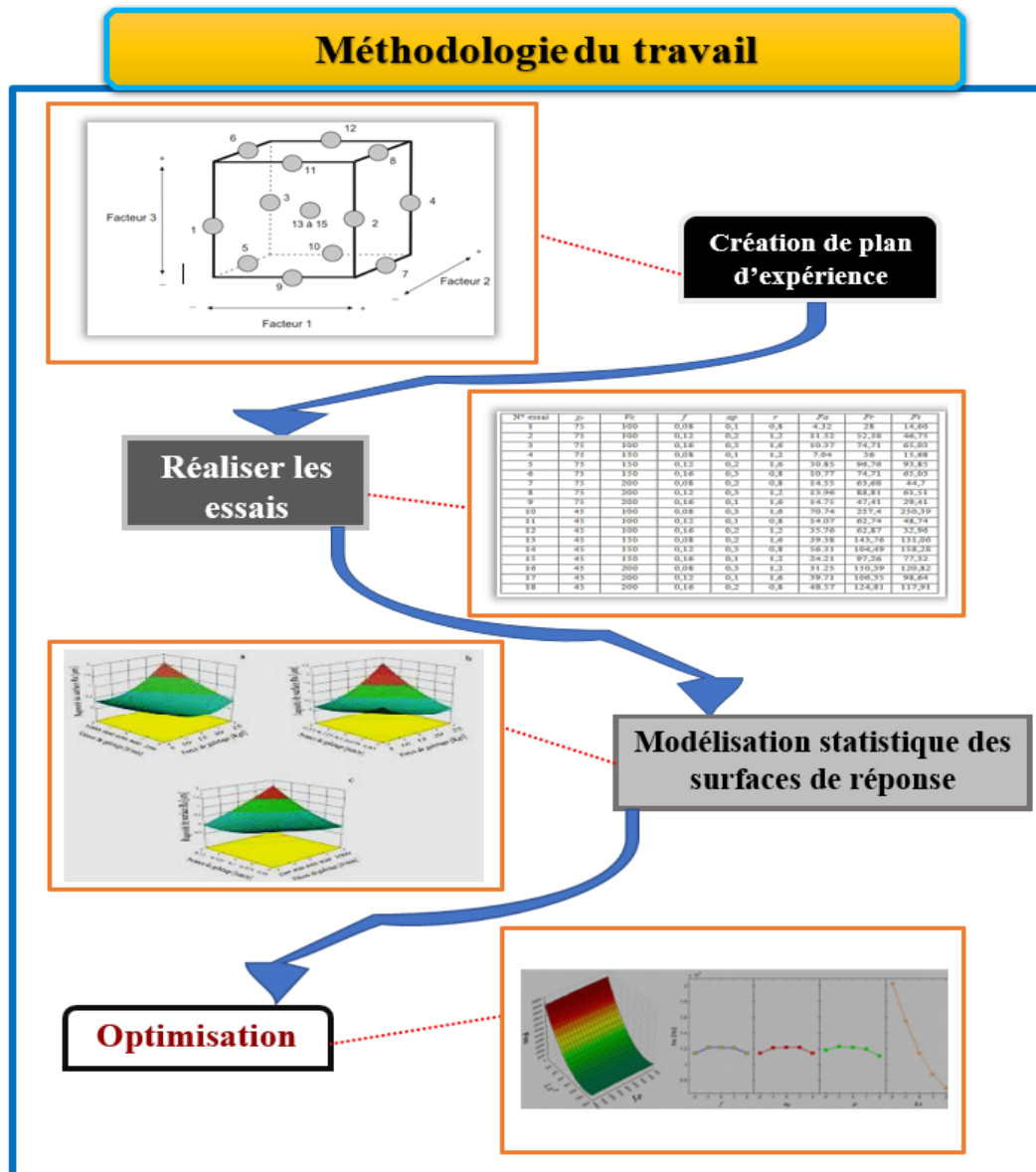


Figure II.10 Etapes de la méthodologie de surface de réponse.

II.5.3 Analyse de la variance

L'analyse de la variance (ANOVA) est une technique statistique standard qui est couramment utilisée pour déterminer l'importance des variables indépendantes sur les réponses de sortie. Elle n'analyse pas les données directement, mais détermine le pourcentage de contribution de chaque facteur dans la détermination de la variabilité (variance) des données.

La table ANOVA est composée de la somme des carrés (SC) et degrés de liberté (DF).

Le (SC) est utilisé pour estimer le carré de l'écart par rapport à la moyenne. Il est exprimé par l'équation :

$$SC_f = \frac{N}{N_{nf}} \sum_{i=1}^{N_{nf}} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \dots \dots \dots (II.4)$$

Avec : $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$ la moyenne des réponses, \bar{y}_i la réponse moyenne observée dans les expériences où le facteur f prend son niveau $i^{ème}$, N : nombre total d'expériences, N_{nf} : niveau de chaque facteur f .

La moyenne des carrés (MC) est estimée en divisant la somme des carrés sur le degré de liberté.

$$MC_i = \frac{SC_i}{df_i} \dots \dots \dots (II.5)$$

Afin de vérifier l'adéquation du modèle, l'indice F -value est utilisé avec la base que les valeurs de F -calculées devraient être supérieures à celles obtenues à partir du F -table.

$$F_i = \frac{MC_i}{MC_e} \dots \dots \dots (II.6)$$

Avec : MC_e les carrés moyens des erreurs.

La dernière colonne du tableau d'ANOVA ($Cont. \%$), montre la contribution des facteurs (en pourcentage, %) sur la variation totale, indiquant le degré d'influence sur le résultat.

$$Cont. \% = \frac{SC_i}{SC_e} \times 100 \dots \dots \dots (II.7)$$

II.6 Résultat et discussion des expériences

Les valeurs des paramètres de réponse ainsi que leurs S/N correspondant sont présentées dans le tableau (II.5), ces facteurs, chacun d'eux varie 4 fois (4 niveaux pour chaque facteur).

Tableau II.5 Résultats expérimentaux de la rugosité et des composantes des efforts de coupe et leurs facteurs signal sur bruit, Taguchi L₁₆

N°	Paramètres d'usinage			Paramètres de réponse							
	Vc (m/min)	f (tr/min)	ap (mm)	Ra (μ m)	Ra (S/N)	Fa (N)	Fa (S/N)	Fr (N)	Fr (S/N)	Ft (N)	Ft (S/N)
1	75	0.08	0.10	0.72	2.85	30.09	-29.57	181.87	-45.20	62.38	-35.90
2	75	0.12	0.20	0.91	0.82	74.64	-37.46	312.34	-49.89	122.19	-41.74
3	75	0.16	0.30	1.08	-0.67	121.12	-41.66	431.49	-52.70	183.27	-45.26
4	75	0.20	0.40	1.16	-1.29	151.56	-43.61	481.27	-53.65	253.74	-48.09
5	105	0.08	0.20	0.63	4.01	74.71	-37.47	287.25	-49.17	86.77	-38.77
6	105	0.12	0.10	0.92	0.72	34.26	-30.70	204.85	-46.23	70.32	-36.94
7	105	0.16	0.40	0.94	0.54	180.03	-45.11	511.22	-54.17	232.28	-47.32
8	105	0.20	0.30	1.08	-0.67	126.55	-42.05	445.45	-52.98	204.38	-46.21
9	150	0.08	0.30	0.51	5.85	131.48	-42.38	397.79	-51.99	128.85	-42.20
10	150	0.12	0.40	0.66	3.61	98.72	-39.89	250.38	-47.97	179.03	-45.06
11	150	0.16	0.10	0.75	2.50	30.39	-29.65	156.71	-43.90	68.56	-36.72
12	150	0.20	0.20	1.04	-0.34	55.27	-34.85	216.50	-46.71	146.91	-43.34
13	210	0.08	0.40	0.24	12.40	113.52	-41.10	310.52	-49.84	148.41	-43.43
14	210	0.12	0.30	0.47	6.56	84.71	-38.56	276.30	-48.83	157.71	-43.96
15	210	0.16	0.20	0.84	1.51	60.82	-35.68	239.65	-47.59	139.31	-42.88
16	210	0.20	0.10	0.92	0.72	28.48	-29.09	157.02	-43.92	91.66	-39.24

II.7 Analyse des résultats par la méthodologie de surface de réponse (RMS)

II.7.1 La rugosité de surface Ra

II.7.1.1 Analyse de variance ANOVA pour le rapport de bruit (S/N) de Ra

Le tableau (II.6) présente le résultat ANOVA pour le rapport de signal de bruit S/N (signal noise) de Ra, la rugosité Ra est influencée par la vitesse de coupe (Vc), l'avance (f), et la profondeur de passe (ap) avec des différents pourcentages, d'après les résultats de l'ANOVA on constate que l'avance (f) est le facteur le plus influençant sur Ra avec une contribution de **54.19%**, suivi par la vitesse de coupe passe (Vc) avec un pourcentage de **30.35%**.

Le facteur de la profondeur de passe (ap) ne présente aucune signification statistique sur la rugosité de surface (Ra), ce qui est en bonne concordance avec les résultats obtenus par Aouici et al. [27]

Tableau II.6 Analyse de variance (ANOVA) du S/N pour Ra

Terme	DF	SS	MS	F-value	P-value	Cont. %	Remarks
Vc	3	56.357	18.7860	7.510	0.019	30.35	Signifiant
f	3	100.616	33.5390	13.410	0.005	54.19	Signifiant
ap	3	13.684	4.5610	1.820	0.243	7.37	Non signifiant
Résiduel	6	15.008	2.5010			8.08	
Total	15	185.665				100	

II.7.2 Le modèle mathématique et le coefficient de diterminonn R^2

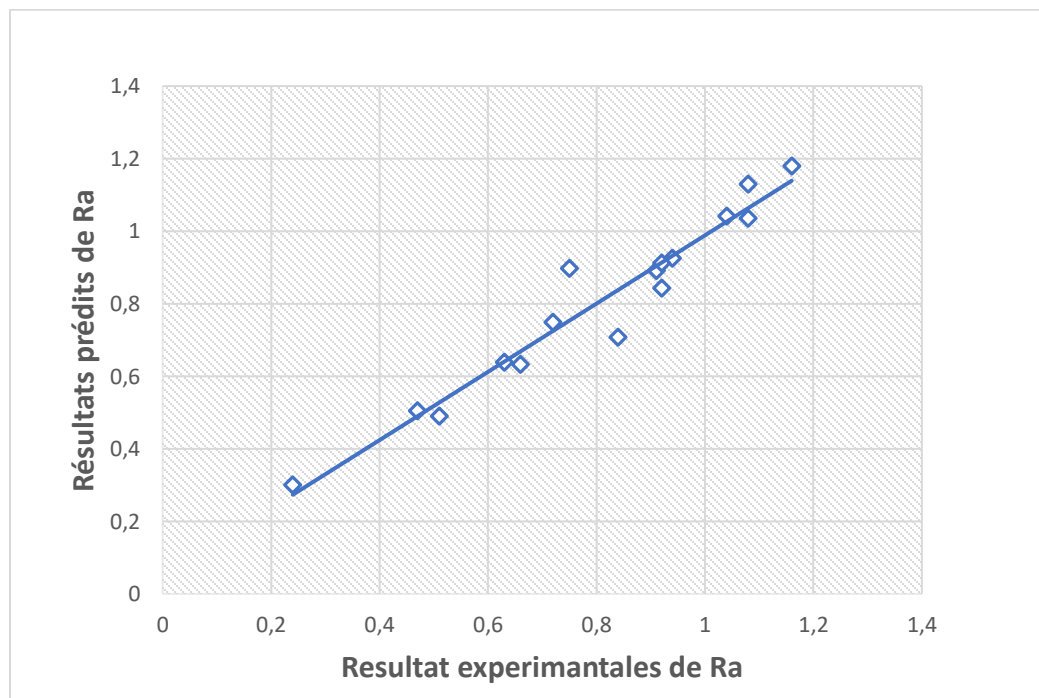
Ce modèle permet de décrire la relation entre le critère de rugosité (Ra) et les paramètres du régime de coupe (paramètres d'entrées) qui sont : Vc, f et ap. Ce modèle est jugé représentatif des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est assez s'approche, (proche de 100%) :

$$Ra = 0.629429 - 0.00264855 * Vc + 4.34375 * f - 0.3025 * ap \dots \dots \dots (II.8)$$

$$R^2 = 94.09\%$$

II.7.3 Teste de la concordance entre les résultats prédits et expérimentaux de Ra

La figure (II.12) montre qu'en général il y a une bonne distribution des résultats, en effet le nuage de points est proche de la droite de pente de 45° qui représente le cas idéal.

**Figure II.12** Les valeurs prédits en fonction des valeurs expérimentales pour Ra

II.7.4 Surface de réponse 3D pour la rugosité de surface Ra

La figure (II.13) montre le tracé de la surface de réponse de la rugosité de surface (Ra) en relation avec la vitesse de coupe (V_c) et l'avance (f), tandis que la profondeur de coupe (a_p) est maintenue au niveau moyen ($a_p=0.25$ mm). Selon cette figure, l'augmentation de l'avance de 0,08 à 0,2 mm cause une augmentation de la rugosité de surface de 117%. En conséquence, l'utilisation d'une vitesse d'avance faible est conseillée pendant le tournage. Des résultats similaires ont été trouvés par Aouici et al. [27] lors du tournage de l'acier AISI D3. À l'inverse, une augmentation de la vitesse de coupe de 75 à 210 m / min engendre une diminution des valeurs de rugosité de surface de 41%.

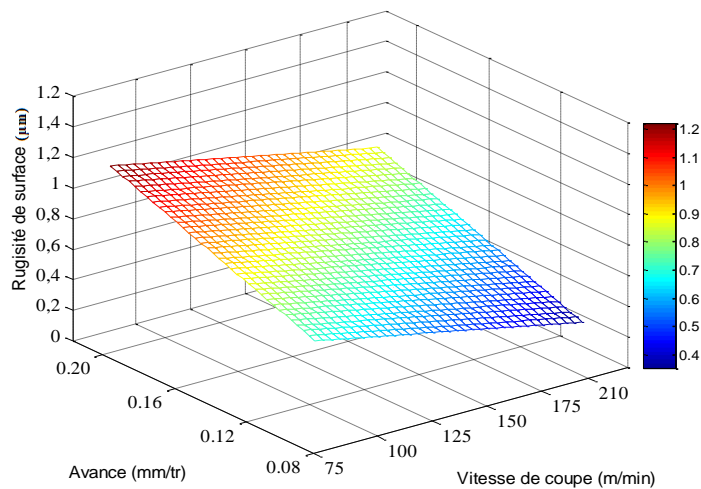


Figure II.13 Effet de la vitesse de coupe et l'avance sur la rugosité de surface Ra, pour $a_p = 0,25$ mm.

II.8 L'effort axial Fa

II.8.1 Analyse de variance ANOVA pour S/N de Fa

Le tableau (II.7) présente le résultat ANOVA pour le rapport de signal de bruit S/N (signal noise) de Fa, d'après les résultats on constate que la profondeur de passe (a_p) est le facteur le plus influençant sur Fa avec une contribution de 92.39%.

Le facteur de l'avance (f) et la vitesse de coupe (V_c) ne présentent aucune signification statistique sur la force axiale (Fa).

Tableau II.7 Analyse de la variance (ANOVA) pour S/N de Fa

Le terme	DF	SS	MS	F-value	P-value	Cont %	Remarque
Vc	3	18.66	6.221	3.75	0.079	4.35	Non significiant
f	3	4.02	1.339	0.81	0.534	0.94	Non significiant
ap	3	395.90	131.966	79.63	0.000	92.39	Signifiant
Résiduel	6	9.94		1.657		2.32	
Total	15	428.52				100	

II.8.2 Le modèle mathématique et le coefficient de ditermination R²

Ce modèle permet de décrire la relation entre l’effort axial (Fa) et les éléments du régime de coupe. Ce modèle est jugé d’une précision mathématique assez acceptable comparé aux résultats expérimentaux, puisque le coefficient de détermination est proche de l’unité.

$$Fa = 12.8111 - 0.212764 Vc + 85.1312 f + 365.062 ap \dots\dots\dots(II.9)$$

$$R^2=87.10\%$$

II.8.3 Test de concordance entre les résultats prévues et expérimentaux de Fa

La figure (II.14) montre qu’en général il y a une faible distribution des résultats, en effet le nuage de points est assez proche de la droite de pente de 45° qui représente le cas idéal.

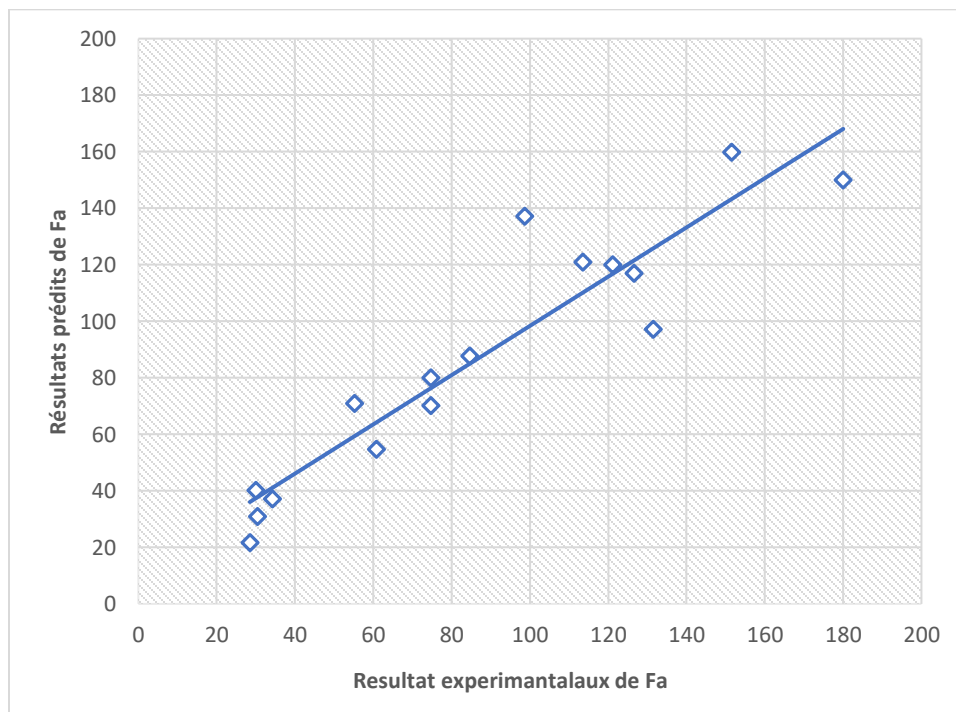


Figure II.14 Les valeurs prédites en fonction des valeurs expérimentales pour Fa

II.8.4 Surface de réponse 3D pour l'effort axial

La figure (II.15) illustre l'évolution de la force de coupe axiale (F_a) en fonction de la profondeur de coupe et l'avance par tour, la vitesse de coupe est maintenue au niveau moyen de $V_c=142.5$ m/min. On peut observer à partir de la figure que la force axiale (F_a) augmente avec l'augmentation de la profondeur de passe et l'avance.

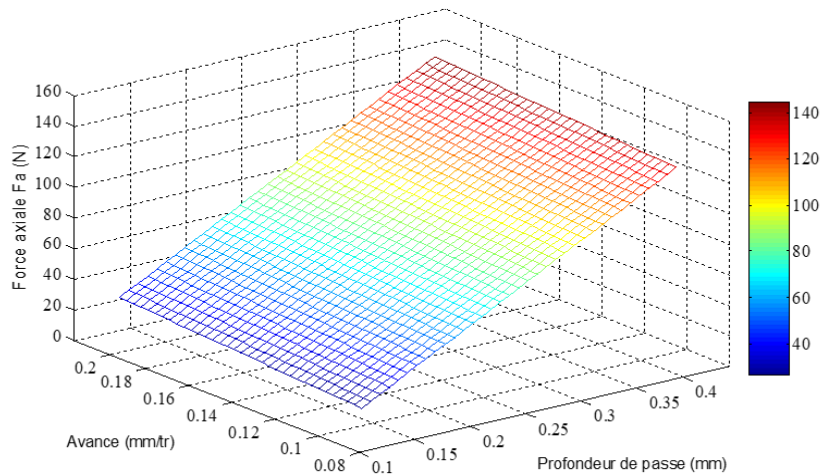


Figure II.15 Effet de la profondeur de coupe et l'avance sur F_a , pour $V_c = 142,5$ m / min.

II.9 L'effort radiale F_r

II.9.1 Analyse de variance ANOVA pour S/N de F_r

Le tableau (II.8) présente le résultat ANOVA pour le rapport de signal de bruit S/N (signal noise) de F_r , d'après les résultats on constate que la profondeur de passe (a_p) est le facteur le plus influençant sur (F_r) avec une contribution de 71.89%, suivi par la vitesse de coup avec un pourcentage de 19.86%. Le facteur de l'avance (f) ne présente aucune signification statistique sur la force radial (F_r).

Tableau II.8 Analyse de la variance (ANOVA) pour S/N de F_r

Le terme	DF	SS	MS	F-value	P-value	Cont %	Remarque
V_c	3	33.873	11.291	6.820	0.023	19.86	Signifiant
f	3	4.136	1.379	0.830	0.523	2.42	Non signifiant
a_p	3	122.638	40.879	24.680	0.001	71.89	Signifiant
Résiduel	6	9.938	1.656			5.83	
Totale	15	170.585				100	

II.9.2 Le modèle mathématique et le coefficient de détermination R^2

Ce modèle permet de décrire la relation entre l'effort radiale (Fr) et les paramètres technologiques, équation (II.10). Ce modèle est jugé représentatif des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est assez acceptable.

$$Fr = 181.357 - 0.93717 Vc + 414.769 f + 763.527 ap \dots \dots \dots (II.10)$$

$$R^2 = 77.94\%$$

II.9.3 Test de la concordance entre les résultats prévus et expérimentaux de Fr

La figure (II.16) montre qu'en général il y a une faible distribution des résultats, en effet le nuage de points est assez proche de la droite de pente de 45° qui représente le cas idéal.

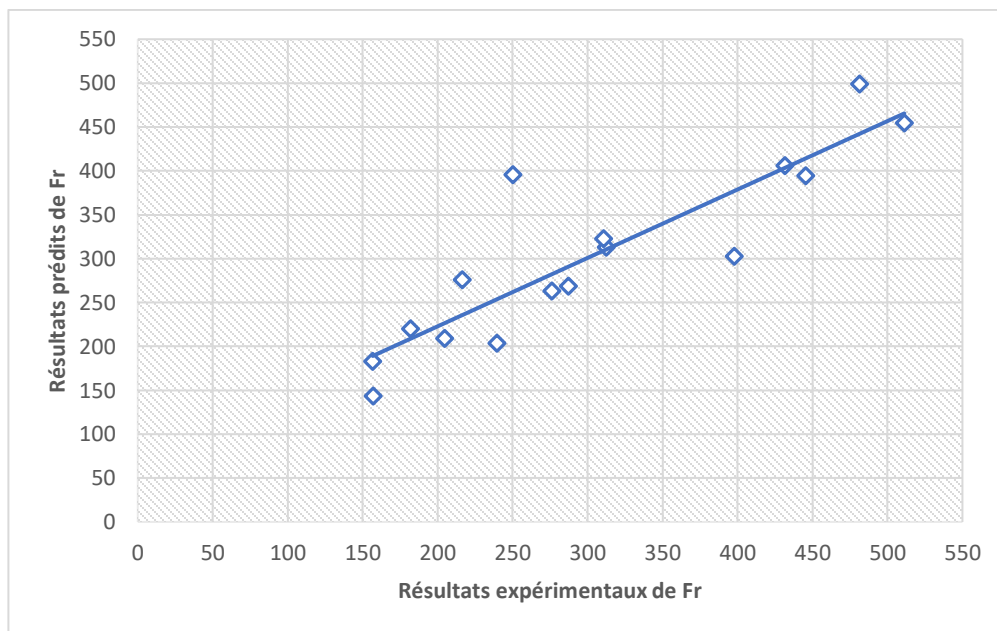


Figure II.16 Les valeurs prédites en fonction des valeurs expérimentales pour Fr

II.9.4 Surface de réponse 3D pour l'effort radial

La figure (II-17) permet d'évaluer l'influence simultanée des termes (Vc ; ap) sur l'effort radial (Fr), la figure indique que les pentes de la profondeur de passe (ap) et de la vitesse de coup (Vc) sont d'une magnitude assez importante, l'augmentation simultanée de (ap) et (Vc) cause une augmentation remarquable de l'effort radiale (Fr).

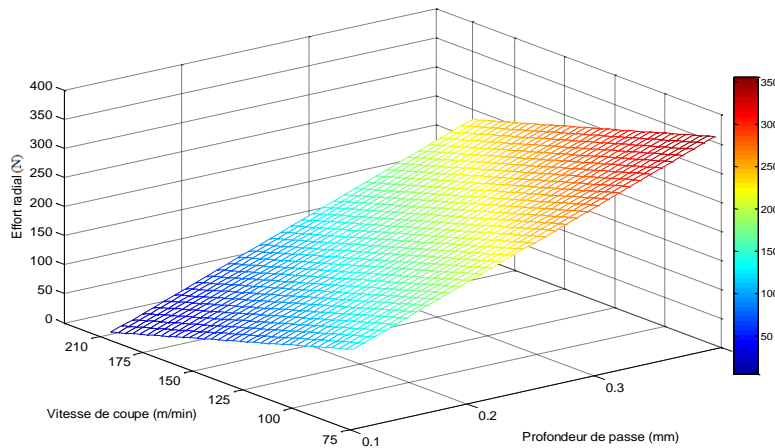


Figure II.17 Effet de la profondeur de coupe et la vitesse sur la force radiale F_r , pour $f=0.14$ mm/tr.

II.10 L’effort tangentielle F_t

II.10.1 Analyse de variance ANOVA pour S/N de F_t

Le tableau (II.9) présente le résultat ANOVA pour le rapport de signal de bruit S/N (signal noise) de F_t , d’après les résultats on constate que la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus influençant sur F_t avec une contribution de 81.03%, suivi par l’avance avec un pourcentage de 17.07%. Le facteur de la vitesse de coupe ne présente aucune signification statistique sur la force tangentielle (F_t).

Tableau II.9 Analyse de la variance (ANOVA) pour S/N de F_t

Le terme	DF	SS	MS	F-value	P-value	Cont %	Remarque
Vc	3	1.703	0.568	1.400	0.332	0.78	Non significiant
f	3	37.340	12.447	30.630	0.000	17.07	Signifiant
ap	3	177.242	59.081	145.390	0.000	81.03	Signifiant
Résiduel	6	2.438	0.406			1.11	
Totale	15	218.723				100	

II.10.2 Le modèle mathématique et le coefficient de ditermination R^2

Ce modèle permet de décrire la relation entre l’effort tangentielle (F_t) et les éléments du régime de coupe. Ce modèle est jugé représentatif des résultats expérimentaux puisque le coefficient de détermination est assez proche à l’unité.

$$F_t = -22.9978 - 0.168486 V_c + 565.631 f + 435.162 ap \dots \dots \dots (II.11)$$

$$R^2=96.75\%$$

II.10.3 Test de concordance entre les résultats prévus et expérimentaux de F_t

La figure (II.18) montre qu'en général il y a une faible dispersion des résultats, en effet le nuage de points est assez proche de la droite de pente de 45° qui représente le cas idéal.

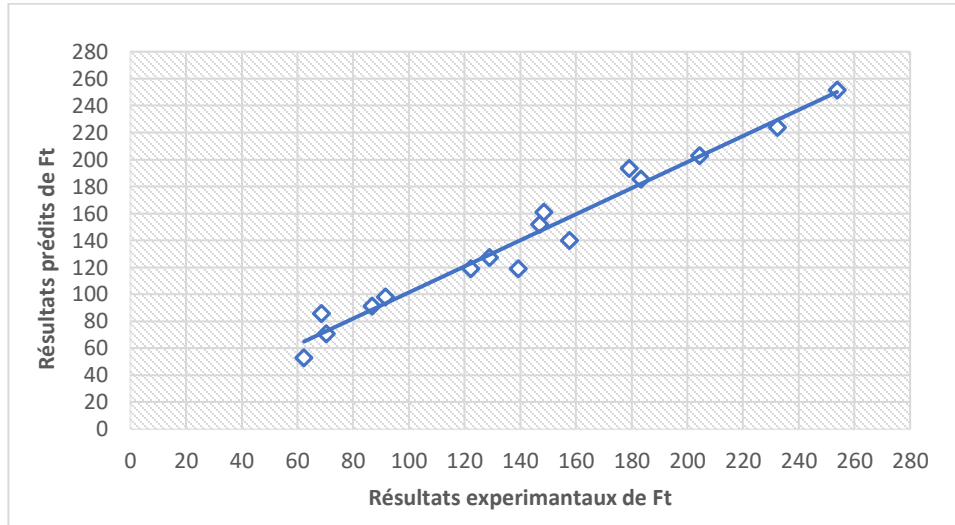


Figure II.18 Valeurs prédites en fonction des valeurs expérimentales pour F_t

II.10.4 Surface de réponse 3D pour l'effort tangentiel F_t

La figure (II.19) ci dessus permet d'évaluer l'influence simultanée de (a_p ; f) sur l'effort tangentiel (F_t), la figure indique que la pente suivant l'augmentation de la profondeur de passe (a_p) est la plus importante suivie par la pente suivant l'avance (f).

L'augmentation simultanée de (a_p) et (f) entraîne une augmentation quantitative importante de l'effort (F_t), par la suite, pour diminuer les valeurs de la composante (F_t) on doit employer des petites profondeurs de passe (a_p) avec des petites avances de coupe (f)

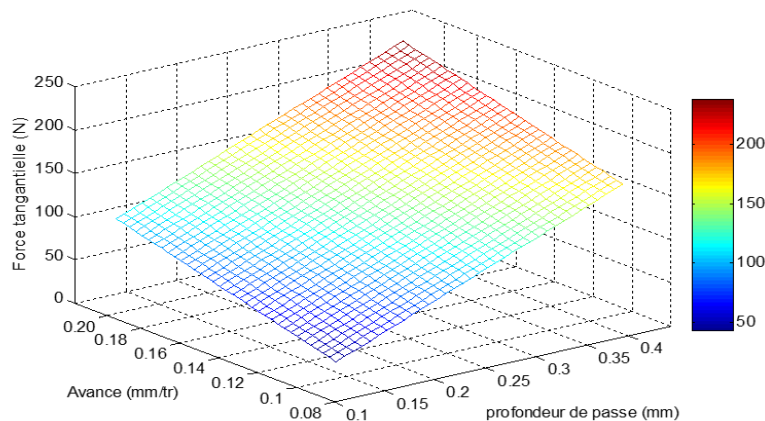


Figure II.19 Effet de la profondeur de coupe et l'avance sur la force tangentielle F_t , pour une vitesse de coupe moyenne $V_c = 142,5$ m / min.

On peut conclure que la profondeur de coupe présente un maximum d'influence sur les composantes des efforts de coupe, en raison de la section transversale de l'outil qui devient plus grande avec le volume du métal déformé.

II.11 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude théorique issue des résultats expérimentaux qui est consacré à la modélisation des paramètres de coupe (vitesse de coupe (V_c), avance par tour (f) et la profondeur de passe (a_p)), en utilisant la méthodologie de surface de réponse, en but de trouver les facteurs significatifs dans notre processus de coupe mise en étude.

L'étude réalisée dans ce chapitre débouche sur les conclusions suivantes

- L'analyse statistique de variance ANOVA a confirmé que l'avance (f) a la plus grande influence sur le critère de rugosité de surface R_a , avec une contribution de 54.19%.
- L'analyse de la variance des données d'usinage a confirmé que la profondeur de passe (a_p) possède l'influence la plus élevée sur les efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) avec des contributions de (92.39%, 71.89% et 81.03%), respectivement.
- L'analyse de variance ANOVA permet de déterminer les modèles mathématiques et les coefficients de détermination (R^2) de chacun des paramètres étudiés.
- Les modèles mathématiques obtenus permettent de donner des prédictions qui sont en bonne concordance avec les valeurs expérimentales.
- Les tracés des courbes de surfaces de réponse ont permis de bien visualiser les effets de chaque paramètre technologique sur nos facteurs mis en étude, c.-à-d., intensité de la pente.

III.1 Introduction

Un réseau de neurones artificiels est un modèle de calcul dont la conception est très schématiquement inspirée du fonctionnement d'un vrai neurone (humain ou animal). Les réseaux de neurones sont généralement optimisés par des méthodes d'apprentissage de type statistique, si bien qu'ils sont placés d'une part dans la famille des applications statistiques, qu'ils enrichissent avec un ensemble de paradigmes permettant de générer de vastes espaces fonctionnels souples et partiellement structurés, et d'autre part dans la famille des méthodes de l'intelligence artificielle qu'ils enrichissent en permettant de prendre des décisions s'appuyant davantage sur la perception que sur le raisonnement logique formel [35]

III.2 Les composants d'un ANN

Un réseau de neurones artificiels est composé d'un ensemble des neurones. Un neurone artificiel est une unité de calcul qui reçoit un certain nombre d'entrées en provenance directe de l'environnement ou de neurones amont.

Lorsque l'information est issue d'un neurone, on lui associe un poids W (poids, abréviation de Wight en anglais) qui représente la capacité du neurone amont à exciter ou inhiber le neurone aval. Chaque neurone est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones avals. Ils sont arrangés par couche et sont connectés avec ceux de la couche suivante.

Pour résumer, chaque neurone calcule une sortie unique en se basant sur les informations qui lui sont données. La figure (III.1) montre la composition d'un neurone artificiel.

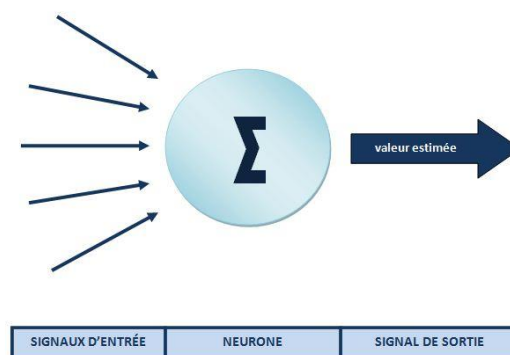


Figure III.1 Composition d'un neurone artificiel.

Un neurone artificiel est donc composé de (figure III.2) :

- Un ensemble de **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 chaque connexion neuronale.

- Une fonction de sommation Σ qui calcule la **somme pondérée** (sous-entendu pondérée par les poids) des entrées :

$$(X_1 \times W_1) + (X_2 \times W_2) + \dots + (X_n \times W_n) \dots \dots \dots (III.1)$$

- Un biais **b** associe pour chaque neurone.
- Une **fonction d'activation f** qui nous donne le nouvel état du neurone à partir d'une certaine fonction choisie : **f (x)**
- Et enfin une sortie **Y**.

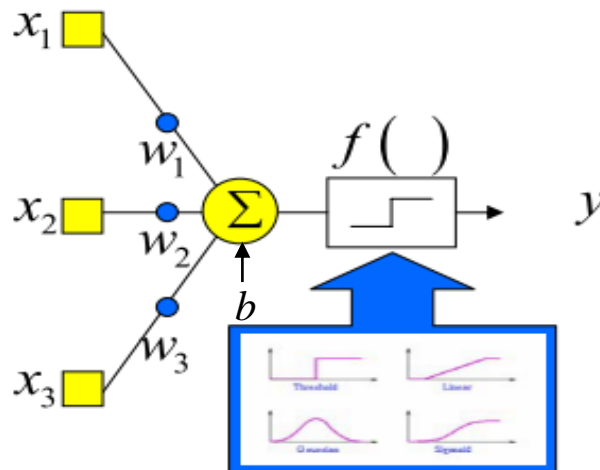


Figure III.2 Arrangement logique d'un neurone

Pour le neurone de la figure (III.3), nous avons :

$\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_R\}$, (Vecteur colonne), $\mathbf{W} = \langle w_{1.1}, w_{1.2}, \dots, w_{1.R} \rangle$, (Vecteur ligne)

$$w_{1.1} x_1 + w_{1.2} x_2 + \dots + w_{1.R} x_R + b_1 = \mathbf{W} * \mathbf{X} + \mathbf{b}$$

La sortie **Y** est alors de la forme :

$$Y = f(\mathbf{W} * \mathbf{X} + \mathbf{b}) \dots \dots \dots (III.2)$$

Le neurone en tant qu'unité élémentaire agit de la façon suivante :

- **1^{ère} phase** : Le neurone fait le calcul de la somme pondérée des entrées (en fonction de la force des connexions). L'apprentissage ayant été réalisé auparavant, le poids des connexions à cette étape est déjà déterminé et fixe.

- **2^{ème} phase** : À partir de la valeur obtenue, une fonction d'activation ou de transfert va calculer la valeur de l'état du neurone. Le neurone compare la somme pondérée des entrées à une valeur de seuil et fournit alors une réponse en sortie.

Une couche de neurones peut être représentée par le schéma et les connexions montrées sur la figure III.3 ci-dessous :

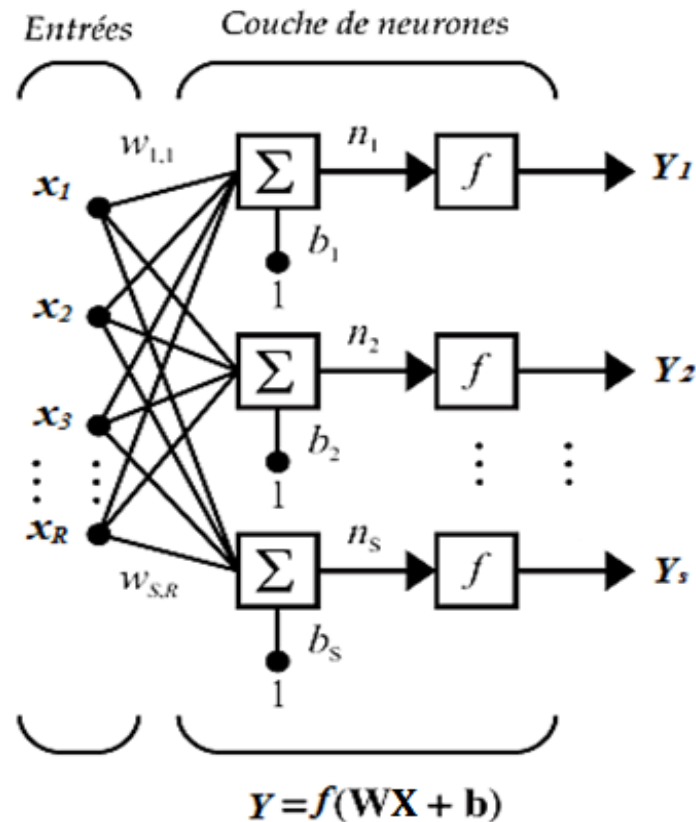


Figure III.3 Schéma d'une couche de neurones

Les fonctions de transfert (fonction d'activation) déterminent la valeur de l'état du neurone qui sera transmise aux neurones avants. Il existe de nombreuses fonctions de transfert possibles [35], les plus utilisées sont présentées sur la figure (III.4). Elles peuvent prendre une infinité de valeurs comprises dans l'intervalle $[-1 ; +1]$.

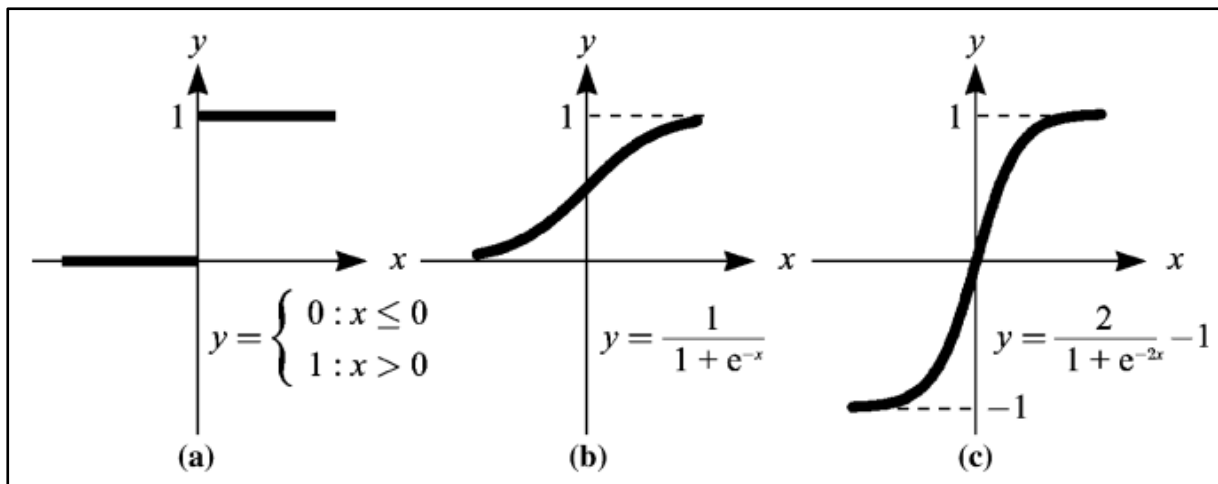


Figure III.4 Fonctions de transfert les plus utilisées pour un réseau de neurones
(a) : fonction seuil, (b) tangente sigmoïde, (c) tangente hyperbolique

III.3 L'apprentissage

L'apprentissage est la propriété la plus intéressante des réseaux neuronaux, elle est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré.

Dans la majorité des algorithmes actuels, les variables modifiées durant l'apprentissage sont les poids des connexions W_i . C'est cette modification qui permet d'accorder la réponse du réseau aux exemples qu'on lui soumet.

Il adapte la force de ses connexions soit en comparant le résultat qu'il a calculé et la réponse qu'on attend de lui (**apprentissage supervisé**), soit en détectant les régularités statistiques des entrées (**apprentissage non-supervisé**).

A l'issue de l'apprentissage, les poids sont fixés : c'est alors la phase d'utilisation (le réseau sait reconnaître une croix même si elle est bruitée ou détériorée). La méthode la plus utilisée lors de l'apprentissage est la rétropropagation : on entre des valeurs dans les cellules d'entrée et en fonction de l'erreur obtenue en sortie (le delta), on corrige les poids accordés aux pondérations. C'est un cycle qui est répété jusqu'à ce que la courbe d'erreurs du réseau ne soit croissante. [36]

III.4 Le perceptron

Un réseau de neurones monocouche, aussi appelé perceptron, est caractérisé de la manière suivante [35].

- Il possède n informations en entrée ;
- Il est composé de p neurones, que l'on représente généralement alignés verticalement.

Chacun peut en théorie avoir une fonction d'activation différente.

- Chacun des p neurones est connecté aux n informations d'entrée.

Le réseau de neurones possède ainsi n informations en entrée et p sorties, chaque neurone renvoyant sa sortie figure (III.5).

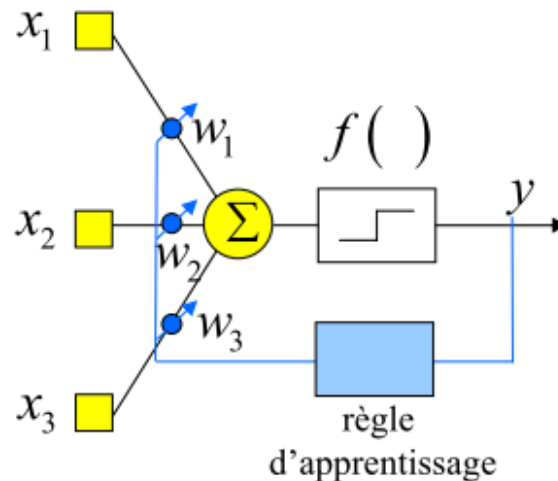


Figure III.5 Schéma de principe du perceptron simple[38]

III.5 La rétropropagation

La rétro propagation consiste à rétro propagé l'erreur commise par un neurone à ses synapses et aux neurones qui y sont reliés. Pour les réseaux de neurones, on utilise habituellement la rétro propagation du gradient de l'erreur (ou back-propagation en anglais), qui consiste à corriger les erreurs selon l'importance des éléments qui ont justement participé à la réalisation de ces erreurs : les poids synaptiques qui contribuent à engendrer une erreur importante se verront modifiés de manière plus significative que les poids qui ont engendré une erreur marginale. [35]

III.6 Le taux d'apprentissage adaptatif

Le taux d'apprentissage dans les réseaux de neurones est un paramètre de contrôle de certains algorithmes d'apprentissage, contrôlant la vitesse à laquelle les pondérations sont ajustées. [37]

III.7 Modélisation de la rugosité de surface R_a et de l'effort tangentielle F_t basée sur les réseaux de neurones

Le modèle neuronal adopté dans la démarche de modélisation de la rugosité de surface (R_a) et l'effort tangential (F_t), est le perceptron multicouche de type Feed-forward avec

l'algorithme de rétropropagation. Chaque neurone dans une couche est connecté à tous les neurones de la couche précédente et de la couche suivante et il n'y a pas de connexions entre les neurones d'une même couche. L'information se propage couche en couche sans que le retour en arrière soit possible. Les données expérimentales présentées dans le tableau (III.1) ont été utilisées pour établir les modèles.

Le plan expérimental se compose de 16 essais, dont 10 essais ont été employés pour l'apprentissage du réseau et 6 essais ont été choisis aléatoirement pour tester l'efficacité du réseau. Le problème qui reste est l'obtention de l'architecture adéquate du réseau, en d'autres termes le problème est de trouver les nombres optimaux de couches cachées et de neurones dans chaque couche. Pour cela 2 structures ont été testées pour chaque sortie (Ra et Ft), les résultats des tests sont présentés dans les tableaux (III.2), (III.4) et que la meilleure structure est : **3-5-1** (3 paramètres de coupe, une couche cachée avec 5 **neurones** et 1 paramètre de sortie) pour Ra et Ft. La fonction de transfert (fonction d'activation) utilisée pour la couche cachée est une tangente hyperbolique et celle utilisée pour le nœud de sortie (Ra ou Ft) est une fonction de transfert linéaire. Le logiciel de calcul JMP 13 a été utilisé pour l'apprentissage et la validation du réseau.

Remarque :

Dans notre étude, on a fait un dimensionnement des valeurs d'entrées (Ra et Ft) et cela afin de mettre toutes les grandeurs sur la même échelle, c'est-à-dire, de 0 à 1, les valeurs en limites sont mentionnées en gras dans le table (III.1) , les formules utilisées sont les suivantes :

$$\frac{Ra_{min}}{Ra_{max}} \leq \frac{Ra_i}{Ra_{max}} \leq \frac{Ra_{max}}{Ra_{max}} \quad (III.A)$$

$$\frac{0.24}{1.16} \leq \frac{Ra_i}{Ra_{max}} \leq 1$$

$$\frac{Ft_{min}}{Ft_{max}} \leq \frac{Ft_i}{Ft_{max}} \leq \frac{Ft_{max}}{Ft_{max}} \quad (III.B)$$

$$\frac{62}{253} \leq \frac{Ft_i}{Ft_{max}} \leq 1$$

Tableau III.1 Résultats expérimentaux pour Ra et Ft

N° d'essais	Paramètres d'entrées			Paramètres de sorties		Par. Sans diamantions	
	Vc	f	ap	Ra (μm)	Ft (N)	Ra	Ft
1	75	0.08	0.1	0.72	62.38	0.62069	0.245842
2	75	0.12	0.2	0.91	122.19	0.784483	0.481556
3	75	0.16	0.3	1.08	183.27	0.931034	0.722275
4	75	0.2	0.4	1.16	253.74	1	1
5	105	0.08	0.2	0.63	86.77	0.543103	0.341964
6	105	0.12	0.1	0.92	70.32	0.793103	0.277134
7	105	0.16	0.4	0.94	232.28	0.810345	0.915425
8	105	0.2	0.3	1.08	204.38	0.931034	0.80547
9	150	0.08	0.3	0.51	128.85	0.439655	0.507803
10	150	0.12	0.4	0.66	179.03	0.568966	0.705565
11	150	0.16	0.1	0.75	68.56	0.646552	0.270198
12	150	0.2	0.2	1.04	146.91	0.896552	0.578978
13	210	0.08	0.4	0.24	148.41	0.206897	0.58489
14	210	0.12	0.3	0.47	157.71	0.405172	0.621542
15	210	0.16	0.2	0.84	139.31	0.724138	0.549027
16	210	0.2	0.1	0.92	91.66	0.793103	0.361236

III.7.1 Modélisation de la rugosité de surface Ra par ANN

L'architecture adéquate pour modéliser la rugosité de surface Ra est **3-5-1**, c.-à-d. 3 nœuds d'entrées (paramètres de coupe), 5 nœuds pour la couche cachée et 1 nœud pour la sortie (rugosité de surface).

Le tableau (III.2) présent les erreurs pour les 6 tests, le choix de la structure optimale est basé sur la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) ainsi que le R^2 et le RMSE les plus petits correspondent à la structure optimale.

Tableau III.2. Performance des structures ANN du modèle de Ra

Architecture neuronale	R^2 entraînement	R^2 validation	RMSE entraînement	RMSE validation
3_5_1	0.9998	0.9985	0.00165	0.01059
3_6_1	0.9999	0.9898	4.45×10^{-7}	0.02812
3_7_1	0.9999	0.9878	0.00133	0.0307
3_8_1	0.9999	0.9944	0.0014	0.02083
3_9_1	1.0000	0.9889	1.119×10^{-15}	0.02934
3_10_1	0.8244	0.9793	0.06979	0.04002

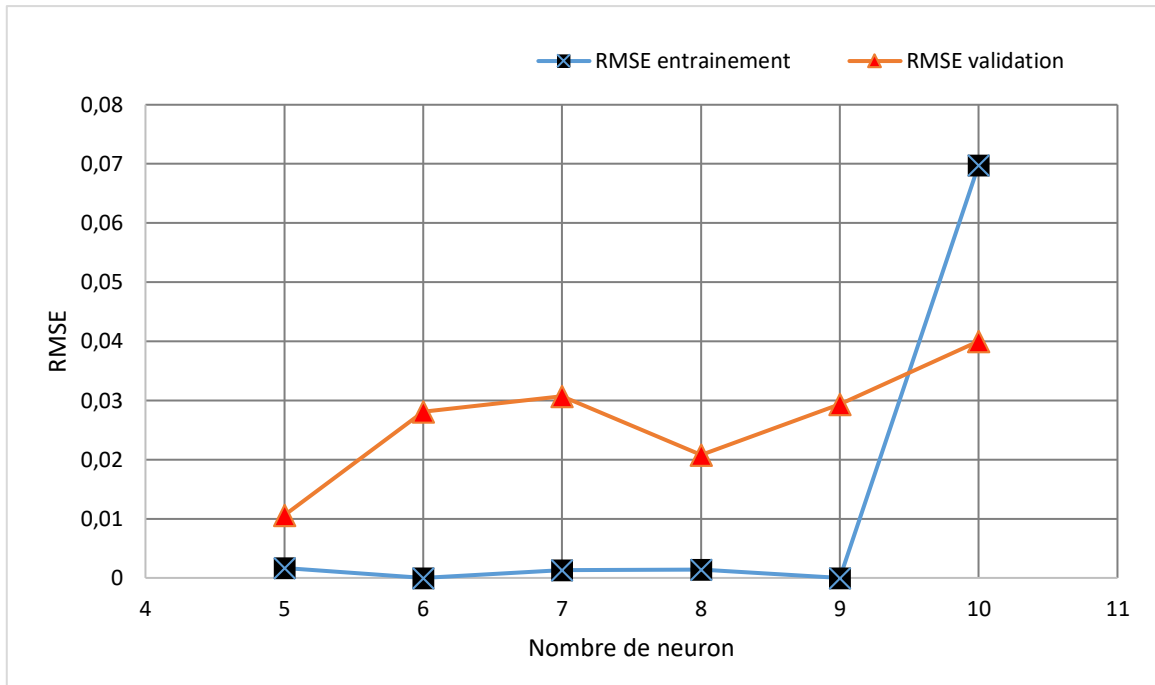


Figure III.6 Variation du RMSE on fonction de nombre de neurone

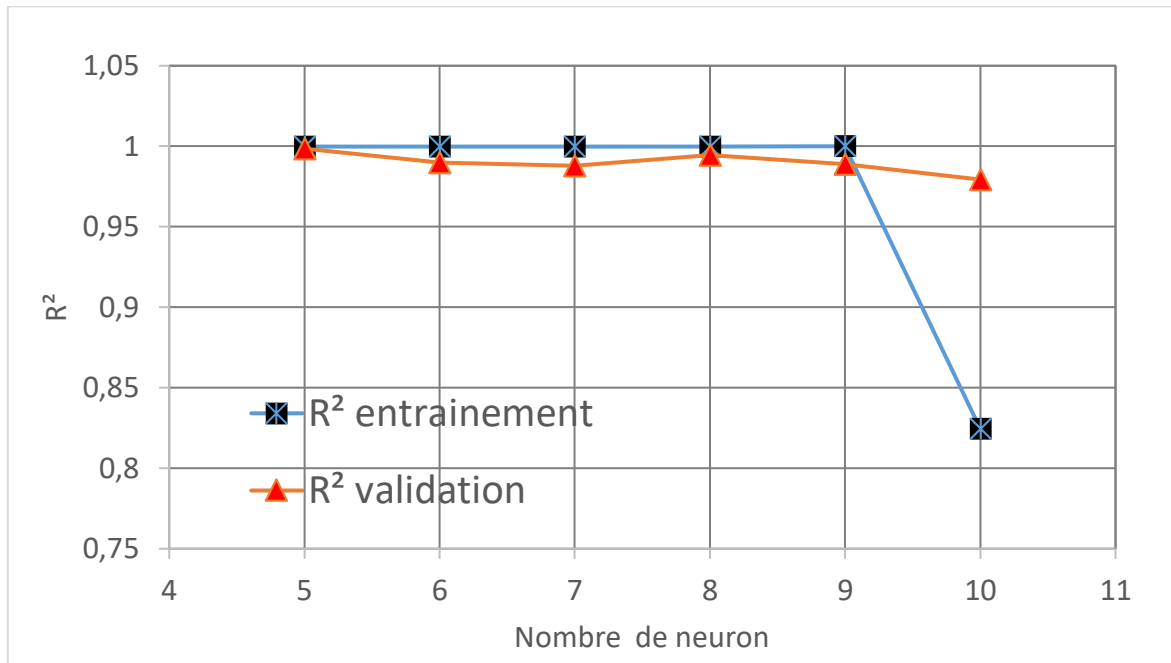


Figure III.7 Variation du R² on fonction de nombre de neurone

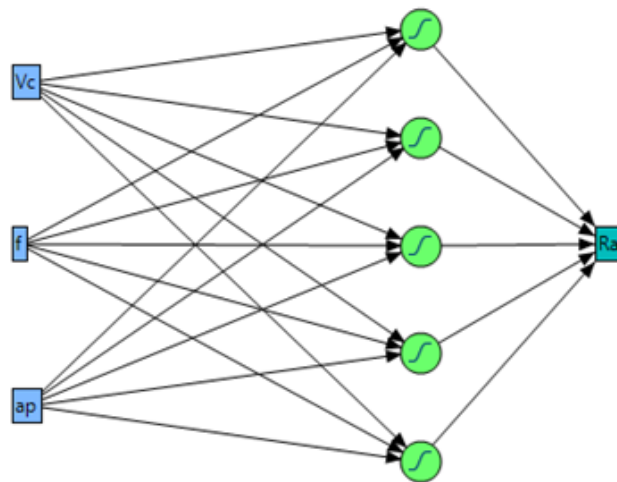


Figure III.8 Structure ANN pour Ra.

L'équation ci-dessous présente le modèle mathématique obtenu par la méthode du réseau de neurones pour la rugosité de surface Ra. H_1 à H_5 présentent les sorties de chaque neurone (dans notre cas 5 neurones) de la couche cachée.

$$H1 = \tanh(.5*(0.0053916081938291*Vc + 12.9911480638635*f + 1.66025149638968*ap + -2.66908502999981));$$

$$H2 = \tanh(.5*(-0.0461254328071132*Vc + -42.2550022210695*f + 5.26048291914807*ap + 10.9742313021388));$$

$$H3 = \tanh(.5*(-0.00048067756305559*Vc + 14.347212853256*f + -7.29790355705179*ap + -1.41728139824272));$$

$$H4 = \tanh(.5*(0.00459699853677728*Vc + 9.68476713352336*f + -9.20642368498827*ap + 0.659027427414726));$$

$$H5 = \tanh(.5*(-0.00108896910898769*Vc + 5.87568858308145*f + 2.50954519534728*ap + -1.26097649966992));$$

La somme des sorties des 5 neurones de la couche cachée multiplié par une fonction de transfert linéaire, nous donne le modèle de la rugosité de surface Ra.

$$Ra = 0.25894*H1 + 0.28*H2 - 0.2654*H3 + 0.769465*H4 + 1.15504*H5 + 0.38136; \dots \dots \dots (III.3)$$

Le tableau III.3 présente les valeurs du coefficient de corrélation, la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) le nombre des essais pour les deux cas (apprentissage et validation) :

Tableau III.3 Les critères R^2 et RMSE du modèle de la rugosité de surface Ra

<i>Apprentissage</i>		<i>Validation</i>	
Ra	Mesures	Ra	Mesures
R^2	99.98	R^2	99.85
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0.00165	Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0.01059
Somme fréquences	10	Somme fréquences	6

La figure (III.9) présente le graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues dans les deux cas (apprentissage et validation). Les valeurs de la rugosité de surface Ra s'alignent sur une droite ce qui implique que le modèle mathématique de la rugosité de surface est adéquat. Les coefficients de corrélations $R^2 = 0.9985$ pour l'apprentissage et $R^2 = 0,9998$ pour la validation présentent 99,98% et 99,85% de variation de la réponse expliqué par le modèle.

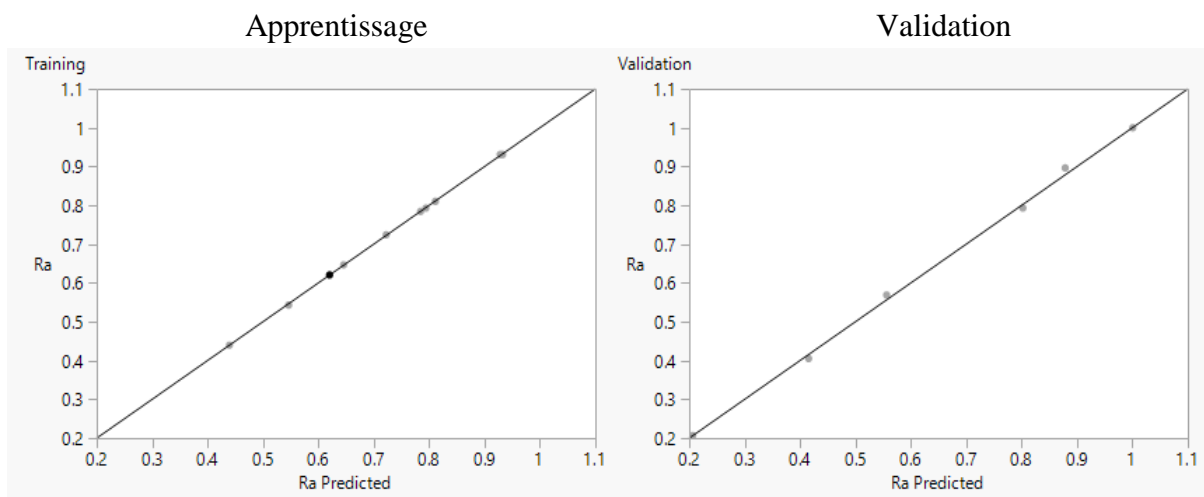


Figure III.9 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues pour Ra

La figure (III.10) montre le tracé de la surface de réponse de la rugosité de surface (Ra) issue du modèle ANN de l'équation (III.3) dans le cas où on a varié la vitesse de coupe (V_c) et l'avance (f), tout en maintenant la profondeur de coupe à une valeur de moyen ($a_p=0.25$ mm). Selon cette figure, l'augmentation de l'avance de 0,08 à 0,2 mm engendre une augmentation significative de la rugosité de surface. En conséquence, même constatation que la

RMS, c'est-à-dire, l'utilisation d'une vitesse d'avance faible est recommandée pendant le tournage.

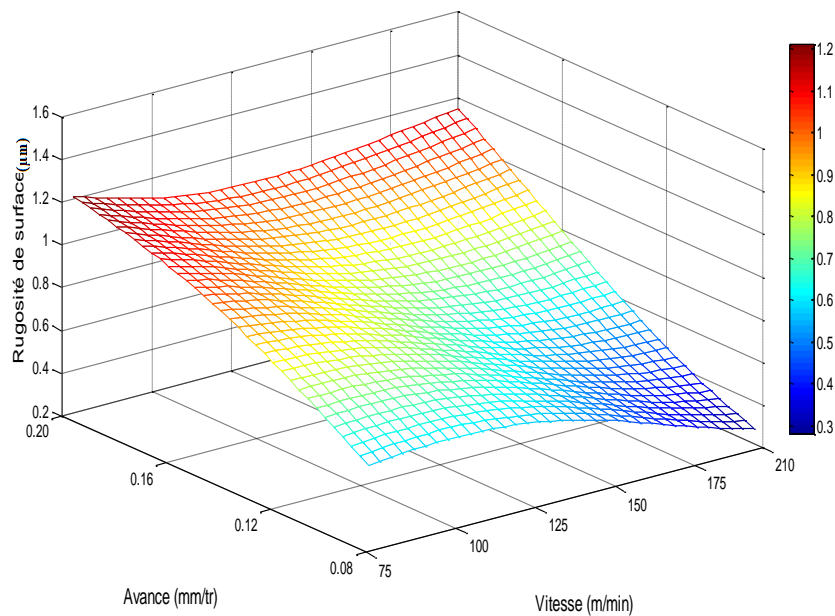


Figure III.10 Effet de la vitesse de coupe et l'avance sur la rugosité de surface R_a , pour $a_p = 0,25$ mm.

III.7.2 Modélisation de l'effort tangentiel F_t par ANN

L'architecture adéquate pour modéliser l'effort tangentiel F_t , la structure choisie est **3-5-1**, c.-à-d. 3 nœuds d'entrées (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe), 5 nœuds pour la couche cachée et 1 nœud pour la sortie (effort tangentiel). Le tableau (III.4) présente les erreurs pour les 6 tests, la structure optimale a été choisie basé sur le plus petit RMSE.

Tableau III.4 Performance des structures ANN du modèle de F_t

Architecture neuronale	R^2 entraînement	R^2 validation	RMSE entraînement	RMSE validation
3_5_1	0.9999	0.999	0.00164	0.00783
3_6_1	1.0000	0.998	2.08×10^{-5}	0.01119
3_7_1	0.9989	0.9996	0.0065	0.00461
3_8_1	0.9985	0.996	0.0076	0.01608
3_9_1	1.0000	0.9967	3.12×10^{-15}	0.01445
3_10_1	1.0000	0.9927	0.00002	0.02171

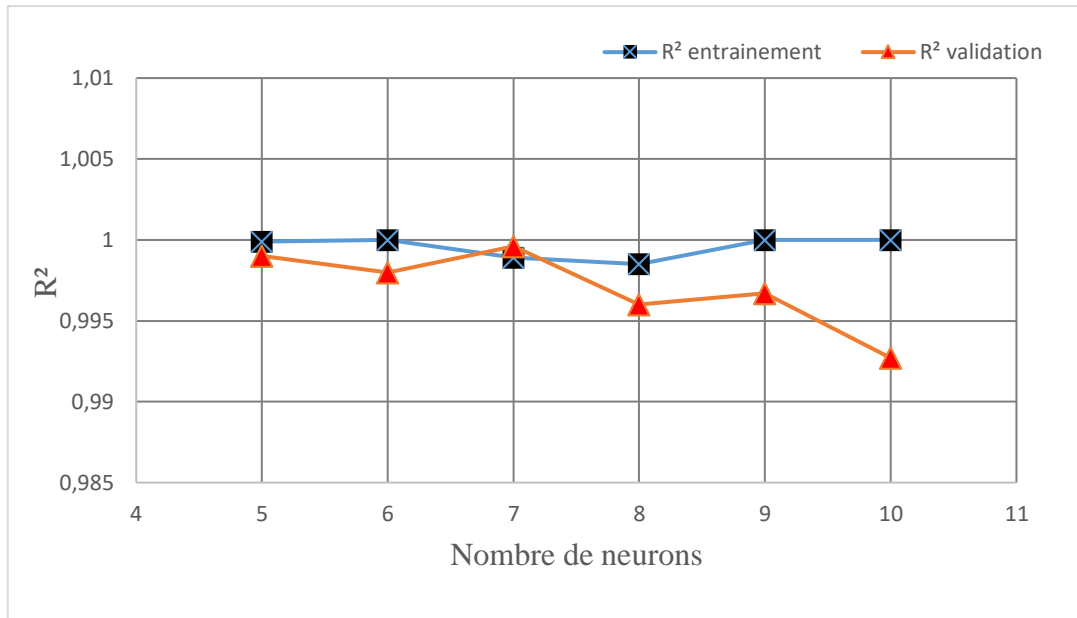


Figure III.11 variation du R² on fonction de nombre de neurone

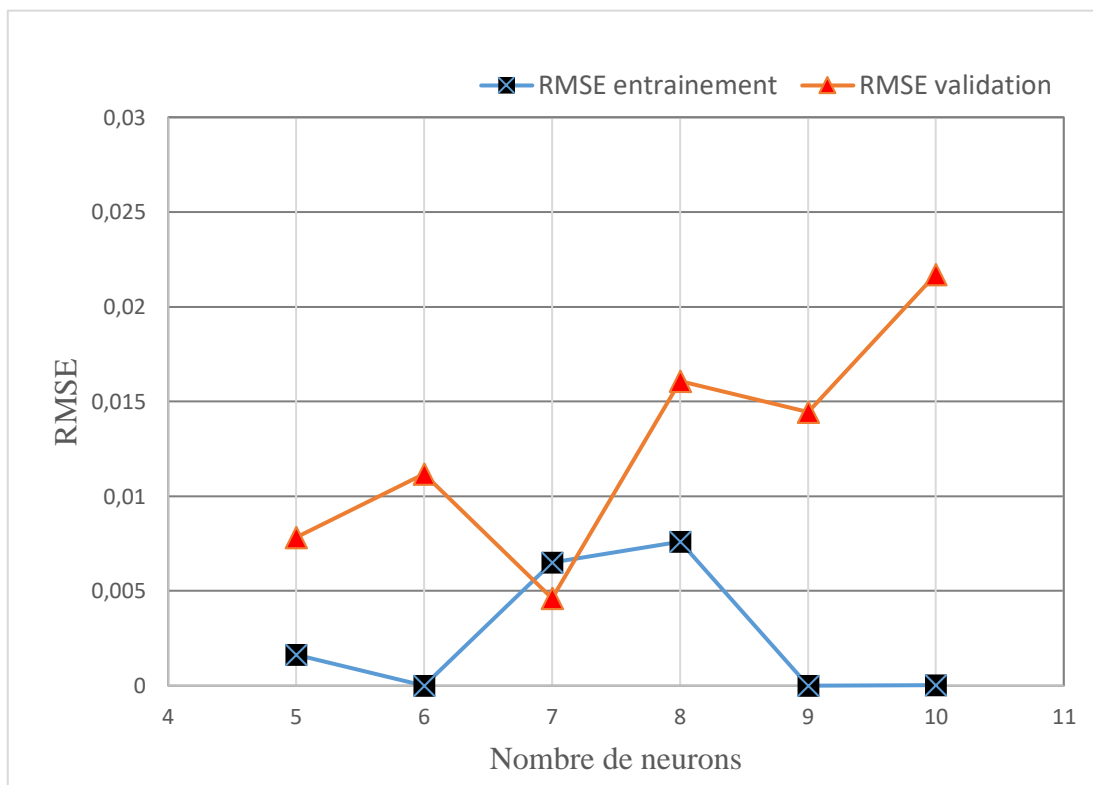


Figure III.12 variations du RMSE on fonction de nombre de neurone

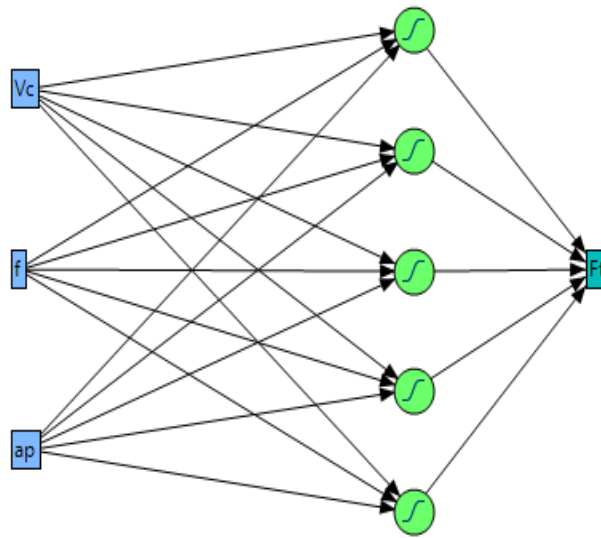


Figure III.13 Structure ANN pour Ft.

L'équation suivante présente le modèle mathématique obtenu par la méthode du réseau de neurones pour l'effort tangentiel Ft. H_1 à H_5 présentent les sorties de chaque neurone (dans notre cas 5 neurones) de la couche cachée.

$$H1 = \tanh(0.5*(0.0107225708547794*Vc - 2.9884975835053*f + 3.87878245211258*ap - 1.87917447194568));$$

$$H2 = \tanh(.5*(-0.0113296739636559*Vc + 4.07987441863154*f + 0.422158156501949*ap + 0.681731856613533));$$

$$H3 = \tanh(.5*(-0.00434478601539409*Vc + 1.76007671371452*f - 0.494419246664359*ap + 0.418227829072785));$$

$$H4 = \tanh(.5*(-0.00158969198769511*Vc + 1.92271404639505*f + 4.2514515204551*ap - 1.13488432135426));$$

$$H5 = \tanh(.5*(-0.00166694687403951*Vc - 1.60070273143076*f - 4.30991939288829*ap + 1.43699175909126));$$

La somme des sorties des 5 neurones de la couche cachée multiplié par une fonction de transfert linéaire, nous donne le modèle de l'effort tangentiel Ft.

$$Ft = 1.3532*H1 + 4.14479*H2 - 2.49844*H3 + 62740*H4 - 5.49956*H5 + 0.467191; \dots \dots \dots \text{(III.4)}$$

Les valeurs du coefficient de corrélation, la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le nombre des essais pour les deux cas (apprentissage et validation) sont présentés dans le tableau (III.5)

Tableau III.5 Les critères R^2 et RMSE du modèle de l'effort radial Ft

Apprentissage		Validation	
Ft	Mesures	Ft	Mesures
R^2	0.9999	R^2	0.9990
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0.00164	Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0.00783
Somme fréquences	10	Somme fréquences	6

La figure (III.14) présente le graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues dans les deux cas (apprentissage et validation) pour l'effort tangentiel (Ft). Les valeurs de l'effort tangentiel s'alignent sur une droite ce qui implique que le modèle mathématique est adéquat. Les coefficients de corrélations $R^2 = 0,9990$ pour l'apprentissage et $R^2 = 0,9999$ pour la validation présentent 99,90% et 99,99% de variation de la réponse expliquée par le modèle.

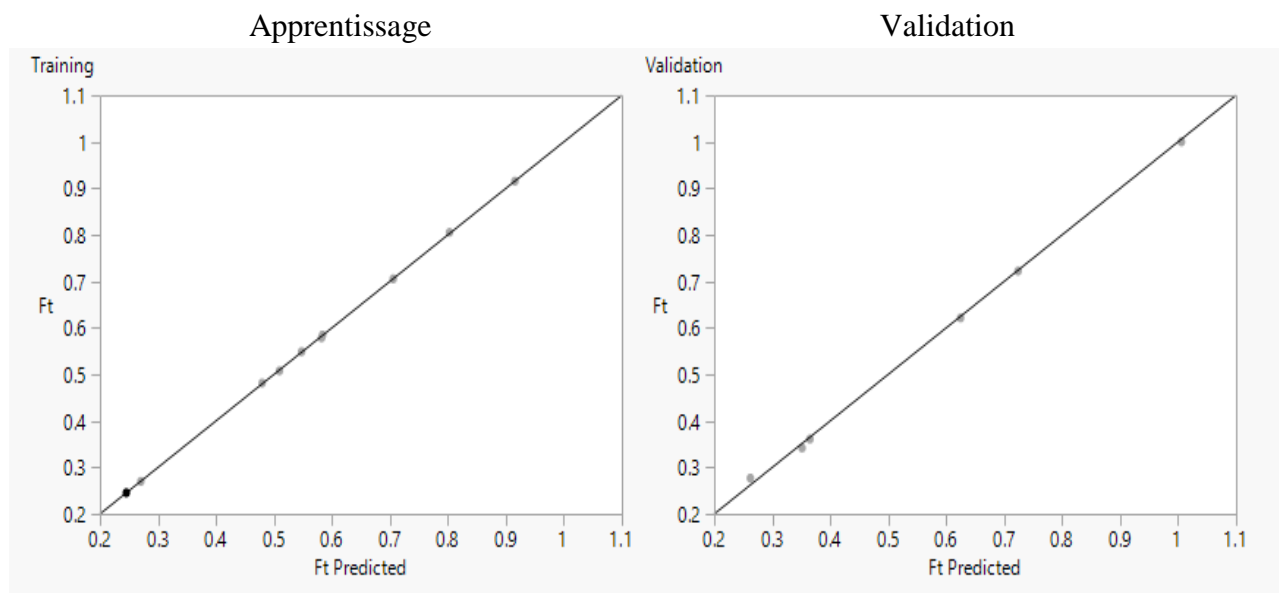


Figure III.14 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues pour Ft

La figure (III.15) permet d'évaluer l'influence de (α ; f) sur l'effort tangentiel (Ft), le tracé de la surface en 3D est issue du modèle ANN présenté par l'équation (III.4), on constate que la variation de (α) engendre une pente importante qui influe sur la variation de (Ft).

L'augmentation simultanée de (ap) et (f) entraîne une augmentation quantitative importante de l'effort (F_t), par la suite, pour diminuer les valeurs de la composante (F_t) on doit employer des petites profondeurs de passe (ap) avec des petites avances de coupe (f).

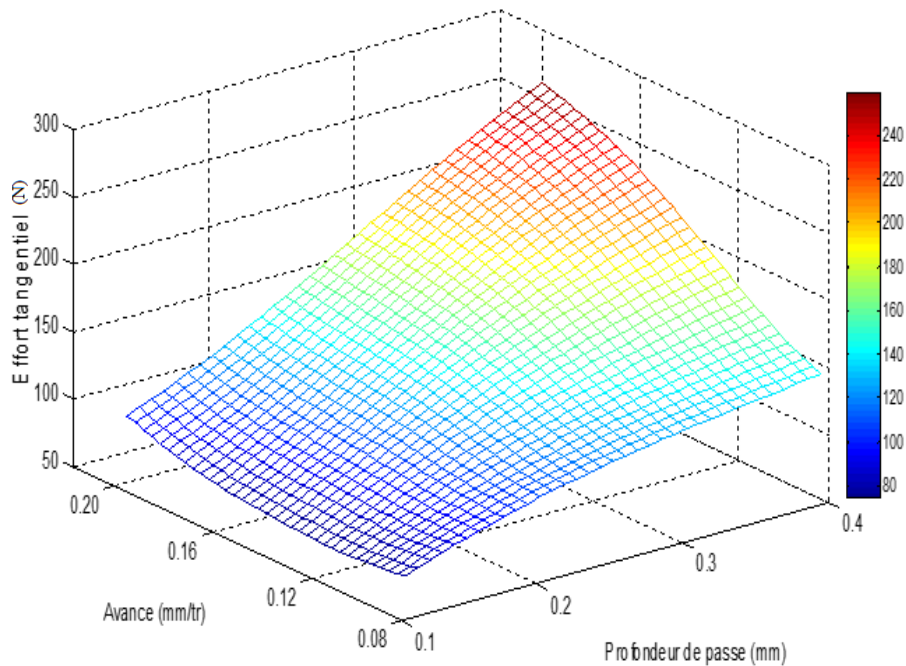


Figure III.15 Effet de la vitesse de coupe et l'avance sur l'effort tangentiel F_t , pour $V_c = 142.5$ m/min.

III.7.3 Modélisation de la rugosité de surface R_a et l'effort tangentiel F_t simultanément par ANN

L'architecture adéquate pour modéliser la rugosité de surface (R_a) l'effort tangentiel (F_t), la structure choisie est **3-6-2**, c.-à-d. 3 nœuds d'entrées (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe), 6 nœuds pour la couche cachée et 2 nœuds pour la sortie (rugosité (R_a) et effort tangentiel (F_t)). Le tableau (III.6) présente les erreurs pour les 6 tests, la structure optimale a été choisie basé sur le plus petit RMSE.

Tableau III.6. Performance des structures ANN du modèle de Ra et Ft simultanément

Architecture neuronal	Ft				Ra			
	R ² Ent.	R ² Val.	RMSE Ent.	RMSE Val.	R ² Ent.	R ² Val.	RMSE Ent.	RMSE Val.
3_5_2	0.9942	0.9923	0.019	0.0137	0.9998	0.8659	0.0018	0.0974
3_6_2	0.9748	0.9694	0.0397	0.0276	0.9998	0.9762	0.0016	0.041
3_7_2	0.9994	0.9817	0.006	0.0213	0.9877	0.9471	0.01772	0.06121
3_8_2	0.9999	0.9704	0.00045	0.0271	1.0000	0.98006	1.10x10 ⁻⁷	0.037
3_9_2	1.0000	0.9207	3.30x10 ⁻¹⁵	0.04443	1.0000	0.9763	2.728x10 ⁻¹⁵	0.04443
3_10_2	0.9535	0.9731	0.053	0.0258	0.9993	0.8377	0.0081	0.1072

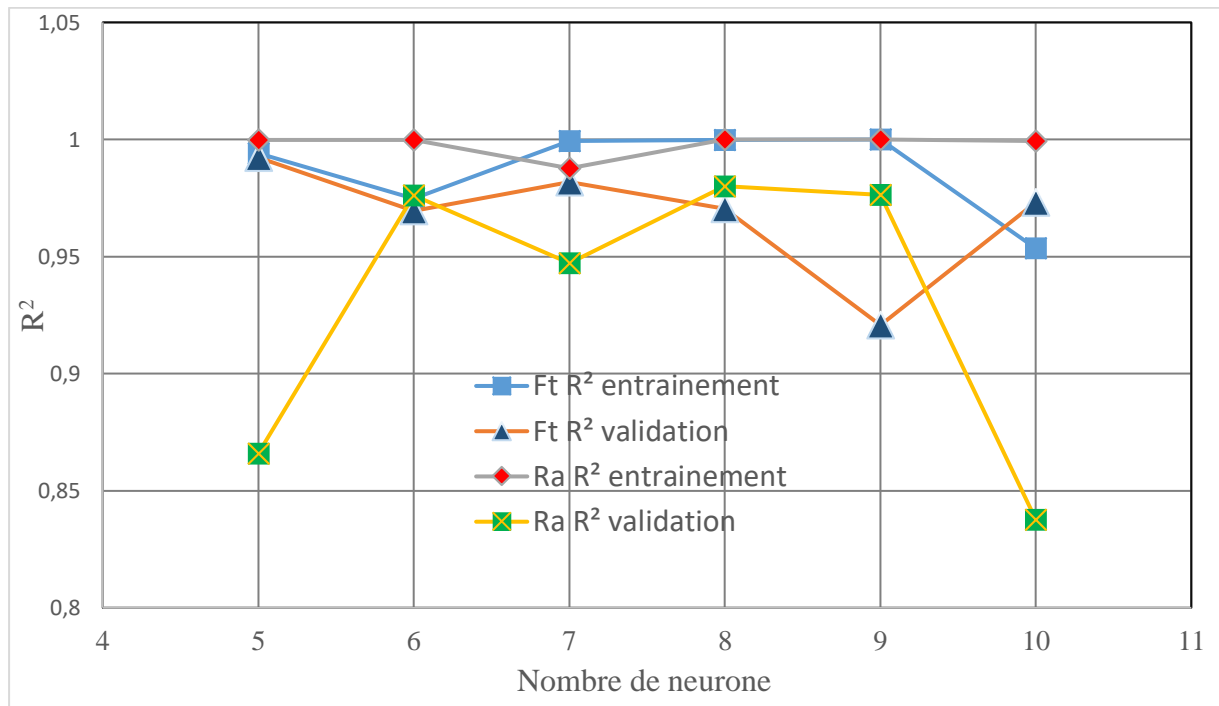


Figure III.16 Variations du R² on fonction de nombre de neurone

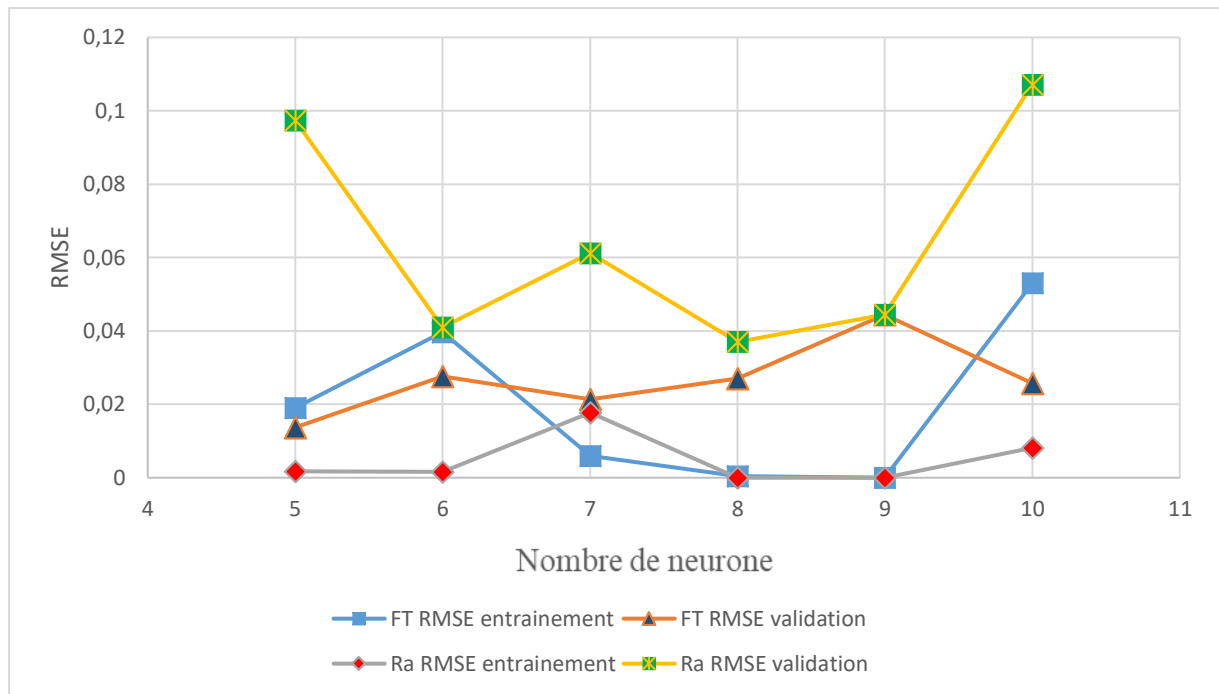


Figure III.17 Variations du RMSE on fonction de nombre de neurone

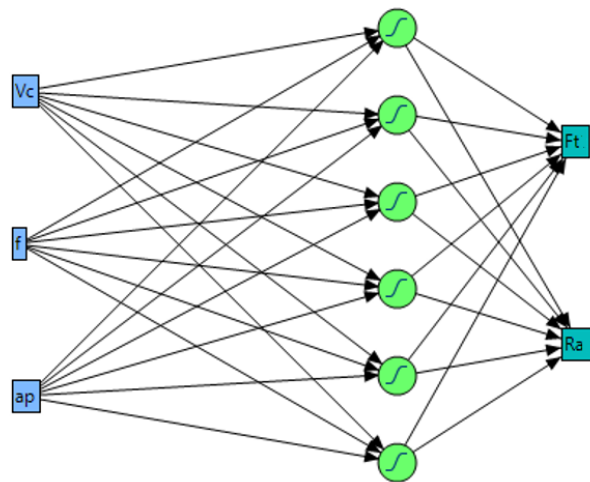


Figure III.18 Structure ANN pour deux sorties : Ra et Ft

Les équations (III.5) et (III.6) présentent le modèle mathématique obtenu par la méthode du réseau de neurones pour la rugosité (Ra) et l’effort tangentiel (Ft). H_1 à H_6 présentent les sorties de chaque neurone (dans notre cas 6 neurones) de la couche cachée.

$$H1 = \tanh(.5*(-0.0322707545052883*Vc-28.9089554319707*f-2.42754704651506*ap + 10.5655678142119));$$

$$H2 = \tanh(.5*(-0.00344893769058442*Vc + 12.3068254191599*f + 5.50810083584257*ap - 3.21371643886722));$$

$$H3 = \tanh(.5*(0.00883445750957172*V_c + 43.1882887529806*f -13.4843935079026*ap - 4.3820639929779));$$

$$H4 = \tanh(.5*(-0.00553581084710961*V_c + 40.2631295888884*f -1.67330991536979*ap - 3.54686890400348));$$

$$H5 = \tanh(.5*(-0.0342180368097356*V_c -24.6055646863089*f + 0.900554648694782*ap + 8.03540299892515));$$

$$H6 = \tanh(.5*(-0.00721473591858127*V_c+ 54.8655242561714*f -0.297816510388535*ap -7.16757046949728));$$

La somme des sorties des 6 neurones de la couche cachée multiplié par une fonction de transfert linéaire, nous donne le modèle de Ra et Ft

$$Ra = -0.28080*H1 + 0.26822*H2 + 0.20872*H3 + 0.17391*H4 + 0.43355*H5 - 0.094405*H6 + 0.81225; \dots \dots \dots (III.5)$$

$$Fz = -0.12118*H1 + 0.729708*H2 + 0.006851*H3 + 0.001445*H4 + 0.06336*H5 - 0.12675*H6 + 0.77317; \dots \dots \dots (III.6)$$

Les valeurs du coefficient de corrélation, la racine de l’erreur quadratique moyenne (RMSE) et le nombre des essais pour les deux cas (apprentissage et validation) sont présentés dans le tableau (III.7)

Tableau III.7 R² et RMSE du modèle de Ra et Ft simultanément

Apprentissage		Validation		Apprentissage		Validation	
Ft	Mesures	Ft	Mesures	Ra	Mesures	Ra	mesures
R ²	0.9748	R ²	0.9694	R ²	0.9998	R ²	0.9762
Racine de l’erreur quadratique moyenne (RMSE)	0.0397	Racine de l’erreur quadratique moyenne (RMSE)	0.02	Racine de l’erreur quadratique moyenne (RMSE)	0.0016	Racine de l’erreur quadratique moyenne (RMSE)	0.0410
Somme fréquences	10	Somme fréquences	6	Somme fréquences	10	Somme fréquences	6

La figure (III.19) présente le graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues dans les deux cas (apprentissage et validation) pour la rugosité (Ra) et l’effort tangentiel (Ft). Les valeurs de Ra et Ft s’alignent sur une droite ce qui implique que le modèle mathématique est adéquat.

Les coefficients de corrélations pour **Ra** : $R^2 = 0,9998$ pour l'apprentissage et $R^2 = 0,9762$ pour la validation présentent 99,98% et 97,62%, et pour **Ft** : $R^2=0.9748$ pour l'apprentissage et $R^2=0.9694$ pour la validation présentent 97,48% et 96,94% de variation de la réponse expliqué par le modèle :

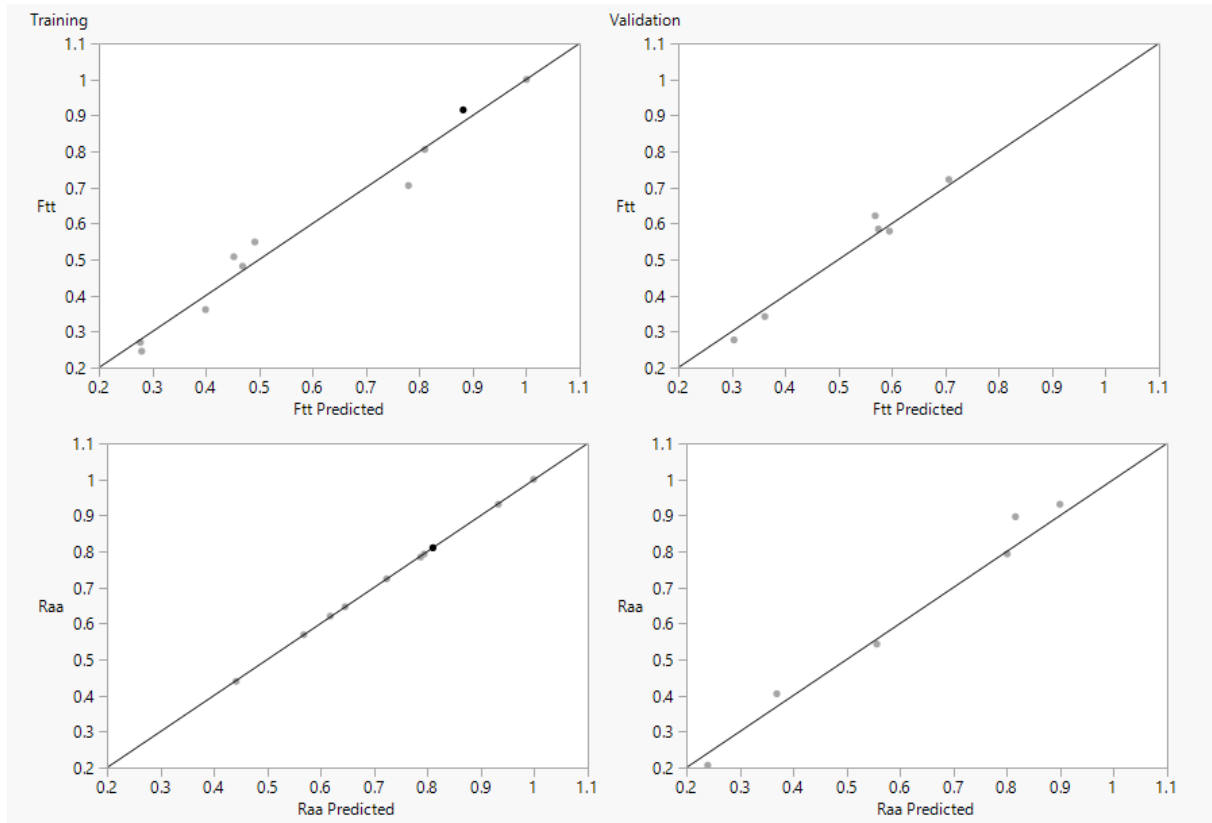


Figure III.19 Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues pour Ra et Ft simultanément.

III.8 Comparaison entre les résultats expérimentaux et estimés par les modèles RMS et ANN pour la rugosité de surface (Ra) et l'effort tangentiel (Ft)

La comparaison entre les valeurs expérimentales pour la rugosité de surface (Ra) et l'effort tangentiel (Ft) avec ceux prédites par les modèles pour le plan de Taguchi 16 essais obtenus par réseaux de neurone artificiels ANN (premier cas, architectures de Ra et Ft séparées) et la Méthodologie de Surface de Réponse (RMS) est présentée dans le tableau (III.8) et graphiquement sur les figures (III.20 et III.21).

Tableau III.8. Comparaison des résultats expérimentaux et estimées par RMS et ANN

N° Essai	Rugosité de surface (Ra)					Effort tangentiel (Ft)				
	Ra (μm) Expér.	Préd (μm) (ANN)	Préd (μm) (RMS)	Erreur en % (ANN)	Erreur en % (RMS)	Ft (N) Expér.	Préd (N) (ANN)	Préd (N) (RMS)	Erreur en % (ANN)	Erreur en % (RMS)
1	0.72	0.71940	0.7480	0.08	3.89	62.38	62.2656	53.1325	0.18	14.82
2	0.91	0.90992	0.8915	0.01	2.03	122.19	121.6914	119.2740	0.41	2.39
3	1.08	1.07662	1.0350	0.31	4.16	183.27	183.6908	185.4155	0.23	1.17
4	1.16	1.16056	1.1785	0.05	1.60	253.74	255.1976	251.5570	0.57	0.86
5	0.63	0.63376	0.6383	0.60	1.32	86.77	89.1522	91.5942	2.75	5.56
6	0.92	0.93048	0.8423	1.14	8.44	70.32	66.5619	70.7032	5.34	0.54
7	0.94	0.94092	0.9253	0.10	1.56	232.28	232.2802	223.8772	0.0003	3.62
8	1.08	1.08185	1.1293	0.17	4.57	204.38	203.6764	202.9862	0.34	0.68
9	0.51	0.50973	0.4889	0.05	4.14	128.85	129.2746	127.5286	0.33	1.03
10	0.66	0.64521	0.6324	2.24	4.18	179.03	179.0480	193.6701	0.01	8.18
11	0.75	0.74882	0.8969	0.16	19.59	68.56	68.6194	85.7466	0.09	25.07
12	1.04	1.01914	1.0404	2.01	0.04	146.91	147.6963	151.8881	0.54	3.39
13	0.24	0.23923	0.2997	0.32	24.89	148.41	148.1452	160.9357	0.18	8.44
14	0.47	0.48189	0.5037	2.53	7.18	157.71	158.5474	140.0447	0.53	11.20
15	0.84	0.83801	0.7077	0.24	15.75	139.31	138.9607	119.1537	0.25	14.47
16	0.92	0.92112	0.9117	0.12	0.90	91.66	92.6117	98.2627	1.04	7.20

On constate que l'erreur entre le modèle ANN et les résultats expérimentaux est entre 0.01 à 2.53% pour Ra, et 0.0003 à 5.34% pour Ft (indiqués en gras au tableau III.8), ce qui est nettement moins que les erreurs données par le modèle RMS.

De ce fait, le modèle ANN peut être utilisée pour la prédiction de la rugosité de la surface à usiner et l'effort tangentiel.

Le pourcentage d'erreur pour le modèle RMS se trouve entre 0.04 à 24.89% pour la rugosité de surface, et 0.54 à 25.07 % pour l'effort tangentiel.

Par conséquent, le modèle de prédiction ANN est jugé le meilleur par rapport au modèle RMS.

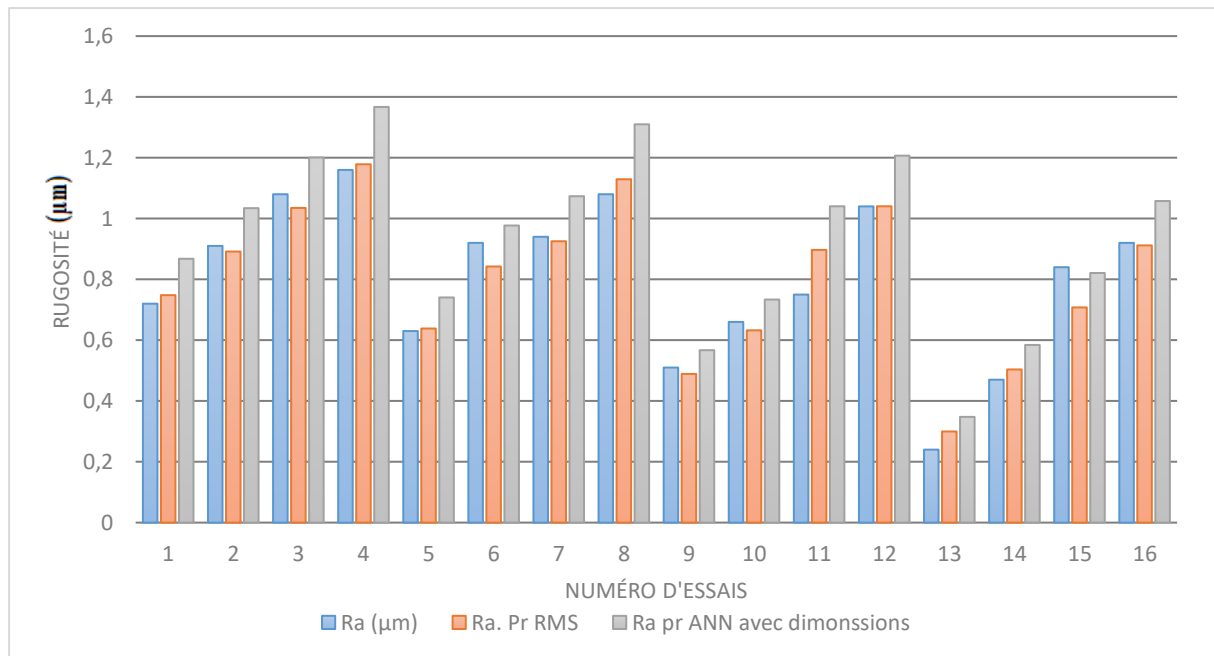


Figure III.20: Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la rugosité (Ra)

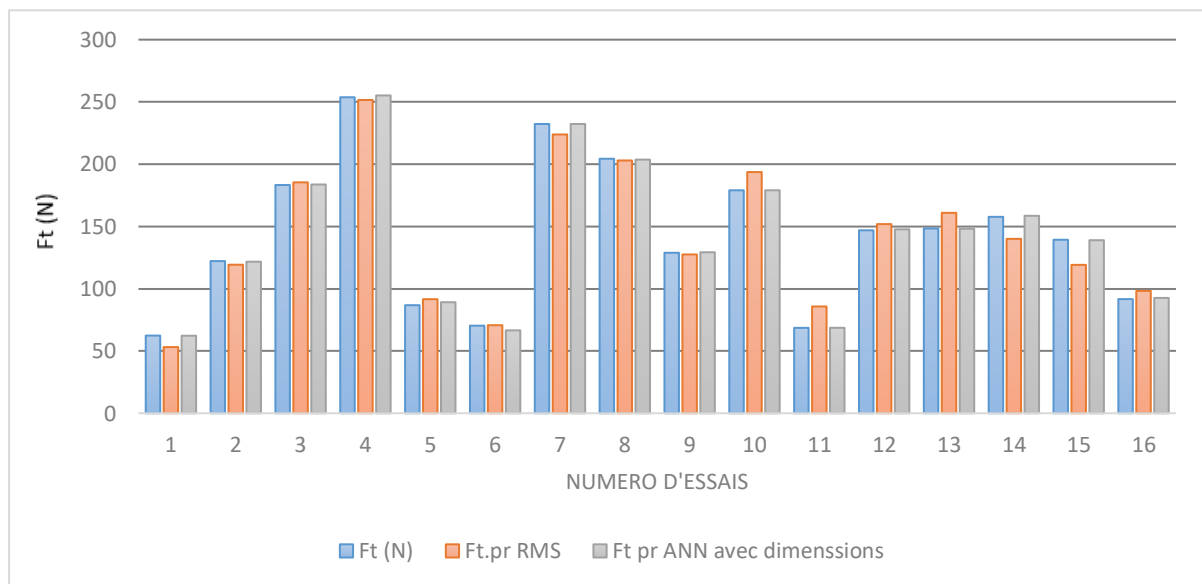


Figure III.21: Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour Ft

Les figures (IV.20 et VI.21), montrent que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont très proches, et aussi que les valeurs données par le modèle ANN sont plus proches aux valeurs expérimentales que les valeurs données par RMS.

Pour cela on peut dire que le modèle ANN est jugée le meilleur par rapport au modèle RMS.

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, on a donné un aperçu générale sur la méthode des neurones artificiels, appelée en anglais artificiel neurone network ANN, afin de présenter des modèles mathématiques basés essentiellement sur le choix de la fonction de transfert, qui est dans notre cas une fonction tangente hyperbolique, plusieurs architectures neuronales ont été testé pour obtenir un R^2 et RMSE proche de l'unité pour le premier et assez petit pour le deuxième.

Les conclusions peuvent être résumé dans les points suivants :

- Les architectures des réseaux neuronaux qui donnent le meilleur R^2 et RMSE sont (3-5-1) et (3-5-1) pour le critère de la rugosité de surface (R_a) et la composante de l'effort de coupe (F_t) respectivement.
- Le cas d'une étude qui rassemble R_a et F_t dans une seule architecture neuronale donne des valeurs de R^2 et RMSE plus grandes que dans le cas où on a pris les deux paramètre R_a et F_t séparément.
- La comparaison entre le modèle issu de la méthode RMS et de la méthode ANN prouve que le modèle issu de la deuxième méthode est le plus proche des valeurs expérimentales.

IV.1. Introduction

L'optimisation est une tâche importante dans le processus d'usinage, permettant le choix des conditions de coupe les plus commodes afin d'obtenir des valeurs désirées d'une certaine variable. Ce qui a habituellement un impact économique direct tel que le temps machine ou le coût total d'opération. Donc, l'objectif de ce chapitre est de faire une optimisation des conditions de coupe, par l'utilisation de différentes méthodes d'optimisation.

Deux méthodes d'optimisation ont été exploitées dans ce chapitre :

- Optimisation des conditions de coupe par la méthode de Taguchi;
- Optimisation des paramètres de coupe par la maximisation de la fonction de désirabilité.

IV.2. Optimisation des conditions de coupe par la méthode de Taguchi

Dans l'analyse des résultats selon la méthode de Taguchi, on cherche à identifier les facteurs qui contribuent à la réduction de la variation dans la réponse. La variation peut être analysée en observant les effets sur la réponse moyenne ou dans la dispersion. Pour mesurer les effets dans la variation, Taguchi a développé une transformation des données, désignée par la relation Signal/Bruit (S/N), qui représente la mesure de la variation existante.

Dans la méthode Taguchi, le terme « signal » représente la valeur souhaitable et le « bruit » représente la valeur indésirable. L'objectif de l'utilisation des S/N ratio est de mesurer les performances pour développer des produits et des processus insensibles aux facteurs de bruit. Le rapport S/N indique le degré de la performance prévisible d'un produit ou d'un procédé, en présence de facteurs de bruit.

Selon le critère de performance de la réponse, le ratio signal/bruit (S/N) prend les formes suivantes :

a) L'optimum est une valeur minimale : la valeur cible est égale à zéro (plus petit c'est meilleur), la caractéristique de performance Y a une distribution non négative et la fonction de perte augmente avec (y). Soient $y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{Nj}$ les résultats expérimentaux obtenus au point j, Taguchi recommande d'utiliser la fonction représentée par la relation (IV.1) : [39]

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \right]$$

b) L'optimum est une valeur maximale : la valeur cible est égale à l'infini (plus grand c'est meilleur), on vise la maximisation de la caractéristique de performance.

Maximiser Y revient à minimiser 1/Y et, Taguchi recommande d'utiliser la formule (IV.2) suivante: [39]

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \right] \dots \dots \dots (IV.2)$$

c) L'optimum est une valeur ciblée : la valeur cible est égale à une valeur nominale m_0 (Nominal c'est meilleur), la fonction de perte augmente quand (Y) s'éloigne de la valeur nominale m_0 , Taguchi recommande d'utiliser la fonction représentée par la relation (IV.3) : [39]

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[\left(\frac{\bar{y}_j^2}{S_j^2} \right) \right] \dots \dots \dots (IV.3)$$

Avec :

$$S^2 = \sum \frac{(y_{ij} - \bar{y}_j)^2}{N_j - 1} \quad \text{Et} \quad \bar{y}_j = \sum \frac{y_{ij}}{N_j}$$

Y_j : représente les valeurs individuelles de la réponse (résultats expérimentaux).

N : représente le n° de répétitions dans un essai.

S^2 : représente la variance de l'erreur.

Pour appliquer l'approche de Taguchi dans notre cas d'étude, nous avons fixé comme objectif d'atteindre l'optimum de chacun des critères étudiés. En d'autres termes, on doit minimiser les critères de rugosité ainsi que les composantes des efforts de coupe. Donc les ratios S/N correspondant seront calculés selon l'équation (a).

Les différentes valeurs du ratio S/N correspondant aux différents critères considérés sont illustrées dans le tableau IV.1.

IV.3 Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs

Cette analyse est basée sur le calcul de la moyenne des ratios S/N des résultats expérimentaux obtenus pour chaque niveau des 3 principaux paramètres d'usinage (V_c , f et a_p). La moyenne des ratios S/N pour un niveau d'un facteur (ou d'une interaction) correspond à la somme des valeurs des ratios S/N pour le même niveau du facteur divisée par le nombre des ratios pour le niveau du facteur.

Tableau IV.1- Signal/Bruit des paramètres de sorties étudiées.

N°	S/N.Ra	S/N.Fa	S/N.Fr	S/N.Ft
1	2.8534	-29.5684	-45.1952	-35.9009
2	0.8192	-37.4594	-49.8926	-41.7407
3	-0.6685	-41.6643	-52.6994	-45.2618
4	-1.2892	-43.6117	-53.6478	-48.0878
5	4.0132	-37.4676	-49.1652	-38.7674
6	0.7242	-30.6957	-46.2287	-36.9416
7	0.5374	-45.1069	-54.1722	-47.3202
8	-0.6685	-42.0452	-52.9760	-46.2088
9	5.8486	-42.3772	-51.9931	-42.2017
10	3.6091	-39.8881	-47.9720	-45.0585
11	2.4988	-29.6546	-43.9019	-36.7214
12	-0.3407	-34.8498	-46.7092	-43.3410
13	12.3958	-41.1014	-49.8418	-43.4293
14	6.5580	-38.5587	-48.8276	-43.9572
15	1.5144	-35.6809	-47.5915	-42.8796
16	0.7242	-29.0908	-43.9191	-39.2436

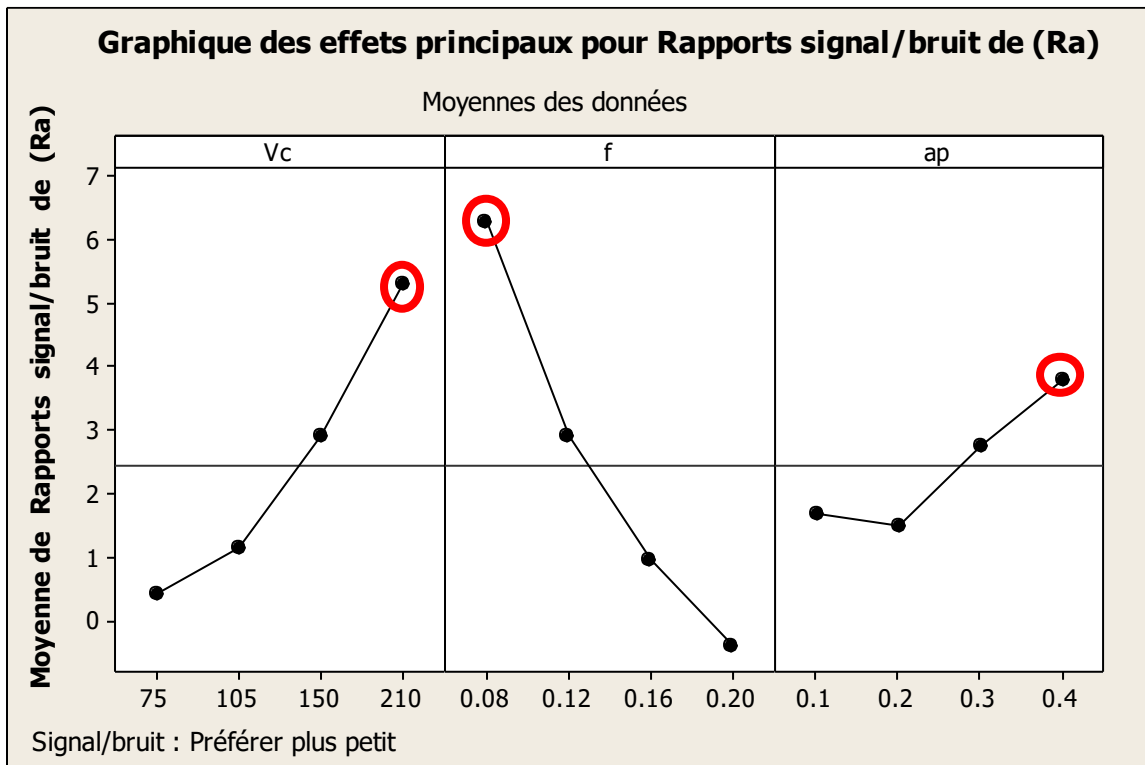
IV.3.1 Analyse des effets principaux sur (Ra)

Le tableau IV.2, présenter le classement des paramètres d'usinage (V_c , f et a_p) sur (Ra), le symbole Δ indique la différence entre la grande et la petite valeur de chaque paramètre.

Tableau IV.2: Moyenne des ratios S/N (R_a) pour chaque niveau des facteurs

Niveau	V_c	f	a_p
1	0.4287	6.2777	1.7002
2	1.1516	2.9276	1.5015
3	2.9040	0.9705	2.7674
4	5.2981	-0.3935	3.8133
Δ	4.8694	6.6712	2.3118
Rang	2	1	3

La plus importante influence correspond à l'avance par tour avec un effet de 6.6712,. La plus faible influence est la profondeur de passe avec un effet de 3.8133 , la vitesse de coupe (V_c) est 4.2981. Les paramètres d'usinage optimaux ont été mis en évidence avec des cercles (figure IV.1).

**Figure. IV.1-** Graphique des effets principaux de V_c , f et a_p pour (R_a).

IV.3.2 Analyse des effets principaux sur (F_a)

Le tableau IV.3, présenter le classement des paramètres d'usinage (V_c , f et a_p) sur (F_a), le symbole Δ indique la différence entre la grande et la petite valeur de chaque paramètre.

Tableau IV.3: Moyenne des ratios S/N (F_a) pour chaque niveau des facteurs

Niveau	V_c	f	a_p
1	-38.08	-37.63	-29.75
2	-38.83	-36.65	-36.36
3	-36.69	-36.65	-41.16
4	-36.11	-37.40	-42.43
Δ	2.72	1.38	12.67
Rang	2	3	1

La plus importante influence correspond à la profondeur de passe avec un effet de 12.66. Les faibles influences sont celles des facteurs relatifs à l'avance par tour (f) qui est 1.38. L'effet de la vitesse de coupe (V_c) est 2.72. Les paramètres d'usinage optimaux ont été désignés par des cercles (figure IV.2).

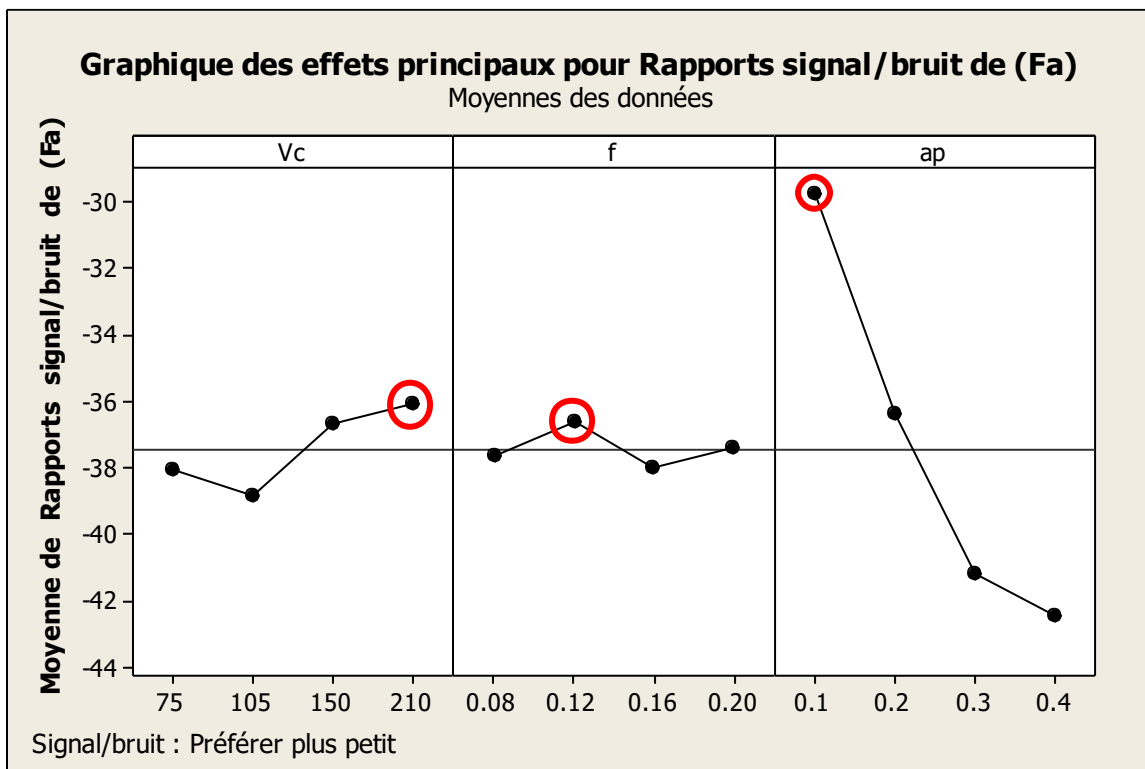


Fig. IV.2- Graphique des effets principaux de V_c , f_z et a_p pour (F_a).

IV.3.3 Analyse des effets principaux sur l'effort radial F_r :

Le tableau IV.4, présenter le classement des paramètres d'usinage (V_c , f et a_p) sur (F_r), le symbole Δ indique la différence entre la grande et la petite valeur de chaque paramètre.

Tableau IV.4 : Moyenne des ratios S/N (F_r) pour chaque niveau des facteurs

Niveau	V_c	f	a_p
1	-50.36	-49.05	-44.81
2	-50.64	-48.23	-48.34
3	-47.64	-49.59	-51.62
4	-47.55	-49.31	51.41
Δ	3.09	1.36	6.81
Rang	2	3	1

On remarque que la profondeur de passe possède la plus grande influence, avec un effet de 6.81 puis la vitesse de coupe (V_c) avec un effet de 3.09. La faible influence c'est l'avance (f) avec un effet de 1.36. Les paramètres d'usinage optimaux ont été désignés par des cercles (figure IV.3).

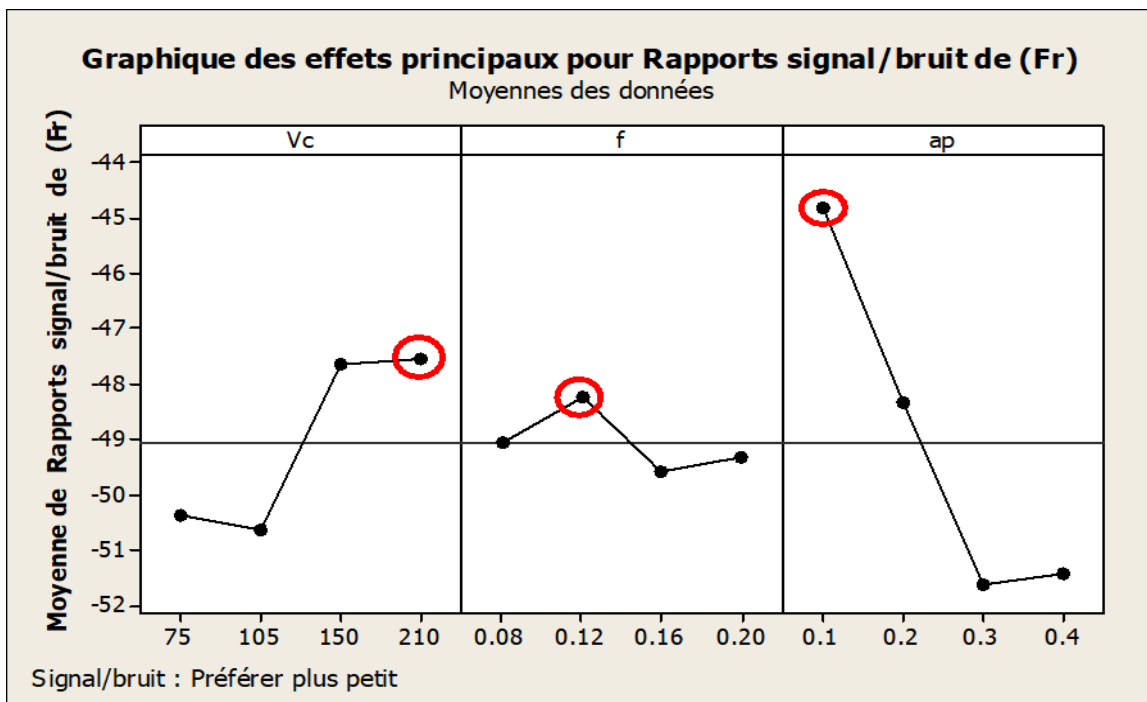


Figure IV.3- Graphique des effets principaux de V_c , f_z et a_p pour (F_r).

IV.3.4 Analyse des effets principaux sur l'effort radial F_t :

Le tableau IV, présenter le classement des paramètres d'usinage (V_c , f et a_p) sur (F_t), le symbole Δ indique la différence entre la grande et la petite valeur de chaque paramètre.

Tableau IV.5: Moyenne des ratios S/N (F_t) pour chaque niveau des facteurs

Niveau	V_c	f	a_p
1	-42.75	-40.07	-37.20
2	-42.31	-41.92	-41.68
3	-41.83	-43.05	-44.41
4	-42.38	-44.22	-45.97
Δ	0.92	4.15	8.77
Rang	3	2	1

La plus importante influence correspond à la profondeur de passe avec un effet de 8.77 puis l'avance (f) avec un effet de 4.15 . La faible influence est la vitesse de coupe (V_c) avec un effet 0.92 . Les paramètres d'usinage optimaux ont été désignés par des cercles (figure IV.4).

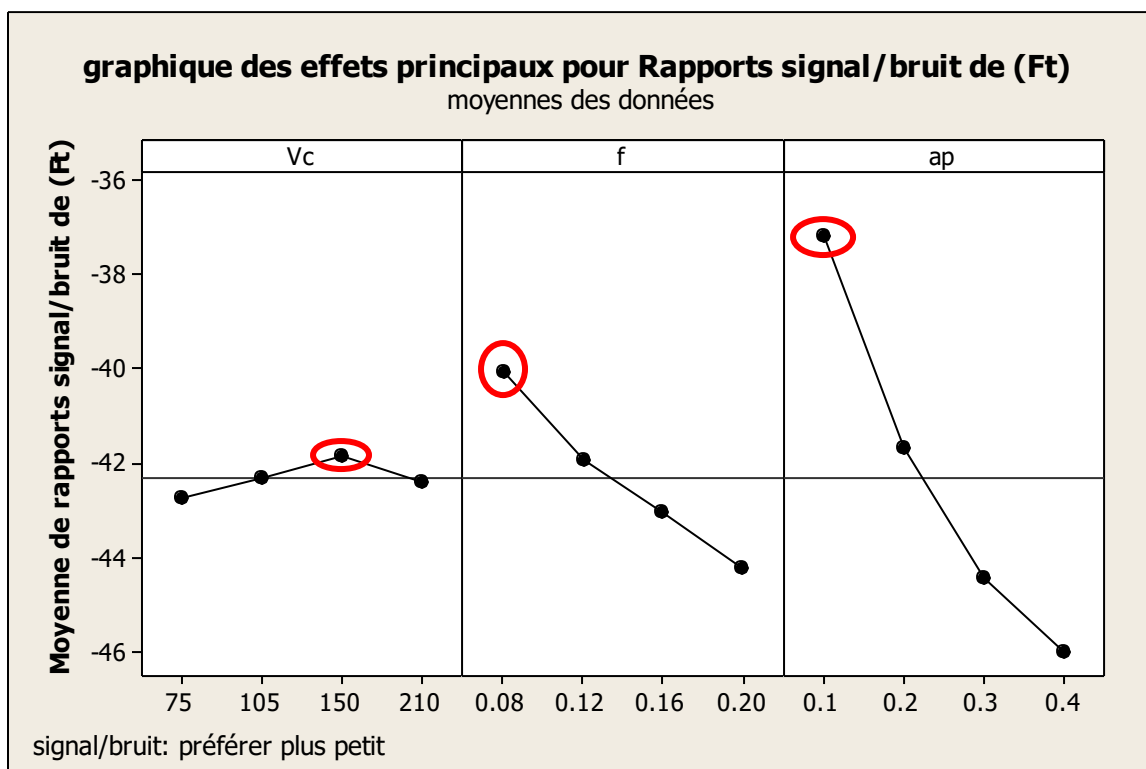


Figure IV.4- Graphique des effets principaux de V_c , f et a_p pour (F_t).

IV.4 Optimisations des paramètres de coupe par la fonction de désirabilité :

La dernière technique d'optimisation simultanée de plusieurs réponses d'un système est la fonction de désirabilité. Cette fonction permet d'imposer des critères supplémentaires tels que les limites inacceptables et la sévérité avec laquelle la réponse doit rester près de la zone désirée. A partir de plusieurs équations exprimant des réponses différentes et ayant des facteurs communs, il s'agit de synthétiser ces fonctions en une seule, nommée la réponse composite ou désirabilité. Notre objectif est de trouver les valeurs optimales des paramètres de coupe (Vc, f et ap) en produisant la plus basse rugosité de la surface (Ra) et en générant le minimum des efforts de coupe (Fa,Fr et Ft). [41]

La désirabilité permet d'évaluer en fonction des réponses calculées par le modèle statistique, l'équivalent d'un pourcentage de satisfaction par rapport aux objectifs fixés.

En recherchant un minimum ou un maximum, les désirabilités peuvent être calculées par les équations suivantes respectivement (IV.3, IV.4 et IV.4).

$$Des(y) = \begin{cases} 0, & y < Low \\ \left(\frac{y - Low}{Tar - Low}\right)^w, & Low \leq y \leq Tar \\ 1, & y > Tar \end{cases} \dots\dots\dots(IV.3)$$

$$Des(y) = \begin{cases} 1, & y < Tar \\ \left(\frac{Up - y}{Up - Tar}\right)^w, & Tar \leq y \leq Up \\ 0, & y > Up \end{cases} \dots\dots\dots(IV.4)$$

$$Des_{comb} = (Des_1 \times Des_2 \times \dots \times Des_i \times \dots \times Des_n)^{\frac{1}{n}} = (\prod_{i=1}^n Des_i)^{\frac{1}{n}} \dots\dots\dots(IV.5)$$

La figure (IV.4) représente la désirabilité en 2D. Elle a été mise au point à partir des équations (IV.3, IV.4 et IV.4). La figure (IV.5.a) montre la minimisation de la réponse, c'est-à-dire qu'au-dessous de la cible, la réponse est un, mais au-dessus de la limite supérieure, elle est nulle. Par contre la figure (IV.5.b) expose la maximisation de la réponse, c'est à dire qu'au-dessous de la cible, la réponse est un, tandis qu'au-dessus de la limite supérieure, elle est nulle.

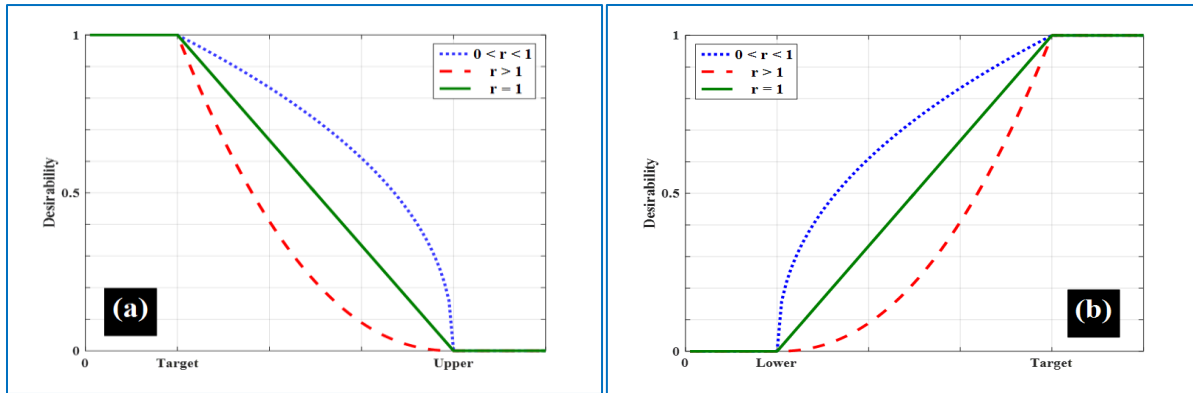


Figure IV.5- Diagramme de désirabilité 2D, (a) Minimum, (b) Maximum. [40]

IV.4.1- Cas d'optimisation étudiés

Dans notre étude, on s'est intéressé à 2 cas d'optimisation qui sont :

- (I) Rugosité minimale : dans ce cas on augmente l'importance et le poids de la rugosité.
- (II) Les trois efforts de coupe minimal : dans ce cas on augmente l'importance et le poids des efforts de coupe (F_a , F_r et F_t).

IV.4.1.1 Optimisation des conditions de coupe pour R_a minimale (1^{er} cas)

Les valeurs des paramètres de coupe optimales pour le critère de rugosité (R_a) et les composantes des efforts de coupe, obtenues en utilisant le logiciel « *Design Expert* », les contraintes utilisées pendant le processus d'optimisation sont illustrées dans le tableau IV.6.

Tableau IV.6 Les contraintes pour optimisation des paramètres d'usage

Name	Goal	Lower	Upper	Lower	Upper	Importance
		Limit	Limit	Weight	Weight	
Vc	is in range	75	210	1	1	3
fz	is in range	0.08	0.20	1	1	3
ap	is in range	0.1	0.4	1	1	3
Ra	minimize	0.24	1.16	1	0.5	5
Fa	minimize	28.48	180.03	1	0.1	3
Fr	minimize	156.71	511.22	1	0.1	3
Ft	minimize	62.38	253.74	1	0.1	3

Le problème revient à minimiser la fonction de désirabilité qui est la fonction objective sous les contraintes des variables. Le tableau IV.6 illustre les valeurs optimales des conditions d'usinage.

Les solutions optimales sont illustrées dans le tableau IV.7 par ordre de niveau décroissant de désirabilité. La valeur de désirabilité 0.957 correspond à la meilleure valeur de la rugosité de surface en priorité et un minimum d'effort de coupe dans la gamme des paramètres indiquée.

Le régime de coupe qui donne le meilleur compromis entre Ra et les composantes de l'effort de coupe est : vitesse de coupe ($V_c = 209.999\text{m/min}$), l'avance de ($f = 0.080\text{ mm/tr}$), la profondeur de passe de ($ap = 0.341\text{ mm}$).

Tableau IV.7 Réponses de la surface de rugosité surface pour le 1^{er} cas d'optimisation.

Number	Solutions							
	Vc	f	ap	Ra	Fa	Fr	Ft	Desirability
1	<u>209.999</u>	<u>0.080</u>	<u>0.341</u>	<u>0.270</u>	<u>106.263</u>	<u>314.467</u>	<u>132.254</u>	<u>0.957</u>
2	209.999	0.080	0.342	0.269	106.416	314.205	132.724	0.957
3	209.999	0.080	0.338	0.271	105.968	314.977	131.343	0.957
4	209.999	0.080	0.344	0.269	106.562	313.949	133.180	0.957
5	209.999	0.080	0.335	0.272	105.669	315.494	130.418	0.957
6	210.000	0.080	0.330	0.273	105.179	316.334	128.910	0.957
7	210.000	0.080	0.353	0.266	107.483	312.362	136.020	0.957
8	210.000	0.080	0.354	0.265	107.611	312.142	136.414	0.957
9	209.998	0.080	0.326	0.275	104.702	317.162	127.434	0.957
10	209.999	0.080	0.324	0.275	104.518	317.477	126.867	0.957

La figure (IV.6) présente la surface des iso-contours ainsi que le diagramme de surface 3D pour une désirabilité en fonction de Vc et f, et une valeur moyenne $ap=0.34\text{mm}$, cette figure nous permet, selon la valeur de désirabilité, de choisir le régime correspondant en projetant la valeur de désirabilité sur les deux axes Vc et f pour obtenir une rugosité de surface minimale (meilleure qualité de surface). D'une autre manière, la figure (IV.6) expose les valeurs optimales des paramètres Vc et f, ainsi que celles des paramètres de sorties étudiés Ra et les composantes de l'effort.

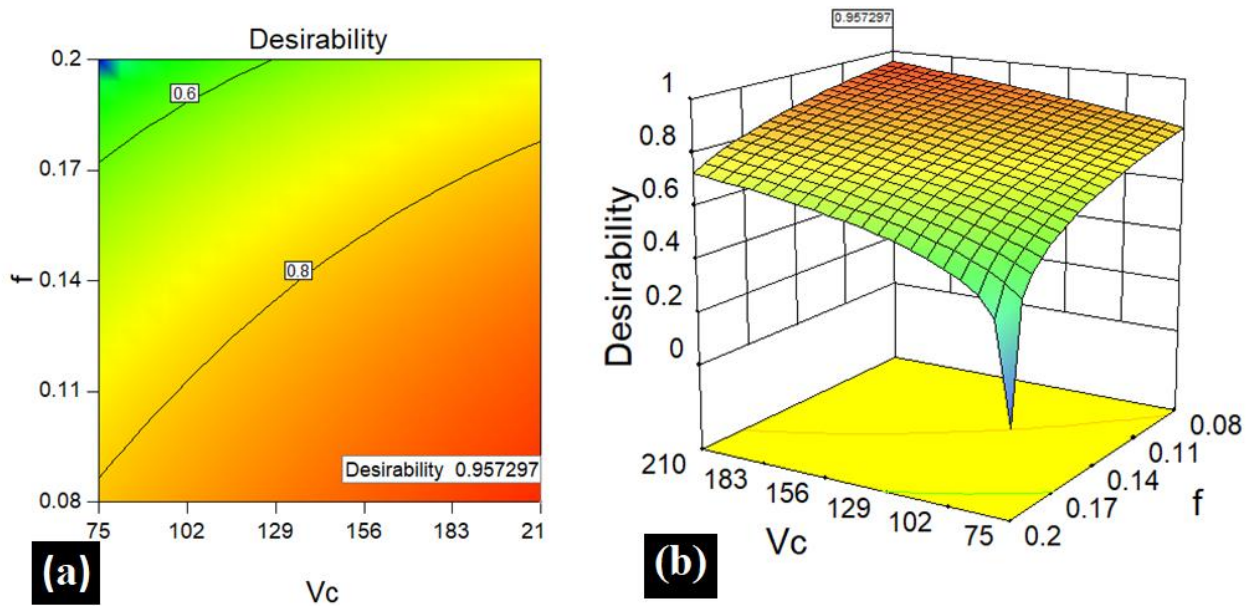


Fig. IV.6 Graphe de désirabilité de pour le 1^{er} cas, $a_p = 0.341$ mm,
a) Surface de contours, **b)** Diagramme de surface 3D.

Le diagramme de la solution optimale désirée est donné dans la figure IV.7. Cette figure montre la valeur minimal de désirabilité et les valeurs des paramètres d'usinage (V_c , f et a_p) pour obtenir la plus petite valeur de la rugosité de surface (R_a), c'est-à-dire qualité de surface meilleure.

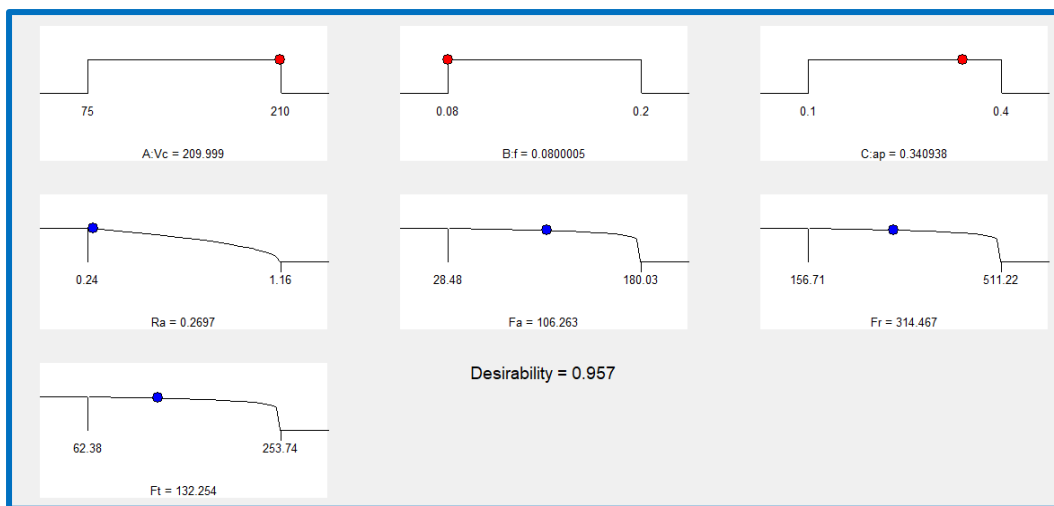


Figure IV.7 Diagramme d'optimisation de réponses pour le 1^{er} cas.

IV.4.1.2 Optimisation des conditions de coupe pour F_i minimale (2^{ème} cas)

Les valeurs des paramètres de coupe optimales pour les efforts de coupe (F_a , F_r et F_t) et la composante de la rugosité de surface, obtenues en utilisant le logiciel « *Design Expert* », les contraintes utilisées pendant le processus d'optimisation sont illustrées dans le tableau IV.8.

Tableau IV.8 Les contraintes pour optimisation des paramètres d'usinage

Name	Goal	Lower	Upper	Lower	Upper	Importance
		Limit	Limit	Weight	Weight	
Vc	is in range	75	210	1	1	3
fz	is in range	0.08	0.20	1	1	3
ap	is in range	0.1	0.4	1	1	3
Ra	minimize	0.24	1.16	1	0.1	3
Fa	minimize	28.48	180.03	1	0.5	5
Fr	minimize	156.71	511.22	1	0.5	5
Ft	minimize	62.38	253.74	1	0.5	5

Le problème revient à minimiser la fonction de désirabilité qui est la fonction objective sous les contraintes des variables. Le tableau IV.9 illustre les valeurs optimales des conditions d'usinage.

Les solutions optimales sont illustrées dans le tableau IV.9 par ordre de niveau décroissant de désirabilité. La valeur de désirabilité 0.971 correspond à la meilleure valeur des efforts de coupe en priorité et un minimum des composantes de l'effort de coupe dans la gamme des paramètres indiquées.

Le régime de coupe qui donne le meilleur compromis entre Ra et les composantes de l'effort de coupe est : vitesse de coupe ($V_c = 75\text{m/min}$), l'avance de ($f = 0.080\text{ mm/tr}$), la profondeur de passe de ($ap = 0.1\text{ mm}$).

Tableau IV.9 Réponses des efforts de coupe pour le 2^{ème} cas d'optimisation.

Ner	Solutions							
	Vc	f	ap	Ra	Fa	Fr	Ft	Dési
1	<u>75.000</u>	<u>0.080</u>	<u>0.100</u>	<u>0.774</u>	<u>29.067</u>	<u>187.173</u>	<u>65.330</u>	<u>0.971</u>
2	75.003	0.081	0.100	0.777	29.030	187.347	65.453	0.971
3	75.761	0.080	0.100	0.772	29.366	188.131	65.283	0.970
.								
.								
.								
.								
.								
.								
.								
.								
.								

La figure (IV.8) présente la surface des iso-contours ainsi que le diagramme de surface 3D pour une désirabilité en fonction de Vc et ap, et une valeur moyenne fixée à f=0.08mm/tr, cette figure nous permet, selon la valeur de désirabilité, de choisir le régime correspondant en projetant la valeur de désirabilité sur les deux axes Vc et ap pour obtenir des efforts de coupe minimaux (économiser l'énergie électrique). D'une autre manière, la figure (IV.8) expose les valeurs optimales des paramètres Vc et ap, ainsi que celles des paramètres de sorties étudiés Ra et les composantes de l'effort.

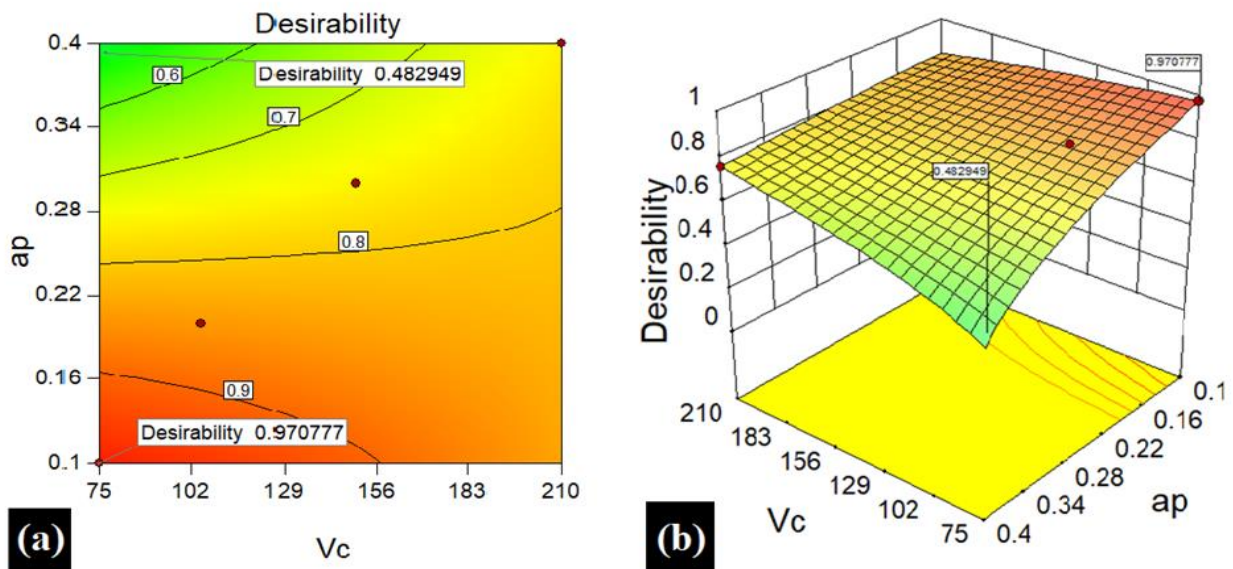


Fig. IV.8 Graph de désirabilité de pour le 2^{ème} cas, f=0.08 mm/tr,

a) Surface de contours, b) Diagramme de surface 3D.

Le diagramme de la solution optimale désirée est donné dans la figure IV.9. Cette figure montre la valeur minimale de désirabilité et les valeurs des paramètres d'usinage (V_c , f et a_p) pour obtenir les plus petites valeurs des efforts de coupe (F_a , F_r et F_t).

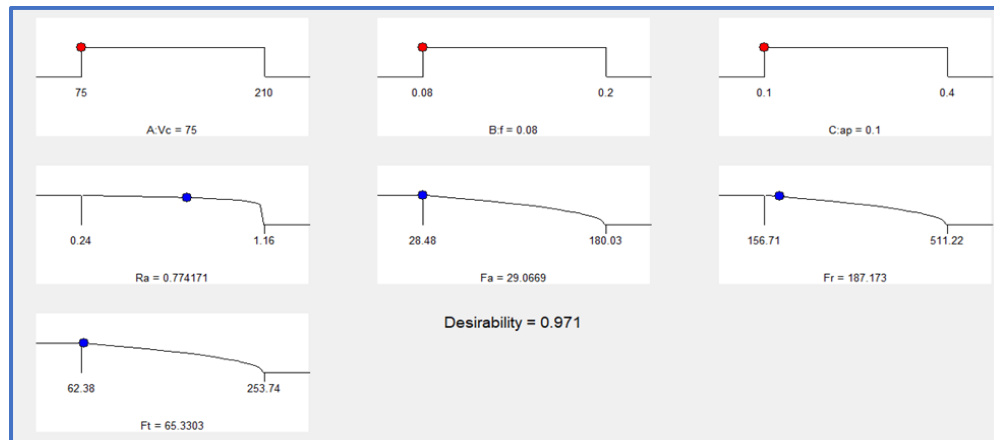


Figure IV.9 Diagramme d'optimisation de réponses pour le 2^{ème} cas.

IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué deux types d'optimisation à savoir : l'optimisation par la méthode de *Taguchi* et l'optimisation par la fonction de désirabilité pour optimiser le critère de rugosité (R_a) et les composantes des efforts de coupe.

L'étude réalisée débouche sur les conclusions suivantes :

- L'analyse par la méthode de *Taguchi* montre qu'il n'existe pas de régime optimal qui satisfait tous les paramètres technologiques étudiés, mais il existe différentes combinaisons correspondantes chacune aux critères d'optimisation considérés. Par contre la fonction de désirabilité présente une meilleure alternative dans le cas où on veut faire une optimisation multi-objectif.

Les combinaisons optimales, des paramètres du processus de tournage, obtenues à partir des deux méthodes d'optimisation sont respectivement :

- Méthode de *Taguchi* est : la vitesse de coupe de $V_c=210$ m/min, l'avance de $f=0,08$ mm/tr, et la profondeur de passe $a_p=0.4$ mm pour une rugosité optimale $R_{a-min}=0.28\mu\text{m}$, et pour $F_{a-min}=14.77$ N est : $V_c=210$ m/min, $f=0,12$ mm/tr, et $a_p=0.1$ mm, et pour $F_r-min=110.43$ N est : $V_c=210$ m/min, $f=0,12$ mm/tr, et $a_p=0.1$ mm, et pour $F_t-min=40.58$ N est : $V_c=150$ m/min, $f=0,08$ mm/tr, et $a_p=0.1$ mm.

- Les deux cas d'optimisation par la fonction de désirabilité donnent des valeurs de désirabilité de 0.957 et 0.971 pour des régimes de coupe de ($V_c=209.99\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/tr}$, $a_p=0.341\text{mm}$) et ($V_c=75\text{m/min}$, $f=0.08\text{ mm/tr}$, $a_p=0.1\text{mm}$) correspondant à une rugosité de surface et efforts de coupes de ($R_a=0.27\mu\text{m}$, $F_a=106.26\text{N}$, $F_r=314.46\text{N}$, $F_t=132.25\text{N}$) et ($R_a=0.774\mu\text{m}$, $F_a=29.06\text{N}$, $F_r=187.17\text{N}$, $F_t=65.33\text{N}$), respectivement.

Conclusion générale

Après une étude bibliographique sur plusieurs supports techniques particulièrement les articles qui sont riches de plusieurs informations et méthodes de travail concernant notre recherche, nous avons présenté toute une description sur le montage expérimental approprié qui contient le matériel utilisé (tour, plateforme Kistler, rugosimètre 2D, appareillage ...) et le type de matériaux à usiné et sa composition chimique.

On a planifié nos expériences par un plan orthogonal de Taguchi L_{16} ; une fois qu'on a collecté les résultats selon le plan L_{16} , la méthodologie de surface de réponse est utilisée par la suite pour modélisation les paramètres misent en étude, qui sont la rugosité de surface et les trois composantes de l'effort de coupe, afin de déterminer des modèles de prédiction linéaire.

La contribution en pourcentage des paramètres technologique qui sont la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de passe est obtenue par l'application de l'analyse de variance (Anova), l'importance des pourcentages de contribution de l'avance (f) et de la profondeur de passe (ap) sur la rugosité de surface (R_a) et les composantes de l'effort de coupe, respectivement, vient confirmer les résultats obtenus par les recherches prédites.

Vu leurs introductions dans les procédés de fabrication, en termes de contrôle et prédiction, les réseaux de neurone artificiels (ANN) s'imposent comme un nouveau moyen de modélisation, pour cette raison, une comparaison des résultats issus des deux méthodes est effectuée. On peut dire que les résultats obtenus par les ANN sont d'une précision meilleure comparés à ceux obtenus par RMS, et cela en se basant sur le coefficient de détermination R^2 et la racine carrée de l'erreur moyenne RMSE.

L'optimisation des paramètres de coupes (V_c , f et ap) par les deux méthodes, Taguchi et fonction désirabilité a donné des régimes de coupe optimaux différents pour R_a , F_a , F_r , F_t ; dans le cas de l'optimisation par Tguchi et pour les deux cas d'optimisation par la fonction désirabilité (importance à la qualité de surface, importance à la productivité) on peut conclure que la fonction désirabilité est plus adéquate pour notre étude, vu quelle rassemble les paramètres de sortie dans un seul régime de coupe, et aussi donne l'importance pour un paramètre sur un autre.

Référence bibliographique

- [1] **BOUYEDDA M**, Etude de performances des matériaux de coupe – Application aux plaquettes de l’E.P.E, Projet de fin d’étude Master II Conception et production industrielle, Université 08 Mai 1945 Guelma, 2012.
- [2] **AOUICI H**, Etude de l’usinabilité de l’acier AISI H11 à l’état traité par le CBN 7020, Thèse de doctorat de Productique, Université 08 Mai 1945 Guelma, 2012.
- [3] **MORARU G F**, Etude du comportement du système « pièce – outil – machine » en régime de coupe vibratoire, Thèse de doctorat de Génie industriel, l’Université «Politécnica» de Bucarest, 2002.
- [4] **AURELIEN M P**, Etude expérimentale et modélisation par éléments finis du procédé de fraisage : Applications à l’identification paramétrique des lois de comportement, Thèse de doctorat pour l’Ingénieur et Microtechniques, Université de Franche-Comté, 2009.
- [5] **ALAIN P**, Tournage, Technique de l’ingénieur, BM7086, Traité génie mécanique, Paris, 2000.
- [6] **CZAPLICKI A**, L’usinabilité et la coupe des métaux, Revue de la société royale belge des ingénieurs et des industries, n°12. pp. 708 – 736, 1962.
- [7] **GRUBER B**, Outillage et mesure, Dunod 2ème Édition, Lausanne, pp. 51-63, 1981.
- [8] **POULACHON G**, Aspects phénoménologiques, mécaniques et métallurgiques en tournage c bn des aciers durcis. Application: usinabilité de l’acier 100cr6 (Doctoral dissertation, Paris. ENSAM), 1999.
- [9] **MATHON P**, Usinabilité et lois générales de l’usinage des aciers et des fontes, mécanique, matériaux, électricité (f), n° 246-247, pp. 23-36, 1970.
- [10] **ROBELET M, ODIN G**, Etude comparée de deux tests rapides d’usinabilité, corrélation avec les résultats d’essais de longue durée, Revue de mai, pp. 1021-1032, 1973.
- [11] **BELHADI S**, Etude de l’usinage des aciers traités lors du tournage avec des matériaux de coupe de haute technologie : étude expérimentale de la formation du copeau, Thèse de doctorat de Productique, Université BADJI MOKHTAR-ANNABA, 2009.
- [12] **BUTIN R & PINOT M**, Fabrications mécaniques technologie, tome III, Fouchier, juillet 1988.
- [13] **BAGUR F**, *Matériaux pour outils de coupe*, Techniques de l’Ingénieur, traité Génie mécanique, BM 7080.
- [14] **Sandvik Coromant**.
http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/tech_guide/spa/MTG_H.PDF
- [15] **CHANCEL P**, les nouveaux outils coupants, CETIM information N° 147, Février, 1996.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [16] **AOUICI H**, Production Mécanique II, Ecole nationale supérieure de technologie, 2013.
- [17] **LEROY F**, Endommagement des outils de coupe, Techniques de l'ingénieur, B7042.
- [18] **LEPADATU D**, Optimisation des procédés de mise en forme par approche couplée plans d'expériences, éléments finis et surface de réponse, pp : 35-36, 2006.
- [19] <http://www.ac-creteil.fr/lycees/94/ebranlycreteil/cours/techno/html/rugosite00.htm>
- [20] Etats de surface des pièces mécaniques Sciences industrielles pour l'ingénieur PT – Lycée Lislet Geoffroy : <http://pt.llg.free.fr/13/S2I/etats%20de%20surface.pdf>
- [21] **CLAUDE B, LIONEL G**, Memotech productique matériaux et usinage, Editions casteilla, PARIS, Septembre 1999.
- [22] Archive multilingue, Actionnées par WorldLingo.
http://www.multilingualarchive.com/ma/frwiki/fr/Etat_de_surface#Rugosit.C3.A9
- [23] **HUGHES L**, Etude de l'influence de la rugosité sur l'écoulement de fluide dans les fissures rocheuses, Thèse acceptée par la Faculté Polytechnique de Mons, L'obtention du grade de docteur en Sciences Appliquées, 2006.
- [24] **Alfredo A, AGUILERA L**, Optimisation des conditions de coupe pour l'usinage du bois. Application de la méthode Couple Outil Matière au défonçage des panneaux de fibres de densité moyenne, Thèse de doctorat en Sciences du Bois, l'Université Henri Poincaré, Nancy I, 2000.
- [25] **Rigal J**, Usinage des composants mécaniques, application aux pièces frittées, Technique de l'ingénieur, BM5018.
- [26] **Martin P**, Commande adaptative de machines-outils. Etude d'un système d'optimisation de l'opération de tournage avec mesure de l'usure de l'outil, Thèse Docteur en Sciences, Université de Nancy I, 1980.
- [27] **Aouici H, Bouchelaghem H, Yallese MA, Elbah M, Fnides B**, Machinability investigation in hard turning of AISI D3 cold work steel with ceramic tool using response surface methodology, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer-Verlag London, 2014.
- [28] **ZERTI Oussama**, thèse de doctorat Investigation expérimentale et analyse multi-objective lors du tournage de l'acier AISI D3 en utilisant les méthodes RSM, ANN, Taguchi et GRA, université 8 mai 1945 Guelma, date 2018.
- [29] **ELBAH, Mohamed, YALLESE, Mohamed Athmane, AOUICI, Hamdi et al.** Évaluation comparative d'outils d'essuie-glace et d'outils en céramique conventionnels sur la rugosité de surface dans l'acier à tournage dur AISI 4140. *Mesure* , 2013, vol. 46, no 9, p. 3041-3056.
- [30] **MEDDOUR, I., YALLESE, MA, KHATTABI, R. et al.** Etude et modélisation des forces de coupe et de la rugosité de surface lors du tournage dur de l'acier AISI 52100 avec un outil céramique mixte: optimisation des conditions de coupe. *Journal international des technologies de fabrication de pointe* , 2015, vol. 77, no 5-8, p. 1387-1399.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [31] **ASILTÜRK, Ilhan et AKKUŞ, Harun.** Détermination de l'effet des paramètres de coupe sur la rugosité de surface en tournage dur à l'aide de la méthode de Taguchi. *Mesure* , 2011, vol. 44, no 9, p. 1697-1704.
- [32] **Gasmi bouthayna. PFE master 2018** modélisation des paramètres technologiques dans l'usinage de l'acier AISI D3 par la méthode RMS
- [33] <https://www.sandvik.coromant.com/fr-fr/products/pages/toolguide.aspx>
- [34] <https://www.ebay.com/p/SANDVIK-COROMANT-SNG-452t-SNGN-120708t-Cc650-Ceramic-10-Inserts/838524133?iid=183252390233>
- [35] https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thode_Taguchi
- [35] [<https://fr.wikipedia.org>].
- [36] [<http://e-philu.univ-paris1.fr>].
- [37] [<http://www.statsoft.fr>].
- [38] **MEDJELDI Mohamed**, PFE master , MODELISATION ET OPTIMISATION DES CONDITIONS DE COUPES LORS DE L'USINAGE DE L'ACIER INOXYDABLE AISI 420 TRAITÉ.2015/2016
- [39] Taguchi G, System of Experimental Design, Unipub/Kraus, International Publication, 1987.
- [40] **ABDELALI, SLAIMIA.** Contribution à l'étude de l'usinabilité des alliages ferreux en fraisage. Thèse de doctorat. Université 8 mai 1945 de Guelma.
- [41] **ALLAL Mohammed**, PFE master, Optimisation des conditions de coupe lors de l'usinage de deux aciers inoxydables univ de guelma 2015/2016

Résumé

Le présent travail a été réalisé pour étudier le comportement d'un matériaux de type AISI D3 d'une dureté de 63 HRC usiné par un outil en céramique (CC650), l'objectif de cette étude est d'essayer de comprendre la variation de la rugosité de surface (Ra) et les composantes de l'effort de coupe (Fa, Fr et Ft) en fonction des paramètres de coupe qui sont : la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de passe, et par la suite de déterminer les régime optimaux. Un plan orthogonal de Taguchi L_{16} est employée pour construire le tableau expérimental, la méthode de surface de réponse (RMS) et l'analyse de variance ANOVA sont utilisés pour analyser les résultats est déterminer le pourcentage de contribution de chaque paramètre technologique. La modélisation par la méthode des réseaux de neurone artificiel (ANN) est présentée pour prédire des modèles théoriques. Une comparaison basée sur le (R^2) et (RMSE) des deux méthodes RMS et ANN confirme la performance des ANN par rapport à RMS. Les méthodes Taguchi et la fonction de désirabilité sont utilisées pour optimiser (Ra et Fa, Fr, Ft) on peut juger que la fonction désirabilité est plus appropriée pour notre étude.

ملخص

تم إنجاز العمل الحالي لدراسة سلوك مادة فولاذية من نوع AISI D3 ذات صلابة 63 HRC يتم تصنيعها بواسطة أداة قطع خزفية (CC650) ، والهدف من هذه الدراسة هو محاولة فهم الاختلاف في خشونة السطح (Ra) ومكونات قوة القطع (Fa و Fr و Ft) بدلالة : سرعة القطع ، التقدم لكل دورة وعمق التمرير ، وذلك لتحديد النظام الأمثل. يتم استخدام مخطط متعامد من Taguchi L_{16} لبناء الجدول التجريبي ، وتستخدم طريقة الاستجابة السطحية (RMS) وتحليل ANOVA التباين لتحليل النتائج لتحديد النسبة المئوية مساهمة كل معلمة التكنولوجية. يتم تقديم نمذجة الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN) للتنبؤ بالنماذج النظرية. تؤكد المقارنة المستندة إلى (R^2) و (RMSE) للطريقتين RMS و ANN أداء ANN مقارنةً بـ RMS. تُستخدم أساليب Taguchi والدالة التفضيلية في تحسين (Ra و Fa ، Fr ، Ft) يمكننا الحكم على أن الدالة التفضيلية أكثر ملائمة لدراستنا.