

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

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



596

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

Spécialité : Conception et Production Industrielles
Présenté par : BERROUR HICHAM

Modélisation de la rugosité de surface et des efforts de coupe lors du tournage dur en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RMS)

Sous la direction de : Pr. yallese.M.A

Juin 2011

Remerciement

A la fin de ce projet nous tenons à remercier

*Le bon Dieu qui nous a donné la patience, le courage d'achever ce travail
malgré toutes les difficultés cette projet.*

Nous tenons à remercier notre encadreur : Pr. Yaltese.M.A

Qui a géré avec compétence, et efficacités le déroulement

De notre travail et qui nous a bien orienté,

Pour son aide précieuse et ses conseils

Judicieux,

Nous tenons également à remercier

- *Toutes les personnes qui ont contribuées à notre formation.*
- *Toutes les personnes qui nous out aidé et soutenu de prés ou de loin
tout long de ce travail.*

berrouf hicham



SOMMAIRE



Introduction générale

Chapitre I- Etude bibliographique, usinage des aciers dur

I.1 Tournage dur	02
I-1 Introduction	02
I.1.2 Définition du tournage dur	02
I.1.3 Comparaison entre le tournage dur et la rectification	03
I.1.4 Désavantages du tournage dur par rapport à la rectification	04
I.1.5 Les matériaux usinés en tournage dur	06
I.1.6 Marché potentiel du tournage dur d'après General Electric	06
I.2 phénomènes physiques intervenant dans le processus de coupe	08
I.2. 1 Efforts de coupe	08
I.2.1.1 Définition	08
I.2.1.2 Génération des efforts de coupe	08
I.2.1.3 Effort spécifique de coupe	09
I.2.2 Rugosité de surface	10
I.2.2.1 principaux défauts de la rugosité	10
I.2.2.2 Principaux critères d'états de surface	11
I.2.2.3 Évaluation de la rugosité	12
I.2.3 Usure des outils de coupe	13
I.2.3.1 Définition	13
I.2.3.2 Phénomène provoquant l'usure	13
I.2.3.5 Différentes Formes d'usure des outils	14
I.2.3.6 Relations entre l'usure et le temps	16
I.3 Les plans d'expériences	17
I.3.1 Introduction	17
I.3.2 Notion d'espace expérimental	17
I.3.3 Notion de surface de réponse	19
I.3.4 Notion de modélisation mathématique	20
I.3.6 Plans factoriels complets à deux niveaux	21

I.4 Travaux de recherche en tournage dur	23
I.5 Conclusion	29

Chapitre II- Procédure expérimentale

II-1 Introduction	31
II.2 Équipements utilisés	31
II-3 Planification des expériences	37
II.4 Conditions de coupe	38
II-5 Conclusion	38

Chapitre III- Application de la méthodologie de surface de réponse pour la prédiction des modèles mathématiques

III. Modélisation des paramètres technologique en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RMS)	40
III.1 Introduction	40
III.2 Modèles de la rugosité en fonction des paramètres de coupe	40
III.2 .1 Résultats des expériences	40
III.2.2 Analyse de la variance (ANOVA) et détermination des modèles mathématique	41
III.2.3 Diagrammes de surfaces 3 D et Graphique de Contour	42
III.2.4 Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction	45
III.2.5 Test de normalité de la distribution des résidus pour (Ra)	47
II.2.6 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites	48
III.3 Modèles de l'effort de coupe en fonction des paramètres de coupe	50
III.3.1 Résultats des expériences	50
III.3.2 Analyse de la variance (ANOVA) et détermination des modèles mathématique	50
III.3.3 Diagrammes de surfaces 3 D et Graphique de Contour	52
III.3.4 Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction	55
III.3.5 Test de normalité de la distribution des résidus pour (Ft)	57
III.3.6 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites	58
III.4 Modèles de la Puissance de coupe en fonction des paramètres de coupe	60
III.4.1 Résultats des expériences	60
III.4.2 Analyse de la variance (ANOVA) et détermination des modèles mathématique	61
III.4.3 Diagrammes de surfaces 3 D et Graphique de Contour	63
III.4.4 Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction	66
III.4.5 Test de normalité de la distribution des résidus pour (Pc)	68
III.4.6 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites	69
III.5 Conclusion	71

Conclusion générale	73
perspectives	74
Nomenclature	75
Références bibliographiques	76

Résumé

Le tournage des métaux durs est un procédé assez récent dans son utilisation. Le but de celui-ci, est de supprimer la phase de rectification, souvent longue et coûteuse. Aussi, le tournage des métaux durs est prometteur et intéresse de nombreux industriels de part les gains de productivité qu'il doit permettre de réaliser sur l'usinage des pièces dures. C'est dans ce cadre que s'inscrit cette étude. Elle concerne une investigation sur le comportement de l'outil de 02 céramiques (CC6050, CC650), face à un acier dur Z200Cr12 traité à (60HRC). Ces caractéristiques rendent l'usinage de ces aciers très difficile ce qui conduit généralement à des durées de vie des outils très limitées. De là, il est très intéressant de trouver des plaquettes de coupe qui ont des meilleures performances et de sélectionner une plage des paramètres du régime de coupe où ces plaquettes peuvent productivement et efficacement usiner ces aciers.

Cette étude met au point l'évaluation de deux matériaux de coupe recommandés pour l'usinage des aciers dur. Ces matériaux sont les céramiques revêtues (CC6050) et la céramique non revêtus (CC650). L'objectif de cette recherche est d'une part d'examiner les différents phénomènes intervenants lors de l'usinage à sec de l'acier dur Z200Cr12 tels que, les efforts de coupe, la rugosité et la puissance de coupe, avec la variation de différents paramètres du régime de coupe (vitesse de coupe, avance par tour, profondeur de passe). D'autre part, nous avons fait une analyse statistique des résultats basée sur l'analyse de variance (ANOVA) et la méthodologie de surface de réponse (RSM) et cela dans le but de proposer des modèles mathématiques de la rugosité, des efforts de coupe et de la puissance de coupe pour d'éventuel des prédictions.

Mots clé : Tournage dur, Matériaux de coupe, Comportement, Rugosité, Efforts de coupe, puissance de coupe, RMS, ANOVA

PROBLÉMATIQUE

Malgré le développement de nouvelles techniques permettant d'élargir le champ d'application des procédés de fabrication par enlèvement de la matière, telles que l'électroérosion ou la découpe par laser, l'Usinage par outil coupant garde une place dominante parmi ces procédés, en raison du rendement énergétique très favorable de ce processus traditionnel. Cette position se trouve d'ailleurs renforcée, grâce aux gains de productivité et à la flexibilité accrue, que permet l'utilisation de plus en plus étendue de la commande numérique et de la programmation automatique des machines-outils.

Aussi est-il souhaitable d'abaisser au maximum les coûts de production de ce processus par l'augmentation des vitesses de coupe, réalisable notamment grâce à l'introduction de nouveaux matériaux coupants. De ce fait, l'optimisation des conditions opératoires des outils coupants doit contribuer largement au développement et à la productivité des techniques avancées d'automatisation de l'usinage.

De plus les progrès techniques, notamment dans les domaines de l'automobile, l'aviation, de l'espace et du nucléaire, ont développé l'emploi de matériaux à d'usinabilité difficile, qui demandent des matériaux à outils très résistants. Parallèlement, ces progrès font apparaître de nouveaux matériaux susceptibles d'être utilisés pour réaliser des outils coupants répondant à ces exigences.

Les outils de coupe en acier rapide, carbure et cermet sont utilisés en tournage pour la plupart des matériaux usinés mais leur tenue est limitée et leur usage parfois impossible lorsque certaines pièces à usiner se caractérisent par une grande dureté et une résistance à l'abrasion élevée. C'est le cas principalement des aciers et fonte trempés, des alliages réfractaires à base de nickel et des matériaux composites à matrice métallique.

C'est pourquoi, bien que les études entreprises jusqu'à présent dans le domaine de la coupe des matériaux durs (mécanisme de la formation du copeau, comportement des outils, aspect thermique, endommagement des arêtes de coupe) aient permis des progrès importants pour la connaissance du processus de coupe en tournage dur, il est nécessaire de les réactualiser et de les poursuivre, afin de répondre à ces conditions nouvelles du contexte industriel. Notons aussi que le tournage dur a été appliqué dans beaucoup de cas industriels mais il n'est pas entièrement contrôlé. Il apparaît, en particulier, que la complexité et les interactions des nombreux facteurs impliqués dans les phénomènes de la coupe en TD, nécessitent des expérimentations spécifiques à chaque matériau, afin de définir le meilleur choix des outils et les conditions de coupe optimales correspondantes.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis toujours, le fabricant essaye d'améliorer et d'augmenter la productivité en usinant : plus difficile, plus précis, et surtout plus économique. Grâce à l'avancé technologiques des machines outils en matière de leur puissance, leur rigidité, leur précision, l'apparition d'outils très durs et issues des dernières technologies, dont les (carbures revêtus, céramique, et CBN), ayant une grande dureté, une grande résistance à l'usure et une bonne résistance aux chocs ; une nouvelle technique d'usinage a vu le jour appelé le tournage dur.

Le tournage dur se présente comme une alternative à la rectification conventionnelle qu'il vise soit à remplacer, soit à compléter. Aussi, ce procédé remet complètement en cause la méthodologie appliquée à une gamme de fabrication. Il faut cependant garder à l'esprit que la qualité des usinages découle de la rigidité du tour (pas de vibration).

Notre étude bibliographique est structurée comme suit :

Le premier chapitre concerne une revue bibliographique sur le tournage dur, suivi par une présentation des phénomènes régissant la coupe des métaux (les efforts de coupe, l'intégrité de surface, l'usure des outils). Le troisième point concerne la méthodologie de surface de réponse (RMS). La fin de cette partie débouche sur quelques résultats de travaux de recherche sur l'usinage dur et une conclusion sur les perspectives de ce procédé.

Dans le deuxième chapitre nous avons défini une méthodologie de travail qui repose sur la planification des expériences. Nous avons présenté les conditions de coupe ainsi que les équipements et le matériel de mesure utilisés.

Dans le troisième chapitre nous avons présenté une étude statistique (analyse de variance, interactions) basée sur la méthodologie de surface de réponse et cela dans le but de déterminer des modèles mathématiques qui permettent la prédiction de la rugosité de surface, efforts de coupe et la puissance de coupe en fonction des paramètres de coupe (V_c, f, a_p).

En fin, nous avons fait une conclusion générale suivie d'une liste de références bibliographiques.

CHAPITRE I
ETUDE
BIBLIOGRAPHIQUE,
USINAGE DES ACIERS
DUR

I.1 Le Tournage Dur

I.1.1 Introduction

Le tournage des métaux durs est un procédé assez récent dans son utilisation. Le but de celui-ci est, à terme de supprimer lors de l'usinage de pièces de précision, la phase de rectification, souvent longue et coûteuse.

Aussi, le tournage des métaux durs est prometteur et intéresse de nombreux industriels de part les gains de productivité qu'il doit permettre de réaliser sur l'usinage des pièces. En effet, avec les méthodes d'usinage conventionnel, là où une grande dureté fonctionnelle des pièces est demandée (50 à 65 HRC), consiste à faire les différentes phases successives suivantes :

- Usinage de la pièce à l'état non traité ;
- Traitement thermique jusqu'à l'obtention de la dureté désirée ;
- Finition par rectification pour que la pièce respecte les cotes notifiées sur le dessin de définition.

Cette longue séquence d'opérations est causée en partie par :

- La non disponibilité (jusqu'à récemment) d'un matériau à outil coupant les matériaux de hautes duretés, résistant à l'usure et tenace.
- La mauvaise appréciation du besoin en machines-outils plus puissantes, plus rigides et plus précises.
- La pratique traditionnelle qui consiste à faire l'ébauchage sur une machine et après faire la finition sur une autre machine plus précise.

Ce type d'usinage conventionnel implique donc des montages et des démontages des pièces qui sont inutiles avec le tournage dur. Avec le nouveau mode d'usinage, le brut peut être usiné directement après traitement thermique et beaucoup d'opérations peuvent être supprimées par substitution d'une opération à deux, donnant ainsi un gain considérable aussi bien en temps qu'en coût [1].

I.1.2 Définition du tournage dur

Le tournage dur concerne le tournage de matériaux ferreux durcis entre 45 et 70 HRC par des opérations principalement de finition interne ou externe, et dans certain cas d'ébauche. A l'aide d'outils modernes à géométrie définie.

La (figure I.1), présente le dressage d'un cylindre de laminoir avec une dureté de 58 HRC, $ap = 4$ mm, $f = 0,1$ mm/tr, $Vc = 100$ m/min.

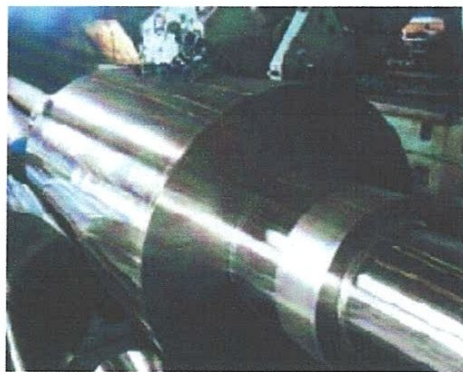


Figure I.1 : Dressage d'un cylindre de laminoir (dureté 58 HRC).

Les matériaux durs sont caractérisés par les propriétés suivantes :

- ✓ Une grande dureté à la pénétration.
- ✓ Un pouvoir abrasif élevé.
- ✓ Une faible ductilité.
- ✓ Un grand rapport entre la dureté et le module d'élasticité module de Young(E).

Le mot **Dur** signifie :

- ✓ Dur au sens de la dureté du matériau usiné, du point de vue résistance à la pénétration d'un indenteur ;
- ✓ Dur au sens de difficulté à usiner le matériau, conséquence de sa très mauvaise usinabilité (un matériau peut être difficile à usiner sans pour autant être dur);
- ✓ Dur au sens de la difficulté de l'opération d'usinage (alésage profond, travail aux chocs,...) [2].

A l'origine, ce terme "**dur**" ne concernait que la grande dureté du matériau usiné. Avec l'arrivée de nouveaux matériaux, des géométries de pièces plus complexes, ce vocable s'est généralisé à d'autres dimensions [3].

I.1.3 Comparaison entre le tournage dur et la rectification

Poulachon [2] a fait une comparaison entre le tournage dur et la rectification, suivant quatre critères: "productivité, qualité, investissement et environnement"

✓ **Productivité :**

- Le tournage dur autorise des taux d'enlèvement de matière trois à quatre fois supérieurs à ceux de la rectification conventionnelle.
- Il peut s'appliquer de la petite à la grande série (ex: roulementier, automobile);
- Les formes complexes sont réalisables par contournage et les réglages sont rapides;
- Il permet de s'adapter rapidement aux productions de plus en plus variables;
- L'automatisation est bien plus aisée;
- Le tournage dur est un procédé très souple, bien adapté aux petites séries répétitives et aux changements de fabrication fréquents, ce qu'exige le travail en flux tendu ou de type juste à temps;
- La possibilité de tourner des pièces de très grandes dimensions;
- Le travail aux chocs est possible en utilisant la nuance d'outil adaptée;
- Pour un volume de matière déterminée, le tournage dur consomme 5 fois moins de puissance que la rectification;
- Les plaquettes CBN normalement usées peuvent être réaffûtées sur la face de coupe.

✓ **Qualité et précision :**

- Le TD permet de réaliser de multiples opérations sans reprises sur la machine;
- Le TD permet d'obtenir des états de surface (jusqu'à des Ra de 0,15 μm) de même valeur que ceux obtenus en rectification (inférieur à 0,5 μm);
- Le TD permet d'obtenir des qualités IT5-IT6, mais la rectification s'impose pour de meilleures qualités;
- Les nouvelles machines disponibles sur le marché permettent d'atteindre des circularités de 1 μm des cylindricités de 2 μm sur 50mm, des tolérances de forme de $\pm 2 \mu\text{m}$, des tolérances en production de 4 μm ;
- En rectification la pièce et la meule sont en rotation ce qui affecte la qualité de la cylindricité;

- Les stries en hélice, caractéristiques de la topographie des surfaces tournées ne sont pas toujours favorables dans le cas des pièces avec fonction d'étanchéité;
- L'alésage avec meule tige est très délicat (encrassement et flexion), l'alésage à la barre d'alésage -voir antivibratoire- est meilleur;
- Les efforts de coupe sont plus faibles qu'en rectification.

✓ Investissement

- Le tournage dur diminue considérablement le montant d'investissements machine et outil (coût d'une rectifieuse: 300Keuro, coût d'un tour CN: 120Keuro) cependant le coût outil/pièce, peut être deux à trois fois plus important (mais suite à son industrialisation croissant rapidement, le prix des plaquettes CBN est en forte baisse);
- La rectification nécessite des opérateurs plus spécialisés.

✓ Environnement

Avec les nouvelles normes environnementales, les industries sont contraintes de traiter ou recycler leurs déchets sous peine de fortes amendes. Les entreprises qui génèrent des boues de rectification sont actuellement entre les mains des cimentiers. Effectivement les boues ne sont plus un déchet puisque c'est une matière première rentrant dans la fabrication du ciment, en conséquence, la qualité des boues doit être maîtrisée. L'analyse des taux d'hydrocarbures (huiles machine, liquide de coupe, lavage des boues) doit rester inférieur à 0,05% sinon celle-ci doivent être traitées différemment soit par pyrolyse, en décharge ou en incinération (surcoût à la tonne 150euro). Ces boues sont constituées de 50% de minuscules copeaux d'acier générés en cours d'opération de rectification qui se mélangent avec 46% de liquide de coupe, 3% de meule et 1% d'huile de graissage.

Malgré des résultats encourageants concernant le traitement des déchets d'autres pistes sont à envisager:

- En interne pour réduire les quantités de boues par pressage, en réduisant les surépaisseurs d'usinage en utilisant des procédés ne générant pas de boues (tournage dur);
- En externe par le développement d'autres filières telles que la mise en décharge contrôlée après neutralisation, l'incinération mais surtout le recyclage en aciérie ou en fonderie ;
- L'usinage pouvant s'effectuer à sec, le procédé contribue à des économies de lubrifiant. Aujourd'hui l'utilisation des liquides d'arrosage et des huiles représente 16 % des coûts totaux de fabrication, tant en produits utilisés qu'en recyclables de destruction entretien des installations;
- Il génère des copeaux recyclables, donc revendus;
- Les pièces rectifiées nécessitent un lavage.

I.1.4 Désavantages du tournage dur par rapport à la rectification

Dans certains cas, il ne sera pas possible, d'un point de vue technique ou économique, de remplacer la rectification cylindrique par le tournage dur. Il se peut, par exemple, que la courbure de la pièce soit si importante que les tolérances dimensionnelles ne puissent être atteintes. Ceci peut se produire dans le cas d'une pièce mince. En effet, dans le cas du tournage dur, la force de coupe ($F_r > F_v$), contrairement au tournage de pièces à l'état non durci. Le diamètre des pièces à tourner ne doit pas être trop réduit de sorte que les vitesses de coupe requises puissent continuer à être atteintes. Prenons par exemple une pièce d'un diamètre de 8 mm et une vitesse requise de 200 m/min.

Pour cela le nombre de tours doit être de 7961,7 tours par minute. Il va de soi que ce nombre de tours ne peut être fourni dans n'importe quelle condition. Pour certaines applications, la surface ne peut présenter un relief fileté. C'est notamment le cas des composants hydrauliques qui nécessitent des garnitures d'étanchéité. La surface des pièces tournées présentera toujours une structure fileté, contrairement à celle des pièces rectifiées. (Il n'est cependant pas exclu d'obtenir une pièce tournée qui puisse servir à réaliser une parfaite étanchéité aux gaz) [4]. Voir (figure I.2etI.3).

Usinage de surfaces

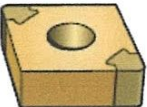
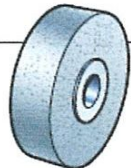

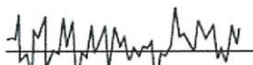
	 Tournage	 Rectification
Méthode	Un seul point de contact	Contact multi-pointes
Profil	Régulier Un seul	Irrégulier Multiples
Contrainte résiduelle	Compression	Compression
Profil de surface		

Figure I.2 : Le tournage dur produit une surface de meilleure qualité que la rectification.

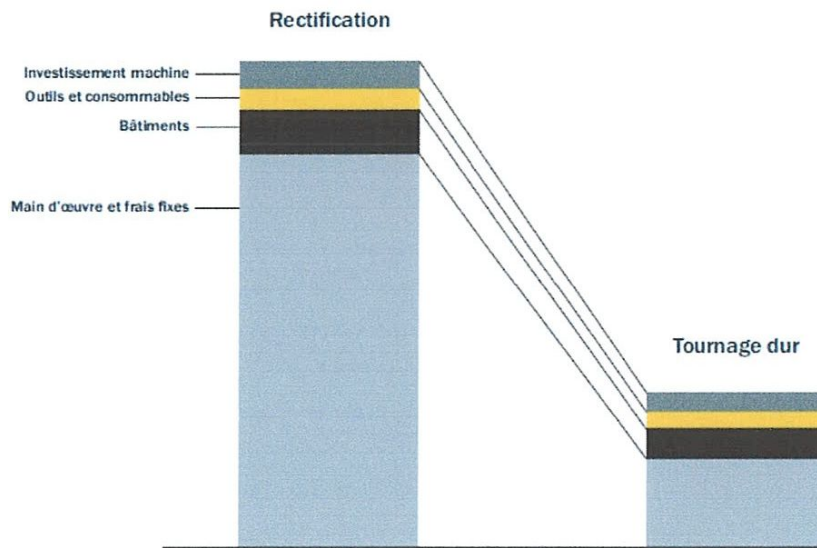


Figure I.3 : Le tournage dur permet des économies substantielles de main d'œuvre et de frais fixes comparé à la rectification.

I.1.5 Les matériaux usinés en tournage dur

Les matériaux ferreux considérés ici comprennent les aciers rapides, les aciers d'outillages à chaud et à froid, les aciers alliés, les aciers de cémentation, les aciers de nitruration, les fontes blanches, les fontes alliées... [2].

- ✓ Les aciers de construction pour TTh :
- ✓ Les aciers d'outillages à froid (X200Cr12, X160CrMoV12,...) :
- ✓ les aciers d'outillages à chaud (X40CrMoV5-1, X38CrMoV 40NiCrMo16, 35CrNiMo4...):
- ✓ les aciers à moules (XC48, 40CrMnMo8, 40NiCrMo16...):
- ✓ les aciers à roulement (100Cr6 ou AISI52100) :

Ce matériau est usiné à des valeurs de dureté de 720HV (60HRC) et constitue un domaine où les outils CBN sont employés avec succès [5], [6]. Lors de l'usinage en finition de cet acier, un outil à faible concentration de CBN est préférable par rapport à un outil à forte concentration de CBN ou à une céramique mixte (Al_2O_3+TiC).

- ✓ Les aciers rapides (HS 6-5-2, HS 2-9-1-8) :
- ✓ Les aciers de cémentation (16MnCr5, 10 CrNi6, C10, 18CrMo4...):
- ✓ Les aciers de nitruration (30CrMo4, 30CrAlMo6-12, 40CrAlV6-10) :
- ✓ Les fontes :
- ✓ Les alliages réfractaires à base de nickel (Inconel 718) ou cobalt (stellite) :

I.1.6 Marché potentiel du tournage dur d'après General Electric

Parmi les 376 M\$ cités à la (figure I.4), le tournage dur représente 95 M\$. On peut remarquer clairement que les outils en CBN ont les possibilités de se développer par rapport aux autres matériaux usinant utilisés dans la technique du tournage dur (Figure I.5, I.6, I.7) [7].

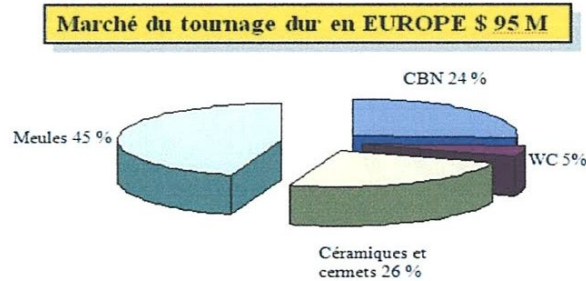


Figure I.4 : Matériaux à outil utilisés en tournage dur en Europe.

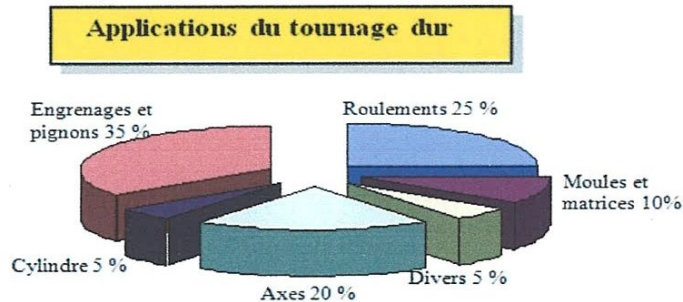


Figure I.5: Utilisation du CBN par famille de pièces.

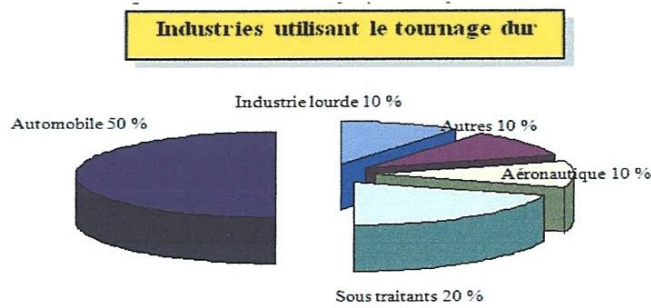


Figure I.6 : Marché du CBN par type d'industries [8].

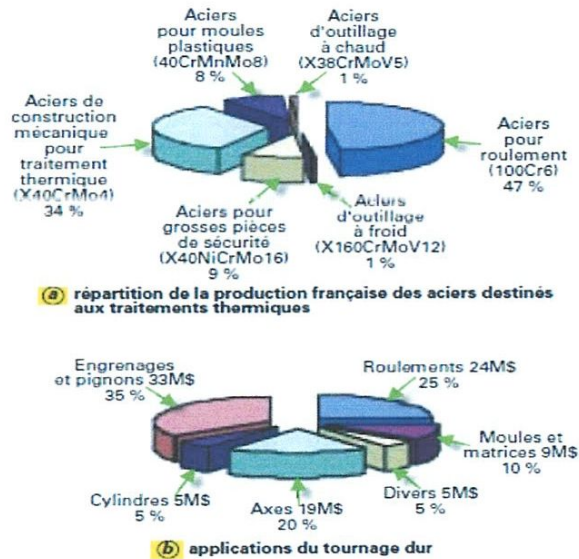


Figure I.7 : Répartition et utilisation des aciers traités en France (1996).

La répartition française des aciers traités (figure 7) montre que l'acier pour roulement 100Cr6 représente à lui seul 47 % (120 000 t) du volume total des aciers destinés aux traitements thermiques. La production européenne représente cinq fois le marché français. Les matériaux ferreux considérés au (tableau I.1) comprennent : les aciers rapides, les aciers d'outillages à chaud et à froid, les aciers alliés, les aciers de cémentation, les aciers de nitruration, les fontes blanches, les fontes alliées.

Matériaux	Utilisation
Acier trempé (45-65 HRC) : de cémentation, de nitruration, pour travail à froid, à chaud...	Engrenages, coussinets, bandes de roulement, têtes de filetage...
Fonte grise	Disques et tambour de frein, volants, involutes de compresseurs.
Fonte blanche (45-65 HRC) : Ni-hard, trempée en surface	Cylindres à profiler et de travail, vis d'extrudeuses, aubes, bagues d'usure...
Métaux frittés (70 HRC)	Roue de pompe, rotors, barbotins, matrices d'extrusion, poinçons...
Superaliages (base Co, Ni ou Fe)	Arbres de turbines, hélices, carters de pompe.
Revêtement dur	Sièges de soupape et de paliers, matrices d'extrusion...

Tableau I.1 : les domaines d'application du tournage dur.

I.2 phénomènes physiques intervenant dans le processus de coupe

I.2.1 Efforts de coupe

I.2.1.1 Définition

Le tournage longitudinal donne naissance 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 , peu utilisée en pratique, est la somme de trois composantes (figure I.8).

F_v : Composantes dans le sens de la vitesse de coupe appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe. Elle a la plus grande valeur absolue.

F_a : Composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance ou effort axial en tournage.

F_r : Composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort de refoulement ou effort radial.

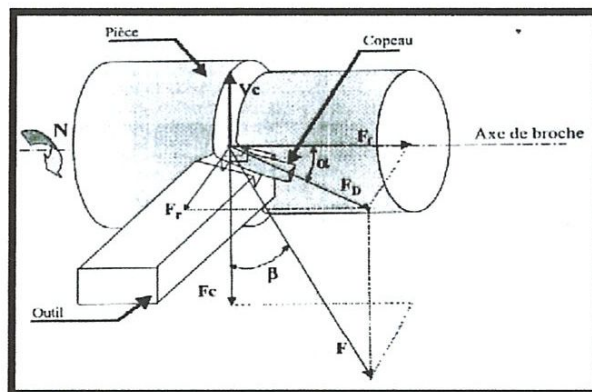


Figure I.8 : Composantes de l'effort de coupe.

La connaissance des efforts de coupe est à la base de l'évaluation de la puissance nécessaire à la coupe. Quand on veut connaître le rendement mécanique d'une machine outil, on a besoin de savoir quelle est la puissance prise à l'outil et donc d'avoir des renseignements sur les efforts de coupe. La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de machines et prévoir les déformations des pièces. Elle intervient dans la précision d'usinage dans les conditions de l'apparitions des vibrations auto excitées ou broutage et indirectement, dans la formation de l'état de surface [9]. Enfin, les efforts de coupe étant en relation avec les propriétés mécaniques du métal dans le processus de la formation du copeau, sont susceptibles de fournir des renseignements sur l'usinabilité du matériau coupé.

I.2.1.2 Génération des efforts de coupe

La génération des efforts à lieu pendant l'opération d'usinage. Les efforts produits par la coupe sont le résultat de forces de cisaillement et de frottement exercées par l'outil sur la pièce. On peut différencier trois zones (figure I.9).

✓ **Zone 1** : Est associée aux forces produites par l'interaction entre l'outil et le copeau. La force résultante F dépend principalement de :

N_y : La réaction normale des déformations élastiques et plastiques sur la surface d'attaque de l'outil.

F_f : La force de frottement entre le copeau et la surface d'attaque de l'outil, de sens contraire au mouvement du copeau et située dans le plan tangent à la surface d'attaque.

- ✓ **Zone 2** : Est associée aux forces exercées entre l'outil et la pièce usinée. La force résultante F_d est pratiquement indépendante de la section de coupe. Cette force dépend de :

F_{fd} : La force de frottement sur la surface résultante de la pièce « face en dépouille normale » située dans le plan tangent à cette surface.

N_a : La réaction normale de la pièce usinée sur la surface de dépouille de l'outil.

- ✓ **Zone 3** : Est associée aux forces exercées entre le copeau et la pièce.

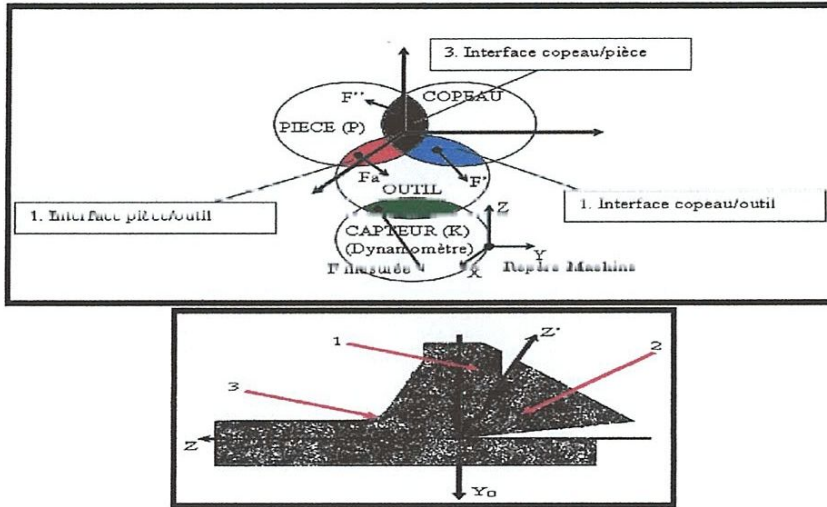


Figure I.9 : Structure de la force de coupe.

I.2.1.3 Effort spécifique de coupe

L'effort spécifique de coupe (pression de coupe) est la force de coupe par unité de surface de coupe (figure I.10). Ce coefficient varie en fonction de [10] :

- ◆ Matériau usiné ;
- ◆ L'épaisseur de coupe ;
- ◆ L'angle de coupe (diminution d'environ 1,5% pour une augmentation de 1°) ;
- ◆ L'usure de l'outil (30 à 50% outil frottement usé) ;

$$F_V = K_C \cdot S \dots \dots \dots (I.1)$$

F_V : Effort tangentiel de coupe en Newton (N).

K_C : Effort spécifique de coupe en (N/mm²).

S : Section du copeau en (mm²).

$$S = a_p \cdot f \dots \dots \dots (I.2)$$

f : avance en millimètre par tour (mm/tr).

a_p : profondeur de passe en (mm).

$$F_V = K_C \cdot a_p \cdot f \dots \dots \dots (I.3)$$

L'effort de coupe spécifique est l'un des facteurs importants qui caractérise l'usinabilité du matériau usiné. La connaissance de celui-ci permet d'évaluer la valeur de la force de coupe nécessaire en fonction de la section du copeau choisi.

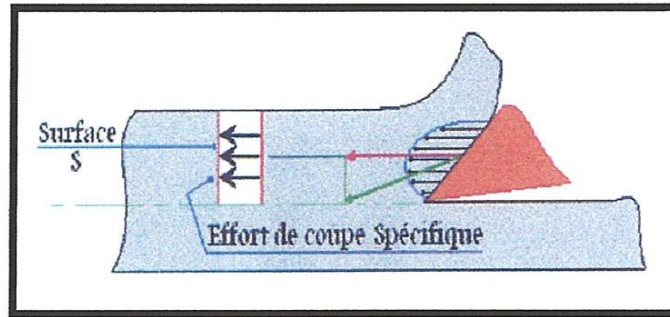


Figure I.10 : Effort de coupe spécifique.

I.2.2 Rugosité de surface

I.2.2.1 principaux défauts de la rugosité

L'aptitude d'une surface à une fonction donnée dépend d'un ensemble de conditions notamment des caractéristiques de ces états de surface. Les Défauts de surface jouent un rôle important dans l'aptitude d'une pièce mécanique à remplir une fonction donnée. Ces défauts sont de nature géométrique ou physico -chimique nous ne intéresserons ici qu'aux défauts géométriques ceux-ci soient conventionnellement sous quatre numéros d'ordre (figure I.11).

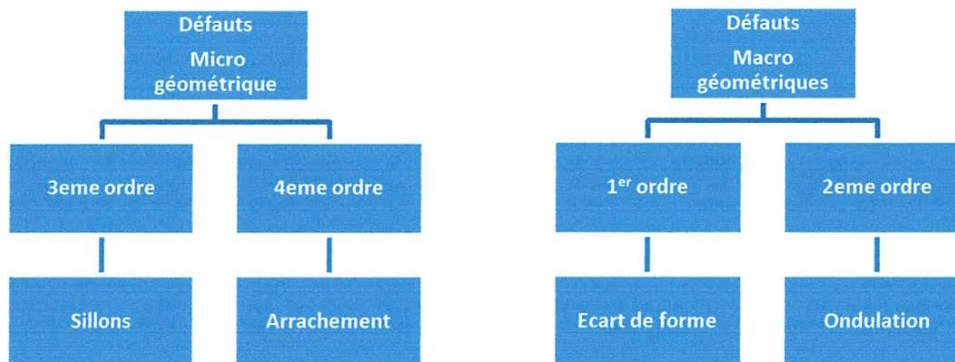


Figure I.11 : Défauts Macro géométriques et Micro géométriques.

Les défauts micro-géométriques (3^{ème} et 4^{ème} ordre) caractérisent la rugosité de la surface ; celle-ci se définit à partir de l'état d'une portion de surface très limitée, donc indépendamment de la qualité macro-géométrique globale de la surface. Les défauts du 3^{ème} ordre sont caractérisés par la forme théorique de la surface engendrée par le déplacement de l'outil (sillons hélicoïdale dans le chariotage). Les défauts du 4^{ème} ordre découlent des imperfections associées à l'action de l'outil (présence du copeau adhérent).

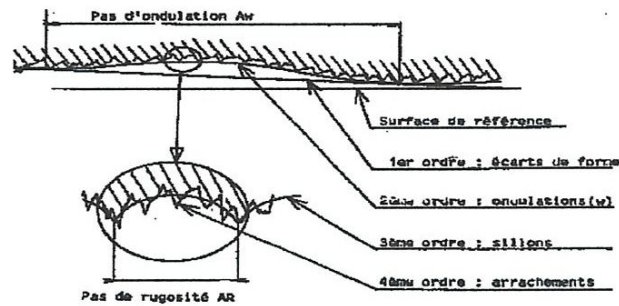


Figure I.12 : Principaux défauts de surface.

I.2.2.2 Principaux critères d'états de surface

Considérons une coupe locale de la surface usiné perpendiculairement aux sillons d'usinage (Figure 12) ; soit OX la ligne moyenne telle que :

$$\int_0^L Y dx = 0 \dots\dots\dots (I.4)$$

Les principaux critères de rugosité sont définis par rapport à cette ligne moyenne (figure I.13).

✓ **Rugosité total Rt**

Rt = profondeur maximal de rugosité. C'est la distance entre les points les plus élevés et les plus bas du diagramme de rugosité en fonction de la longueur totale mesurée.

✓ **Rugosité Rz**

Rz = profondeur moyenne de rugosité. C'est la valeur moyenne de rugosité sur cinq longueurs mesurées à la suite.

✓ **Rugosité moyenne arithmétique Ra**

Ra = Valeur moyenne de rugosité identifie la valeur moyenne arithmétique de toutes les distances des points du diagramme de rugosité, en fonction de la ligne moyenne et d'un intervalle de longueur.

Ra : est calculée sur une longueur d'évaluation (figure I.13).

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L Y dx \dots\dots\dots (I.5)$$

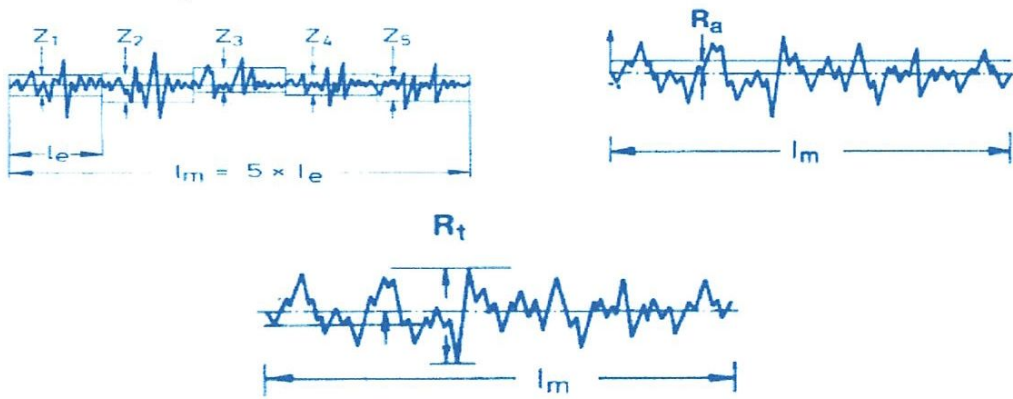


Figure I.13 : Principaux critères de la rugosité.



Formeur tube automobile
 ø gorge ± 0.01,
 Position ± 0.01, Ra 0.2,
 matière Z180 traité 61-62 Hrc

Figure I.14 : Rugosité obtenue avec le tournage dur.

✓ **Rugosité maximum Rmax**

Rmax est le maximum de la hauteur des irrégularités du profil de rugosité Rmax étant prise sur une saillie et un creux consécutif.

✓ **Rugosité Rp**

Rp est la hauteur maximum de saillie de rugosité. Rp est la distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne pour une longueur (L).

I.2.2.3 Évaluation de la rugosité

Théoriquement la connaissance de l’avance (f) ainsi que la géométrie de l’outil permet de calculer la profondeur maximale des sillons marqués sur la surface usinée [11], [12]. En tournage par exemple, la rugosité totale Rt de la surface obtenue peut être déterminée à partir d’un profil géométrique idéal donné par la (figure I.15).

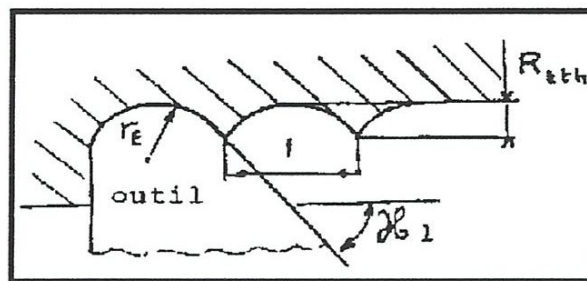


Figure I.15: sillons théoriques.

$$R_t \text{ (théorique)} \approx \frac{f^2}{8 r_e} \dots\dots\dots (I.6)$$

Pour les faibles avances, le phénomène de copeau minimum prend place et il se traduit par un refus de coupe de l’outil ce qui donne lieu à un copeau de faible épaisseur. Dans ce cas, la rugosité totale réelle Rt est bien supérieure à Rt (théorique). Par contre, pour les avances élevées, les irrégularités découlant de la coupe deviennent faibles par rapport aux sillons théoriques ce qui donne une rugosité totale réelle Rt qui se rapproche de Rt (théorique). A partir de l’équation (), une approximation largement utilisée pour évaluer la rugosité moyenne arithmétique (Ra) se présente sous la forme [13].

$$Ra_{(théorique)} \approx \frac{f^2}{32r_e} \dots\dots\dots (I.7)$$

En utilisant un certain nombre d'expériences, il est possible de mettre au point expérimentalement des relations mathématiques entre la rugosité obtenue par usinage et les paramètres usuels de coupe [11].

Ces relations sont généralement de la forme :

$$Ra = K_1 \cdot r_e \cdot HB^{K_3} \cdot a_p^{K_4} \cdot f^{K_5} \cdot V_c^{K_6} \dots\dots\dots (I.8)$$

Avec les K_i des coefficients déterminés pour les conditions expérimentales choisies. En général, $K_4 \approx 0$ et pour un matériau et un outil bien spécifié, il vient que :

$$Ra = C f^{K_5} \cdot V_c^{K_6} \dots\dots\dots (I.9)$$

Où : C est une constante et $K_5 > 0$ et $K_6 < 0$.

I.2.3 Usure des outils de coupe

I.2.3.1 Définition

L'usure d'outil est un processus de destruction des couches superficielles qui conduisent à la modification progressive de la forme et de l'état de surface. Elle affect également la géométrie de l'outil, la température, l'effort de coupe, la précession et la rugosité de la surface usinée.

I.2.3.2 Phénomène provoquant l'usure

D'une façon générale l'usure de deux matériaux en contact est due à des phénomènes d'ordre mécanique et physico-chimique.

Ces phénomènes dépendent essentiellement de la température de coupe, et selon König (Professeur à l'Université Technique d'Aix-La-Chapelle), et se divisent comme la montre la (figure I.16) suivante :

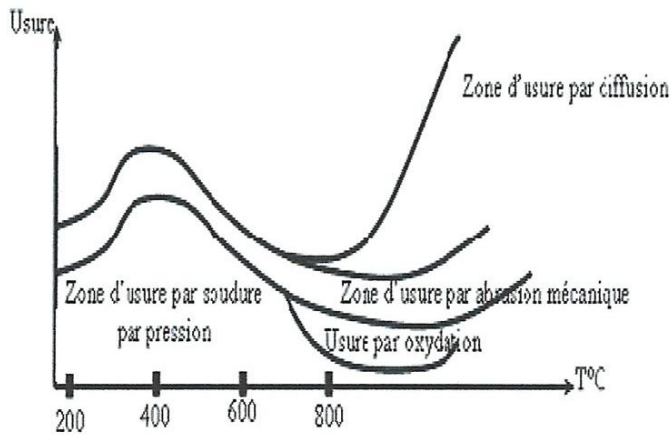


Figure I.16 : causes d'usure.

I.2.3.3 Phénomènes mécaniques

✓ Usure par abrasion mécanique

Déplacement de matière, produit par des particules dures, ou par des protubérances dures. Un corps dur déforme plastiquement, avec ou sans enlèvement de matière, un corps plus mou (figure I.17).

On peut distinguer :

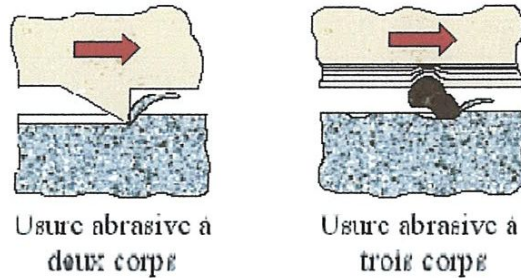


Figure I.17 : Usure abrasive.

✓ Usure abrasive à deux corps

Les sillons sont formés parallèlement à la direction de déplacement des aspérités abrasives.

✓ Usure abrasive à trois corps

Les particules abrasives dures sont libres dans l'interface et déforment plastiquement les surfaces frottantes en créant des empreintes.

✓ Usure par déformation plastique

L'usure par déformation est due en fait à l'affaissement de l'arête de coupe sous l'action des efforts de coupe. Ceci est d'autant plus marqué lorsque la température à proximité du bec de l'outil augmente [14].

I.2.3.4 Phénomènes physico- chimiques

✓ Usure par diffusion

Ce type d'usure, essentiellement due à la température, apparaît lors de l'usinage avec des vitesses de coupe trop élevées. Cependant des éléments de l'outil sont transférés vers le copeau et la pièce et vis-versa. Cette usure dépend de la solubilité du matériau de l'outil dans le métal usiné et de la température d'interface atteinte au cours d'usinage. Les réactions provoquées par la diffusion affaiblissent la résistance mécanique de l'outil en surface. L'usure par diffusion croît avec la vitesse de coupe [15].

✓ Usure par corrosion :

C'est un processus d'usure dominé par une réaction chimique ou électrochimique avec le milieu environnant. Cette réaction est créée par le frottement et mène à la formation d'une couche superficielle qui protège contre l'usure adhésive.

I.2.3.5 Différentes Formes d'usure des outils

Les formes d'usure des outils de coupe dépendent des paramètres essentiels déjà évoqués (couple outil- matière, condition d'usinage), on répertorie également

quatre zones principales d'usure, d'une façon générale l'outil est soumis aux 6 modes d'usures définis ci-après.

✓ **Usure en cratère**

Elle se caractérise par la formation d'une cuvette sur la face d'attaque de l'outil par frottement du copeau (figure I.18). Les dimensions, la profondeur K_t et la position d'un cratère évoluent, et influent en particulier sur le rayon d'enroulement du copeau ; le flan arrière du cratère pouvant jouer le rôle d'un brise copeau naturel. Cette forme d'usure est due aux températures élevées au niveau de contact outil-copeau provoquant une réaction chimique ou une diffusion importante. Elle représente également une caractéristique essentielle des outils carbure et aciers rapides, la forme du cratère est définie par sa profondeur maximale K_t , le rapport de cratérisation :

$$\gamma = K_t / K_m \dots \dots \dots (I.10)$$

✓ **Usure en dépouille**

Elle résulte du frottement de la pièce contre la face en dépouille de l'outil et se manifeste par l'apparition d'une bande striée et brillante parallèle étant la dernière surface de l'outil en contact avec la surface usinée, l'usure en dépouille détermine l'état de surface de la pièce usinée et sa précision dimensionnelle (figure I.18).

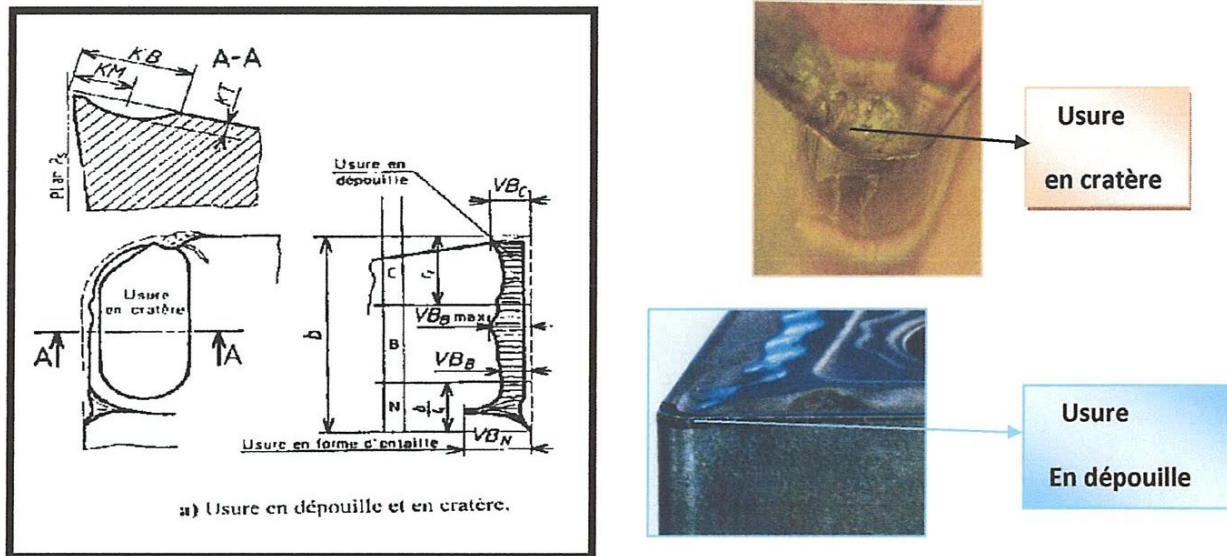


Figure I.18 : Forme d'usures des outils de coupe [16].

✓ **Usure en entaille**

C'est une forme d'usure de la face en dépouille qui se produit sur l'arête tranchante à la hauteur du diamètre périphérique de la pièce (donc à la limite de largeur de coupe). Elle résulte des forts taux d'écrouissage de la pièce dans cette zone. Au niveau de cette entaille, les conditions de coupe devenant mauvaises provoquent une auto accélération du phénomène. Ceci entraîne un affaiblissement considérable du nez de l'outil qui est alors susceptible de s'effondrer sous l'effet des pressions locales exercées (figure I.19).



Figure I.19 : Usure en entaille.

✓ **Usure par déformation plastique**

La pointe de l'outil peut subir une déformation permanente sous l'effet des températures élevées et des hautes pressions régnant dans la zone de coupe. Cette déformation se traduit par un affaiblissement plastique de la pointe de l'outil, une déformation permanente et un refoulement sur les faces de dépouille.

✓ **Usure par Ecaillage et fissuration d'arête**

Dans le cas d'usinage avec des efforts cycliques ou des chocs thermiques provoqués par une coupe discontinue ou par des vibrations, on observe l'apparition de fissures ou d'ébréchures sur l'arête ou sur la face de coupe, celles-ci diminuent considérablement la durée de vie de l'outil.

✓ **Usure par rupture de la pointe de l'outil**

Ce type de défaillance d'outil est rencontré dans le cas d'usinage des matériaux très durs et hétérogènes avec un outil en matériau fragile ; les outils céramiques y sont très sensibles lors des conditions de coupe mal définie dans des matériaux comportant des inclusions.

I.2.3.6 Relations entre l'usure et le temps

La durée de vie de l'outil de coupe est liée directement à l'usure, ou à sa détérioration pour un temps de coupe donnée. L'allure tracée ci dessous, se divise en trois zones A, B, C. Elle représente la relation entre l'usure et le temps de coupe (figure I.20).

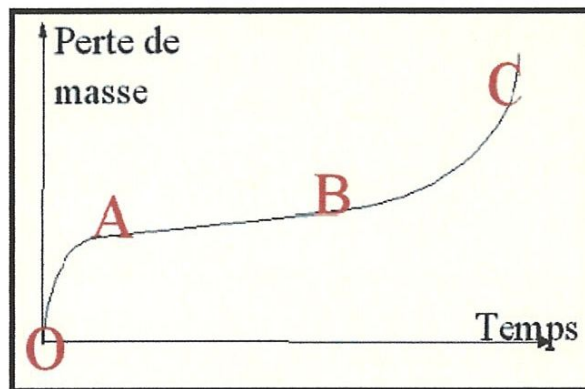


Figure I.20: Evaluation de l'usure en fonction du temps de coupe.

Zone A : Est celle du rodage ou usure initiale, elle donne lieu à une usure intense qui se caractérise par l'arrachement de petite particules de la surface la plus en saillie. Plus la surface est nette (lisse) au départ, plus l'évolution de l'usure est faible.

Zone B : Correspond à l'usure normale. Elle est plus stable, c'est-à-dire linéaire. Elle est caractérisée par une pente, très faible comparativement aux autres zones.

Zone C : Est la zone d'usure accélérée (catastrophique), la où les deux types d'usure (celles en dépouille et en cratère) se réunissent.

I.3 Les plans d'expériences

I.3.1 Introduction

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles. Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à partir du moment où l'on recherche le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt, y , et des variables, x_i . Il faut penser aux plans d'expériences si l'on s'intéresse à une fonction du type :

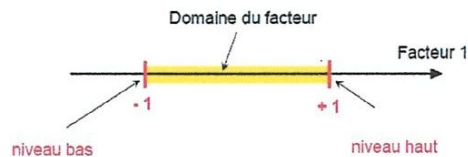
$$y = f(X_i)$$

Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Pour cela, il faut suivre des règles mathématiques et adopter une démarche rigoureuse. Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur.

La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées.

I.3.2 Notion d'espace expérimental

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la réponse, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme «variable» on utilisera le mot facteur. La réponse dépend donc de un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Figure I.21). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée niveau. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut.



La Figure I.21 : Le niveau bas du facteur est noté par - 1 et le niveau haut par +1.

Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le

domaine du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut par $+1$.

S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé l'espace expérimental (Figure I.22).

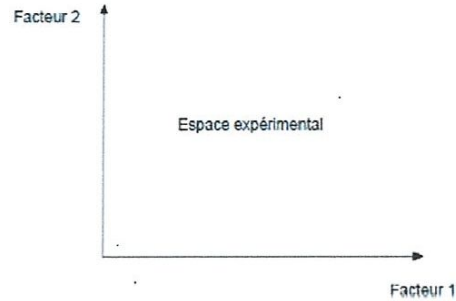


Figure I.22 : Définition de l'espace expérimental

Figure I.22 : Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté.

Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental.

Le niveau x_1 du facteur 1 et le niveau x_2 du facteur 2 peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental (Figure I.22). Une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux.

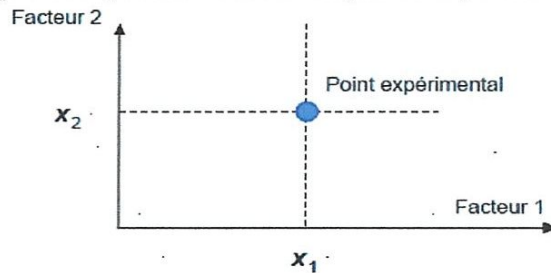


Figure I.23 : Niveaux des facteurs définissant des points Expérimentaux dans l'espace expérimental

La figure I.23 : présente dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux.

Le regroupement des domaines des facteurs définit le «domaine d'étude». Ce domaine d'étude est la zone de l'espace expérimental choisie par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire plusieurs expériences bien définies, est représentée par des points répartis dans le domaine d'étude (Figure I.23).

Cette façon de représenter une expérimentation par des points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude.

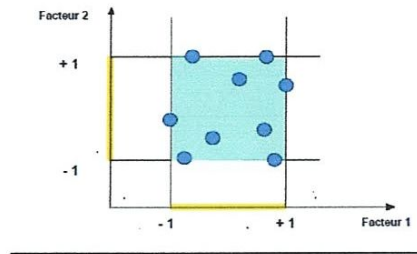


Figure I.24 : Définition du domaine d'étude par l'expérimentateur

La figure 24 : présentes les points expérimentaux sont disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur.

Les définitions qui ont été données s'appliquent bien aux variables continues. Mais il existe d'autres types de variables. Il y a les variables discrètes comme par exemple des personnes : Julien, Arthur, Louis, Simon et Nathan. On peut encore parler d'espace expérimental mais il n'aura pas les mêmes propriétés que l'espace des variables continues. Il y a également les grandeurs ordonnables comme, par exemple, des distances qui peuvent être courtes, moyennes et longues. Là aussi, la notion d'espace expérimental existe toujours mais cet espace possède des propriétés différentes des deux premiers.

I.3.3 Notion de surface de réponse

Les niveaux x_i représentent les coordonnées d'un point expérimental et y est la valeur de la réponse en ce point. On définit un axe orthogonal à l'espace expérimental et on l'attribue à la réponse. La représentation géométrique du plan d'expériences et de la réponse nécessite un espace ayant une dimension de plus que l'espace expérimental. Un plan à deux facteurs utilise un espace à trois dimensions pour être représenté : une dimension pour la réponse, deux dimensions pour les facteurs.

A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse (Figure I.25).

Le nombre et de l'emplacement des points d'expériences est le problème fondamental des plans d'expériences. On cherche à obtenir la meilleure précision possible sur la surface de réponse tout en limitant le nombre d'expériences.

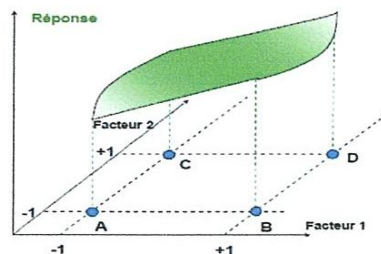


Figure I.25 : Définition de la surface de réponse.

La figure I.25 présentes les réponses associées aux points du domaine d'étude forment la surface de réponse. Les quelques réponses mesurées aux points du plan d'expériences permettent de calculer l'équation de la surface de réponses.

I.3.4 Notion de modélisation mathématique

On choisit a priori une fonction mathématique qui relie la réponse aux facteurs. On prend un développement limité de la série de Taylor-Mac Laurin. Les dérivées sont supposées constantes et le développement prend la forme d'un polynôme de degré plus ou moins élevé :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum a_{ij} x_i^2 + a_{ij\dots z} x_i x_j \dots x_z \dots\dots\dots(I.11)$$

Ou :

- ✓ y est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours De l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée.
- ✓ x_i représente le niveau attribué au facteur i par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On suppose même que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la regression).
- ✓ a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} sont les coefficients du modèle mathématique adopté a priori. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

L'intérêt de modéliser la réponse par un polynôme est de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire les expériences. Ce modèle est appelé "modèle postulé" ou "modèle a priori".

I.3.5 Le modèle de l'expérimentateur

Deux compléments doivent être apportés au modèle précédemment décrit. Le premier complément est le "manque d'ajustement". Cette expression traduit le fait que le modèle a priori est fort probablement différent du modèle réel qui régit le Phénomène étudié. Il y a un écart entre ces deux modèles. Cet écart est le manque d'ajustement (lack of fit en anglais).

Le second complément est la prise en compte de la nature aléatoire de la réponse. En effet, si l'on mesure plusieurs fois une réponse en un même point expérimental, on n'obtient pas exactement le même résultat. Les résultats sont dispersés. Les dispersions ainsi constatées sont appelées erreurs expérimentales.

Ces deux écarts, manque d'ajustement et erreur expérimentale, sont souvent réunis dans un seul écart, notée e . Le modèle utilisé par l'expérimentateur s'écrit alors :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum a_{ij} x_i^2 + a_{ij\dots z} x_i x_j \dots x_z + e \dots\dots\dots(I.12)$$

✓ **Système d'équations**

Chaque point expérimental permet d'obtenir une valeur de la réponse. Cette réponse est modélisée par un polynôme dont les coefficients sont les inconnues qu'il faut déterminer. A la fin du plan d'expériences, on a un système de n équations (s'il y a n essais) à p inconnues (s'il y a p coefficients dans le modèle choisi a priori). Ce système s'écrit d'une manière simple en notation matricielle :

$$y = Xa + e \dots\dots\dots(I.13)$$

y est le vecteur des réponses.

X est la matrice de calcul, ou matrice du modèle, qui dépend des points expérimentaux choisis pour exécuter le plan et du modèle postulé.

a est le vecteur des coefficients.

e est le vecteur des écarts.

Ce système possède un nombre d'équations inférieur au nombre d'inconnues. Il y a n équations et $p + n$ inconnues. Pour le résoudre, on utilise une méthode de régression basée sur le critère des moindres carrés. On obtient ainsi les estimations des coefficients que l'on note :

\hat{a}

Le résultat de ce calcul est :

$$\hat{a} = (X' X)^{-1} X' y$$

Formule dans laquelle la matrice X' est la matrice transposée de X . De nombreux logiciels exécutent ce calcul et donnent directement les valeurs des coefficients.

Deux matrices interviennent constamment dans la théorie des plans d'expériences :

- La matrice d'information $X' X$.
- La matrice de dispersion $(X' X)^{-1}$.

Nous allons maintenant appliquer les notions et les propriétés que nous venons de décrire aux plans d'expériences les plus classiques. Nous verrons successivement les plans suivants :

- ✓ Plans factoriels complets à deux niveaux.
- ✓ Plans factoriels fractionnaires à deux niveaux.
- ✓ Autres plans à deux niveaux.
- ✓ Plans à plusieurs niveaux.
- ✓ Plans pour surfaces de réponse.
- ✓ Plans de mélanges.
- ✓ Plans booléens.
- ✓ Plans optimaux.
- ✓ Plans pour simulations numériques.

I.3.6 Plans factoriels complets à deux niveaux

Ces plans possèdent un nombre de niveaux limité à deux pour chaque facteur. Toutes les combinaisons de niveaux sont effectuées au cours de l'expérimentation. Ces plans peuvent être utilisés indistinctement pour les variables continus et pour les variables discrètes.

I.3.6 .1 Plan à deux facteurs

Pour deux facteurs, le domaine d'étude est un carré (en unités codées). Par exemple, la Figure 26 représente un plan factoriel complet à deux facteurs. Le modèle mathématique postulé est un modèle du premier degré par rapport à chaque facteur :

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_{12} x_1 x_2 + e \quad \dots \dots \dots (I.14)$$

- ✓ y est la réponse
- ✓ x_i représente le niveau attribué au facteur i .
- ✓ a_0 est la valeur de la réponse au centre du domaine d'étude.
- ✓ a_1 est l'effet (ou effet principal) du facteur 1.
- ✓ a_2 est l'effet (ou effet principal) du facteur 2.
- ✓ a_{12} est l'interaction entre les facteurs 1 et 2.
- ✓ e est l'écart.

On démontre que les meilleurs emplacements des points d'expériences sont situés aux sommets du domaine d'étude.

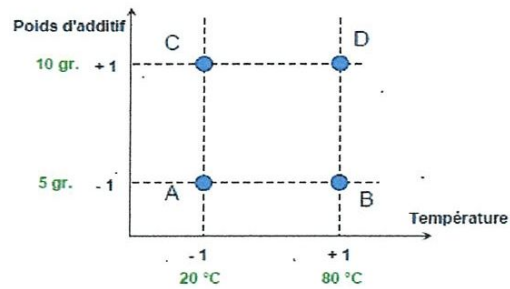


Figure I.26 : Les meilleurs emplacements des points expérimentaux sont les sommets du domaine d'étude lorsque le modèle postulé est du premier degré.

I.3.6.2 Plans factoriels à k facteurs à 2 niveaux

On peut augmenter le nombre de facteurs. L'espace expérimental possède autant de dimensions qu'il y a de facteurs et le modèle mathématique correspond à la relation (I.12). Un plan comportant k facteurs à deux niveaux est noté 2^k .

- Le k en exposant signifie qu'il y a k facteurs étudiés.
- Le 2 indique le nombre de niveaux par facteur.

On remarquera que cette notation indique également le nombre d'essais à réaliser. Ce nombre devient rapidement très important. Pour seulement 7 facteurs, il faudrait exécuter 128 essais. Pour diminuer le nombre des essais en conservant la possibilité d'étudier tous les facteurs, les plans factoriels fractionnaires à deux niveaux ont été introduits.

I.3.6.3 plans factoriels fractionnaires a deux niveaux 2^{k-q}

Les plans factoriels fractionnaires sont des plans factoriels qui permettent d'étudier tous les facteurs mais dont le nombre d'essais est réduit par rapport aux plans factoriels complets. Un plan factoriel fractionnaire à 2 fois moins, ou 4 fois moins ou $2q$ fois moins d'essais que le factoriel complet correspondant.

A la fin d'un plan factoriel fractionnaire, on a un système de n équations à p coefficients inconnus avec p plus grand que n . On ne sait pas résoudre un tel système. Comme on ne peut pas augmenter le nombre d'équations, il faut diminuer le nombre d'inconnues. On y arrive en utilisant un artifice : on regroupe les coefficients de telle manière qu'il y ait n inconnues. On résout donc un système de n équations à n groupes de coefficients. On appelle ces groupes de coefficients, des contrastes ou des aliases et on dit que les coefficients sont aliasées dans les contrastes.

I.4 Travaux de recherche en tournage dur

D.I. Lalwani, N.K. Mehta, P.K. Jain [17] ont fait une étude sur les effets des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance par tour et profondeur de passe) sur les efforts de coupe (effort axial, effort radial et effort tangentiel) et la rugosité de la surface en tournage dur de finition de l'acier MDN250 (équivalent à l'acier 18Ni(250)). Les auteurs ont utilisé un des outils en céramique revêtue. Les résultats trouvés par les autres sont comme suit :

- Le modèle linéaire est adapté pour l'effort axial, l'effort radial et effort tangentiel tandis que le modèle quadratique est adapté pour la rugosité de la surface.
- La vitesse de coupe n'a aucun effet significatif sur les efforts de coupe et la rugosité de la surface.
- Pour le modèle de l'effort axial, la profondeur de passe est la le facteur significatif avec une contribution de 89.05%. Tandis que l'avance par tour a une contribution secondaire de 6.61% dans le modèle.
- Pour le modèle de l'effort radial, l'avance par tour et la profondeur de passe sont des facteurs significatifs avec la contribution 46.71% et 49.59% dans toute la variabilité de modèle.
- Pour le modèle de l'effort de coupe, l'avance par tour et la profondeur de passe sont les facteurs les plus significatifs affectant l'effort de coupe avec une contribution de 52.60% et 41.64% dans toute la variabilité de modèle, respectivement. L'interaction entre ces deux fournit une contribution secondaire de 3.85%.
- Pour le modèle de la rugosité de la surface, l'avance par tour fournit la contribution primaire et influe d'une manière significative la rugosité de la surface. L'interaction entre l'avance par tour et la profondeur de passe, l'effet quadratique de l'effet d'avance par tour et d'interaction de la vitesse et la profondeur de passe fournissent la contribution secondaire au modèle.
- La bonne rugosité de la surface peut être réalisée quand la vitesse de coupe et la profondeur de passe sont placées plus proche de leur niveau élevé de la gamme expérimentale (93m/min et 0.2mm) et une avance au niveau bas de la gamme expérimentale (0.04mm/rev). Si la V_c augmente de 55 à 93m/min, avec $a_p=0.2$ et $f=0.04$ mm/tr, la rugosité diminue de 0.397 à 0.352 μm , ce qui implique une diminution de 11.33% de la valeur de rugosité.

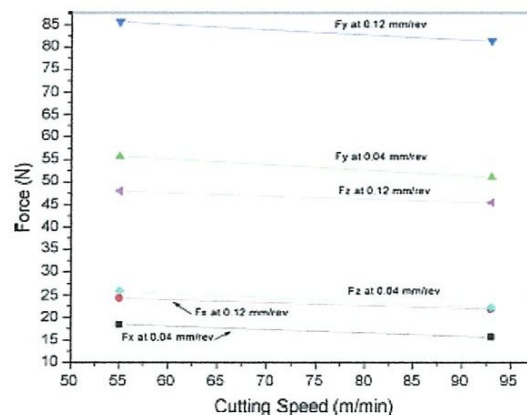


Figure I.27: Efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe pour diverses avances par tour, $a_p= 0.1$ mm.

Dilbag Singh . P. Venkateswara Rao [18] ont fait une recherche expérimentale pour déterminer les effets des conditions de coupe et la géométrie d'outil sur la rugosité de la surface lors du tournage dur de finition de l'acier à roulement (AISI 52100). Les plaquettes utilisées par les auteurs sont en céramique mixte composées de l'oxyde d'aluminium et le titane carbonitrure de Titane. Les facteurs étudiés sont (vitesse de coupe, avance, rayon du bec et l'angle d'attaque), chaque facteur a été changé pour trois niveaux 3^4 ce qui fait un plan d'expérience de 81 essais.

Les résultats trouvés par les auteurs, indiquent que les paramètres de vitesse de coupe, l'avance, angle d'attaque et le rayon du bec sont les facteurs qui affectent l'état de la surface. Les résultats de cette étude prouvent aussi que l'avance est le facteur dominant déterminant l'état de la surface suivi du rayon du bec et de la vitesse de coupe. Bien que, l'effet de l'angle d'attaque sur l'état de la surface soit moins marqué. Les effets d'interaction du rayon du bec et de l'angle d'attaque sont considérablement significatifs. Des modèles mathématiques pour la rugosité de la surface ont été développés en employant la Méthodologies de surface de réponse. Ce modèle serait utile en choisissant la géométric et les conditions de coupe d'outil pour la qualité de surface exigée. Les modèles peuvent également être employés pour l'optimisation du processus de tournage dur.

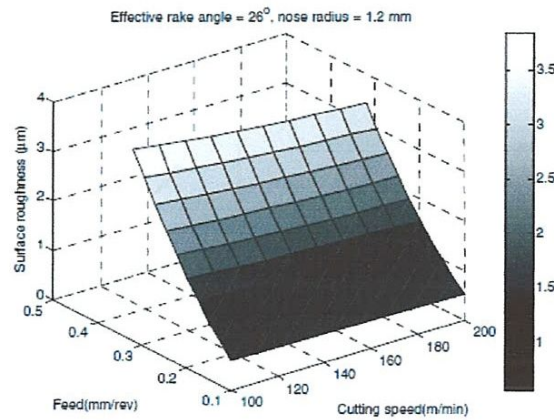


Figure I.28 : Modèles de la rugosité en fonction des paramètres de coupe.

Modèle mathématique proposé par les auteurs :

$$\begin{aligned}
 Y_2 = & 0.7834 + 0.0159x_1 + 1.1444x_2 - 0.0247x_3 \\
 & - 0.6020x_4 + 0.0490x_1x_2 + 0.1007x_1x_3 \\
 & + 0.0937x_1x_4 - 0.0393x_2x_3 - 0.1146x_2x_4 \\
 & - 0.0096x_3x_4 + 0.1749x_1^2 + 0.1662x_2^2 \\
 & - 0.1597x_3^2 - 0.3946x_4^2,
 \end{aligned}$$

Modèle mathématique final pour l'usure en dépouille :

$$\begin{aligned} W(\text{mm}) = & -0.142 + 0.083 V + 0.135 F \\ & + 0.268 T + 0.016 V^2 + 0.009 F^2 \\ & - 0.024 T^2 - 0.031 VF - 0.037 VT \\ & - 0.053 FT + 0.012 VFT \end{aligned}$$

K. Palanikumara, F.Matab,J. Paulo Davimc [20] ont fait une étude sur l'influence des paramètres de coupe sur des critères de rugosité de la surface tels que R_a , R_t , R_q , R_p et R_{3z} lors du tournage des matériaux composites renforcés de fibres de verre. Des modèles empiriques sont développés pour corréler les paramètres d'usinage avec la rugosité de la surface. L'analyse des résultats expérimentaux est effectuée par des graphiques de zone à trois dimensions de surface. Les résultats trouvés par les auteurs sont comme suit :

- les modèles empiriques sont développés pour corréler les paramètres de rugosité de la surface avec des paramètres de coupe, avance et vitesse de coupe.
- L'analyse des paramètres de rugosité de la surface est effectuée en utilisant le graphique de zone.
- L'analyse des paramètres de coupe a été effectuée en utilisant les courbes 3D de surface de réponse.
- La rugosité de surface augmente avec l'augmentation des l'avance par tour et presque diminue avec l'augmentation de vitesse de coupe.

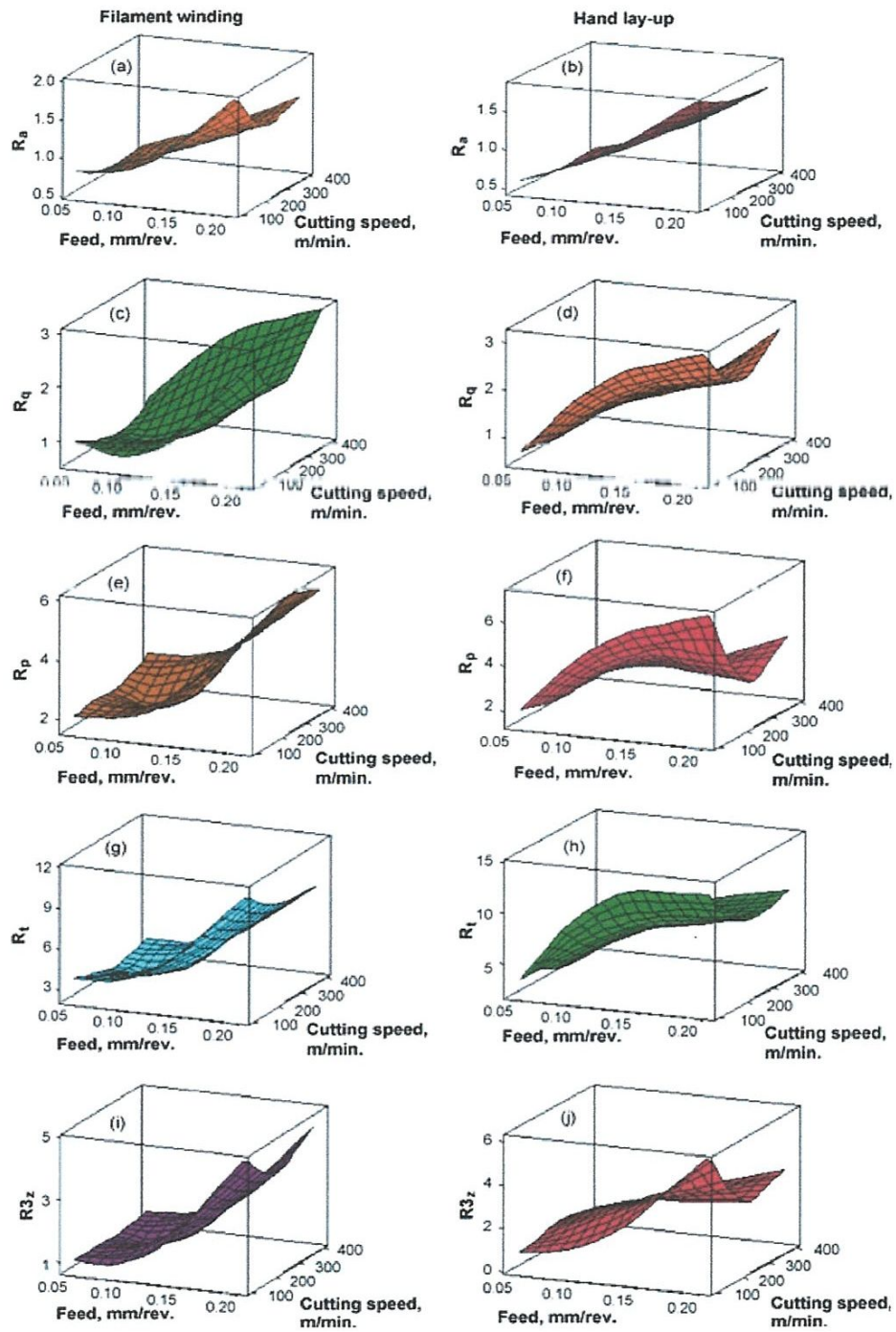


Figure I.30 : Surface 3D.

K.V.B.S. Kalyan Kumar, S.K. Choudhury [21] ont fait une étude expérimentale de l'effet de l'arrosage cryogénique sur l'usure de l'outil et les efforts de coupe dynamiques à haute fréquence produits pendant l'usinage à grande vitesse de l'acier inoxydable. Des expériences ont été effectuées en conditions à sec et cryogéniques selon un plan d'expériences de 20 essais et cela pour comprendre l'avantage relatif offert par l'arrosage cryogénique. Les résultats trouvés par les auteurs sont comme suit :

- ✓ L'arrosage cryogénique était efficace en réduisant les températures de coupe qui ont attribué pour la réduction substantielle de l'usure en dépouille (37.39%).
- ✓ La consommation de l'azote liquide était haute, ce qui amène à une augmentation coût global d'usinage.
- ✓ L'effort de coupe enregistré lors de l'usinage cryogénique est inférieur à celui enregistré lors de la coupe à sec, mais la réduction de l'effort de coupe est moins prévue, ils ont observé l'avantage seulement de 14.83% de réduction offerte par l'usinage cryogénique.
- ✓ Elle était conclue du travail des auteurs que l'arrosage cryogénique est une réponse possible pour l'usinage à grande vitesse (usinage écologique) (Eco-amical).
- ✓ Le traitement des résultats du plan d'expérience a permis la détermination des modèles mathématiques de l'usure pour les deux types d'usinage.

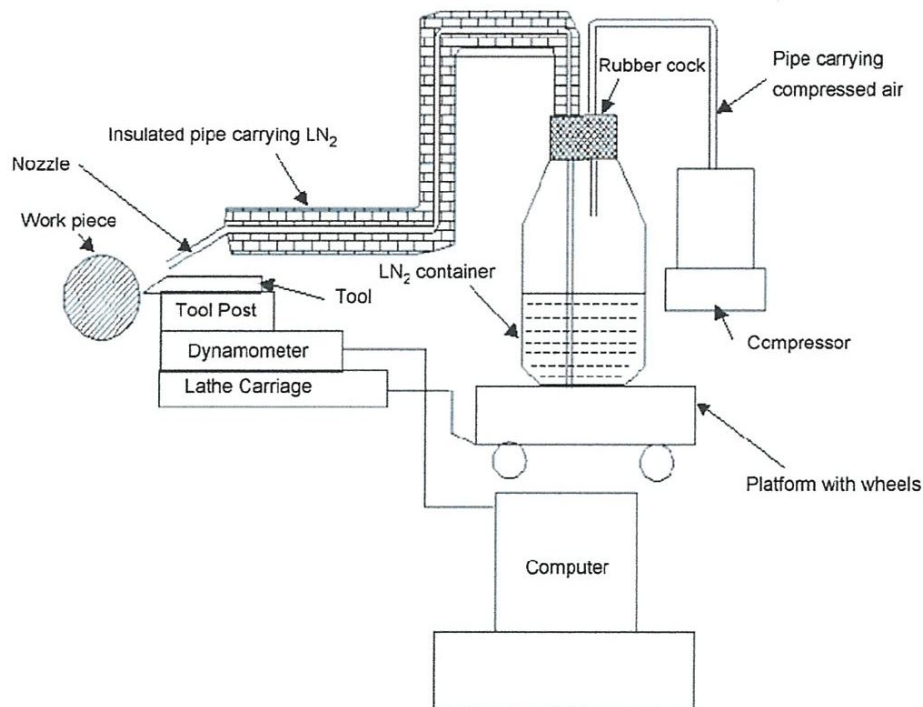


Figure I.31 : Schéma de principe du dispositif expérimental.

Model de l'usure en dépouille dans la coupe cryogénique :

$$\text{LWC} = 0.2558 + 0.0662N + 0.0389 f + 0.0282 d + 0.0062N^2 + 0.0046 f^2 + 0.0008 d^2 \\ + 0.0130 Nf + 0.01 Nd + 0.0066 fd$$

Model de l'usure en dépouille dans la coupe sec :

$$\text{LWD} = 0.3693 + 0.0754N + 0.0512 f + 0.0248 d + 0.0028N^2 + 0.0118 f^2 + 0.0058 d^2 \\ + 0.0164 Nf \\ + 0.0020 Nd + 0.0056 fd$$

Model d'effort de coupe dans la coupe cryogénique :

$$\text{FCC} = 295.2964 - 34.4197N + 50.0314 f + 45.1558 d + 4.7650N^2 - 0.8959 f^2 - \\ 4.7840 d^2 - 8.8544 Nf \\ 12.5916Nd + 18.0000 fd$$

Model d'effort de coupe dans la coupe sec :

$$\text{FCD} = 318.2549 - 38.2000N + 49.8056 f + 46.9654 d + 7.5291N^2 + 0.6277 f^2 - \\ 0.2560 d^2 - 6.4864 Nf \\ - 10.8747 Nd + 20.1250 fd$$

I.5 Conclusion

Les grandes entreprises ayant compris les gains financiers qu'elles pouvaient en tirer de la technique du tournage dur sont de plus en plus nombreux. On citera à titre d'exemple : Ford (Bordeaux), Mercedes (Gaggenau), Volkswagen (Kassel), Fiat (Turin), BMW (Munich), General motors, etc....

Les pièces usinées sont des baladeurs, des couronnes, des manchons d'accouplement, des pignons, des arbres, des cages de roulement. On notera aussi que, s'il est quelquefois possible d'usiner complètement par tournage dur les pièces traitées, il est vain de vouloir en faire un substitut à la rectification. En combinant les deux techniques d'usinage, il est possible de réduire considérablement les temps d'usinage et de réalisations des produits.

CHAPITRE II

PROCÉDURE

EXPÉRIMENTALE

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble des moyens exploités dans la réalisation des expériences, afin de caractériser le comportement du couple (outil-matière) (CC6050, CC650, Z200Cr12). Cela va consister en une présentation des différents équipements utilisés, de l'effort de coupe générée, de la rugosité de surfaces obtenue. Nous présentons en même temps la démarche utilisée pour la planification et les conditions de réalisation des expériences.

Les expériences ont été effectuées au département de Génie Mécanique (Université de Guelma).

II.2 Équipements utilisés

II.2.1 Machine outil

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour à charioter et à fileter fabriqué par la société tchèque « TOS TRENCIN » modèle SN40 de puissance sur la broche égale à 6.6 KW (figure II.1). les nombres de tours disponibles sur la machine sont : 22.5; 31.5; 45 ; 63; 90; 125; 180; 250; 355; 500; 710; 1000; 1400; 2000 (tr/min). Les avances disponibles sont : 0.08; 0.11; 0.12; 0.14; 0.16; 0.2; 0.24; 0.28;.....6.4 (mm/tr).

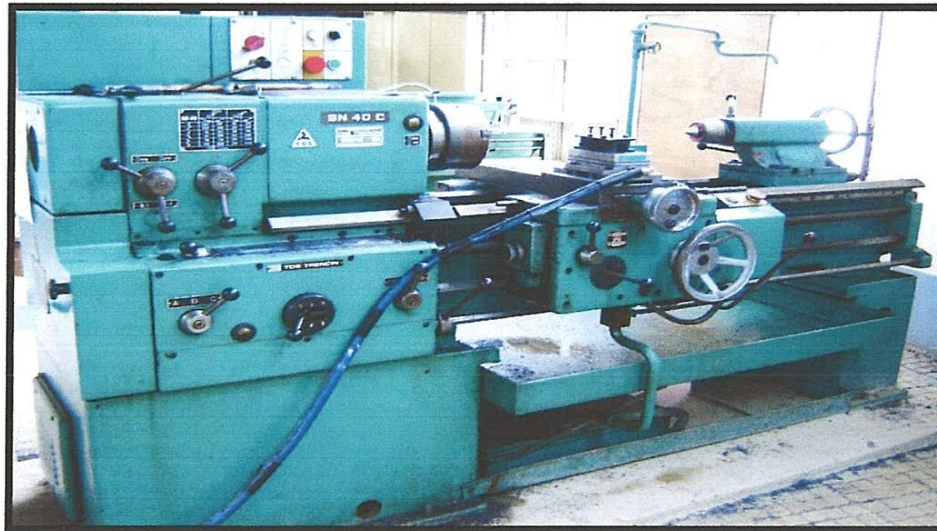


Figure II.1 : Tour à charioter et à fileter modèle SN40.

II.2.2 Matière à usiner

Le matériau sur lequel sont testées nos plaquettes présentes des caractéristiques voisines des matériaux que l'on usine le plus souvent dans l'industrie.

L'acier Z200Cr12 est un acier à outil à haute teneur en chrome présentant le minimum de risques de déformation et d'altération des dimensions aux traitements thermiques. Il a une excellente tenue à l'usure (haute résistance à l'usure). Il est utilisé surtout pour la fabrication des matrices et poinçons de découpage et d'emboutissage, filières d'étrirage, galets profileurs, mollettes, outils à bois, peignes à rouler des filets, etc. Pour les différents essais réalisés nous avons usiné des éprouvettes de diamètres $D=76$ mm (après le nettoyage de l'éprouvette) et de longueur $L=400$ mm (figure II.2, II.3).

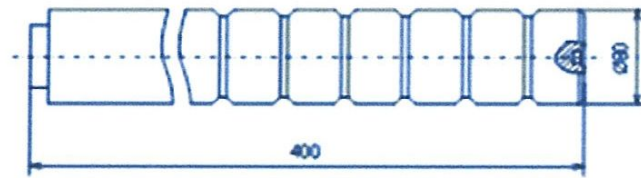


Figure II.2 : Géométrie des éprouvettes pour les différents essais.

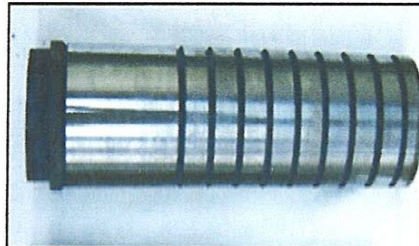


Figure II.3 : Photos des éprouvettes utilisées.

La composition chimique de l'acier Z200Cr12 est présentée dans le (tableau II.1)

Élément	Pourcentage (%)
Carbone (C)	2,00-2,20
Silicium (Si)	0,25-0,45
Manganèse (Mn)	0,25-0,35
Chrome (Cr)	12,00-14,00

Tableau II.1 : Composition chimique de l'acier Z200Cr12.

II.2.3 Outils de coupe utilisés

➤ Plaquettes

Les plaquettes utilisées sont amovibles de forme carrée (figure II.3) à fixation par trou central; toutes les informations relatives aux plaquettes de coupe sont regroupées dans le (tableau II.2).

Matériau de coupe	Désignation	Géométrie	Marque	Composition
Céramique mixte revêtue	CC6050	SNGA12.04.08 T01020	Sandvik	70%AL ₂ O ₃ +30%TIC+ TIN + revêtement TIN
Céramique mixte non revêtue	CC650	SNGA12.04.08 T01020	Sandvik	70%AL ₂ O ₃ +30%TIC

Tableau II.2: Informations relatives aux plaquettes utilisées.

➤ Porte outil

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un porte – outil sur lequel est fixée la plaquette mécaniquement par trou central (figure II.5). La désignation normalisée du porte-outil est donnée sur le tableau (II.3). La plaquette amovible est fermement serrée au moyen d'un fort élément de serrage dans le porte-outil. Une cale-support en carbure métallique vissée et rectifiée, protège le porte-outil et garantit un contact parfait de la Plaquette (figure II.4).

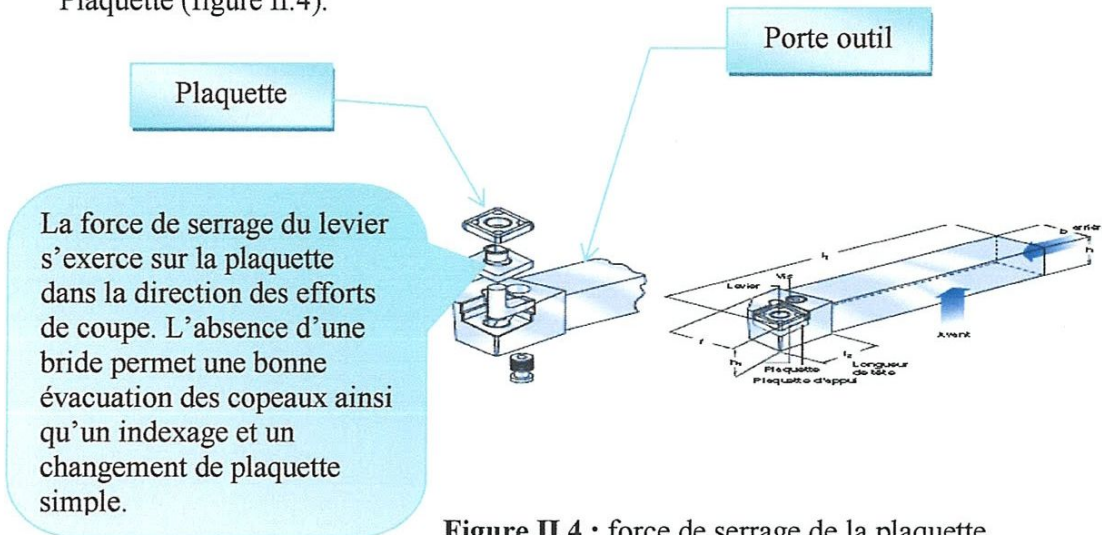


Figure II.4 : force de serrage de la plaquette.

Porte outil	χ_r°	α°	γ°	λ°	Section (mm ²)
PSBNR 2525 M12	75	6	-6	-6	25x25

Tableau II.3: Caractéristiques géométriques du porte outil.

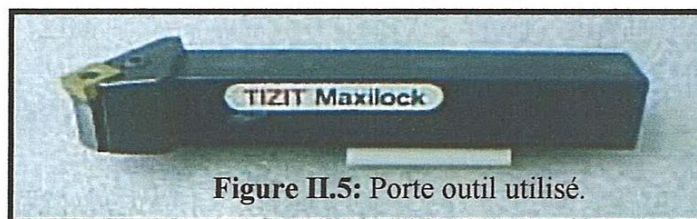


Figure II.5: Porte outil utilisé.

II.2.4 Appareillage de mesures utilisées

II.2.4.1 Mesure de la rugosité

Pour la mesure des différents critères de rugosité (R_a , R_z , R_t) nous avons utilisé un Rugosimètre (2D) SurfTest 301 (Mitutoyo), équipé d'une imprimante de profil de rugosité (figure II.6). Ce dernier est constitué d'une pointe de diamant (palpeur) avec un rayon de pointe de $5\mu\text{m}$ se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. La longueur de plage est de 4mm avec une longueur de base de 0.8mm (0.8×5). La plage de mesure des critères de rugosité est de (0.05 à $40\mu\text{m}$) pour R_a et de (0.3 à $160\mu\text{m}$) pour R_t et R_z . Afin d'éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce (figure II.7).

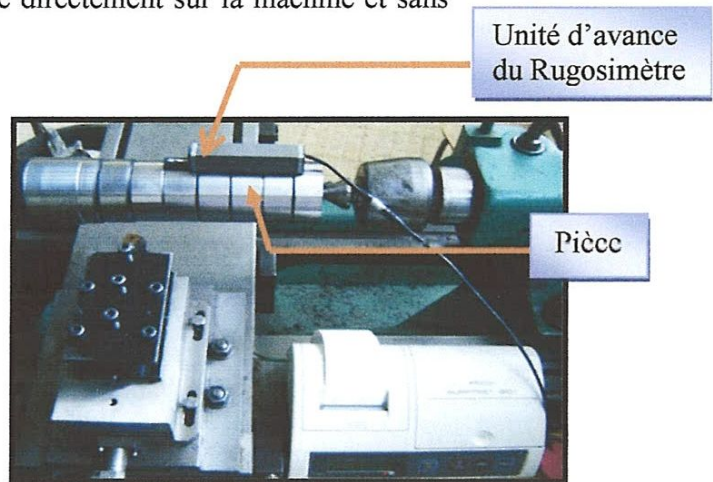
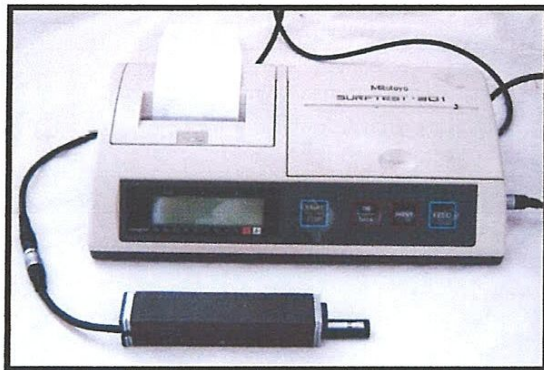


Figure II.6: Rugosimètre SurfTest 301.

Figure II.7 : Mesure de la rugosité sans Démontage de la pièce

II.2.4.2 Mesure des efforts de coupe

Pour mesurer l'amplitude des efforts de coupe, nous avons utilisé un dispositif moderne dynamomètre (KISTLER), qui compte parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des trois composantes de l'effort de coupe. Ce dispositif (figure II.8) comporte plusieurs éléments dont on en cite : la plateforme, l'amplificateur de signaux, le PC avec le 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 du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil est fixe. Ce dernier est monté sur la plateforme, appelée aussi table, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine outil. La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz à 3 éléments, qui sont assemblés sous haute précontraintes, entre une

Plaque de base et une plaque de recouvrement, formant un dynamomètre qui peut mesurer trois composantes en même temps. Les forces agissantes sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges 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 dans ce but. Un logiciel (DYNOWARE) analyse et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimée en trois composantes (figure II.8 et II.9).

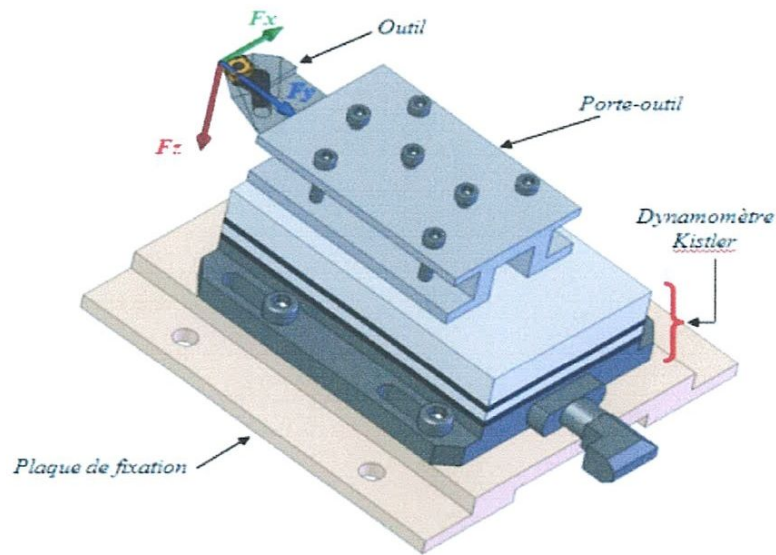


Figure II.8 : Dispositif de mesure des composantes de l'effort.

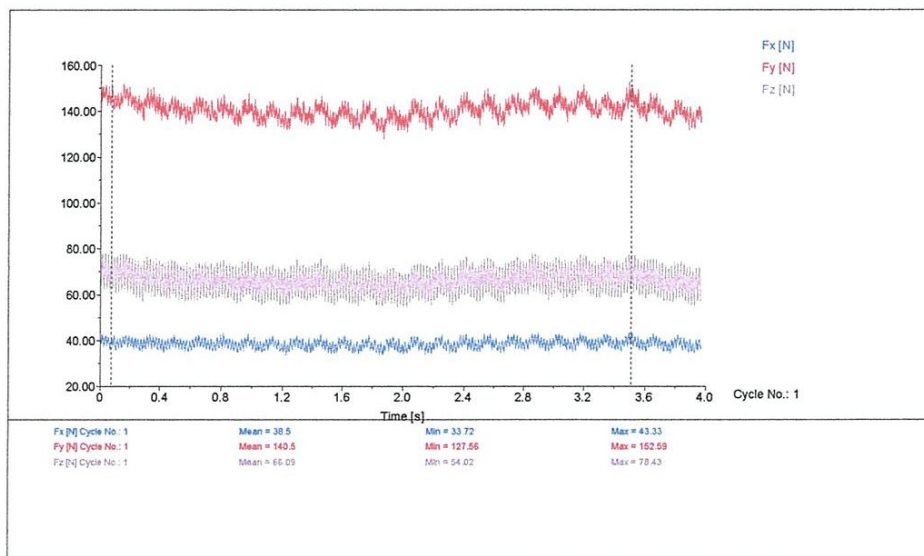


Figure II.9: profil des composantes d'effort de coupe.

➤ Optimisation des procédés

Puisque les valeurs générales des efforts de coupe sont différentes dans chaque entreprise et pour chaque machine, chaque utilisateur doit pouvoir disposer de données individuelles.

La vitesse et la section de coupe ; l'avance, la profondeur, le matériau de la pièce, l'outil de coupe et la géométrie de coupe, sont des facteurs déterminants qui permettent de définir la direction et l'amplitude des efforts de coupe.

C'est dans les domaines de la recherche, de la fabrication et de la conception que les dynamomètres sont le plus utiles, car ils permettent de mesurer les différentes composantes d'un effort de coupe. Ils servent également à analyser, à comparer et à sélectionner les matériaux, l'outil et la machines. D'autres possibilités d'application résultent de la détermination des efforts

de coupe optimisés de l'analyse du comportement de cassure d'outils ainsi que de l'examen de la formation de copeaux et de leur influence sur les efforts de coupe.

➤ **Chaîne de mesure et caractéristiques**

Dynamomètre à 3 composantes (9257 B): la porte outil type 9403 vissable est employée pour des outils de tournage avec une section maximum de 26x26 (figure II.5).

- Grande rigidité, fréquence propre très élevée.
- Large gamme de mesure.
- Bonne linéarité, sans hystérésis.
- Faible interaction (<1%).
- Utilisation simple (prêt à l'emploi).
- Construction compacte.
- Résistant au lubrifiant selon mode de protection IP 67.
- Câble spécial à haute isolation de la connexion entre le dynamomètre et l'amplificateur (5 m de longueur; 8 mm de diamètre).
- Amplificateur multi canaux, destiné au mesure des efforts de coupe.
- Ordinateur personnel (Pc).
- Traceur.

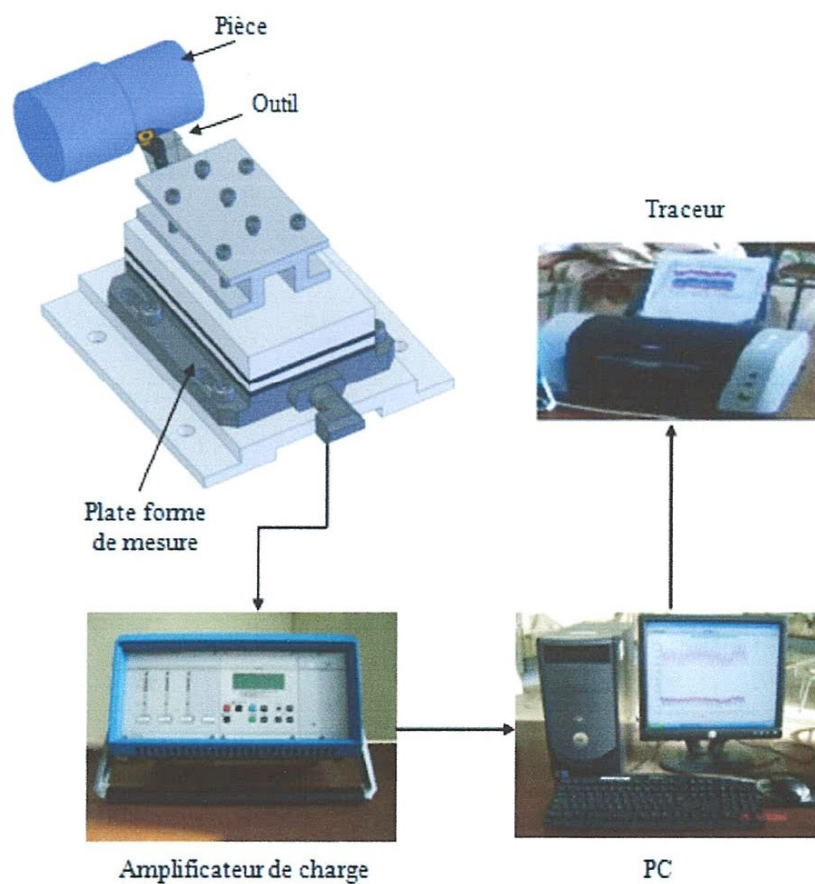


Figure II-8 Chaîne de mesure des efforts de coupe.

II.3 Planification des expériences

II.3.1 Introduction

Il existe plusieurs éléments intervenant sur le processus de coupe. Parmi ces derniers on peut citer : les éléments du régime de coupe (V_c, f, a_p), la géométrie de la partie active de l'outil ($r, \alpha, \beta, \gamma, \varepsilon, \text{etc.}\dots$), ainsi que les conditions de coupe (rigidité de la machine, lubrification). On peut dire que tous ces facteurs sont des paramètres d'entrée du processus de coupe. Par contre, les efforts de coupe, la rugosité, représentent eux les paramètres de sortie. Il est sur qu'en ce qui concerne notre étude, de nombreux points apparaissent importants à traiter. Toutefois, nous nous sommes limités au suivi de l'évolution des paramètres suivants :

- ◆ Les efforts de coupe en fonction des paramètres (V_c, f, a_p)
- ◆ La rugosité en fonction des paramètres (V_c, f, a_p)
- ◆ La puissance de coupe en fonction des paramètres (V_c, f, a_p)

Considérant $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ comme paramètres d'entrée et $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ comme paramètres de sortie.

L'influence d'un ou de plusieurs facteurs ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$) sur un paramètre Y [22], peut être obtenue en utilisant la méthodes suivantes:

- Méthode multifactorielle

II.3.2 Méthode multifactorielle

Cette méthode permet de déterminer l'action simultanée de plusieurs facteurs sur le paramètre Y_j . c'est une relation qui a la forme :

$$Y_j = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$$

Pour notre étude nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base (f, a_p, V_c) sur la rugosité, l'effort. Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule suivante :

$$N = q^k \dots\dots\dots (II.1)$$

Où, N : nombre d'essais

q : nombre de niveaux de variations des facteurs de base.

k : nombre de facteurs de base.

Dans notre cas nous avons trois facteurs de base ($k = 3$) et chaque facteur à Quatre niveaux de variation.

Dans la coupe des métaux, les lois liant la sortie Y d'un système d'usinage aux paramètres d'entrée (X_1, X_2, \dots, X_n) sont en général de la forme :

$$Y = C X_1^{k_1} X_2^{k_2} \dots\dots X_n^{k_n} \dots\dots\dots (II.2)$$

Où C : est une constante tenant compte de l'influence des facteurs ne figurant pas dans la relation (II.2).

$k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$: sont des exposants qui reflètent respectivement les degrés d'influence de (X_1, X_2, \dots, X_n) sur Y [23].

II.4 Conditions de coupe

Les essais sont effectués en tournage (opération de chariotage), la pièce est maintenue en montage mixte. L'usinage est réalisé sans lubrification et dans les conditions de coupe suivant le (tableau II.4).

Condition de coupe	Essais d'effort de coupe
Vitesse de coupe V_c (m/min)	90-120-140-160
Avance f (mm/tr)	0.08-0.12-0.14-0.16
Profondeur de passe a_p (mm)	0.1-0.2-0.3-0.4

Tableau II.4: Conditions de coupe.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équipements indispensables aux essais. La composition chimique des éprouvettes et les caractéristiques des matériaux de coupe ont été définies, et aussi les conditions de coupe, sont mentionnées.

CHAPITRE III
APPLICATION DE LA
MÉTHODOLOGIE DE
SURFACE DE RÉPONSE
POUR LA PRÉDICTION
DES MODÈLES
MATHÉMATIQUES

III. Modélisation des paramètres technologique en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RMS)

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons déterminer les modèles mathématiques des différents phénomènes étudiés. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre les éléments du régime de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe) et les paramètres étudiés (rugosité, effort de coupe) en utilisant deux types de plaquettes de coupe (la céramique mixte revêtue CC6050 et la céramique mixte non revêtue CC650). Pour faire une analyse de variance (ANOVA) et pour déterminer les constantes des différents modèles mathématiques ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse (RMS), nous avons utilisé un logiciel de statistique appelé « MINITAB15 ». L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés, et aussi la contribution de chaque paramètre du régime de coupe sur la rugosité et les efforts de coupe.

III.2 Modèles de la rugosité en fonction des paramètres de coupe

III.2.1 Résultats des expériences

Dans le tableau III.1 sont présentées les valeurs expérimentales du critère de rugosité (Ra) pour les deux plaquettes étudiées. Ces valeurs sont obtenues suite aux différentes combinaisons des éléments du régime de coupe selon un plan d'expérience de 16 essais avec 3 facteurs et 4 niveaux (plan de taguchi).

N° ESSA	Vc	f	ap	Ra (µm) plaquette revêtue 6050	Ra (µm) plaquette non revêtue 650
	(m/min)	(mm/tr)	(mm)		
1	90	0,08	0,1	0,30	0,43
2	90	0,12	0,2	0,67	0,52
3	90	0,14	0,3	0,83	0,85
4	90	0,16	0,4	1,41	1,35
5	120	0,08	0,2	0,49	0,36
6	120	0,12	0,1	0,81	0,50
7	120	0,14	0,4	1,20	0,86
8	120	0,16	0,3	1,35	0,95
9	140	0,08	0,3	0,50	0,75
10	140	0,12	0,4	0,74	0,80
11	140	0,14	0,1	1,08	1,02
12	140	0,16	0,2	1,29	1,00
13	160	0,08	0,4	0,59	0,70
14	160	0,12	0,3	0,90	0,76
15	160	0,14	0,2	1,13	1,11
16	160	0,16	0,1	1,63	1,23

Tableau III.1 : Résultats de la rugosité suivant le L16 (plan de taguchi 16 essais).

III.2.2 Analyse de la variance (ANOVA) et détermination des modèles mathématique

Les résultats présentés dans le tableau (III.2) sont analysés par le logiciel MINITAB15. En appliquant l'analyse de la variance (ANOVA), nous considérons un intervalle de confiance de 95% ($\alpha=0.05$). L'analyse de la variance (ANOVA) de la rugosité de surface (Ra) montre pour la céramique revêtue CC6050 (tableau III.2.a) que l'avance (f) et le facteur le plus significatif car sa contribution est de 86,134% suivi par la vitesse de coupe (Vc) avec une contribution 4,952% et en dernier lieu la profondeur de passe (ap) avec contribution presque inexistante 0,0733%. Le terme carré (f^2) a une contribution de 3,9%.

L'analyse de la variance (ANOVA) pour la céramique CC650 (tableau III.2.c), montre aussi que l'avance (f) et le facteur le plus significatif avec une contribution de 62,268% suivi par la vitesse de coupe (Vc) avec une contribution de 6,974% et en dernier lieu la profondeur de passe (ap) de 3,787%. Le terme carré (f^2) a une contribution 6,437% suivi par l'interaction (Vc*ap) d'une valeur 5,193% et aussi (Vc²) avec une contribution de 4,57%.

a) Céramique revêtue :

Source	DL	SomCar	séq	ajust	CM ajust	F	P	contribution%
Vc	1	0,10804		0,00369	0,00369	0,39	0,557	4,952
f	1	1,87920		0,01203	0,01203	1,26	0,305	86,134
ap	1	0,00162		0,00004	0,00004	0,00	0,949	0,0733
Vc*Vc	1	0,00009		0,00029	0,00029	0,03	0,868	0,0041
f*f	1	0,08509		0,05679	0,05679	5,94	0,051	3,900
ap*ap	1	0,02250		0,02257	0,02257	2,36	0,175	1,031
Vc*f	1	0,00084		0,00009	0,00009	0,01	0,926	0,0385
Vc*ap	1	0,02478		0,02277	0,02277	2,38	0,174	1,135
f*ap	1	0,00216		0,00216	0,00216	0,23	0,651	0,099
Erreur	6	0,05737		0,05737	0,00956			
Total	15	2,18170						

S = 0,0977880

R carré = 97,37 % R carré (ajust) = 93,43 %

b)

Terme	Coeff	Coef	ErT	T	P
Constante	0,047		1,123	0,04	0,968
Vc	0,00811		0,01306	0,62	0,557
f	-11,67		10,40	-1,12	0,305
ap	0,205		3,075	0,07	0,949
Vc*Vc	0,000008		0,000045	0,17	0,868
f*f	87,45		35,89	2,44	0,051
ap*ap	3,757		2,446	1,54	0,175
Vc*f	-0,00575		0,05947	-0,10	0,926
Vc*ap	-0,02211		0,01432	-1,54	0,174
f*ap	6,36		13,38	0,48	0,651

c) Céramique non revêtue

Source	DL	SomCar séq	ajust	CM ajust	F	P	contribution%
Vc	1	0,08397	0,00723	0,00723	0,46	0,525	6,974
f	1	0,74971	0,01057	0,01057	0,66	0,446	62,268
ap	1	0,04560	0,00410	0,00410	0,26	0,629	3,787
Vc*Vc	1	0,05511	0,05802	0,05802	3,65	0,105	4,577
f*f	1	0,07751	0,04011	0,04011	2,52	0,163	6,437
ap*ap	1	0,02176	0,02217	0,02217	1,39	0,282	1,807
Vc*f	1	0,00927	0,00234	0,00234	0,15	0,714	0,769
Vc*ap	1	0,06253	0,05846	0,05846	3,68	0,104	5,193
f*ap	1	0,00316	0,00316	0,00316	0,20	0,671	0,262
Erreur	6	0,09537	0,09537	0,01589			
Total	15	1,20399					

S = 0,126075
R carré = 92,08 % R carré (ajust) = 80,20 %

Terme	Coeff	Coef ErT	T	P
d) Constante	1,134	1,448	0,78	0,463
Vc	-0,01136	0,01684	-0,67	0,525
f	-10,94	13,41	-0,82	0,446
ap	2,015	3,965	0,51	0,629
Vc*Vc	0,000110	0,000058	1,91	0,105
f*f	73,50	46,27	1,59	0,163
ap*ap	3,724	3,153	1,18	0,282
Vc*f	-0,02945	0,07668	-0,38	0,714
Vc*ap	-0,03542	0,01847	-1,92	0,104
f*ap	7,69	17,25	0,45	0,671

Tableau III.2 : Résultats de l'analyse de variance pour Ra.

Les coefficients des modèles mathématiques de la rugosité pour les 2 céramiques testés sont mentionnés sur le tableau (III.2.b.d).

Alors les modèle de la rugosité (Ra) avec tout les facteurs principaux et leurs interactions, peut s'écrire comme suit :

Modèle complet : (plaquette revêtue CC6050)

$$Ra = 0.047 + 0.00811Vc - 11.67f + 0.205ap + 0.000008Vc^2 + 87.45f^2 + 3.757ap^2 - 0.00575Vc*f - 0.02211Vc*ap + 6.36f*ap$$

Coefficient de détermination R²=97,37%

Modèle complet : (plaquette non revêtue CC650)

$$Ra = 1.134 - 0.01136Vc - 10.94f + 2.015ap + 0.000110Vc^2 + 73.50f^2 + 3.724ap^2 - 0.02945Vc*f - 0.03542Vc*ap + 7.69f*ap$$

Coefficient de détermination R²=92,08%

III.2.3 Diagrammes de surfaces 3 D et Graphique de Contour

La réponse de la rugosité de surface (Ra) (3D) en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur les diagrammes (fig.III.1). Cette figure montre que la pente de l'avance (f) est supérieur par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur la rugosité (Ra) suivi par la vitesse de coupe (Vc) et en dernier lieu par la profondeur de passe (ap). D'autre part les graphes de contour figure III.2 permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables. Le diagramme montre la relation entre une valeur de réponse (dans notre cas Ra) et trois facteurs à partir d'un modèle d'équation. Les points ayant la même réponse sont joints pour générer les lignes de contours des réponses constantes.

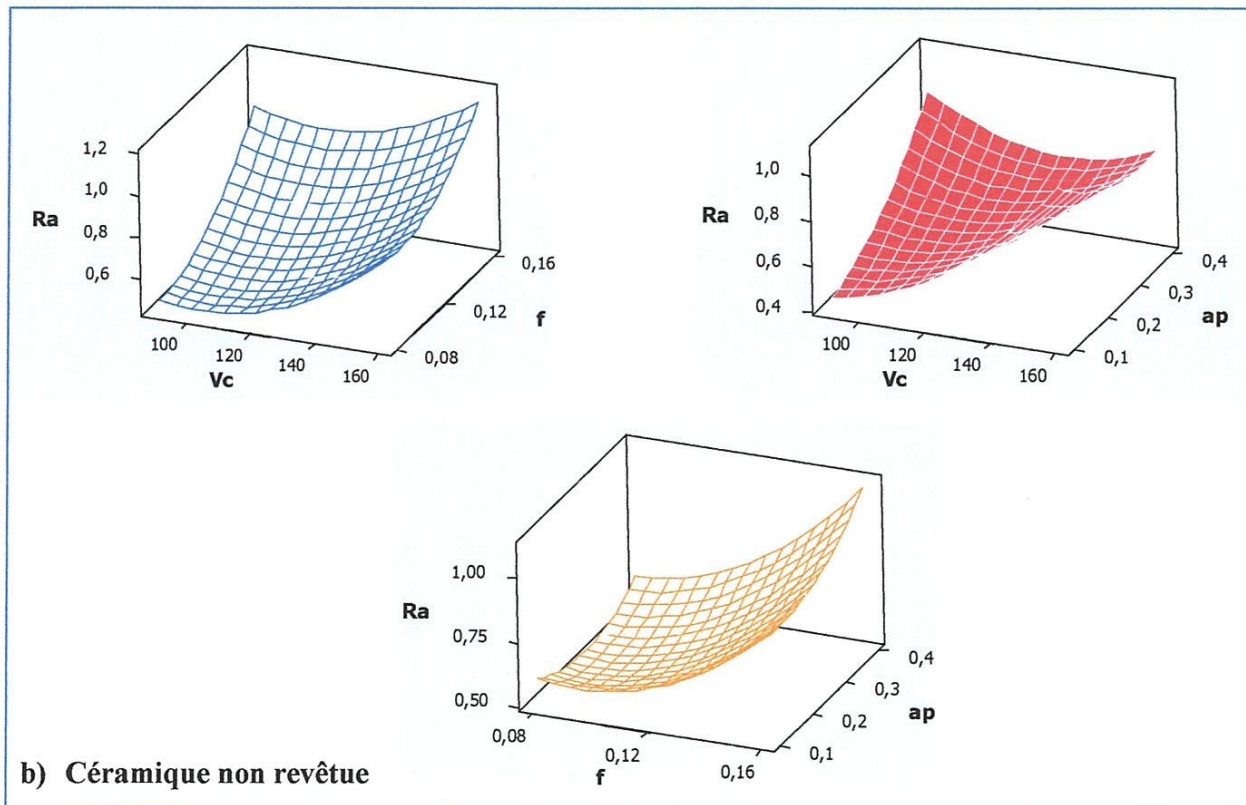
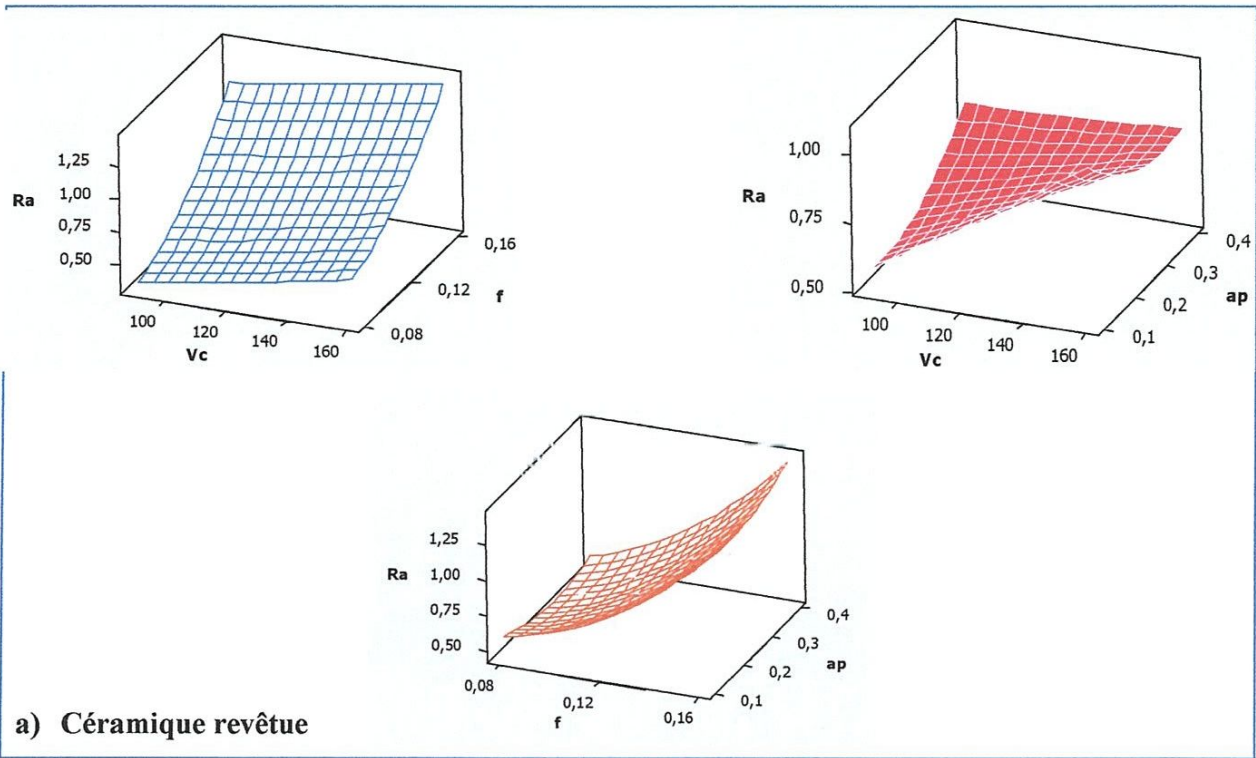


Figure III.1: Diagrammes de surfaces de Ra en fonction de (Vc , f , ap).

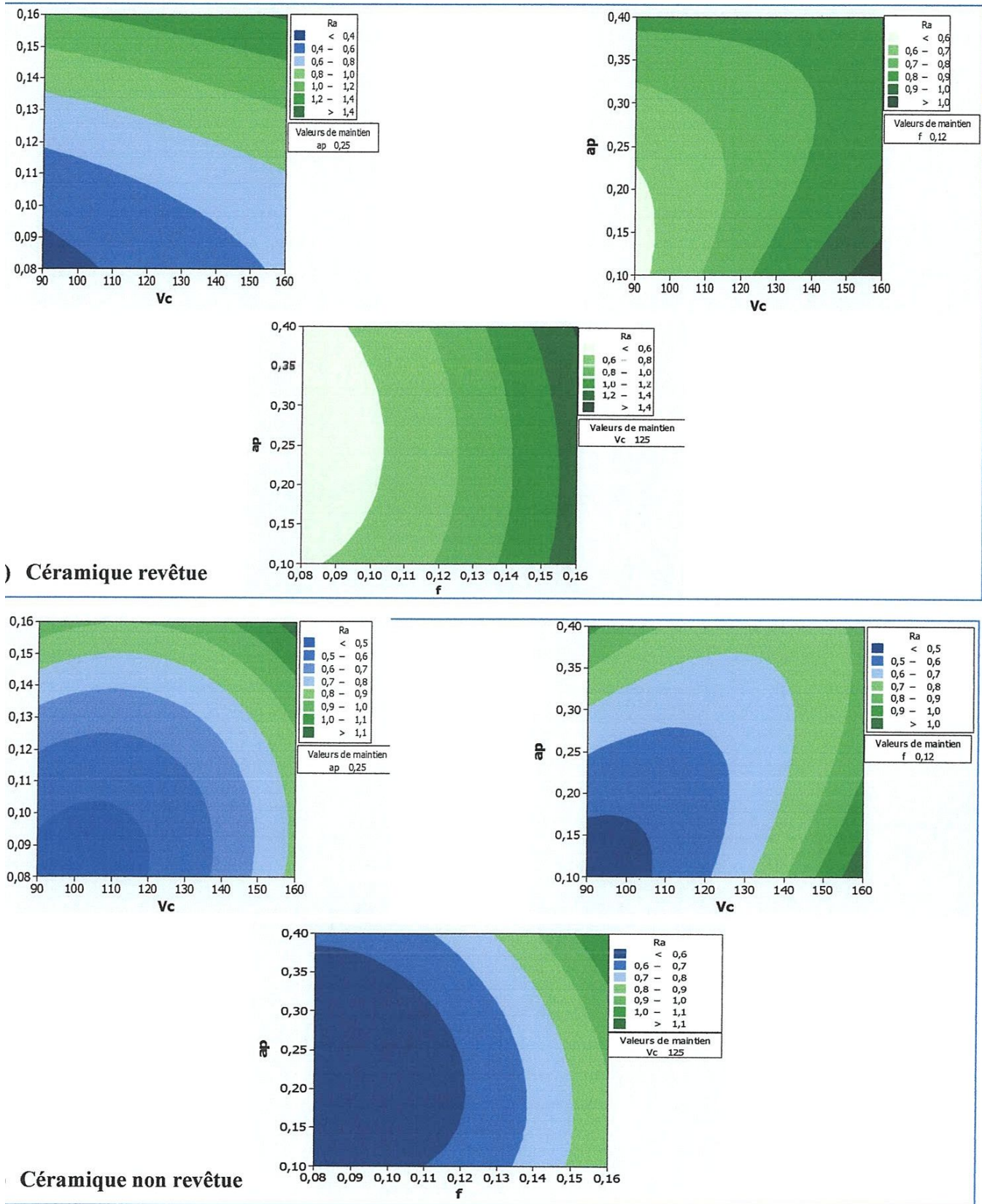
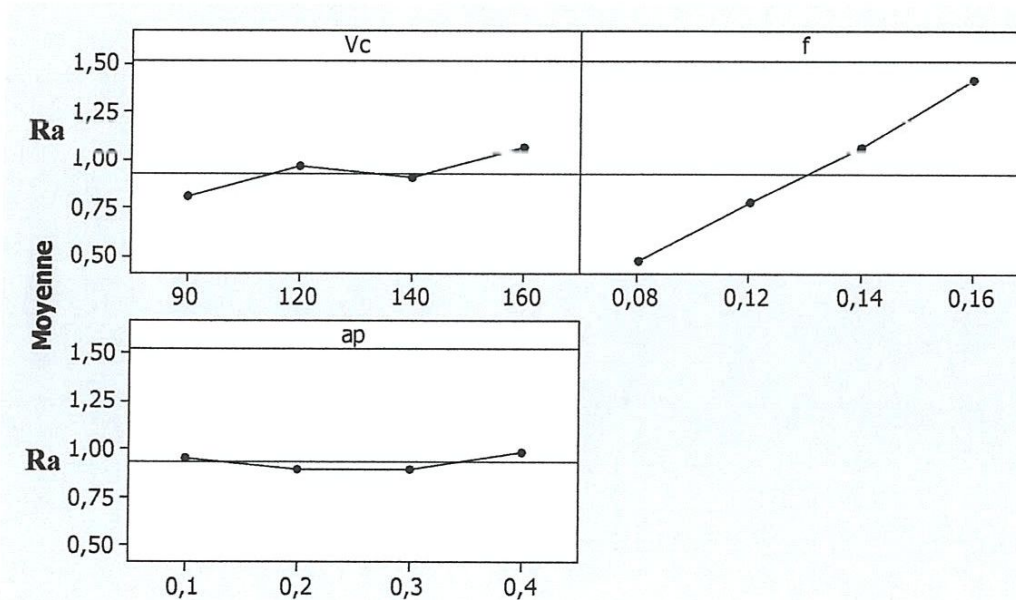


Figure III.2 : Graphique de Contour de Ra en fonction de Vc,f ,ap.

III.2.4 Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction

La (figure III.3) montre les effets moyens des paramètres de coupe sur la rugosité (Ra) pour les deux types de plaquettes. On remarque que l'avance (f) est le facteur le plus influent sur la rugosité (Ra) car il a la plus grande pente. La profondeur de passe (ap) affecte peu la rugosité (Ra).

a) Céramique revêtue :



b) Céramique non revêtue :

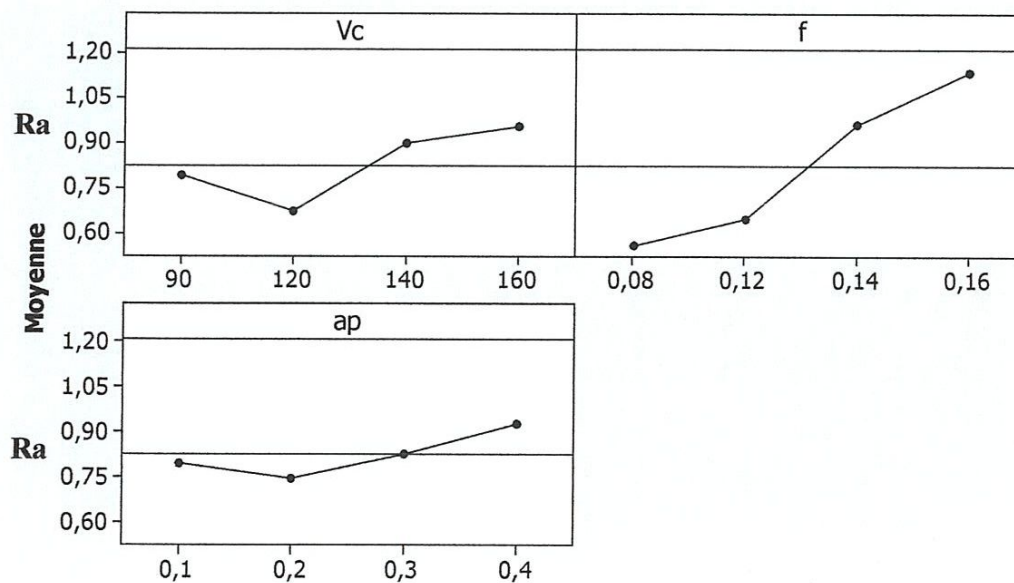
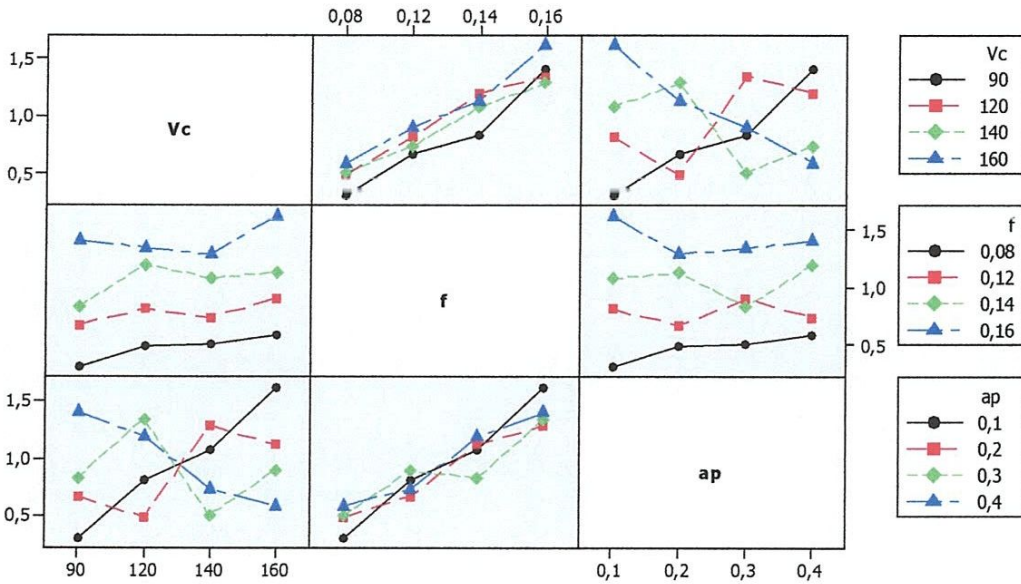


Figure III.3 : Graphique des effets principaux pour Ra.

La (figure III.4) montre le diagramme des interactions des paramètres de coupe sur la rugosité Ra. Cette figure montre que nous avons des interactions entre la vitesse de coupe (V_c) et l'avance (f) et entre la vitesse de coupe (V_c) et la profondeur de passe (ap).

a) Céramique revêtue :



b) Céramique non revêtue :

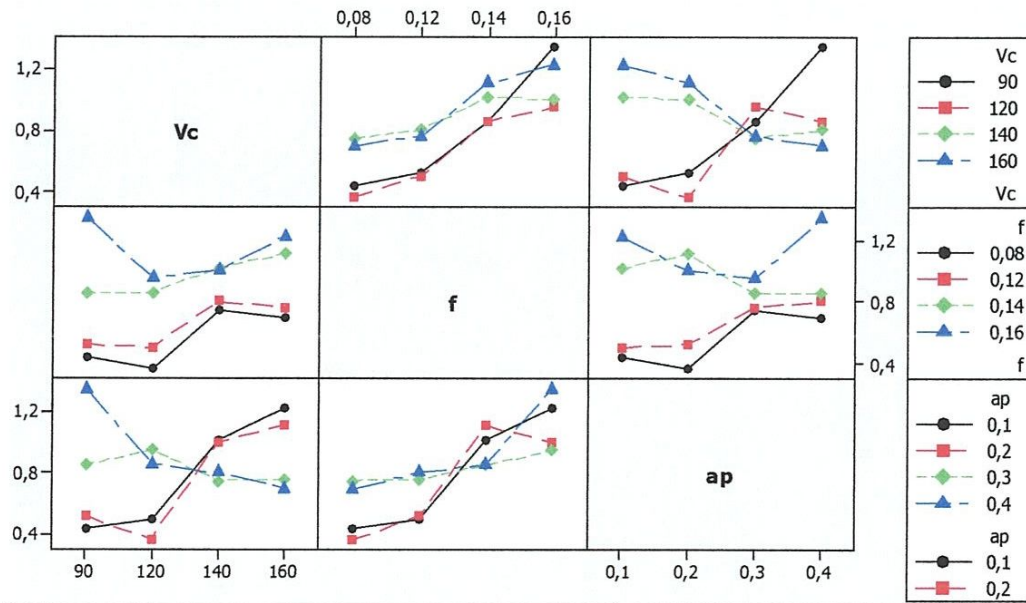


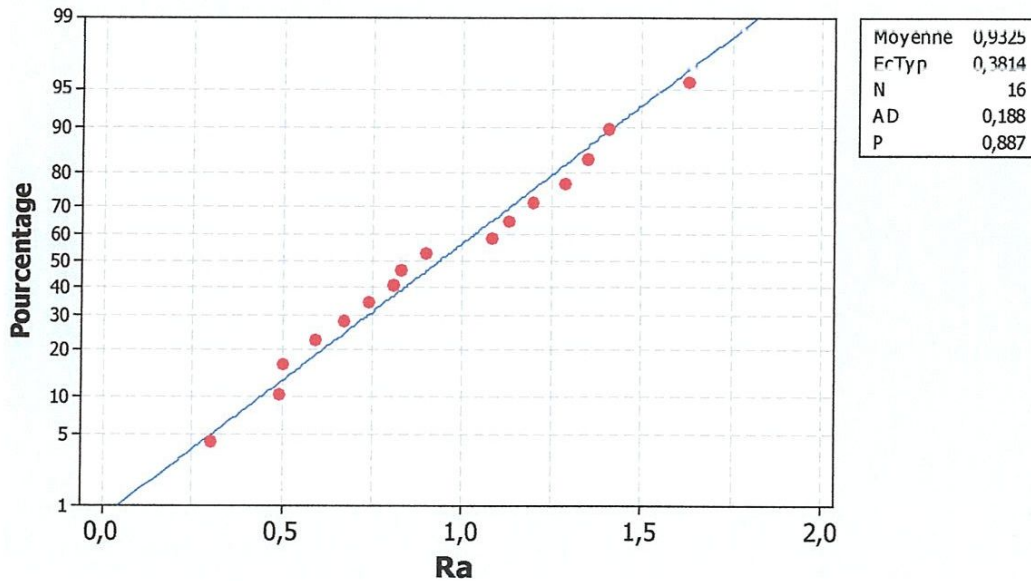
Figure III.4 : Diagramme d'interaction pour Ra.

III.2.5 Test de normalité de la distribution des résidus pour (Ra)

Pour valider le model de la rugosité (Ra), on a étudié la distribution des résidus (différence entre la valeur expérimentale de (Ra) et celle obtenue à partir du modèle de prédiction), cette distribution doit suivre la loi normale.

Le test de normalité de cette distribution (Test de normalité d'Anderson Darling) valide cette hypothèse (P-Value < 0,887) pour la céramique revêtue et (P-Value < 0,943) pour céramique non revêtue (figure III.5).

a) Céramique revêtue :



b) Céramique non revêtue :

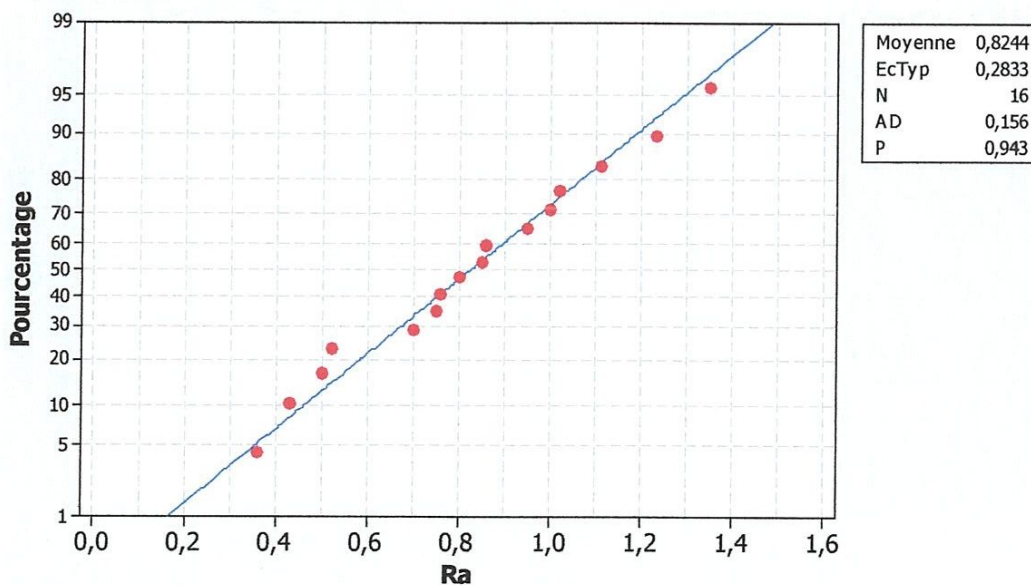


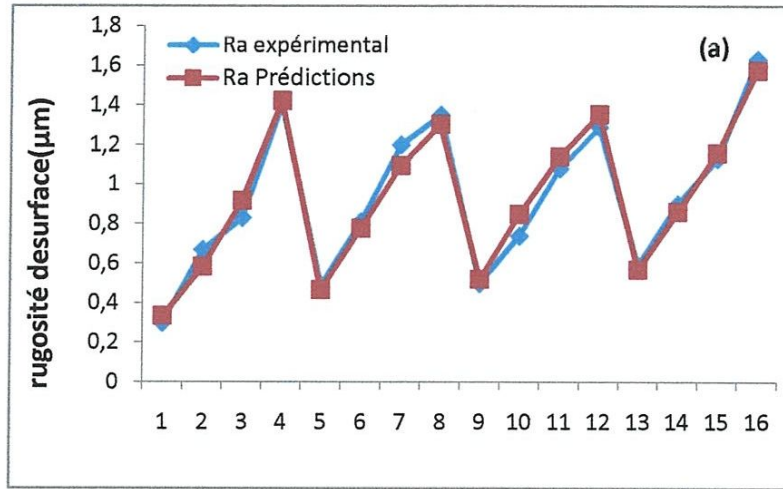
Figure III.5 : Test de normalité de la distribution des résidus pour Ra.

III.2.6 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

La Figure III.6 montre une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites de la rugosité (R_a) pour les 16 essais réalisés. Ces droites permettent de comparer les valeurs prédites aux valeurs expérimentales dans le but d'évaluer l'ajustement du modèle. Les valeurs x représentent les numéros des essais (16 essais), tandis que les valeurs y correspondent les valeurs prédites et expérimentales.

L'analyse de la figure III.6 montre la bonne corrélation entre les deux valeurs.

a) Céramique revêtue :



b) Céramique non revêtue :

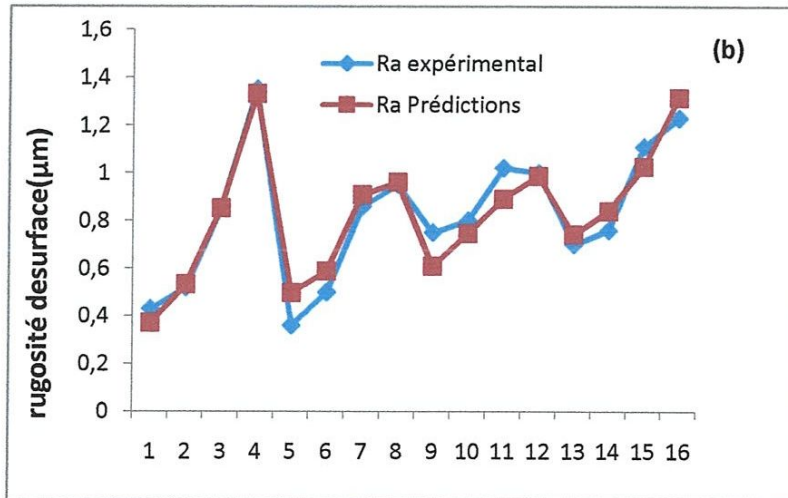


Figure III.6 : Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du R_a pour les deux types des plaquettes.

La formule pour déterminer le pourcentage d'erreur est :

$$\left| \text{Valeur Théorique} - \text{Valeur Expérimentale} \right| \times 100 / \text{Valeur Expérimentale}$$

Le tableau (III.3) montre le pourcentage d'erreur pour chaque essai (valeur mesurés et prédites).

N° ESSA	Ra (µm)	Ra (µm)	Erreur %	Ra (µm)	Ra (µm)	Erreur %
	CC6050 Mesure	CC6050 prédites	Ra (µm) CC6050	CC650 Mesure	CC650 Prédites	Ra (µm) CC650
1	0,30	0,33454	11,51%	0,43	0,37036	13,86%
2	0,67	0,58274	13,02%	0,52	0,53240	2,38%
3	0,83	0,91764	10,55%	0,85	0,85027	0,03%
4	1,41	1,42310	0,92%	1,35	1,33220	1,31%
5	0,49	0,46560	4,97%	0,36	0,49780	38,27%
6	0,81	0,77755	4,00%	0,50	0,58799	17,59%
7	1,20	1,09416	8,82%	0,86	0,90734	5,50%
8	1,35	1,30264	3,50%	0,95	0,96021	0,01%
9	0,50	0,52040	4,08%	0,75	0,60921	18,78%
10	0,74	0,84773	14,55%	0,80	0,74580	6,77%
11	1,08	1,14025	5,57%	1,02	0,88967	12,77%
12	1,29	1,35369	4,93%	1,00	0,98532	1,46%
13	0,59	0,56815	3,70%	0,70	0,74175	5,96%
14	0,90	0,85991	4,45%	0,76	0,83906	10,40%
15	1,13	1,15739	2,42%	1,11	1,02572	7,59%
16	1,63	1,57453	3,40%	1,23	1,31490	6,90%

Tableau III.3 : Résultats des erreurs entre les valeurs mesurées et prédites des la rugosité (Ra).

L'analyse du tableau (III.3), montre que le % d'erreurs minimales sont obtenues avec le régime 4 pour les céramiques mixte revêtue (CC6050) et le régime 8 pour les céramique mixte non revêtue (CC650).

III.3 Modèles de l'effort de coupe en fonction des paramètres de coupe

III.3.1 Résultats des expériences

Dans le tableau (III.4) sont présentées les valeurs expérimentales de l'effort de coupe (Ft) pour les deux plaquettes étudiées. Ces valeurs ont été obtenues suite aux différentes combinaisons des éléments du régime de coupe selon un plan d'expérience 16 essais avec 3 facteurs et 4 niveaux (plan de taguchi).

N° ESSA	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Ft (N) plaquette revêtue 6050	Ft (N) plaquette non revêtue 650
1	90	0,08	0,1	56,59	45,86
2	90	0,12	0,2	137,24	97,35
3	90	0,14	0,3	227,46	108,84
4	90	0,16	0,4	308,34	243,52
5	120	0,08	0,2	97,16	83,97
6	120	0,12	0,1	80,09	63,60
7	120	0,14	0,4	261,05	221,05
8	120	0,16	0,3	179,36	190,87
9	140	0,08	0,3	139,28	141,67
10	140	0,12	0,4	252,05	173,26
11	140	0,14	0,1	80,25	80,88
12	140	0,16	0,2	114,02	127,11
13	160	0,08	0,4	175,17	161,13
14	160	0,12	0,3	170,13	155,60
15	160	0,14	0,2	160,44	110,54
16	160	0,16	0,1	53,28	94,67

Tableau III.4 : Résultats de l'effort de coupe suivant le L16 (plan de taguchi 16 essais).

III.3.2 Analyse de la variance (ANOVA) et détermination des modèles mathématique

Les résultats présentés dans le tableau (III.5) sont analysés par le logiciel MINITAB15. En appliquant l'analyse de la variance (ANOVA), nous considérons un intervalle de confiance de 95% ($\alpha=0.05$). L'analyse de la variance (ANOVA) montre pour la céramique revêtue CC6050 tableau (III.5.a) que la profondeur de passe (ap) et le facteur le plus significatif car sa contribution est de 81,370% suivi par l'avance (f) avec une contribution 7,517% et en dernier lieu la vitesse de coupe (Vc) avec contribution 4,520%, Le terme carré (F^2) a une contribution de 2,273%.

L'analyse de la variance (ANOVA) pour la céramique non revêtue CC650 tableau (III.5.c), montre aussi que la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus significatif avec une contribution de 77,581% suivi par l'avance (f) avec une contribution

11,787% et en dernier lieu la vitesse de coupe (V_c) avec contribution 0,101%, le terme carré (f^2) a une contribution 1,929% suivi par l'interaction ($f*ap$) d'une valeur 2,281% et aussi (V_c^2) avec une contribution de 0,631%.

a) Céramique revêtue :

Source	DL	SomCar	séq	ajust	CM	ajust	F	P	contribution%
V_c	1	3955,2		45,1	45,1		0,22	0,652	4,520
f	1	6578,0		1636,6	1636,6		8,14	0,029	7,517
ap	1	71196,5		233,1	233,1		1,16	0,323	81,370
V_c*V_c	1	253,5		441,6	441,6		2,20	0,189	0,289
$f*f$	1	1988,9		2646,7	2646,7		13,17	0,011	2,273
$ap*ap$	1	108,8		113,4	113,4		0,56	0,481	0,124
V_c*f	1	0,0		52,0	52,0		0,26	0,629	0,000
V_c*ap	1	1217,1		959,2	959,2		4,77	0,072	1,391
$f*ap$	1	992,6		992,6	992,6		4,94	0,068	1,134
Erreur	6	1206,2		1206,2	201,0				
Total	15	87496,7							

S = 14,1785

R carré = 98,62 % R carré (ajust) = 96,55 %

Terme	Coeff	Coef	ErT	T	P
b) Constante	-179,5		162,9	-1,10	0,313
V_c	-0,897		1,894	-0,47	0,652
f	4304		1509	2,85	0,029
ap	480,1		445,9	1,08	0,323
V_c*V_c	0,009630		0,006497	1,48	0,189
$f*f$	-18880		5203	-3,63	0,011
$ap*ap$	266,3		354,6	0,75	0,481
V_c*f	-4,387		8,623	-0,51	0,629
V_c*ap	-4,537		2,077	-2,18	0,072
$f*ap$	4310		1940	2,22	0,068

c) Céramique non revêtue :

Source	DL	SomCar	séq	ajust	CM	ajust	F	P	contribution%
V_c	1	48,4		495,0	495,0		1,25	0,306	0,101
f	1	5617,5		330,4	330,4		0,84	0,396	11,787
ap	1	36974,0		114,9	114,9		0,29	0,609	77,581
V_c*V_c	1	301,0		132,9	132,9		0,34	0,583	0,631
$f*f$	1	919,5		799,0	799,0		2,02	0,205	1,929
$ap*ap$	1	289,2		303,1	303,1		0,77	0,415	0,606
V_c*f	1	1,1		185,0	185,0		0,47	0,519	0,002
V_c*ap	1	49,1		9,7	9,7		0,02	0,881	0,103
$f*ap$	1	1087,5		1087,5	1087,5		2,75	0,148	2,281
Erreur	6	2371,1		2371,1	395,2				
Total	15	47658,4							

S = 19,8791

R carré = 95,02 % R carré (ajust) = 87,56 %

d)

Terme	Coef	Coef ErT	T	P
Constante	-30,7	228,3	-0,13	0,898
Vc	2,972	2,655	1,12	0,306
f	-1934	2115	-0,91	0,396
ap	-337,1	625,2	-0,54	0,609
Vc*Vc	-0,005283	0,009110	-0,58	0,583
f*f	10374	7296	1,42	0,205
ap*ap	435,5	497,2	0,88	0,415
Vc*f	-8,27	12,09	-0,68	0,519
Vc*ap	-0,455	2,912	-0,16	0,881
f*ap	4511	2719	1,66	0,148

Tableau III.5 : Résultats de l'analyse de variance pour Ft.

Les coefficients des modèles mathématiques de l'effort de coupe (Ft) pour les 2 céramiques testés sont mentionnés sur les tableau (III.5.b,d).

Alors les modèle de l'effort de coupe (Ft) avec tout les facteurs principaux et leurs interactions, peut s'écrire comme suit:

Modèle complet : (plaquette revêtue CC6050)

$$Ft = -179.5 - 0.897Vc + 4304f + 480.1ap + 0.009630Vc^2 - 18880f^2 + 266.3ap^2 - 4.387Vc*f - 4.537Vc*ap + 4310f*ap$$

Coefficient de détermination $R^2 = 98,62\%$

Modèle complet : (plaquette non revêtue CC650)

$$Ft = -30.7 + 2.972Vc - 1934f - 337.1ap - 0.005283Vc^2 + 10374f^2 + 435.5ap^2 - 8.27Vc*f - 0.455Vc*ap + 4511.4F*ap$$

Coefficient de détermination $R^2 = 95,02\%$

III.3.3 Diagrammes de surfaces 3 D et Graphique de Contour

La réponse de l'effort de coupe (Ft) (3D) en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur les diagrammes (fig. III.7). Cette figure montre que la pente de la profondeur de passe est supérieur par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur l'effort de coupe (Ft) suivi par l'avance (f) et en dernier lieu peu la vitesse de coupe (Vc).

D'autre part les graphes de contour (figure III.8) permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables. Le diagramme montre la relation entre une valeur de réponse (dans notre cas Ft) et trois facteurs à partir d'un modèle d'équation. Les points ayant la même réponse sont joints pour générer les lignes de contours des réponses constantes.

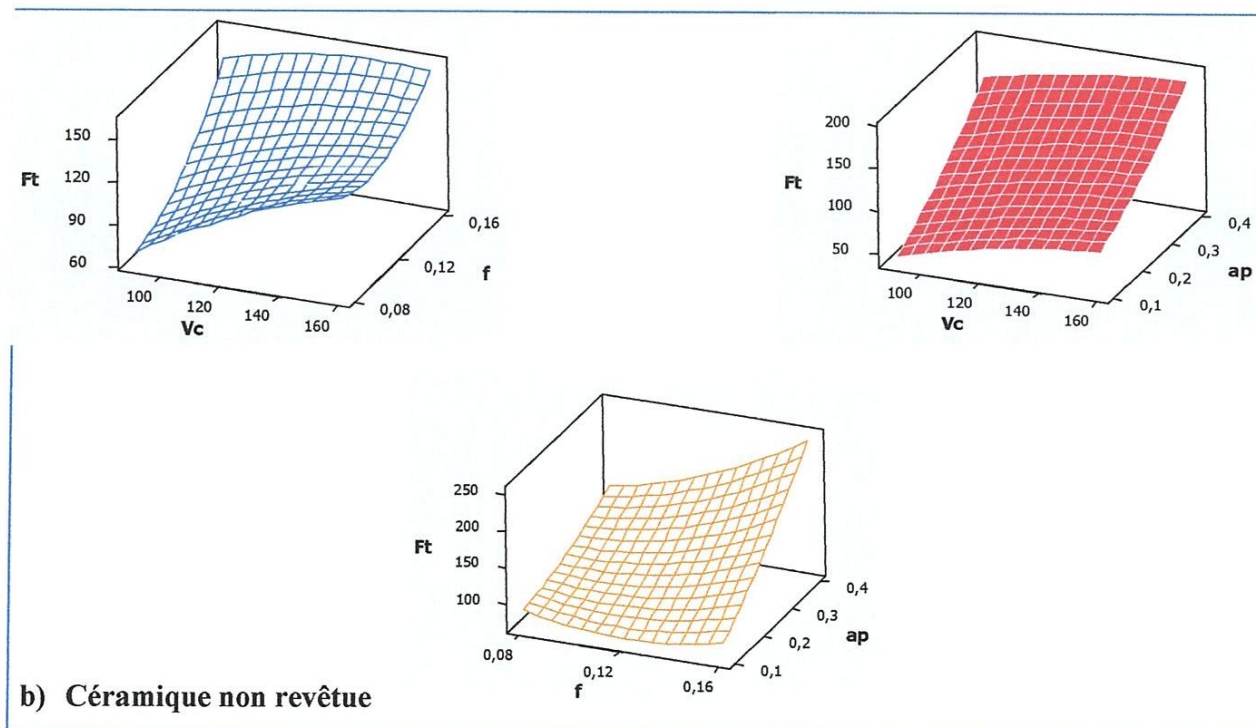
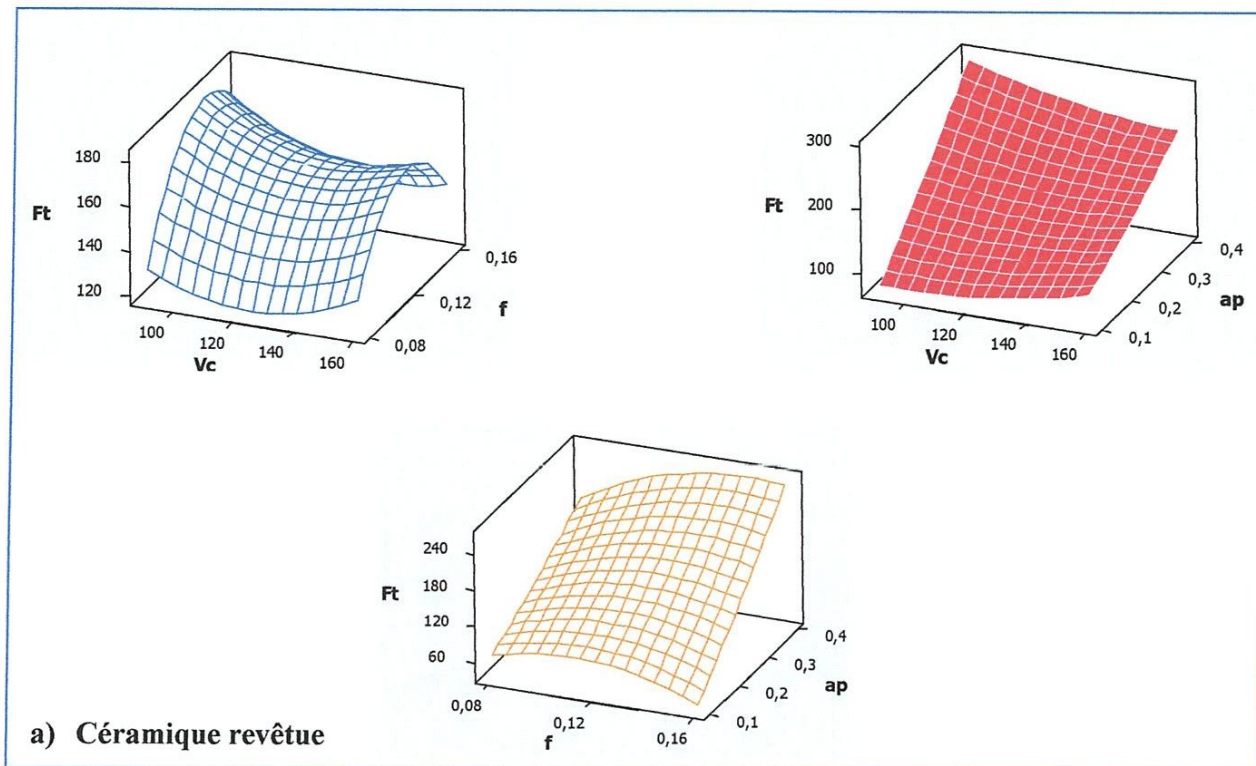


Figure III.7 Diagrammes de surfaces de F_t en fonction de (V_c , f , ap).

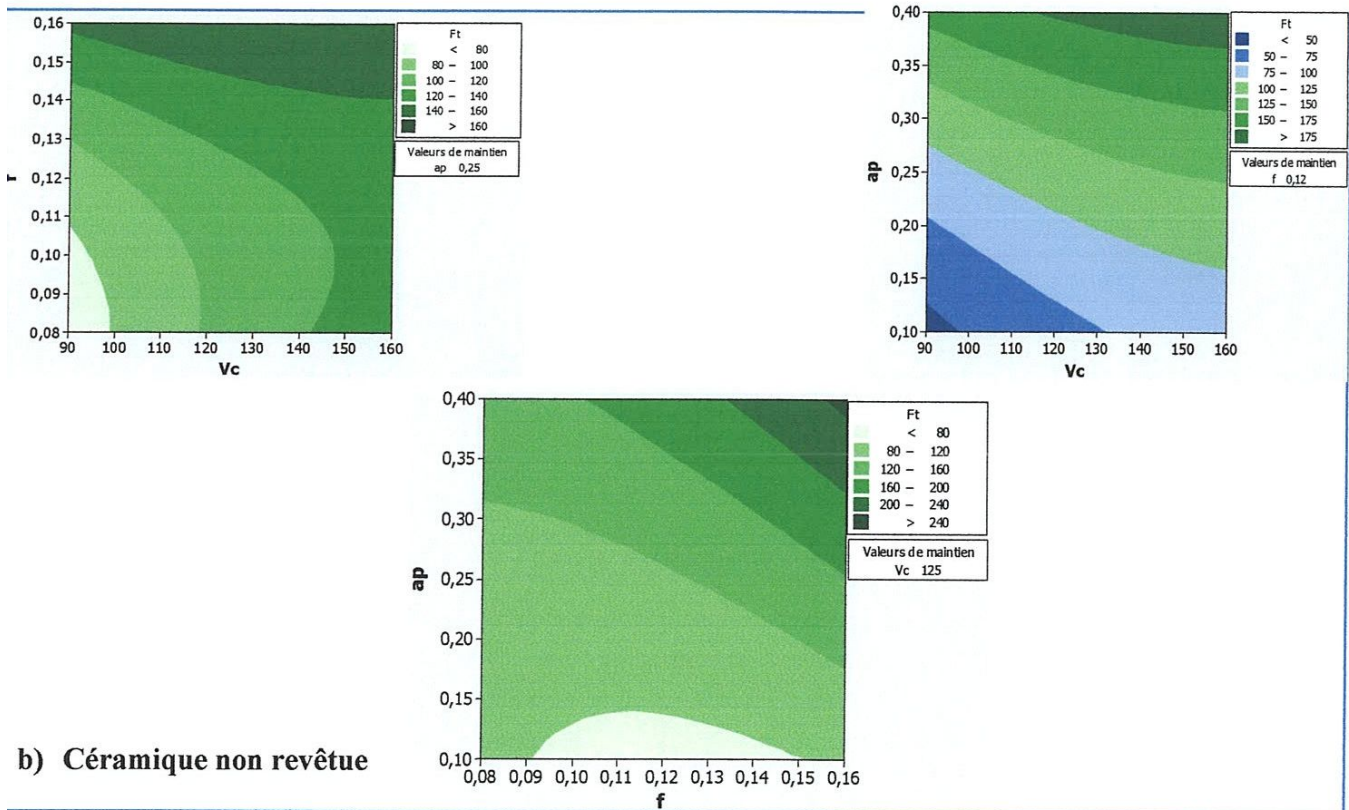
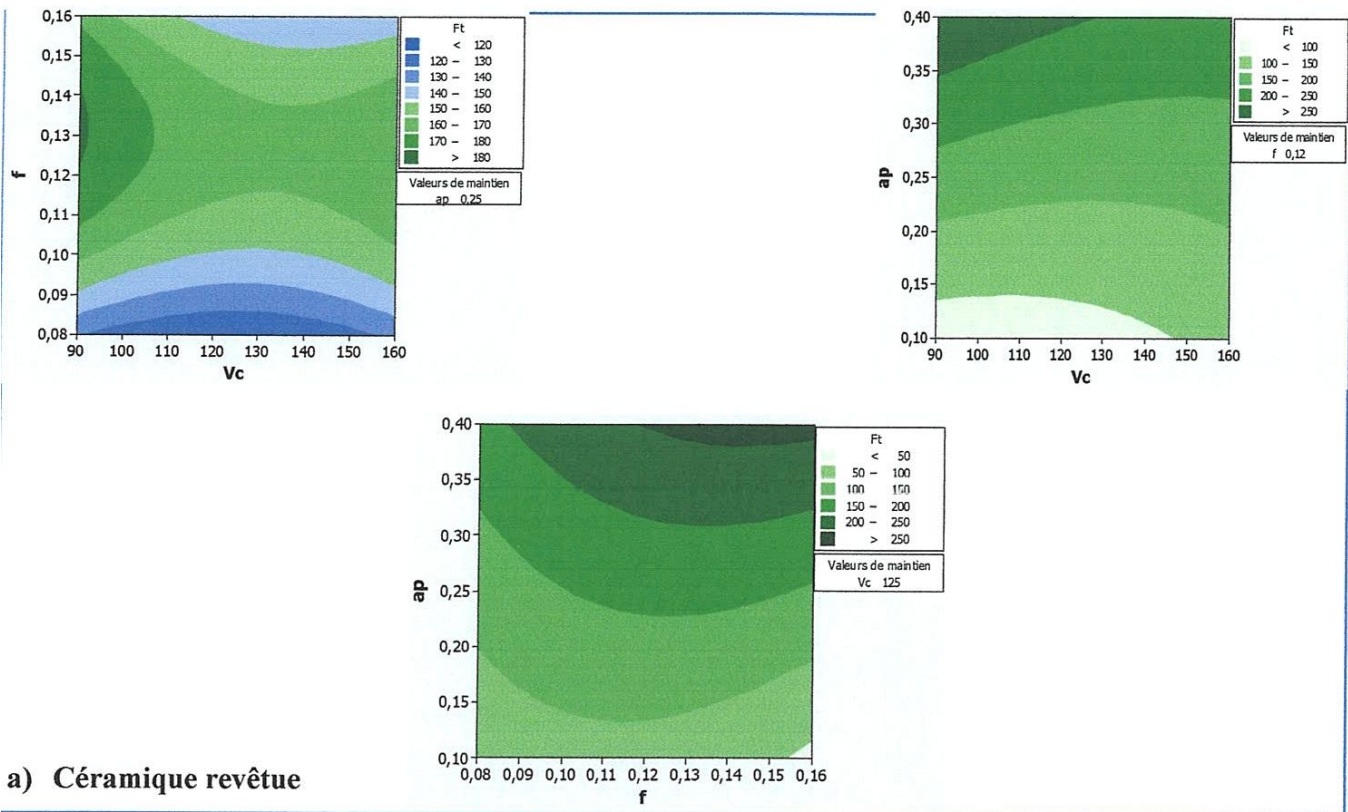
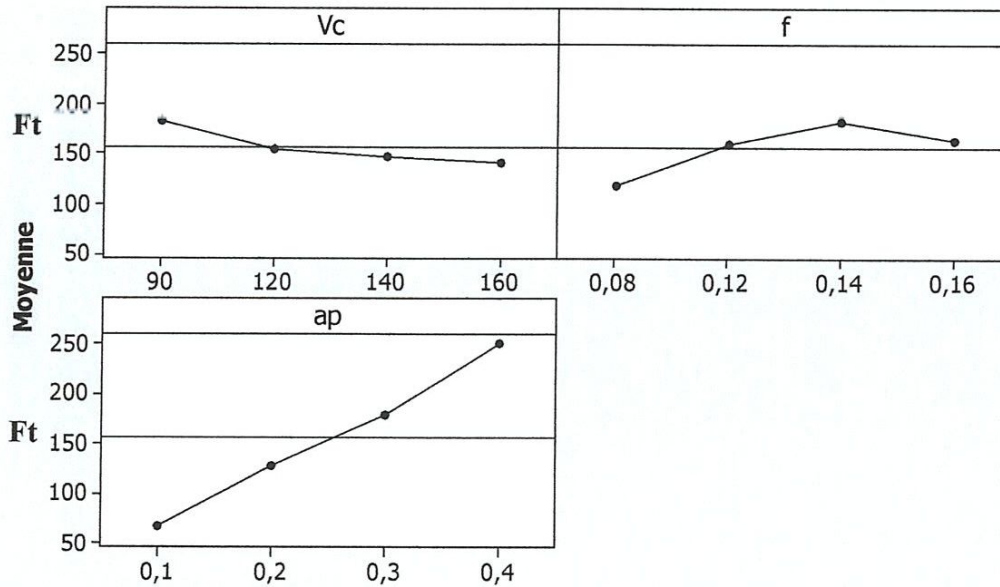


Figure III.8 Graphique de Contour de Ft en fonction de Vc ,ap,f

III.3.4 Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction

La (figure III.9) montre les effets moyens des paramètres de coupe sur l'effort de coupe. On remarque que la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus influent sur l'effort de coupe (F_t) car il a la plus grande pente. L'avance (f) affecte peu l'effort de coupe (F_t).

a) Céramique revêtue :



b) Céramique non revêtue :

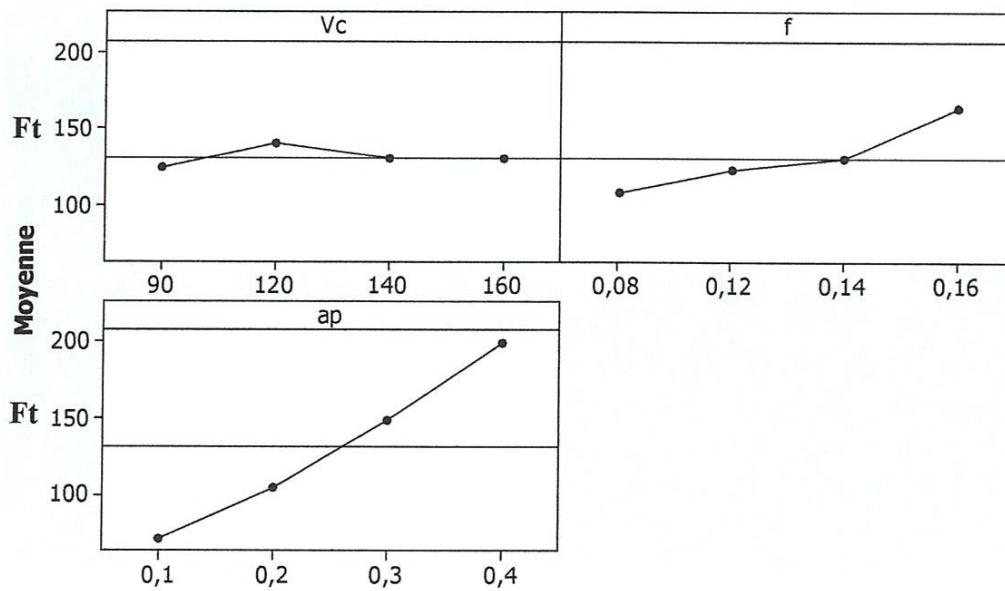
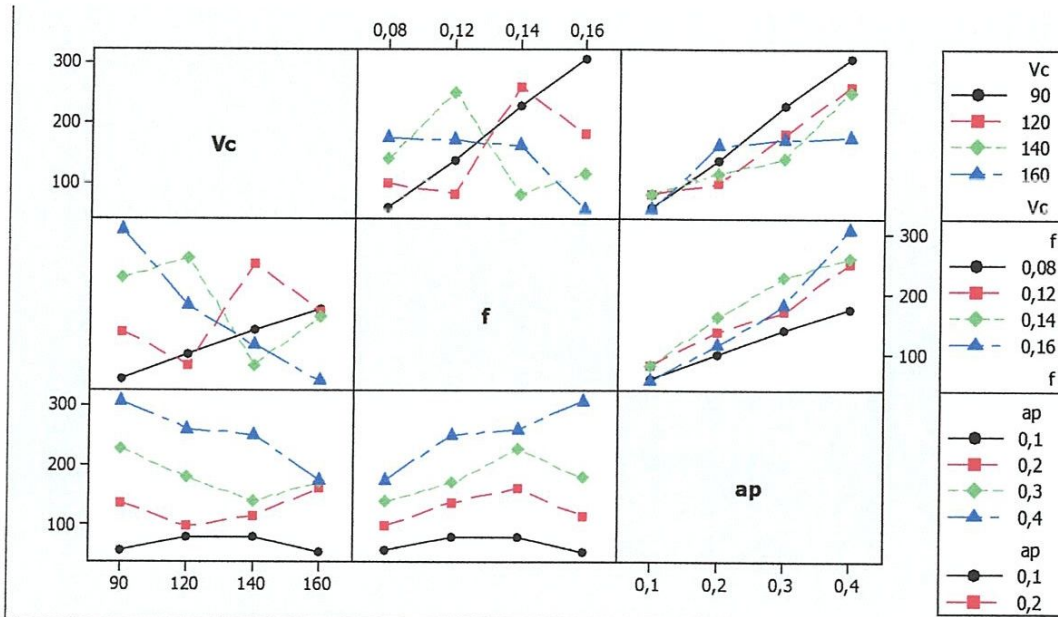


Figure III.9 Graphique des effets principaux pour F_t .

La (figure III.10) montre le diagramme des interactions des paramètres de coupe sur l'effort de coupe (F_t). Cette figure montre que nous avons des interactions entre la vitesse de coupe (V_c) et l'avance (f) et entre la vitesse de coupe (V_c) et la profondeur de passe (ap).

a) Céramique revêtue :



b) Céramique non revêtue :

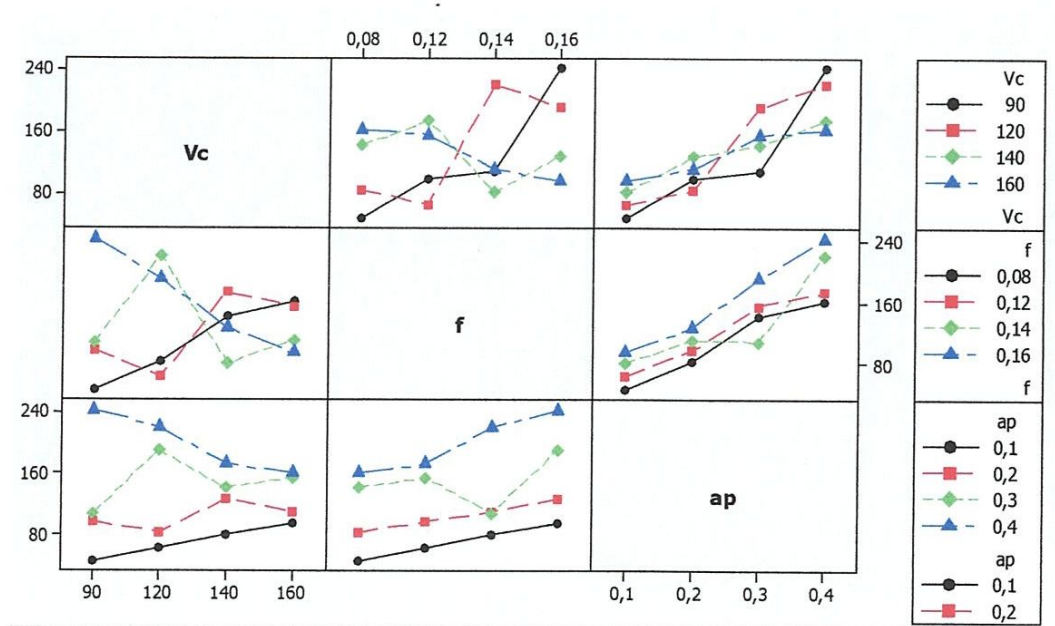


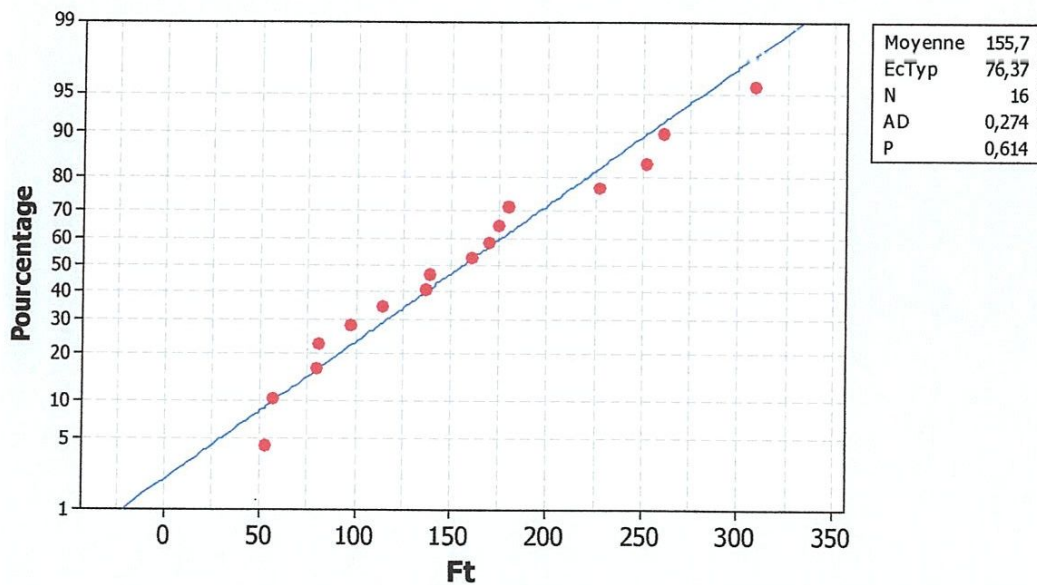
Figure III.10 : Diagramme d'interaction pour F_t .

III.3.5 Test de normalité de la distribution des résidus pour Ft

Pour valider le model de l'effort de coupe (Ft), on a étudié la distribution des résidus (différence entre la valeur expérimentale de (Ft) et celle obtenue à partir du modèle de prédiction), cette distribution doit suivre la loi normale.

Le test de normalité de cette distribution (Test de normalité d'Anderson Darling) valide cette hypothèse (P-Value < 0,614) pour céramique revêtue et (P-Value < 0,772) pour céramique non revêtue (figure III.11).

a) Céramique revêtue :



b) Céramique non revêtue :

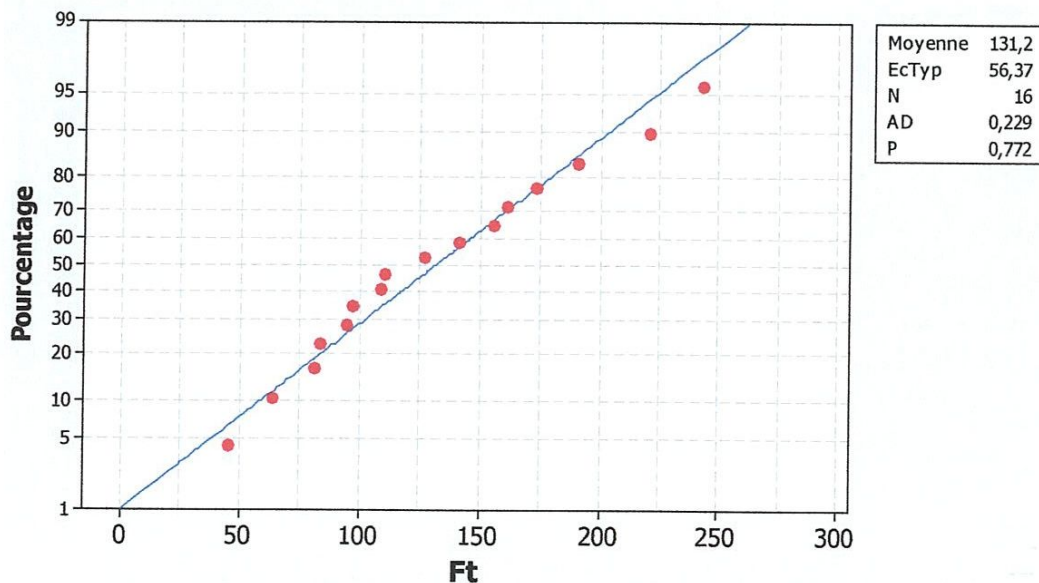


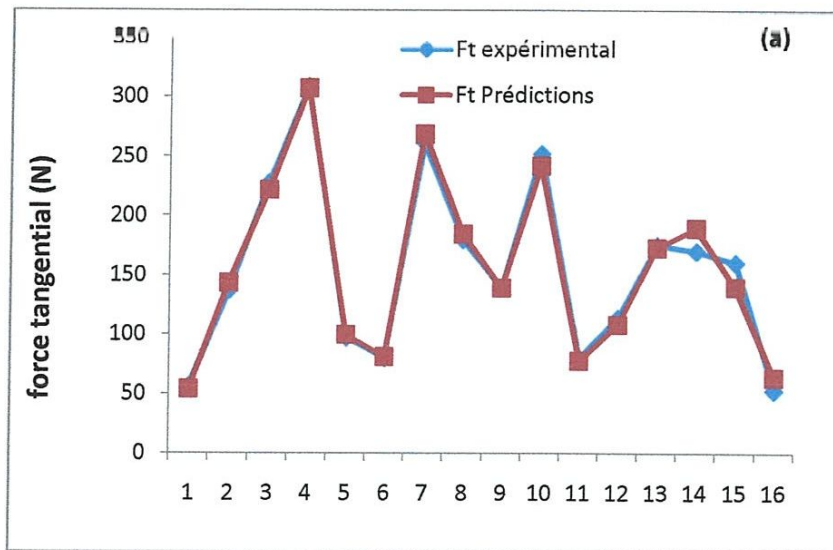
Figure III.11 : Test de normalité de la distribution des résidus pour Ft.

III.3.6 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

La (Figure III.12) montre une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites de l'effort de coupe (F_t) pour les 16 essais réalisés. Ces droites permettent de comparer les valeurs prédites aux valeurs expérimentales dans le but d'évaluer l'ajustement du modèle. Les valeurs x représentent les numéros des essais (16 essais), tandis que les valeurs y correspondent les valeurs prédites et expérimentales.

L'analyse de la (figure III.12) montre une bonne corrélation entre les deux valeurs.

a) Céramique revêtue :



b) Céramique non revêtue :

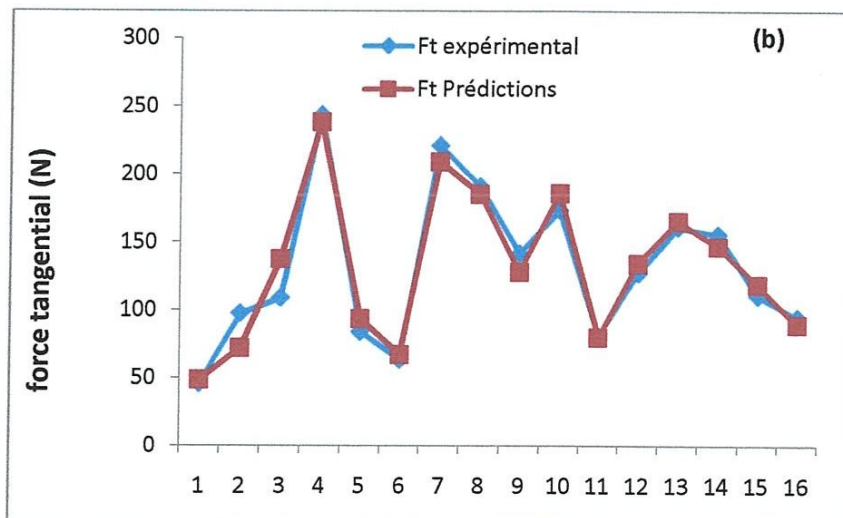


Figure III.12 : Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du (F_t) pour les deux types des plaquettes.

La formule pour déterminer le pourcentage d'erreur est :

$$\left| \text{Valeur Théorique} - \text{Valeur Expérimentale} \right| \times 100 / \text{Valeur Expérimentale}$$

Le tableau (III.6) montre le pourcentage d'erreur de chaque essai entre la valeur mesuré et prédite.

N° ESSA	Ft (N) CC6050 Mesure	Ft (N) CC6050 prédites	Erreur % Ft CC6050	Ft (N) CC650 Mesure	Ft (N) CC650 Prédites	Erreur % Ft CC650
1	56,59	53,976	4,61%	45,86	48,741	6,28%
2	137,24	143,449	4,52%	97,35	72,036	26,00%
3	227,46	221,540	2,60%	108,84	137,585	26,41%
4	308,34	307,094	0,40%	243,52	238,188	2,18%
5	97,16	99,627	2,53%	83,97	93,372	11,19%
6	80,09	80,900	1,01%	63,60	67,361	5,91%
7	261,05	268,587	2,88%	221,05	209,082	4,41%
8	179,36	184,169	2,68%	190,87	185,390	2,87%
9	139,28	138,885	0,28%	141,67	128,060	9,60%
10	252,05	242,032	3,97%	173,26	186,044	7,37%
11	80,25	77,672	3,21%	80,88	79,684	1,47%
12	114,02	108,264	5,04%	127,11	134,274	5,63%
13	175,17	173,025	1,20%	161,13	165,409	2,65%
14	170,13	189,253	11,25%	155,60	146,656	5,74%
15	160,44	139,903	12,80%	110,54	118,577	7,27%
16	53,28	63,535	19,24%	94,67	89,462	5,50%

Tableau III.6 : Résultats des erreurs entres les valeurs mesurées et prédites des l'effort de coupe (Ft).

L'analyse du tableau (III.6), montre que le % d'erreur minimales sont obtenues avec le régime 9 pour les céramiques mixte revêtue (CC6050) et le régime 11 pour les céramique mixte non revêtue (CC650).

III.4 Modèles de la Puissance de coupe en fonction des paramètres de coupe

III.4.1 Résultats des expériences

Dans le tableau (III.7) sont présentées les valeurs de la Puissance de coupe (P_c) calculées en se basent sur les valeurs des efforts de coupe (F_t) trouvés expérimentalement et cela pour les deux plaquettes étudiées. Ces valeurs ont été obtenues suite aux différentes combinaisons des éléments du régime de coupe selon un plan d'expérience 16 essais (L16).

N° ESSA	V_c (m/min)	f (mm/tr)	a_p (mm)	P_c (W) plaquette revêtue 6050	P_c (W) plaquette non revêtue 650
1	90	0,08	0,1	84,88	68,79
2	90	0,12	0,2	205,86	146,02
3	90	0,14	0,3	341,19	163,26
4	90	0,16	0,4	462,51	365,28
5	120	0,08	0,2	194,32	167,94
6	120	0,12	0,1	160,18	127,2
7	120	0,14	0,4	522,1	442,1
8	120	0,16	0,3	358,72	381,74
9	140	0,08	0,3	324,98	330,56
10	140	0,12	0,4	588,1	404,27
11	140	0,14	0,1	187,25	188,72
12	140	0,16	0,2	266,04	296,59
13	160	0,08	0,4	467,12	429,68
14	160	0,12	0,3	453,68	414,93
15	160	0,14	0,2	427,84	294,77
16	160	0,16	0,1	142,08	252,45

Tableau III.7 : Résultats de la Puissance de coupe suivant le L16.

La puissance de coupe est un paramètre important surtout pour les opérations d'ébauche car elle permet:

- ✓ de choisir ou d'investir dans une machine de puissance adaptée à l'opération à réaliser
- ✓ de rechercher les conditions de coupe permettant d'utiliser au mieux la puissance de la machine pour assurer le meilleur débit de copeaux en tenant compte des capacités de l'outil utilisé.

La puissance nécessaire à la coupe P_c (W) peut être estimée par la formule suivante:

$$P_c = F_c \cdot V_c / 60 \dots \dots \dots (III.1)$$

P_c : Puissance de coupe (W)
 F_c : Effort de coupe (N)
 V_c : Vitesse de coupe (m/min)

$$F_c = k_c \times a_p \times f, \text{ donc avec les unités utilisées} \dots \dots \dots (III.2)$$

$$F_c = k_c \cdot a_p \cdot f \cdot V_c / 60 \dots \dots \dots (III.3)$$

a_p : Profondeur de passe (mm)

f : Avance par tour (mm/tr)

k_c : Pression spécifique de coupe ($N \text{ mm}^{-2}$) (fonction du matériau usiné).

L'analyse des résultats du tableau III.7 montre que les valeurs minimales de la puissance de coupe (P_c) sont obtenues avec le régime 1 pour les 2 matériaux testés par contre les valeurs maximales sont obtenues avec le régime 10 pour la céramique revêtue 6050 et le régime 7 pour la céramique non revêtue 650.

III.4.2 Analyse de la variance (ANOVA) et détermination des modèles mathématique

Les résultats présentés dans le tableau (III.8) sont analysés par le logiciel MINITAB15. En appliquant l'analyse de la variance (ANOVA), nous considérons un intervalle de confiance de 95% ($\alpha=0.05$). L'analyse de la variance (ANOVA) de la puissance de coupe (P_c) montre pour la céramique revêtue CC6050 (tableau III.8.a) que la profondeur de passe (a_p) et le facteur le plus significatif car sa contribution est de 82,16% suivi par la vitesse de coupe (V_c) avec une contribution 6,22% et en dernier lieu l'avance (f) avec contribution 2,03%, Le terme carré (f^2) a une contribution de 4,82%.

L'analyse de la variance (ANOVA) pour la céramique CC650 (tableau III.8.c), montre aussi que la profondeur de passe (a_p) est le facteur le plus significatif avec une contribution de 64,36% suivi par la vitesse de coupe (V_c) avec une contribution 24,45% et en dernier lieu l'avance (f) avec contribution 4,11%, le terme carré (f^2) a une contribution 1,929% suivi par l'interaction ($f \cdot a_p$) d'une valeur 0,67% et aussi (V_c^2) avec une contribution de 0,45%.

a) Céramique revêtue :

Source	DL	SomCar	séq	ajust	CM	ajust	F	P	contribution%
Vc	1	21654		41	41		0,03	0,863	6,22
f	1	7079		6122	6122		4,90	0,069	2,03
ap	1	285704		92	92		0,07	0,795	82,16
Vc*Vc	1	117		568	568		0,45	0,525	0,03
f*f	1	16771		15268	15268		12,23	0,013	4,82
ap*ap	1	108		104	104		0,08	0,783	0,031
Vc*f	1	2665		43	43		0,03	0,859	0,76
Vc*ap	1	37		9	9		0,01	0,935	0,01
f*ap	1	6080		6080	6080		4,87	0,069	1,74
Erreur	6	7491		7491	1249				
Total	15	347706							

S = 35,3350

R carré = 97,85 % R carré (ajust) = 94,61 %

Terme	Coeff	Coef	ErT	T	P
b) Constante	-398,8	405,9		-0,98	0,364
Vc	-0,853	4,719		-0,18	0,863
f	8325	3760		2,21	0,069
ap	-301	1111		-0,27	0,795
Vc*Vc	0,01092	0,01619		0,67	0,525
f*f	-45347	12968		-3,50	0,013
ap*ap	255,0	883,8		0,29	0,783
Vc*f	3,97	21,49		0,18	0,859
Vc*ap	0,443	5,176		0,09	0,935
f*ap	10667	4834		2,21	0,069

c) Céramique non revêtue :

Source	DL	SomCar séq	ajust	CM ajust	F	P	contribution%
Vc	1	54815	1171	1171	0,85	0,393	24,45
f	1	9233	1596	1596	1,15	0,324	4,11
ap	1	144303	978	978	0,71	0,433	64,36
Vc*Vc	1	1010	520	520	0,38	0,563	0,45
f*f	1	1504	2261	2261	1,63	0,248	0,67
ap*ap	1	427	433	433	0,31	0,596	0,19
Vc*f	1	1049	26	26	0,02	0,895	0,46
Vc*ap	1	986	1375	1375	0,99	0,358	0,43
f*ap	1	2551	2551	2551	1,84	0,224	1,13
Erreur	6	8309	8309	1385			
Total	15	224186					

S = 37,2125
R carré = 96,29 % R carré (ajust) = 90,73 %

d)

Terme	Coeff	Coef ErT	T	P
Constante	-15,6	427,4	-0,04	0,972
Vc	4,570	4,970	0,92	0,393
f	-4250	3959	-1,07	0,324
ap	-983	1170	-0,84	0,433
Vc*Vc	-0,01045	0,01705	-0,61	0,563
f*f	17452	13657	1,28	0,248
ap*ap	520,6	930,7	0,56	0,596
Vc*f	-3,11	22,63	-0,14	0,895
Vc*ap	5,431	5,451	1,00	0,358
f*ap	6909	5091	1,36	0,224

Tableau III.8 : Résultats de l'analyse de variance pour la puissance de coupe (Pc).

Les coefficients des modèles mathématiques de la Puissance de coupe (Pc) pour les 2 céramiques testés sont mentionnés sur les tableau (III.8.b,d).

Alors les modèle de la Puissance de coupe (Pc) avec tout les facteurs principaux et leurs interactions, peut s'écrire comme suit:

Modèle complet : (plaquette revêtue CC6050)

$$Pc = -398.8 - 0.853Vc + 8325f - 301ap + 0.0109Vc^2 - 45347f^2 + 255ap^2 + 3.97Vc*f + 0.443Vc*ap + 10667f*ap$$

Coefficient de détermination $R^2 = 97,85\%$

Modèle complet : (plaquette non revêtue CC650)

$$Pc = -15.6 + 4.570Vc - 4250f - 983ap - 0.01045Vc^2 + 17452f^2 + 520.6ap^2 - 3.11Vc*f + 5.431Vc*ap + 6909F*ap$$

Coefficient de détermination $R^2 = 96,29\%$

III.4.3 Diagrammes de surfaces 3 D et Graphique de Contour

La réponse de Puissance de coupe (P_c) en fonction des facteurs d'expérimentation est représentée sur les diagrammes (fig. III.13). Cette figure montre que la pente de la Profondeur de passe est supérieur par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur la Puissance de coupe (P_c) suivi par la vitesse de coupe (V_c) et en dernier lieu peu l'avance (f).

D'autre part les graphes de contour (figure III.14) permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables. Le diagramme montre la relation entre une valeur de réponse (dans notre cas P_c) et trois facteurs à partir d'un modèle d'équation. Les points ayant la même réponse sont joints pour générer les lignes de contours des réponses constantes.

III.4.4 Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction

La (figure III.15) montre les effets moyens des paramètres de coupe sur la Puissance de coupe (P_c). On remarque que la profondeur de passe (a_p) est le facteur le plus influent sur la Puissance de coupe (P_c) car il a la plus grande pente. La vitesse de coupe (V_c) affecte aussi la Puissance de coupe (P_c), l'avance affecte peu la Puissance de coupe (P_c).

La (figure III.16) montre le diagramme des interactions des paramètres de coupe sur la Puissance de coupe (P_c). Cette figure montre que nous avons des interactions entre la vitesse de coupe (V_c) et l'avance (f) et entre la vitesse de coupe (V_c) et la profondeur de passe (a_p).

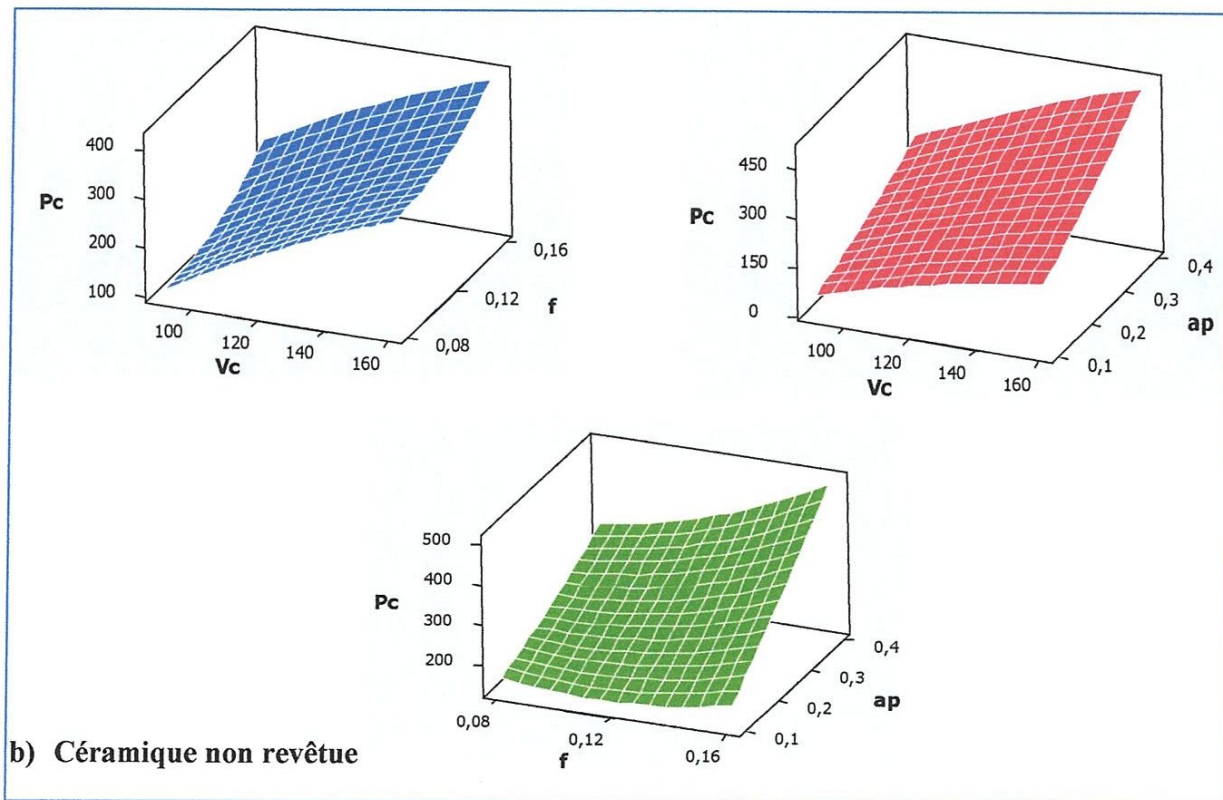
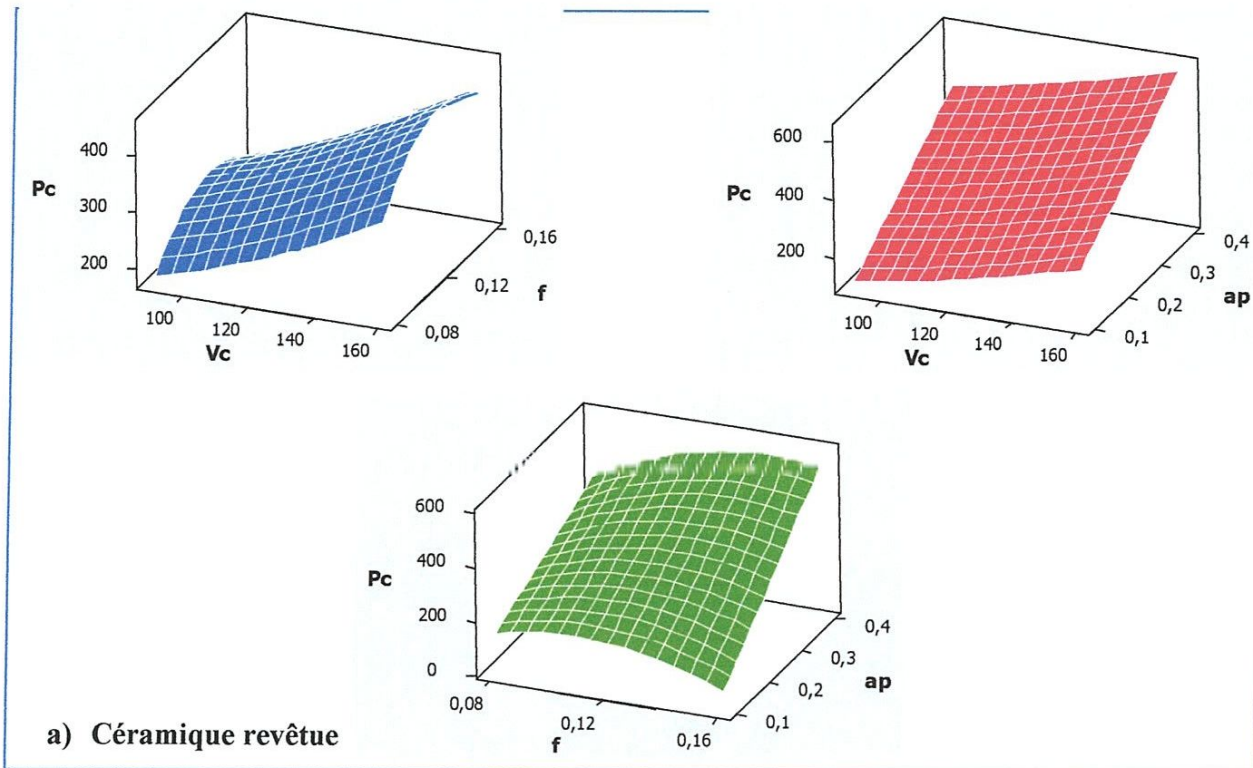


Figure III.13 Diagrammes de surfaces de P_c en fonction de (V_c , f , ap).

Chapitre III Application de la (RMS) pour la prédiction des modèles mathématiques

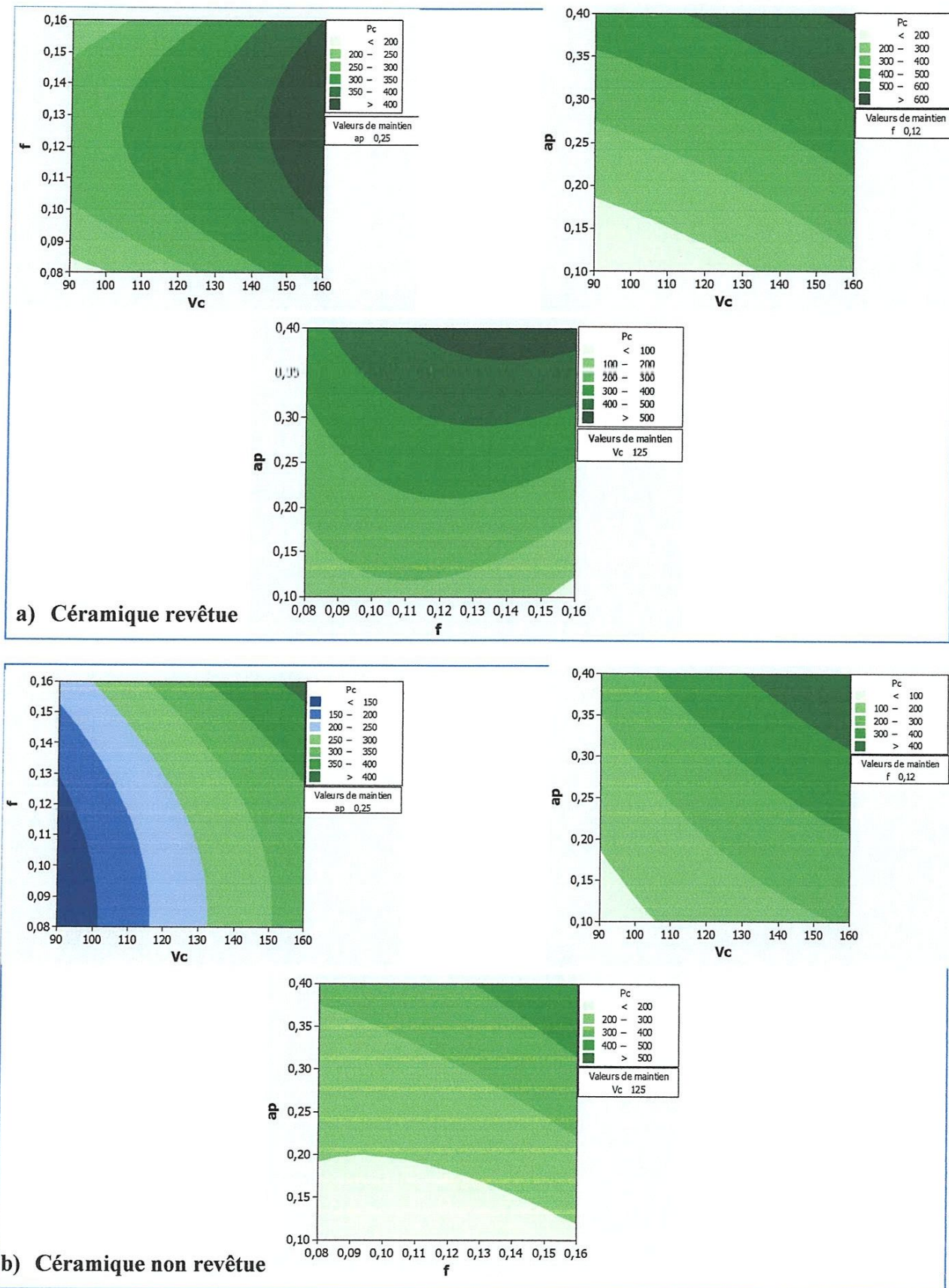
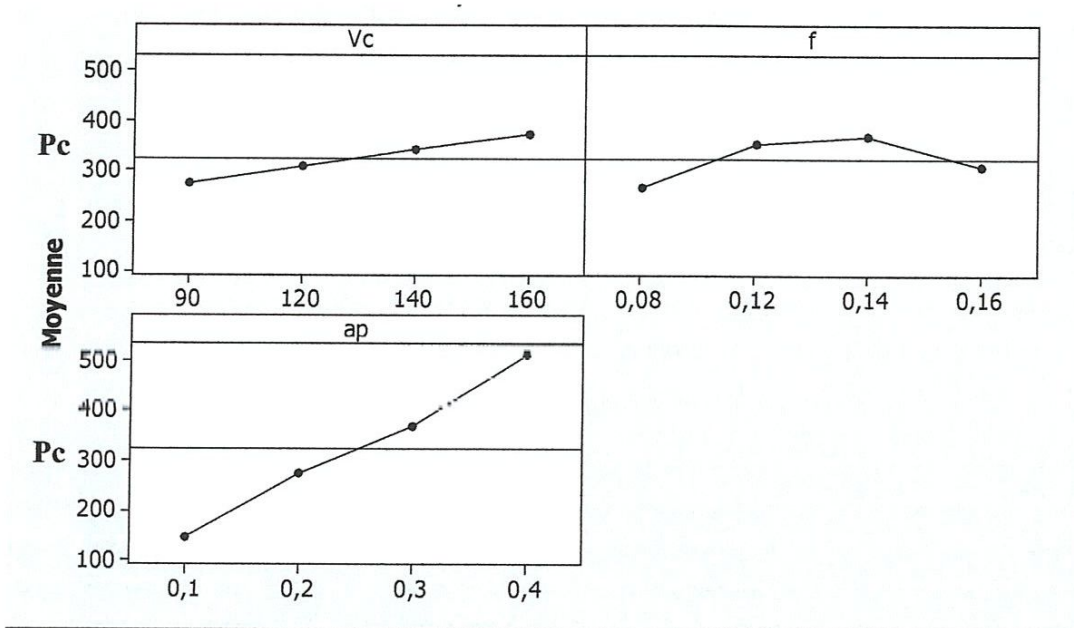


Figure III.14 Graphique de Contour de Pc en fonction de Vc ,ap,f

a) Céramique revêtue :



b) Céramique non revêtue :

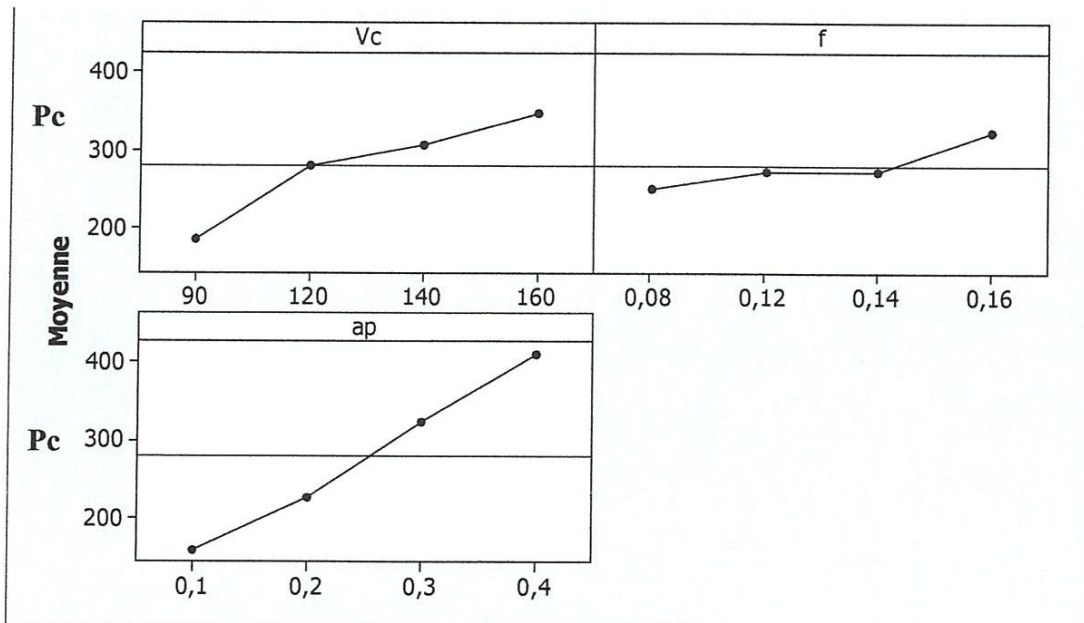
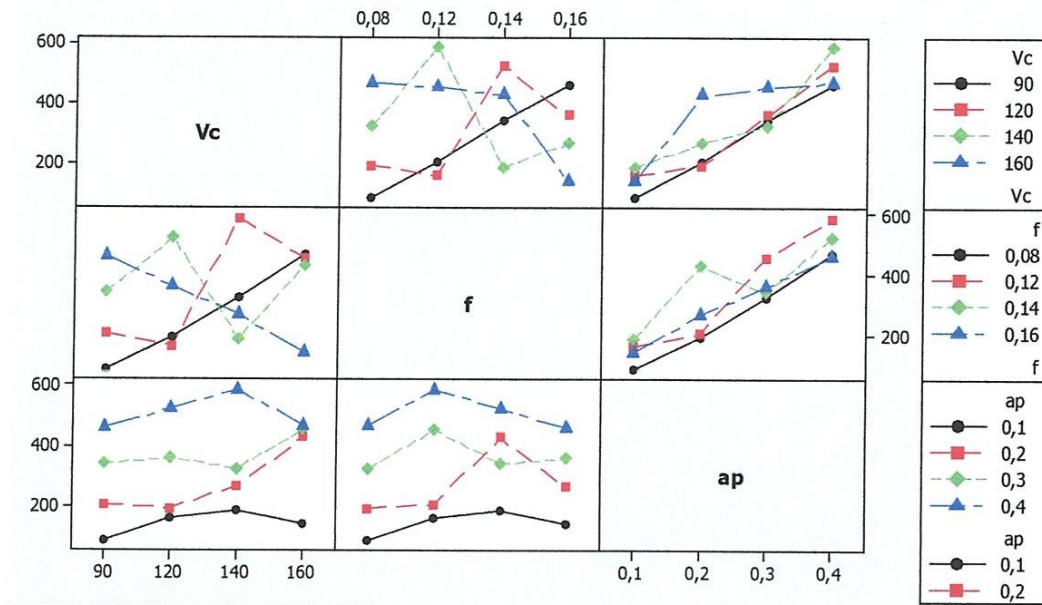


Figure III.15 Graphique des effets principaux pour Pc.

a) Céramique revêtue :



b) Céramique non revêtue :

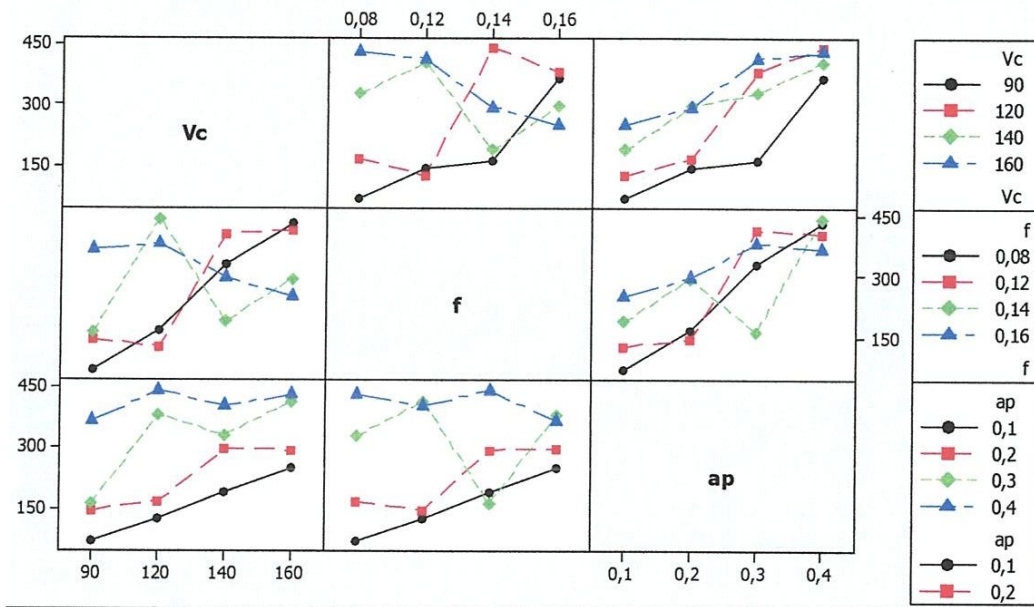


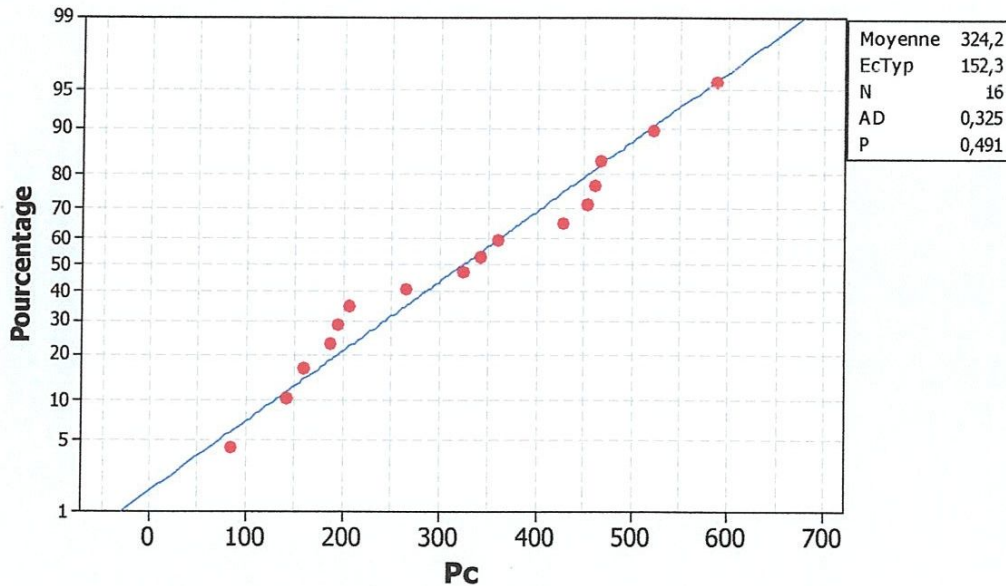
Figure III.16 : Diagramme d'interaction pour Pc.

III.4.5 Test de normalité de la distribution des résidus pour (Pc)

Pour valider le modèle de la Puissance de coupe (P_c), on a étudié la distribution des résidus (différence entre la valeur expérimentale de (P_c) et celle obtenue à partir du modèle de prédiction), cette distribution doit suivre la loi normale.

Le test de normalité de cette distribution (Test de normalité d'Anderson Darling) valide cette hypothèse (P-Value < 0,491) pour céramique revêtue et (P-Value < 0,261) pour céramique non revêtue (figure III.17).

a) Céramique revêtue :



b) Céramique non revêtue :

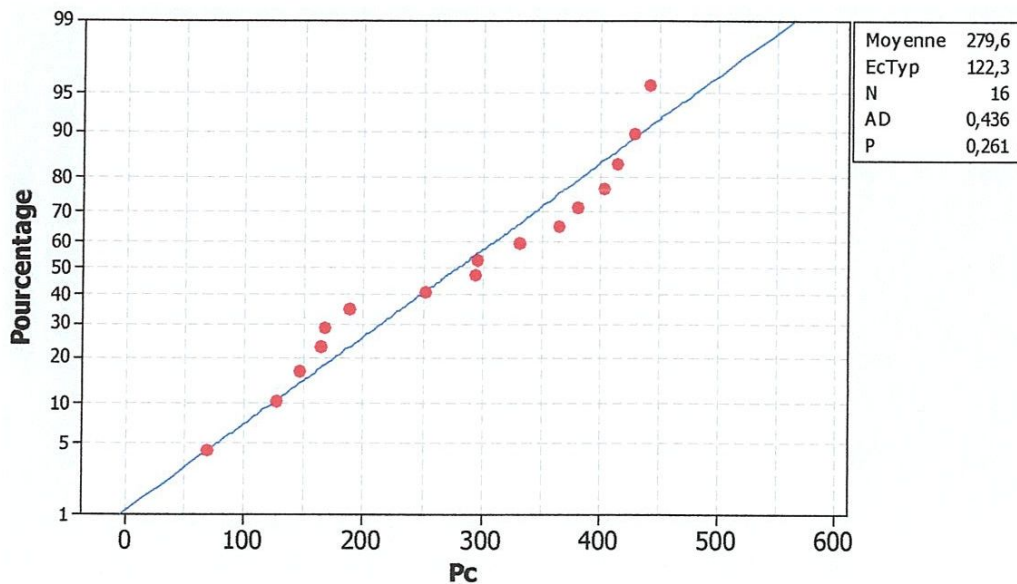


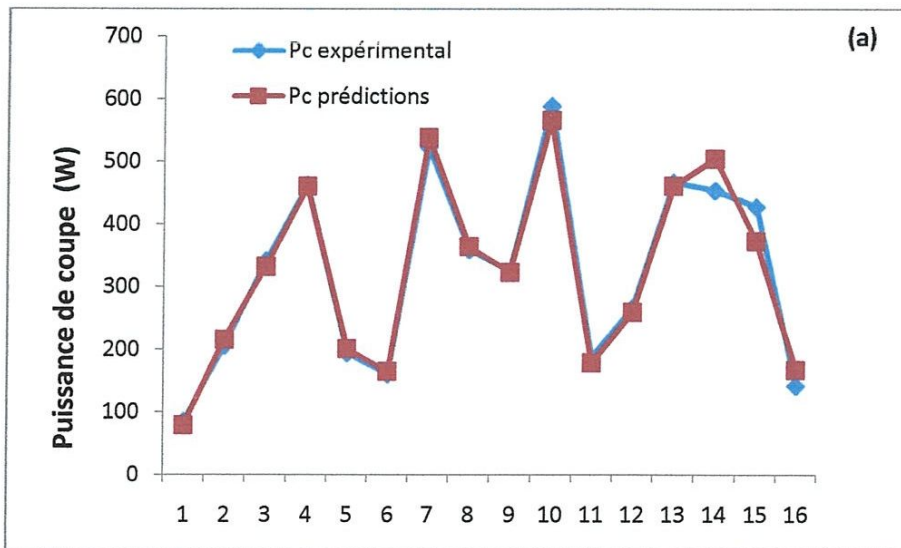
Figure III.17 : Test de normalité de la distribution des résidus pour P_c .

III.4.6 Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites

La (Figure III.18) montre une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites de la Puissance de coupe (P_c) pour les 16 essais réalisés. Ces droites permettent de comparer les valeurs prédites aux valeurs expérimentales dans le but d'évaluer l'ajustement du modèle. Les valeurs x représentent les numéros des essais (16 essais), tandis que les valeurs y correspondent les valeurs prédites et expérimentales.

L'analyse de la (figure III.18) montre que les deux courbes sont en bonne corrélation.

a) Céramique revêtue :



b) Céramique non revêtue :

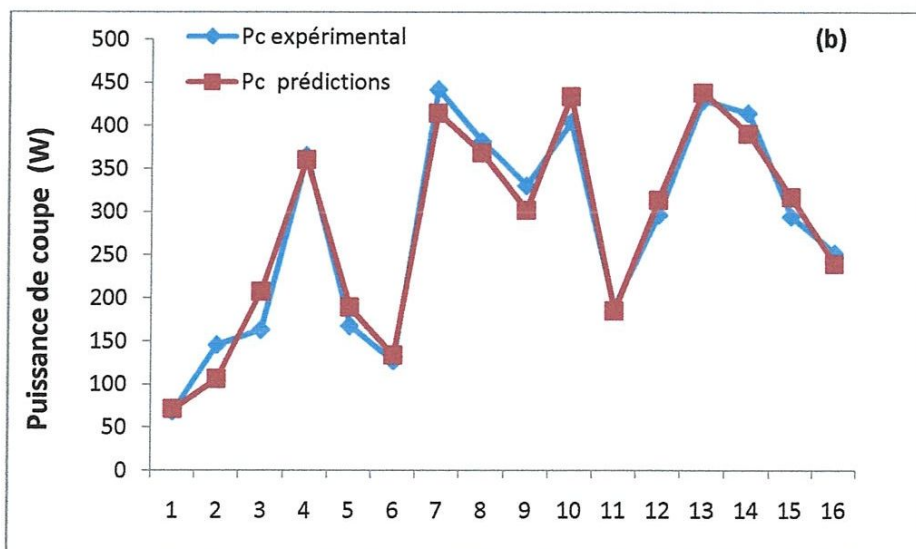


Figure III.18 : Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de (P_c) pour les deux types des plaquettes.

La formule pour déterminer le pourcentage d'erreur est :

$$\left| \text{Valeur Théorique} - \text{Valeur Expérimentale} \right| \times 100 / \text{Valeur Expérimentale}$$

Le tableau (III.9) montre le pourcentage d'erreur de chaque essai entre la valeur mesuré et prédite.

N° ESSA	Pc (W) CC6050 Mesure	Pc (W) CC6050 prédites	Erreur % Pc CC6050	Pc (W) CC650 Mesure	Pc (W) CC650 Prédites	Erreur % Pc CC650
1	84,88	78,976	6,95%	68,79	71,389	3,77%
2	205,86	215,676	4,76%	146,02	106,522	27,04%
3	341,19	332,132	2,65%	163,26	207,619	27,17%
4	462,51	460,076	0,52%	365,28	360,726	1,24%
5	194,32	201,202	3,54%	167,94	189,247	12,87%
6	160,18	164,981	2,99%	127,2	133,839	5,21%
7	522,1	538,363	3,11%	442,1	414,745	6,18%
8	358,72	363,939	1,45%	381,74	368,434	3,48%
9	324,98	323,199	0,54%	330,56	302,087	8,61%
10	588,1	565,589	3,82%	404,27	434,254	7,41%
11	187,25	178,260	4,80%	188,72	185,184	1,87%
12	266,04	259,524	2,44%	296,59	313,874	5,82%
13	467,12	460,802	1,35%	429,68	438,706	2,10%
14	453,68	504,299	11,15%	414,93	391,048	5,75%
15	427,84	372,659	12,89%	294,77	316,979	7,53%
16	142,08	167,173	17,66%	252,45	239,647	5,071%

Tableau III.9 : Résultats des erreurs entres les valeurs mesurées et prédites des la Puissance de coupe (Pc).

L'analyse du tableau (III.9), montre que le % d'erreur minimales sont obtenues avec le régime 4 pour les deux testées.

Conclusion générale

L'étude expérimentale du comportement des matériaux de coupe lors du tournage de l'acier dur (Z200Cr12) nous a permis d'étudier l'usinabilité de cet acier en se basant sur les critères suivants : efforts de coupe, rugosité de la surface usinée et puissance de coupe en utilisant deux type de plaquette de céramique mixte (CC6050,CC650) .

Dans le premier chapitre, nous avons présenté une étude bibliographique sur le tournage dur, suivi par une présentation des phénomènes régissant la coupe des métaux (les efforts de coupe, l'intégrité de surface, l'usure des outils). Le troisième point concerne la méthodologie de surface de réponse (RSM). La fin de cette partie débouche sur quelques résultats de travaux de recherche sur l'usinage dur.

Dans le deuxième chapitre nous avons défini une méthodologie de travail qui repose sur la planification des expériences. Nous avons présenté les conditions de coupe ainsi que les équipements et le matériel de mesure utilisés.

Dans le chapitre troisième, nous avons fait une analyse de variance des résultats expérimentaux pour déterminer les facteurs qui ont un impact significatif. Ensuite nous avons proposé des modèles mathématiques en se basant sur la méthodologie de la surface de réponse (RSM) et calculer l'erreur de chaque paramètres de sortie pour les 16 essais réalisés.

Le travail d'expérimentation et de modélisation réalisé dans cette mémoire débouche sur les conclusions suivantes :

- 1 L'étude des efforts de coupe réalisée dans ce travail permet de mieux comprendre ce phénomène en tournage dur et cela dans le but d'avoir une meilleure stabilité du système usinant. Les résultats des efforts et de la rugosité et la puissance de coupe en fonction des conditions de coupe permettent de déterminer le domaine de validité de l'outil coupant face à l'acier étudié (Z200Cr12). Cette démarche appelée (couple - outil – matière), permet de définir un domaine de fonctionnement correct de l'outil.
- 2 Le traitement statistique des résultats des essais ont abouti à la détermination des modèles mathématiques des efforts de coupe, de la rugosité et de la puissance de coupe. L'analyse de la variance (ANOVA) nous a permis de déterminer les facteurs qui ont un impact significatif sur les différents phénomènes étudiés.
- 3 L'analyse ANOVA de l'effort de coupe (F_t) pour la céramique revêtue CC6050 montrent que la profondeur de passe (a_p) est le paramètre le plus influent avec une contribution de 81,370% suivi par l'avance (f) avec une contribution 7,517% et en dernier de la vitesse de coupe (V_c) avec contribution 4,520%. L'analyse de la variance (ANOVA) pour la céramique non revêtue CC650, montre aussi que la profondeur de passe (a_p) est le facteur le plus significatif avec une contribution de 77,581% suivi par l'avance (f) avec une contribution 11,787% et en dernier lieu la vitesse de coupe (V_c) avec contribution 0,101%.

- 4 L'analyse de la variance (ANOVA) de la rugosité (Ra) montre pour la céramique revêtue CC6050 que l'avance (f) et le facteur le plus significatif car sa contribution est de 86,134% suivi par la vitesse de coupe (Vc) avec une contribution 4,952% et en dernier lieu la profondeur de passe (ap) avec contribution presque inexistante 0,0733%. L'analyse de la variance (ANOVA) pour la céramique non revêtue CC650, montre aussi que l'avance (f) et le facteur le plus significatif avec une contribution de 62,268% suivi par la vitesse de coupe (Vc) avec une contribution de 6,974% et en dernier lieu la profondeur de passe (ap) de 3,787%.
- 5 L'analyse de la variance (ANOVA) de la puissance de coupe (Pc) montre pour la céramique revêtue CC6050 que la profondeur de passe (ap) et le facteur le plus significatif car sa contribution est de 82,16% suivi par la vitesse de coupe (Vc) avec une contribution 6,22% et en dernier lieu l'avance (f) avec contribution 2,03%. L'analyse de la variance (ANOVA) pour la céramique non revêtue CC650, montre aussi que la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus significatif avec une contribution de 64,36% suivi par la vitesse de coupe (Vc) avec une contribution 24,45% et en dernier lieu l'avance (f) avec contribution 4,11%.
- 6 Les modèles développés peuvent être utilisés facilement dans les machines automatisées ou robotiques sous forme de programme pour la qualité désirée.

PERSPECTIVES

Ce travail ouvre de nouvelles perspectives de recherche qui sont :

- 1 Continuer à étudier le comportement de nouveaux matériaux de coupe face à l'acier dur Z200Cr12.
- 2 Déterminer les modèles mathématiques en fonction d'autres variables tels que : la géométrie de la partie active de l'outil (rayon du bec de l'outil et l'angle d'attaque).
- 3 Etudes des les vibrations de l'outil et son influence sur la rugosité de surface en tournage dur.
- 4 Faire une analyse de Taguchi pour les résultats trouvés.
- 5 Faire une étude sur l'optimisation du régime de coupe.

NOMENCLATURE

ANOVA	Analyse de la variance.
a_p	Profondeur de passe (mm).
f	Avance par tour (mm/tr).
Frés	Effort de coupe résultant (N).
F_x (F_a)	Effort de coupe axial (N).
F_y (F_r)	Effort de coupe radial (N).
F_z (F_t)	Effort de coupe tangentiel (N).
P_c	Puissance de coupe (w).
P	Puissance absorbée par la machine (w).
R_a	Rugosité moyenne arithmétique (μm).
RSM	Méthodologie de la surface de réponse.
R_t	Rugosité totale (μm).
R_z	Profondeur moyenne de la rugosité (μm).
VB	Hauteur de l'usure en dépouille (mm).
V_c	Vitesse de coupe (m/min).
α	Angle de dépouille principal (degré).
γ	Angle d'attaque (degré).
χ	Angle de direction principal (degré).

Références bibliographiques

- [1] **Becir. K.** Étude de l'usinage des aciers trempés avec des outils en nitrure de bore cubique (CBN).mémoire de magister Annaba 1992, pp 72-73.
- [2] **Poulachon G.** Aspects phénoménologiques, mécaniques et métallurgiques en tournage. Thèse de doctorat, ENSAM de Cluny, 1999, 165 p.
- [3] **Hug J. L.** Tournage des métaux durs, Machine de production, 1995, N° 110, pp 17-19.
- [4] **Windels F.** Le tournage dur, un concurrent pour la rectification cylindrique, Techniwatch. 2003, pp 1-3.
- [5] **Barlier C. et Girardin L.** Mémothech- matériaux et usinage, Editions Casteilla, , 1992. pp 137-140.
- [6] **KÖning W.** wand .turning bearing steel with ambiante and ceramic. Industriel Diumund. Review. 3, 1987, pp.117-120.
- [7] **Dapsalmon P.,** Machining of hardened ferrous materials, GE Superabrasif France 1994.
- [8] **Meyer D.** Plaquette P-CBN haute performance pour les aciers durs, les fontes grises perlitiques et les fonts trempées. secomax, 1994.
- [9] **Weil R.** Techniques d'usinage, Dunod. Paris, 1971.
- [10] **Calderon.J.,** .Caractérisation dynamique du système pièce outil machine usinage des pièces minces. Thèse de doctorat, INSA Lyon, 1998, p 44-45.
- [11] **Bedrin.C; Roumesy.B.,** Usinage par outil coupant Fascicule 1-2, INSA Lyon 1989.
- [12] **Enache S.** La qualité des surfaces usinées. **Dunod**, Paris, 1972.
- [13] **Dawson.T.G.** Machining hardened steel with polycrystalline cubic boron nitride cutting tools. Thèse de doctorat, Gorgia institute of technology 2002.
- [14] **Laurent. D,** Métrologie d'étude de la coupe. Liaison entre Couple Outil Matière et système Pièce Outil Machine. Thèse de doctorat de L'INSA de Lyon 2003. pp 105-106,
- [15] **Loladze T.N.,** of the theory of diffusion wear, Annals of the CIRP,30(1),pp71-75,1981.
- [16] **Dietrich.Retcol.** Précis de méthode d'usinage. 5^{ème} édition pages (109) Nathahn 1985.
- [17] **D.I. Lalwani., N.K. Mehta., P.K. Jain.** Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel . 2008 , vol. 206, N°1-3, pp. 167-179.
- [18] **Dilbag Singh . P. Venkateswara Rao .** A surface roughness prediction model for hard turning process . 2007, vol. 32, N° 11-12, pp. 1115-1124.
- [19] **P Thangavel., V Selladurai., and R Shanmugam .** Application of response surface methodology for predicting flank wear in turning operation. 2006, vol. 220, N° 6, pp. 997-1003.
- [20] **K. Palanikumara., F.Matab.,J. Paulo Davimc.** Analysis of surface roughness parameters in turning of FRP tubes by PCD tool . 2008, vol. 204, N° 1-3, pp. 469-474.
- [21] **K.V.B.S. Kalyan Kumar., S.K. Choudhury .** Investigation of tool wear and cutting force in cryogenic machining using design of experiments. 2008, vol. 203, N° 1-3, pp. 95-101.
- [22] **Andonov. I, Bekech. Y.,** Analyse et systhese des processus technologiques en construction mécanique, technica, sofia 1984.
- [23] **Roumesy B.,** Determination des lois d'usure, Machines- outils, N° 301,1975.
