

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur

Et de la recherche scientifique



UNIVERSITE Abderrahmane MIRA BEJAIA

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Fabrication Mécanique et Productique

Par :

SENDID Houssam

ZOUGGAR Anis

Thème

Modélisation de la force de coupe par le logiciel Minitab, cas de la coupe orthogonale de l'acier 42CrMo4

Soutenu le 27/09/2020 devant le jury composé de :

Mr. M. HADJOU

Président

Mr. A. BELAMRI

Rapporteur

Mr. N. BENSALD

Examineur

Année Universitaire 2019-2020

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier en premier lieu ALLAH, le tout puissant, de nous avoir donné autant de courage, de patience et de volonté pour atteindre ce but.

La première personne que Nous tenons à remercier est notre encadreur Monsieur BELAMRI ABDELATIF, pour sa confiance et ses conseils qui ont constitué un apport considérable dans la réalisation de ce travail.

Nous remercions également les examinateurs de l'honneur qu'ils nous font en acceptant de lire notre travail, de le juger et de débattre son contenu.

Notre reconnaissance à tous les enseignants du département de génie mécanique qui ont contribué à notre formation.

Dédicaces

J'ai le grand honneur de dédier

Ce modeste travail

A mes parents

A mon frère et mes sœurs

A tous mes amis

A toute la famille SENDID

A tous ceux qui me sont chers et proches

A toute personne m'ayant encouragé ou aidé au long de mes études.

Houssam SENDID

Dédicaces

J'ai le grand honneur de dédier

Ce modeste travail

A mes parents

A mon frère

A tous mes amis

A toute la famille ZOUGGAR

A tous ceux qui me sont chers et proches

A toute personne m'ayant encouragé ou aidé au long de mes études

Anis ZOUGGAR

Table de matière

Remerciements	I
Dédicaces	II
Table de matière	IV
Table des figures	VII
Liste des tableaux	iIX
Nomenclature	X
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur l'usinage	
I.1- Introduction.....	2
I.2- Généralité sur l'usinage par enlèvement de matière.....	2
I.2.1- Définition de la coupe des métaux	2
I.2.2- Opérations de tournage.....	3
I.2.3- Classement des types des copeaux	4
I.3- Généralité sur les outils de coupes	4
I.3.1- Matériaux des outils de coupe	4
I.3.2- Eléments de l'outil	8
I.3.3- Différents types des outils	9
I.3.4- Usure des outils de coupe.....	10
I.4- Conditions de coupe.	11
I.4.1- Vitesse de coupe V_c	11
I.4.2- Vitesse d'avance V_f et avance par tour f	12
I.4.3- Profondeur de passe a	13
I.5- Effort de coupe.....	13
I.5.1- Mesure des efforts de coupe.....	13
I.6- Influence des conditions de coupe sur les efforts de coupe	15
I.6.1- Influence de la vitesse de coupe V_c	15
I.6.2- Influence de la profondeur de passe a	16
I.6.3- Influence de l'avance par tour f	17
I.7- Optimisation des conditions de coupe.....	17
I.7.1- Définition	17
I.7.2- Objectif.....	17
I.7.3- Problème d'optimisation	18
I.7.4- Critères d'optimisation.....	19

I.7.5- Les différentes Méthodes d'optimisations	20
I.8- Conclusion	21
Chapitre II :Fonctionnement et ajustement du logiciel Minitab	
II.1-Introduction	22
II.2-Principe de fonctionnement	22
II.2.1- Interface utilisateur de Minitab	22
II.2.2- Projets et feuilles de travail	23
II.2.3- Ouvrir et lire une feuille de travail	24
II.2.4- Représentation graphique des données	24
II.3-Ajustement du logiciel Minitab	28
II.3.1- Exécution d'une Analyse de variance ANOVA	28
II.3.2- Analyses de régression	29
II.3.3- Conception d'un plan d'expériences	29
II.3.4- Enregistrement d'un projet Minitab.....	35
II.4-Conclusion	36
Chapitre III : Création et validation d'une étude sous Minitab	
III.1- Introduction	37
III.2- Prédiction et optimisation des forces d'usinage avec la méthode d'oxley's	37
III.2.1- La partie expérimentale	37
III.2.2- Présentation du model d'Oxley.....	38
III.2.3- Approche RSM (Méthodologie de surface de réponse)	38
III.2.4- Résultats expérimentaux	40
III.2.5- Optimisation en utilisant l'approche RSM	41
III.3- Etude comparative.....	42
III.4- Application sur un acier 100Cr6	45
III.4.1- Environnement expérimental	45
III.4.2- Résultats expérimentaux	46
III.4.3- Etude théorique de l'expérience	48
III.5- Conclusion.....	48
Chapitre IV : Modélisation de la force de coupe en coupe orthogonale	
IV.1- Introduction	51
IV.2- Partie expérimentale.....	51
IV.3- Etude théorique.....	53
IV.3.1- Analyse de variance	54
IV.3.2- Analyse de régression.....	54

IV.4- Etude comparative.....	57
IV.4.1- Influence de V_c et f sur F_c	59
IV.5- Rapport de prévision et d'optimisation.....	51
IV.6- Conclusion	62
Conclusion générale	63
Bibliographie.....	64
Résumé/Abstract	

Table des figures

Figure I-1 Opération de chariotage en tournage [1].....	2
Figure I-2 Morphologie des copeaux en fonction de la vitesse de coupe V_c (copeau obtenus lors d'essais de tournage avec plaquette céramique Al_2O_3). Avance par tour : 0.2 (mm/tr) [1]....	4
Figure I-3 Disposition des matériaux d'outil selon la ténacité et la dureté [3].	5
Figure I-4 Les familles de céramique [3]	7
Figure I-5 Eléments de l'outil [6].....	8
Figure I-6 Angles du taillant (outil en main) [6].....	9
Figure I-7 Angle du taillant (outil en travail) [6].	9
Figure I-8 Différents types des outils.....	10
Figure I-9 Formes d'usure sur les outils de coupe [3].	11
Figure I-10 Le choix des conditions de coupe [2].....	11
Figure I-11 Vitesse de coupe V_c en tournage.	12
Figure I-12 Vitesse d'avance V_f en tournage.	12
Figure I-13 Présentation des composantes des efforts de coupe [2].	13
Figure I-14 Capteur d'efforts à jauges d'extensomètre [4].	14
Figure I-15 Schéma de principe de fonctionnement d'un capteur piézoélectrique [4].....	15
Figure I-16 Evolution des efforts de coupe en fonction de vitesse de coupe [5].	15
Figure I-17 Évolution des efforts en fonction la profondeur de passe [5].	16
Figure I-18 Évolution des efforts de coupe en fonction l'avance [5].	17
Figure I-19 Schématisation d'un processus de coupe [6].	18
Figure I-20 Différentes Méthode d'optimisations [2].	21
Figure II-1 Interface du logiciel Minitab 18.	23
Figure II-2 Exemple d'une feuille de travail.....	24
Figure II-3 Création d'un panneau d'histogrammes.	25
Figure II-4 Histogrammes avec ajustement.	26
Figure II-5 Création d'un nuage de points avec groupes.....	27
Figure II-6 Le rapport récapitulatif en nuage de points.	27
Figure II-7 Analyse de variance contrôlée.....	28
Figure II-8 Procédures de comparaison des variances.....	28
Figure II-9 Interprétation graphique des résultats.....	29
Figure II-10 Analyse de régression.....	29
Figure II-11 Création d'un plan factoriel.....	30
Figure II-12 Affichage des plans disponibles.	31

Figure II-13 Sélection d'un plan.....	31
Figure II-14 Saisie des données dans la feuille de travail.....	32
Figure II-15 Ajustement d'un modèle.	32
Figure II-16 Vérification des termes sélectionnés.	33
Figure II-17 Sélection des diagrammes des effets.	33
Figure II-18 Interprétation de la droite de Henry.....	34
Figure II-19 Interprétation du diagramme de Pareto.	34
Figure II-20 Création des diagrammes factoriels.....	35
Figure II-21 Enregistrement d'un projet Minitab	35
Figure III-1 Vue photographique du montage expérimental [8].	38
Figure III-2 Organigramme de la stratégie mise en œuvre pour RSM [8].	40
Figure III-3 Effet de la vitesse de coupe et de la vitesse d'avance sur la force de coupe, la rugosité de surface et l'usure en dépouille [8].	40
Figure III-4 Evolution de F_c en fonction de f avec $V_c= 30$ m/min	44
Figure III-5 Evolution de F_c en fonction de f avec $V_c= 45$ m/min	44
Figure III-6 Evolution de F_c en fonction de f avec $V_c= 60$ m/min	44
Figure III-7 Evolution de F_c en fonction de f avec $V_c= 75$ m/min	44
Figure III-8 Evolution de F_c en fonction de f avec $V_c= 105$ m/min	45
Figure III-9 Evolution de F_c en fonction de f avec $V_c= 90$ m/min	45
Figure III-10 Machine utilisée (Tour SOMAB 500) [2].....	46
Figure III-11 Plaquette utilisée (CNMG M5) [2].	46
Figure III-12 comparaison expérimentale /théorique des efforts de coupe F_c	48
Figure IV-1 Pièce usinée.....	49
Figure IV-2 Plaquette en carbure non revêtue	49
Figure IV-3 Tour parallèle conventionnelle type SN 50 du hall de technologie.	50
Figure IV-4 Relation entre les variables V_c et f	53
Figure IV-5 Pourcentage de variation par modèle.	53
Figure IV-6 Courbes de l'évolution des forces de coupe à 0.08 (mm/tr) de l'avance par tour....	56
Figure IV-7 Courbes de l'évolution des forces de coupe à 0.12 (mm/tr) de l'avance par tour....	56
Figure IV-8 Courbes de l'évolution des forces de coupe à 0.20 (mm/tr) de l'avance par tour...56	56
Figure IV-9 Evolution des efforts de coupe en fonction V_c et f à coté mandrin.	57
Figure IV-10 Evolution des efforts de coupe en fonction V_c et f au milieu.	58
Figure IV-11 Evolution des efforts de coupe en fonction V_c et f du côté de la pointe.....	58
Figure IV-12 Paramètres et sensibilité de la solution optimale maximale.....	60
Figure IV-13 Paramètres et sensibilité de la solution optimale minimale.	60

Liste des tableaux

Tableau III-1 Composition chimique du matériau utilisé [8].....	37
Tableau III-2 Conditions d'essai pour la validation expérimentale [8].	38
Tableau III-3 Niveaux d'expériences et sortie des paramètres de coupe prévus par le modèle d'Oxley [8].....	39
Tableau III-4 Forces de coupes prévues à partir du modèle d'Oxley [8].....	41
Tableau III-5 Résumé de l'analyse de régression [8].....	42
Tableau III-6 Analyse de la variance pour la force de coupe [8].	42
Tableau III-7 Tableau comparatif des efforts de coupes trouvés pas le modèle d'Oxley et celles prédites par Minitab.	43
Tableau III-8 Résumé de nouvelle analyse de régression	44
Tableau III-9 Résultats expérimentaux [2].....	47
Tableau IV-1 Résultats expérimentales.	51
Tableau IV-2 Analyse de la variance pour Fc.	52
Tableau IV-3 Forces de coupes théoriques prédites par Minitab.	54
Tableau IV-4 Récapitulatif des forces de coupe.	55
Tableau IV-5 Principales solutions alternatives dans l'objectif de maximiser Fc.....	59
Tableau IV-6 Principales solutions alternatives dans l'objectif de minimiser Fc.	59
Tableau IV-7 Solution optimale.....	59

NOMENCLATURE

Symboles	Définition	Unité (SI)
M_f	: Mouvement d'avance	-
M_c	: Mouvement de coupe	-
V_f	: Vitesse d'avance	mm.min ⁻¹
V_c	: Vitesse de coupe	m. min ⁻¹
f	: Avance par tour	mm.tr ⁻¹
N	: Vitesse de rotation	tr.min ⁻¹
F_c	: effort tangentiel de coupe	N
F_f	: effort axial	N
F_a	: effort radial	N
F_t	: Effort total	N
h	: Epaisseur du coupeau	mm
a	: Profondeur de passe	mm
R_a	: Rugosité de surface	μm
VB	: Usure de l'outil	-
HB	: Dureté de la pièce de la pièce usinée	-
$C.I$: Intervalle de confiance	-
T	: Température actuel	°C
T_p	: Température d'interface	°C
T_w	: Température initial de la pièce	°C
T_m	: Température de fusion de la pièce	°C
t_m	: Temps machine	s
t_{cs}	: Temps changement de l'outil	s
t_R	: Temps de retour rapide de l'outil	s
t_h	: Temps de montage et démontage de pièce	s
Re	: Limite d'élasticité	MPa
B	: Module de durcissement	MPa
C	: Coefficient de dépendance du taux de déformation	-
D	: Diamètre de coupe	mm
J	: Rigidité du système de montage	-
L	: Longueur de coupe	mm
M	: Distribution normal standard	-

P	: Puissance absorbé par la coupe	j.s^{-1}
s	: Déviation standard de chaque facteur	-
Y_{opt}	: Valeur optimale du facteur de sortie	-
Z	: Diamètre initiale de la pièce	mm

Symboles grecs

α	: Angle de dépouille	rad
β	: Angle de taillant	rad
γ	: Angle de coupe	rad
ω	: Vitesse angulaire	rad.min^{-1}
δ	: Contrainte de déformation	MPa

Abréviations

CBN	: Nitrure de bore cubique
ARS	: Acier rapide supérieur
P.C	: Processus de coupe
C.E.U	: Cellule élémentaire d'usinage
RSM	: Reponse surface methodology
ANOVA	: Analyse de variance

Introduction générale

Introduction Générale

Les différentes techniques de transformation de matière (fabrication) est un sujet important dans le domaine industriel.

L'usinage par enlèvement de copeaux désigne l'ensemble des techniques qui permettent de produire des formes complexes et très précises à l'aide d'un outil tranchant. Cette technique ancienne est souvent qualifiée de coupe onéreuse dans la mesure où la mise en forme de la pièce entraîne une transformation de matière noble en déchets (copeaux).

Cependant, elle reste une technique de fabrication importante et répandue dans la mise en forme des métaux par la coupe.

Le tournage est l'un des procédés d'usinage les plus utilisés, ses résultats dépendent initialement du choix des conditions de coupe (vitesse de coupe, avance par tour ou vitesse d'avance et la profondeur de passe),

Le procédé de tournage, objet de notre étude, représente à lui seul 33 % du domaine de l'usinage par enlèvement de copeau [1].

En réalité, le problème d'usinage est souvent présenté à l'aide d'un critère multiple. Les paramètres inclus dans ce critère sont dans la plus part des cas contradictoire ce qui nous conduit à un recours à l'optimisation qui demande beaucoup d'essais.

Une approche consiste à modéliser la coupe des métaux, en choisissant un paramètre à étudier et trouver une équation qui le relie à d'autre paramètre régissant la coupe.

Dans notre cas nous appuyions une étude expérimentale de nos collègues Mensouri et Khima qui ont mis en œuvre une série d'essais d'usinage de chariotage orthogonale et ayant déduit les efforts de coupe à partir de l'étude des épaisseurs du copeau.

Notre part de travail est d'injecter ces résultats dans le logiciel Minitab, basé sur l'étude de la variance afin de trouver la corrélation entre l'effort de coupe(F_c) et la vitesse coupe (V_c) et la vitesse d'avance (f) ($F_c = f_{ct}(V_c, f)$)

Dans ce but, notre document est articulé sur quatre chapitres :

- Chapitre I : Généralités sur l'usinage par enlèvement de matière.
- Chapitre II : Fonctionnement et ajustement du logiciel Minitab.
- Chapitre III : Création et validation d'une étude sous Minitab.
- Chapitre IV : Modélisation de la force de coupe en coupe orthogonale.

Chapitre I
Généralités sur l'usinage

I.1- Introduction

Dans ce chapitre nous allons faire une présentation générale sur l'usinage par enlèvement de matière, afin de bien viser l'objectif qui est l'optimisation des conditions de coupe, nous allons étudier dans ce travail un seul procédé d'usinage qui est le tournage.

Nous souhaitons par cette partie de l'étude fournir les éléments fondamentaux du problème en double objectif :

- Présenter les paramètres relatifs au procédé de coupe.
- Etudier l'influence de ces paramètres sur l'effort de coupe.

I.2- Généralité sur l'usinage par enlèvement de matière

L'usinage est un procédé de génération de surfaces. Il consiste à créer une nouvelle surface Par enlèvement de matière (formation des copeaux) en utilisant un outil coupant. Les caractéristiques de cette surface dépendent du couple outil-matière, c'est-à-dire des paramètres mis en jeu pendant la coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance, profondeur de passe...).

En usinage, il existe plusieurs configurations utilisables selon le procédé de coupe (le fraisage, le rabotage, le tournage.....). Durant notre étude, nous nous intéresserons plus précisément à la technique d'enlèvement de matière (tournage).

En tournage Figure I-1 le mouvement de coupe M_c est appliqué à la pièce avec une trajectoire circulaire et une fréquence de rotation définissant la vitesse de coupe V_c . Le mouvement d'avance M_f est appliqué à l'outil avec une trajectoire coplanaire et une vitesse d'avance définie V_f [1].

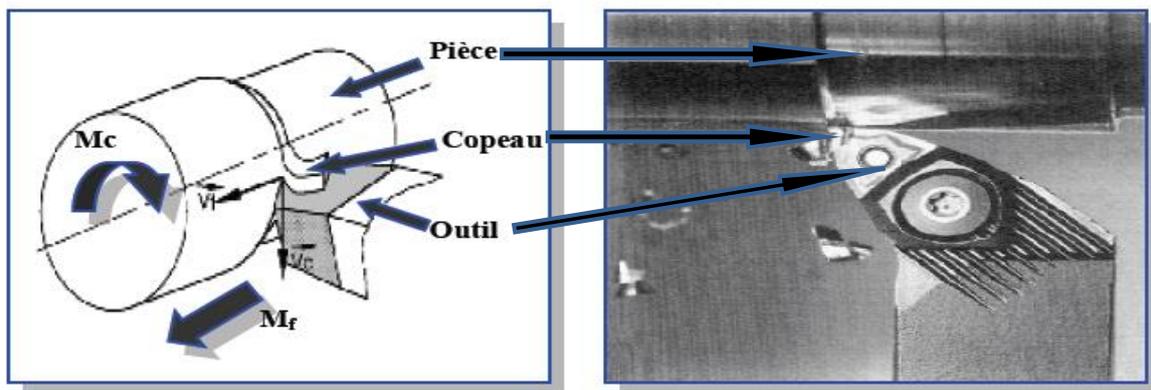


Figure I-1 Opération de chariotage en tournage [1].

I.2.1- Définition de la coupe des métaux

L'usinage d'une pièce demande l'utilisation des machines tel que le tour et fraiseuse qui sont plus employés pour obtenir une pièce selon des normes précises [1]

Cette technique de coupe transforme une partie de la matière noble en copeaux (appelés aussi déchets) qui sont inutilisables, malgré ses défauts elle reste toujours une façon (un procédé) de fabrication importante pour réussir une pièce demandée [1].

Dans la mise en forme des métaux par la coupe, le procédé de tournage, représente à lui seul 33% du domaine d'usinage par enlèvement de copeau. De nouveaux matériaux mise en forme par les sidérurgistes pour répondre aux exigences particulières de quelques domaines comme l'aéronautique, doivent être caractérisé [1].

I.2.2- Opérations de tournage

Dans le tournage, on peut classée, selon le profil de la pièce demandé les opérations en deux classes principales [2] :

- Tournage intérieur.
- Tournage extérieur.

Pour les deux classes, on peut distinguer suivant les formes obtenues, les opérations suivantes :

a. Chariotage

Cette opération consiste à usiner une surface cylindrique ou conique, le mouvement d'avance (mouvement de l'outil) est une translation rectiligne parallèle ou oblique à l'axe de révolution de la pièce, et cet usinage aura pour effet de réduire le diamètre de la pièce [2].

b. Alésage

Cette opération consiste à usiner une surface cylindrique ou conique intérieure. Le mouvement d'avance est similaire à celui en chariotage [2].

c. Dressage

Opération qui consiste à usiner une surface plane perpendiculaire à l'axe de la broche extérieure ou intérieure, ce qui diminue la longueur [2].

d. Contournage

On donnant à l'outil une trajectoire plane quelconque, on peut obtenir une forme de révolution quelconque [2].

e. Chanfreinage

Opération qui consiste à usiner un cône de petite dimension de façon à supprimer un angle vif [2].

f. Tronçonnage

Opération qui consiste à usiner une rainure jusqu'à l'axe de la pièce afin d'en détacher un tronçon [2].

g. Filetage

Opération qui consiste à réaliser un filetage extérieure ou intérieure, le mouvement d'avance est combiné avec le mouvement de coupe [2].

I.2.3- Classement des types des copeaux

La classification des copeaux présentés est celle donnée par Komanduri et Brown .Une nomenclature des différents types de copeau est présentée en ci-dessous. Ils les ont classés en tant que Figure I-2 [1].

- Copeau continu.
- Copeau ondulant.
- Copeau dentelé à zone de cisaillement concentrée, ou copeau de cisaillement catastrophique, ou copeau de cisaillement adiabatique.
- Copeau discontinu.

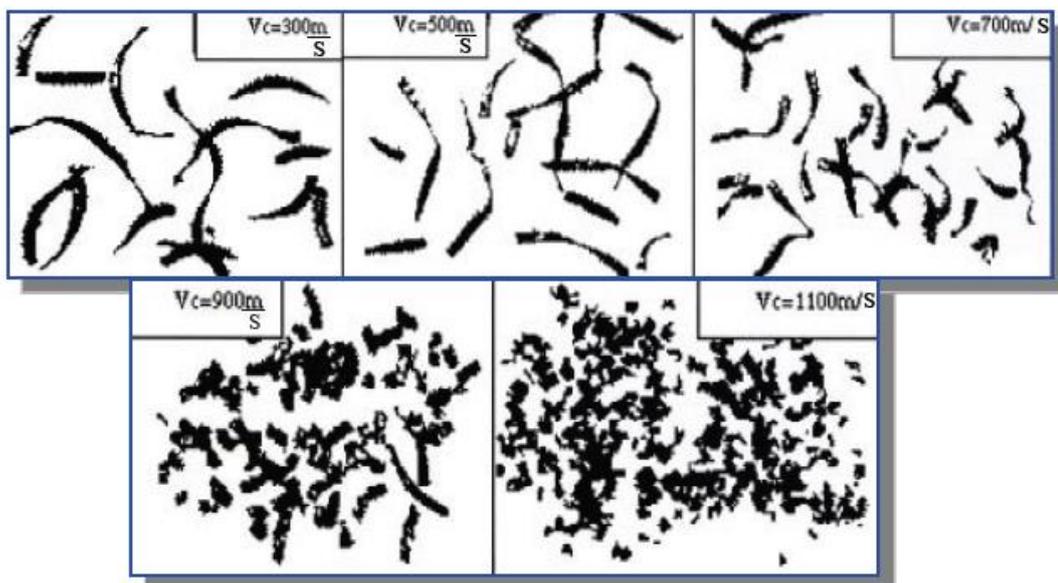


Figure I-2 Morphologie des copeaux en fonction de la vitesse de coupe V_c (copeau obtenu lors d'essais de tournage avec plaquette céramique Al_2O_3). Avance par tour : 0.2 (mm/tr) [1].

Des variations d'épaisseur, non cyclique sont observées lorsque des matériaux purs sont coupés à basse vitesse. Dans la littérature, le terme de copeau fragmenté est souvent utilisé pour tous les types cycliques, en particulier les ondulés et les dentelés, bien que ces deux types soient réellement différents. La fréquence du cycle ondulé est de l'ordre de 100 Hz alors que celle du cycle dentelé est 2 à 4 fois plus élevée. La section longitudinale des copeaux ondulés n'a pas de points anguleux comme celles des copeaux dentelés [1].

I.3- Généralité sur les outils de coupes

I.3.1- Matériaux des outils de coupe

Le tournage des aciers durcis par trempe (tournage dur) nécessite l'utilisation de matériaux coupants ayant d'excellentes propriétés de dureté à hautes températures, de résistance à l'usure et de stabilité chimique. C'est l'avènement des outils comme les carbures micro grains revêtus, les céramiques, les CBN et le diamant qui a rendu possible l'exploitation industrielle de cette technologie. Les principales matières utilisées pour les outils de tournage modernes sont illustré dans la Figure I-3 [3].

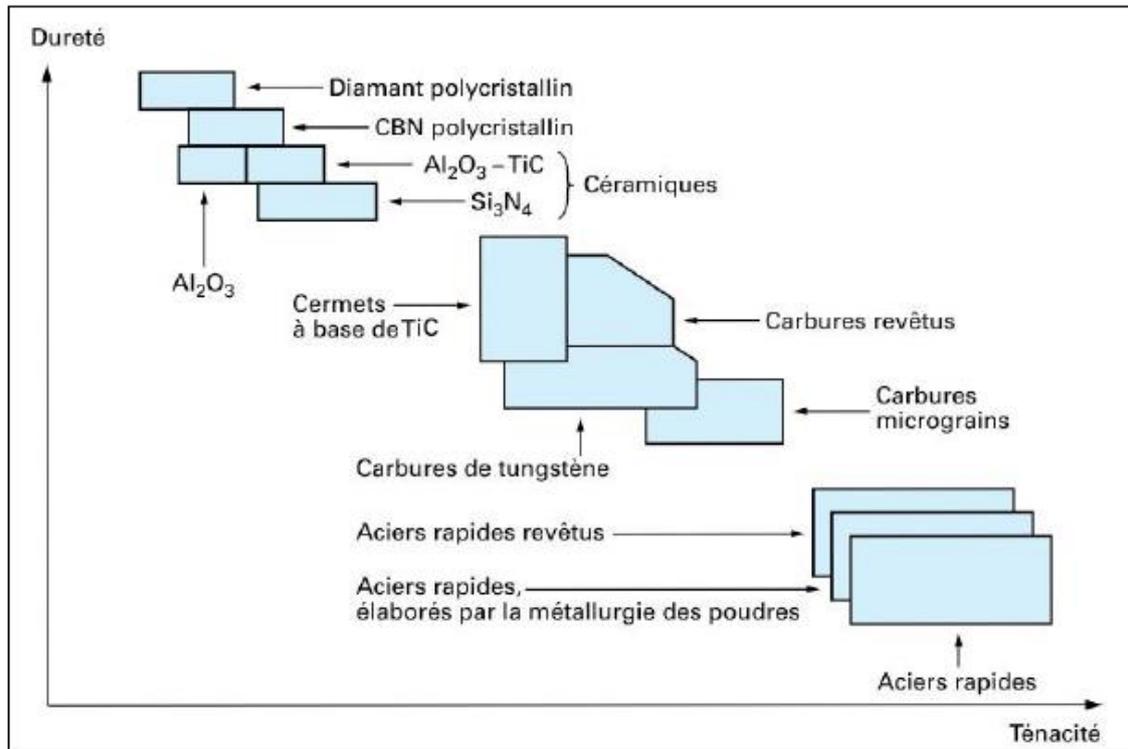


Figure I-3 Disposition des matériaux d'outil selon la ténacité et la dureté [3].

a. Acier rapides supérieurs ARS

Les outils ARS (acier rapides supérieurs) sont élaborés à partir d'un acier fortement allié subissant un traitement thermique, il est toujours utilisé pour certains types d'outils comme les forêts, où les outils possèdent un faible angle tranchant [3].

On les utilise avec de faibles vitesses de coupe pour éviter l'échauffement trop important et par conséquent une usure excessive, généralement ils sont des outils monobloc. En générale la composition chimique est présentée comme suit : 0,7 à 1,6% de carbone, 12 à 20 % tungstène, 3,5 à 10% molybdène, vanadium et cobalt, leur fabrication est réalisée par coulée en coquille ou par métallurgie des poudres [3].

b. Carbure

Les outils en carbures sont les plus utilisés grâce à leur intérêt économique. Ils sont en général utilisés sous forme de plaquettes de différentes formes. Les premières applications des

carbures de coupe se sont faites sous forme de plaquettes à braser sur des corps d'outils en aciers ordinaire, la partie active de ces outils étant réaffûtée au fur et à mesure de son usure. Il y a deux types d'outil en carbure [3] :

- Les carbures non revêtus : sont obtenus par frittage (métallurgie des poudres) de substance dure (carbures de tungstène de titane ...) et de substance liante (cobalt) qui confère sa ténacité à la plaquette [3].
- Les carbures revêtus : sont des plaquettes de carbure recouvertes d'une couche de quelques micromètres de nitrure ou de carbure de titane, ou encore d'oxyde d'aluminium [3].

c. Cermets

Cermet, un terme formé de deux syllabes : « cer » vient de céramique et « met » de métal. Ce sont des matériaux élaborés par la métallurgie des poudres, constitués par des particules de composés métalliques durs (carbures, nitrures, carbonitrures) liées par un métal (généralement du nickel). Actuellement, les cermets sont composés de TiC, TiN, Mo₂C, WC, VC, TaC, NbC, Ni et Co. Les propriétés d'utilisation des cermets dépendent pour une grande part des proportions des différents composants cités ci-dessus, notamment des teneurs en TiC, TiN, et TiCN et du rapport N/(C+N) qui, dans la dernière génération de cermets, est supérieur à 0,3. La taille des particules dures a également une grande influence sur les propriétés des Cermets. Des grains fins améliorent la ténacité et la résistance aux chocs thermiques. Les cermets présentent, en outre, une grande inertie chimique réduisant les phénomènes de cratérisation et d'arête rapportée. Leur bonne résistance à l'usure et leur grande ténacité permettent de travailler en coupe positive, d'où de moindres efforts de coupe, de bons états de surface et une grande précision dimensionnelle des pièces usinées. Les Cermets ne nécessitent pas obligatoirement de lubrification, elle est réalisée uniquement lorsque la précision de la finition l'exige [3].

d. Céramiques

Les céramiques sont des matériaux frittés sans liant métallique. Elles sont très dures et donc sensibles aux chocs thermiques et mécaniques [3].

La céramique la plus courante est l'oxyde d'aluminium ou alumine Al₂O₃. Jusqu'aux années 1980, l'alumine a été utilisée pour l'usinage de fontes dont la dureté ne dépassait pas 250 HB, mais il est possible maintenant d'usiner de l'acier jusqu'à 60HRC (environ 700 HV) ; c'est le matériau de coupe qui résiste le mieux à la cratérisation [3].

D'autres céramiques sont également employées. Les céramiques noires qui sont des mélanges d'Al₂O₃ et de carbure métallique (TiC ou WC) ou de zircone (ZrO₂), sont beaucoup moins sensibles que les céramiques Al₂O₃ aux brusques changements de température et permettent l'emploi de liquides de coupe. Le nitrure de silicium Si₃N₄ permet, lors de l'usinage de certains matériaux, des vitesses de coupe une fois et demie à deux fois supérieures à celles des

autres céramiques, ce qui impose des machines plus performantes (plus puissantes, plus rigides ...) il s'emploie à sec. Les céramiques renforcées par des whiskers (bâtonnets de fibres monocristallines de carbure de silicium entre lacées) qui leurs confèrent une plus grande ténacité, Permettent un travail au choc ou dans les matériaux réfractaires. Les céramiques sont employées avec des machines rigides et puissantes et un arrosage continu est nécessaire. Les surfaces doivent être préparées (chanfrein en début de passe) [3].

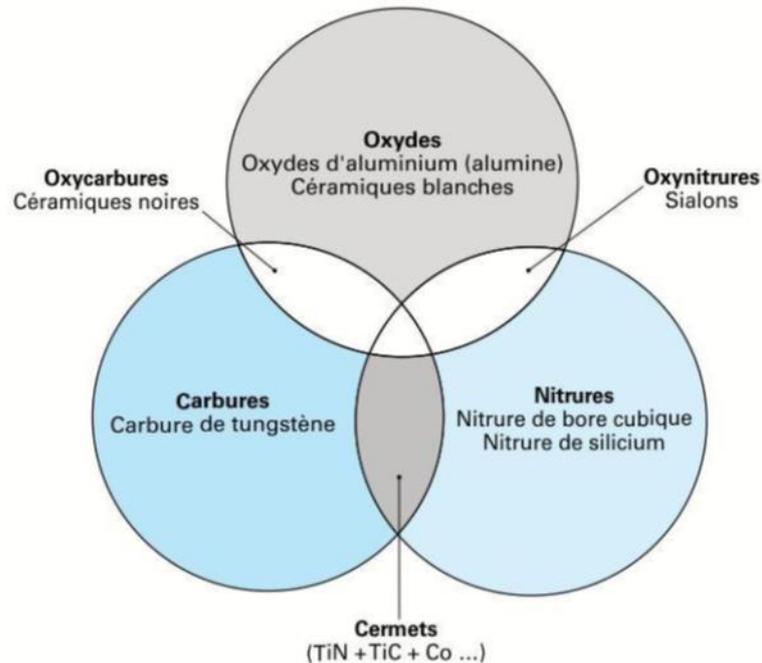


Figure I-4 Les familles de céramique [3].

e. Nitrure de bore cubique

Le CBN est une matière très dure adaptée au tournage de l'acier trempé, de la fonte en coquille et d'alliages à base de nickel ou cobalt. Les impératifs sont ici très rigoureux au niveau des conditions coupe et de l'arête de coupe. La productivité et la longévité sont nettement supérieures à celles des plaquettes céramiques ou en carbure. Les plaquettes en nitrure de bore cubique sont destinées en premier lieu à la finition [3].

f. Diamant

L'utilisation du diamant est fortement répandue comme constituant des meules, ou des grains de réaffutage des meules, il a un faible coefficient de frottement ce qui limite l'apparition d'arête rapportée (donc peut d'encrassage). Par contre, son énorme inconvénient réside dans sa non-stabilité à haute température. Un diamant soumis à une température de plus de 650° se transforme en un morceau de graphite. On ne peut donc pas l'utiliser pour les matériaux ferreux. Mais, il convient aux matériaux non ferreux s'usinant à basse température : Alliage d'aluminium, de cuivre, de magnésium, résines thermodurcissables....etc [3].

I.3.2- Éléments de l'outil

Les outils permettent d'enlever le copeau ; La géométrie de l'outil influe directement sur les formes usinables de la pièce. Il existe une grande diversité d'outils de coupe mais les principaux éléments des différents outils sont semblables en ce titre nous définissons les constituants d'outil et son type de matériaux [6].

a. Faces et les arêtes de l'outil

Un outil de coupe consiste en un corps et une queue ; ce dernier élément est fixé au porte-outil, mais le premier élément est la partie de l'outil portant les éléments coupants ou les plaquettes. Les faces sont les plans constituant le corps d'un outil. Les arêtes sont l'intersection des faces. La partie de l'outil qui intervient directement dans l'opération de coupe (les arêtes, la face de coupe et la face de dépouille) est appelée partie active. Les différentes faces et arêtes sont illustrées sur la Figure I-5 (les arêtes, la face de coupe et la face de dépouille) [6].

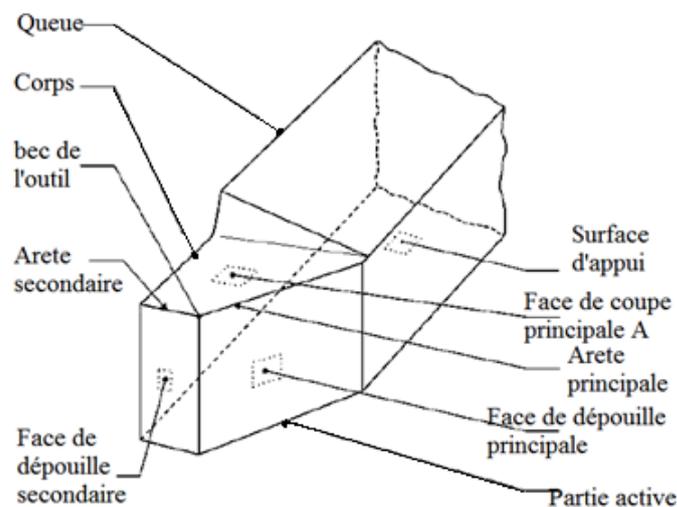


Figure I-5 Éléments de l'outil [6].

b. Angles de l'outil

La nécessité des angles d'outil présente à travers la facilité transparente d'opération de coupe. Selon chaque base des coordonnées il y a des angles spéciaux, on définit les angles principaux du taillant. Elles sont comme suit [6] :

- l'angle de dépouille α .
- l'angle de taillant β .
- l'angle de coupe γ est représenté en Figure I-6 :

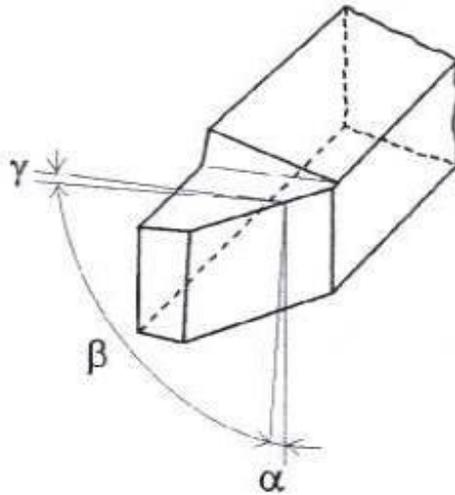


Figure I-6 Angles du taillant (outil en main) [6].

La Figure I-7 illustre ces mêmes angles dans les systèmes de référence outil en travail : outil à taille en bout (gauche) et outil à taille de côté ou latérale (droite).

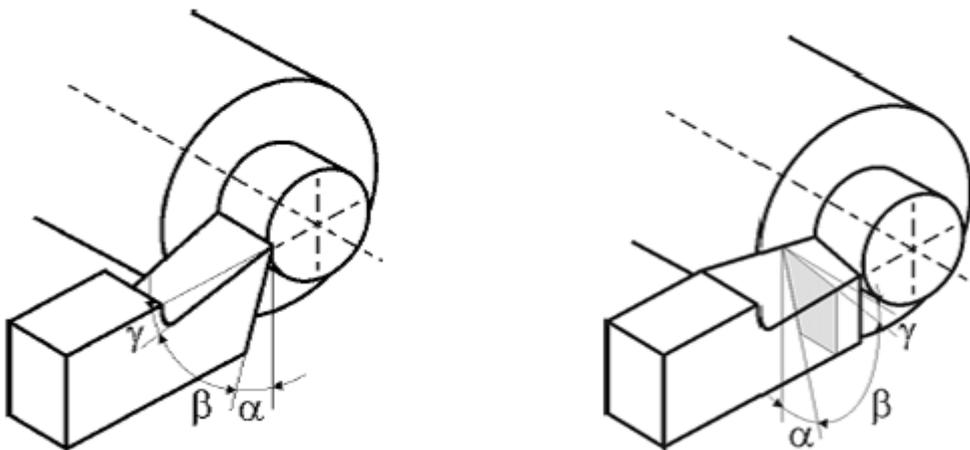


Figure I-7 Angle du taillant (outil en travail) [6].

I.3.3- Différents types des outils

Les outils de coupe en tournage classés selon la forme en trois types [2] :

- Les forêts pour l'alésage.
- Les outils monoblocs : le corps et la partie active sont de même matériau.
- Les outils à plaquette.

Les outils de tournage actuels sont constitués dans la plupart du temps d'un porte-plaquette muni d'un dispositif de fixation de la plaquette interchangeable constituée d'une matière plus dure et comportant plusieurs arêtes de coupe, la Figure I-8 illustre les divers types d'outil porte-plaquette.



Figure I-8 Différents types des outils.

I.3.4- Usure des outils de coupe

En fonction des conditions d'usinage (la nature de l'outil, du matériau usiné, du type d'usinage et des conditions de coupe) nous pouvons avoir les types d'usures suivantes [3] :

- **Usure en dépouille** : Ou usure frontale due aux frottements de la surface de coupe de la pièce sur la surface en dépouille de l'outil. Elle se manifeste par l'apparition d'une bande striée et brillante parallèle à l'arête tranchante de l'outil Figure I-9(a) [3].

- **Usure suivant la surface d'attaque** : elle se caractérise par une cuvette dite "cratère" formée sur la surface d'attaque de l'outil suite au frottement du copeau sur celle-ci Figure I-9 (b). Cette forme d'usure est due à l'existence des températures élevées au contact du copeau et de l'outil provoquant une diffusion importante. Cette usure peut jouer un rôle important quand à l'enroulement et la fragmentation du copeau [3].

- **Fissuration de l'arête** : On observe l'apparition de fissures sur l'arête coupante dans le cas des usinages avec des chocs mécaniques ou thermiques, ou avec des vibrations périodiques des efforts provoqués par une coupe discontinue. Elle est propre aux outils en carbure métalliques Figure I-9 [3].

- **Rupture (cassure) de la pointe** : c'est la destruction totale du bec de l'outil (Observée dans le cas des outils en acier rapide), Figure I-9(d) [3].

- **Déformation plastique** : la pointe de l'outil peut subir une déformation permanente sous l'effet des températures élevées et des hautes pressions dans la zone de coupe. Cette déformation de la pointe de l'outil influe sur sa géométrie et par conséquent sur la précision et l'état de surface usinée, Figure I-9(e) [3].

- **Entaille** : Dans certaines conditions de coupe, il se produit des arrachements, l'arête tranchante à la hauteur du diamètre périphérique s'use et il y a un effondrement à cet endroit. L'entaille est due à des passages successifs de l'outil sur une couche écrouie par le passage précédent, donc plus dur, Figure I-9(f) [3].

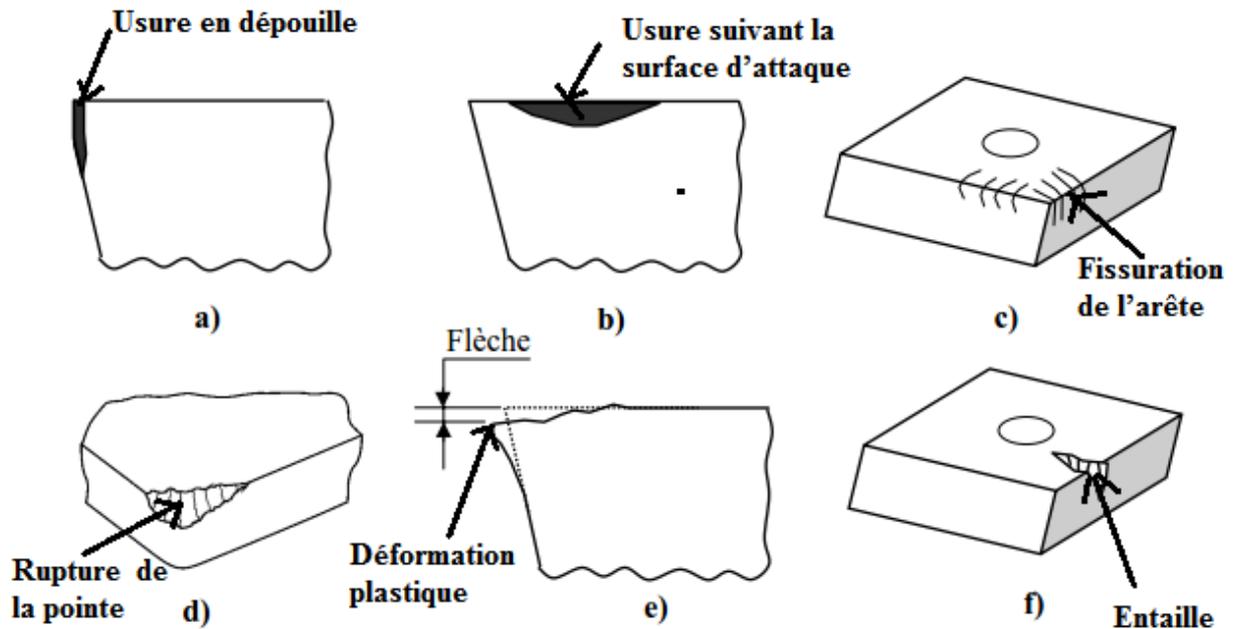


Figure I-9 Formes d'usure sur les outils de coupe [3].

I.4- Conditions de coupe.

Avant de réaliser une opération de tournage, il est nécessaire de bien choisir les conditions de coupe pour obtenir un bon résultat (précision, état de surface ...) Il y a plusieurs critères qui permettent de définir les conditions de coupe notamment [2] :

- Le type de la machine (mécanisme, gamme des vitesses,...).
- La puissance de la machine - La matière de l'outil (ARS, carbure...).
- La matière usinée (acier, aluminium...).
- Le type de l'opération (perçage, chariotage, surfaçage...).
- L'utilisation éventuelle de lubrification (destiné à refroidir ou/et à diminuer le frottement).



Figure I-10 Le choix des conditions de coupe [2].

I.4.1- Vitesse de coupe V_c

Le choix de la vitesse de coupe (V_c) dépend de la nature de l'opération effectuée et du couple outil-matière (caractéristiques physiques et mécaniques du matériau usiné et du matériau

usinant). En pratique, la vitesse de coupe est réglée par la vitesse de rotation de la pièce (notée N et exprimée en tour/min).

Cette vitesse dépend de la vitesse de coupe et du diamètre de la pièce à usiner. La relation reliant la vitesse de coupe et la vitesse de rotation est donnée par l'équation (I.1) [1].

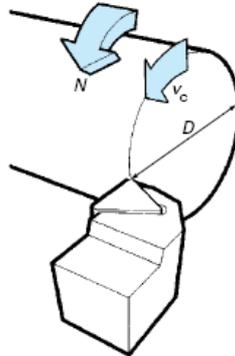


Figure I-11 Vitesse de coupe V_c en tournage.

La vitesse de la broche est donnée par l'expression suivante :

$$N(\text{tr/min}) = \frac{1000 \times V_c(\text{m/min})}{\pi D(\text{mm})} \quad (\text{I.1})$$

Tel que :

N : Vitesse de rotation.

V_c : Vitesse de coupe $\text{m} \cdot \text{mn}^{-1}$.

D : Diamètre de la pièce exprimée en mm.

I.4.2- Vitesse d'avance V_f et avance par tour f

La vitesse d'avance V_f (mm/min), que la figure I-12 montre, est la vitesse à laquelle la machine déplace l'outil par rapport au bâti. L'avance par tour f (mm/tr) est la valeur du déplacement de l'outil, lorsque la pièce a effectué une révolution. C'est une donnée clé pour la qualité de la surface usinée. L'avance influe non seulement sur l'épaisseur des copeaux, mais également sur la manière dont ils se brisent. La vitesse d'avance V_f est donnée par la formule suivante [1].

$$V_f(\text{mm/min}) = f(\text{mm/tr}) \times N(\text{tr/min}) \quad (\text{I.2})$$

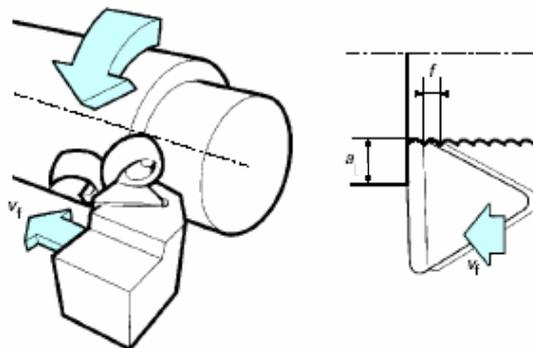


Figure I-12 Vitesse d'avance V_f en tournage.

Tel que :

V_f : Vitesse d'avance en (mm/min).

f : Avance par tour en (mm/tr).

a : Profondeur de passe en mm.

N : Vitesse de rotation de la broche en (tr/min).

I.4.3- Profondeur de passe a

En chariotage, la profondeur de passe a (voir Figure. I-12) est la différence de rayon entre la surface non usinée et la surface usinée (c'est-à-dire la moitié de la différence entre le diamètre non usiné et le diamètre usiné). La profondeur de coupe est toujours mesurée perpendiculairement à la direction de l'avance et non pas suivant l'arrête de l'outil [1].

I.5- Effort de coupe

L'étude et l'approximation des efforts de coupe sont nécessaires pour choisir les outils et dimensionner le port pièce leurs directions permettent de déterminer le sens de déplacement des outils afin que les appuis du montage s'opposent à ces efforts [2].

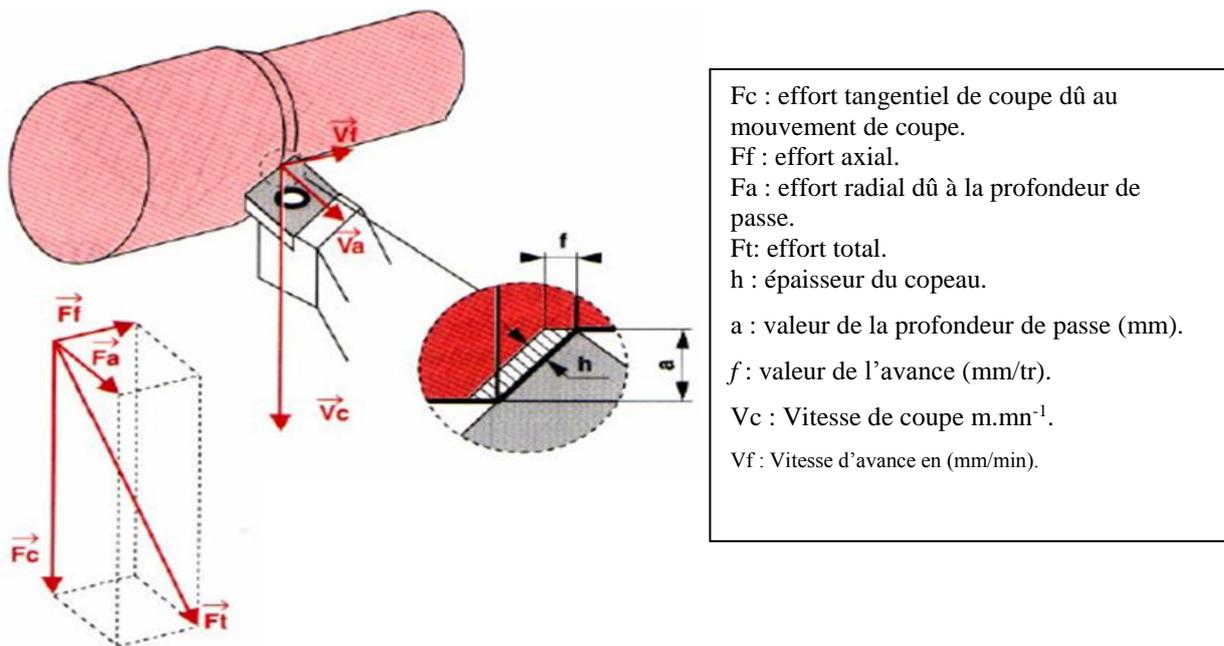


Figure I-13 Présentation des composantes des efforts de coupe [2].

$$F_t = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_a^2} \quad (I.3)$$

I.5.1- Mesure des efforts de coupe

Les capteurs de force utilisent généralement un "corps d'épreuve" déformable afin de déterminer la force appliquée. La déformation du corps d'épreuve détermine la force appliquée.

Il existe deux types [4] :

- les capteurs de force à jauges d'extensomètre.
- les capteurs de force à effet piézoélectrique.

a. Les capteurs d'efforts à jauges d'extensomètre

Une jauge d'extensomètre (fil en serpentín) est collée sur la surface d'une pièce pour laquelle on désire connaître les efforts qu'elle subit. Lorsqu'un effort est appliqué, le fil se déforme, subit une variation de longueur. Sa résistance varie en conséquence. La variation de sa résistance est proportionnelle à sa variation de longueur. Connaissant la loi de comportement du matériau, qui relie les déformations aux efforts, on a accès aux efforts (voir l'item jauges d'extensomètre pour avoir plus de renseignement sur cette technologie) [4].

En fonction du type d'effort mesuré, la (ou les) jauge(s) peuvent être collé directement sur une pièce du système ou sur un corps d'épreuve défini [4].



Figure I-14 Capteur d'efforts à jauges d'extensomètre [4].

b. Les capteurs d'efforts piézoélectriques

De nombreux cristaux génèrent une charge électrique lorsqu'on les soumet à une charge mécanique. Ce phénomène physique est connu dans le monde entier sous le nom d'effet piézoélectrique. La technique de mesure piézoélectrique est prédestinée aux tâches de mesure présentant des exigences extrêmes concernant la géométrie, les plages de température et la dynamique [4].

L'effet piézoélectrique a été découvert en 1880 par les frères Curie. "Piezein" vient du grec et signifie "comprimer, exercer une pression". Les deux physiciens ont constaté que la surface de certains cristaux se chargeait électriquement lorsque le cristal était soumis à une sollicitation mécanique. Cette charge électrique est exactement proportionnelle à la force qui s'exerce sur le cristal et se mesure en pico coulomb (pC) [4].

En fonction de la position des axes polaires des cristaux par rapport à la force exercée on distingue plusieurs types d'effet piézoélectrique [4].

- Effet longitudinal.
- Effet de poussée / Effet de cisaillement.
- Effet transversal.

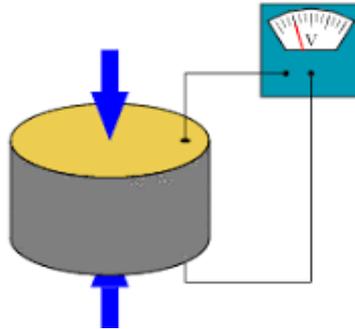


Figure I-15 Schéma de principe de fonctionnement d'un capteur piézoélectrique [4].

I.6- Influence des conditions de coupe sur les efforts de coupe

L'étude de l'évolution des forces de coupe est basée sur des essais expérimentaux, a permis la mise en évidence de l'influence des conditions de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) sur les composantes de l'effort de coupe [5].

I.6.1- Influence de la vitesse de coupe V_c

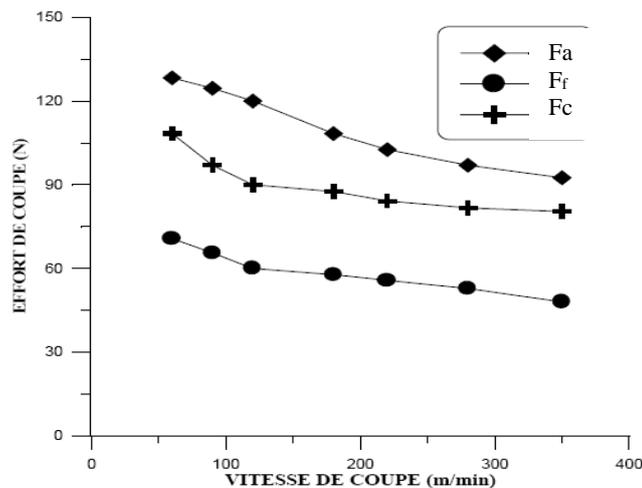


Figure I-16 Evolution des efforts de coupe en fonction de vitesse de coupe [5].

Les résultats présentés sur la Figure I.-16 illustrent l'évolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe V_c , cette figure a montré qu'une augmentation de la vitesse conduit à une diminution des composantes de l'effort de coupe. La haute température dans la zone de coupe qui rend le métal travaillé plus plastique et par conséquent l'effort nécessaire pour la coupe diminue. Il est à noter aussi que les vitesses employées ne favorisent pas l'apparition de l'arête rapportée. En examinant l'allure des courbes, on remarque que les efforts diminuent jusqu'à 180 m/min, au-delà de cette limite, ils se stabilisent légèrement [5].

Cette diminution des efforts est d'autant plus marquée par les faibles vitesses de coupe. En effet, une élévation de la vitesse de 60 à 180 m/min, conduit à une diminution des trois composantes de l'effort (F_a , F_f , F_c) respectivement de (18,4%, 22,3%, 23,7%). Alors qu'une augmentation de la vitesse de 180 à 280 m/min, conduit à une diminution de (11,6% ; 9,47% ; 7,18%).

Les résultats montrent aussi que l'effort radial (F_a) est prépondérant par rapport aux deux autres efforts (F_c et F_f) [5].

I.6.2- Influence de la profondeur de passe a

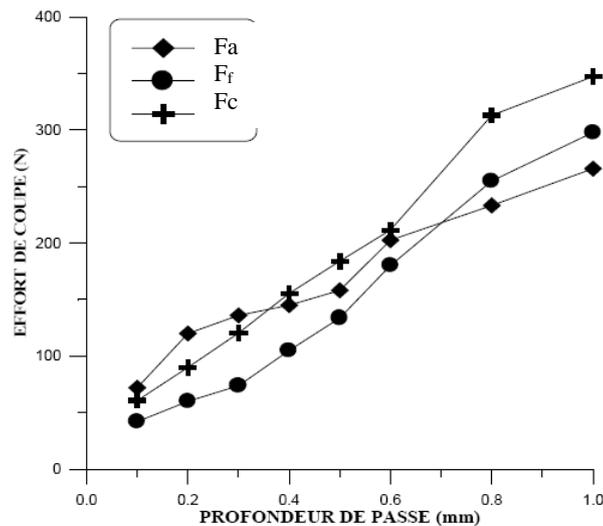


Figure I-17 Évolution des efforts en fonction la profondeur de passe [5].

La Figure I-17 présente l'évolution des efforts de coupe en fonction de la profondeur de passe. Les résultats montrent une nette augmentation des efforts de coupe avec l'augmentation de la profondeur de passe et cela à cause de l'augmentation de l'épaisseur (section) du copeau et par conséquent l'augmentation du volume du métal déformé, cette augmentation est presque linéaire. Aux petites valeurs de la profondeur de passe, l'effort radial est prépondérant. Au-delà de la valeur de $a=0,4$ mm pour (F_c) et 0,6 mm pour (F_f), L'effort tangentiel et axial dépassent l'effort radial. Cela peut être expliqué par le travail de l'outil en tournage par son rayon du bec aux petites profondeurs de passe [5].

Avec l'augmentation de a , la coupe se fait en dehors de la limite du rayon de bec et la pièce présente une résistance à la pénétration de l'outil dans le sens de l'effort tangentiel et en particulier l'effort axial augmente, car la longueur de l'arête tranchante en contact avec la pièce augmente. Autrement dit l'outil ne travaille plus par son rayon seulement [5].

I.6.3- Influence de l'avance par tour f

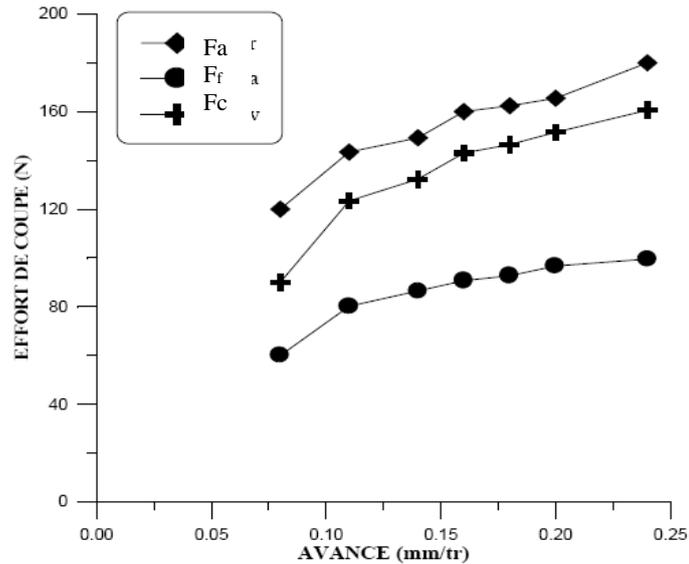


Figure I-18 Évolution des efforts de coupe en fonction l'avance [5].

Les courbes de la Figure I-18 montrent une augmentation des efforts avec l'augmentation de l'avance, puisque cette dernière accroît la section du copeau cisailée, d'où le métal résiste plus à la rupture et nécessite un effort plus grand pour l'enlèvement du copeau. On remarque que l'effort radial est prépondérant suivi par l'effort tangentiel et en dernier lieu par l'effort axial et cela pour toutes les avances testées [5].

I.7- Optimisation des conditions de coupe

I.7.1- Définition

Optimiser, c'est rechercher la solution la plus satisfaisante tout en respectant un certain nombre de contraintes.

Dans le cas d'une mise en œuvre d'une nouvelle production ou d'une amélioration d'une production existante, il peut être nécessaire d'optimiser le choix des paramètres de coupe.

Il existe de nombreux critères selon lesquels on peut optimiser les paramètres de coupe mais on ne présentera ici que les trois plus utilisés [6]:

- Cout minimum d'usinage.
- Temps minimal d'usinage, cadence maximale de fabrication.
- Volume de copeau donné par arête de coupe.

I.7.2- Objectif

L'optimisation des conditions de coupe peut avoir plusieurs buts [6] :

- Minimiser le coût de l'usinage
- Minimiser le temps de production

- Minimiser le nombre d'outils nécessaires.
- Minimiser l'effort de coupe.

I.7.3- Problème d'optimisation

Résoudre un problème d'optimisation consiste à trouver une solution qui minimise ou maximise un critère particulier. Dans la plupart des cas, l'optimum découvert n'est pas unique. Ainsi il existe un ensemble de solutions minimisant ou maximisant le critère considéré.

D'après le processus de tournage et les phénomènes relatifs au phénomène principal de coupe tels que ; le mécanisme de formation de copeau et les mécanismes endommageant des outils, le processus de coupe peut être schématisé comme suit [6]:

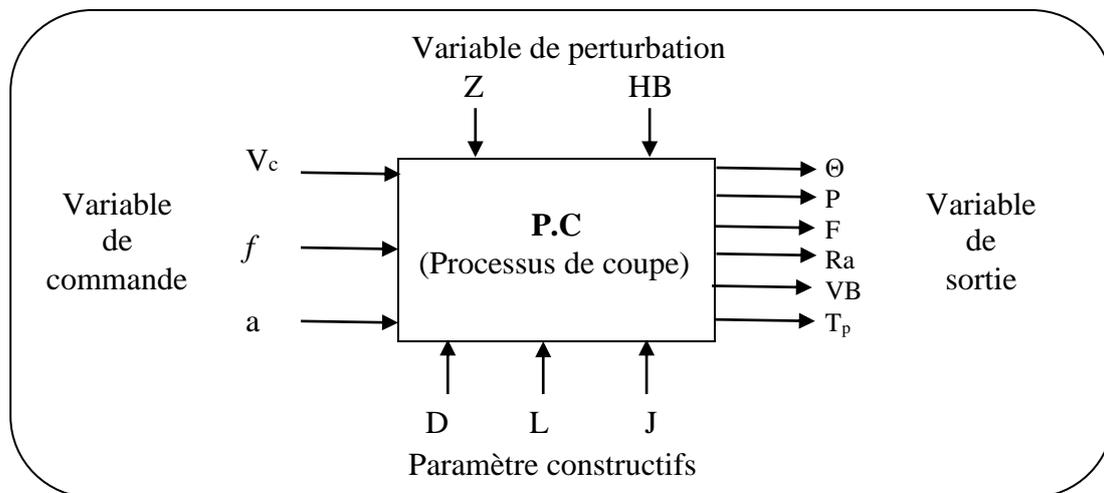


Figure I-19 Schématisation d'un processus de coupe [6].

- | | |
|---|-----------------------------------|
| Θ : paramètres économiques (coût et temps de production). | F : effort de coupe. |
| P : puissance absorbée par la coupe. | Ra : rugosité de surface. |
| T _p : température d'interface (outil-matière). | VB : usure de l'outil. |
| J : rigidité du système de montage. | D : diamètre de coupe. |
| L : longueur de coupe. | HB : dureté de la pièce à usiner. |
| Z : diamètre initial (de la brute ou de l'ébauche). | a : profondeur de passe. |
| V _c : vitesse de coupe. | f : avance par tour. |

La recherche des meilleures conditions de coupe en tournage amène à considérer un grand nombre de facteurs qui sont classés selon la Figure I-19 en quatre groupes [6] :

- Paramètres constructives : (diamètre de coupe, longueur de coupe et rigidité du système de montage) ces paramètres sont généralement imposés par le constructeur. Elles sont déterminées à partir du rôle fonctionnelle de la pièce (ou la surface) usinée [6].

- Variables de perturbation : (diamètre initial et dureté de la brute ou l'ébauche) ces facteurs ne sont pas facilement mesurables et leurs effets sont souvent négligeables dans la modélisation de coupe [6].
- Variables de commande : (vitesse de coupe, avance par tour et profondeur de passe) ce sont presque les seuls facteurs qu'on peut les varier directement. Ils ont des limitations pour chaque machine-outil ainsi qu'une influence directe sur les variables de sortie du processus de coupe [6].
- Variables de sortie : (coût et temps de production, puissance absorbée par la coupe, effort de coupe, rugosité de surface, usure de l'outil et température de l'interface outil-copeau) une partie de ces paramètres est le fruit du processus de coupe tel que (la rugosité de surface usinée) et $Ra\theta$ (le coût et le temps de production). Cette partie est l'objectif qu'on cherche à améliorer [6].

Les variables définissant les conditions de coupe en tournage sont des grandeurs géométriques et cinématiques intervenant dans la dynamique de coupe et la nature du milieu dans lequel est effectuée la coupe (lubrifiant). En générale, les variables retenues pour une opération de tournage sont les variables de commande [6] :

- La vitesse de coupe V_c en (m/min).
- L'avance par tour f en (tr/mm).
- La profondeur de passe a en (mm).

Le problème d'optimisation des conditions de coupe consiste à déterminer les valeurs des variables de coupe (V_c , f et a) pour chaque opération élémentaire d'usinage en prenant en compte les limites de performances des éléments de la cellule élémentaire d'usinage (C.E.U) qui se traduisent par des contraintes établies à partir de la lois de coupe et qui font intervenir les variables de coupe avec lesquelles le domaine des solutions réalisables est borné. D'une manière générale, la détermination des paramètres de coupe nécessite une bonne connaissance des facteurs d'incidence relatifs au couple outil-matière, à l'opération d'usinage et à l'environnement [6].

I.7.4- Critères d'optimisation

L'intérêt de l'optimisation des conditions de coupe réside dans l'amélioration de certains critères de jugement économiques et techniques de l'usinage tels que le coût de production, la productivité (par minimisation du temps de production ou maximisation du débit de copeau), la durée de vie des outils de coupe et dans des rares études l'état de surface produite [6].

L'analyse de la relation entre ces critères et les conditions de coupe conduit aux conclusions suivantes : plus les conditions de coupe ne sont réduites, plus les temps nécessaires à

l'exécution des opérations sont élevés et par conséquent le coût de production est élevé. L'augmentation des conditions de coupe provoque une usure rapide des outils de coupe, d'où leur changement assez fréquent conduit à l'augmentation du temps et du coût de production. Elle peut même conduire à la détérioration des surfaces usinées [6].

Les nombreuses études antérieures ont montré que la satisfaction de plusieurs critères en même temps est en manière générale difficilement réalisable, parfois même impossible vu que certains critères sont très souvent concurrents (la minimisation du temps de production par l'utilisation des régimes de coupe élevés conduit à l'augmentation du coût de production par suite à l'usure des outils, de même l'augmentation de la productivité conduit au non-respect de la précision d'usinage). C'est pour cela, les critères d'optimisation sont souvent variés selon les objectifs de production recherchés [6].

I.7.5- Les différentes Méthodes d'optimisations

La résolution de problèmes d'optimisation est devenue un sujet central dans l'étude de la plupart des processus, le nombre de problèmes d'aide à la décision pouvant être formalisé sous la forme d'un problème d'optimisation étant en forte croissance [2].

Pour explorer les différentes méthodes d'optimisation, nous considérons le cas d'une optimisation mono-objectif. Nous distinguons trois familles de méthodes d'optimisation Mono-objectif :

- Les méthodes déterministes.
- Les méthodes probabilistes.
- Les méthodes non déterministes.

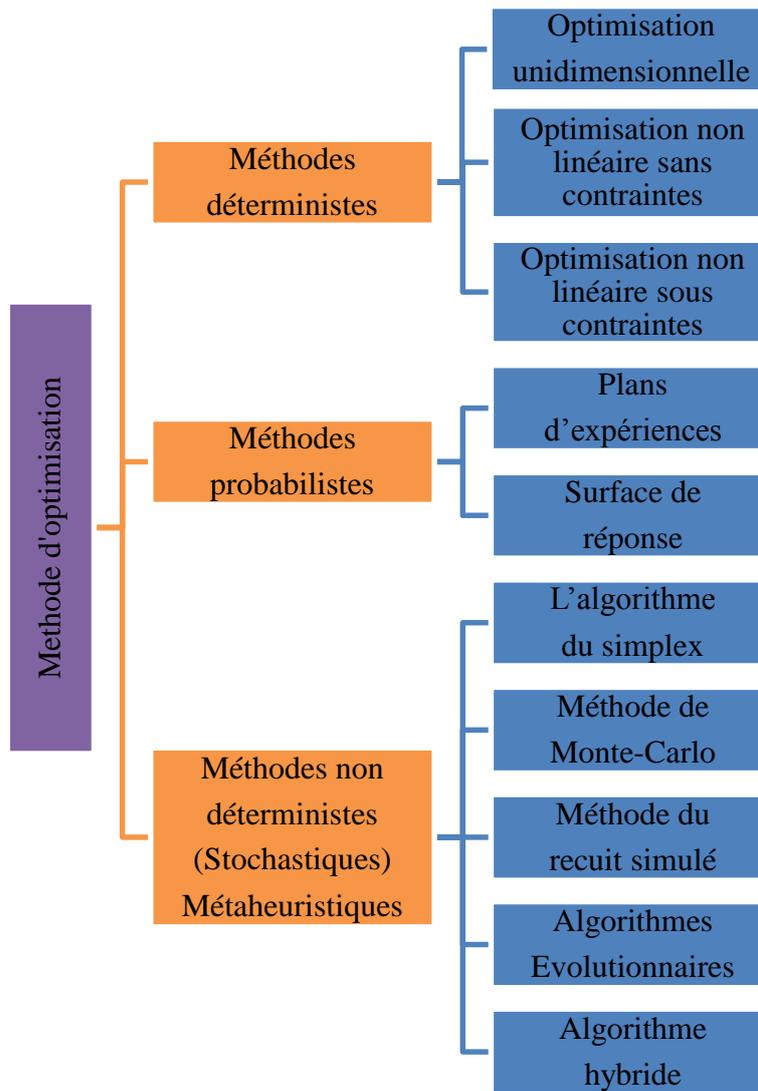


Figure I-20 Différentes Méthode d'optimisations [2].

I.8- Conclusion

Le chapitre I montre que la coupe des métaux est un processus qui fait intervenir de nombreux paramètres, nous avons résumé dans ce chapitre les différents paramètres qui le contrôlent.

L'optimisation est une tâche importante dans le processus d'usinage, permettant le choix des conditions de coupe les plus commodes afin d'obtenir des valeurs désirées d'une certaine variable.

Chapitre II
Fonctionnement et ajustement
du logiciel Minitab

II.1- Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation du logiciel Minitab, principe de fonctionnement et ajustement de logiciel afin de le servir dans les chapitres qui suit.

Minitab est un logiciel propriétaire commercial de statistiques. Il est développé par *Minitab, Inc.* pour le système d'exploitation Windows uniquement. Il est largement utilisé par les universités pour enseigner les statistiques, et les développeurs le dirigent particulièrement aux entreprises en affichant leur intention de les rendre plus performantes selon la méthode « Six Sigma » [7].

Logiciel développé depuis 1972 et disponible en 8 langues [7].

II.2- Principe de fonctionnement

II.2.1- Interface utilisateur de Minitab

Avant de commencer l'analyse, ouvrez Minitab et observez l'interface utilisateur. Dans la barre des tâches de Windows, sélectionnez **Démarrer >Tous les programmes >Minitab>Minitab 18**. Par défaut, lorsque vous ouvrez Minitab, deux fenêtres sont visibles et une autre est réduite.

a. Fenêtre Session

La fenêtre Session affiche les résultats de vos analyses au format texte. Dans cette fenêtre, vous pouvez également entrer des commandes de session dans le volet Ligne de commande au lieu d'utiliser les menus de Minitab [7].

b. Feuille de travail

La feuille de travail est semblable à une feuille de calcul, c'est là que vous saisissez et que vous ordonnez vos données. Vous pouvez ouvrir plusieurs feuilles de travail en même temps [7].

c. Project Manager

La troisième fenêtre, intitulée Project Manager, est réduite en dessous la feuille de travail [7].

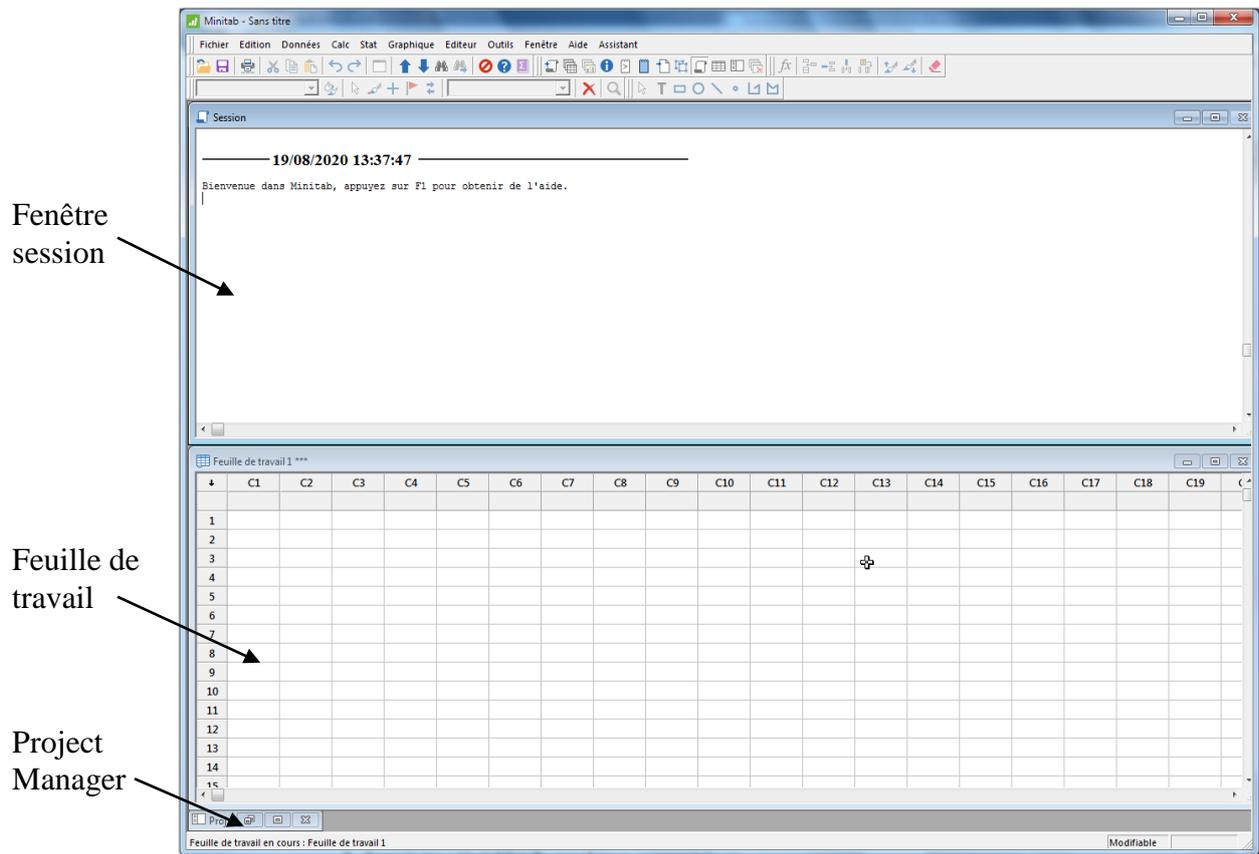


Figure II-1 Interface du logiciel Minitab 18.

II.2.2- Projets et feuilles de travail

Dans un projet, vous pouvez manipuler des données, effectuer des analyses et générer des graphiques. Un projet contient une ou plusieurs feuilles de travail.

Les fichiers de projet (.MPJ) contiennent les éléments suivants [7].

- Feuilles de travail.
- Graphiques.
- Résultats de la fenêtre Session.
- Historique de commandes de session.
- Paramètres de boîte de dialogue.
- Présentation de la fenêtre.
- Options.

Les fichiers de feuille de travail (.MTW) contiennent les éléments suivants [7] :

- Colonnes de données.
- Constantes.
- Matrices.
- Modèles pour les variables de réponse.
- Objets de plan.

- Description de colonnes.
- Description de feuilles de travail.

Enregistrer un travail dans un fichier de projet pour conserver l'ensemble de vos données, graphiques, paramètres de boîte de dialogue et options. Enregistrez votre travail dans un fichier de feuille de travail pour conserver uniquement les données.

Un fichier de feuille de travail peut servir pour plusieurs projets. Les feuilles de travail peuvent contenir jusqu'à 4000 colonnes. Le nombre de feuilles de travail qu'un projet peut contenir dépend directement de la capacité de mémoire de votre ordinateur [7].

II.2.3- Ouvrir et lire une feuille de travail

On peut ouvrir une nouvelle feuille de travail vide à tout moment. On peut également ouvrir un ou plusieurs fichiers contenant des données, comme un fichier Microsoft Excel. Lorsqu'on ouvre un fichier, son contenu est copié dans le projet Minitab en cours. Aucune des modifications apportées à la feuille de travail dans le cadre du projet n'a d'incidence sur le fichier d'origine [7].

a. Ouvrez le fichier de données échantillons

Les données sont présentées dans des colonnes, également appelées variables. Le numéro et le nom de la colonne sont affichés en haut de chaque colonne [7].

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	Vc	f	Fc			
1	30	0,05	39,59			
2	30	0,08	53,40			
3	30	0,11	66,78			
4	30	0,14	79,75			
5	30	0,17	92,29			
6	30	0,20	104,42			
7	45	0,05	32,95			
8	45	0,08	47,10			

Figure II-2 Exemple d'une feuille de travail.

II.2.4- Représentation graphique des données

Avant de mener une analyse statistique, vous pouvez utiliser des graphiques pour étudier les données et évaluer les relations entre les variables. Ces graphiques vous permettent également de mettre en forme vos données et vous aident à interpréter les résultats statistiques [7].

Vous pouvez accéder aux graphiques Minitab à partir des menus **Graphique** et **Stat**. Les graphiques intégrés, qui vous aident à interpréter les résultats et à évaluer la validité des hypothèses statistiques, sont également accessibles au moyen de nombreuses commandes statistiques [7].

Les graphiques Minitab disposent des caractéristiques suivantes [7] :

- Des galeries d'images vous aidant à choisir un type de graphique.
- Une personnalisation flexible.
- Des éléments graphiques modifiables.
- Une option de mise à jour automatique.

a. Création d'un panneau d'histogrammes

1. Ouvrez le fichier de données échantillons.
2. Sélectionnez **Graphique >Histogramme**.

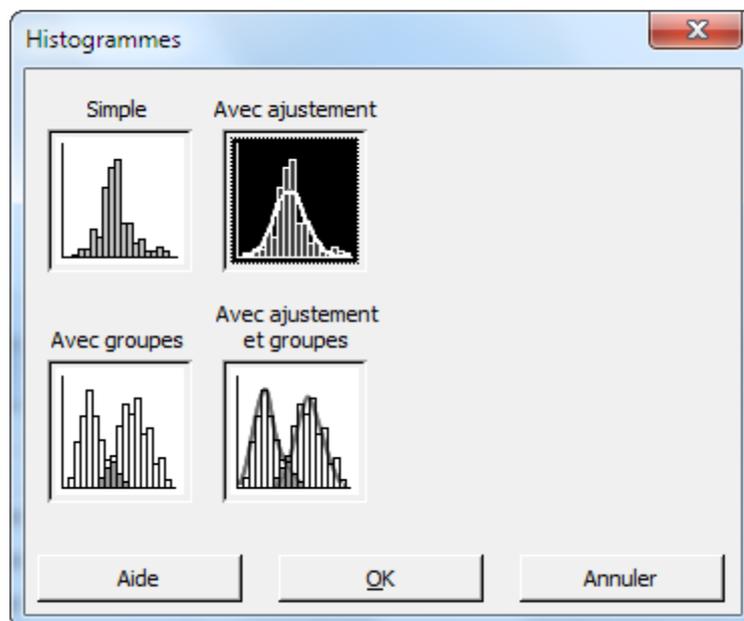


Figure II-3 Création d'un panneau d'histogrammes.

3. Sélectionnez **Avec ajustement**, puis cliquez sur **OK**.
4. Dans la zone **Variables du graphique**, saisissez Fc (force de coupe).
5. Cliquez sur Graphiques multiples, puis sélectionnez l'onglet Variables de répartition.
6. Dans la zone Var. de répartition avec groupes dans panneaux distincts, saisissez Vc et f.
7. Cliquez sur **OK** dans chaque boîte de dialogue.

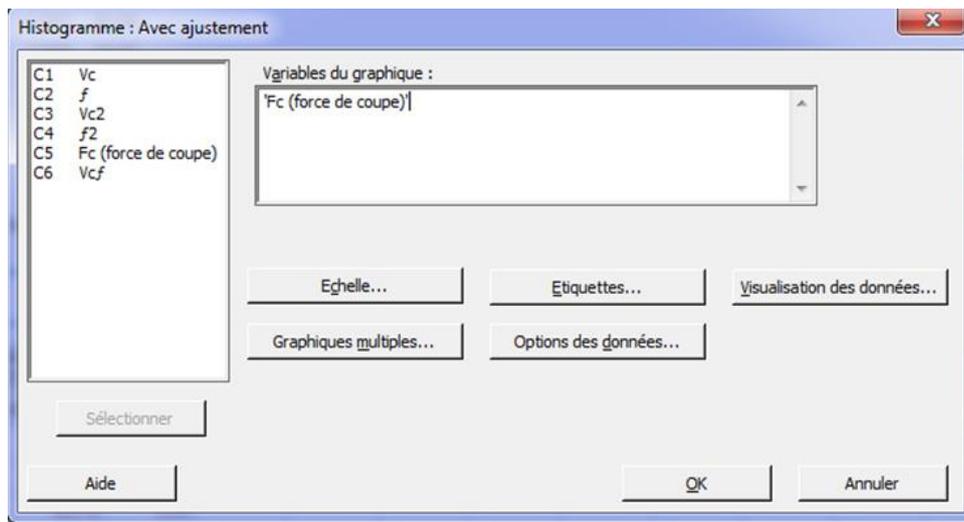


Figure II-4 Histogrammes avec ajustement.

Pour sélectionner des variables dans la plupart des boîtes de dialogue Minitab, utilisez l'une des méthodes suivantes [7] :

- Double-cliquez sur les variables dans la zone de liste des variables.
- Mettez les variables en surbrillance dans la zone de liste des variables, puis cliquez sur **Sélectionner**.
- Saisissez le nom ou le numéro de colonne des variables.

b. Création d'un nuage de points avec groupes

Utilisez un nuage de points pour étudier la relation entre deux variables. Vous pouvez choisir un nuage de points dans le menu Graphique ou utiliser l'Assistant Minitab. Ce dernier vous guide dans vos analyses et vous aide à interpréter les résultats en toute confiance. Il peut être utilisé pour les tests statistiques, les graphiques, les analyses de qualité et les plans d'expériences les plus basiques [7].

L'Assistant est utile dans les situations suivantes :

- Vous avez besoin d'aide pour choisir l'outil le plus adapté pour une analyse.
- Vous souhaitez que les boîtes de dialogue contiennent moins de termes techniques et soient plus simples à remplir.
- Vous voulez que Minitab vérifie les hypothèses d'analyse pour vous.
- Vous souhaitez bénéficier d'un affichage graphique qui indique en détail comment interpréter les résultats.

1. Sélectionnez **Assistant >Analyse graphique**.
2. Sous **Visualiser les relations entre les variables**, cliquez sur **Nuage de points (Groupes)**.
3. Dans la zone **Colonne Y**, saisissez Vc.
4. Dans la zone **Colonne X**, saisissez f.
5. Dans **Nombre de colonnes X**, sélectionnez 1.

6. Dans la zone **X1**, saisissez *Fc*.

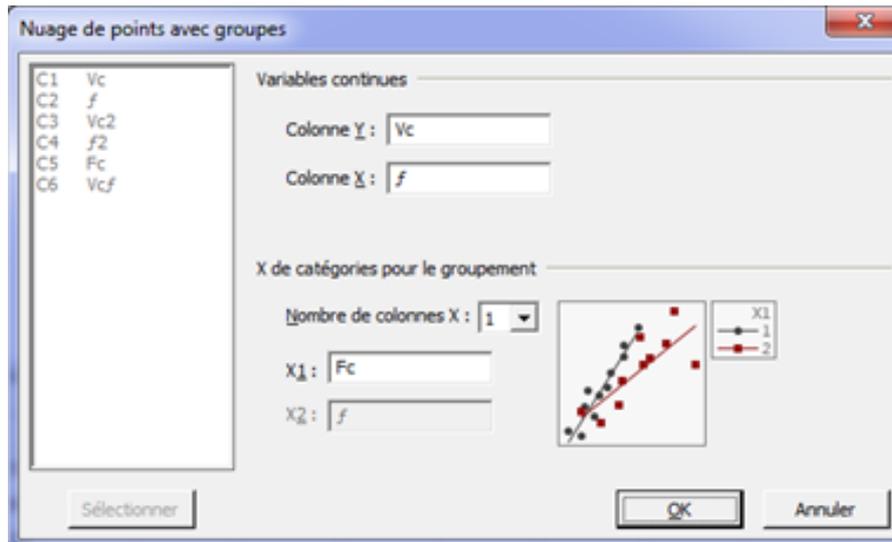


Figure II-5 Création d'un nuage de points avec groupes.

7. Cliquez sur OK.

c. Création d'une présentation graphique

1. Vérifiez que le rapport récapitulatif en nuage de points est actif, puis sélectionnez **Editeur** > **Outil de présentation**

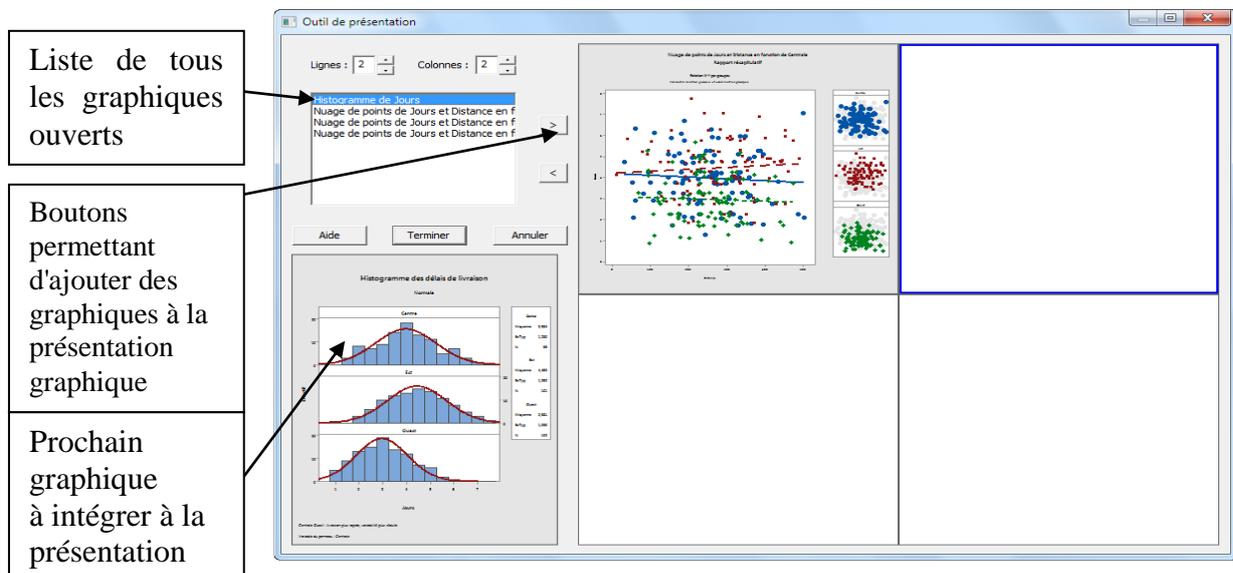


Figure II-6 Le rapport récapitulatif en nuage de points.

2. Pour disposer deux graphiques sur une seule page, dans la zone **Lignes**, saisissez 1.

3. Cliquez sur le rapport récapitulatif et faites-le glisser sur la partie droite de la présentation.

4. Cliquez sur le bouton figurant une flèche vers la droite pour placer le panneau d'histogrammes sur la partie gauche de la présentation.

5. Cliquez sur **Terminer**.

II.3- Ajustement du logiciel Minitab

II.3.1- Exécution d'une Analyse de variance ANOVA

En statistique, l'analyse de la variance (terme souvent abrégé par le terme anglais ANOVA : analysis of variance) [7].

1. Sélectionnez **Stat > ANOVA > A un facteur**.
2. Sélectionnez **Les données de réponse se trouvent dans une colonne pour tous les niveaux de facteurs**.
3. Dans la zone Réponse, saisissez Fc. Dans la zone Facteur, Vc et f.

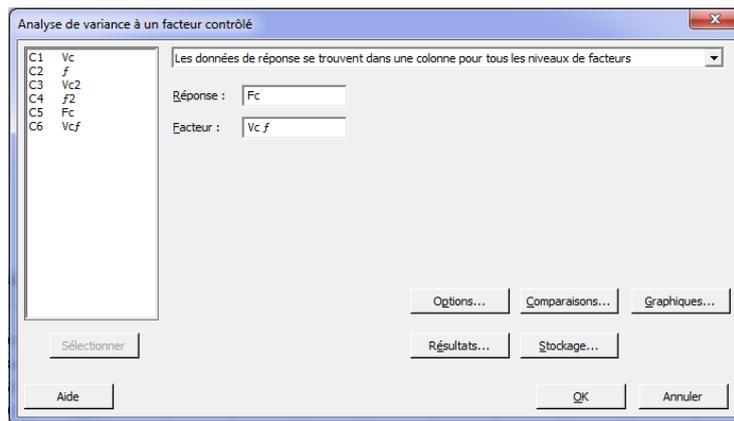


Figure II-7 Analyse de variance contrôlée.

4. Cliquez sur Comparaisons.
5. Sous Procédures de comparaison supposant des variances égales, cochez la case Tukey.

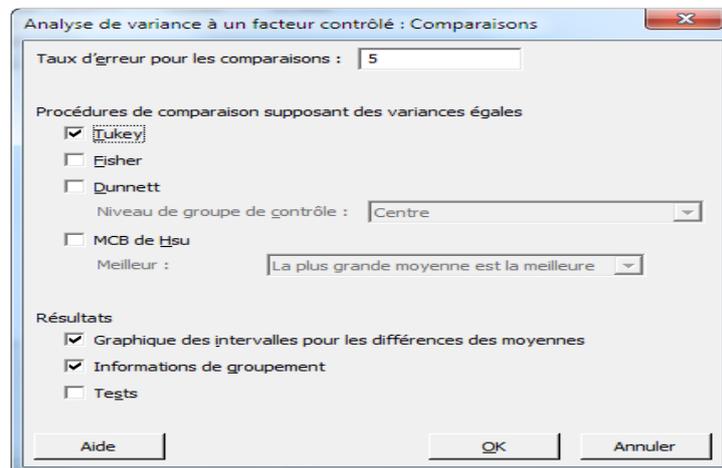


Figure II-8 Procédures de comparaison des variances.

6. Cliquez sur **OK**.
7. Cliquez sur Graphiques.

Pour de nombreuses commandes statistiques, Minitab propose des graphiques qui facilitent l'interprétation des résultats et l'évaluation de la validité des hypothèses statistiques. Ils sont nommés graphiques intégrés [7].

8. Sous Diagrammes de données, cochez les cases Graphique des intervalles, Diagramme des valeurs individuelles et Boîte à moustaches des données.

9. Sous Graphiques des valeurs résiduelles, sélectionnez Quatre en un.

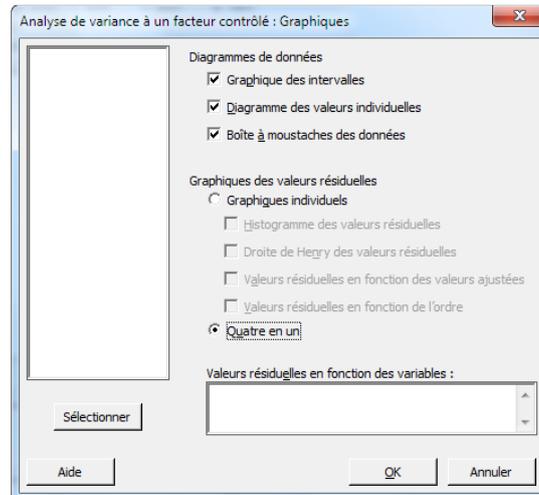


Figure II-9 Interprétation graphique des résultats.

10. Cliquez sur **OK** dans chaque boîte de dialogue.

II.3.2- Analyses de régression

Permet de modéliser la relation entre des prédicteurs de catégorie ou continus et une réponse, et d'utiliser le modèle pour prévoir les valeurs de réponse pour de nouvelles observations. Vous pouvez facilement inclure des termes d'interaction et polynomiaux, transformer la réponse ou utiliser la régression pas à pas si nécessaire [7]. Dans Minitab, sélectionnez **Stat > Régression > Régression > Ajuster le modèle de régression**.

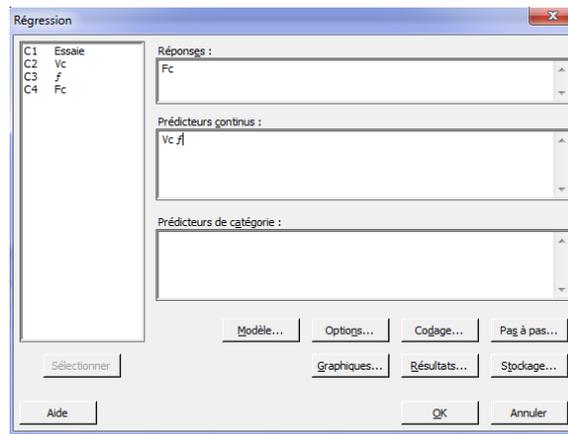


Figure II-10 Analyse de régression

II.3.3- Conception d'un plan d'expériences

Pour entrer et analyser les données d'un plan d'expériences (DOE) dans Minitab, vous devez d'abord créer un plan d'expériences dans la feuille de travail. Minitab propose de nombreux plans [7].

- **Filtrage**

Inclut les plans de Plackett-Burman et de criblage définitifs [7].

- **Factoriel**

Inclut les plans complets à deux niveaux, les plans fractionnaires à deux niveaux, les plans en parcelles divisées (split-plot) et les plans de Plackett-Burman [7].

- **Surface de réponse**

Inclut les plans composites centrés et les plans de Box-Behnken [7].

- **Mélange**

Inclut les plans de mélange centrés, les plans en réseaux et les plans sous contraintes [7].

- **Taguchi**

Inclut les plans à 2, 3, 4 et 5 niveaux, ainsi que les plans à divers niveaux.

Déterminez le plan le plus adapté à votre expérience. Sélectionnez-le ensuite dans le menu **Stat>DOE** (plan d'expériences). Vous pouvez aussi ouvrir la barre d'outils correspondante en sélectionnant **Outils>Barres d'outils**. Une fois que vous avez choisi un plan et ses caractéristiques, Minitab se charge de le créer et de le mémoriser dans la feuille de travail [7].

a. Sélection d'un plan

Vous souhaitez créer un plan factoriel pour étudier la relation entre deux facteurs (le système de traitement des commandes et la procédure d'emballage) et le temps nécessaire à la préparation d'une commande [7].

1. Sélectionnez **Fichier>Nouveau>Projet**.

2. Sélectionnez **Stat>DOE** (plan d'expériences) >**Plan factoriel>Créer un plan factoriel**.

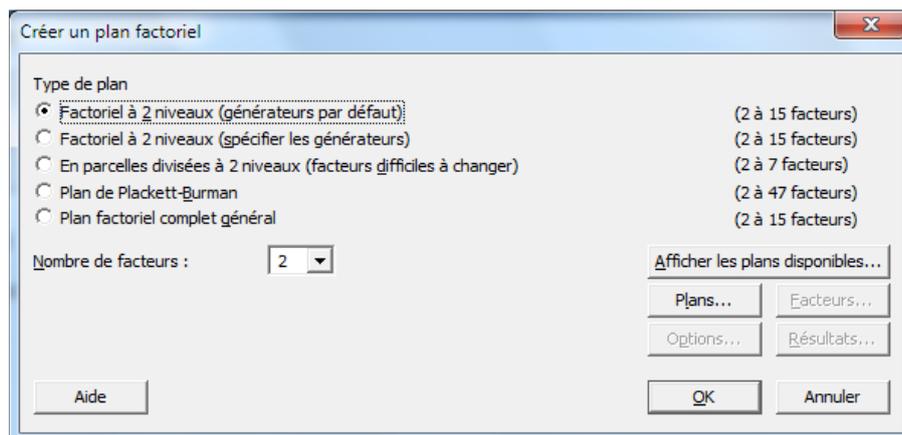


Figure II-11 Création d'un plan factoriel.

Lorsque vous créez un plan dans Minitab, seuls deux boutons sont activés, à savoir Afficher les plans disponibles et Plans. Les autres boutons deviennent disponibles dès que la sous-boîte de dialogue Plans a été complétée [7].

3. Cliquez sur **Afficher les plans disponibles**.

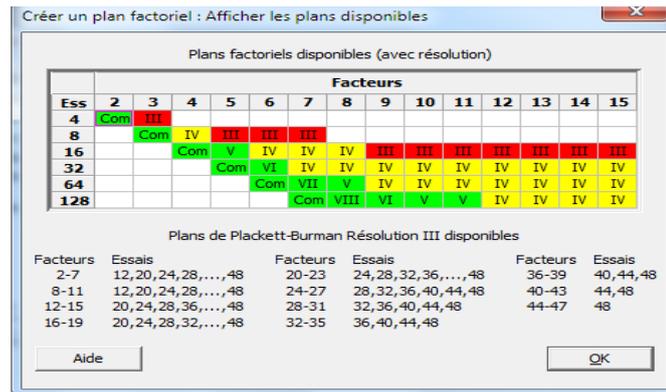


Figure II-12 Affichage des plans disponibles.

Pour la plupart des plans, Minitab affiche tous les plans possibles et le nombre d'essais nécessaires dans la boîte de dialogue Afficher les plans disponibles [7].

4. Cliquez sur **OK** pour revenir à la boîte de dialogue principale.

5. Sous **Type de plan**, sélectionnez **Factoriel à 2 niveaux (générateurs par défaut)**.

6. Dans **Nombre de facteurs**, sélectionnez **2**.

7. Cliquez sur **Plans**.

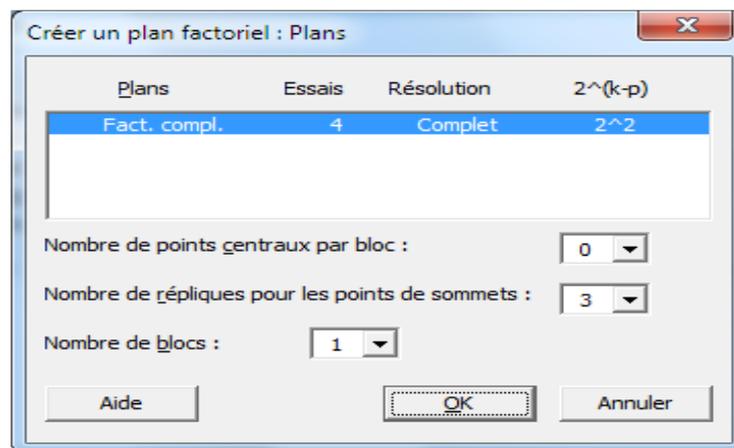


Figure II-13 Sélection d'un plan.

La zone située dans la partie supérieure de la boîte de dialogue indique les plans disponibles pour ce type de plan et le nombre de facteurs que vous avez choisis. Dans cet exemple, comme vous utilisez un plan factoriel avec deux facteurs, vous n'avez qu'une option : un plan factoriel complet avec quatre essais expérimentaux. Il existe 2^2 (ou quatre) combinaisons de facteurs possibles pour un plan à deux niveaux avec deux facteurs [7].

8. Dans **Nombre de répliques pour les points de sommets**, sélectionnez **3**.

9. Cliquez sur **OK** pour revenir à la boîte de dialogue principale.

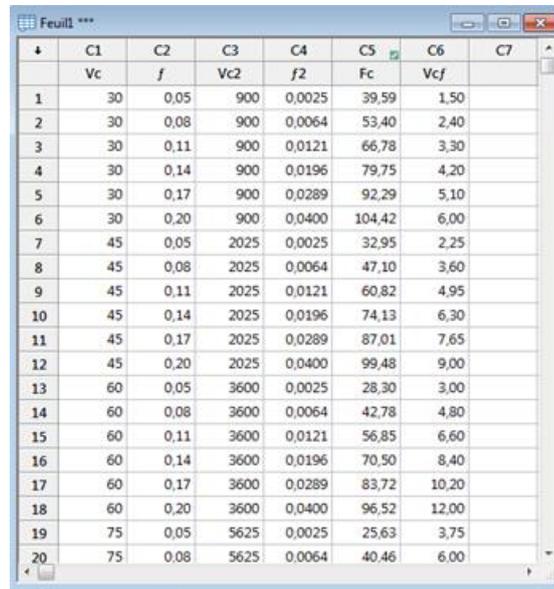
Tous les boutons sont maintenant disponibles.

10. Cliquez sur **OK** pour revenir à la boîte de dialogue principale.

b. Saisie des données dans la feuille de travail

Une fois que vous avez réalisé l'expérience et recueilli les données, vous pouvez saisir ces dernières dans la feuille de travail. La caractéristique mesurée est appelée réponse [7].

Dans cet exemple, vous mesurez Fc (effort de coupe).



	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	Vc	f	Vc2	f2	Fc	Vcf	
1	30	0,05	900	0,0025	39,59	1,50	
2	30	0,08	900	0,0064	53,40	2,40	
3	30	0,11	900	0,0121	66,78	3,30	
4	30	0,14	900	0,0196	79,75	4,20	
5	30	0,17	900	0,0289	92,29	5,10	
6	30	0,20	900	0,0400	104,42	6,00	
7	45	0,05	2025	0,0025	32,95	2,25	
8	45	0,08	2025	0,0064	47,10	3,60	
9	45	0,11	2025	0,0121	60,82	4,95	
10	45	0,14	2025	0,0196	74,13	6,30	
11	45	0,17	2025	0,0289	87,01	7,65	
12	45	0,20	2025	0,0400	99,48	9,00	
13	60	0,05	3600	0,0025	28,30	3,00	
14	60	0,08	3600	0,0064	42,78	4,80	
15	60	0,11	3600	0,0121	56,85	6,60	
16	60	0,14	3600	0,0196	70,50	8,40	
17	60	0,17	3600	0,0289	83,72	10,20	
18	60	0,20	3600	0,0400	96,52	12,00	
19	75	0,05	5625	0,0025	25,63	3,75	
20	75	0,08	5625	0,0064	40,46	6,00	

Figure II-14 Saisie des données dans la feuille de travail.

Vous pouvez saisir des données dans toutes les colonnes, sauf celles qui contiennent des informations sur le plan [7].

Vous pouvez aussi entrer plusieurs réponses pour une seule expérience à raison d'une réponse par colonne [7].

c. Ajustement d'un modèle

Comme la feuille de travail contient un plan factoriel, Minitab active les commandes de menu **DOE (plan d'expériences) > Plan factoriel, Analyser un plan factoriel** et **Diagrammes factoriels**. Dans cet exemple, vous commencez par ajuster le modèle [7].

1. Sélectionnez **Stat >DOE (plan d'expériences)>Plan factoriel >Analyser un plan factoriel**.
2. Dans la zone **Réponses**, saisissez Fc.

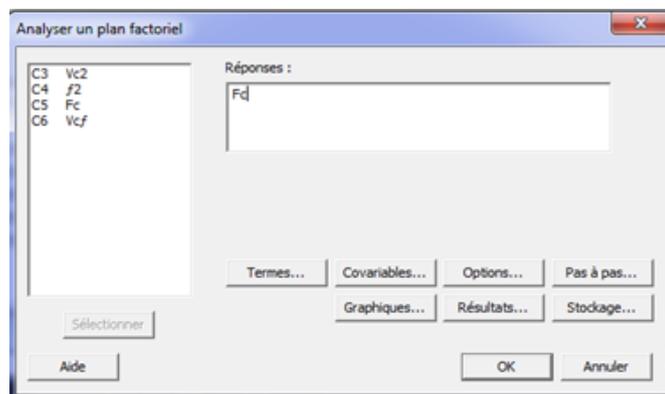


Figure II-15 Ajustement d'un modèle.

3. Cliquez sur **Termes**. Vérifiez que **A : Vc**, **B : f** et **AB** apparaissent dans la zone **Termes sélectionnés**.

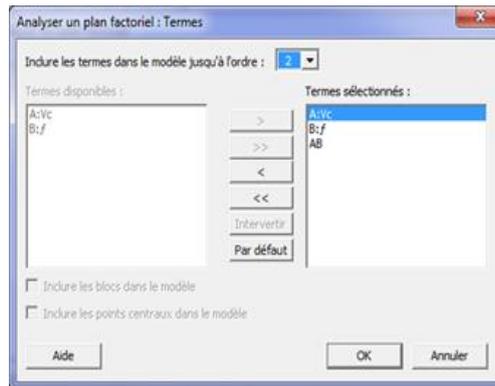


Figure II-16 Vérification des termes sélectionnés.

Lorsque vous analysez un plan, utilisez toujours la sous-boîte de dialogue Termes pour sélectionner les termes à inclure dans le modèle. Vous pouvez ajouter ou supprimer des facteurs et des interactions à l'aide des flèches.

Utilisez les cases à cocher pour inclure des blocs et des points centraux dans le modèle.

4. Cliquez sur **OK**.

5. Cliquez sur **Graphiques**.

6. Sous Diagrammes des effets, sélectionnez **Pareto** et **Normale**.

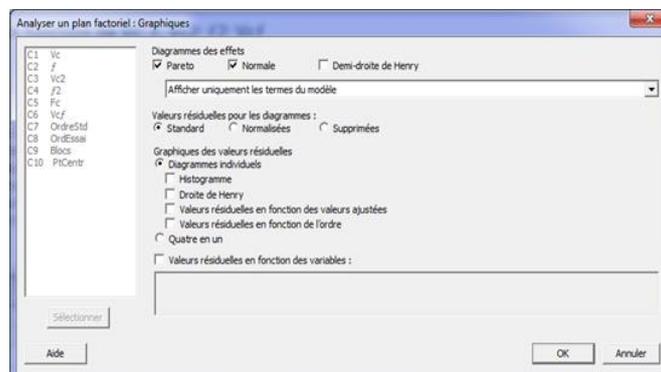


Figure II-17 Sélection des diagrammes des effets.

Les diagrammes des effets ne sont disponibles que pour les plans factoriels. Les graphiques des valeurs résiduelles, qui permettent de vérifier les hypothèses du modèle, peuvent être affichés pour tous les types de plans [7].

7. Cliquez sur **OK** dans chaque **boîte de dialogue**.

Minitab ajuste le modèle indiqué dans la sous-boîte de dialogue Termes, affiche les résultats dans la fenêtre Session et stocke le modèle dans le fichier de feuille de travail. Une fois que vous avez identifié un modèle acceptable, vous pouvez utiliser le modèle stocké pour vos analyses ultérieures [7].

d. Interprétation des diagrammes des effets

Vous pouvez également évaluer la droite de Henry et le diagramme de Pareto des effets normalisés pour connaître les effets qui influent sur la réponse, Fc.

1. Pour afficher la droite de Henry, sélectionnez **Fenêtre>Diagramme des effets pour Heures**.

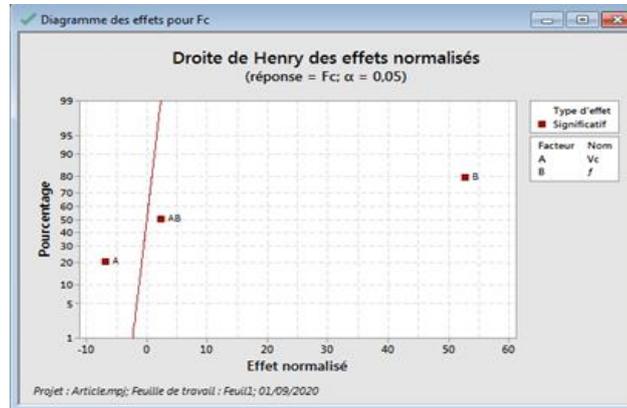


Figure II-18 Interprétation de la droite de Henry.

Les carrés indiquent les termes significatifs. Les termes Système de Vc (A), f(B) et Vc*f (AB) sont significatifs parce que leur valeur de p est inférieure au niveau d' α (0,05).

2. Pour afficher le diagramme de Pareto, sélectionnez **Fenêtre>Diagramme de Pareto des effets pour Fc**.

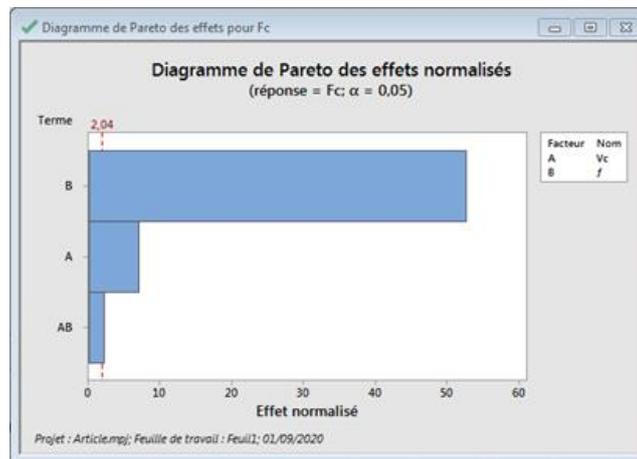


Figure II-19 Interprétation du diagramme de Pareto.

Dans ce diagramme, Minitab affiche la valeur absolue des effets du diagramme de Pareto. Tous les effets allant au-delà de la ligne de référence sont significatifs. Les termes Vc (A), f(B) et Vc*f(AB) sont tous significatifs.

e. Créer des diagrammes factoriels

Utilisez le modèle stocké pour créer un graphique des effets principaux et un diagramme des interactions, afin de visualiser les effets [7].

1. Sélectionnez **Stat >DOE (plan d'expériences) >Plan factoriel >Diagrammes factoriels**.

2. Vérifiez que les variables, Système de commande et Emballage apparaissent dans la zone Sélectionnées.

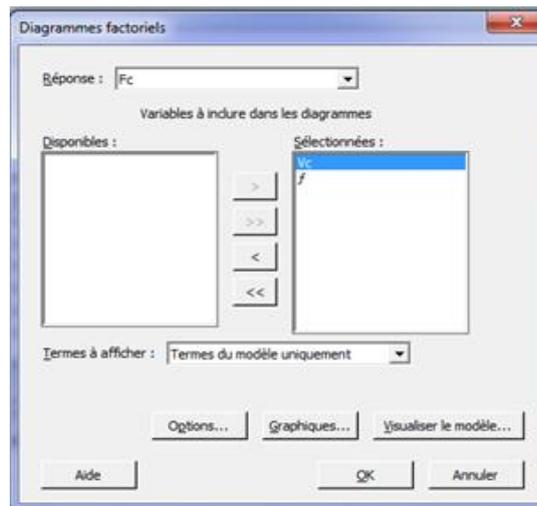


Figure II-20 Création des diagrammes factoriels.

3. Cliquez sur **OK**.

II.3.4- Enregistrement d'un projet Minitab

Les données Minitab sont enregistrées dans des feuilles de travail. Vous pouvez également enregistrer des projets Minitab contenant tout votre travail, à savoir feuilles de travail, résultats de la fenêtre Session, graphiques, historique de votre session et paramètres de boîte de dialogue.

1. Sélectionnez **Fichier>Enregistrer le projet sous**.
2. Accédez au dossier dans lequel vous souhaitez enregistrer vos fichiers.
3. Dans la zone **Nom de fichier**, saisissez **Nom du fichier**.
4. Cliquez sur Enregistrer.

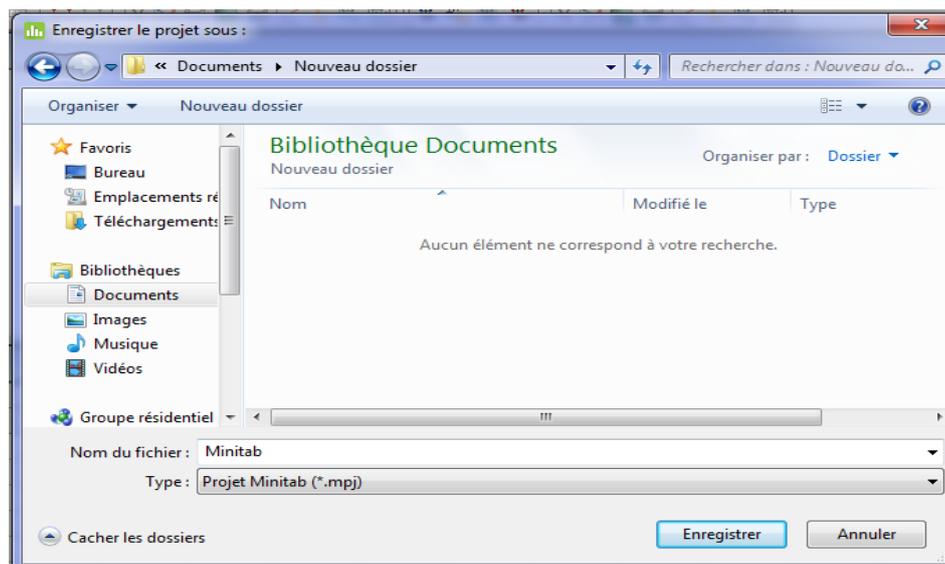


Figure II-21 Enregistrement d'un projet Minitab

II.4- Conclusion

On conclue dans ce chapitre que la plupart des analyses statistiques nécessitent de suivre une série d'étapes reposant souvent sur des connaissances de base ou sur le domaine étudié.

Le logiciel Minitab permet de :

- Analyser des données à l'aide de graphiques.
- Réaliser des analyses statistiques.
- Concevoir un plan d'expériences.
- Présenter les résultats.
- Préparer des feuilles de travail.

Chapitre III
Création et validation d'une
étude sous Minitab

III.1- Introduction

Dans ce chapitre le travail consiste à :

- Présenter un article de recherche sur la Prédiction et optimisation des forces d'usinage avec la méthode oxley, Théorie prédictive et approche RSM lors de l'usinage d'un alliage de tungstène WHA, et refaire une étude théorique avec le logiciel Minitab 18 puis faire une étude comparative entre les résultats expérimentaux et les résultats théoriques.
- Refaire une étude théorique d'une application sur un acier 100Cr6 faite dans une thèse doctorat par Hicham Chibane.

III.2- Prédiction et optimisation des forces d'usinage suivant la méthode d'oxley

Le travail se concentre sur la détermination de bonne combinaison de paramètres de coupe pour obtenir la force de coupe optimale lors de l'usinage des WHA. Cependant, cela nécessite un vaste test expérimental coûteux et long. Ce papier utilise le modèle analytique prédictif d'Oxley pour prédire forces sous différentes combinaisons de vitesse et d'avance. La coupe les forces ainsi prévues sont prises en compte pour l'optimisation de la coupe paramètres (vitesse de coupe et avance) à l'aide de méthodologie de surface de réponse (RSM) [8].

III.2.1- La partie expérimentale

Le matériau de la pièce est un alliage de tungstène (95 WHA), la composition chimique a été déterminé par spectrométrie à rayon x, sa dureté est de 200 HV [8].

Tableau III-1 Composition chimique du matériau utilisé [8].

Propriétés	95 WHA		
Composition	Fe	Ni	W
	2	3	95
Densité (g / cm ³)	17.5		
Dureté (HRC)	32.3		
Limite d'élasticité (Mpa)	300		

La machine utilisée est un tour type CNC (HMT PTC200) avec vitesse de broche allant de 100 à 4000 tr / min, l'outil est en plaquettes en carbure non revêtu CNMG120408, l'usinage est fait à sec [8].



Figure III-1 Vue photographique du montage expérimental [8].

Des essais d'usinage ont été effectués suivant les conditions suivantes :

Tableau III-2 Conditions d'essai pour la validation expérimentale [8].

N° Teste	Vc (m/min)	f (mm/tr)
01	70	0.10
02	50	0.10
03	30	0.10
04	50	0.05
05	50	0.15

III.2.2- Présentation du model d'Oxley

Oxley est le premier à présenter une approche thermomécanique de l'usinage. Le modèle donne, en fonction des conditions de coupe, les efforts et les températures moyennes dans les zones primaires et secondaires ainsi que la géométrie du copeau (longueur de contact et épaisseur du copeau) [8].

Son modèle comprend une partie mécanique et une partie thermique issue des travaux de Boothroyd (1963). Le modèle s'appuie sur deux observations fondamentales faites à partir de micrographies [8] :

- Le cisaillement primaire s'effectue dans une zone d'une certaine épaisseur.
- Le copeau s'écoule le long de la face de coupe de l'outil, ce qui induit une zone de cisaillement secondaire d'épaisseur constante.

III.2.3- Approche RSM (Méthodologie de surface de réponse)

Dans une opération de tournage, il existe un grand nombre de facteurs qui peut être considéré comme les paramètres de coupe qui affectent la sortie des variables. Mais, la littérature montre que la vitesse de coupe et la vitesse d'avance sont les paramètres de coupe les plus tourner des matériaux durs. Dans les travaux de Chithajalu Kiran Sagar, ces deux paramètres ont

été sélectionnés comme facteurs d'étude en conservant les paramètres restants constants sur le domaine expérimental. Etude à deux facteurs avec six niveaux ont été pris pour chaque facteur, ce qui donne un total de 36 essais. La variable de sortie considérée pour l'optimisation dans le cas présent est la force de coupe [8].

La conception factorielle (FFD) a été prédite à l'aide du modèle développé basé sur la théorie d'Oxley. Cette approche réduit le besoin de tests expérimentaux considérablement, économisant ainsi une grande partie du temps, argent et matériel. Les niveaux de paramètres de coupe pour les expériences figurent dans le Tableau III-2 [8].

Tableau III-3 Niveaux d'expériences et sortie des paramètres de coupe prévus par le modèle d'Oxley [8].

Sortie N°	Facteur	Unité	Niveau					
			1	2	3	4	5	6
01	Vc	m/min	30	45	60	75	90	105
02	f	mm/tr	0.05	0.08	0.11	0.14	0.17	0.20

L'approche RSM a été utilisée pour l'optimisation de l'usinage de WHA avec 95 % de teneur en tungstène. RSM est un outil de modélisation qui adapte à la fois mathématique et statistique techniques pour optimiser le rendement souhaité en établissant les relations entre les variables indépendantes et la réponse variables de sortie dans l'espace de conception [8].

L'équation de régression, comme indiqué ci-dessous, a été développée pour démontrer l'effet des paramètres du processus sur les forces de coupe. Où b est le coefficient de régression [8].

$$Fc = b_0 + b_1 Vc + b_2 f + b_{11} Vc^2 + b_{22} f^2 + b_{12} Vc f \quad (\text{III.2})$$

Afin d'identifier la contribution de chaque paramètre de coupe, La table ANOVA a été développée et la combinaison optimale a été identifiée en traçant un tracé de distribution normale. Les paramètres optimaux ont été validés par des expériences de confirmation. L'intervalle de confiance pour la combinaison optimale est donné comme suit [8].

$$I.C = Y_{opt} \pm Z \frac{s}{\sqrt{M}} \quad (\text{III.3})$$

Tel que :

I.C : Intervalle de confiance.

Y_{opt} : Valeur optimale de sortie.

Z : Diamètre initial de la pièce.

M : Distribution standard normal.

s : Déviation standard de chaque facteur.

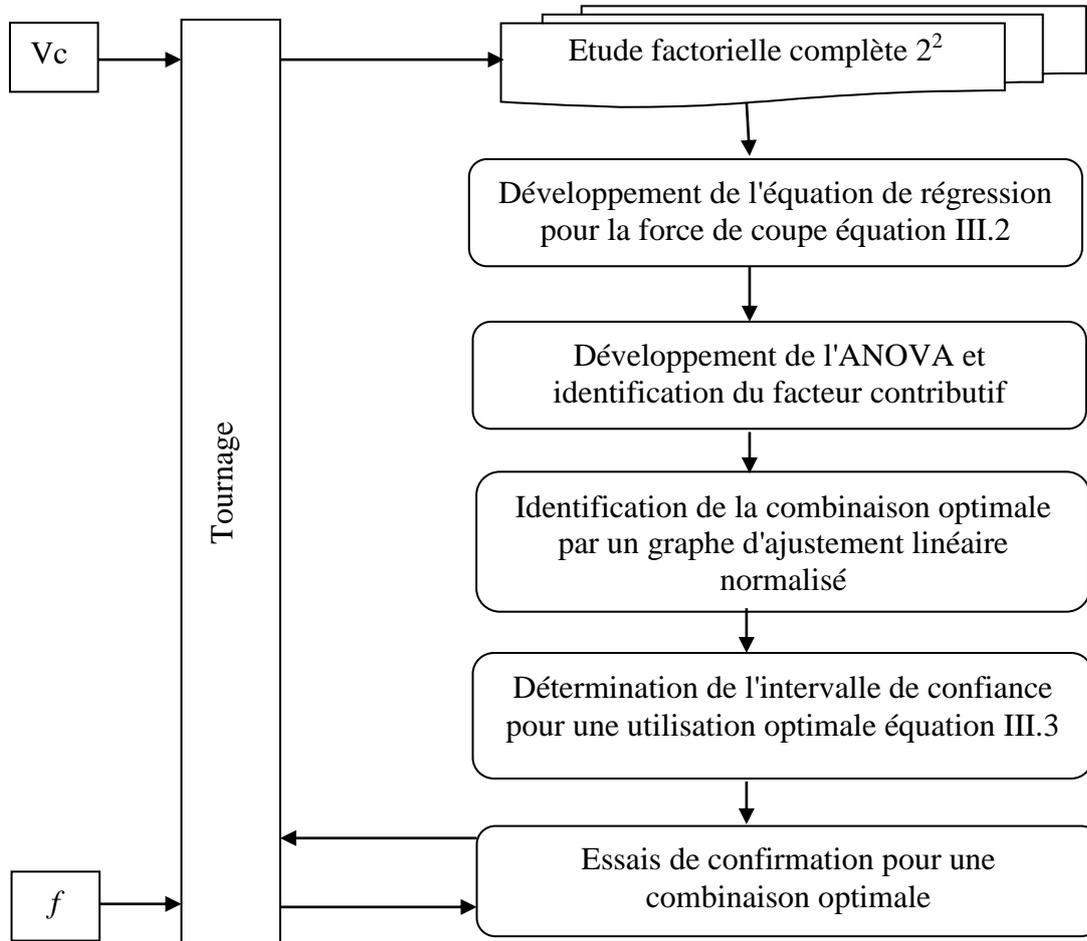


Figure III-2 Organigramme de la stratégie mise en œuvre pour RSM [8].

III.2.4- Résultats expérimentaux

Le tournage est effectué à sec en faisant varier la vitesse de coupe et la vitesse d'avance à une profondeur de coupe constante de 0,15 mm. La figure III.3 montre l'effet de la vitesse de coupe et de la vitesse d'avance sur trois variables de sortie, à savoir la force de coupe, la rugosité de surface et l'usure en dépouille pendant l'usinage de 95 WHA [8].

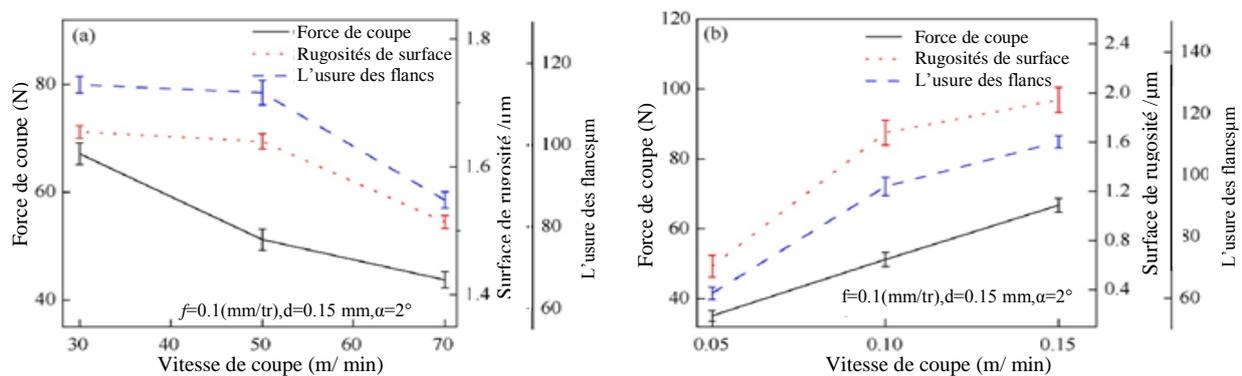


Figure III-3 Effet de la vitesse de coupe et de la vitesse d'avance sur la force de coupe, la rugosité de surface et l'usure en dépouille [8].

III.2.5- Optimisation en utilisant l'approche RSM

Les forces de coupe ont été prédites à l'aide du modèle d'Oxley pour 2⁶ FFD et présentées dans le Tableau III-3[8].

Tableau III-4 Forces de coupes prévues à partir du modèle d'Oxley [8].

Teste N°	Vc (m/min)	f (mm/tr)	Fc (N)
1	30	0,05	39,59
2	30	0,08	53,4
3	30	0,11	66,78
4	30	0,14	79,75
5	30	0,17	92,29
6	30	0,2	104,42
7	45	0,05	32,95
8	45	0,08	47,1
9	45	0,11	60,82
10	45	0,14	74,13
11	45	0,17	87,01
12	45	0,2	99,48
13	60	0,05	28,3
14	60	0,08	42,78
15	60	0,11	56,85
16	60	0,14	70,5
17	60	0,17	83,72
18	60	0,2	96,52
19	75	0,05	25,63
20	75	0,08	40,46
21	75	0,11	54,86
22	75	0,14	68,85
23	75	0,17	82,41
24	75	0,2	95,55
25	90	0,05	24,94
26	90	0,08	40,11
27	90	0,11	54,86
28	90	0,14	69,18
29	90	0,17	83,09
30	90	0,2	96,57
31	105	0,05	26,24
32	105	0,08	41,75
33	105	0,11	56,84
34	105	0,14	71,5
35	105	0,17	85,75
36	105	0,2	99,57

Dans ce travail, le logiciel statistique Mini Tab (version 16) a été utilisé pour développer les équations de réponse et évaluer les valeurs des coefficients. L'équation empirique statistique a été développée pour la force de coupe comme variable de sortie en utilisant uniquement les coefficients significatifs, comme indiqué ci-dessous [8].

$$Fc = 40 - 0.8110Vc + 468.1f + 0.004415Vc^2 - 234.2f^2 + 0.755Vcf \quad (\text{III.4})$$

Les valeurs de R^2 sont déterminées pour le modèle proposé à l'aide de RSM et présentées dans le Tableau III.5. On observe que le R^2 prévu est en bon accord avec le R^2 ajusté. De plus la valeur R^2 est élevée et plus proche de l'unité ce qui est souhaitable [8].

Tableau III-5 Résumé de l'analyse de régression [8].

Réponse	Valeur S	R^2 %	R^2 ajusté%
Fc (N)	1.078	99.76	99.92

L'analyse de variance (ANOVA) et le test du rapport F ont été effectués pour vérifier l'adéquation des modèles ainsi que la signification des coefficients de modèle individuels. Le tableau III-5 présente le tableau ANOVA pour le modèle du second ordre proposé pour la force de coupe en Equation (III.4). A partir des valeurs P du modèle de force de coupe, on peut observer que les effets linéaires, carrés et d'interaction sont significatifs. Cela indique que les termes du modèle ont un effet significatif sur la réponse. En outre, le carré moyen ajusté pour l'erreur résiduelle s'est avéré être l'unité, ce qui est souhaitable car cela signifie qu'il ne manque pas d'ajustement [8].

Tableau III-6 Analyse de la variance pour la force de coupe [8].

La source	DF	Adj SS	Adj MS	Valeur F	P-Valeur
Régression	5	14680.8	293.2	3002.31	0,000
Linéaire	2	14414,5	7207,2	7379,58	0,000
Carré	2	231,0	115,5	118,12	0,000
Interaction	1	35,3	35,3	36,12	0,000
Erreur résiduelle	30	29.3	1.0		
total	35	14710.2			

III.3- Etude comparative

Nous avons refait la même démarche sur Minitab 18, nous avons obtenue l'équation suivante :

$$Fc = 36,0080 - 0,811182 Vc + 467,984f + 0,004411Vc^2 - 233,962f^2 + 0,755791Vcf \quad (\text{III.5})$$

Tableau III-7 Tableau comparatif des efforts de coupes expérimentaux et celles prédites par Minitab.

Essaie	Fc 1 (N)	Fc 2 (N)	Fc 3 (N)	Ecart 1	Ecart 2
1	39,59	43,5955	39,5904215	4,0055	0,0004215
2	53,4	57,40462	53,3977016	4,00462	-0,0022984
3	66,78	70,79218	66,7838501	4,01218	0,0038501
4	79,75	83,75818	79,748867	4,00818	-0,001133
5	92,29	96,30262	92,2927523	4,01262	0,0027523
6	104,42	108,4255	104,415506	4,0055	-0,004494
7	32,95	36,963625	32,95190975	4,013625	0,00190975
8	47,1	51,112495	47,0992958	4,012495	-0,0007042
9	60,82	64,839805	60,82555025	4,019805	0,00555025
10	74,13	78,145555	74,1306731	4,015555	0,0006731
11	87,01	91,029745	87,01466435	4,019745	0,00466435
12	99,48	103,492375	99,477524	4,012375	-0,002476
13	28,3	32,3185	28,298348	4,0185	-0,001652
14	42,78	46,80712	42,78584	4,02712	0,00584
15	56,85	60,87418	56,8522004	4,02418	0,0022004
16	70,5	74,51968	70,4974292	4,01968	-0,0025708
17	83,72	87,74362	83,7215264	4,02362	0,0015264
18	96,52	100,546	96,524492	4,026	0,004492
19	25,63	29,660125	25,62973625	4,030125	-0,00026375
20	40,46	44,488495	40,4573342	4,028495	-0,0026658
21	54,86	58,895305	54,86380055	4,035305	0,00380055
22	68,85	72,880555	68,8491353	4,030555	-0,0008647
23	82,41	86,444245	82,41333845	4,034245	0,00333845
24	95,55	99,586375	95,55641	4,036375	0,00641
25	24,94	28,9885	24,9460745	4,0485	0,0060745
26	40,11	44,15662	40,1137784	4,04662	0,0037784
27	54,86	58,90318	54,8603507	4,04318	0,0003507
28	69,18	73,22818	69,1857914	4,04818	0,0057914
29	83,09	87,13162	83,0901005	4,04162	0,0001005
30	96,57	100,6135	96,573278	4,0435	0,003278
31	26,24	30,303625	26,24736275	4,063625	0,00736275
32	41,75	45,811495	41,7551726	4,061495	0,0051726
33	56,84	60,897805	56,84185085	4,057805	0,00185085
34	71,5	75,562555	71,5073975	4,062555	0,0073975
35	85,75	89,805745	85,75181255	4,055745	0,00181255
36	99,57	103,627375	99,575096	4,057375	0,005096

Le Tableau III-7 est un récapitulatif des efforts de coupe des différents essaie Telles que :

Fc 1 (N) : Force de coupe expérimentale.

Fc 2 (N) : Force de coupe déterminée à partir de l'équation (III.5).

Fc 3 (N) : Force de coupe déterminée à partir de l'équation (III.6).

Ecart 1 : Différence entre Fc 2 et Fc 1.

Ecart 2 : Différence entre Fc 2 et Fc 1.

Tableau III-8 Résumé de nouvelle analyse de régression

Réponse	Valeur S	R ² %	R ² ajusté %
Fc (N)	0.0030728	100 %	100 %

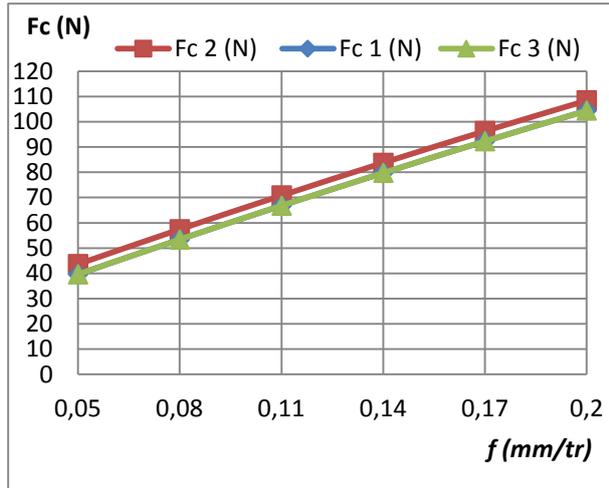


Figure III-4 Evolution de Fc en fonction de *f* avec *Vc*= 30 m/min

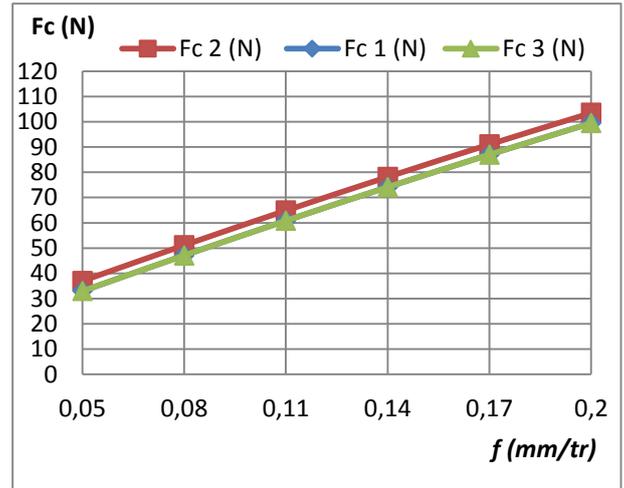


Figure III-5 Evolution de Fc en fonction de *f* avec *Vc*= 45 m/min

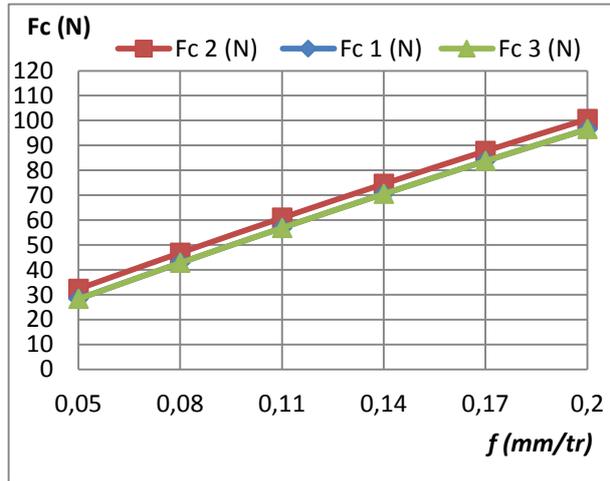


Figure III-6 Evolution de Fc en fonction de *f* avec *Vc*= 60 m/min

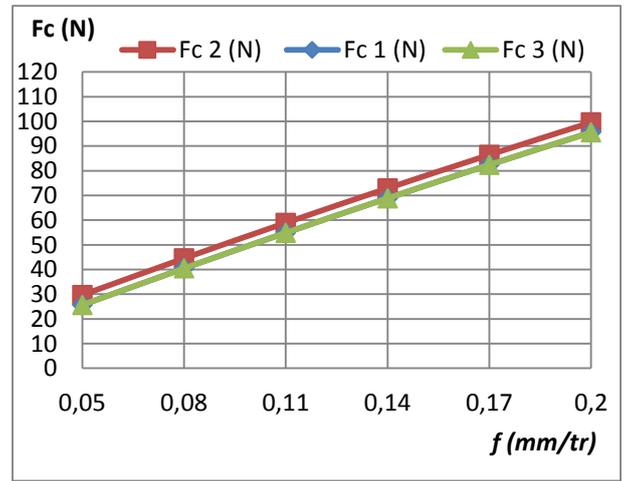


Figure III-7 Evolution de Fc en fonction de *f* avec *Vc*= 75 m/min

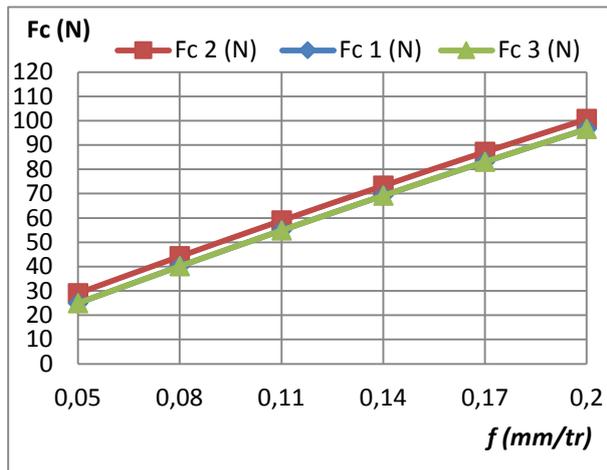


Figure III-9 Evolution de Fc en fonction de f avec $V_c = 90$ m/min

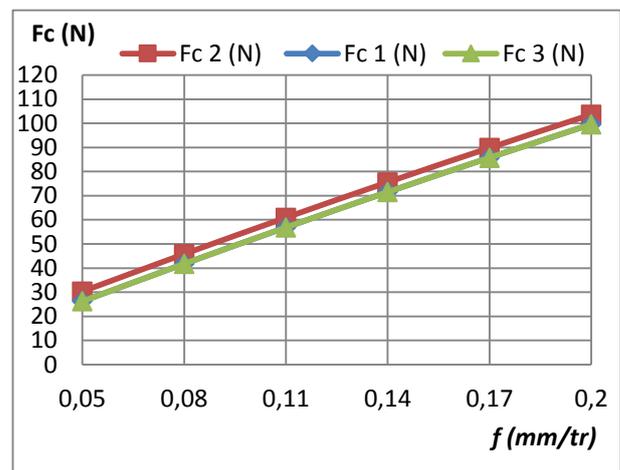


Figure III-8 Evolution de Fc en fonction de f avec $V_c = 105$ m/min

Les Figure III-4, III-5, III-6, III-7, III-8 et III-9, montre l'évolution des différents efforts de coupe en fonction des L'avance par tour.

Tel que :

Fc 1 (N) : Force de coupe expérimentale.

Fc 2 (N) : Force de coupe déterminée à partir de l'équation (III.5).

Fc 3 (N) : Force de coupe déterminée à partir de l'équation (III.6).

On remarque que la courbe des efforts de coupe Fc 3 déterminé par l'équation (III.6) est superposé sur la courbe des efforts de coupe Fc 2 parce que la valeur de R^2 ajusté est 100%.

On constate que l'effort de coupe Fc augmente à chaque fois l'avance par tour augmente, contrairement à l'effort de coupe Fc diminue à chaque fois la vitesse de coupe augmente.

III.4- Application sur un acier 100Cr6

III.4.1- Environnement expérimental

Dans cette partie nous allons présenter une partie d'expérience faite par Hicham Chibane, l'objectif de son étude est, d'une part d'étudier les effets des paramètres de coupe (vitesse de coupe, profondeur de passe et avance par tour) sur l'état de surface des pièces usinées, la productivité, les efforts de coupe, la dynamique de la coupe et, d'autre part de choisir les paramètres de coupe optimaux en tournage d'un acier (100Cr6) pour une configuration choisie à partir d'un minimum d'essais.

Les essais d'usinage ont été réalisés sur un tour à commande numérique type "SOMAB Unimab" 500 d'une puissance de 24 kW et ayant une vitesse de rotation maximale de 2500 tr/min comme le montre la Figure III-10 [2].



Figure III-10 Machine utilisée (Tour SOMAB 500) [2].

Au cours de ces essais, le matériau utilisé est un acier 100Cr6. C'est un acier allié ayant une résistance d'environ 850 Mpa et une dureté de 217 HB. Il peut être utilisé à l'état traité, recuit ou trempé pour la fabrication de roulement à billes [2].

La plaquette utilisée est de géométrie CNMG M5 d'utilisation générale de rayon 0,8 mm (voir annexe 2), montée sur un porte plaquette DCLN2525M12. C'est une géométrie dédiée à une large plage d'utilisation. Figure III-11 [2].



Figure III-11 Plaquette utilisée (CNMG M5) [2].

III.4.2- Résultats expérimentaux

Les données ont été réorganisées par bloc dans le but d'une meilleure interprétation des résultats comme le montre le Tableau III-9.

Tableau III-9 Résultats expérimentaux [2].

a	f	Vc	Fc expérimentale
1	0,15	100	547
1	0,15	200	480
1	0,15	300	455
1	0,3	100	904
1	0,3	200	820
1	0,3	300	806
1	0,45	100	1159
1	0,45	200	1033
1	0,45	300	994
1,5	0,15	100	750
1,5	0,15	200	682
1,5	0,15	300	696
1,5	0,3	100	1250
1,5	0,3	200	1145
1,5	0,3	300	1135
1,5	0,45	100	1675
1,5	0,45	200	1645
1,5	0,45	300	1650
2	0,15	100	955
2	0,15	200	866
2	0,15	300	950
2	0,3	100	1500
2	0,3	200	1488
2	0,3	300	1455
2	0,45	100	2315
2	0,45	200	2192
2	0,45	300	2172

III.4.3- Etude théorique de l'expérience

A partir des données du Tableau III-9, on va établir une équation de régression de la force de coupe avec le logiciel Minitab 18 afin de faire une comparaison entre l'effort de coupe expérimentale et théorique.

L'équation de régression établie est la suivante :

$$F_c = 427 + 9.2 * a - 524 * f - 1.892 * Vc + 0.00370Vc^2 + 2449 * a * f \quad (III.6)$$

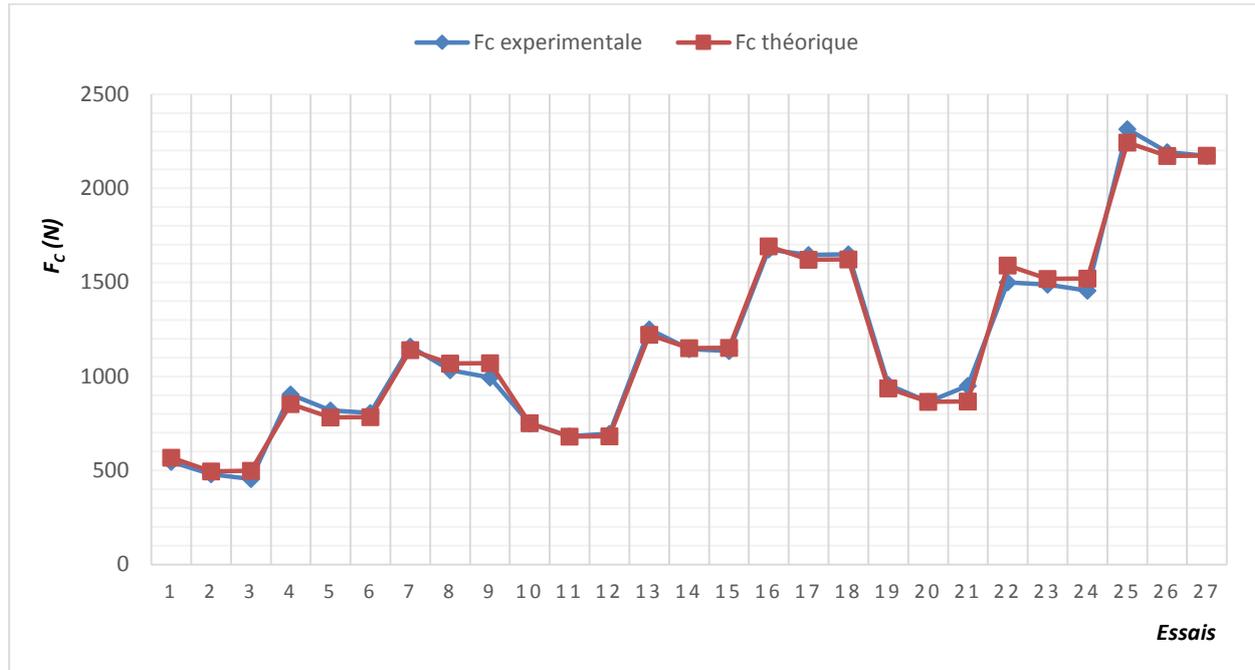


Figure III-12 comparaison expérimentale /théorique des efforts de coupe Fc.

La Figure III-12 montre la comparaison entre les résultats expérimentaux et le modèle théorique de régression, on remarque que les résultats sont très proches.

III.5- Conclusion

Dans ce chapitre Nous avons présenté les travaux de Chithajalu Kiran Sagar en référence [8] , et une partie d'expérience de Hicham Chibane en référence [2], nous avons expliqué leurs démarches puis les résultats obtenus en utilisant le logiciel Minitab.

Nous avons refait les études en introduisant les mêmes valeurs de d'entrée et de sortie.

Nous avons obtenu des nouvelles équations qui se rapproche plus des résultats expérimentaux.

Cette étape nous a permis de mieux maitriser le logiciel Minitab 18.

Chapitre IV

Modélisation de la force de coupe en coupe orthogonale

IV.1- Introduction

Dans ce chapitre nous allons faire une étude théorique à l'aide du logiciel Minitab18 d'une expérience faite par nos collègues Mansouri et Khima.

Notre travail consiste à :

- Trouver un modèle qui donne la force de coupe F_c en fonction des conditions de coupe (V_c, f).
- Trouver les paramètres V_c et f qui donnent le Max de F_c et le Min de F_c .
- Une étude comparative entre les résultats expérimentaux et théorique issue de notre modélisation.

IV.2- Partie expérimentale

Une opération d'usinage de gorge a été effectuée sur une pièce de 195 mm en acier faiblement allié 42CrMo4 figurante dans la Figure IV-1, l'opération consiste à réaliser 10 gorge de 10 mm à une profondeur de 5 mm.

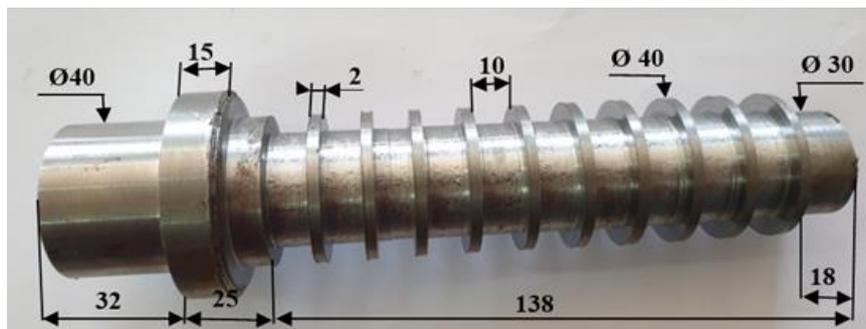


Figure IV-1 Pièce usinée.

L'opération nécessite une série de test expérimental sur un tour parallèle développant une puissance de 7000 W en utilisant la méthode de coupe orthogonale, avec un outil de coupe en carbure non revêtu.



Figure IV-2 Plaquette en carbure non revêtu



Figure IV-3 Tour parallèle conventionnelle type SN 50 du hall de technologie.

Les tests expérimentaux ont été effectués par des différents paramètres de coupe sur plusieurs positions de la pièce. Le travail se concentre sur la détermination des forces de coupe lors de l'usinage.

Les résultats expérimentaux pour l'effort de coupe donnés dans le Tableau IV-1 ont été obtenus par les relations du modèle mécanique de Merchant.

Tableau IV-1 Résultats expérimentales.

		<i>f</i> (mm/tr)		
		0.08	0.12	0.2
Position	Vc (m/min)	Fc (N)		
N°1 38 mm	60	263,45	536,19	3404,49
	80	286,09	743,89	1948,15
N°2 50 mm	60	247,39	508,63	2058,23
	80	275,71	659,14	1070,13
N°3 62 mm	60	246,08	508,63	2560,8
	80	260,14	630,3	1316,32
N°4 74 mm	60	244,53	446,73	2018,13
	80	256,84	508,94	1616,5
N°5 86 mm	60	244,53	446,73	2018,13
	80	251,05	493,11	1788,2
N°6 98 mm	60	293,24	446,73	1665,15
	80	248,61	493,11	4959,11
N°7 110 mm	60	243,84	426,71	1114
	80	247,29	438,47	4959,11
N°8 122 mm	60	242,65	402,53	1022
	80	245,88	442,03	5055,01
N°9 134 mm	60	244,69	392,38	914,9
	80	252,6	411,23	5432,42
N°10 146 mm	60	248,82	372,2	878,87
	80	259,36	392,46	4530,13

IV.3- Etude théorique

Dans cette partie, le logiciel Minitab (version 18) a été utilisé pour développer l'équation de réponse et évaluer les valeurs des coefficients. L'équation empirique statistique a été développée pour la force de coupe comme variable de sortie en utilisant les données du Tableau IV.1.

IV.3.1-Analyse de variance

ANOVA est une méthode statistique qui permet de déterminer l'interaction individuelle de tous les facteurs contrôlés dans un plan d'expérience. Dans notre étude on utilise l'ANOVA pour analyser les effets des paramètres d'entrées (vitesse de coupe et l'avance) sur la réponse étudiée (effort de coupe).

Les résultats de l'analyse ANOVA pour l'effort de coupe (F_c) sont représentés dans le Tableau IV-2. Cette analyse a été réalisée avec un intervalle de confiance de 95%.

Tableau IV-2 Analyse de la variance pour F_c .

Source	DL	Somme des carrés	CM	F	P
Vc	1	4,16591E+06	4,16591E+06	0,241	0,649
f	4	6,90976E+07	1,72744E+07	25,436	0,000
Erreur	54	3,66731E+07	679131,3009		
Total	59	1,09937E+08			

IV.3.2-Analyse de régression

L'analyse de régression est utilisée pour la modélisation et l'analyse de plusieurs variables où il y a une relation entre une variable dépendante et un ou plusieurs variables indépendantes.

Dans notre étude, la variable dépendante est la force de coupe (F_c), alors que les variables indépendantes sont la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f).

Pour l'obtention des modèles prédictifs de la force de coupe (F_c), l'équation de régression linéaire a été utilisée.

a. Rapport récapitulatif

Ce test est basé sur le niveau de risque (α) que nous souhaitons accepter pour conclure qu'une relation existe entre V_c et f , alors que ce n'est pas le cas.

- Si conclure à tort qu'une relation existe implique une conséquence grave, une valeur d' α moins élevée réduira les risques de faire ce type d'erreur.
- Si négliger une relation potentielle représente une conséquence grave, une valeur d' α plus élevée réduira les risques de faire ce type d'erreur.

Vous pouvez choisir d'utiliser la valeur d' α en tant que règle de décision stricte. Si la valeur de p est inférieure à celle d' α , vous pouvez en conclure qu'une relation existe, avec un niveau de

risque acceptable. Si la valeur de p est suffisamment proche de celle d' α , denombreux spécialistes considèrent qu'il s'agit de la preuve faibled'une relation pouvant justifier une exploration approfondie, peut-être avec un échantillon plus élevé.

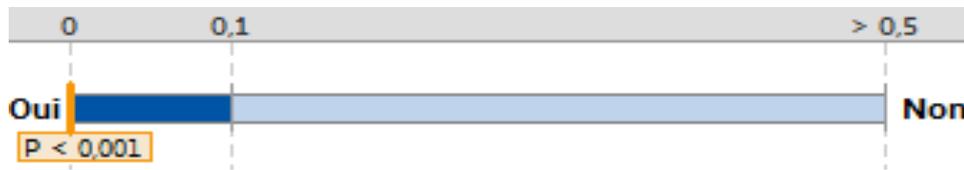


Figure IV-4 Relation entre les variables V_c et f .

La relation entre les variable V_c et f dans le modele est significatif sur le plan statistique ($p < 0.10$).

Le R carré indique la capacité du modèle de régression à s'ajuster aux données. En particulier, il mesure quel degré de variation dans la réponse (F_c) est expliqué par les variables V_c et V_f dans le modèle de régression. Plus la valeur du R carré est élevée, plus le modèle de régression est ajusté aux données.

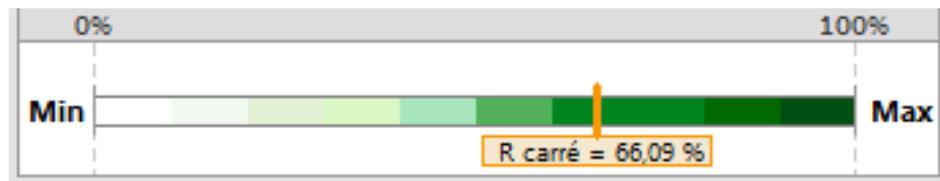


Figure IV-5 Pourcentage de variation par modèle.

66.09 % de variation de la valeur F_c peut être expliqué par le modèle de régression.

b. Rapport de création du modèle

Equation final du modèle :

$$F_c = 5699 - 61.9V_c - 73323f + 163724f^2 + 662V_c f \quad (\text{IV.1})$$

Si le modèle est bien ajusté aux données, on utilise l'équation (IV.1) pour prévoir F_c (N) pour les valeurs spécifiques des variables V_c et f , ou pour rechercher les paramètres des variables V_c et f correspondant à une valeur ou étendue de valeurs souhaitée pour F_c (N).

A partir de l'équation (IV.1) on déduit un tableau des forces de coupe avec les paramètres disponibles.

Tableau IV-3 Forces de coupes théoriques prédites par Minitab.

		<i>f</i> (mm/tr)		
		0.08	0.12	0.2
Position	Vc (m/min)	Fc théoriques (N)		
N°1 38 mm	60	344,5936	310,2656	1813,36
	80	165,7936	661,0656	3223,36
N°2 50 mm	60	344,5936	310,2656	1813,36
	80	165,7936	661,0656	3223,36
N°3 62 mm	60	344,5936	310,2656	1813,36
	80	165,7936	661,0656	3223,36
N°4 74 mm	60	344,5936	310,2656	1813,36
	80	165,7936	661,0656	3223,36
N°5 86 mm	60	344,5936	310,2656	1813,36
	80	165,7936	661,0656	3223,36
N°6 98 mm	60	344,5936	310,2656	1813,36
	80	165,7936	661,0656	3223,36
N°7 110 mm	60	344,5936	310,2656	1813,36
	80	165,7936	661,0656	3223,36
N°8 122 mm	60	344,5936	310,2656	1813,36
	80	165,7936	661,0656	3223,36
N°9 134 mm	60	344,5936	310,2656	1813,36
	80	165,7936	661,0656	3223,36
N°10 146 mm	60	344,5936	310,2656	1813,36
	80	165,7936	661,0656	3223,36

IV.4- Etude comparative

Tableau IV-4 Récapitulatif des forces de coupe.

		f (mm/tr)								
		0.08			0.12			0.2		
P	Vc	Fc Exp	Fc Théo	Ecart	Fc Exp	Fc Théo	Ecart	Fc Exp	Fc Théo	Ecart
1	60	263,45	344,5936	81,1436	536,19	310,2656	-225,9244	3404,49	1813,36	-1591,13
	80	286,09	165,7936	-120,2964	743,89	661,0656	-82,8244	1948,15	3223,36	1275,21
2	60	247,39	344,5936	97,2036	508,63	310,2656	-198,3644	2058,23	1813,36	-244,87
	80	275,71	165,7936	-109,9164	659,14	661,0656	1,9256	1070,13	3223,36	2153,23
3	60	246,08	344,5936	98,5136	508,63	310,2656	-198,3644	2560,8	1813,36	-747,44
	80	260,14	165,7936	-94,3464	630,3	661,0656	30,7656	1316,32	3223,36	1907,04
4	60	244,53	344,5936	100,0636	446,73	310,2656	-136,4644	2018,13	1813,36	-204,77
	80	256,84	165,7936	-91,0464	508,94	661,0656	152,1256	1616,5	3223,36	1606,86
5	60	244,53	344,5936	100,0636	446,73	310,2656	-136,4644	2018,13	1813,36	-204,77
	80	251,05	165,7936	-85,2564	493,11	661,0656	167,9556	1788,2	3223,36	1435,16
6	60	293,24	344,5936	51,3536	446,73	310,2656	-136,4644	1665,15	1813,36	148,21
	80	248,61	165,7936	-82,8164	493,11	661,0656	167,9556	4959,11	3223,36	-1735,75
7	60	243,84	344,5936	100,7536	426,71	310,2656	-116,4444	1114	1813,36	699,36
	80	247,29	165,7936	-81,4964	438,47	661,0656	222,5956	4959,11	3223,36	-1735,75
8	60	242,65	344,5936	101,9436	402,53	310,2656	-92,2644	1022	1813,36	791,36
	80	245,88	165,7936	-80,0864	442,03	661,0656	219,0356	5055,01	3223,36	-1831,65
9	60	244,69	344,5936	99,9036	392,38	310,2656	-82,1144	914,9	1813,36	898,46
	80	252,6	165,7936	-86,8064	411,23	661,0656	249,8356	5432,42	3223,36	-2209,06
10	60	248,82	344,5936	95,7736	372,2	310,2656	-61,9344	878,87	1813,36	934,49
	80	259,36	165,7936	-93,5664	392,46	661,0656	268,6056	4530,13	3223,36	-1306,77

Le Tableau IV-4 présente les résultats théoriques et expérimentaux des forces de coupe et l'écart entre eux tel que :

Fc Exp : Force de coupe expérimentale.

Fc Théo : Force de coupe Théoriques Calculé par l'équation (IV.1).

Ecart : Différences entre Fc Exp et Fc Théo.

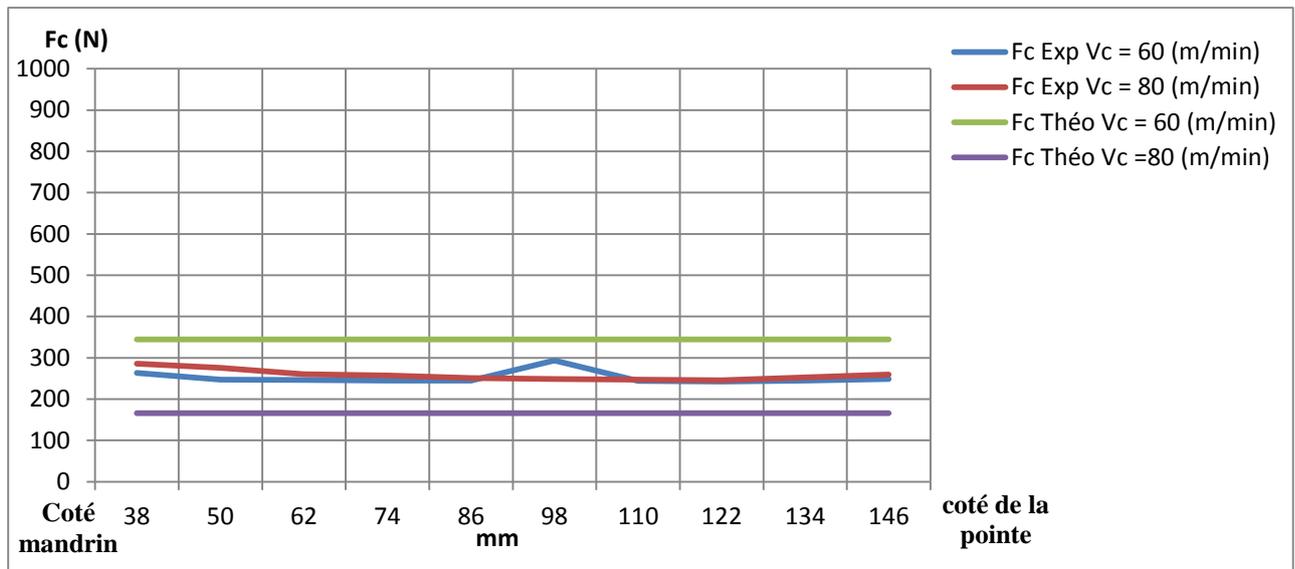


Figure IV-6 Courbes de l'évolution des forces de coupe à 0.08 (mm/tr) de l'avance par tour.

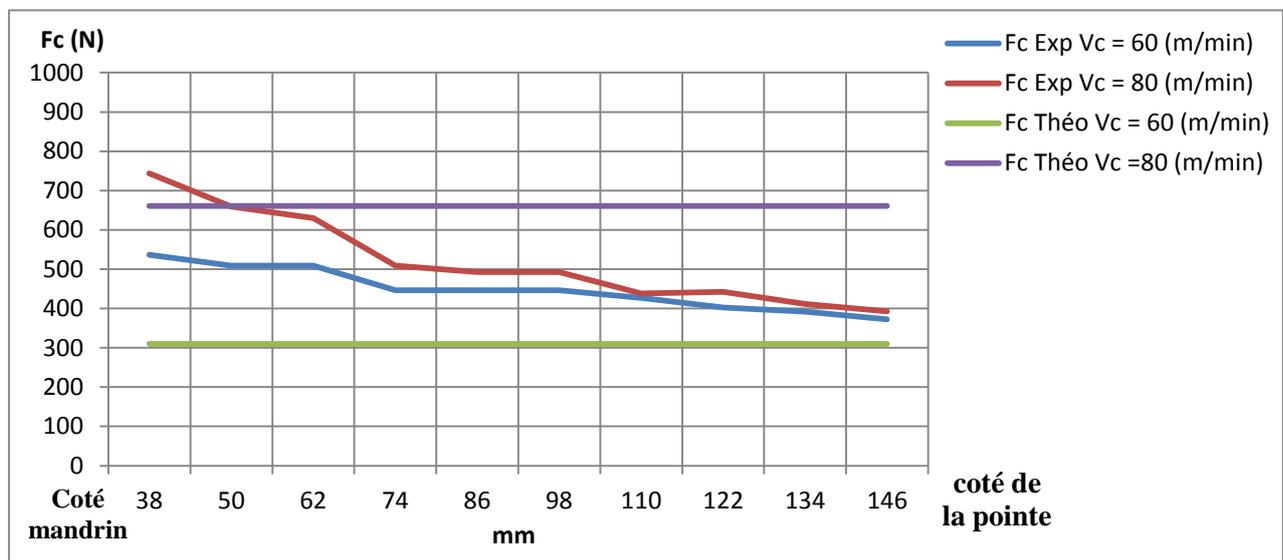


Figure IV-7 Courbes de l'évolution des forces de coupe à 0.12 (mm/tr) de l'avance par tour.

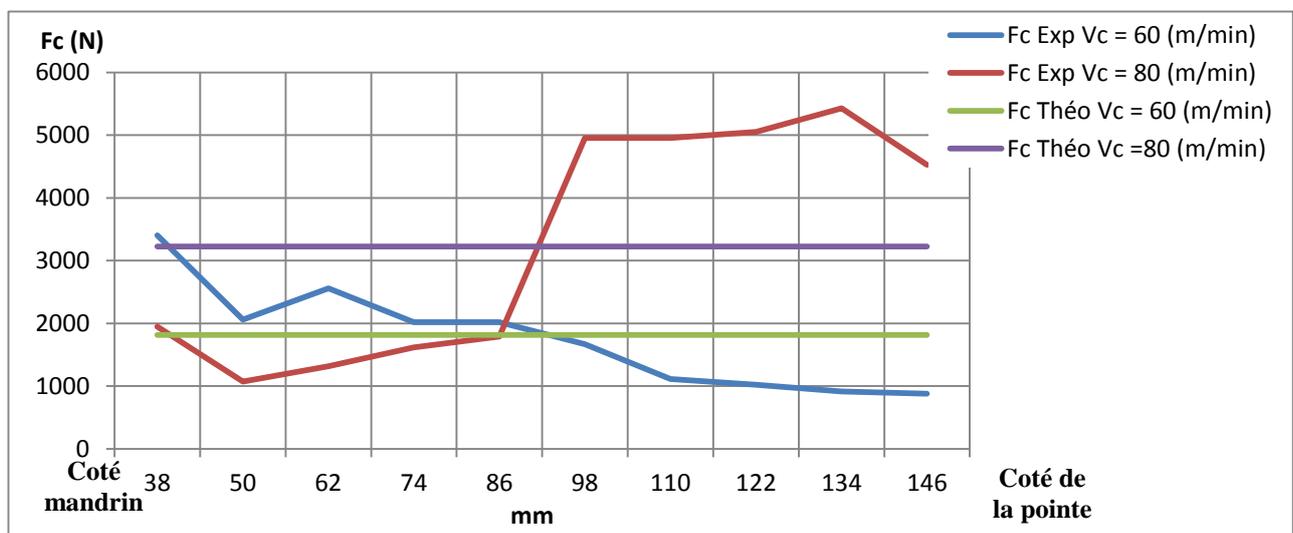


Figure IV-8 Courbes de l'évolution des forces de coupe à 0.20 (mm/tr) de l'avance par tour.

Les Figure IV-6, IV-7 et IV-8 illustre l'évolution et la différence entre les forces de coupe théoriques et expérimentales avec des différents paramètres de coupe en fonction de positions de la pièce.

Dans la Figure IV-6, à une vitesse d'avance 0.08 mm/tr, on constate que les forces de coupe théoriques sont constantes sur toutes les positions de la pièce contrairement à les forces de coupe expérimentales qui diminuent jusqu'à la position N°6 et augmentent une autre fois jusqu'à la position N°10, on constate aussi que les forces de coupe à une vitesse d'avance 60 m/min est plus élevées que celles de 80m/min.

Dans la Figure IV-7 à une vitesse d'avance 0.12 mm/tr, on constate que les forces de coupe théoriques sont constantes sur toutes les positions de la pièce contrairement à les forces de coupe expérimentales qui sont maximales dans la première position et diminuent progressivement jusqu'à la dernière position, on remarque également que la différence entre les forces théoriques à la vitesse de coupe 80 m/min et 60 m/min est grande au début de la pièce et il se rapproche à la fin de la pièce, aussi les forces de coupe à une vitesse d'avance 80 m/min est plus élevée que celles de 60 m/min.

Dans la Figure IV-7, à une vitesse d'avance 0.2 mm/tr, on constate que les forces de coupe théoriques sont constantes sur toutes les positions de la pièce et à la vitesse de coupe 80 m/min et plus élevée que celles de 60 m/min, par contre les forces de coupe expérimentales ont une gradation aléatoire on remarque que $F_c \text{ Exp à } V_c = 60 \text{ m/min}$ plus grand que $F_c \text{ Exp à } V_c = 80 \text{ m/min}$ de la première position jusqu'à un point d'intersection à la position N°5, elles deviennent le contraire $F_c \text{ Exp à } V_c = 80 \text{ m/min}$ plus grand que $F_c \text{ Exp à } V_c = 60 \text{ m/min}$.

IV.4.1-Influence de V_c et f sur F_c

a. Etude à côté du mandrin

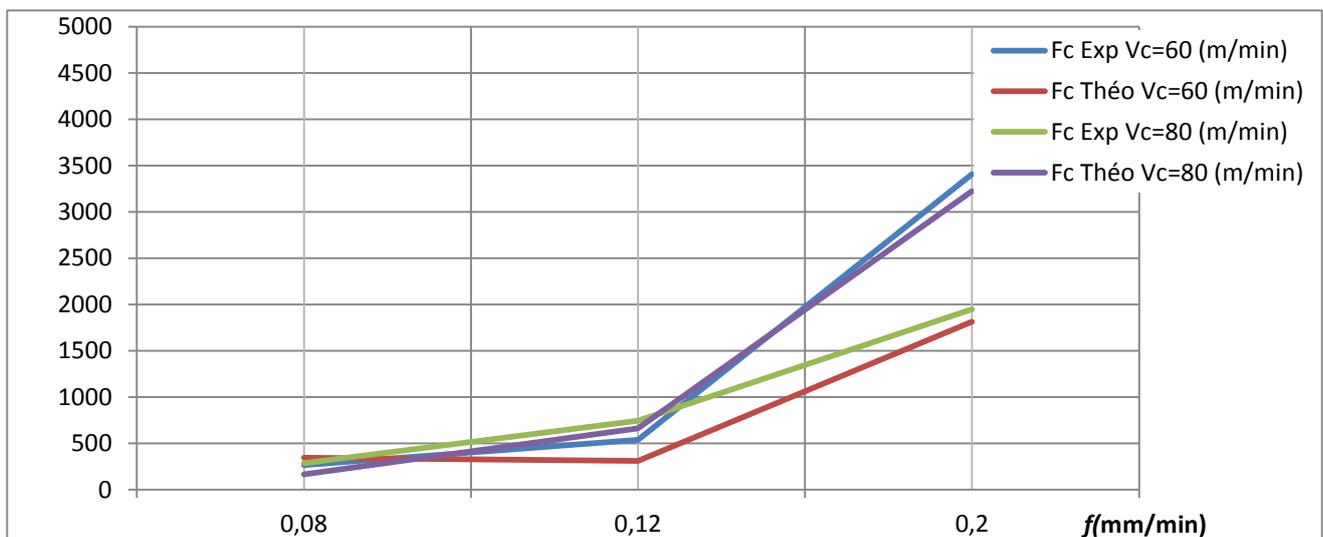


Figure IV-9 Evolution des efforts de coupe en fonction de V_c et f à côté du mandrin.

b. Etude au milieu de la pièce

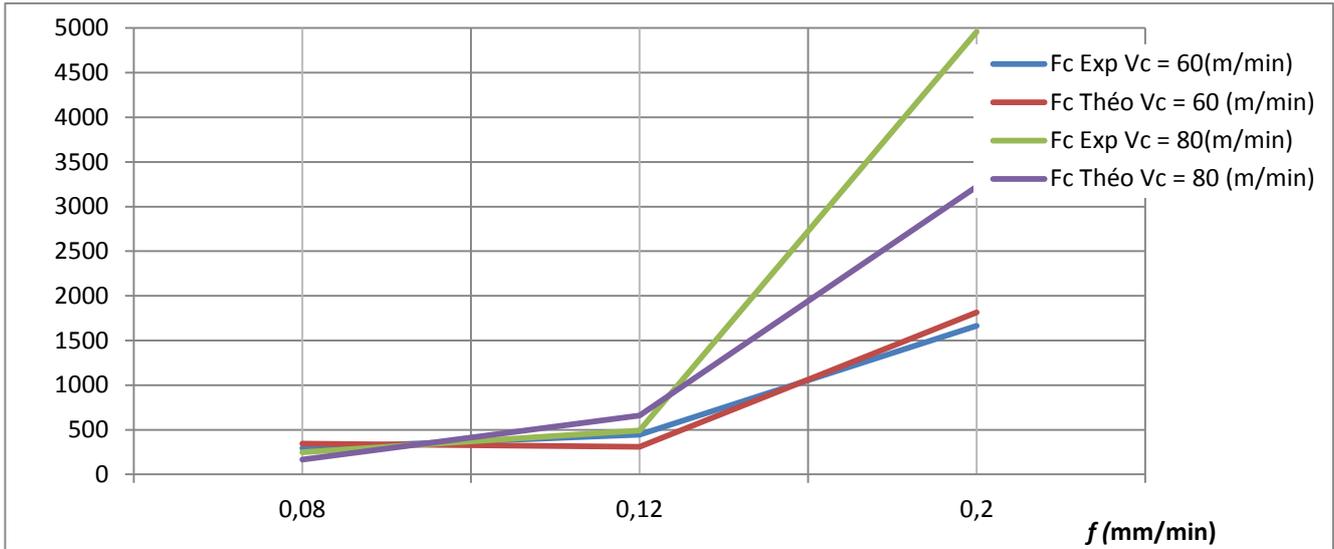


Figure IV-10 Evolution des efforts de coupe en fonction de V_c et f au milieu.

c. Etude du côté de la pointe

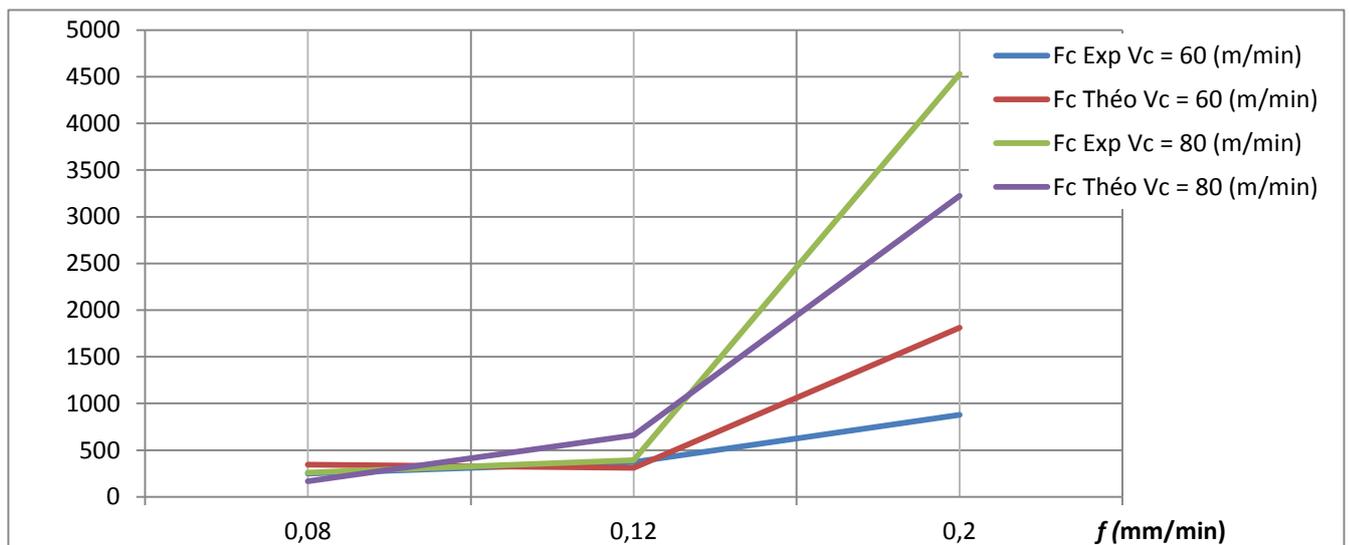


Figure IV-11 Evolution des efforts de coupe en fonction de V_c et f du côté de la pointe.

Les Figures IV-9, IV-10 et IV-11 présentent l'évolution des forces de coupe expérimentales et théoriques à des vitesses de coupe de 60 et 80 m/min sur les positions essentielles de la pièce au début et au milieu et à la pointe de la pièce, en fonction des vitesses d'avance tandis que :

- La Figure IV-9 présente les forces de coupe à la position N°1= 38 mm
- La Figure IV-10 présente les forces de coupe à la position N°5= 98 mm
- La Figure IV-11 présente les forces de coupe à la position N°10= 146 mm

On remarque que la force de coupe augmente avec l'augmentation de la vitesse d'avance.

IV.5- Rapport de prévision et d'optimisation

IV.5.1-Objectif minimiser ou maximiser l'effort de coupe Fc

Tableau IV-5 Principales solutions alternatives dans l'objectif de maximiser Fc.

Vc	f	Valeur Fc max prévue
60	0,2	1811,80
80	0,12	660,269
60	0,08	344,589
60	0,12	309,745
80	0,08	165,690

Tableau IV-6 Principales solutions alternatives dans l'objectif de minimiser Fc.

Vc	f	Valeur Fc min prévue
60	0.12	309.745
60	0.08	344.589
80	0.12	660.269
60	0.2	1811.80
80	0.2	3221.17

Les résultats du Tableau IV-4 et le Tableau IV-5 montrent les points de l'échantillon avec les valeurs Fc prévues les plus proches de la solution optimale. Évaluez ces points ainsi que la solution optimale pour déterminer si certains d'entre eux sont adaptés.

Tableau IV-7 Solution optimale.

		Maximale	Minimale
Valeur Fc (N) prévue		3221,17	165.690
Paramètres optimaux	Vc (m/min)	80	80
	f (mm/tr)	0.2	0.08

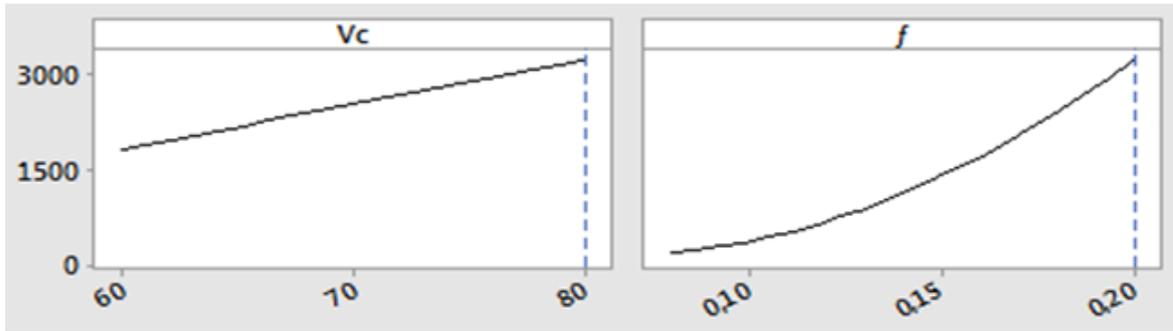


Figure IV-12 Paramètres et sensibilité de la solution optimale maximale.

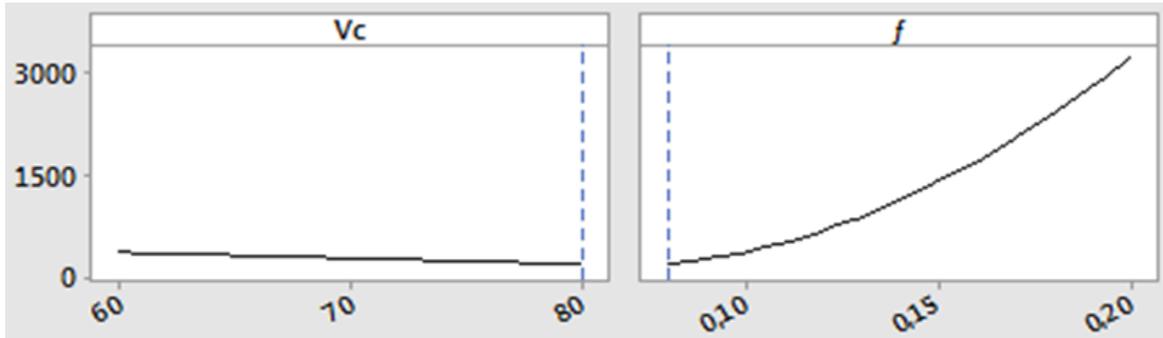


Figure IV-13 Paramètres et sensibilité de la solution optimale minimale.

Les résultats présentés sur la Figure IV-14 et IV-15 illustrent l'évolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe V_c et f , les lignes bleues indiquent les paramètres optimaux. Les lignes noires indiquent la valeur F_c prévue pour différents paramètres.

IV.6- Conclusion

On conclut que le modèle de régression développé dans ce chapitre démontre la relation avec des coefficients de corrélation élevés entre les valeurs mesurées et prédites, pour l'effort de coupe F_c d'où le coefficient de régression $R^2=66.69\%$.

La comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites de l'effort tangentielle F_c , montre un écart de 40 % des expérimentales. Par conséquent, les modèles développés permettent de faire des prédictions dans la gamme de l'expérimentation réalisée, lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Dans le présent travail, une opération de tournage est modélisée afin de sélectionner les conditions de coupe optimales.

Dans ce but, la détermination de bonne combinaison de paramètres de coupe pour obtenir la force de coupe optimale lors de l'usinage, le critère d'optimisation est considéré une combine entre la vitesse d'avance et la vitesse de coupe sous les contraintes liées aux efforts de coupe.

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

L'utilisation du logiciel Minitab 18 nous a permis de découvrir un outil de résolution performant. Cet outil a pu réduire considérablement le temps de résolution.

Les résultats trouvés dans le chapitre III ont justifié les hypothèses théoriques proposées à l'avant de l'étude. Ainsi les résultats de l'étude et les écarts avec les résultats expérimentaux.

A partir de la comparaison entre les résultats expérimentaux et théorique de l'étude qui porte la mesure de la force de coupe lors de l'usinage de l'acier 42CrMo4 à l'aide d'un outil en carbure non revêtu dont les paramètres d'entrées sont la vitesse de coupe et la vitesse d'avance ont permis de déterminer les effets des conditions de coupe sur la force de coupe.

Le traitement des résultats obtenus nous a permis de déduire un modèle qui exprime la relation entre les paramètres d'usinage étudiés et la force de coupe.

Par la suite nous avons pu obtenir un modèle de force de coupe en fonction de la vitesse de coupe et la vitesse d'avance avec un coefficient de régression $R^2=66.09\%$.

Le modèle développé permette d'obtenir des approximations de paramètre de sortie étudié qui est en 66 % de concordance avec les valeurs obtenue expérimentalement.

Les conditions qui donnent la force maximale sont $V_c = 80$ m/min et $f = 0.2$ mm/tr, et celle qui donnent la force minimale sont $V_c = 80$ m/min et $f = 0.08$ mm/tr.

Références Bibliographiques

Bibliographie

- [1] N. Djilani, Contribution à l'optimisation de la durée de vie d'un outil de coupe par l'application d'un champ magnétique, Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, 2011.
- [2] H. CHIBANE, Contribution à l'optimisation multi-objective des paramètres de coupe en usinage et apport de l'analyse vibratoire, thèse de doctorat en Mécanique, Université François Rabelais: Tours, avril 2013.
- [3] M. F, Etude de l'influence de la machine-outil sur les, paramètres technologiques en particulier lors de, l'usinage des matériaux durs, Thèse de Doctorat, Université de Annaba, 2010.
- [4] J.Garnier, Capteurs-Actionneurs : technologie, Equipe SII CPGE : france, 2011.
- [5] L. B. S. B. N. O. M.A.YALLESE1, influence des conditions d'usinage sur les efforts de coupe lors du tournage du 100cr6 (60hrc) avec le CBN, Laboratoire Mécanique des Matériaux et Maintenance Industrielle Structure (LR3MI) Université de Annaba: Algérie, 2007.
- [6] T.AMEUR, Optimisation des conditions de coupe en utilisant le calcul evolutionaire, thèse de magister en mécanique, université Mohamed Khider Biskra, 2005.
- [7] P. Mise en route de Minitab 18., disponible sur <http://www.minitab.com/fr-fr/>, page consultée le 27/07/2020, 2017.
- [8] T. K. A. P. A. K. G. Chithajalu Kiran Sagar, Prédiction et optimisation des forces d'usinage avec oxley's, Mechanical Engineering Department BITS-Pilani, Hyderabad Campus: India, 2019.

Résumé

L'optimisation est une tâche importante dans le processus d'usinage, permettant au choix des conditions de coupe les plus convenables. L'objectif de ce travail est de faire une optimisation des conditions de coupe et d'étudier leur effet sur le paramètre technologique d'usinage (efforts de coupe), obtenue lors de l'usinage de l'acier faiblement allié 42CrMo4, avec un outil en carbure non revêtu.

Nous commençons notre travail par la présentation générale sur l'usinage par enlèvement de matière puis l'étude de l'influence des paramètres de coupe, soit, la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f), et la profondeur de passe (a), sur le paramètre technologique d'usinage l'effort de coupe (F_c).

Ensuite, on s'intéresse à la modélisation de l'effort tangentiel en fonction des paramètres de régime de coupe, en se basant le logiciel statistique Minitab 18.

La dernière partie du travail réservée à une analyse de statistique d'une expérience faite par nos collègues pour déduire une équation de régression des efforts de coupe, en fonction des conditions de coupe (vitesse de coupe, vitesse d'avance), afin de trouver les valeurs optimales du paramètre technologique étudié (F_c). Les résultats trouvés montrent que la moyenne de pourcentage d'écart est à environ 40 %.

Mots clés : Force de coupe, Optimisation, Paramètres de coupe, ANOVA, Minitab.

Abstract

Optimization is an important task in the machining process, allowing the choice of the most suitable cutting conditions. The objective of this work is to optimize the cutting conditions and to study their effect on the technological parameter of machining (cutting forces), obtained during the machining of low-alloy steel 42CrMnO4, by a tool in uncoated carbide.

We start our work with the general presentation on machining by material removal then the study of the influence of the cutting parameters, that is, the cutting speed (V_c), advance speed (f), and the depth of cut (a), on the technological parameter of machining the cutting force (F_c).

The last part of the work reserved for a statistical analysis of an experiment made by our colleagues to deduce a regression equation of the cutting forces, as a function of the cutting conditions (cutting speed, feed rate), in order to find the optimal values of the technological parameter studied (F_c). The results found show that the average percentage deviation is about 40%.

Keywords: Cutting force, Optimization, Cutting parameters, ANOVA, Minitab.