

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



Mémoire de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme de Master

Option : Construction Mécanique

Présenté par : MEGHAZI Hicham

=====

**Minimisation de l'effort de coupe et de la puissance
consomme lors de l'usinage du polyamide PA 6**

=====

Sous la Direction de :

Pr. YALLESE Mohamed Athmane

Dr. BELHADI Salim

Année universitaire 2019/2020

Dédicaces

Je dédie ce mémoire

A mes chers parents ma mère et mon père.

Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leur encouragement.

A mes frères et sœurs.

A mes amis et camarades.

Sans oublier tous les professeurs.

REMERCIEMENTS

En premier lieu, nous tenons à remercier notre DIEU, notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

Je remercie en particulier mes encadreur, Pr. YALLESE Mohamed Athmane et Dr BELHADI Salim, à qui je tiens à exprimer m'a profonde gratitude pour toute la confiance qu'ils m'ont témoignée, les encouragements, les conseils et l'aide qu'ils n'ont cessé de me prodiguer tout au long de cette période.

Ainsi que tous mes professeurs qui m'ont enseigné durant mes études à la faculté des sciences et technologie.

A la fin je tiens à remercier tous nous collègue d'étude, particulièrement

الملخص

التأثير الاقتصادي لتكاليف التصنيع والمتطلبات الفنية على السطح النهائي للمنتج النهائي وقوة القطع يعني أنه يجب تحسين معلمات القطع. لذلك يعد التحسين مهمة مهمة في عملية المعالجة ، مما يسمح باختبار ظروف تتعلق الأعمال البحثية التي أجريت في أطروحة الماجستير هذه بالنمذجة والتحسين الأمثل. القطع الأكثر ملاءمة ينقسم العمل إلى . باستخدام أداة قطع من الكريبيد المطلي (PA 6) لظروف القطع أثناء تحويل مادة البولي أميد جزأين ، الجزء الأول يتعلق بنمذجة المعلمات التكنولوجية للقطع ، وهي معايير المكون المماسي لقوة القطع لتقييم (ANOVA) وتحليل التباين (MSR) والضغط النوعي والطاقة المستهلكة باستخدام منهجية سطح الاستجابة الجزء الثاني من هذا (AP) ، والتغذية من خلال وعمق التميرير (VC) تأثير معلمات القطع ، وهي: سرعة القطع البحث يتعلق بالتحسين الأمثل لظروف القطع باستخدام منهج تاجوتشي القائم على (تحليل الإشارة / الضوضاء) ، وفقاً لثلاثة قضية؛ تصغير (قدم) ، والتدليل (GRA) والتحليل الارتباطي الرمادي (DF) وظيفة الاستحسان بشكل فعال في استجابة واحدة. Taguchi (كانساس) وتقليل (كمبيوتر). أظهرت النتائج أنه يمكن استخدام طريقة هي الأفضل للتحسين متعدد الأهداف MSR و Gray من ناحية أخرى ، تعتبر أساليب

كلمات البحث :

PA 6 ، ANOVA ، التحسين ، Taguchi ، MSR ، GRA.

Résumé

L'impact économique des coûts de fabrication et des exigences techniques sur l'état de surface du produit fini et de la puissance de coupe impose l'optimisation des paramètres de coupe. L'optimisation est donc une tâche importante dans le processus d'usinage, permettant le choix des conditions de coupe les plus commodes.

Le travail de recherche réalisé dans ce mémoire de Master concerne la modélisation et l'optimisation des conditions de coupe lors du tournage de polyamide (PA 6) avec un outil de coupe en carbure revêtu

Le travail est divisé en deux parties, la première partie concerne la modélisation des paramètres technologique d'usinage à savoir, la composante tangentielle critères de l'effort de coupe, la pression spécifique et la puissance consommée en utilisant la méthodologie de la surface de réponse (MSR) et l'analyse de la variance (ANOVA) afin d'évaluer l'influence des paramètres de coupe, à savoir : Vitesse de coupe (V_c), avance par et la profondeur de passe (a_p).

La deuxième partie de ce travail de recherche concerne l'optimisation des conditions de coupe en utilisant l'approche de Taguchi basée sur (analyse signal / bruit), la fonction de désirabilité (DF) et l'analyse relationnelle grise (GRA) selon trois cas; Minimiser (F_t), manimiser(K_s) et minimiser (P_c). Les résultats prouvent que la méthode de Taguchi peut être utilisée efficacement dans le cas d'une seule réponse. Par contre les méthodes Grey et MSR sont les meilleurs pour l'optimisation multi-objectif.

Mots clés : Polyamide PA 6, tournage, plans d'expérience, ANOVA, optimisation, Taguchi, MSR, GRA.

Abstract

The economic impact of manufacturing costs and technical requirements on the surface finish of the finished product and the cutting power means that the cutting parameters must be optimized. Optimization is therefore an important task in the machining process, allowing the choice of the most convenient cutting conditions.

The research work carried out in this Master thesis concerns the modelling and optimization of cutting conditions when turning polyamide (PA 6) with a coated carbide cutting tool.

The work is divided into two parts, the first part concerns the modelling of the technological parameters of machining namely, the tangential component criteria of the cutting force, the specific pressure and the power consumed using the methodology of the response surface (MSR) and analysis of variance (ANOVA) in order to assess the influence of the cutting parameters, namely: Cutting speed (V_c), feed by and depth of cut (a_p).

The second part of this research work concerns the optimization of cutting conditions using the Taguchi approach based on (signal / noise analysis), desirability function (DF) and gray relational analysis (GRA) according to three case; Minimize (F_t), minimize (K_s) and minimize (P_c). The results show that the Taguchi method can be used effectively in a single response. On the other hand, the Gray and MSR methods are the best for multi-objective optimization.

Keywords: PA 6, turning, Machining, experimental plans, ANOVA, optimization, Taguchi, MSR, GRA.

Index des figures

Figure I. 1: Composition des polymères	3
Figure I. 2 : Comportement des polymères [4].....	6
Figure I. 3 : Représentation graphique des efforts de coupe	9
Figure I. 4 : L'effet principal de rapport de S/N pour.	13
Figure I. 5 : Comparaison de la force de coupe spécifique des matériaux PA6 et PA66 GF30 [10].....	14
Figure I. 6 : Comparaison de la puissance des matériaux PA6 et PA66 GF30 [10]. ...	14
Figure I. 7 :. Effet de l'avance sur (Ks) lors de l'usinage du composite PA66-GF30 et du polyamide PA66 à $V_c = 70 \text{ m / min}$ et $a_p = 150 \text{ mm}$: (a- d) pour le polymère PA66-GF30 et (e- h) pour le Polyamide PA66 [11].....	15
Figure I. 8: Effet de l'avance et de la vitesse de coupe sur la force de coupe [14].	16
Figure II. 1: Machine de Tour à charioter et à fileter modèle SN40.	18
Figure II. 2: Illustration pour la machine de tour à charioter et à fileter modèle SN40.	18
Figure II. 3: Plateforme d'effort de coupe KISTLER 9257 B.	19
Figure II. 4: Capteur d'effort de coupe KISTLER.	20
Figure II. 5: Montage du dynamomètre sur la table de la machine avec la direction des efforts de coupe.....	20
Figure II. 6: Eprouvettes pour différents essais.....	22
Figure II. 7: Photos des plaquettes coupe utilisées.	23
Figure II. 8: Porte outil utilisé.....	24
Figure II. 9: Montage de la chaîne et plateforme de mesure des efforts de coupe.....	24
Figure II. 10: Interface de logiciel Design Expert	25
Figure II. 11: Interface de logiciel MiniTAB v18.	25
Figure III. 1 :Graphique des effets principaux pour (Ft).	34
Figure III. 2 : Diagramme d'interaction pour (Ft).	34
Figure III. 3 : Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du (Ft).....	35
Figure III. 4 : Diagrammes de surfaces de (Ft) en fonction de (V_c . fz. a_p).	36
Figure III. 5 : Graphique de Contour de (Ft) en fonction de V_c ; f; a_p	37
Figure III. 6 :Graphique des effets principaux pour (Ks).	39
Figure III. 7 : Diagramme d'interaction pour (Ks).	39
Figure III. 8 : Graphe des valeurs réelles et prédites de la pression spécifique de coupe (Ks).....	40
Figure III. 9 : Diagrammes de surfaces de (Ks) en fonction de (V_c . fz. a_p).	41

Figure III. 10 :Graphique de Contour de (K_s) en fonction de V_c , f_z , a_p .	42
Figure III. 11: Graphique des effets principaux pour la puissance de coupe (P_c).	43
Figure III. 12 : Diagramme d'interaction pour la puissance de coupe (P_c).	44
Figure III. 13 : Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour la puissance de coupe (P_c).	45
Figure III. 14:Diagrammes de surfaces de (K_s) en fonction de (V_c , f_z , a_p).	46
Figure III. 15 : Graphique de Contour de (K_s) en fonction de V_c , f_z , a_p .	46

Figure IV. 1 :Graphique des effets principaux de V_c , f et a_p sur l'effort de.....	51
Figure IV. 2 :Graphique des effets principaux de V_c , f et a_p sur la pression de coupe spécifique (K_s).	53
Figure IV. 3 :Graphique des effets principaux de V_c , f et a_p sur la puissance de coupe (P_c).	54
Figure IV. 4 : Graph de désirabilité de F_t , K_s et P_c (diagramme de surface 3D et surface de contours) pour le 1er cas.	60
Figure IV. 5 :Diagramme d'optimisation de réponses multiples de l'effort de coupe..	60
Figure IV. 6 : Graph de désirabilité de F_t , K_s et p_c (diagramme de surface 3D et surface de contours) pour le 2ème cas.	61
Figure IV. 7 : Diagramme d'optimisation de réponses multiples de l'effort de coupe, puissance consomme, pression spécifique.	61
Figure IV. 8 : Graph de désirabilité de F_t , K_s et P_c (diagramme de surface 3D et surface de contours) pour le 3ème cas	62
Figure IV. 9 :Diagramme d'optimisation de réponses multiples de l'effort de coupe, puissance consomme, pression spécifique.	63
Figure IV. 10: Graph de désirabilité de F_t , K_s et P_c (diagramme de surface 3D et surface de contours) pour le 3ème cas.	64
Figure IV. 11 : Diagramme d'optimisation de réponses multiples de de l'effort de coupe, puissance consomme, pression spécifique.	64
Figure IV. 12 : Qualité Relationnelle Grise (GRG).	70

Index des tableaux

Tableau I. 1 :effort de coupe (F_c et F_t) en fonction de paramètres de coupe pour le PA6 et le PA66 GF30.....	11
Tableau I. 2: Paramètres et niveaux de conditions de coupe utilisées.....	12
Tableau II. 1: Les propriétés physiques et thermiques pour le polyamide PA6.....	21
Tableau II. 2 : Informations relatives aux plaquettes de coupe.....	22
Tableau II. 3: Matrice de planification pour un plan L27	26
Tableau II. 4 : Matrice de planification pour un plan Taguchi (L27).....	27
Tableau III. 1 : Résultats expérimentaux pour un plan (L27).	29
Tableau III. 2 : Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort F_t	33
Tableau III. 3: Résultats de l'ANOVA pour l'effort de coupe spécifique (K_s).	38
Tableau III. 4: Résultats de l'ANOVA pour la puissance de coupe (P_c).	43
Tableau IV. 1- Signal/Bruit des paramètres de sorties étudiées.	49
Tableau IV. 2 :Moyenne des ratios S/B(R_a) pour chaque niveau des facteurs.Préférer plus petit.....	51
Tableau IV. 3 : Moyenne des ratios S/B (K_s) pour chaque niveau des facteurs. Préférer plus petit.....	52
Tableau IV. 4 : Moyenne des ratios S/B(P_c) pour chaque niveau des facteurs. Préférer plus petit.....	53
Tableau IV. 5 : But et gamme de paramètres pour le 1er cas d'optimisation.	57
Tableau IV. 6 : But et gamme de paramètres pour le 2ème cas d'optimisation.	57
Tableau IV. 7 :But et gamme de paramètres pour le 3ème cas d'optimisation.....	57
Tableau IV. 8 : But et gamme de paramètres pour le 4 ^{ème} cas d'optimisation.	58
Tableau IV. 9 : Réponses de la surface de l'effort de coupe (K_s) et (P_c) pour la 1 ^{er} cas d'optimisation.	58
Tableau IV. 10 :Réponses de la surface de l'effort de coupe (K_s) et (P_c) pour le 2ème cas d'optimisation.	59
Tableau IV. 11 :Réponses de la surface de l'effort de coupe (K_s) et (P_c) pour le 3ème cas d'optimisation.	59
Tableau IV. 12 : Réponses de la surface l'effort de coupe (K_s) et (P_c) pour le 4ème cas d'optimisation	59
Tableau IV. 13: Résultats expérimentale normalisé (x_i^0 (k)).	66
Tableau IV. 14 : Coefficients du GR (η_i (k)).	67
Tableau IV. 15 ; Niveau relationnel gris et son ordre (Grey relational grade (GRG))	69
Tableau IV. 16 : Effets principaux de la qualité grise (Grey Grade).	71

Nomenclature

<i>f</i>	Avance (tr/min).
Vc	Vitesse de coupe (m/min).
ap	profondeur de coupe (mm).
Ft	effort de coupe (N).
Ks	pression spécifique (Mpa).
Pc	puissance consommée (W)
R²	Coefficient de détermination.
ANOVA	Analyse de variance.
MSR	Méthodologie de surface de réponse.
GRA	Analyse Relationnelle Gris.
Des	Désirabilité.
DF	Fonction désirabilité.
Cont%	Pourcentage de contribution

Table des matières

CHAPITRE I: Etude bibliographique

I.1.Introduction.....	3
I.2. Définition :.....	3
I.3. Classification des polymères :	4
I.3.1-selon les propriétés.....	4
I.3.2-selon la structure chimique et la microstructure	4
I.3.3-selon l'origine : On peut classer les polymères en trois groupes	5
I.4. Quelques propriétés des polymères :	5
I.5. Le polyamide PA:	6
I.6 Généralité sur la coupe des métaux.....	7
I.6.1. Définitions de l'usinabilité.....	7
I.6.2. Critères d'évaluation de l'usinabilité.....	8
I.7. Les paramètres technologiques de l'usinage:	8
I.7.1. Les efforts de coupe	8
I.7.2.Intérêt de leur mesure	8
I.7.3.Rapport des composantes.....	9
I.7.4.Effort spécifique de coupe (pression de coupe)	9
I.7.5.La puissance de coupe.....	10
I.8. Travaux de recherches (état de l'art)	10
I.9.Conclusion	16

CHAPITRE II: Procédures expérimentales

II.1-Introduction	17
II.2. Matériels utilisés	17
II.2.1. Machine-outil	17
II.2.2. Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe	19
II.2.3. Type de polyamide pour l'usinage	21
II.2.4. Outils de coupe et porte outil	22
II.2.4.1. Plaquette de coupe	22
II.2.4.2. Porte-outil :.....	23
II.2.4.3 Equipements supplémentaires :.....	24
II.3. Planification des expériences	25
II.4. Conclusion :	28

CHAPITRE III : Modélisation des paramètres technologiques

III.1.Introduction.....	29
III.2- Résultats expérimentaux.....	29
III.3. Analyse de variance ANOVA et MSR :	30
III.3.1.Analyse de la variance (ANOVA).....	30
III.3.2 Méthodologie des surfaces de réponses.....	31
III.4- Analyse statistique et modélisation des paramètres technologiques	33
III.4.1- Résultats de l'effort de coupe (Ft)	33
III.4.1.2- Graphes des effets moyens et des interactions.....	33
III.4.1.3- Equation de régression pour l'effort de coupe (Ft)	35
III.4.1.4- Diagrammes de surfaces 3D et graphique de Contour :.....	35
III.4.2- Résultats de la pression spécifique de coupe (Ks)	37
III.4.2.1- Analyse de la variance pour (Ks)	37
III.4.2.2- Graphes des effets moyens et des interactions :.....	38
III.4.2.3- Equation de régression pour le critère (Ks).....	39
III.4.2.4- Diagrammes de surfaces 3D et Graphique de Contour	40
III.4.3- Résultats de la puissance de coupe (Pc)	42
III.4.3.1- Analyse de la variance pour (Pc)	42
III.4.3.2- Graphes des effets moyens et des interactions.....	43
III-4-3-3 Equation de régression pour la puissance de coupe (Pc)	44
III-5. Conclusion	47

CHAPITRE IV : Optimisation des conditions de coupe

IV.1.Introduction	48
IV.2.Optimisation mono-objectif.....	48
IV.2.1.méthodedeTaguchi	48
IV.2.1.1. La démarche de la méthode de Taguchi	48
IV.2.1.2.Optimisation mono-objectif utilisant la méthode de Taguchi (<i>S/N ratio</i>)	49
IV.2.2- Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs.....	50
IV.2.2.1- Analyse des effets principaux sur l'effort de coupe (Ft).....	51
IV.2.2.2- Analyse des effets principaux sur la pression de coupe spécifique (Ks).....	52
IV. 2.2.3- Analyse des effets principaux sur la puissance de coupe (Pc)	53
IV.3- Optimisation par la méthode de la fonction désirabilité.....	55

IV.3.1- Introduction.....	55
IV.3.2 Optimisation des conditions de coupe pour Ft, Ks et Pc	56
IV.4. Optimisation par la méthode d'Analyse Relationnelle Gris	65
IV.4.1. Description de la méthode.....	65
IV.4.2 Calcul des coefficients du Relationnel Gris	67
IV.4.3. Calcul du GRG (Grey relational grade)	68
IV.4.4. Conclusion	71

Introduction générale

Le plus grand volume des matières thermoplastiques est généralement transformé par injection. Toutefois cette technologie est mal ou pas adaptée à la réalisation de pièces mécaniques à l'échelle unitaire et à la petite et moyenne série, voire pour des grandes séries de pièces dont la géométrie ou les caractéristiques recherchées ne permettent pas le moulage. Certains matériaux comme ceux à base de PTFE et les polyamides sont très difficilement injectables. C'est donc dans ces cas de figures que l'usinage plastique reste le plus adaptée.

La possibilité de réalisation de pièces avec des épaisseurs de parois minces et variables avec des tolérances serrées, reste difficilement réalisable sinon impossible par injection. L'usinage permet aussi la réalisation de pièces de tolérances avec des parois épaisses, ce qui serait source de retassures avec l'injection. En plus, l'absence de la dépouille nécessaire au démoulage des pièces injectées ne permet pas des surfaces parallèles.

D'autre part, pour certains essais mécaniques sur les polymères, les normes préconisent des éprouvettes permettant d'évaluer les résistances mécaniques correspondantes. Des recommandations de préparation et d'emploi de ces éprouvettes sont brièvement rapportées. Cette préparation fait souvent appel à la mise en forme par enlèvement de matière à l'outil coupant. Il importe donc de s'assurer que les propriétés mécaniques mesurées ne soient pas affectées par les conditions d'usinage. Ce problème demeure très peu traité dans la littérature. C'est dans ce cadre que s'inscrit cette étude, elle a pour but la modélisation des efforts de coupe, l'effort spécifique et la puissance de coupe et aussi l'optimisation des conditions de coupe lors de l'usinage du polyamide PA 6...

Ce manuscrit s'articule en quatre chapitres :

Le premier chapitre est une recherche bibliographique sur les polymères en générale et une attention particulière a été réservée à l'étude du Polyamide (PA 6) (définition, classification, leurs propriétés et leurs comportements à l'usinage suivi par généralité sur la coupe des métaux et les paramètres technologiques de l'usinage. Une autre partie très importante est réalisée dans ce chapitre, ayant pour but de présenter des travaux de recherche relatifs au tournage des polymères.

Dans le deuxième chapitre nous présentons les équipements nécessaires à la réalisation des essais et la planification des expériences ainsi que les conditions de coupe adoptées. Les dispositifs de mesure des paramètres de sortie et le couple outil-matière sont aussi présentés d'une manière détaillée.

Dans le troisième chapitre nous avons analysé les résultats de l'étude de l'influence des paramètres de coupe sur l'effort de coupe, la pression spécifique et la puissance consommée. Nous avons utilisé la méthodologie de surface de réponse MSR et

l'analyse de la variance ANOVA afin de calculer la contribution des différents facteurs (V_c , f , et a_p) et leurs interactions sur les paramètres technologiques. Pour cela nous avons utilisé des logiciels de statistique appelé «Design-Expert et Minitab» pour les calculs des valeurs des coefficients de corrélation et les constantes associées ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse.

Dans le quatrième chapitre nous appliquons deux types d'optimisation : l'optimisation mono-objective, en utilisant la méthode de Taguchi et l'optimisation multi-objective, en utilisant les deux méthodes : la méthodologie de surface de réponse (MSR) et l'analyse relationnelle grise (Grey methode). Ainsi, les valeurs optimales des paramètres de coupe par rapport aux objectifs d'optimisation ont été calculées pour chacun des paramètres technologiques d'usinage (l'effort de coupe, la pression spécifique et la puissance consommée).

Chapitre I : Etude bibliographique

I.1.Introduction

Il n'est pas difficile d'imaginer l'impact que la recherche sur les nouveaux polymères va avoir sur la société actuelle dans un proche avenir. Toute nouvelle technologie, des avions supersoniques et des trains à grande vitesse aux batteries minuscules pour téléphones mobiles, en passant par l'optoélectronique, les nouveaux implants chirurgicaux et les nouveaux tissus synthétiques, nécessite un large éventail de matériaux à développer avec des propriétés très spécifiques. Sans la recherche et la connaissance des nouveaux polymères (les plastiques en termes simples), ces technologies ne pourraient pas être développées dans le futur et pourraient même ne pas être imaginées.

Les développements prévisibles pour les polymères sont motivés par deux faits fondamentaux. Le premier est que la science des polymères a réussi à synthétiser de nouveaux monomères et polymères, tout en déterminant la microstructure et la cristallinité, prédisant la composition chimique des polymères et des copolymères. Ces connaissances acquises dans le domaine des polymères ont été reconnues dans le monde entier et ont reçu plusieurs prix Nobel. La seconde est due aux propriétés intrinsèques des polymères : grande disponibilité et structures polymériques infinies possibles ; faible densité, ce qui les rend beaucoup plus légers que d'autres matériaux, faciles à traiter avec une faible consommation d'énergie; économique; et, surtout, un large spectre de propriétés spécifiques: conducteurs et isolants, transparents et opaques, flexibles et rigides, imperméables et perméables, et ils peuvent atteindre une résistance comparable aux métaux [1].

I.2. Définition :

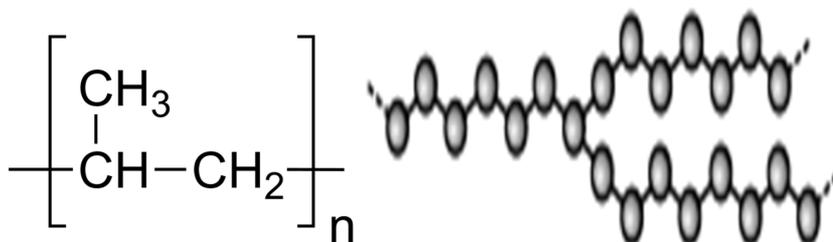


Figure I. 1: Composition des polymères

Chapitre I : Etude bibliographique

Polymère sont des substances organique de masses moléculaires élevées (macromolécules) obtenus par l'association d'unités structurales répétitives. Chaque unité pouvant être considéré comme dérivant d'un composé spécifique Appel monomère.

I.3. Classification des polymères :

Les polymères peuvent être classés selon divers critères, qui ne s'excluent pas les uns l'autres [3].

I.3.1-selon les propriétés : une des propriétés mises en cause est l'influence d'une élévation de température une autre est le comportement élastique. Il résulte qu'on distingue trois grandes familles

❖ Les thermoplastiques :

Ils acquièrent par chauffage une fluidité suffisante pour être transformés sans modification de leur structure chimique, et donc a priori de façon réversible, aux phénomènes de dégradation prés. Parmi les principaux thermoplastiques, on peut citer le PE, le PP, le Ps, le pvc, les polyamides, le PET

❖ Les thermodurcissables :

Une élévation de température provoque le durcissement du matériau, en lui conférant sa structure définitive, de façon irréversible, même si la chaleur n'est pas indispensable ;

❖ Les élastomères :

Sont par définition des polymères ayant des propriétés élastiques réversibles (allongement réversible important). Exemple : caoutchouc naturel, polybutadiène, poly isoprène.

I.3.2-selon la structure chimique et la microstructure :

❖ **constitution** : polymères a chaine carbonée ou non (silicones), homo-et copolymères ;

❖ **dimensionnalité** : polymère linéaires, ramifiés, réticulés ;

Chapitre I : Etude bibliographique

❖ **enchaînement des unités constitutives dans les copolymères :**
copolymères Statistiques, alternés, à blocs, greffés ;

❖ **configuration :** iso-tactique, syndiotactique, a-tactique ;

❖ **état physique :** amorphe, semi-cristallin ;

I.3.3-selon l'origine : On peut classer les polymères en trois groupes :

❖ **les polymères naturels :** cellulose, caoutchouc, etc... ;

❖ **Les polymères artificiels** dérivés des polymères naturels : nitrate et acétate de cellulose, ébonite (caoutchouc frottement réticulé par le soufre) ;

❖ **Les polymères synthétiques :** Produit dans des réactions de polymérisation en chaîne ou de polycondensation.

❖ **Selon l'utilisation :** colles et adhésifs, peintures, vernis, mastics, matières plastiques, caoutchoucs, fibres, mousse, etc...

❖ **En fonction du cycle de vie :** matériaux jetables (durée de vie inférieur à un an), durables (1 à 20), infrastructure (durée de vie supérieur à 20 ans).

I.4. Quelques propriétés des polymères :

Cristallin ou amorphe les plastiques englobent une large éventail de matériaux de diverse combinaison et formulation de carbone, oxygène, nitrogène et d'autres éléments organiques et inorganiques. la plupart des plastiques sont des solides sous leur forme finale .mais a une certaine étape de leur existence, ils sont liquides et peuvent être transformés sous de nombreuses formes. Cette transformation implique généralement l'utilisation de chaleur et/ou dépression [2,3]. De nos jours, on compte plus de cinquante différentes familles de plastiques dans l'industrie et chaque famille peut avoir des douzaines de variations cristallin ou amorphe, les polymères sont souvent décrits comme cristallins ou amorphes alors qu'il est plus exacte de décrire les plastiques par leur degré de cristallinité.

Chapitre I : Etude bibliographique

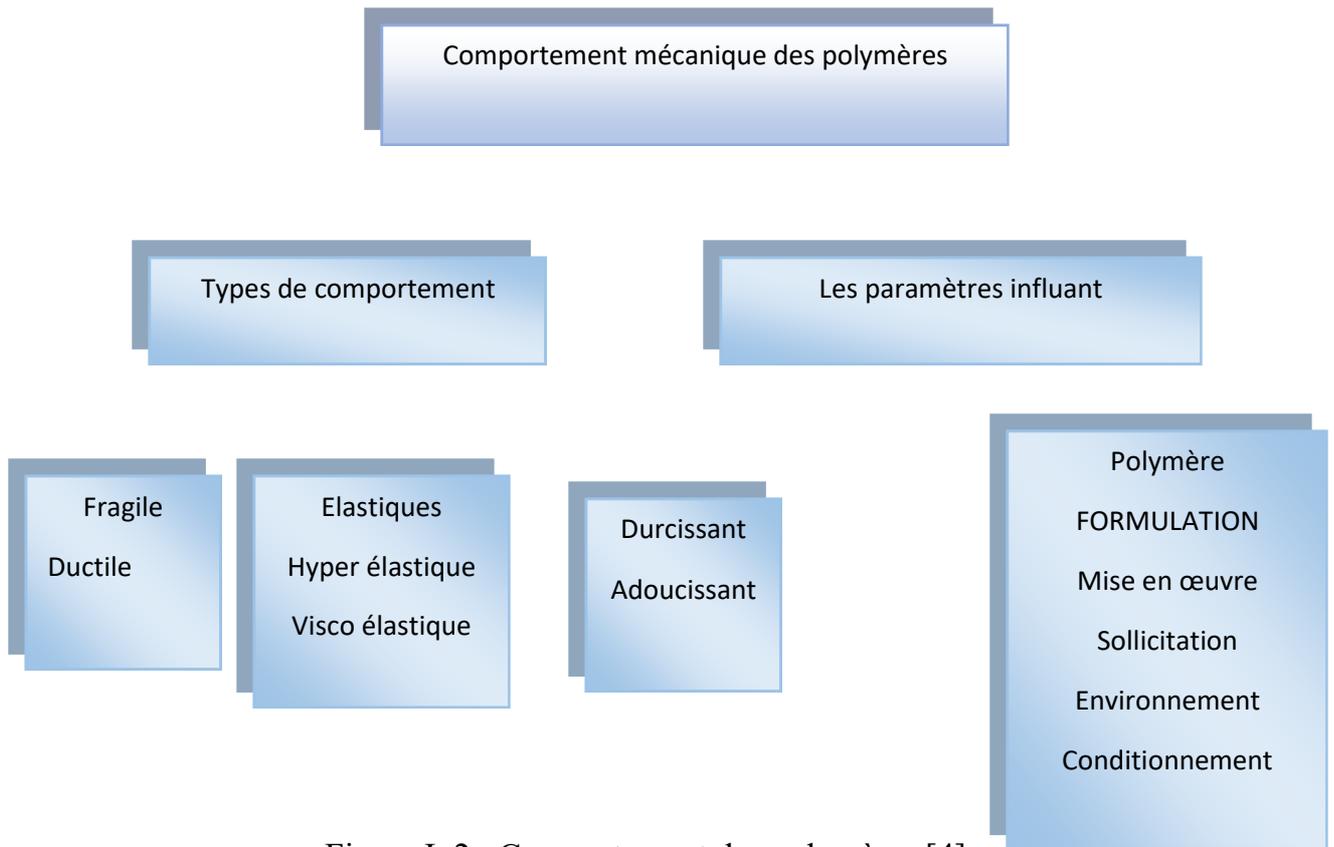


Figure I. 2 : Comportement des polymères [4]

Les propriétés mécaniques [4] des matériaux polymères dépendent du type de polymères, de la structure moléculaire, du poids moléculaire, du poids moléculaire, du taux de cristallinité de polymères, d'additifs chimiques, du type et de la quantité de colorant, de modificateur d'impact, des charges, et des renforts. Ces propriétés dépendent aussi du processeur de fabrication, des méthodes d'essai des procédures d'essai, et la déclaration des valeurs de propriété (**Figure I.2**). Ils diffèrent donc sensiblement dans chaque formulation. La nature viscoélastique des matières plastiques domine leurs propriétés mécaniques et elle influe également sur les procédures d'essai. Dans la littérature il existe plusieurs références de base qui regroupent les propriétés suivant les classements par familles.

I.5. Le polyamide PA:

Souvent désigné par le nom de NYLON. Cette désignation indique une fabrication extrudée. La résistance mécanique, la rigidité et le pouvoir amortissant combinés à une excellente résistance à l'usure en font le matériau de référence pour la construction mécanique et l'entretien [4,5].

Chapitre I : Etude bibliographique

Il associe de bonnes propriétés mécaniques, électriques et chimiques.

Exemple d'applications : pièces de guidages engrenages, galets, éléments d'accouplements, cages de roulements, construction mécanique.

Caractéristiques principales :

- ✓ Haute résistance mécanique, rigidité, dureté,
- ✓ bonne résistance à la fatigue,
- ✓ haute pouvoir amortissant,
- ✓ bonnes propriétés de glissement,
- ✓ excellente résistance à l'usure,
- ✓ Couleurs : Naturel ou Noir.

I.6 Généralité sur la coupe des métaux

I.6.1. Définitions de l'usinabilité

L'usinabilité est une propriété particulièrement difficile à étudier car elle relève de deux domaines scientifiques et techniques différents, d'une part l'aspect métallurgique du problème, qui comprend les conditions d'élaboration et les processus de fabrication dont l'effet combiné conduit aux propriétés particulières du métal à mettre en œuvre, d'autre part l'aspect mécanique du problème, comprenant les conditions de la mise en forme du métal en vue de l'application envisagée. [6]. Selon les chercheurs travaillant dans le domaine de la coupe des métaux l'usinabilité est définie aussi sous différentes formes :

- ✓ **D'après A .CZAPLICKI [6]** : L'usinabilité est la propriété grâce à laquelle un matériau donné peut subir plus ou moins facilement une opération d'usinage déterminée. Il s'agit donc en principe d'une propriété inhérente à la matière envisagée.
- ✓ **D'après BERARD GRUBER [7]** : l'usinabilité ou l'aptitude d'un matériau à être amené à des dimensions et formes déterminées avec un état de surface défini par une ou plusieurs opérations d'usinage. Il ne s'agit pas d'une propriété simple de la matière, elle n'est pas une grandeur mesurable, l'usinabilité est une propriété complexe désignant la facilité, plus ou moins grande, d'un matériau à être amené par enlèvement de copeaux à une forme et à des côtes fixes.

Chapitre I : Etude bibliographique

I.6.2. Critères d'évaluation de l'usinabilité

Selon les chercheurs qui ont travaillé dans le domaine de l'usinabilité, on trouve une variété des critères de son évaluation

- ✓ L'état de surface
- ✓ La durée de vie de l'outil
- ✓ Les conditions de coupe
- ✓ La productivité
- ✓ Les efforts de coupe et la puissance consommée par la coupe
- ✓ La température de coupe

I.7. Les paramètres technologiques de l'usinage:

I.7.1. Les efforts de coupe

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

I.7.2. Intérêt de leur mesure

Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage [8], comme présenté dans la **(Figure I.3)** La connaissance des efforts de coupe est à la base de l'évaluation de la puissance nécessaire à la coupe. Quand on veut connaître le rendement mécanique d'une machine-outil, on a besoin de savoir quelle est la puissance prise à l'outil, et donc d'avoir des renseignements sur les efforts de coupe. La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de machines et à prévoir les déformations des pièces. Elle intervient dans la précision d'usinage, dans les conditions d'apparition des vibrations, au broutage [9].

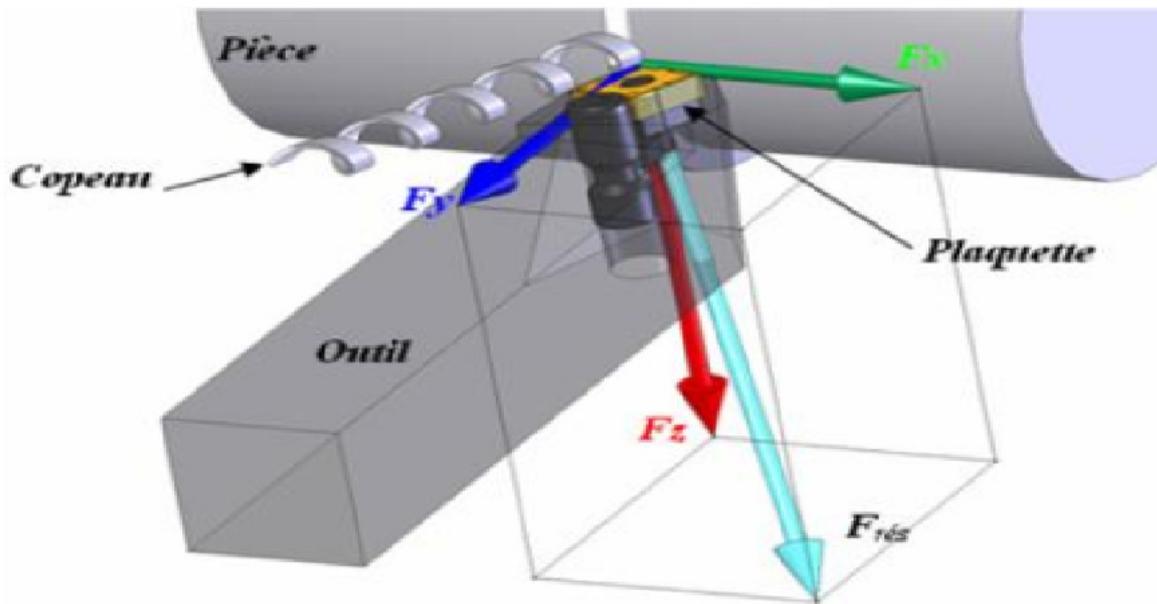


Figure I. 3 : Représentation graphique des efforts de coupe

$F_z = F_c$: composante dans le sens de la vitesse de coupe, appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe.

$F_x = F_a$: composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance ou effort axial en tournage, joue un rôle fondamentale dans le processus de coupe.

$F_y = F_p$: composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort de refoulement ou effort radial, n'a qu'une importance secondaire et disparaît dans le cas de coupe orthogonale pure

I.7.3. Rapport des composantes

La résultante des efforts de coupe, étant une diagonale du parallélépipède, est égale à :

$$F_{rés} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (I.1)$$

I.7.4. Effort spécifique de coupe (pression de coupe)

L'effort spécifique de coupe, aussi appelé pression de coupe, est également à déterminer. Cette grandeur est définie comme étant l'effort de coupe ramené à la section du copeau non déformé.

Chapitre I : Etude bibliographique

$$K_z = F_z/S \quad (I.2)$$

F_z : effort de coupe (N) ;

K_z : pression de coupe (N/mm²) ;

S : section du copeau (mm²) ;

$$S = a_p \times f \quad (I.3)$$

f : avance (mm/tr) ; a_p : profondeur de passe (mm) ;

L'effort spécifique varie en fonction de:

- ✓ matériau usiné ;
- ✓ épaisseur de coupe ;
- ✓ angle de coupe (diminution de 1,5 environ, pour augmentation de 1°) ;
- ✓ usure de l'outil ;

I.7.5. La puissance de coupe

$$P_c = F_z \times V_c \quad (I.4)$$

V_c : vitesse de coupe (m/s); F_z : force de coupe (N); P_c : puissance de coupe (W).

Mais, d'après l'expression de la force de coupe, on peut utiliser la formule suivante:

$$P_c = K_z \times a_p \times f \times V_c \quad (I.5)$$

P_c : puissance de coupe (W) ;

K_z : pression de coupe (N/mm²) ;

a_p : profondeur de passe (mm) ;

f : avance (mm/tr) ;

V_c : vitesse de coupe (m/s).

I.8. Travaux de recherches (état de l'art)

Davim et Mata [10] ont évalué l'influence du renforcement des fibres de verre lors de tournage des polymères PA6 et PA66 (GF30). Les expériences ont été effectuées sur des pièces extrudées d'un diamètre de 50 mm et d'une longueur de 100

Chapitre I : Etude bibliographique

mm ,avec un outil au carbure cémenté (K15) (DCMW 11T3 04 H13A) qui à la géométrie suivante : angle de coupe 7° , angle de dépouille 0° , angle d'arête de coupe 93° et angle d'inclinaison de l'arête de coupe 0° et un porte-outil du type SDJCL 2020 K11. Les auteurs ont trouvé que la présence de fibres de verre dans le polymère PA66 conduit à des valeurs plus élevées des efforts de coupe par rapport au polymère PA6et cela pour toutes les conditions de coupe testées (**Tableau I.1**)

Tableau I. 1 :effort de coupe (F_c et F_t) en fonction de paramètres de coupe pour le PA6 et le PA66 GF30

V (m/min)	f (mm/rev)	PA 6		PA 66 GF30	
		F_c (N)	F_t (N)	F_c (N)	F_t (N)
200	0.05	25.07	11.11	31.9	15.36
200	0.1	44.94	11.57	40.75	15.17
200	0.15	71.81	13.37	71.38	16.47
200	0.2	80.02	13.96	92	17.63
100	0.05	24.42	11.87	32.19	16.13
100	0.1	44.37	12.6	53.33	18.5
100	0.15	62.84	13.76	75.62	20.86
100	0.2	78.89	15.12	97.29	22.99
50	0.05	25.91	12.89	33.56	17.84
50	0.1	45.5	13.69	55.15	22.33
50	0.15	72.68	15.56	78.03	26
50	0.2	81.14	16.31	101.31	30.45

L'étude de Lazarević et al [11] concerne la détermination des conditions robustes pour la minimisation des efforts de coupe lors du tournage de polyamide PA 6 L'optimisation des efforts de coupe est d'une importance capitale en tournage parce que les efforts de coupe sont directement liés à plusieurs caractéristiques de fonctionnement d'usinage Dans cette étude l'influence de quatre paramètres de coupe, tels que (V_c , f , ap) et le rayon de l'outil (**Tableau I.2**) sur les efforts de coupe principaux sont analysés sur la base du tableau orthogonale de taguchi et l'analyse du signal – bruit (**Figure I.4**) . Les résultats expérimentaux montrent que :

Chapitre I : Etude bibliographique

- 1- La profondeur de passe suivie de l'avance par tour sont les paramètres de coupe les plus significatifs affectant l'effort de coupe. L'effet de la vitesse de coupe est beaucoup plus petit, alors que l'effet du rayon du bec de l'outil est négligeable.
- 2- la vitesse de coupe élevée, l'avance par tour et la profondeur de passe faibles, et le plus petit rayon du bec de l'outil soient avantageux pour la minimisation de l'effort de coupe dans le procédé de tournage de polyamide.
- 3- La méthodologie robuste d'optimisation proposée par (G. Taguchi) donne l'approche la plus simple pour l'optimisation de processus mais elle est mono-objective.

Tableau I. 2: Paramètres et niveaux de conditions de coupe utilisées

Paramètre de coupe	Niveau		
	1	2	3
A - V_c [m/min]	65.03	115.61	213.88
B - f [mm/tr]	0.049	0.098	0.196
C - a_p [mm]	1	2	4
D - r [mm]	0.4	O.S	-

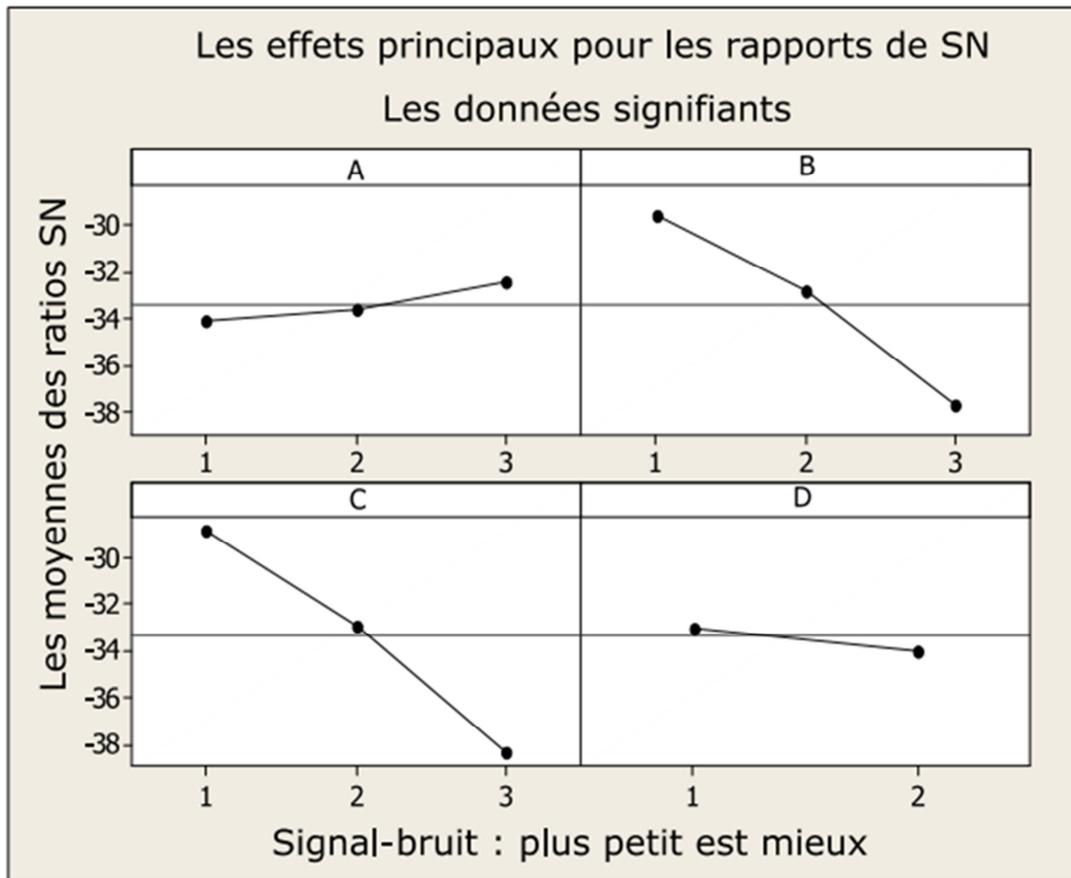


Figure I. 4 : L'effet principal de rapport de S/N pour.

Gaitond et autres [12] ont fait une analyse des effets des paramètres de coupe pendant le micro-usinage du polyamide renforcé de 30% de fibres (PA66 GF30) avec deux outils de coupe en diamant poly-cristallines (PCD) et l'autre carbure cémenté (K10), vitesse de coupe (V_c) et l'avance par tour (f) sur des aspects d'usinabilité, tels que l'effort de coupe (F_c), l'effort de coupe spécifique (K_s) et la puissance de coupe (P). La méthodologie de surface de réponse (MSR) a été employée.

Ils ont trouvé les résultats démontrés que la meilleure usinabilité peut être obtenue avec l'outil PCD pour le polyamide PA66 GF30 et qu'elle est indépendante de la vitesse de coupe et de la vitesse d'avance (**Figure I.5**). D'autre part, le choix de l'outil de coupe pour le matériau PA6 est influencé par la vitesse de coupe et le taux d'alimentation (**Figure I.6**). Par conséquent, le renforcement améliore bien les propriétés mécaniques et thermiques mais au prix de l'usinabilité.

Chapitre I : Etude bibliographique

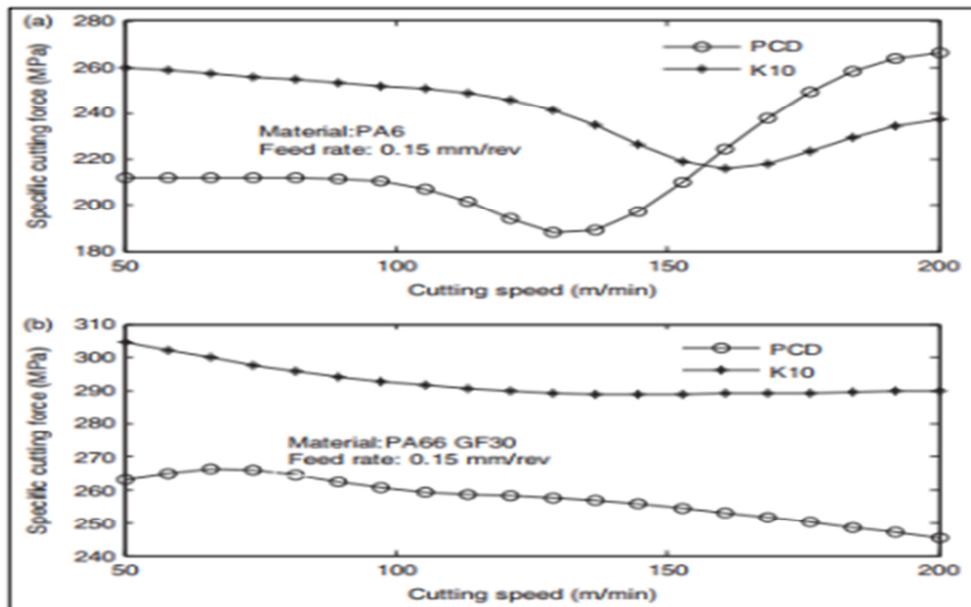


Figure I. 5 : Comparaison de la force de coupe spécifique des matériaux PA6 et PA66 GF30 [10]

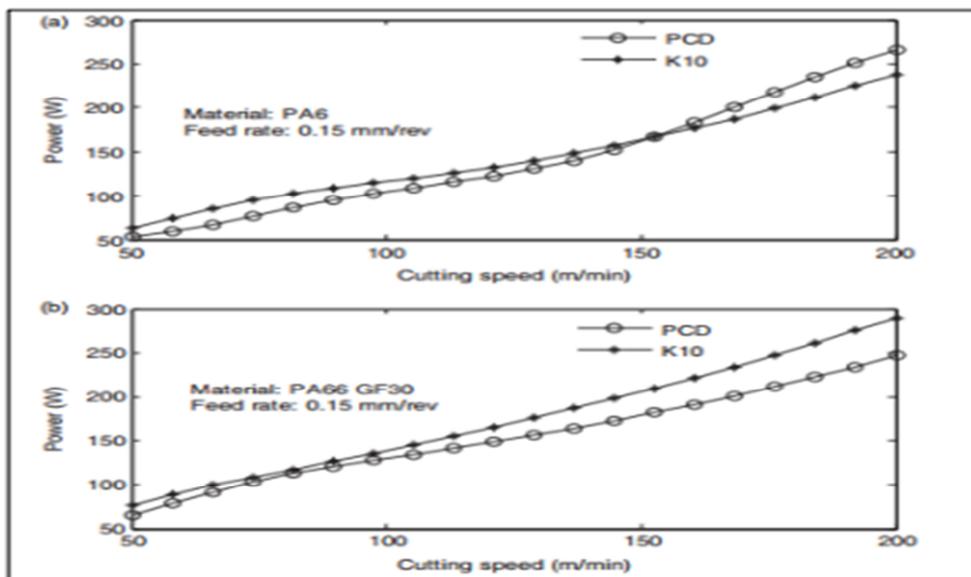


Figure I. 6 : Comparaison de la puissance des matériaux PA6 et PA66 GF30 [10].

L. R. Silva et autres [13] a présenté une étude sur l'effet de la géométrie d'outil découpe sur l'usinabilité du polyamide avec et sans renforcement de fibres de verre à 30%, pendant le tournage de précision en comparant les performances des outils en carbure non revêtus avec la géométrie de coupe standard et des outils avec préparation de l'arête modifiée. Les résultats indiquent que les composantes de l'effort de coupe

Chapitre I : Etude bibliographique

ont été réduites avec le rayon du bec de l'outil. Pour un rayon de bec $r_e = 0,4$ mm, l'effort radial a présenté des valeurs plus élevées suivies par l'effort de coupe et en dernier lieu par l'effort axial. Cependant, lorsque le rayon de bec a été réduit, l'effort de coupe a dépassé la composante radiale, en particulier lors du tournage du polyamide renforcé. La réduction des efforts de coupe s'explique par la zone de contact réduite. D'autre part, ils ont trouvé que l'effort de coupe spécifique a diminué lorsque l'avance a été élevée et a présenté des valeurs comparables aux alliages métalliques, néanmoins, le polyamide PA66 a présenté une augmentation de (K_s) de trois fois par rapport au composite PA66-GF30 (**Figure I.7**).

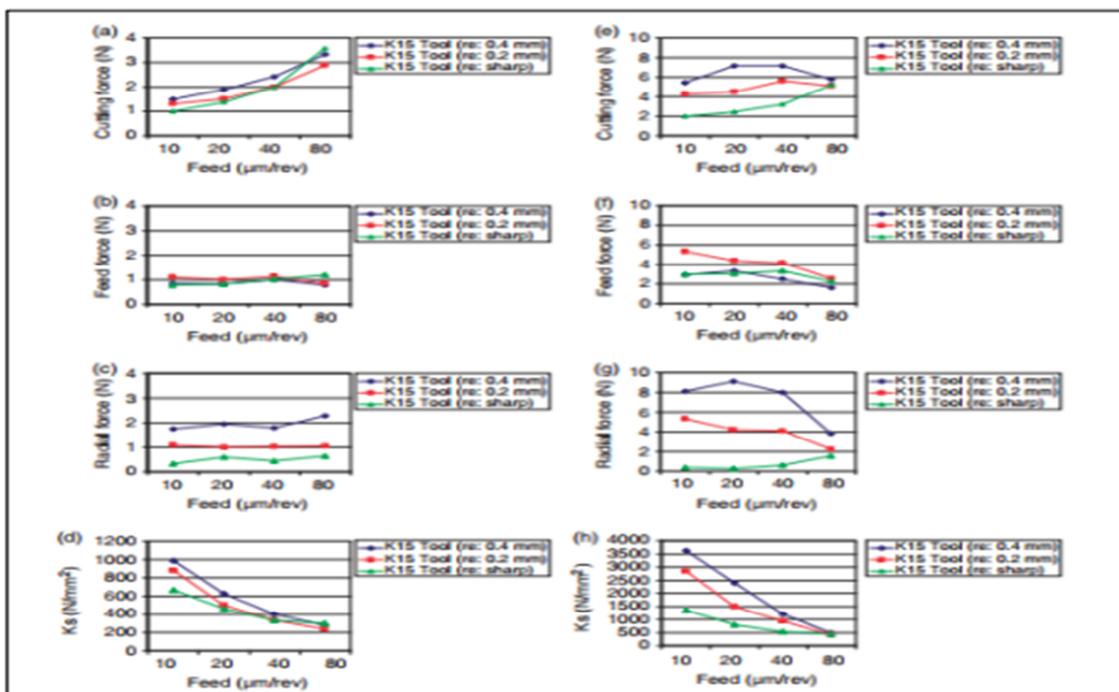


Figure I. 7 :. Effet de l'avance sur (K_s) lors de l'usinage du composite PA66-GF30 et du polyamide PA66 à $V_c = 70$ m / min et $a_p = 150$ mm : (a- d) pour le polymère PA66-GF30 et (e- h) pour le Polyamide PA66 [11].

V. N. Gait et autres [14] ont fait une analyse des effets des paramètres de coupe, la vitesse de coupe (v) et l'avance par tour (f) sur des aspects d'usinabilité, tels que l'effort de coupe (F_c), effort de coupe spécifique (K_s), et puissance (p) pendant le micro-usinage du polyamide avec 30% des fibres (PA66 GF30) avec l'outil de PCD, la méthodologie de surface de réponse (MSR) a été employée. Les résultats des expériences de micro-usinage trouvés par les auteurs montrent que l'effort de coupe augmente avec l'avance par tour pour une vitesse de coupe fixe. De plus, l'effort de

Chapitre I : Etude bibliographique

coupe diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe. L'effort de coupe est sensible à des valeurs plus élevées d'avance par tour par rapport à des valeurs plus basses de vitesse de coupe (**Figure I.8**).

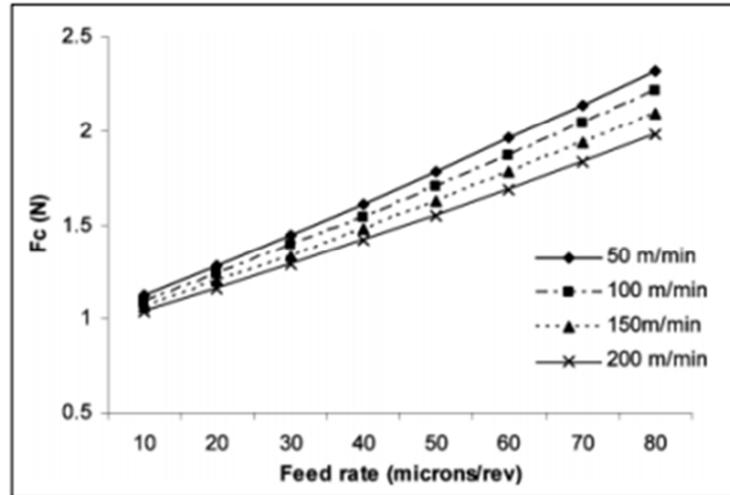


Figure I. 8: Effet de l'avance et de la vitesse de coupe sur la force de coupe [14].

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude bibliographique divisé en trois parties, la première expose les polyamides en général et le polyamide PA 6 en particulier. La seconde partie expose Généralité sur la coupe des métaux et Les paramètres technologiques de l'usinage (les effort de coupe ,la pression spécifique et la puissance consomme. La dernière partie traite l'état de l'art sur l'usinabilité des polymères.

Chapitre II : Procédures expérimentales

II.1-Introduction

Notre travail dans ce chapitre se résume à présenter les équipement étudiés pour l'étude expérimentale de l'effet de certains facteurs d'usinage, tels que la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f), ainsi que la profondeur de passe (a_p), sur les critères de l'effort de coupe (F_t), pression spécifique de coupe (K_s) et puissance de coupe (P_c). Nous présentons en même temps la démarche utilisée pour la planification des expériences et les conditions de réalisation des essais. A cet effet nous avons réalisé l'usinage de polymère semi cristallin, le polyamide (PA6), avec un outil de coupe en carbure suivant un plan d'expérience de taguchi de type L27.

Les expériences sont effectuées au laboratoire de coupe des métaux du département de Génie Mécanique et au laboratoire de LMS à l'Université de 8 Mai 1945.

II.2. Matériels utilisés

Nous présentons dans ce point le matériel utilisé pour l'élaboration des expériences. Un banc d'essais comportant un tour à charioter et à fileter, une plateforme Kistler pour l'acquisition des efforts de coupe.

II.2.1. Machine-outil

Les expériences que nous avons effectuées lors de notre étude ont été réalisées sur une tour parallèle de marque TOS TRENCIN modèle SN40C (**Figure 1et 2**), ces caractéristiques sont les suivantes :

Puissance du moteur électrique	Nombre de tours par minute	Avance en millimètres par tour
6,6 kW	45 à 2000 tr/min	0,08 à 6,4 mm/tr

Chapitre II : Procédures expérimentales



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

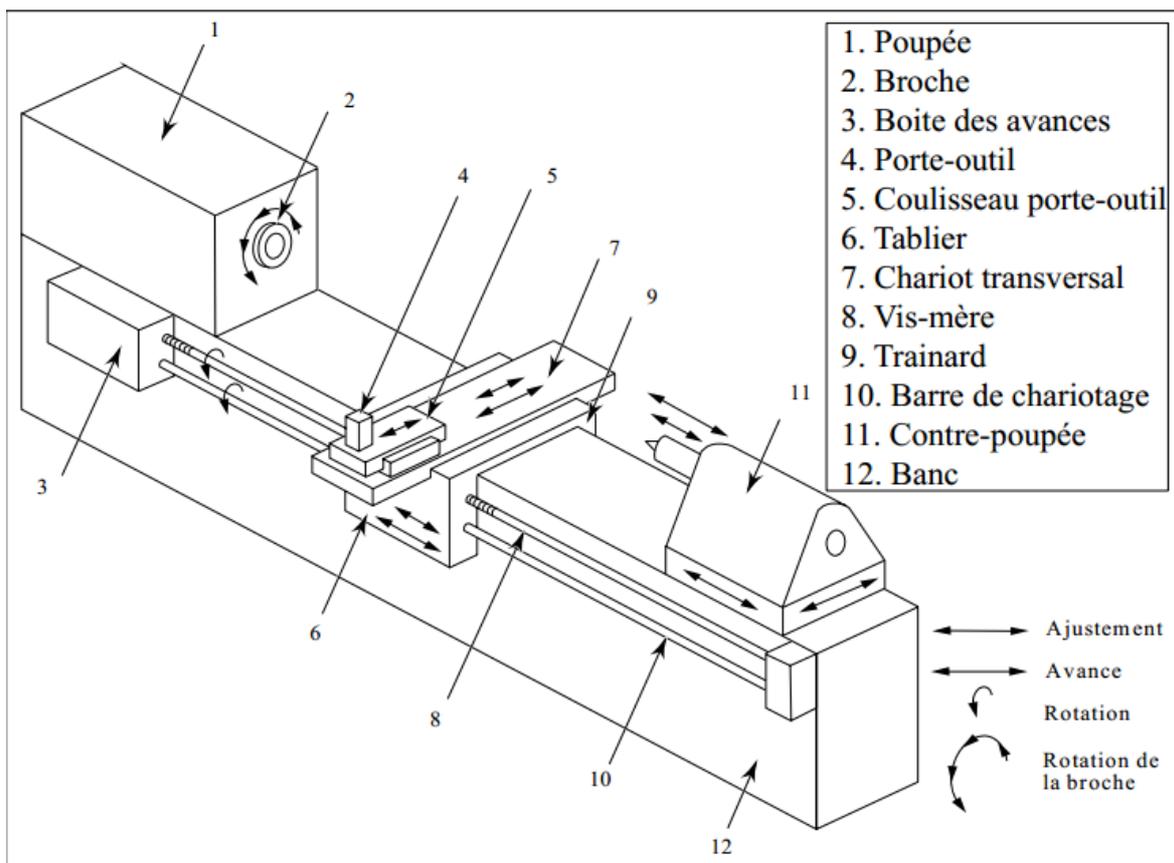


Figure II. 2: Illustration pour la machine de tour à charioter et à fileter modèle SN40.

II.2.2. Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe

Pour connaître l'amplitude des efforts de coupe, nous avons utilisé un dispositif moderne dynamomètre (KISTLER9257 B) **Figure II-3**, qui compte parmi les équipements les plus fiables pour la mesure des trois composantes de l'effort de coupe



Figure II. 3: Plateforme d'effort de coupe KISTLER 9257 B.

Ce dispositif comporte plusieurs éléments dont on en site : la plateforme, l'amplificateur de signaux, le PC avec le logiciel et enfin un traceur ou une imprimante pour tracer les courbes. Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil est fixe. Ce dernier est monté sur la plateforme, appelée aussi table, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine-outil. La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz **Figure II-4**.

Chapitre II : Procédures expérimentales

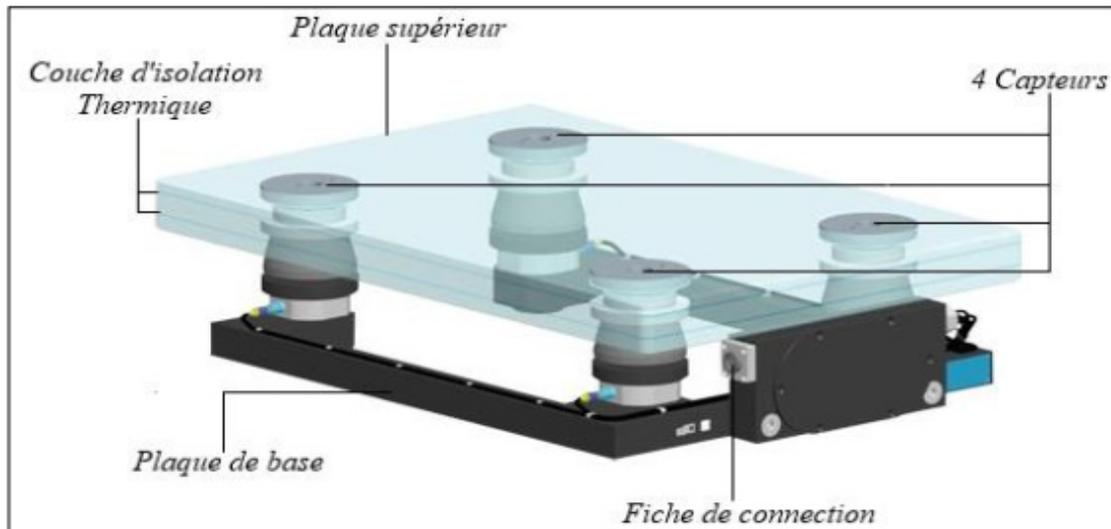


Figure II. 4: Capteur d'effort de coupe KISTLER.

Les forces qui agissent sur cette plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques. Ces dernières sont alors amplifiées par l'amplificateur des signaux.

Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (DYNOWARE) analyse et traite ces signaux et la force produite.

Lors du processus du tournage est alors directement exprimée en trois composantes

Figure II-5 :

- Force axiale : F_x (F_a)
- Force radiale : F_y (F_r)
- Force tangentielle : F_z (F_v).

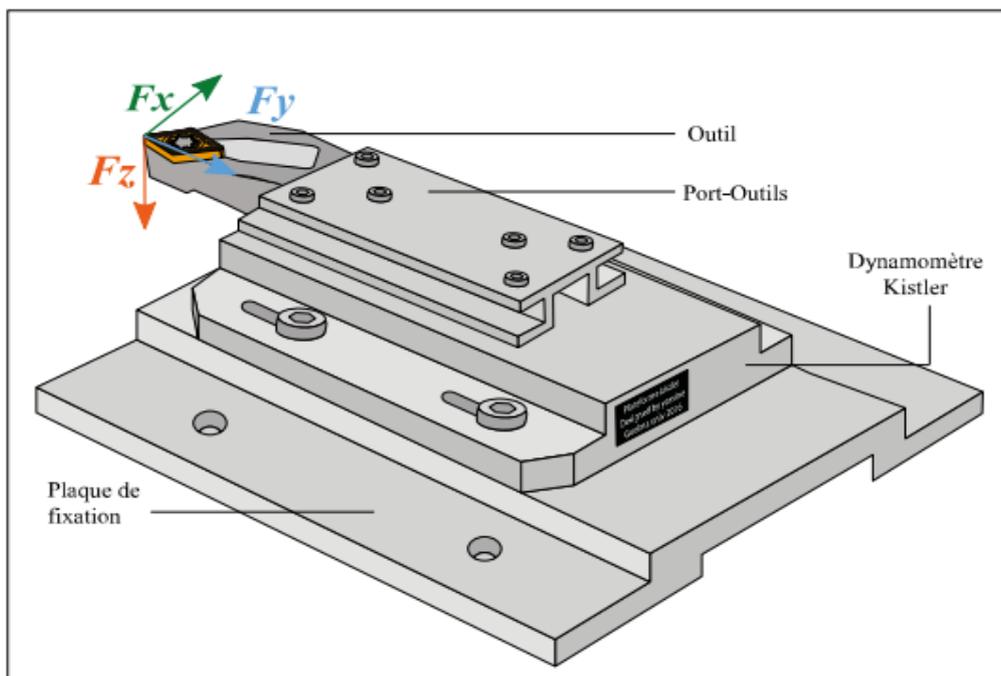


Figure II. 5: Montage du dynamomètre sur la table de la machine avec la direction des efforts de coupe.

Chapitre II : Procédures expérimentales

• Chaîne de mesure et caractéristiques

Dynamomètre à trois composantes (9257 B) : la porte outil type 9403 visible est employée pour des

outils de tournage avec une section maximum de 26×26.

Grande rigidité, fréquence propre très élevée :

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

II.2.3. Type de polyamide pour l'usinage

Le matériau utilisé dans notre étude c'est le Polyamide PA6 de couleur blanche **Figure II-6**, tous les caractéristiques physiques et thermiques pour le Polyamide PA6 sont données dans le **Tableau II-1**.

Tableau II. 1: Les propriétés physiques et thermiques pour le polyamide PA6

Propriétés Physiques	Norme DIN	Unités	
Densité	53479	[g/cm ³]	1.14
Absorption d'eau à 23 [°C] HR50 [%]	53495	[%]	3.0
Dureté	53505	-	R100
Résilience	53453	[KJ/m ²]	>7
Allongement à la rupture	53455	%	50
Résistance à la traction	53455	[N/mm ²]	70-80
Module d'élasticité en traction	43457	[N/mm ²]	2800
Propriétés Thermiques			
T°C d'utilisation en continu	52612	[T°C]	1.14
Point de Fusion	53736	[T°C]	3.0
Coefficient de dilatation thermique lin.	52328	[10E-5 mm/°C]	R100
T°C de déformation sous charge 1,85 [N/mm²]	-	[T°C]	>7
Conductivité thermique	52612	[W/°C.m]	50
Classement au feu	UL94	-	70
Indice d'Oxygène	UL94	[%]	2800



Figure II. 6: Eprouvettes pour différents essais

II.2.4. Outils de coupe et porte outil

II.2.4.1. Plaquette de coupe

Les plaquettes sont amovibles de forme carrée **figure II-7** Toutes les informations qui concernent les plaquettes de coupe sont regroupées dans le **tableau II-2**.

Tableau II. 2 : Informations relatives aux plaquettes de coupe

Caractéristiques techniques	
type d'operation	tournage
forme de la plaquette	SPMR
dimension de la plaquette	120308
matiere	Carbure
designation iso	SPMR 120308
matiere a usiner	ACIER - INOX
epaisseur plaquette(mm)	3,97
longueur arete(mm)	12
cercle inscrit plaquette(mm)	3,18
rayon plaquette(mm)	0,8
nuance	GC235

Chapitre II : Procédures expérimentales

fixation plaquette	bride
angle de depouille(°)	11
angle et forme plaquette	90° S
classe de tolerance	M
nombre d'aretes de coupe	4
type de plaquette	Positive
revetement	Oui
Marque	SANDVIK



Figure II. 7: Photos des plaquettes de coupe utilisées.

II.2.4.2. Porte-outil :

Pour la réalisation des essais d'usinage, nous avons utilisé un porte outil (Figure II 8) de désignation SD PN 25 25 M12 avec L'angle de direction principal 45°.



Figure II. 8: Porte outil utilisé.

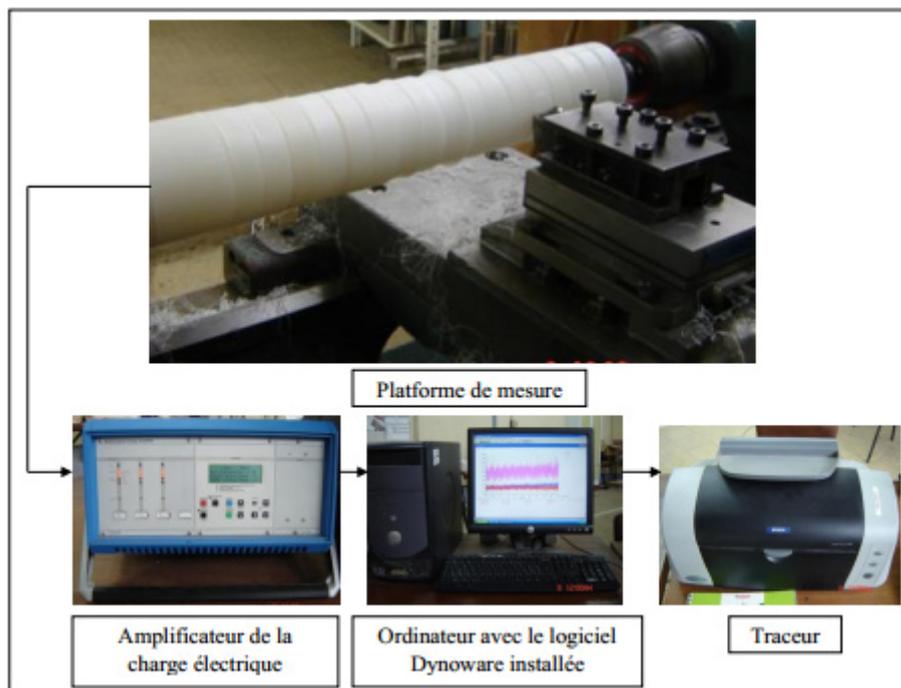


Figure II. 9: Montage de la chaîne et plateforme de mesure des efforts de coupe.

II.2.4.3 Equipements supplémentaires :

- Un pied à coulisse pour mesurer le diamètre de la pièce ;
- Un appareil photo-numérique pour prendre les photos des différents équipements utilisés.

- Les Logiciel Design Expert et MiniTAB v18 ont été utilisés pour effectuer les calculs statistiques de l'effort de coupe (F_t), la puissance de coupe (P_c), l'effort spécifique de coupe (K_s) en se basant sur les étapes de la méthodologie de surface de réponse (MSR) (Figure II-10 et II-11).

Chapitre II : Procédures expérimentales

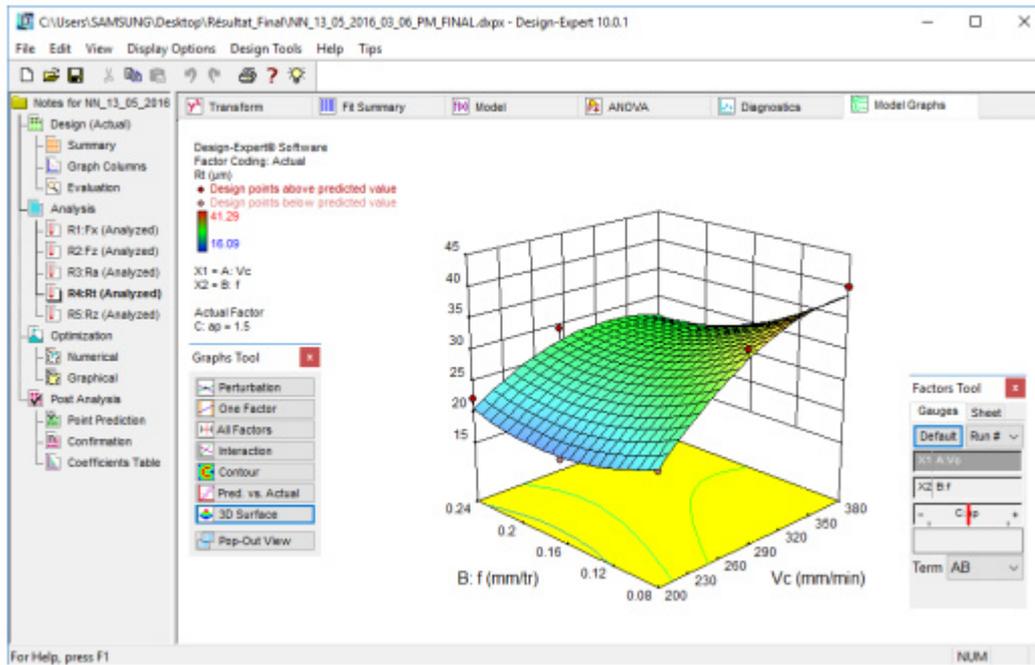


Figure II. 10: Interface de logiciel Design Expert .

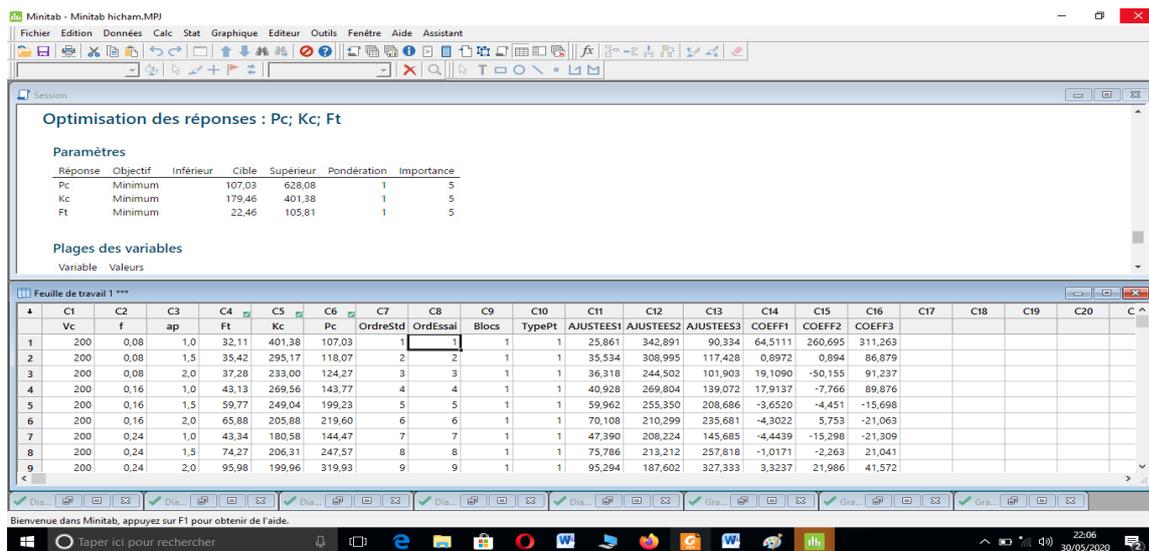


Figure II. 11: Interface de logiciel MiniTAB v18.

II.3. Planification des expériences

Parmi le grand nombre de facteurs qui influent sur le système d'usinage, on peut citer, les éléments du régime de coupe (V_c , a_p , f), ainsi que les conditions de travail (rigidité de la machine, ...etc.). Tous ces facteurs jouent le rôle de paramètres d'entrée du système d'usinage. Les efforts de coupe, pression spécifique de coupe, la puissance de coupe représentent les paramètres de sortie.

Les essais ont été réalisés suivant le plan de taguchi, la matrice de planification donne les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les différents

Chapitre II : Procédures expérimentales

régimes de coupe. Dans cette recherche les essais ont été numérotés de 1 à 27 (**Tableau II-3**). La table orthogonale standard L27 (3^{13}) de Taguchi est adoptée comme plan expérimentale. Dans notre cas, la première colonne est réservée à la variation de la vitesse de coupe (V_c); la deuxième colonne est réservée à la variation de l'avance par tours (f) et la cinquième colonne est réservée à la variation de la profondeur de passe (a_p).

Tableau II. 3: Matrice de planification pour un plan L27

N° d'essai	Facteurs		
	V_c [m/min]	f [mm/tr]	a_p [mm]
	Valeurs codifiées des facteurs		
	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	0
3	-1	-1	+1
4	-1	0	-1
5	-1	0	0
6	-1	0	+1
7	-1	+1	-1
8	-1	+1	0
9	-1	+1	+1
10	0	-1	-1
11	0	-1	0
12	0	-1	+1
13	0	0	-1
14	0	0	0
15	0	0	+1
16	0	+1	-1
17	0	+1	0
18	0	+1	+1
19	+1	-1	-1
20	+1	-1	0
21	+1	-1	+1
22	+1	0	-1
23	+1	0	0
24	+1	0	+1
25	+1	+1	-1
26	+1	+1	0
27	+1	+1	+1

Le tableau II.4 illustre les valeurs réelles des conditions de coupe adoptées ainsi que les paramètres de sorti à savoir l'effort de coupe, la pression spécifique et la puissance de coupe. Dans notre cas la pression spécifique et le puissance de coupe .

Chapitre II : Procédures expérimentales

Tableau II. 4 : Matrice de planification pour un plan Taguchi (L27).

N° d'essais	Facteurs			Réponses		
	Vc(m/min)	f(mm/dent)	ap(mm)	Ft(N)	Ks(Mpa)	Pc(W)
1	200	0,08	1,0	32,11	401,38	107,03
2	200	0,08	1,5	35,42	295,17	118,07
3	200	0,08	2,0	37,28	233,00	124,27
4	200	0,16	1,0	43,13	269,56	143,77
5	200	0,16	1,5	59,77	249,04	199,23
6	200	0,16	2,0	65,88	205,88	219,60
7	200	0,24	1,0	43,34	180,58	144,47
8	200	0,24	1,5	74,27	206,31	247,57
9	200	0,24	2,0	95,98	199,96	319,93
10	280	0,08	1,0	25,53	319,13	119,14
11	280	0,08	1,5	30,37	253,08	141,73
12	280	0,08	2,0	45,88	286,75	214,11
13	280	0,16	1,0	35,05	219,06	163,57
14	280	0,16	1,5	74,43	310,13	347,34
15	280	0,16	2,0	76,89	240,28	358,82
16	280	0,24	1,0	50,17	209,04	234,13
17	280	0,24	1,5	82,69	229,69	385,89
18	280	0,24	2,0	105,81	220,44	493,78
19	380	0,08	1,0	22,46	280,75	142,25
20	380	0,08	1,5	42,52	354,33	269,29
21	380	0,08	2,0	48,98	306,13	310,21

Chapitre II : Procédures expérimentales

22	380	0,16	1,0	37,47	234,19	237,31
23	380	0,16	1,5	62,28	259,50	394,44
24	380	0,16	2,0	76,69	239,66	485,70
25	380	0,24	1,0	43,07	179,46	272,78
26	380	0,24	1,5	70,69	196,36	447,70
27	380	0,24	2,0	99,17	206,60	628,08

II.4. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les équipements indispensables aux essais au laboratoire d'usinage. Les propriétés techniques des éprouvettes et les caractéristiques des outils de coupe ont été définies. Les conditions de coupe ainsi que la planification des expériences ont été choisies. Dans le chapitre qui suit, nous allons présenter les différents résultats des essais réalisés.

Chapitre III : Modélisation des paramètres technologiques

III.1.Introduction

Ce chapitre est consacré à la détermination des modèles mathématiques du processus de coupe en tournage du polyamide PA6 par un outil de coupe en carbure cémenté (SPMR 120308). Les modèles trouvés permettent d'exprimer les relations entre les éléments du régime de coupe (V_c , f et a_p) et les paramètres technologiques étudié (effort de coupe, pression spécifique de coupe et puissance de coupe). Le traitement des résultats est réalisé en utilisant la méthodologie des surfaces de réponse (MSR) et l'analyse de la variance (ANOVA) afin de déterminer l'influence (contribution %) des paramètres d'usinage sur les paramètres de sorti. Le traitement des résultats a été réalisé par un logiciel de statistique appelé (Design Expert 10).

III.2- Résultats expérimentaux

Dans le **tableau (III-1)** sont présentées les valeurs expérimentales de l'effort de coupe (F_t), la pression spécifique de coupe (K_s), la puissance de coupe (P_c) et. Ces valeurs ont été obtenues suite aux différentes combinaisons des éléments du régime de coupe (V_c , f et a_p) selon un plan d'expérience de Taguchi (L27) lors de tournage de polyamide PA 6. Ce plan d'expérience est le prolongement du travail réalisé par ZAIDI au paravent, le plan contient trois paramètres de sortie :

Tableau III. 1 : Résultats expérimentaux pour un plan (L27).

N° d'essais	Facteurs			Réponses		
	V_c (m/min)	f (mm/dent)	a_p (mm)	F_t (N)	K_s (Mpa)	P_c (W)
1	200	0,08	1,0	32,11	401,38	107,03
2	200	0,08	1,5	35,42	295,17	118,07
3	200	0,08	2,0	37,28	233,00	124,27
4	200	0,16	1,0	43,13	269,56	143,77
5	200	0,16	1,5	59,77	249,04	199,23
6	200	0,16	2,0	65,88	205,88	219,60
7	200	0,24	1,0	43,34	180,58	144,47
8	200	0,24	1,5	74,27	206,31	247,57
9	200	0,24	2,0	95,98	199,96	319,93
10	280	0,08	1,0	25,53	319,13	119,14

Chapitre III : Modélisation des paramètres technologiques

11	280	0,08	1,5	30,37	253,08	141,73
12	280	0,08	2,0	45,88	286,75	214,11
13	280	0,16	1,0	35,05	219,06	163,57
14	280	0,16	1,5	74,43	310,13	347,34
15	280	0,16	2,0	76,89	240,28	358,82
16	280	0,24	1,0	50,17	209,04	234,13
17	280	0,24	1,5	82,69	229,69	385,89
18	280	0,24	2,0	105,81	220,44	493,78
19	380	0,08	1,0	22,46	280,75	142,25
20	380	0,08	1,5	42,52	354,33	269,29
21	380	0,08	2,0	48,98	306,13	310,21
22	380	0,16	1,0	37,47	234,19	237,31
23	380	0,16	1,5	62,28	259,50	394,44
24	380	0,16	2,0	76,69	239,66	485,70
25	380	0,24	1,0	43,07	179,46	272,78
26	380	0,24	1,5	70,69	196,36	447,70
27	380	0,24	2,0	99,17	206,60	628,08

III.3. Analyse de variance ANOVA et MSR :

III.3.1. Analyse de la variance (ANOVA)

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

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

Chapitre III : Modélisation des paramètres technologiques

$$SC_f = \frac{N}{N_{nf}} \sum_{i=1}^{N_{nf}} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (\text{III.1})$$

$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$ la moyenne des réponses

- y_i : la réponse moyenne observée dans les expériences,
- N : nombre total d'expériences,
- N_{nf} : niveau de chaque facteur f

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

$$MC_i = \frac{SS_i}{df_i} \quad (\text{III.2})$$

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

$$F_i = \frac{MC_i}{MC_e} \quad (\text{III.3})$$

Avec : MC_e les carrés moyens des erreurs

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

$$\text{Cont. \%} = \frac{SC_s}{SC_t} * 100 \quad (\text{III.4})$$

III.3.2 Méthodologie des surfaces de réponses

La méthode des surfaces de réponse est un ensemble de techniques mathématiques qui se base sur la conception expérimentale pour déterminer la portée des variables d'entrée indépendantes. Cette méthode permet, grâce à des modèles mathématiques empiriques, de déterminer une relation d'approximation entre les réponses de sortie (Y), et les variables d'entrée (vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f) et la profondeur de passe (ap) pour optimiser les paramètres du procédé afin d'atteindre des réponses souhaitables. Dans cette méthode, la réponse peut s'écrire sous la forme suivante [19] :

$$Y = \varphi(V_c, f, ap) \quad (\text{III.5})$$

La méthodologie de surface de réponse (MSR) est une procédure qui comprend six étapes :

Chapitre III : Modélisation des paramètres technologiques

- 1) définir les variables d'entrée indépendantes et les réponses de sortie désirées ;
- 2) adopter un plan de conception expérimentale ;
- 3) effectuer une analyse de régression avec le modèle mathématique (quadratique) de MSR ;
- 4) analyser par ANOVA les variables d'entrée indépendantes, afin de trouver les paramètres qui affectent considérablement la réponse ;
- 5) déterminer la situation du modèle quadratique de MSR et de décider si le modèle de MSR à besoin des variables de dépistage ou non et enfin ;
- 6) optimiser, la conduite d'expérimentation et la confirmation et de vérifier les caractéristiques de performance prédite.

L'utilisation de la méthodologie de la surface de réponse permet d'une part de modéliser une variable dépendante Y, dite variable de réponse (rugosité de la surface, effort de coupe tangentiel, effort spécifique tangentiel et puissance de coupe), en fonction d'un certain nombre de variables indépendantes (facteurs), X1, X2, ..., Xk (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe), d'autre part, d'analyser l'influence et l'interaction de ces dernières sur la réponse. On peut ainsi écrire le modèle pour une réponse donnée (Y) sous la forme suivante :

$$Y = a_0 + \sum_{i=1} a_i X_i + \sum_{i=1} a_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} a_{ij} X_i X_j \quad \text{(III.6)}$$

- Y est la grandeur à laquelle s'intéresse l'expérimentateur. C'est la réponse ou la grandeur
- d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée
- Xi représente le niveau attribué au facteur i. C'est la valeur de la coordonnée du facteur i retenue par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On supposera même, par la suite, que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression) ;
- a0, ai, aij, aii représentent respectivement le terme constant, les coefficients des termes linéaires, des termes représentant les interactions entre variables et des termes quadratiques. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences. Le coefficient de détermination de la régression multilinéaire R² est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation (III.5)

$$R^2 = \frac{\Sigma(y_i - \bar{y})^2}{\Sigma(\bar{y}_i - \bar{y})^2} \quad \text{(III.7)}$$

Avec

Chapitre III : Modélisation des paramètres technologiques

- ♣ y_i : valeur de la réponse calculée à la i ème expérience ;
- ♣ \bar{y}_i : valeur mesurée à la i ème expérience ;
- ♣ \bar{y} : valeur moyenne des réponses mesurées.

III.4- Analyse statistique et modélisation des paramètres technologiques

III.4.1- Résultats de l'effort de coupe (Ft)

Le tableau (III-2) expose les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort de coupe (Ft). L'objectif est d'analyser l'effet des facteurs principaux et de déterminer la contribution des différents facteurs et interactions sur l'effort de coupe (Ft). L'analyse des résultats indique que les paramètres significatifs sont (f) avec une contribution de 46.28%, suivie par (ap) et (Vc) avec une contribution respective de (39.96 et 0.07)%. Les interactions (Vc x ap), (f x ap) sont aussi significatives avec une légère contribution de moins de 7.4%. Pour le terme de (ap²), son effet est aussi significatif avec une légère contribution de (0.83 %).

Tableau III. 2 : Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort Ft.

Source	D L	SomCar séqu	Contri bution	SomCa r ajust	CM ajust	Valeur F	Vale ur de p
Modèle	9	13810,9	96,87%	13810,9	1534,54	58,46	0,000
Linéaires	3	12306,3	86,32%	12338,2	4112,73	156,69	0,000
Vc	1	10,6	0,07%	14,5	14,49	0,55	0,468
f	1	6598,7	46,28%	6559,3	6559,33	249,90	0,000
ap	1	5697,1	39,96%	5764,4	5764,37	219,61	0,000
Carré	3	307,3	2,16%	307,3	102,43	3,90	0,027
Vc*Vc	1	77,7	0,55%	77,7	77,74	2,96	0,103
f*f	1	111,1	0,78%	111,1	111,05	4,23	0,055
ap*ap	1	118,5	0,83%	118,5	118,49	4,51	0,049
Interaction à 2 facteurs	3	1197,3	8,40%	1197,3	399,09	15,20	0,000
Vc*f	1	12,5	0,09%	12,5	12,47	0,47	0,500
Vc*ap	1	133,1	0,93%	133,1	133,11	5,07	0,038
f*ap	1	1051,7	7,38%	1051,7	1051,69	40,07	0,000
Erreur	17	446,2	3,13%	446,2	26,25		
Total	26	14257,1	100,0%				

III.4.1.2- Graphes des effets moyens et des interactions

La figure (III-1) montre les effets moyens des paramètres de coupe sur l'effort de coupe (Ft). On remarque que l'avance (f) est le facteur le plus influent sur l'effort de coupe (Ft) car il a la plus grande pente suivie par la profondeur de passe (ap) et en dernier lieu la vitesse de coupe (Vc). La figure (III-2) expose le diagramme des interactions des paramètres de coupe pour l'effort de coupe (Fc). L'analyse des

Chapitre III : Modélisation des paramètres technologiques

graphes dévoile que les courbes pour les interactions ($V_c \times ap$) et ($f \times ap$) ne sont pas parallèle, ce qui veut dire qu'il y'a des interactions significatives avec des faibles contributions qui ne dépasse pas les 7.4% dans le meilleur des cas (**tableau III-2**)

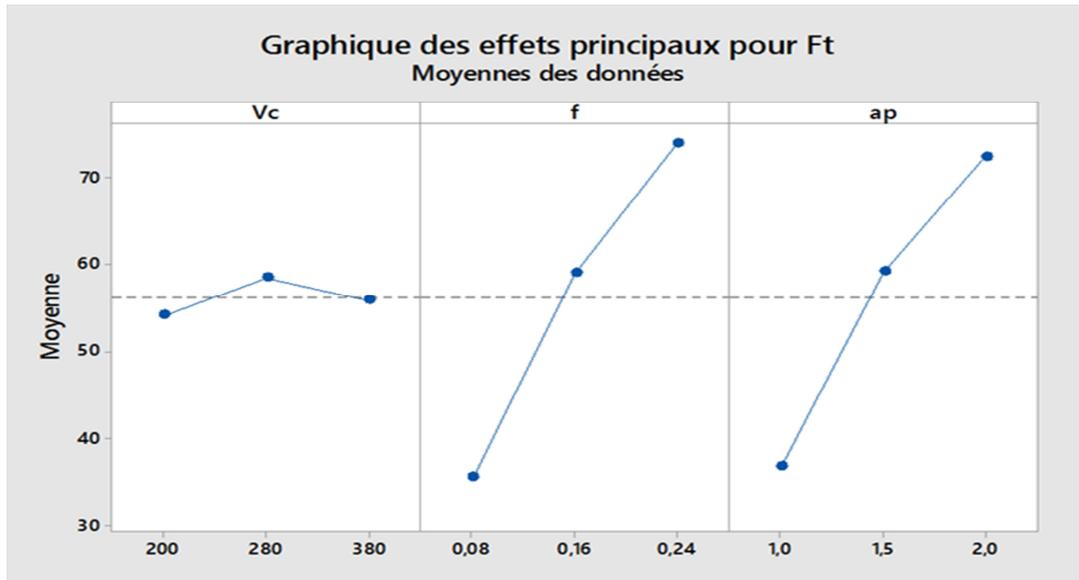


Figure III. 1 :Graphique des effets principaux pour (Ft).

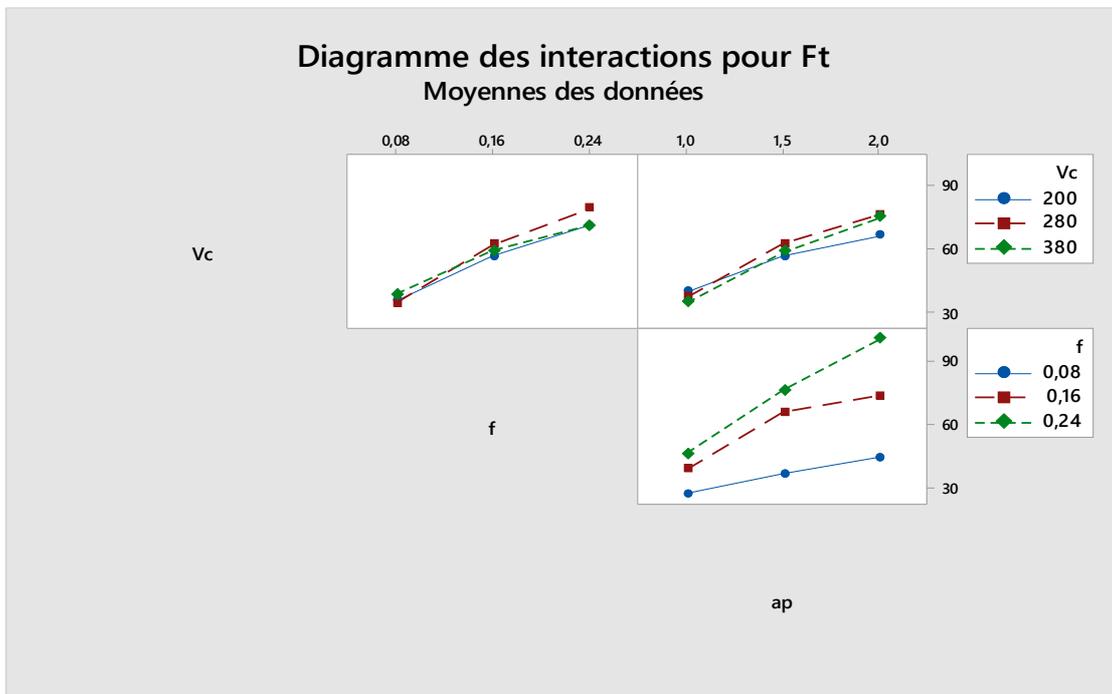


Figure III. 2 : Diagramme d'interaction pour (Ft).

Chapitre III : Modélisation des paramètres technologiques

III.4.1.3- Equation de régression pour l'effort de coupe (Ft)

Le modèle de l'effort de coupe (Ft) est donné par l'équation suivante (III-4). Son coefficient de détermination (R²) est de 96,87%

$$F_t = -43,7 + 0,183 V_c + 144 f + 30,3 a_p - 0,000451 V_c * V_c - 672 f * f - 17,78 a_p * a_p - 0,141 V_c * f + 0,0739 V_c * a_p + 234,0 f * a_p \quad (III.8)$$

La Figure (III-3) montre une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites (données par le modèle) de l'effort de coupe (Ft). L'analyse de la figure (III.3) montre une très bonne corrélation avec (R² = 96,87%).

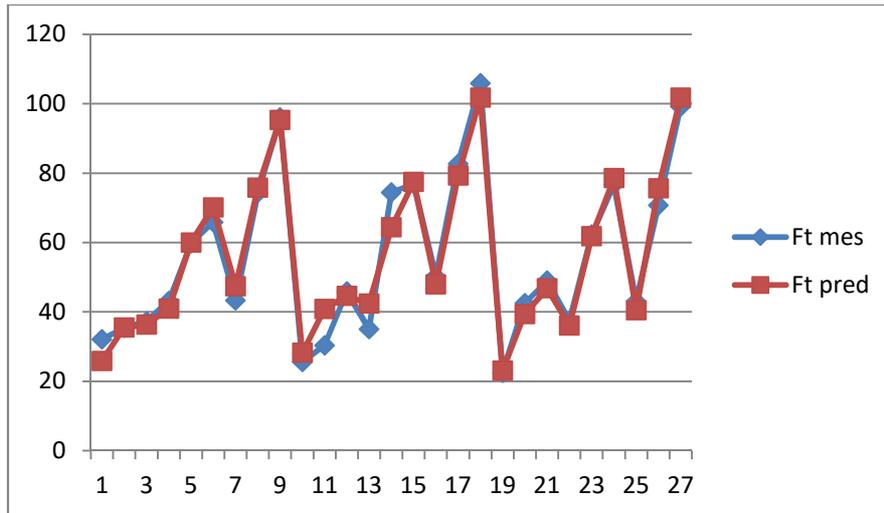


Figure III. 3 : Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites du (Ft).

III.4.1.4- Diagrammes de surfaces 3D et graphique de Contour :

la figure (III-4) représente Les graphiques 3D de l'effort de coupe (Ft) en fonction des facteurs d'expérimentation en fonction de (Vc,f et ap). Dans la figure (III-4-a) montre une augmentation de l'avance (f) qui a un effet significatif sur (Ft) et diminution de vitesse de coupe. Dans la figure (III.4.b) montre une augmentation de (ap) avec une diminution de (vc). Dans la figure(III.4.c) montre une grande augmentation de (Ft).

Chapitre III : Modélisation des paramètres technologiques

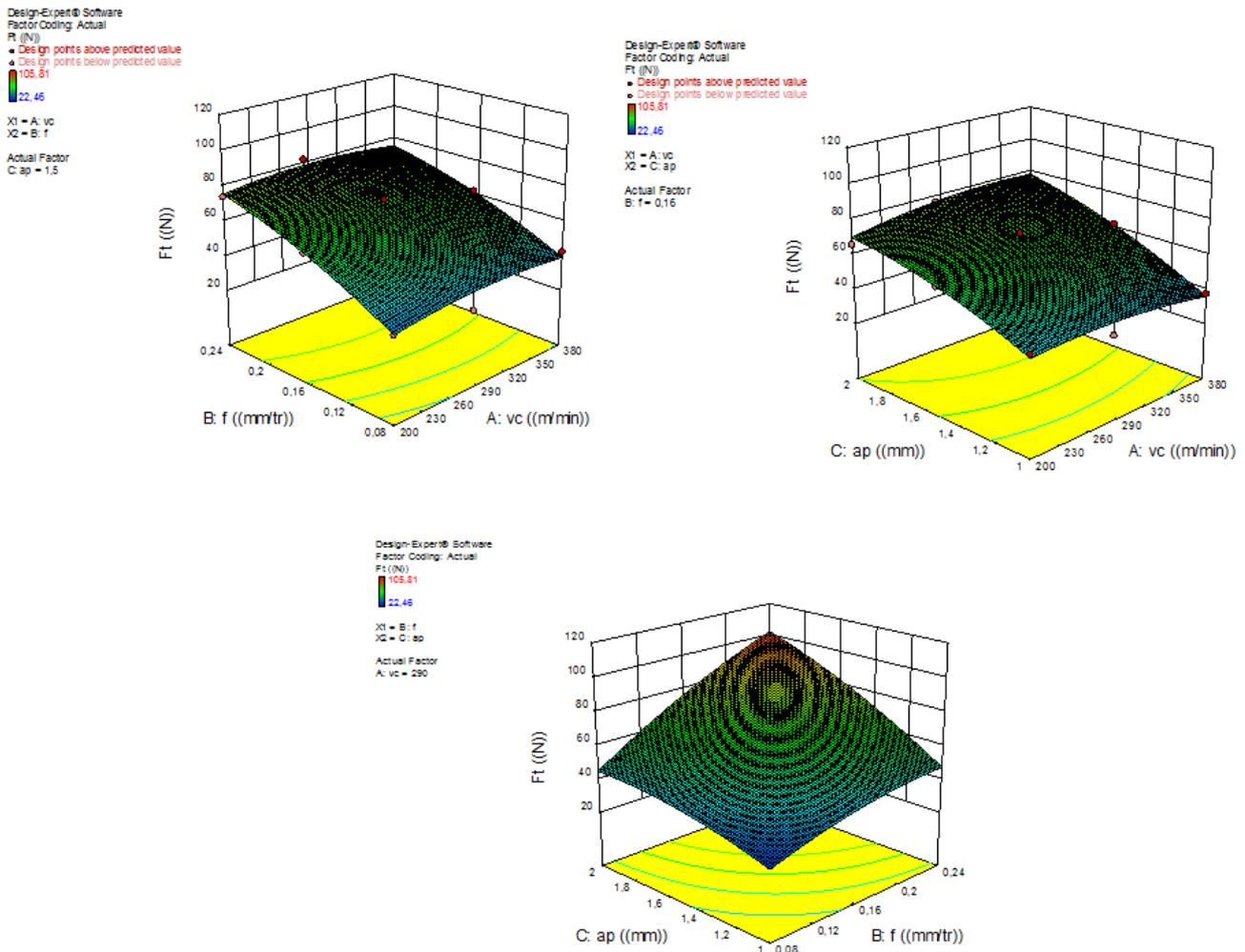


Figure III. 4 : Diagrammes de surfaces de (F_t) en fonction de (v_c , f , a_p).

Les graphes de contour dans **la figure III.5** permettent de visualiser la surface de réponse (F_t), et aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables. Le diagramme montre la relation entre une valeur de réponse (dans notre cas F_t) et trois facteurs à partir d'un modèle d'équation. Les points ayant la même réponse sont joints pour générer les lignes de contours des réponses constantes.

Chapitre III : Modélisation des paramètres technologiques

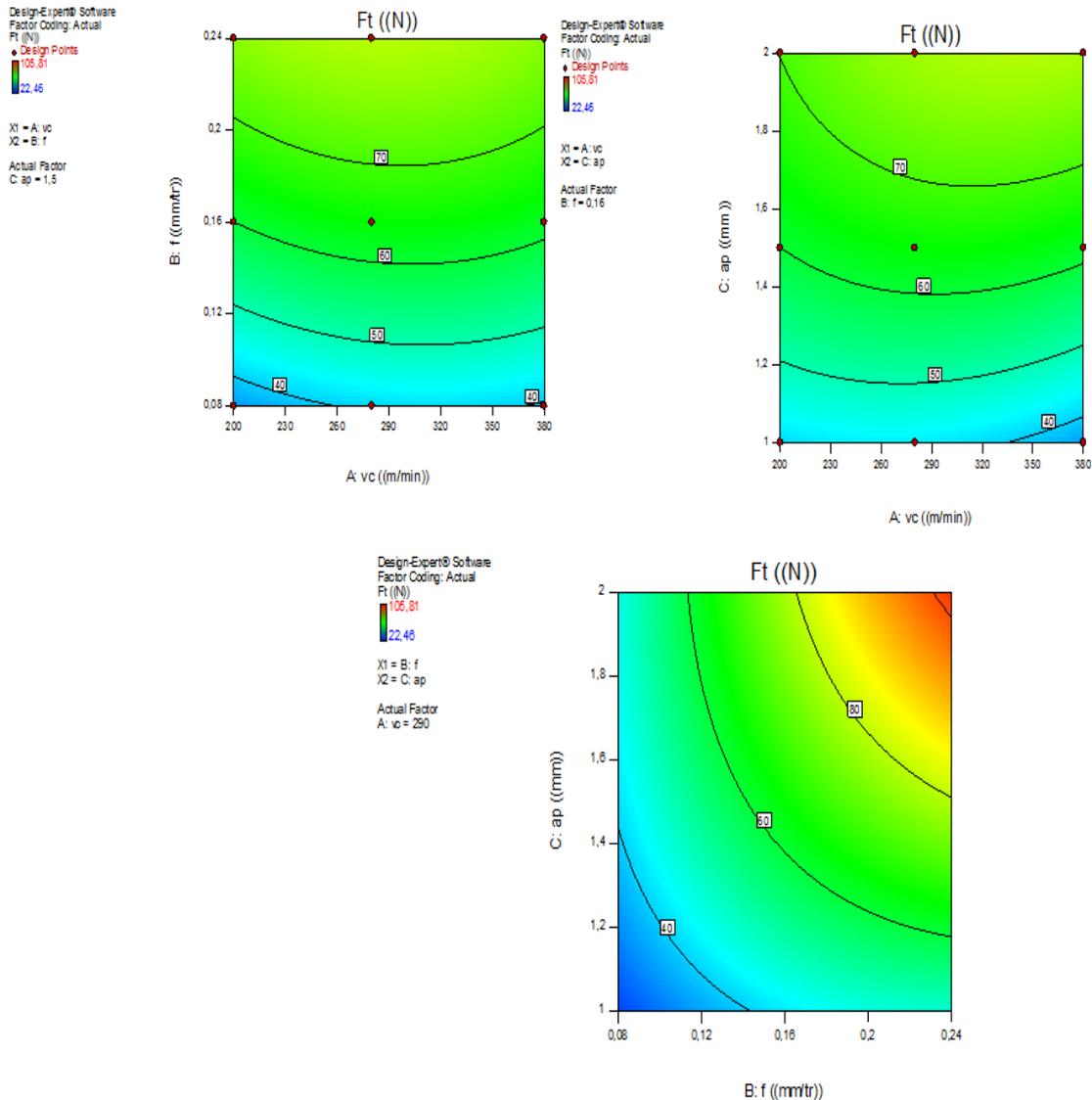


Figure III. 5 : Graphique de Contour de (F_t) en fonction de V_c ; f ; a_p .

III.4.2- Résultats de la pression spécifique de coupe (K_s)

III.4.2.1- Analyse de la variance pour (K_s)

Le tableau (III-3) illustre les résultats dans de l'analyse de la variance (ANOVA) pour la pression spécifique de coupe (K_s). Le but est d'analyser l'effet des facteurs principaux du régime de coupe ainsi que les interactions sur la pression spécifique de coupe (K_s). L'analyse des résultats montre que les paramètres significatifs sont l'avance (f) avec une contribution de 5,962%, suivie par (a_p) et (V_c) avec (1,75 et 0,01)% de contributions respectivement. Tous les termes carré ayant une faible contributions tel que V_c^2 f^2 a_p^2 ces contributions (0.15, 0.26, 1.86)% successives. avec de faibles contributions qui n'atteignent pas les 1,86%. Les interactions ($V_c * a_p$,

Chapitre III : Modélisation des paramètres technologiques

f*ap) ayant une faible influence sur la pression spécifique ces contributions (7.69, 5.99)%. Toutes les autres facteurs n'ont pas d'influence significatifs

Tableau III. 3: Résultats de l'ANOVA pour l'effort de coupe spécifique (Ks).

Source	DL	SomCar séq	Contrib ution	SomCa r ajust	CM ajust	Valeur F	Vale ur de p
Modèle	9	58603,5	77,42%	58603,5	6511,5	6,48	0,001
Linéaires	3	46463,1	61,38%	46284,6	15428,2	15,34	0,000
Vc	1	9,7	0,01%	14,4	14,4	0,01	0,906
f	1	45128,1	59,62%	45186,7	45186,7	44,94	0,000
ap		1325,3	1,75%	1083,4	1083,4	1,08	0,314
Carré	3	1718,3	2,27%	1718,3	572,8	0,57	0,643
Vc*Vc	1	115,5	0,15%	115,5	115,5	0,11	0,739
f*f	1	198,6	0,26%	198,6	198,6	0,20	0,662
ap*ap	1	1404,2	1,86%	1404,2	1404,2	1,40	0,254
Interaction à 2 facteurs	3	10422,2	13,77%	10422,2	3474,1	3,46	0,040
Vc*f	1	61,7	0,08%	61,7	61,7	0,06	0,807
Vc*ap	1	5824,7	7,69%	5824,7	5824,7	5,79	0,028
f*ap	1	4535,7	5,99%	4535,7	4535,7	4,51	0,049
Erreur	17	17092,3	22,58%	17092,3	1005,4		
Total	26	75695,8	100,00%				

III.4.2.2- Graphes des effets moyens et des interactions :

La figure (III-6) présente les effets moyens des paramètres de coupe sur la pression spécifique de coupe (Ks). On remarque que l'avance (f) est le facteur qui a le plus important impact sur la pression spécifique de coupe car il a la plus grande pente, suivie par la profondeur de passe (ap) et en dernier lieu la vitesse de coupe (Vc). La figure (III-7) montre le diagramme des interactions des paramètres de coupe pour la pression spécifique de coupe (Ks). D'après l'allure des courbes, qu'il y'a des interactions entre tous les variables, ce qui est en accord avec les résultats de l'ANOVA du tableau (III-4). Ce dernier indique que tous les interactions sont significatives, mais avec de faibles contributions (inférieur à 8%).

Chapitre III : Modélisation des paramètres technologiques

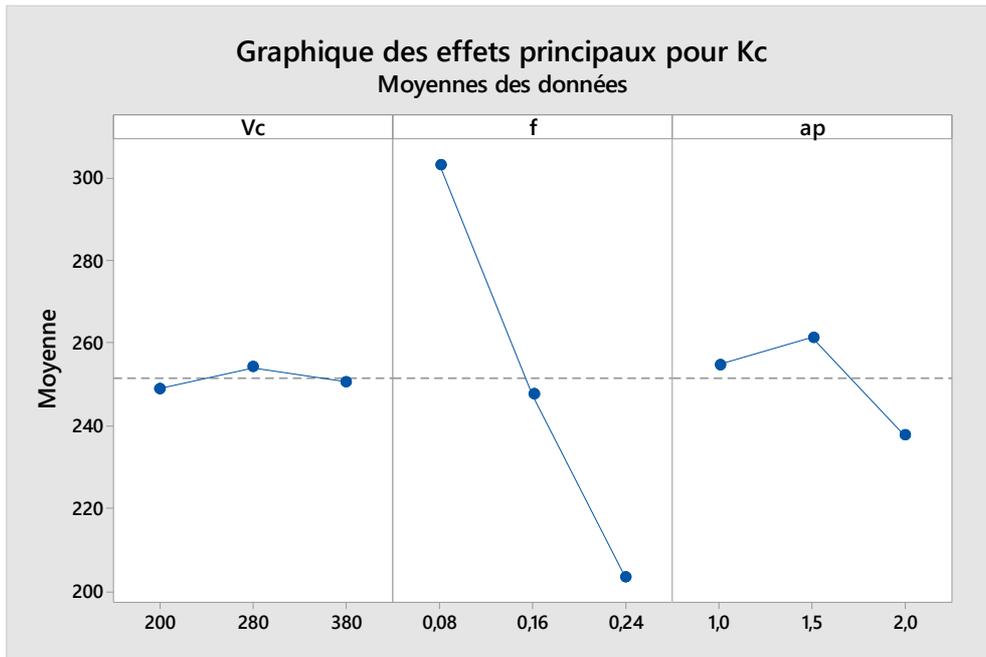


Figure III. 6 :Graphique des effets principaux pour (Ks).

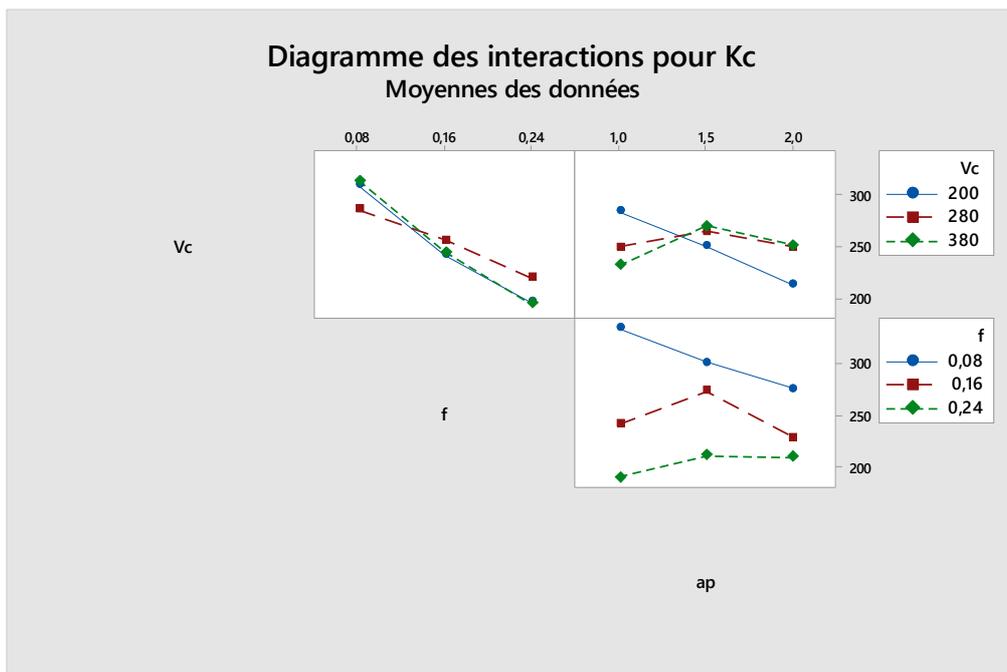


Figure III. 7 : Diagramme d'interaction pour (Ks).

III.4.2.3- Equation de régression pour le critère (Ks)

Le modèle de la pression spécifique de coupe (K_s) est donné par l'équation ci-après (III.5). Son coefficient de détermination (R^2) est de 77,42%

$$K_s = 535 - 0,35 V_c - 1553 f - 51 ap - 0,00055 V_c * V_c + 899 f * f - 61,2 ap * ap - 0,31 V_c * f + 0,489 V_c * ap + 486 f * ap \quad (III.9)$$

Chapitre III : Modélisation des paramètres technologiques

La Figure (III-16) présente une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites (données par le modèle) de la pression spécifique de coupe (K_s). L'analyse de cette figure indique une corrélation acceptable avec un coefficient de détermination $R^2 = 77,42\%$

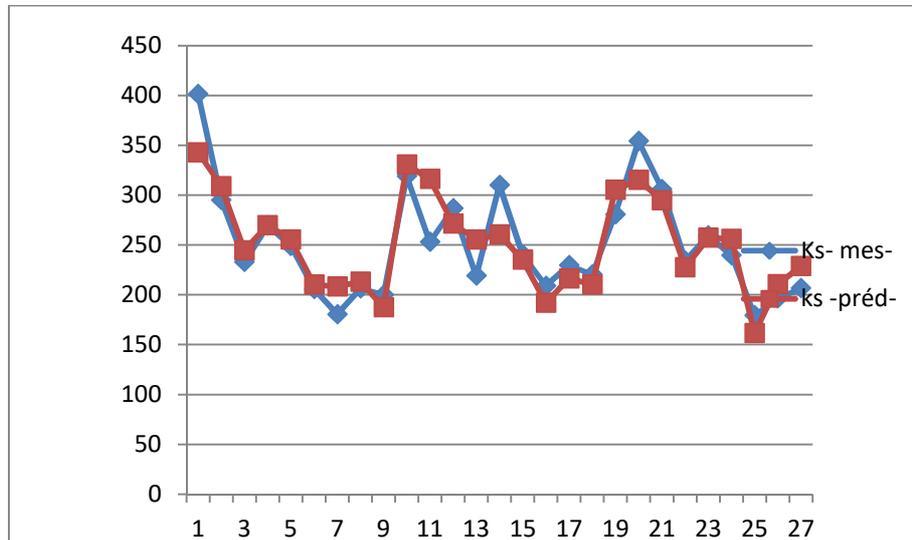


Figure III. 8 : Graphe des valeurs réelles et prédites de la pression spécifique de coupe (K_s).

III.4.2.4- Diagrammes de surfaces 3D et Graphique de Contour

La figure (III-9) expose les diagrammes (3D) de la pression spécifique de coupe (K_s) en fonction des conditions de coupe (V_c , f et a_p). La figure (III-9-a et b) montre que la vitesse de coupe (V_c) a la plus grande influence sur la pression spécifique de coupe (K_s) vu sa pente élevée. Dans la figure (III-9-c), on remarque une légère diminution de (K_s) en fonction de la profondeur de passe (a_p) et l'avance (f).

Chapitre III : Modélisation des paramètres technologiques

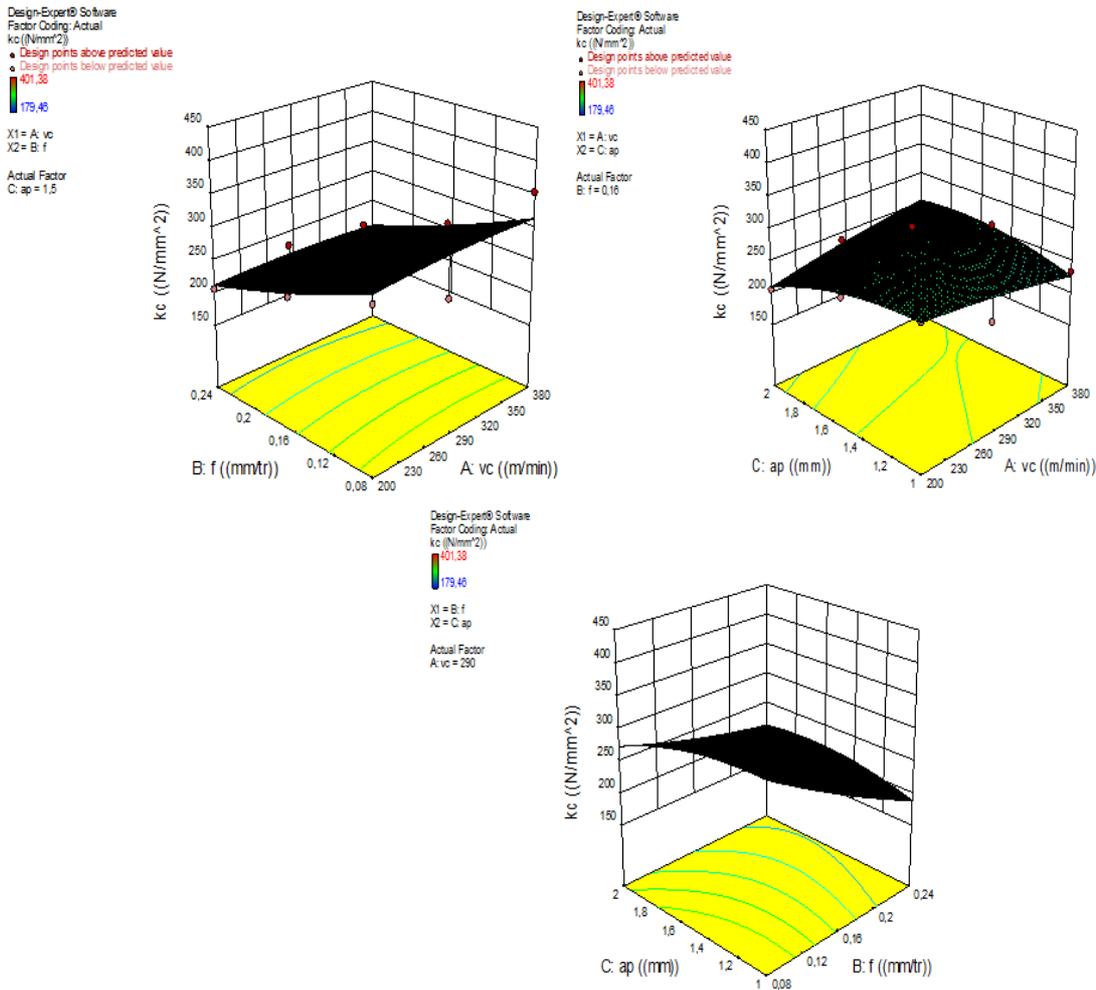


Figure III. 9 : Diagrammes de surfaces de (K_s) en fonction de (V_c , f_z , a_p).

Les graphes de contour figure (III-10) permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi de prédire les valeurs de réponse de la pression spécifique dans n'importe quelle zone du domaine expérimental. Comme ils dévoilent nettement que la plus grande pression (K_s) est obtenue à faible avance (f_z) et profondeur de passe (a_p).

Chapitre III : Modélisation des paramètres technologiques

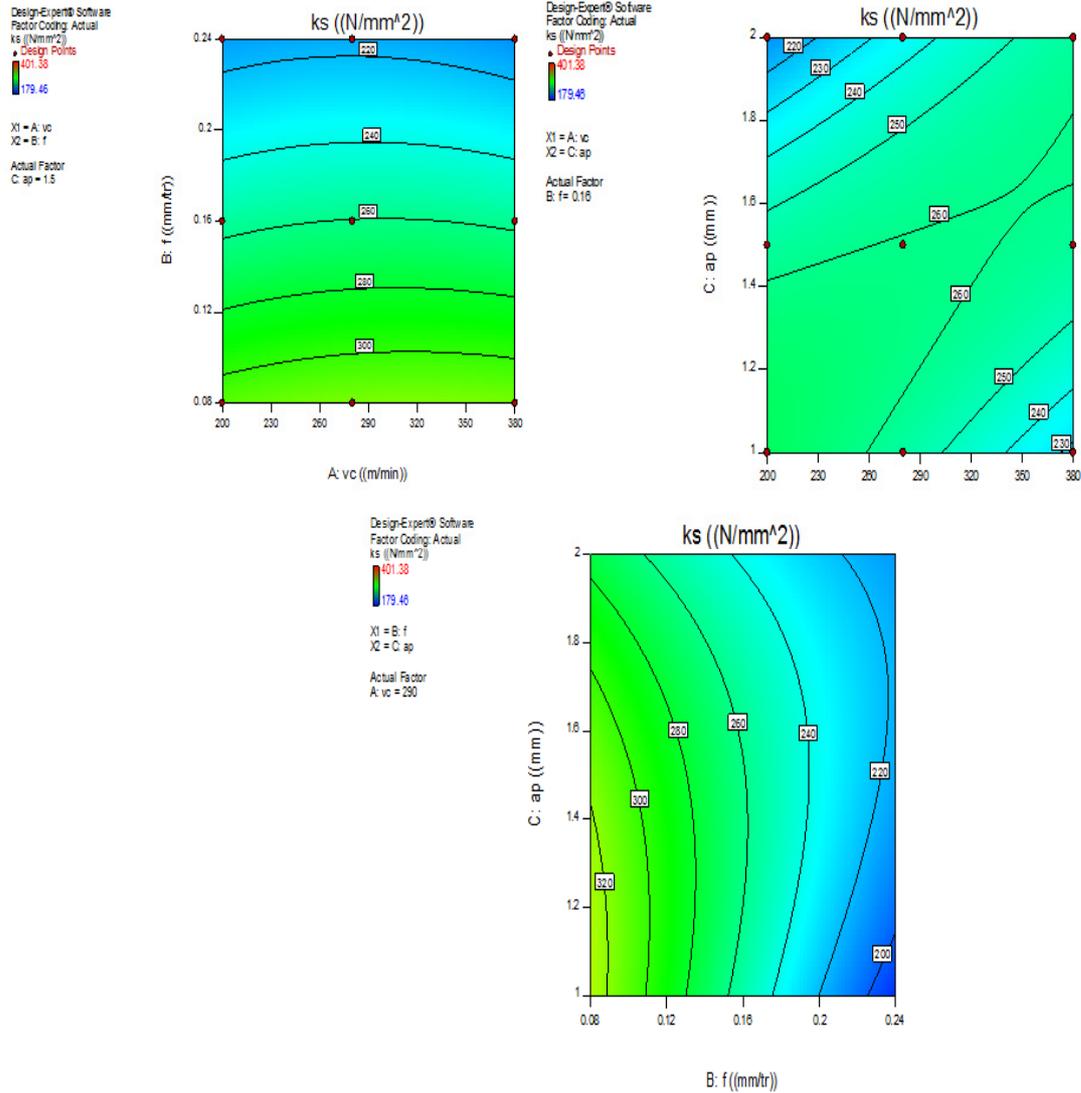


Figure III. 10 :Graphique de Contour de (K_s) en fonction de V_c , f_z , a_p .

III.4.3- Résultats de la puissance de coupe (P_c)

III.4.3.1- Analyse de la variance pour (P_c)

Le tableau (III.4) présente les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour la puissance de coupe (P_c). L'objectif est d'analyser l'impact des facteurs principaux du régime de coupe ainsi que les interactions sur la puissance (P_c). Il est à noter que l'avance est le paramètre qui a le plus grand effet sur (P_c) avec une contribution de 30,29%, suivie par (a_p) et (V_c) avec les contributions respectives de (28,89 et 27,69)%. Les faibles contributions correspondent aux interactions ($f \times a_p$) et ($f \times V_c$) avec un pourcentage inférieur à 4,5%.

Chapitre III : Modélisation des paramètres technologiques

Tableau III. 4: Résultats de l'ANOVA pour la puissance de coupe (P_c).

Source	D L	SomCar séqu	Contribu tion	SomCa r ajust	CM ajust	Valeur F	Vale ur de p
Modèle	9	477053	98,11%	477053	53006	97,94	0,000
Linéaires	3	422376	86,86%	430491	143497	265,14	0,000
Vc	1	134632	27,69%	135863	135863	251,03	0,000
f	1	147285	30,29%	149527	149527	276,28	0,000
ap	1	140459	28,89%	145101	145101	268,10	0,000
Carré	3	6823	1,40%	6823	2274	4,20	0,021
Vc*Vc	1	1436	0,30%	1436	1436	2,65	0,122
f*f	1	2662	0,55%	2662	2662	4,92	0,040
ap*ap	1	2725	0,56%	2725	2725	5,03	0,038
Interaction à 2 facteurs	3	47854	9,84%	47854	15951	29,47	0,000
Vc*f	1	5335	1,10%	5335	5335	9,86	0,006
Vc*ap	1	20824	4,28%	20824	20824	38,48	0,000
f*ap	1	21695	4,46%	21695	21695	40,09	0,000
Erreur	17	9201	1,89%	9201	541		
Total	26	486253	100,00%				

III.4.3.2- Graphes des effets moyens et des interactions

La figure (III-11) présente les effets moyens des paramètres de coupe sur la puissance de coupe (P_c). On remarque que le facteur qui a la plus grande influence sur (P_c) est l'avance (f) puisque elle a la plus grande pente, suivie par (ap et Vc) avec des pentes proche l'une de l'autre. Ce qui est logique, puisque (P_c) dépend de l'effort de coupe, et la profondeur (ap) influe beaucoup sur ce dernier (équation I.6).

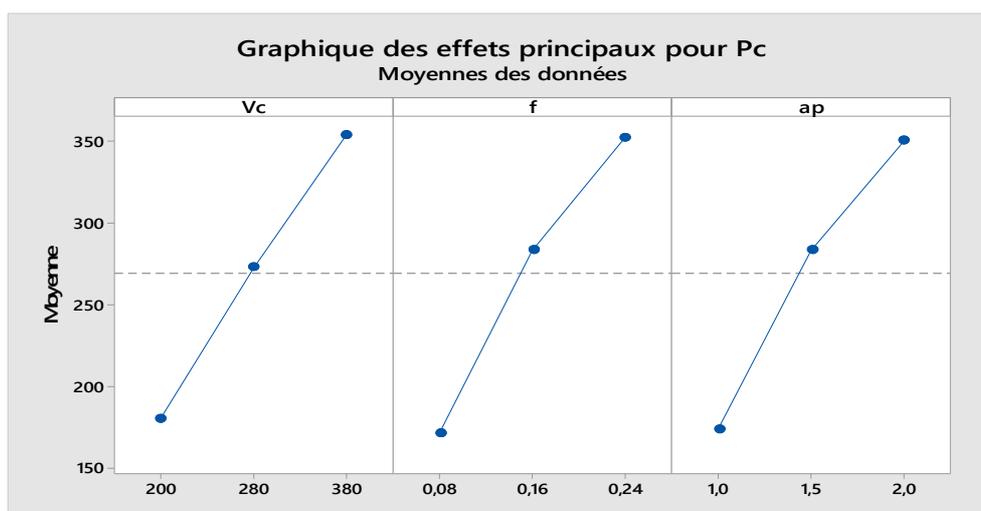


Figure III. 11: Graphique des effets principaux pour la puissance de coupe (P_c).

La figure (III-12) expose le diagramme des interactions des paramètres d'usinage pour la puissance de coupe (P_c). Cette figure montre une tendance de

Chapitre III : Modélisation des paramètres technologiques

chevauchement entre les courbes des différents paramètres des interactions (f x ap) et (f x Vc), car (f) a une grande pente par rapport à (ap et Vc), ce qui veut dire que leurs trajectoires vont se croiser. Alors il y'a des interactions entre (f x ap) et (f x Vc), mais avec des faibles contributions qui n'atteignent pas les 4,5% (**tableau III.5**)

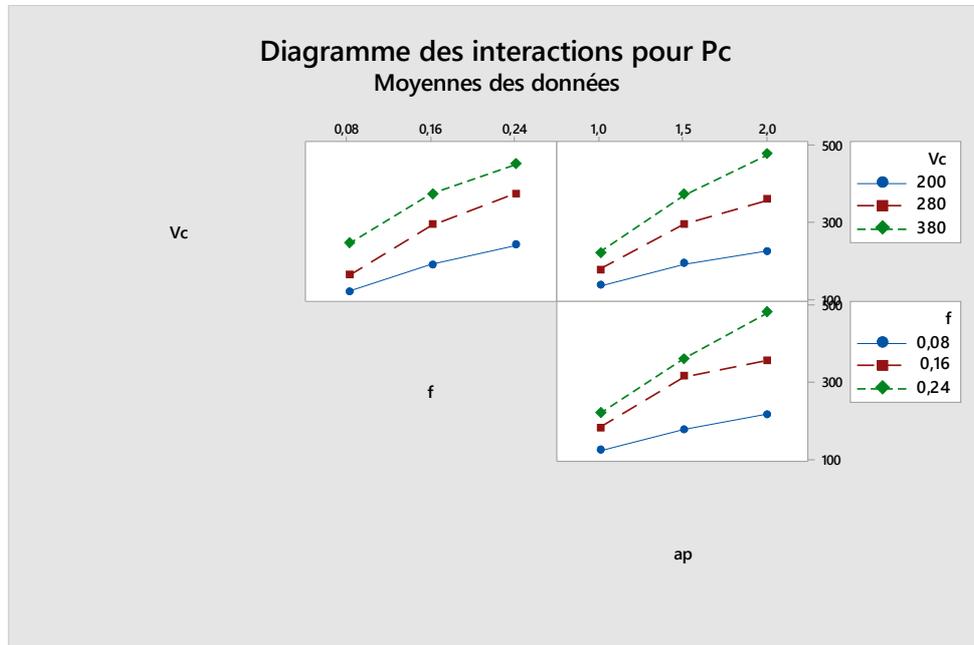


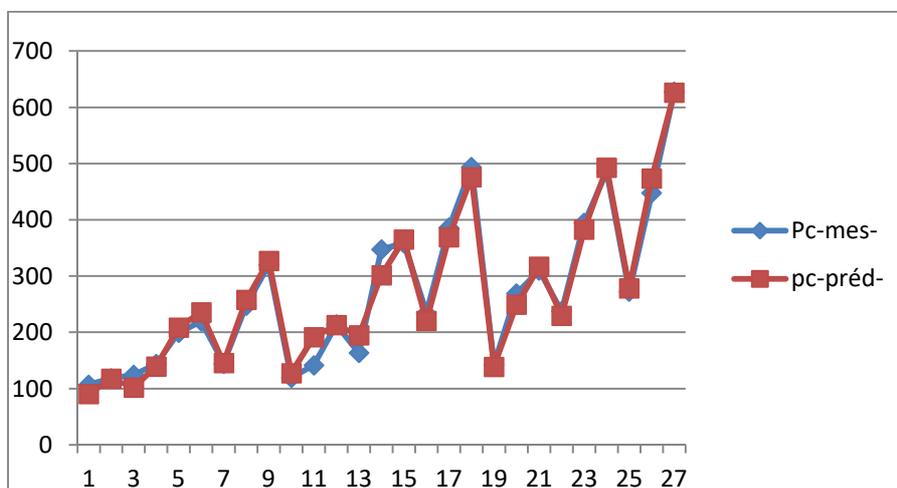
Figure III. 12 : Diagramme d'interaction pour la puissance de coupe (Pc).

III-4-3-3 Equation de régression pour la puissance de coupe (Pc)

Le modèle de la puissance de coupe (Pc) est donné par l'équation (III.6) ci-après. Son coefficient de détermination (R^2) est de 98,11%

$$Pc = -67 + 0,236 Vc - 248 f - 3 ap - 0,00194 Vc*Vc - 3291 f*f - 85,2 ap*ap + 2,922 Vc*f + 0,924 Vc*ap + 1063 f*ap \quad (III.10)$$

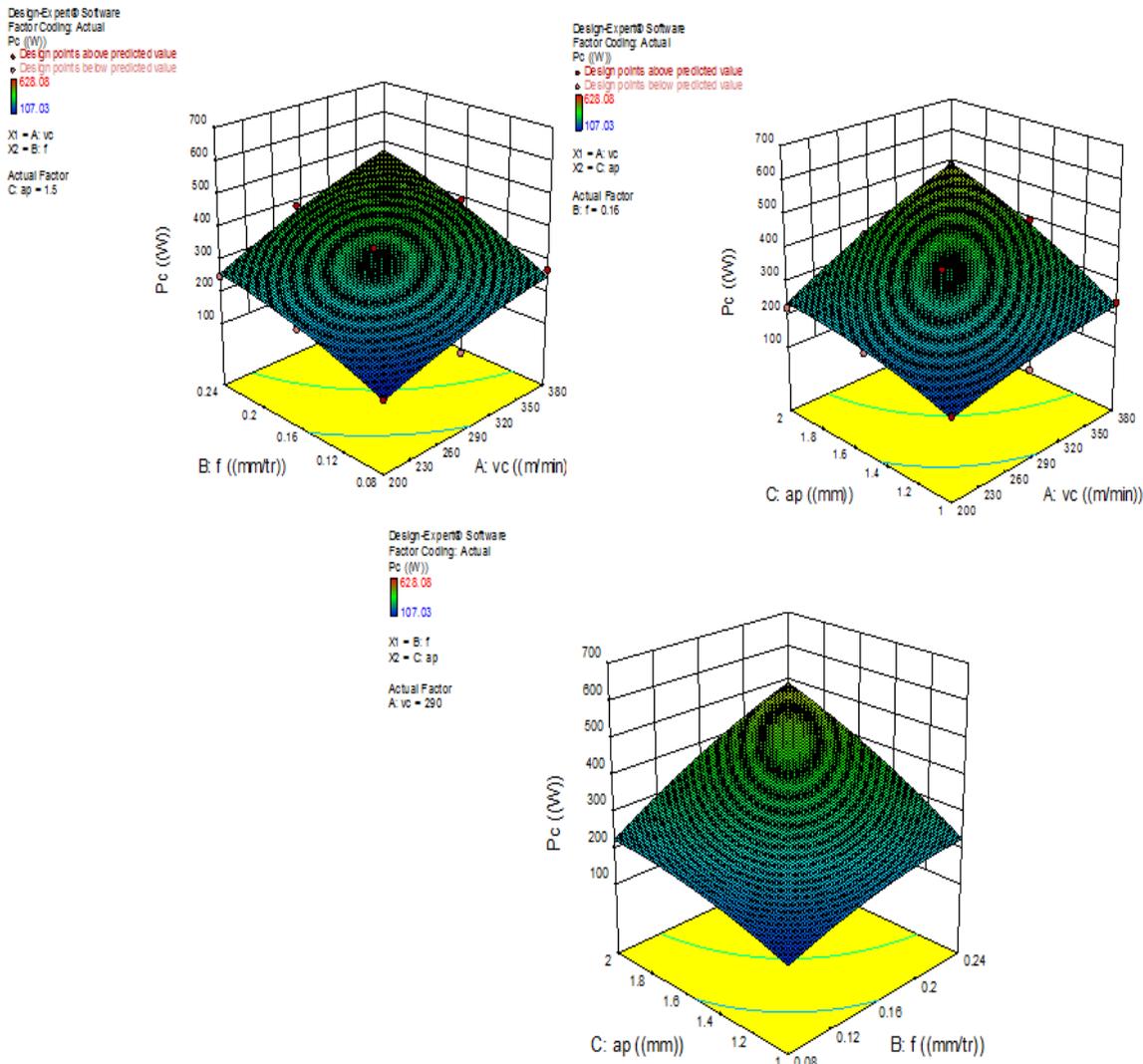
La Figure (III.13) présente une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites (données par le modèle) de la puissance de coupe (Pc). L'analyse des résultats de la figure (III.13) montre une bonne corrélation entre les deux courbes avec un coefficient de détermination de $R^2 = 98,11\%$.



Chapitre III : Modélisation des paramètres technologiques

Figure III. 13 : Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites pour la puissance de coupe (P_c).

Les graphiques (3D) de la puissance de coupe (P_c) en fonction des facteurs d'entrée sont représentées dans la figure (III.14). La figure (III.14.a) expose le diagramme (3D) de (P_c) en fonction de (f et V_c). On constate que l'augmentation de l'avance (f) et la vitesse de coupe induisent une augmentation de (P_c). Sur la figure (III.14.b) est représenté le diagramme de (P_c) en fonction de (a_p et V_c). On remarque que l'augmentation de la profondeur de passe (a_p) et de (V_c) fait augmenter la puissance de coupe (P_c) d'une manière frappante. La figure (III.14.c) illustre le diagramme de (P_c) en fonction de (f et a_p). Il est évident que l'avance est le paramètre qui a l'influence majeure sur l'augmentation de la puissance de coupe.



Chapitre III : Modélisation des paramètres technologiques

Figure III. 14: Diagrammes de surfaces de (Ks) en fonction de (Vc, fz, ap).

Les graphes de contour **figure (III-15)** permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables. Le diagramme montre la relation entre la valeur de réponse (Pc) et les trois facteurs à partir du modèle de l'équation. D'une simple vue à ces graphes on peut rapidement savoir que la plus grande puissance de coupe est atteinte aux grandes profondeurs de passe.

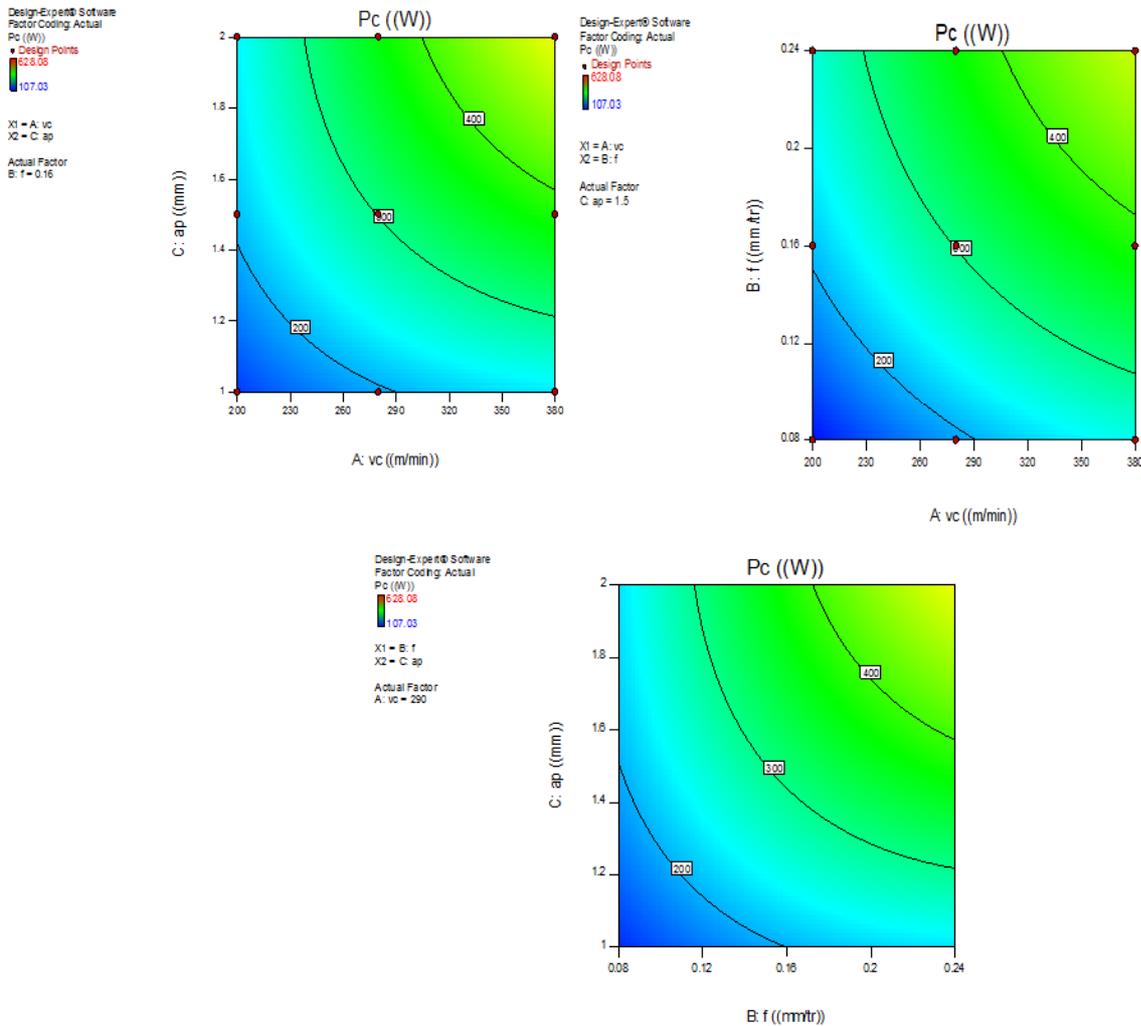


Figure III. 15 : Graphique de Contour de (Ks) en fonction de Vc, fz, ap.

Chapitre III : Modélisation des paramètres technologiques

III-5. Conclusion

Dans ce chapitre, l'application de la méthodologie des surfaces de réponse (MSR) et l'analyse de la variance (ANOVA) lors de l'usinage du Polyamide (PA 6) avec un outil de coupe en carbure a permis d'obtenir des modèles mathématiques de l'effort de coupe, pression spécifique et puissance consommée en fonction des paramètres d'usinage (V_c , f et a_p). Les modèles trouvés sont exploités pour l'optimisation des conditions de coupe dans le but de minimiser les paramètres de sortie F_t , K_s et P_c .

Chapitre IV : Optimisation des conditions de coupe

IV.1.Introduction

L'optimisation des paramètres de coupe en usinage a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche en utilisant diverses techniques, tels que les méthodes, Taguchi, GRA, GA, PSO, DF, etc..... L'optimisation est une tâche importante dans le processus d'usinage, permettant au choix des conditions de coupe les plus commodes afin d'obtenir des valeurs désirées dans une certaine variable. Ce qui a habituellement un impact économique direct tel que le temps machine ou le coût total d'opération. Donc, notre objectif dans ce chapitre est de faire une optimisation des conditions de coupe, par l'utilisation des différentes méthodes d'optimisation.

Deux types d'optimisation ont été dans ce chapitre

- Optimisation mono-objectif : En utilisant la méthode de Taguchi ;
- Optimisation multi-objectif : En utilisant la méthodologie de surface de réponse (MSR) et l'analyse relationnel gris (Grey).

IV.2.Optimisation mono-objectif

IV.2.1.méthodedeTaguchi

Le docteur Genichi Taguchi a travaillé dans le domaine de la qualité, il a notamment mis au point une méthode nommé méthode Taguchi qui permet de maîtriser la qualité dès la conception des produits. L'utilisation du plan fractionnaire permet de diminuer considérablement le nombre d'expériences à réaliser pour identifier les coefficients d'un modèle. La mise au point de plans fractionnaires adaptés à un modèle est une procédure longue et peut s'avérer complexe. Taguchi a mis au point une méthode originale permettant, à partir de quelques tables standard, de résoudre facilement la plupart des problèmes industriels en matière de plan d'expériences . Ces tables standards de Taguchi considèrent que les interactions entre deux facteurs sont négligeables sauf quelques-unes parfaitement identifiées. Et les interactions d'ordre supérieur à deux seront toujours considérées comme négligeables

IV.2.1.1. La démarche de la méthode de Taguchi

La démarche de Taguchi se présente en six étapes [17] :

➤ **Etape 1** : décrire le problème à résoudre en essayant de quantifier l'objectif à atteindre.

➤ **Etape2** : sélectionner les paramètres les plus influents après un recensement exhaustif.

Les paramètres listés non retenus seront maintenus constants au cours des essais.

➤ **Etape 3** : construire le plan en utilisant des tables ayant des propriétés d'orthogonalité

pour configurer les combinaisons des facteurs à tester. La propriété d'orthogonalité permet de faire varier dans une série d'essais plusieurs facteurs en même temps sans que l'effet influe sur les autres facteurs. Cette propriété a pour conséquence de diminuer le nombre d'essais

Chapitre IV : Optimisation des conditions de coupe

- **Etape 4** : réaliser les essais en reproduisant, sur le produit ou le processus, chaque combinaison du plan et en consignait les réponses dans un tableau.
- **Etape5** : Calculer le rapport S/N et analyser les résultats. Il existe deux méthodes complémentaires : l'analyse graphique mise au point par Taguchi et l'analyse de la variance statistique (AVOVA).
- **Etape6** : conclure à partir de la synthèse des résultats obtenus, sélectionnez les niveaux optimaux des paramètres du procédé et décider des actions à mener (réglages des paramètres, remise en cause de la conception du produit ou du processus, etc.)

IV.2.1.2.Optimisation mono-objectif utilisant la méthode de Taguchi (S/N ratio)

Le terme signal représente l'effet souhaitable de la caractéristique de sortie et le terme bruit représente l'effet indésirable de la caractéristique de sortie. Le rapport S/N mesure les caractéristiques de qualité déviant des valeurs désirées. Le rapport S/N le plus élevé signifie le niveau optimal des paramètres de processus de coupe les faibles efforts de coupe sont souhaitables dans cette étude. La caractéristique S/N la plus petite est la meilleur (*Smaller-the-better*) a été utilisée pour le traitement des rapports S/N la caractéristique S/N la plus grande est la meilleur (*Larger-the-better*). Les caractéristiques de qualité S/N , « la plus petite est mieux » et « la plus grande est mieux » sont calculées avec les équations suivantes:

Le plus petit est le meilleur (*Smaller-the-better*) :

$$\frac{S}{B} = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i^2) \right] \quad (\text{IV.1})$$

Où : n = nombre de répétitions et Y_i = valeur observée de la réponse, Avec : $i = 1, 2, \dots, n$.

Il est appliqué dans le cas où la minimisation des critères est demandée.

➤ □ Le plus grand est le meilleur (*Larger-the-better*) :

$$\frac{S}{B} = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \right] \quad (\text{IV.2})$$

Le tableau IV.1 résume les résultats des ratios Signal/ Bruit (S/N) pour les paramètres de sorties du processus de coupe Ft, Ks et Pc

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

Chapitre IV : Optimisation des conditions de coupe

N ⁰	V _c ; (m/min)	f ; (mm/tr)	a _p ; (mm)	S/B- FT	S/B-K _s	S/B-P _c
1	200	0,08	1	-30,1328	-52,0711	-40,5901
2	200	0,08	1,5	-30,9850	-49,4014	-41,4428
3	200	0,08	2	-31,4295	-47,3471	-41,8873
4	200	0,16	1	-32,6956	-48,6131	-43,1534
5	200	0,16	1,5	-35,5297	-47,9254	-45,9871
6	200	0,16	2	-36,3751	-46,2723	-46,8326
7	200	0,24	1	-32,7378	-45,1334	-43,1956
8	200	0,24	1,5	-37,4163	-46,2904	-47,8740
9	200	0,24	2	-39,6436	-46,0189	-50,1011
10	280	0,08	1	-28,1410	-50,0794	-41,5212
11	280	0,08	1,5	-29,6489	-48,0652	-43,0292
12	280	0,08	2	-33,2325	-49,1501	-46,6127
13	280	0,16	1	-30,8938	-46,8113	-44,2741
14	280	0,16	1,5	-37,4350	-49,8309	-50,8151
15	280	0,16	2	-37,7174	-47,6144	-51,0975
16	280	0,24	1	-34,0089	-46,4046	-47,3891
17	280	0,24	1,5	-38,3491	-47,2228	-51,7293
18	280	0,24	2	-40,4905	-46,8658	-53,8707
19	380	0,08	1	-27,0282	-48,9664	-43,0610
20	380	0,08	1,5	-32,5719	-50,9882	-48,6044
21	380	0,08	2	-33,8004	-49,7181	-49,8331
22	380	0,16	1	-31,4737	-47,3914	-47,5063
23	380	0,16	1,5	-35,8870	-48,2827	-51,9196
24	380	0,16	2	-37,6948	-47,5919	-53,7274
25	380	0,24	1	-32,6835	-45,0794	-48,7163
26	380	0,24	1,5	-36,9872	-45,8611	-53,0197
27	380	0,24	2	-39,9276	-46,3026	-55,9603

IV.2.2- Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs

Cette analyse est basée sur le calcul de la moyenne des ratios (S/B) des résultats expérimentaux obtenus pour chaque niveau des trois paramètres d'usinage (V_c, f et a_p). La moyenne des ratios (S/B) pour un niveau d'un facteur (ou d'une interaction) correspond à la somme des valeurs des ratios (S/B) pour le même niveau du facteur divisé par le nombre des ratios pour le niveau du facteur. Les valeurs relatives du rapport (S/B) les plus grandes permettront d'identifier le ou les designs optimaux.

Chapitre IV : Optimisation des conditions de coupe

IV.2.2.1- Analyse des effets principaux sur l'effort de coupe (F_t)

D'après le **tableau (IV-2)** et de la **figure (IV-1)**, on observe que les paramètres d'usinage (V_c , f et a_p) présentent des effets différents sur l'effort de coupe. La plus importante influence correspond à l'avance ($f=0.08\text{mm/tr}$) suivie par la profondeur de passe ($a_p=1\text{mm}$) et en dernier lieu vient la vitesse de coupe ($V_c=200\text{m/min}$).

Tableau IV. 2 : Moyenne des ratios S/B(R_a) pour chaque niveau des facteurs. Préférer plus petit

Niveau	V_c	f	a_p
1	-34,11	-30,77	-31,09
2	-34,44	-35,08	-34,98
3	-34,23	-36,92	-36,70
Delta	0,33	6,14	5,61
Rang	3	1	2

Selon l'approche de Taguchi, la plus grande valeur du Signal/ Bruit (S/N) représente la meilleure performance de l'effort de coupe correspond aux niveaux **f1**, **ap1**, **vc3** (les lettres représentent les paramètres d'usinage et les indices représentent les niveaux). Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales du critère de l'effort de coupe (F_t) sont donc : la plus basse vitesse de coupe 200 m/min, la plus basse avance 0.08 mm/tr et maximum profondeur de passe 1 mm. Les paramètres d'usinage optimaux ont été mis en évidence dans des cercles (**figure IV.1**).

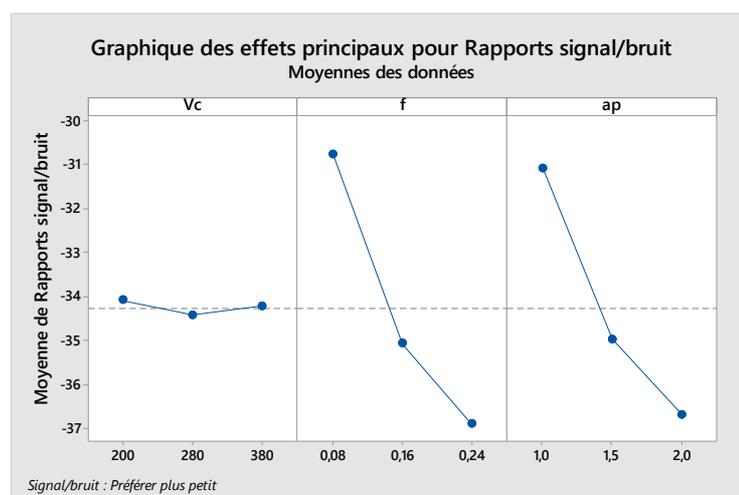


Figure IV. 1 : Graphique des effets principaux de V_c , f et a_p sur l'effort de

Chapitre IV : Optimisation des conditions de coupe

IV.2.2.2- Analyse des effets principaux sur la pression de coupe spécifique (Ks)

D'après le **tableau (IV-3)** et de la **figure (IV-2)**, on observe que les paramètres d'usinage (V_c , f et a_p) présentent des effets différents sur l'effort de coupe. La plus importante influence correspond à l'avance ($f=0.24$ mm/tr) suivie par la profondeur de passe ($a_p=2$ mm) et en dernier lieu vient la vitesse de coupe ($V_c=200$ m/min) .

Tableau IV. 3 : Moyenne des ratios S/B (**Ks**) pour chaque niveau des facteurs.
Préférer plus petit

Niveau	V_c	f	A_p
1	-47,67	-49,53	-47,84
2	-48,00	-47,81	-48,21
3	-47,80	-46,13	-47,43
Delta	0,33	3,40	0,78
Rang	3	1	2

Selon l'approche de Taguchi, du Signal/ Bruit (S/N) représente la meilleure performance de la pression spécifique correspond aux niveaux **f3**, **ap3**, **vc1**. Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales du critère de la pression spécifique (Ks) sont donc : la plus basse vitesse de coupe 200 m/min, la plus basse avance 0.08 mm/tr et maximum profondeur de passe 1 (**figure IV.1**).

Chapitre IV : Optimisation des conditions de coupe

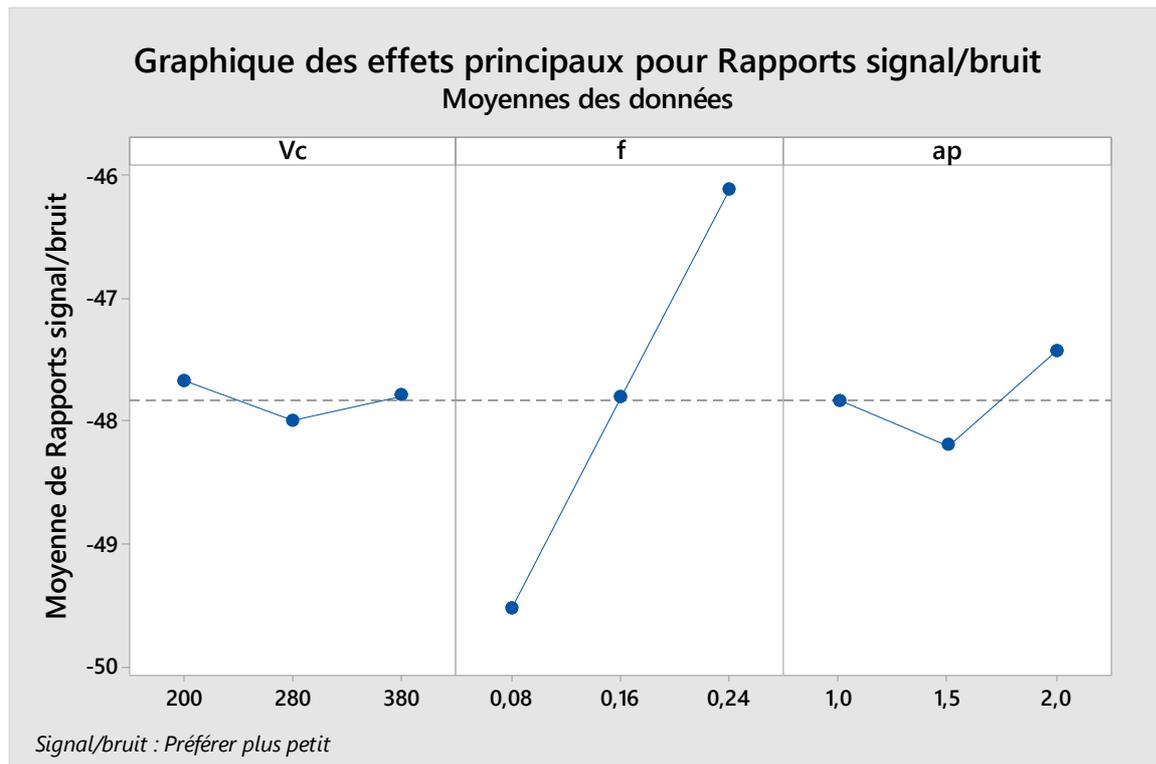


Figure IV. 2 : Graphique des effets principaux de Vc, f et ap sur la pression de coupe spécifique (Ks)

IV. 2.2.3- Analyse des effets principaux sur la puissance de coupe (Pc)

D'après le tableau (IV-4) et de la figure (IV-3), on observe que les paramètres d'usinage (Vc, f et ap) présentent des effets différents sur la puissance consommée. La plus importante influence correspond à l'avance ($f=0.08\text{mm/tr}$) suivie par la profondeur de passe ($ap=1\text{mm}$) et en dernier lieu vient la vitesse de coupe ($vc=200\text{mm/min}$).

Tableau IV. 4 : Moyenne des ratios S/B (Pc) pour chaque niveau des facteurs.
Préférer plus petit

Niveau	Vc	f	Ap
1	-44,56	-44,06	-44,38
2	-47,82	-48,37	-48,27
3	-50,26	-50,21	-49,99
Delta	5,70	6,14	5,61
Rang	2	1	3

Chapitre IV : Optimisation des conditions de coupe

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la valeur la plus élevée du Signal/Bruit (S/N) représente la meilleure performance la puissance consommée correspond aux niveaux **f1**, **ap1**, **vc1**. Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales du critère de la puissance consommée sont donc : la plus basse vitesse de coupe 200 m/min, la plus basse avance 0.08 mm/tr et maximum profondeur de passe 1 mm (**figure IV.1**).

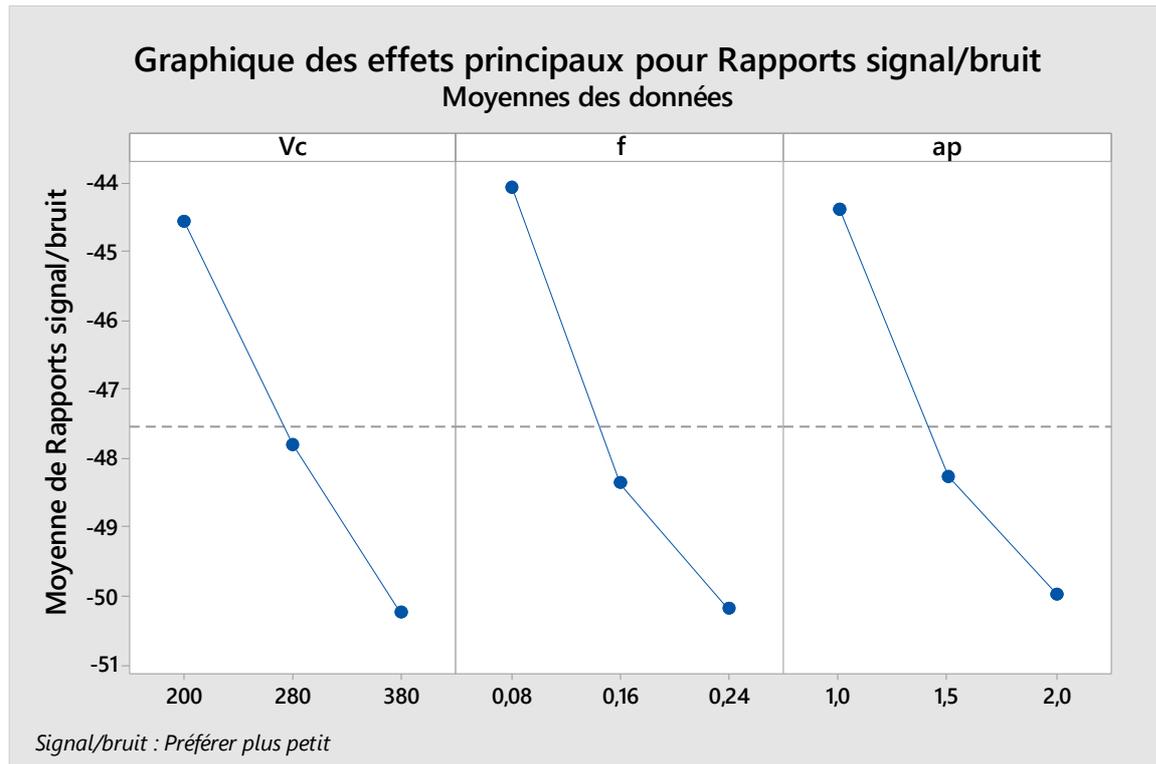


Figure IV. 3 :Graphique des effets principaux de Vc, f et ap sur la puissance de coupe (P_c).

IV.3- Optimisation par la méthode de la fonction désirabilité

IV.3.1- Introduction

L'optimisation d'une réponse ou la recherche d'un compromis entre plusieurs réponses consiste à définir, au sein du domaine expérimental, un réglage des facteurs permettant de satisfaire au mieux les exigences énoncées en termes de réponse. Dans le but d'optimiser les paramètres de coupe, chaque paramètre dans la planification (MSR) a été étudié à quatre niveaux différents. Le choix des quatre niveaux pour chaque variable est exigé par cette planification afin d'explorer la région de la surface de réponse à proximité de l'optimum. L'optimisation des réponses par la méthodologie de surface de réponse (MSR) aide à identifier la combinaison des paramètres des variables d'entrées qui optimisent une réponse unique ou un ensemble de réponses. Une optimisation commune doit satisfaire aux conditions requises pour toutes les réponses de l'ensemble. L'optimisation des réponses multiples est une méthode permettant un compromis entre diverses réponses grâce à la fonction de désirabilité qui permet de rassembler des critères ayant des unités différentes par le biais de fonction de désirabilité élémentaire et variant entre 0 et 1. Une désirabilité de 0, c'est-à-dire une désirabilité élémentaire prenant la valeur nulle, représente une configuration inacceptable pour la réponse sélectionnée, alors qu'une désirabilité prenant la valeur 1 représente le cas idéal. L'objectif le plus important de cette étude est de parvenir à l'effort de coupe, pression spécifique et puissance consommée souhaitées avec les paramètres de coupe optimale. Pour atteindre ce but, l'exploitation de la fonction de désirabilité pour l'optimisation semble être une technique utile. Ici, le but est de minimiser l'effort de coupe, pression spécifique et puissance consommée. Pour résoudre ce type de problème de planification des paramètres, une fonction objective, $F(x)$, est définie comme suit [19]:

$$DF = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{j=1}^n w_j}} \quad (IV.3)$$

$$F(x) = -DF$$

Où d_i est la désirabilité définie pour la sortie ciblée et w_i est la fonction de pondération de d_i . Pour différents objectifs de chaque sortie ciblée, la désirabilité d_i est définie dans différentes formes. Si l'objectif est d'atteindre une valeur spécifique de T_i , la désirabilité d_i est :

$$d_i = 0 \quad \text{Si } Y_i \leq \text{Inf}_i$$

$$d_i = \frac{Y_i - \text{Inf}_i}{T_i - \text{Inf}_i} \quad \text{Si } \text{Inf}_i \leq Y_i \leq T_i \quad (IV.4)$$

Chapitre IV : Optimisation des conditions de coupe

$$d_i = \left[\frac{Y_i - Sup_i}{T_i - Sup_i} \right] \quad Si \quad T_i \leq Y_i \leq Sup_i \quad (IV.13)$$

$$d_i = 0 \quad Si \quad Y_i \geq Sup_i$$

Pour un objectif de trouver un maximum, la désirabilité est montrée comme suite :

$$d_i = 0 \quad Si \quad Y_i \leq Inf_i$$

$$d_i = \left[\frac{Y_i - Inf_i}{Sup_i - Inf_i} \right] \quad Si \quad Inf_i \leq Y_i \leq Sup_i \quad (IV.5)$$

$$d_i = 1 \quad Si \quad Y_i \geq Sup_i$$

Pour un objectif de rechercher un minimum la désirabilité peut être définies par les formules suivantes :

$$d_i = 1 \quad Si \quad Y_i \leq Inf_i$$

$$d_i = \left[\frac{Sup_i - Y_i}{Sup_i - Inf_i} \right] \quad Si \quad Inf_i \leq Y_i \leq Sup_i \quad (IV.6)$$

$$d_i = 0 \quad Si \quad Y_i \geq Sup_i$$

Donc, l'objectif de notre étude est de choisir un réglage optimal qui minimise la fonction combinée de désirabilité DF , C'est-à-dire minimisé $F(x)$

IV.3.2 Optimisation des conditions de coupe pour Ft, Ks et Pc

Dans notre étude, on s'est intéressé à quatre cas d'optimisation qui sont: (i) l'effort de coupe (Ft) minimale, (ii) la pression spécifique de coupe (Ks) minimale, (iii) la puissance de coupe (Pc) minimale, (iv) compromis entre l'effort de coupe (Ft), la pression spécifique de coupe (Ks) et la puissance de coupe (Pc). **Les tableaux (IV.5, IV.6 et IV.7,IV8)** présentent les objectifs souhaités, l'intervalle de variation des paramètres de coupe, les poids et l'importance affectés à chaque paramètre pour les trois cas d'optimisation.

Chapitre IV : Optimisation des conditions de coupe

Tableau IV. 5 : But et gamme de paramètres pour le 1^{er} cas d'optimisation.

		Lower	Upper	Lower	Upper	
Name	Goal	Limit	Limit	Weight	Weight	Importance
A:vc	is in range	200	380	1	1	3
B:f	is in range	0.08	0.24	1	1	3
C:ap	is in range	1	2	1	1	3
Ft	minimize	22.46	105.81	1	0.5	5
Ks	minimize	179.46	401.38	1	0.1	1
Pc	minimize	107.03	628.08	1	0.1	1

Tableau IV. 6 : But et gamme de paramètres pour le 2^{ème} cas d'optimisation.

		Lower	Upper	Lower	Upper	
Name	Goal	Limit	Limit	Weight	Weight	Importance
A:vc	is in range	200	380	1	1	3
B:f	is in range	0.08	0.24	1	1	3
C:ap	is in range	1	2	1	1	3
Ft	minimize	22.46	105.81	1	0.1	1
Ks	minimize	179.46	401.38	1	0.5	5
Pc	minimize	107.03	628.08	1	0.1	1

Tableau IV. 7 : But et gamme de paramètres pour le 3^{ème} cas d'optimisation.

		Lower	Upper	Lower	Upper	
Name	Goal	Limit	Limit	Weight	Weight	Importance
A:vc	is in range	200	380	1	1	3
B:f	is in range	0.08	0.24	1	1	3
C:ap	is in range	1	2	1	1	3
Ft	minimize	22.46	105.81	1	0.1	1
Ks	minimize	179.46	401.38	1	0.1	1
Pc	minimize	107.03	628.08	1	0.5	5

Chapitre IV : Optimisation des conditions de coupe

Tableau IV. 8 : But et gamme de paramètres pour le 4^{ème} cas d'optimisation.

Name	Goal	Limit	Limit	Weight	Weight	Importance
A:vc	is in range	200	380	1	1	3
B:f	is in range	0.08	0.24	1	1	3
C:ap	is in range	1	2	1	1	3
Ft	minimize	22.46	105.81	1	0.5	5
Ks	minimize	179.46	401.38	1	0.5	5
Pc	minimize	107.03	628.08	1	0.5	5

Les tableaux (IV.9, IV.10 et IV.11,IV12), illustrent les solutions correspondantes aux quatre cas cités. Pour le premier cas d'optimisation, on a donné l'importance maximale à la l'effort de coupe (5+), tout en gardant la puissance de coupe et l'effort de coupe a son bas niveau (1+) de même pour les poids on a donné 0.5 à celui qui a plus d'importance et un poids de 0.1 à celui qui a moins d'importance. Le régime optimal des conditions de coupe trouvé est de $V_c=380\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/dent}$ et $a_p=1\text{mm}$. L'effort de coupe prend une valeur minimale de $F_t=23.0426\text{mm/min}$, la $K_s=305.234\text{Mpa}$, $p_c=138.66\text{w}$ et la désirabilité $Des=0.985$. Concernant le deuxième cas d'optimisation, la pression spécifique de coupe (K_s) est devenu la mieux considérée avec une importance (5+), tandis que l'effort de coupe et la puissance consomme a pris un niveau minimal avec une importance (1+). Le régime optimale des conditions de coupe trouvé est de $V_c=379.99\text{m/min}$, $f=0.02168\text{mm/dent}$ et $a_p=1\text{mm}$. La (P_c) prend une valeur maximale de la $P_c=268.68\text{w}$ $F_t=40,10\text{N}$, $K_s=179.449\text{Mpa}$, et la désirabilité $Des=0.991$. Le troisième cas d'optimisation la puissance consomme est devenu la mieux considérée avec une importance (5+). Le régime optimale des conditions de coupe trouvé est de $V_c=200\text{m/min}$, $f=0.08\text{mm/dent}$ et $a_p=2\text{mm}$, $F_t=36.218\text{N}$, $K_s=244.502\text{Mpa}$, $P_c=101.903\text{w}$ Concernant le 4^{ème} cas s'intéresse à une optimisation combinée entre , la pression spécifique de coupe (K_s), L'effort de coupe, la puissance consomme avec une même importance (5+), pour les quarte sorties . Le régime optimale des conditions de coupe trouvé est de $V_c=379.99\text{m/min}$, $f=0.02168\text{mm/dent}$ et $a_p=1\text{mm}$. La puissance consomme prend une valeur maximale de la $F_t=40,10\text{N}$, $K_s=179.449$, $P_c=268.68\text{w}$ et la désirabilité $Des=0.991$

Tableau IV. 9 : Réponses de la surface de l'effort de coupe (K_s) et (P_c) pour la 1^{er} cas d'optimisation.

Number	vc	F	Ap	Ft	ks	Pc	Desirability
1	<u>380.000</u>	<u>0.080</u>	<u>1.000</u>	<u>23.043</u>	<u>305.234</u>	<u>138.866</u>	<u>0.985</u>

Chapitre IV : Optimisation des conditions de coupe

Figure IV. 4 : Graph de désirabilité de Ft, Ks et Pc (diagramme de surface 3D et surface de contours) pour le 1er cas.

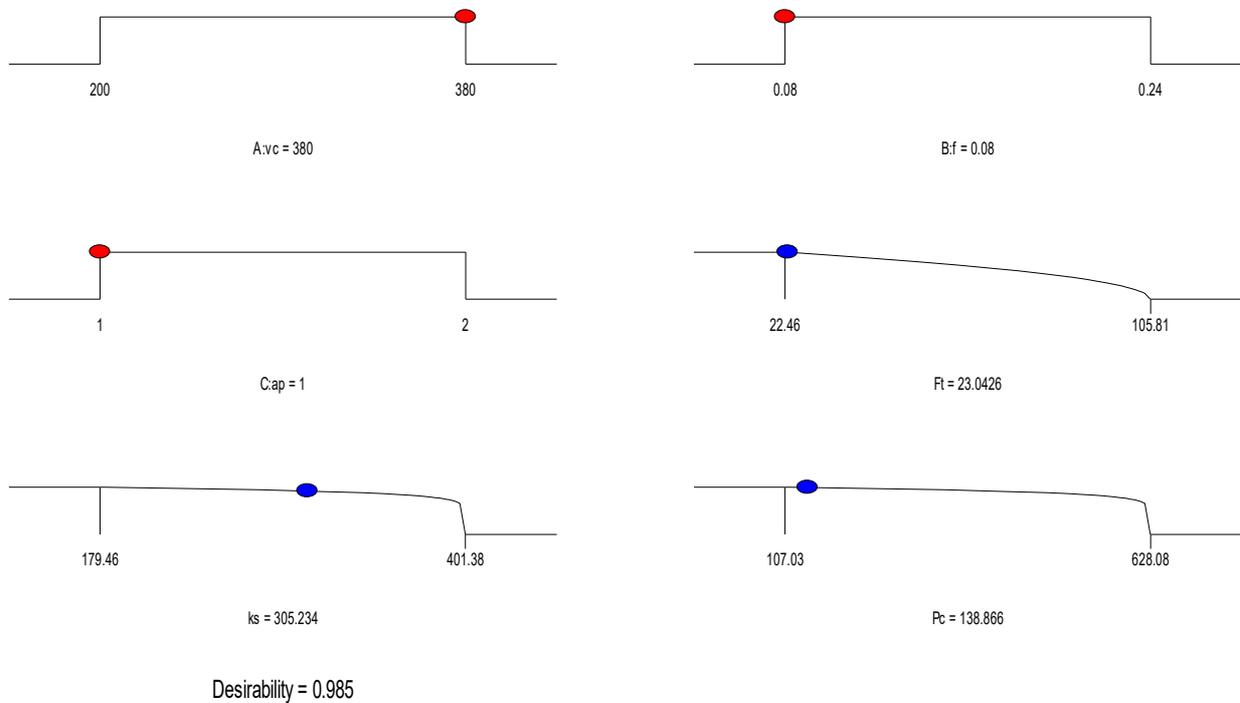


Figure IV. 5 : Diagramme d'optimisation de réponses multiples de l'effort de coupe.

figure (IV6 ,IV7) représente le graphique de contour pour la 2 eme cas la désirabilité est (99.1%) pour les trois critères effort de coupe , pression spécifique , puissance consomme.

Chapitre IV : Optimisation des conditions de coupe

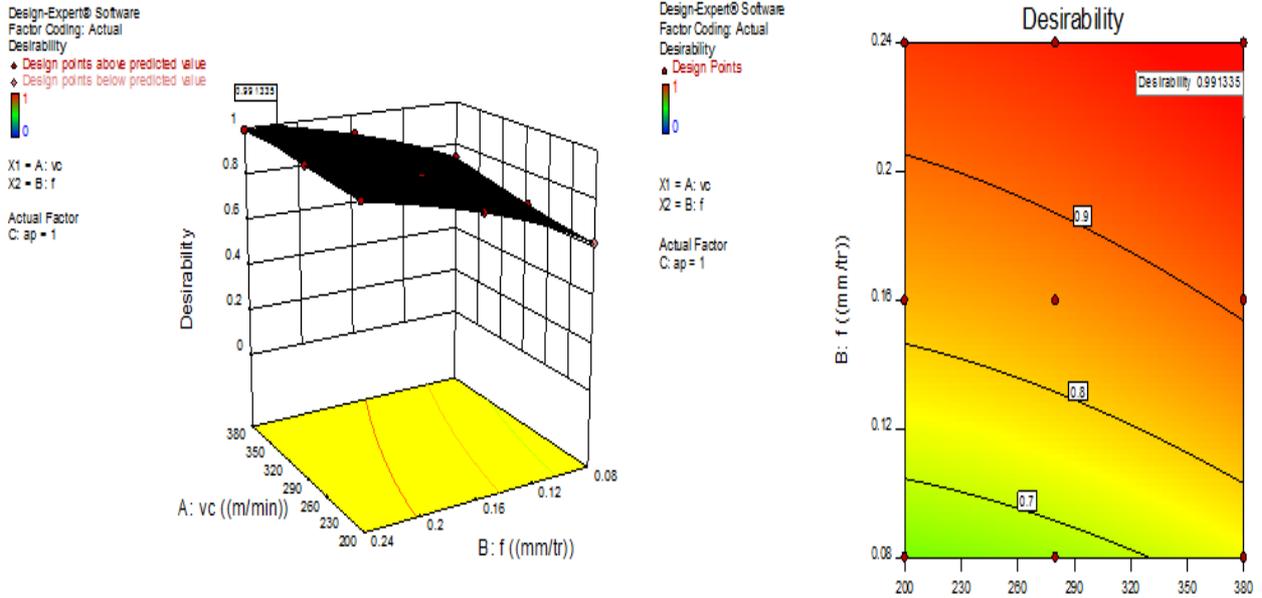


Figure IV. 6 : Graph de désirabilité de F_t , K_s et p_c (diagramme de surface 3D et surface de contours) pour le 2^{ème} cas.

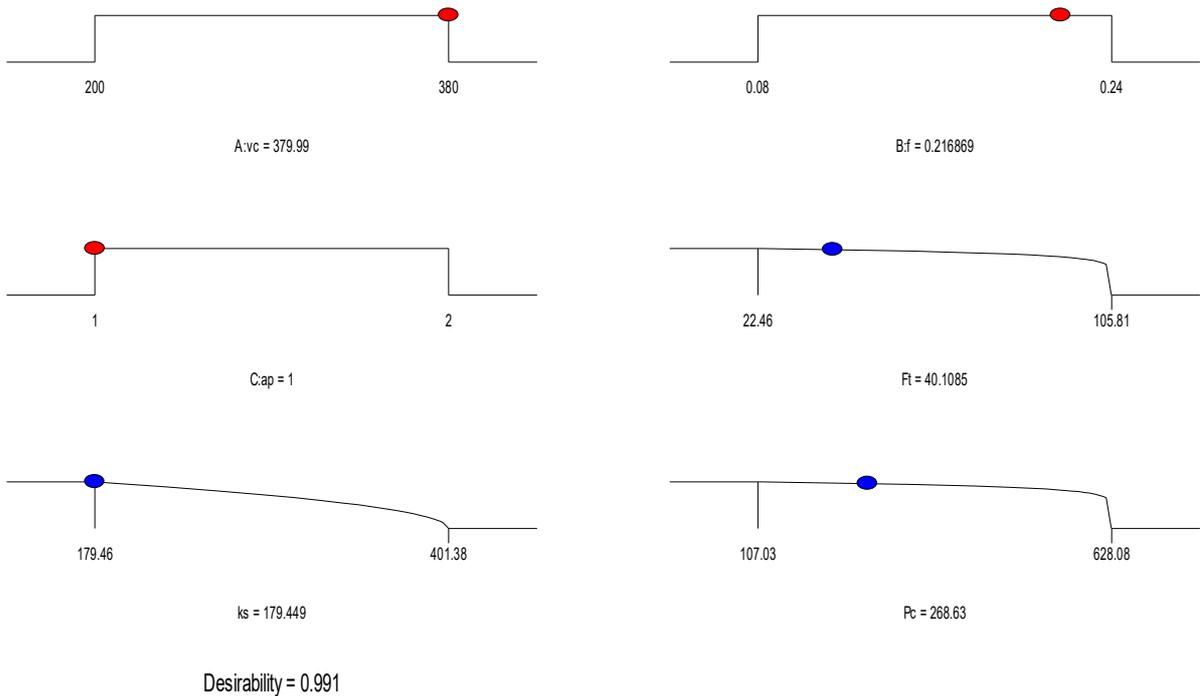


Figure IV. 7 : Diagramme d'optimisation de réponses multiples de l'effort de coupe, puissance consommée, pression spécifique.

Chapitre IV : Optimisation des conditions de coupe

figure (IV8 ,IV9) représente le graphique de contour pour la 3 eme cas la désirabilité est (99.2%) pour les trois critères effort de coupe , pression spécifique , puissance consomme.

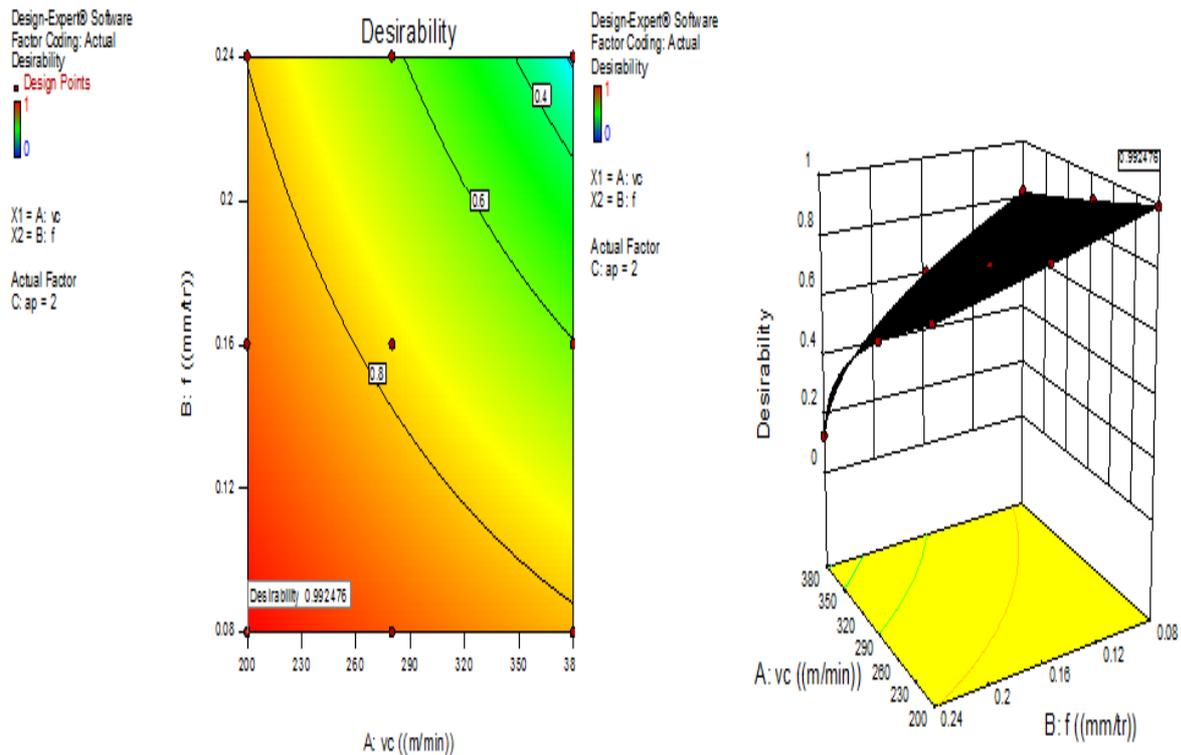


Figure IV. 8 : Graph de désirabilité de Ft, Ks et Pc (diagramme de surface 3D et surface de contours) pour le 3ème cas

Chapitre IV : Optimisation des conditions de coupe

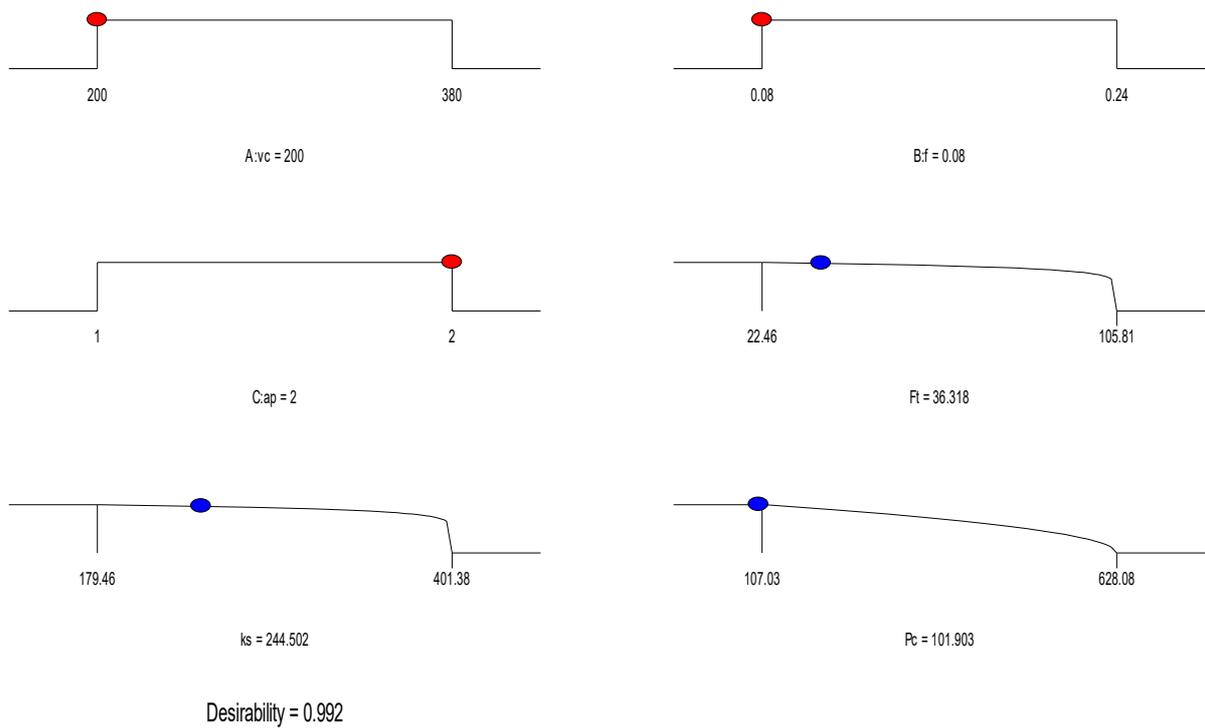


Figure IV. 9 :Diagramme d'optimisation de réponses multiples de l'effort de coupe, puissance consomme, pression spécifique.

figure (IV10 ,IV11) représente le graphique de contour pour la 4 eme cas la désirabilité est (91.6%) pour les trois critères effort de coupe , pression spécifique , puissance consomme.

Chapitre IV : Optimisation des conditions de coupe

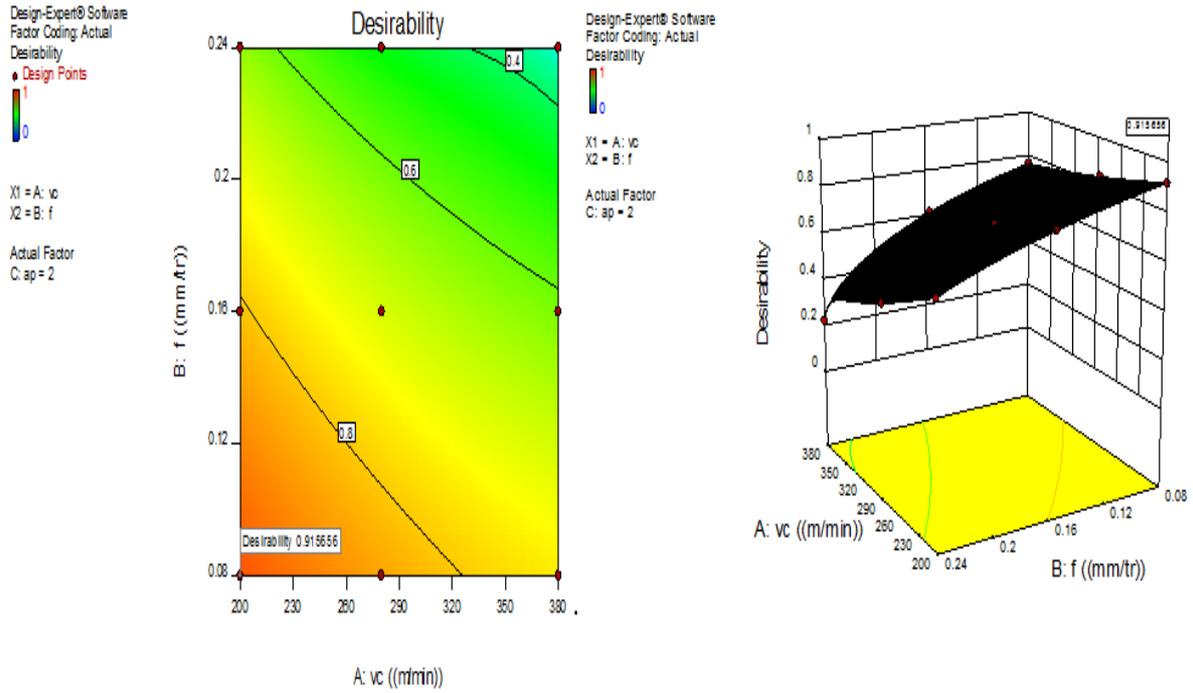


Figure IV. 10: Graph de désirabilité de F_t , K_s et P_c (diagramme de surface 3D et surface de contours) pour le 3^{ème} cas.

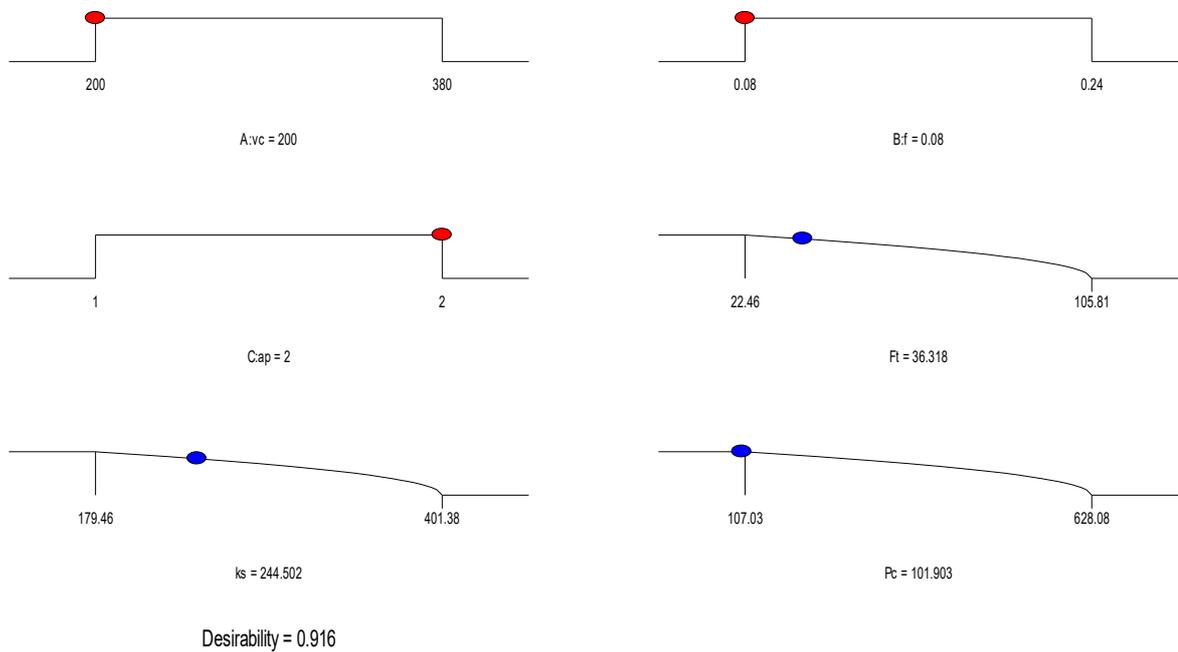


Figure IV. 11 : Diagramme d'optimisation de réponses multiples de de l'effort de coupe, puissance consomme, pression spécifique.

IV.4. Optimisation par la méthode d'Analyse Relationnelle Gris

IV.4.1. Description de la méthode

L'analyse relationnelle grise (GRA) est utilisée pour convertir un problème d'optimisation d'un multi-objectif en un seul objectif. Le but de cette étude est de déterminer la combinaison optimale des paramètres de tournage qui nous permet de minimiser la rugosité de surface et maximiser le volume de copeau enlevé simultanément. Les étapes suivantes sont considérées pour l'Analyse Relationnelle Gris (GRA) basé sur la méthode de Taguchi.

➤ *Étape 1 : La normalisation*

La première étape de l'analyse relationnelle grise est de normaliser (dans l'intervalle 0 et 1) les données expérimentales selon le but de l'optimisation.

- ✓ la minimisation du critère (rugosité de surface Ra), la séquence originale est normalisée comme suit :

$$x_i(k) = \frac{\max(x_i^0(k)) - x_i^0(k)}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (\text{IV.7})$$

- ✓ Pour la maximisation du critère, et c'est le cas du débit du copeau enlevé (MRR), alors la séquence originale est normalisée comme suit :

$$x_i(k) = \frac{x_i^0(k) - \min(x_i^0(k))}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \quad (\text{IV.8})$$

Où :

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

Le but de la normalisation est de rendre toutes les réponses en même grandeur, les données traitées par la normalisation sont données dans **le tableau VI.1**

Chapitre IV : Optimisation des conditions de coupe

Tableau IV. 13: Résultats expérimentale normalisé (x_i^0 (k)).

N° Essai. (i)	La Normalisation		
	Valeur Idéal	1	1
1	Ft	Ks	Pc
2	0,884	0,000	1,000
3	0,845	0,479	0,979
4	0,822	0,759	0,967
5	0,752	0,594	0,929
6	0,552	0,686	0,823
7	0,479	0,881	0,784
8	0,749	0,995	0,928
9	0,378	0,879	0,730
10	0,118	0,908	0,591
11	0,963	0,371	0,977
12	0,905	0,668	0,933
13	0,719	0,517	0,794
14	0,849	0,822	0,891
15	0,376	0,411	0,539
16	0,347	0,726	0,517
17	0,668	0,867	0,756
18	0,277	0,774	0,465
19	0,000	0,815	0,258
20	1,000	0,544	0,932
21	0,759	0,212	0,689
22	0,682	0,429	0,610
23	0,820	0,753	0,750
24	0,522	0,639	0,448
25	0,349	0,729	0,273
26	0,753	1,000	0,682
27	0,421	0,924	0,346

Chapitre IV : Optimisation des conditions de coupe

IV.4.2 Calcul des coefficients du Relationnel Gris

Le coefficient relationnel gris décrit la corrélation entre les résultats expérimentaux idéaux et obtenus. La formule mathématique du coefficient relationnel gris ($\xi_i(k)$) est donnée comme suit :

$$\xi_i(\mathbf{k}) = \frac{\Delta_{\min} + \Psi \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(\mathbf{k}) + \Psi \Delta_{\max}} \quad \mathbf{0} < \xi_i(\mathbf{k}) \leq \mathbf{1} \quad (\text{IV.9})$$

Où :

$D_{0i}(k)$: La différence en valeur absolue entre $x_0^k(k)$ et $x_i^k(k)$

D_{\min} : La plus petite valeur de $D_{0i}(k)$

D_{\max} : La plus grande valeur de $D_{0i}(k)$

$D_{0i}(k)$ coefficient de distinction (sa valeur entre 0 à 1).

$$\Delta_{0i}(\mathbf{k}) = \|\mathbf{x}_0(\mathbf{k}) - \mathbf{x}_i(\mathbf{k})\| \quad (\text{IV.10})$$

$$\Delta_{\min} = \min_{\forall j \in i} \min_{\forall k} \|\mathbf{x}_0(\mathbf{k}) - \mathbf{x}_i(\mathbf{k})\| \quad (\text{IV.11})$$

$$\Delta_{\max} = \max_{\forall j \in i} \max_{\forall k} \|\mathbf{x}_0(\mathbf{k}) - \mathbf{x}_i(\mathbf{k})\| \quad (\text{IV.12})$$

La valeur de ω est en générale égale à (0,5) .

La valeur du coefficient η a été prise (0,5). Les valeurs des coefficients "Gris Ra Le « relationnel Coefficients » est présenté dans le **tableau IV.2**.

Tableau IV. 14 : Coefficients du GR ($\eta_i(k)$).

Chapitre IV : Optimisation des conditions de coupe

<i>N:° Essai (i)</i>	<i>coéf (Ft)</i>	<i>Coéf (Ks)</i>	<i>Coéf (Pc)</i>
1	0,812	0,333	1,000
2	0,763	0,490	0,959
3	0,738	0,675	0,938
4	0,668	0,552	0,876
5	0,528	0,615	0,739
6	0,490	0,808	0,698
7	0,666	0,990	0,874
8	0,446	0,805	0,650
9	0,362	0,844	0,550
10	0,931	0,443	0,956
11	0,840	0,601	0,882
12	0,640	0,508	0,709
13	0,768	0,737	0,822
14	0,445	0,459	0,520
15	0,434	0,646	0,509
16	0,601	0,790	0,672
17	0,409	0,688	0,483
18	0,333	0,730	0,402
19	1,000	0,523	0,881
20	0,675	0,388	0,616
21	0,611	0,467	0,562
22	0,735	0,670	0,667
23	0,511	0,581	0,475
24	0,435	0,648	0,408
25	0,669	1,000	0,611
26	0,464	0,868	0,433
27	0,352	0,803	0,333

IV.4.3. Calcul du GRG (Grey relational grade)

Après avoir calculé la moyenne des coefficients du relationnel gris (Grey Relational Coefficients), les γ_i (Grey Relational Grade) peuvent être obtenu comme suit:

$$\alpha_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (\text{IV.10})$$

Où : n est le nombre des caractéristiques de performance (dans notre cas n=2).

La plus grande valeur de (Grey Relational Grade) est considérée comme la relation la plus forte entre la séquence idéale ($x_0(k)$) et la séquence donnée ($x_i(k)$). La séquence idéale ($x_0(k)$) est la meilleure réponse dans le processus expérimental.

Chapitre IV : Optimisation des conditions de coupe

Ainsi, le Grade Relationnel (Relational Grade) supérieur correspond à la combinaison des paramètres la plus proche de l'optimale

Selon le **tableau IV.15** et la **figure VI.15**, la combinaison des paramètres de coupe de l'expérience 14 a eu la qualité grise (GRG) la plus élevée et ceci signifie que cette expérience présente la combinaison des paramètres optimaux qui donne une rugosité de surface minimale, et un volume de copeau enlevé maximum.

Tableau IV. 15 ; Niveau relationnel gris et son ordre (Grey relational grade (GRG))

<i>N=° Essai. (i)</i>	<i>GRG (α_i)</i>	<i>Ordre</i>
1	0,715	22
2	0,737	21
3	0,783	15
4	0,699	23
5	0,627	17
6	0,665	13
7	0,844	27
8	0,634	25
9	0,585	24
10	0,777	19
11	0,775	14
12	0,619	9
13	0,776	18
14	0,475	12
15	0,529	10
16	0,687	26
17	0,527	20
18	0,489	11
19	0,801	3
20	0,560	5
21	0,547	2
22	0,691	7
23	0,523	6
24	0,497	4

Chapitre IV : Optimisation des conditions de coupe

25	0,760	16
26	0,588	8
27	0,496	1

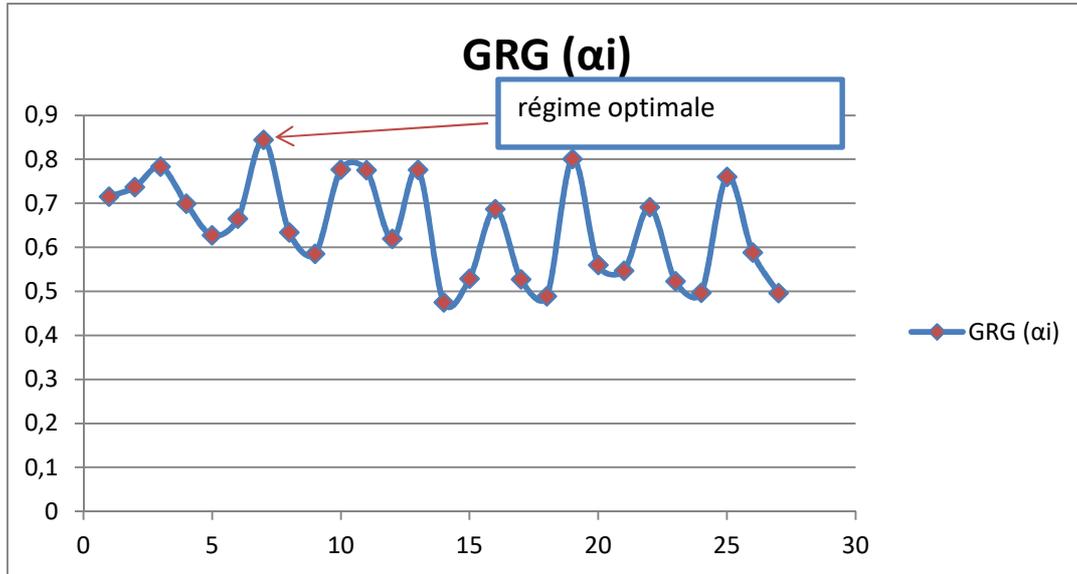


Figure IV. 12 : Qualité Relationnelle Grise (GRG).

Le niveau optimal des paramètres est le niveau correspondant au maximum de la valeur moyenne de "la qualité relationnelle grise. La combinaison optimale des paramètres du processus de tournage de polyamide (PA-6) est obtenu à partir de **tableau IV.16**, Le facteur ayant la valeur maximale de delta est celui qui affecte le plus les réponses. Le maximum de la valeur de delta dans **le tableau IV.16** est égal à 2.327; et le facteur correspondant, à savoir la profondeur de passe.

Chapitre IV : Optimisation des conditions de coupe

Tableau IV. 16 : Effets principaux de la qualité grise (Grey Grade).

Préférer plus grand

Niveau	Vc	f	ap
1	-3,165	-3,163	-2,521
2	-4,203	-4,427	-4,467
3	-4,469	-4,246	-4,848
Delta	1,304	1,263	2,327
Rang	2	3	1

IV.4.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué trois types d'optimisation : l'optimisation mono-objective, dans laquelle nous avons utilisé la méthode de Taguchi. Aussi pour une optimisation multi-objective nous avons appliqué deux méthodes différentes : la méthode Grise (Grey Relationnel Analysis) et la méthodologie des surfaces de réponse (MSR) basée sur l'approche de la fonction de désirabilité (DF) pour minimiser l'effort de coupe, la pression spécifique et la puissance consommée.

Chapitre IV : Optimisation des conditions de coupe

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'étude expérimentale portant sur le tournage du polyamide (PA 6) avec un outil de coupe en carbure, nous a permis d'étudier la modélisation des paramètres de performance suivants : L'effort de coupe tangentiel, la pression spécifique et la puissance de coupe et aussi l'optimisation des conditions de coupe (la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe). Les résultats trouvés nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- 1- L'analyse de la variance de l'effort de coupe (F_t) montre que l'avance (f) est le facteur le plus influant avec une contribution 46.28% suivie par la profondeur de passe (ap) avec une contribution de 39.96%, l'interaction ($f*ap$) avec une contribution 7,38% et en fin la vitesse de coupe avec une contribution de 0.07%. Les interactions (V_c*f) et ($V_c * ap$) ont des faibles contributions de (0.09% et 0,93%) par conséquent, ils ne sont pas significatifs. Les termes carrés (V_c^2 , f^2 et ap^2) ne sont pas aussi significatifs. (Si Pvalue inférieure à 0,005 ils sont significatifs)
- 2- L'analyse de la variance de la pression spécifique (K_s) montre que l'avance (f) est le facteur le plus influant avec une contribution 59.62% suivie par la profondeur de passe (ap) avec une contribution de 1.75%, l'interaction ($vc*ap$) avec une contribution 7,69% et en fin la vitesse de coupe avec une contribution de 0.01%. Les interactions (V_c*f) et ($f * ap$) ont des faibles contributions de (0.08% et 0,5.99%) par conséquent, ils ne sont pas significatifs. Les termes carrés (V_c^2 , f^2 et ap^2) ne sont pas aussi significatifs. (il fait vérifier, Si Pvalue inférieure à 0,005 ils sont significatifs)
- 3- L'analyse de la variance de la puissance consommée (pc) montre que l'avance (f) est le facteur le plus influant avec une contribution 30.29% suivie par la profondeur de passe (ap) avec une contribution de 28.89% et en dernier lieu la vitesse de coupe avec une contribution de 27.69%. L'interaction ($f*ap$) a une contribution 4.46% et les interactions (V_c*f) et ($V_c * ap$) ont des faibles contributions de (1.10% et 4.28%) par conséquent, ils ne sont pas significatifs. Les termes carrés (V_c^2 , f^2 et ap^2) ne sont pas aussi significatifs. (il fait vérifier, Si Pvalue inférieure à 0,005 ils sont significatifs)
- 4- La combinaison optimale, des paramètres du processus de tournage, obtenue à partir de la Méthode de Taguchi est :

- Ks: une vitesse de coupe de $V_c = 200$ m/min, une avance de $f = 0,24$ mm/tr, et une profondeur de passe $a_p = 2$ mm Ft : une vitesse de coupe de $V_c = 200$ m/min, une avance de $f = 0,08$ mm/tr, et une profondeur de passe $a_p = 1$ mm
- Pc : une vitesse de coupe de $V_c = 200$ m/min, une avance de $f = 0,08$ mm/tr, et une profondeur de passe $a_p = 1$ mm.

5- Les conditions de coupe optimales trouvées par la méthode de l'analyse Relationnelle Grise pour minimiser l'effort de coupe, la pression spécifique et la puissance consommée sont : vitesse de coupe de $V_c = 200$ m/min, avance $f = 0,24$ mm/tr, et une profondeur de passe $a_p = 1$ mm.

6- L'optimisation par MSR des conditions de coupe les mieux adaptées pour minimiser (Ft, Ks et Pc) nous a donné : $V_c = 379.99$ m/min, $f = 0,2168$ mm/tr et $a_p = 1$ mm. Les valeurs des paramètres de sortie sont : les efforts de coupe (Ft = 40.1085), la pression spécifique (Ks=179.449) et pour la puissance consommée (Pc=288.83).

7- La méthode de Taguchi peut être plus efficace dans le cas d'une seule réponse. Par contre l'Analyse Relationnelle Grise et la méthodologie de surface de réponse basée sur la fonction de désirabilité sont les meilleurs pour l'optimisation multi-objectif.

Référence bibliographiques :

- [1] TDL (Polymères) ou livre Physique de Polymères.
- [2] Livre Les Polymères de la molécule à l'objet.
- [3] **Thés KADDECHE Mounia**, Etude des déformations résiduelles des propriétés mécaniques des tubes épais en HDPE-80, Mémoire de magister, Université de Guelma, Septembre 2006.
- [4] **GHAOUI MAHFOUD**, Etude comparative de l'usinage de deux polymères (POM-C ET PA-6), mémoire de Master, Université Guelma, 2015-2016
- [5] **Jiang Q.**, L.C. ? Pitlo M., The dependence of surface of a spectacle polymère upon machining conditions, progress of Machining Technology. Beijing : Aviation IndustryPress., (2000) 7-12
- [6] A. Czaplicki, L'usinabilité et la coupe des métaux : revue de la Société Royale Belge des Ingénieurs et des Industries, 12, 708 – 736, (1962).
- [7] B. Gruber, Outillage et mesure. Dunod 2ème Edition, Lausanne, 51-63, (1981).
- [08] **T. MASUZAWA**; State of the art of micromachining, annals of CIRP, 2000, 49, PP473–488.
- [9] **S. BERKANI**; Etude du comportement des matériaux de coupe lors du tournage d'un acier inoxydable, département mécanique, université Guelma, 2009, P10.
- [10] **Davim, J. P., & Mata, F.** (2007). A comparative evaluation of the turning of reinforced and unreinforced polyamide. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 33(9-10), 911-914.
- [11] **Lazarević, Dragoljub, et al.** "Robust conditions for cutting force minimization in polyamide turning process." FME Transactions 43.2 (2015): 114-118.
- [12] Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., Mata, F., & Davim, J. P. (2010). Modeling and analysis of machinability characteristics in PA6 and PA66 GF30 polyamides through artificial neural network. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 23(3), 313-336
- [13] **Silva, L. R., & Davim, J. P. (2009)**. The effect of tool geometry on the machinability of polyamide during precision turning. Journal of composite materials, 43(23), 2793-2803
- [14] **Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., Silva, L. R., Abrão, A. M., & Davim, J. P. (2009)**. Machinability study in microturning of PA66 GF30 polyamide with a PCD tool. Materials and Manufacturing Processes, 24(12), 1290-1296