

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

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



Mémoire fine d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Présenté par : **GHAOUI MAHFOUD**

Option: Maintenance Industrielle

=====

**Etude comparative de l'usinage de
deux polymère (POM-C & PA6)**

=====

■ **Sous la direction de : Dr. M. KADDECHE**

2015-2016

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon Seigneur Miséricordieux par essence et par excellence de m'avoir permis d'accomplir cette thèse avec succès car Il est digne de louange et de glorification.

L'ensemble de ce travail a été réalisé au sein de département mécanique, de l'université de Guelma . Néanmoins une partie des essais a été réalisée au sein du laboratoire de Mécanique et Structures (LMS) de l'université de Guelma

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à mon directeur de thèse, Dr M.kaddech. Je tiens à souligner à quel point j'ai apprécié de travailler avec lui tant d'un point de vue professionnel qu'humain. Son bureau est un lieu de discussions ouvertes, sincères et sans concession. Sa grande disponibilité malgré un nombre de sollicitations toujours grandissant, sa rigueur et son excellence scientifique et pédagogique.

SOMMAIRE

[Introduction générale](#) : **Erreur ! Signet non défini.**

Chapitre I : Etude bibliographique

I.2. Généralités sur les matériaux polymères:.....	3
I.3. préparation des polymères:.....	3
I.4. Classification des polymères :	3
I.4.1- Selon les propriétés:.....	3
I.4.2- Selon la structure chimique et la microstructure:.....	4
I.4.3- Selon l'origine:.....	4
on peut classer les polymères en trois groupes:	4
I.4.4 Selon l'utilisation:	4
I.5. Quelques propriétés des polymères :	4
I.6. Le polyamide PA.6 [4]:	9
I.7. Le POM C :	10
I.8. Les paramètres technologiques de l'usinage:	8
I.8.1. définition des critères de Rugosité:	8
I.9. Les efforts de la coupe.....	12
I.9.1. Intérêt de leur mesure	13
I.9.2. Rapport des composantes	14
I.9.3. Effort spécifique de coupe (pression de coupe).....	14
I.9.4. La puissance de coupe.....	14
I.10. Usinage des polymères:.....	15

Chapitre II : Etat de l'art

[I. Travaux de recherches concernant l'usinage des polymères](#)..... 17

[Conclusion](#) : **Erreur ! Signet non défini.**

Chapitre III : Procédure expérimentale

III.1. Introduction	31
III.2. Procédure expérimentale.....	34
III-3. Planification des expériences.....	35
III-3.1. Méthode de planification des expériences.....	35

Chapitre IV : Influence des paramètres d'usinage sur la rugosité de surface et les efforts de coupe

IV.1.Introduction	38
IV.2. Influence des paramètres du régime de coupe sur les critères de rugosité	38
IV.2.1.Analyse de la variance (ANOVA) pour les rugosités R_a , R_t et R_z :	38
IV.2.2. Graphiques des effets principaux	40
IV.2.3.Analyse de régression pour les trois critères de rugosité R_a , R_t et R_z en fonction de V_c , f et a_p	42
IV.3. Influence des paramètres du régime de coupe sur les composantes de l'effort de coupe	44
IV.3.1. Analyse de la variance (ANOVA) pour les efforts de coupe F_x , F_y et F_z ..	44
IV.3.2.Graphiques des effets principaux.....	46
IV.3.3. Analyse de régression des composantes de l'effort de coupe F_x , F_y et F_z en fonction de V_c , f et a_p	47
IV.3. Conclusion.....	50

Chapitre V : Optimisation

V.1. Introduction.....	51
V.2. Optimisation mono-objectif	51
V.2.1. Méthode de Taguchi.....	51
V.2.2. La démarche de la méthode de Taguchi.....	51
V.2.3. Optimisation mono-objectif utilisant la méthode de Taguchi (S/N ratio)..	52
V.2.4. Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs.....	53
V.3.3. Optimisation multi-objectif.....	57
V.3.3.1. Méthode d'Analyse Relationnelle Gris (Grey method).....	57
V.3.3.2. Prédiction de la combinaison optimale du processus.....	59
V.3.3.3. Analyse de la variance ANOVA de la qualité grise (Grey Grade).....	61
V.4. Conclusion.....	62

1. Introduction

Une importante compétition sur les plans technique et économique continue d'opposer les métaux aux matériaux polymères pour la réalisation de pièces multiformes destinées à être utilisées dans des domaines variés. Les polymères présentent l'avantage d'être mis en œuvre plus facilement lors de la production par moulage ou par extrusion.

Cependant, après moulage les pièces polymériques peuvent encourir la probabilité de voir leur structure se transformer par cristallisation en quelques jours. Ainsi, les opérations d'usinage sont nécessaires pour les réparations et le contrôle de qualité. Le problème consiste à mettre au point l'effet des paramètres de coupe et de déterminer la prépondérance de ce dernier dans le cas des aciers.

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. Les normes elles-mêmes sont assez discrètes sur ce point. Partant de ce constat, la spécificité de ce travail s'inscrit sous le sceau d'une double préoccupation ; un bon état de surface et des conditions de coupe qui n'affecte pas les propriétés du matériau.

L'objectif de cette étude bibliographique est d'investiguer l'usinabilité des polymères semi-cristallins pour cerner l'intervalle des valeurs des paramètres du régime de coupe à dans un souci d'obtenir un meilleur état de surface et des efforts de coupe les plus modérés sans pour autant perdre de vue les propriétés du matériau.

Ce manuscrit s'articule en cinq chapitres. Le premier chapitre est une revue bibliographique. Dans le chapitre deux sont résumés les études les plus récentes dans le domaine de l'usinage des polymères. Le troisième chapitre est dédié à la description de procédure expérimentale et les méthodes de traitement des résultats. Un quatrième chapitre est consacré à l'étude de l'influence des paramètres du régime de coupe sur les rugosités de surface et les efforts de coupe lors de l'usinage du POM-C et du PA6. Un dernier chapitre est dédié à l'optimisation des opérations de tournage pour déterminer le régime optimal qui assure une minimisation des trois critères de rugosité et des trois composantes des efforts de coupe.

Enfin, la conclusion générale et les différentes perspectives que l'on attribue à ce travail sont listés à la fin du manuscrit.

I.2. Généralités sur les matériaux polymères:

Un polymère est constitué de macromolécules, elles même sont constituées d'une chaîne de monomères. On distingue les homopolymères constitués de répétition d'une unique structure moléculaire (**figure I.1**) et les copolymères constitués d'une répétition de plusieurs structures différentes; (la plupart des polymères sont élaborés à partir d'un ou deux types de monomères seulement). [1]

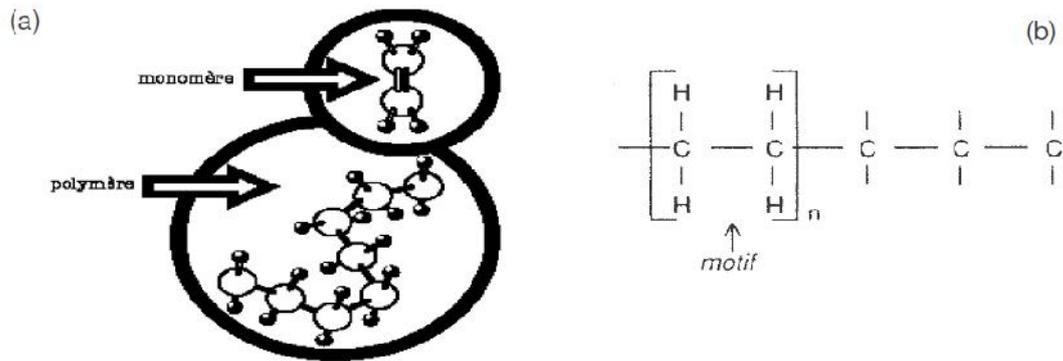


Figure I.1 : monomère d'un homopolymère :
(a) d'une façon globale, (b) d'un Polyéthylène [1]

I.3. préparation des polymères:

On distingue deux grandes catégories de réactions permettant la préparation des polymères :

- La polymérisation en chaîne, pour produire par exemple le polyéthylène, le polystyrène, le polyphylétique.
- La polycondensation (polymérisation par étapes, pour produire par exemple le PET (polyéthylène téréphtalate)).

I.4. Classification des polymères :

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

I.4.1- Selon les propriétés: une des propriétés mises en cause est l'influence d'une élévation de température. Une autre est le comportement élastique. Il en 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 près. 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. Par extension, on inclut dans cette famille tout polymère qui subit une transformation 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, polyisoprène.

I.4.2- Selon la structure chimique et la microstructure:

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

❖ **dimensionnalité:** polymères linéaires, ramifiés, réticulés.

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

❖ **configuration:** iso tactique, syndiotactique, atactique.

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

I.4.3- 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 fortement réticulé par le soufre);

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

I.4.4 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 inférieure à un an), durables (1 à 20 ans), infrastructure (durée de vie supérieure à 20ans [2]).

I.5. Quelques propriétés des polymères :

Cristallin ou amorphe les plastiques englobent un large éventail de matériaux de diverses combinaisons et formulations de carbone, oxygène, hydrogène, nitrogène et d'autres éléments organiques et inorganiques. La plupart des plastiques sont des solides sous leur forme finale. Mais à 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 de pression [3]. De nos jours, on compte plus de cinquante différentes familles de plastique dans l'industrie et chaque famille peut avoir des douzaines de variations. Cristallin ou amorphe, les polymères sont souvent décrits comme étant cristallins ou amorphes alors qu'il est plus exact de décrire les plastiques par leur degré de cristallinité. Aucun polymère n'est à 100 pour cent cristallin car autrement il ne pourrait se dissoudre à cause de sa structure très organisée. Cependant, plusieurs polymères sont considérés comme des matériaux semi-cristallins avec un maximum de 80 pour cent de cristallinité. Les matériaux amorphes n'ont pas un ordre établi dans leur structure moléculaire qui les compose et peuvent être comparés à un bol de spaghettis cuits. Les plastiques amorphes incluent les polymères atactiques alors que leur structure moléculaire ne résulte généralement pas à une cristallisation. Cette catégorie de plastiques amorphes inclut entre autres le polystyrène, le PVC et l'acrylique. Le degré de cristallinité est une caractéristique inhérente de chaque polymère, mais il peut être affecté ou contrôlé par certains procédés comme la polymérisation ou le moulage. Les matériaux cristallins présentent une structure hautement organisée et leurs composantes moléculaires sont solidement entassées. Ces zones de cristallinité sont appelées sphéroïdes et elles peuvent varier dans la forme et la

dimension à travers les zones amorphes. La longueur des chaînes polymères contribue à leurs habiletés à cristalliser. Les polymères composés de carbone ou d'oxygène comme les acétals sont déjà cristallisés. Les matériaux plastiques comme les nylons et autres polyamides cristallisent à cause de leurs chaînes parallèles et d'une forte liaison hydrogène des groupes amines et carbonyles. Le polyéthylène est cristallin en raison de ses chaînes moléculaires régulières et alignées. Le poly-tétra-fluoro-polyéthylène (PTFE) est aussi hautement symétrique. Le degré de cristallinité affecte plusieurs propriétés polymériques. En retour, certaines caractéristiques et certains procédés affectent le degré de cristallinité. Le poids moléculaire affectera la cristallinité des polymères. Le poids moléculaire est une méthode pour mesurer la longueur d'une chaîne moléculaire dans un matériau. Le poids moléculaire des plastiques varie généralement entre 10 000 et 1 000 000. Plus le poids moléculaire est élevé, plus faible sera le degré de cristallinité et les zones de cristallites seront imparfaites. Le degré de cristallinité est aussi dépendant du temps disponible pour que la cristallisation se produise.

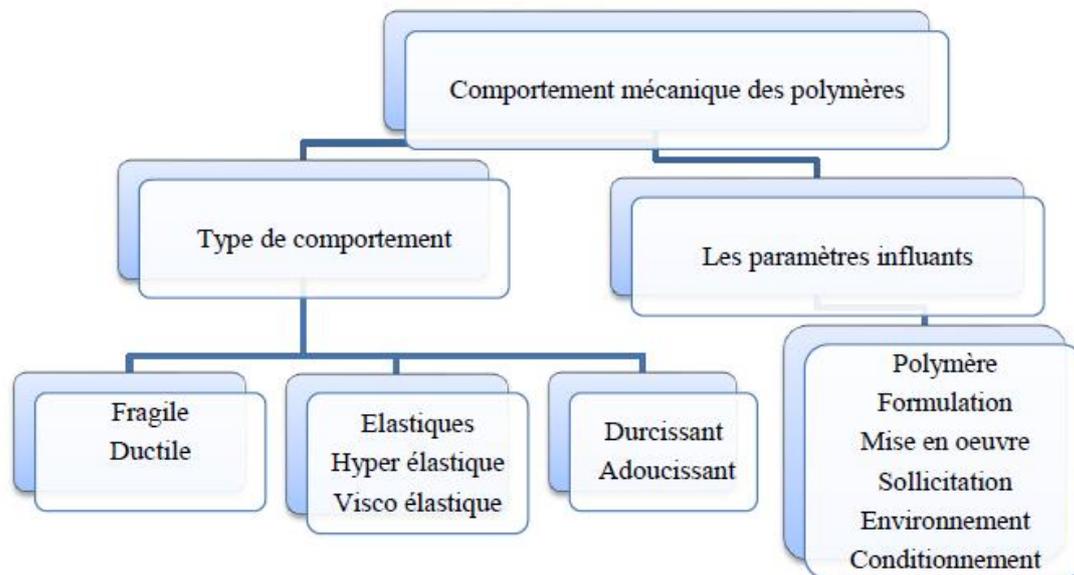


Figure I. 2: Comportement des polymères [4]

Les propriétés mécaniques [4] des matériaux polymères dépendent du type de polymère, de la structure moléculaire, du poids moléculaire, du taux de cristallinité, d'alliage 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 processus 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.

Tableau I-1 : Comparatif de quelques propriétés des polymères [4]

Thermoplastic Resins	Tensile Strength (MPa)	Elongation at Break (%)	Tensile Modulus (MPa)	Flexural Stress (MPa)	Compressive Stress (MPa)	Shear Strength (MPa)	Izod Impact Notch (J/m)
ABS - Unfilled	47	—	2,413	83	—	—	320
ABS - High Impact	43	—	2,206	72	—	—	374
ABS - Pipeline Grade	44	—	2,529	80	—	—	267
ABS - 20% GR	83	—	4,556	103	—	—	75
ABS - 30% GR	96,5	—	6,894	121	—	—	64
Aceal Homopolymer - Medium Flow	69	40	3,102	97	124	65,5	80
Aceal Homopolymer - High Flow	68	17	3,102	—	105,5	58,6	58,7
Aceal Homopolymer - Tough-Med Flow	58	60	2,413	69	91	41	133
Aceal Homopolymer - 20% PTFE	47,5	15	2,413	71,0	89,6	35	53,4
Aceal Copolymer - Med Flow	80,6	60	2,826	89,6	140	53	74,7
Aceal Copolymer - 35% GR	127	3,00	8,518	193	117	90	96
Acrylic - Unfilled	85,5	3,00	2,44*	72	72	52	16
Acrylic - Heat Resistant	69	2,00	2,413	83	10	—	10
Acrylic - High Impact	38	20,00	1,376	48	27,5	—	107
Cellulose Acetate - Unfilled	43	6,00	827	27	—	—	53
Cellulose Acetate - Unfilled	43	70,00	2,75*	83	—	—	416
HDPE Homopolymer - Unfilled	13,7	12,00	1,061	—	21	—	21
PE - 30% GR	58,6	2,00	5,515	75,8	41	—	214
Nylon 6 - Unfilled - 50% RH	70	300	979	—	—	—	69
Nylon 6 - 30% GR - 50% RH	89,6	3,00	5,515	—	—	—	180
Nylon 6/6 - Unfilled - 50% RH	77	300	1,206	—	34 DAM	86 DAM	112
Nylon 6/6 Tough - 50% RH	41	2,10	861	—	13 DAM	56 DAM	1,058
Nylon 6/6 - 13% GR - 50% RH	83	8,00	2,75*	165 DAM	—	76 DAM	53,4
Nylon 6/6 - 33% GR - 50% RH	124,0	4,00	6,204	282 DAM	—	96 DAM	133
Nylon 6/6-43% GR - 50% RH	148,0	3,00	8,273	283 DAM	—	93 DAM	187
PA Tough/6-33% GR - 50% RH	110,0	5,10	5,08*	205 DAM	165 DAM	—	235
PA Tough/6/6-Mineral 50% RH	80,0	45,00	1,751	—	—	—	187
Nylon 6/6-Mineral 50% RH	84,0	6,00	4,826	—	—	—	75
Nylon 6/12-33% GR - 50% RH	138,0	5,00	6,204	255 DAM	—	76 DAM	133
Nylon 6/12-43% GR - 50% RH	165,0	5,00	8,61*	289 DAM	—	33 DAM	180
PA (6-T/D/T)-38% GR - 50% RH	210,0	2,50	10,000	—	—	—	96
PA (6-T/D/T)-45% GR - 50% RH	245,0	2,20	12,064	—	—	—	107
Nylon 4/6-30% GR - 50% RH	117,0	8,00	4,136	—	—	—	187
PPA - 15% GR - 50% RH	117,0	2,00	7,179	162	180	81	47
PPA - 33% GR - 50% RH	193,0	2,10	13,098	254	247	89	101

I.6. Le polyamide PA.6 [4]:

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. Il associe de bonnes propriétés mécaniques, électriques et chimiques.

Exemples 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.
- Haut pouvoir amortissant.
- Bonnes propriétés de glissement.
- Excellente résistance à l'usure.
- Couleurs : Naturel ou Noir

Tableau I.2: Quelques propriétés du polyamide PA6[4]

<i>Généralise</i>	<i>Norme</i>	<i>Unité</i>	<i>Valeur</i>
<i>Propriété Physique</i>			
<i>Densité</i>	53479	g/cm^3	1.14
<i>Absorption d'eau 23°C HR 50%</i>	53495	%	3.0
<i>Duret</i>	53505		R100
<i>Résilience</i>	53453	KJ/m^2	>7
<i>Allongement a la rupture</i>	53455	%	50
<i>Résistance a la traction</i>	53455	N/mm^2	70
<i>Module d'élasticité en traction</i>	53457	N/mm^2	2800
<i>Propriété thermique</i>			
<i>T_{max} d'utilisation en continu</i>	52612	T _{max}	-40/+90
<i>Point de fusion</i>	53736	T _{max}	220
<i>Coef de dilatation thermique lin</i>	52828	$10^{-5} mm/m/°C$	8.5
<i>T_{max} de déformation sous charge 1.85N/mm²</i>	-	T _{max}	7.5
<i>Conductivité thermique</i>	52612	$W/m . m$	0.23
<i>Classement eu feu</i>	UL94	-	V2
<i>Propriété électriques</i>			
<i>Rigidité diélectrique</i>	53481	KV/mm	20
<i>Résistivité transversal</i>	53482	$/cm$	10 E12
<i>Constante diélectrique 10³HZ</i>	53483	-	3.7
<i>Tangent angle perte 10³HZ 10e * p6 HZ</i>	53483	-	0.03

I.7. Le POM C :

Le POM C est un co-polymère de polyacétal non chargé qui, en fonction de sa bonne résistance chimique, entre souvent en ligne de compte pour des applications industrielles. Par rapport à l'homopolymère, le POM C offre une résistance plus élevée à l'hydrolyse, une meilleure résistance aux bases et alcalins, voire une plus haute température de service admissible en continu. Cette dernière est de 100°C, avec de brèves pointes de température pouvant aller jusqu'à 140°C. La plage des températures acceptables pour l'utilisation mécanique de ce matériau s'étale jusqu'à 105°C. Le POM C convient pour un contact direct avec les aliments.

Caractéristiques :

- Densité (g/cm^3) : 1,41
- Température de service (°C) : -50 à +100
- Résistance (Mpa) : 68
- Résistance au choc (Charpy KJ/m^2) : 8,0
- Dureté à la bille (MPa) : 150
- Coef.de dilatation thermique ($1/K \times 10^{-6}$) :110
- Rigidité diélectrique (KV/mm) : 40
- Résistance superficielle (Ohms) : >1013
- Inflammabilité (UL94 3 mm) : HB
- Couleur : naturel, noir.
- Transparence : DIN 5036 - 0%

- Contact produits alimentaires : oui 90/128/EEC

Tableau I.3 : Propriétés du POM-C[4]

GÉNÉRALES	NORMES	VALEURS	UNITÉS
Densité	DIN EN ISO 1183-1	1,41	g/cm ³
Absorption d'humidité	DIN EN ISO 62	0,2	%
MÉCANIQUES	NORMES	VALEURS	UNITÉS
Résistance à la traction	DIN EN ISO 527	67	MPa
Allongement à la rupture	DIN EN ISO 527	30	%
Module d'élasticité à la traction	DIN EN ISO 527	2800	MPa
Résistance au choc ⁽⁴⁾	DIN EN ISO 179	6	kJ/m ²
Dureté à la bille	DIN EN ISO 2039-1	150	MPa
Dureté shore D	DIN EN ISO 868	81	Echelle D
Coefficient de frottement à sec		-	
Taux d'usure ou Sand-Slurry		-	µm/km
THERMIQUES	NORMES	VALEURS	UNITÉS
Température de fusion	ISO 11357-3	165	°C
Conductibilité thermique	DIN 52612-1	0,31	W / (m * K)
Capacité thermique spécifique	DIN 52612	1,5	kJ / (kg * K)
Coefficient de dilatation thermique linéaire	DIN 53752	110	10 ⁻⁶ K ⁻¹
Température d'utilisation à long terme	Moyenne	-50 à 100	°C
Température d'utilisation à court terme	Moyenne	140	°C
Température de déformation sous charge	DIN EN ISO 75 méthode A	110	°C
ÉLECTRIQUES	NORMES	VALEURS	UNITÉS
Constante diélectrique	IEC 60250	3,8	-
Facteur de perte diélectrique 50Hz	IEC 60250	0,002	-
Résistivité volumique	IEC 60093	10 ¹³	Ω*cm
Résistivité superficielle	IEC 60093	10 ¹³	Ω
Résistance aux courants de cheminement CTI	IEC 60112	600	-
Rigidité diélectrique	IEC 60243	40	kV/mm

I.8. Les paramètres technologiques de l'usinage:

I.8.1. définition des critères de Rugosité:

Les paramètres de la rugosité de surface sont codifiés par les normes : ISO 468-1982, ISO 4287/1,2-1984 et ANSI/ASME B46.1-1985[5]. Cette normalisation porte sur des profils dans un espace à deux dimensions. Les paramètres de la rugosité définissent seulement les caractéristiques micro-géométriques de la surface. Une valeur déterminée de chaque paramètre peut correspondre à plusieurs surfaces obtenues par différentes techniques d'élaboration. Évidemment les propriétés mécaniques de chacune de ces surfaces peuvent être différentes, c'est pourquoi pour caractériser exhaustivement une surface, il faut souvent préciser plusieurs paramètres accompagnés du mode d'élaboration de cette surface. Pour cette étude la caractérisation de la qualité de la surface usinée a été limitée aux trois critères de rugosité (Ra, Rt ou Rc et Rz ou Rp) [6].

Selon les normes ISO 4287/1-1984 et ANSI/ASME B46.1-1985 les trois critères de rugosité, précédents, sont définis comme suit :

La hauteur des irrégularités sur dix points Rz : Moyenne des valeurs absolues des hauteurs, des cinq saillies du profil les plus hautes et des profondeurs des cinq creux du profil les plus bas, à l'intérieur de la longueur de base.

$$R_z = \frac{1}{5} R_1 + R_3 + R_5 + R_7 + R_9 - R_2 + R_4 + R_6 + R_8 + R_{10} \quad (\text{I-1})$$

La hauteur maximale du profil R_t : Distance entre la ligne des saillies et la ligne des creux à l'intérieur de la longueur de base.

L'écart moyen arithmétique du profil R_a : Moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts du profil dans les limites de la longueur de base.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y \ x \ dx| = \frac{1}{n} \sum |y_i| \quad (\text{I-2})$$

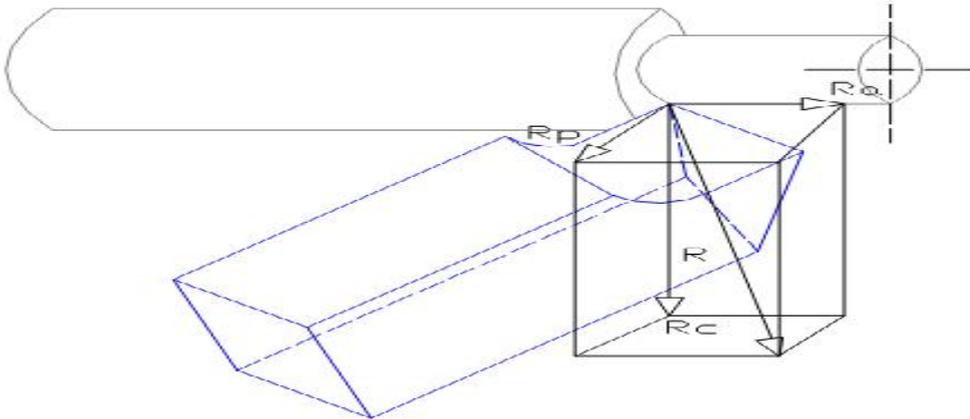


Figure I-3 critères de rugosité [7]

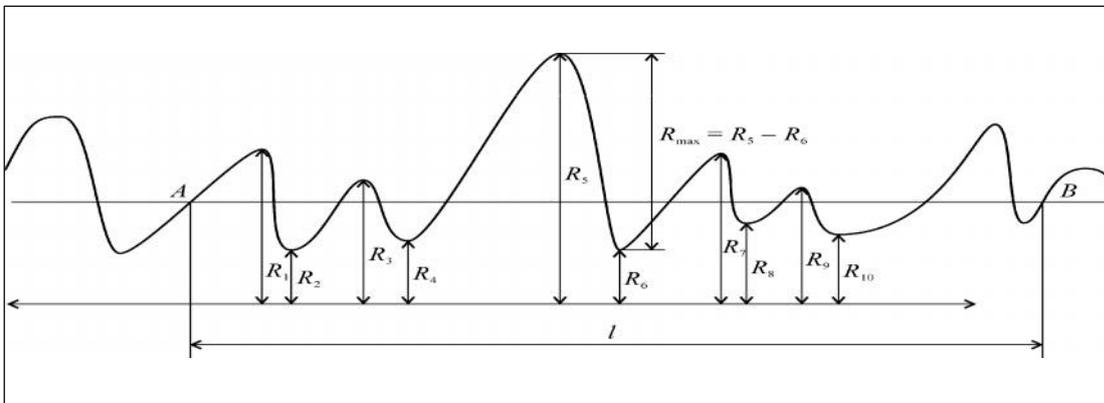


Figure I-4 Hauteur des irrégularités sur dix points R_z [8].

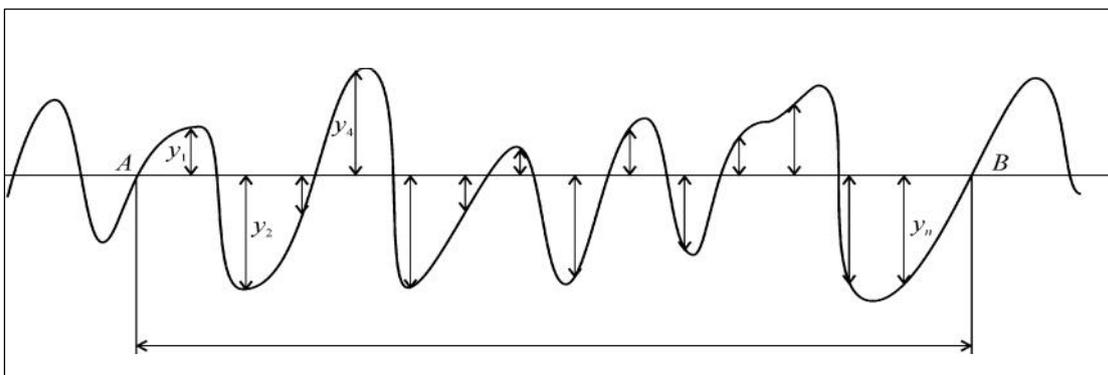


Figure I-5 Écart moyen arithmétique du profil Ra [8].

I.9. Les efforts de la 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.9.1. 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 [9], comme présenté dans la *figure I-6*

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 [10].

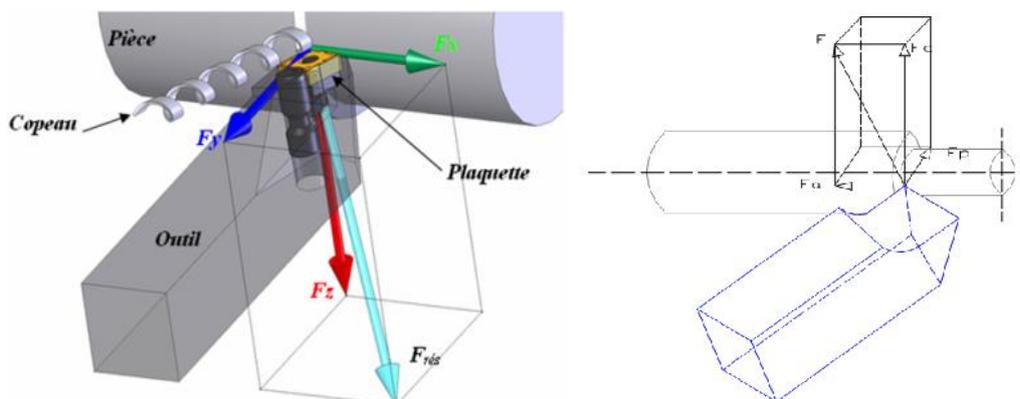


Figure I-6 représentation graphique des efforts de coupe [7].

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

➤ **$F_x = Fa$** : 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.

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

1.9.2. Rapport des composantes

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

$$F_{rés} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (I-3)$$

1.9.3. 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.

$$K_z = F_z / S \quad (I-4)$$

F_z: effort de coupe (N) ;

K_z: pression de coupe (N/mm²) ;

S: section du copeau (mm²) ;

$$S = a_p \times f \quad (I-5)$$

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

1.9.4. La puissance de coupe

Elle est donnée par la relation:

$$P_c = F_z \times V_c \quad (I-6)$$

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:

$$P_c = K_z \times a_p \times f \times V_c \quad (I-7)$$

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).

La puissance de la machine se déduit de la puissance de coupe en fonction du rendement

$$P=P_c/\eta$$

(I-

8)

Où: **P**: puissance absorbée par la machine ; η : rendement de la machine.

I.10. Usinage des polymères:

Plusieurs facteurs affectent la qualité et l'intégrité de la surface en tournage. Ces derniers peuvent être classés en facteurs concernant le matériau de la pièce à usiner (dureté, propriétés métallurgique), facteurs liés à l'outil de coupe (composition chimique du matériau, géométrie) et les paramètres de coupe. La qualité de la surface est influencée par la dureté et les propriétés du matériau usiné [11]. Il est prouvé en générale que la rugosité de la surface diminue avec l'augmentation de la dureté de la pièce pour le matériau polyéthylène, elle est très inférieure à celle des matériaux coupant, ce qui n'influe donc guère sur la durée de vie de l'outil de coupe

Lors du tournage, la surface obtenue n'est pas parfaitement cylindrique, elle comporte des sillons hélicoïdaux résultants de la forme plus ou moins pointue de l'outil de coupe et du mouvement hélicoïdal outil/pièce. Ces sillons ont un profil d'autant plus profond que le rayon du bec de l'outil est faible. Par ailleurs ils sont d'autant plus larges que l'avance par tour est élevée [12].

D'autre part, la forme de la surface engendrée par l'outil peut être affectée par les perturbations de la trajectoire de l'outil par rapport à la pièce, occasionnées par des vibrations importantes de l'un de ces éléments (ou des deux). Lorsque les conditions dynamiques (flexibilité et inertie des éléments, insuffisance d'amortissement mécanique) sont telles que les vibrations oscillatoires de cette trajectoire deviennent autoentretenues il en résulte des perturbations périodiques de la surface découpée. Elles prennent la forme de marques ou de stries plus ou moins accentuées, qui peuvent modifier sensiblement la rugosité du profil idéal défini par la trajectoire théorique de l'outil [13].

La production des pièces en matières plastiques doit prendre en compte, à part égale, les conditions de fabrication, les caractéristiques propres du matériau, le type de sollicitation et les conditions d'utilisation, ainsi que les interactions entre ces différents critères. Les précautions essentielles consistent à éviter toute déformation. Il faut prendre en compte aussi que l'effort d'usinage est inférieur à celui nécessaire pour usiner une pièce similaire en acier; il n'est donc pas nécessaire de serrer la pièce plastique avec le même effort. Les plastiques sont plus souples et fléchissent; c'est pourquoi les profondeurs de passe et les avances ne doivent pas être excessives. Parfois le refroidissement n'est pas nécessaire, c'est le cas de certains usinages de matières plastiques à faible coefficient de frottement tels que le polyéthylène. Dans ce cas très particulier, il peut être intéressant de prévoir quand même un soufflage d'air comprimé pour repousser le copeau et éviter qu'il ne vienne s'enrouler autour de l'outil. Il est en effet fréquent que le copeau ne se fragmente pas pendant l'usinage [14].

Les matériaux d'outils peuvent être en acier rapide qui est le moins cher à l'achat. Ces outils ont une durée de vie moins longue lors de l'usinage des matériaux renforcés de fibre de verre. Les carbures, qui ont une plus grande résistance à l'abrasion que les aciers rapides ont un bon rapport prix/usure. Pendant l'usinage, Parfois le refroidissement n'est pas nécessaire. C'est le cas de certains usinages de matières plastique à faible coefficient de frottement, par exemple polyéthylène. La précaution essentielle consiste à éviter toute déformation. L'utilisation des

montages spéciaux est conseillée pour éviter toute déformation, par exemple dans le chariotage des tubes creux en plastique la pièce doit être supportée par un manchon (cylindre) en bois [15].

La **figure I-7** définit les différents angles d'un outil de tour. Les principaux paramètres préconisés pour l'usinage des polyamides sont illustrés sur le **tableau I-3**

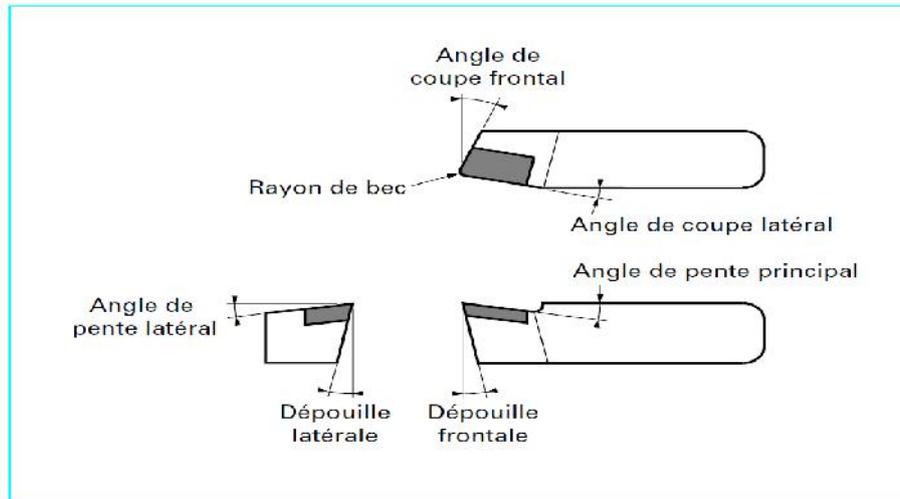


Figure I-7 définit différent angle d'un outil de tour [16].

Tableau I-3 paramètres de coupes pour l'usinage des polyamides [16].

Procédé	Paramètres	Unité	PA 6, PA 6-6
Sciage à la scie circulaire	Angle de dépouille	degré	10 à 40
	Angle de coupe	degré	4 à 8
	Pas de denture	mm/dent	5 à 10
	Avance	mm/tr	8
	Vitesse de coupe	m/min	jusqu'à 3 000
Sciage à la scie à ruban	Angle de dépouille	degré	10 à 40
	Angle de coupe	degré	4 à 8
	Pas de la denture	mm/dent	3 à 15
	Avance	mm/tr	8
	Vitesse de coupe	m/min	50 à 1 000
Tournage	Angle de dépouille	degré	0 à 15
	Angle de coupe	degré	négatif
	Profondeur de coupe	mm	0,5 à 10
	Avance	mm/tr	0,05 à 0,5
Fraisage	Vitesse de coupe	m/min	50 à 1 000
	Angle de dépouille	degré	15 à 30
	Angle d'attaque	degré	5 à 15
	Avance	mm/tr	jusqu'à 0,5
	Vitesse de coupe	m/min	1 000

I. Travaux de recherches concernant l'usinage des polymères

Cette partie récapitule les recherches dans la littérature existante reliée à l'usinage des polymères. L'objectif est de faire une étude à partir de ces articles publiés et de comprendre les travaux accomplis concernant l'usinage de ces polymères jusqu'à nos jours. Dans cette recherche on a trouvé que beaucoup d'auteurs ont étudié l'influence de la matière à usiner, le rôle du revêtement et les paramètres de coupe optimaux, l'usure de l'outil, l'influence des revêtements, l'influence des différents types de substrats et l'effet de l'usinage à sec sur l'usinabilité de ces polymères.

Les polymères ont un comportement non-linéaire très complexe et leurs caractéristiques sont influencées par la densité, le poids moléculaire et la distribution du poids moléculaire [17]. Gombette et Ernoult [18] ont indiqué que les coefficients de dilatations thermiques volumiques des polymères sont supérieurs à ceux des métaux ou des matériaux covalents à liaisons intenses (pour le polyéthylène $30 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ à $40 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, Pour les métaux $3 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ à $7 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ et pour le diamant $0.3 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$). Ils sont aussi mauvais conducteurs de chaleurs; ils conduisent 100 à 1000 fois moins de chaleur que les métaux. La combinaison de ces deux caractéristiques, fait que la chaleur engendrée par l'opération d'usinage reste concentrée sur la zone usinée et entraîne une déformation thermique importante, voir un risque de dégradation thermique. La viscosité des polymères joue un rôle décisif pour déterminer la qualité de la surface usinée. Leur déformation visqueuse dépend fortement du taux de déformation ainsi que de la température [18-20]. Les polymères sont très souples par rapport aux aciers et beaucoup moins durs ce qui impose, par exemple, des précautions de serrage particulières pour ne pas déformer la pièce ni en marquer la surface.

Plusieurs articles ont été publiés dans le domaine de l'usinage des polymères. Jiang [21] et Dusunceli [22] ont investigué la relation entre les paramètres du matériau, tel que la température de transition vitreuse (T_g), la température de fusion et les effets de viscosité et de la relaxation, et l'état de surface du produit fini. Smith [23] a étudié l'effet de la température de transition vitreuse (T_g) sur la qualité de surface des pièces thermoplastiques amorphes en tournage. Il a trouvé que la rugosité de surface des polymères est très influencée par la température de transition vitreuse et que si la température dans la zone de coupe dépasse T_g un bon état de surface est obtenu. Le choix des conditions de coupe est essentiel. En général la plupart des travaux d'usinage de matières plastiques sont basés sur des résultats d'études réalisées sur des métaux avec de légères modifications.

Alauddin [24] a résumer plusieurs études sur l'usinage conventionnel des matières plastiques à savoir le tournage, la coupe orthogonale, le perçage, le fraisage et la rectification. L'étude réalisée par Kabayashi [25] est portée sur le tournage de la résine polyester. Les figures 1, 2, 3 et 4 montrent qu'il est préférable d'utiliser un angle d'attaque nul ou négatif, une profondeur de passe inférieure à 0.02mm pour obtenir un bon état de surface et des efforts de coupes très faibles.

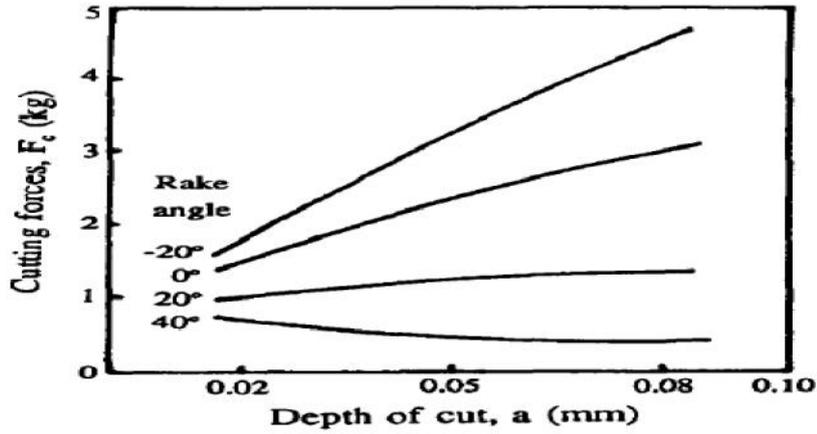


Figure II.1 : Effort de coupe en fonction de a_p pour $V_c=0.8\text{m/min}$ [24]

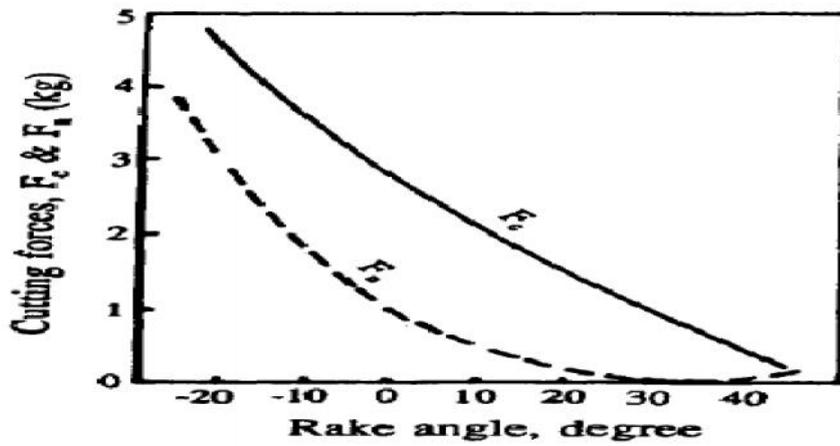


Figure II.2 : Effort de coupe en fonction de l'angle de direction pour $V_c=0.2\text{m/min}$ et $a_p=0.08\text{mm}$ [24]

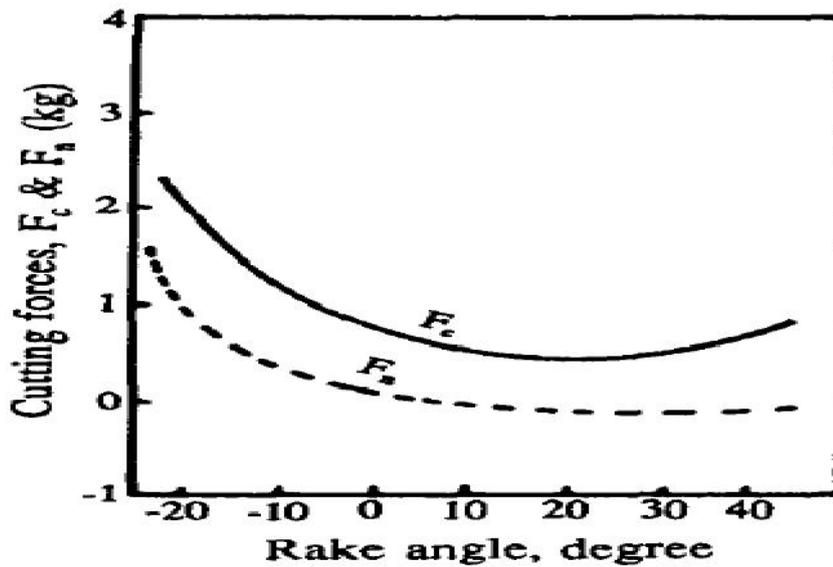


Figure II.3 : Efforts de coupe en fonction de l'angle de direction pour $V_c=7.15\text{m/min}$ et $a_p=0.08\text{mm}$ [24]

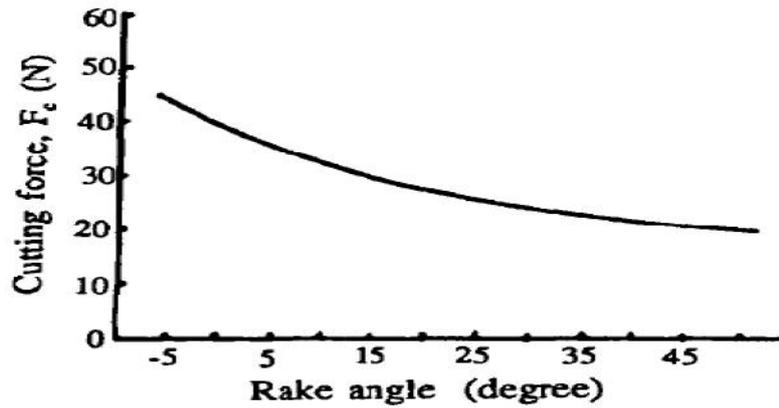


Figure II.4 : Effort de coupe en fonction de l'angle de direction principal pour $V_c=15\text{m/min}$ [24]

Petropoulos [26] a étudié l'influence des paramètres de coupe sur la rugosité de surface lors du tournage du PEEK et du PEEK GF30 renforcé. L'analyse statistique des résultats expérimentaux a révélé que l'augmentation de l'avance cause une augmentation significative du critère de rugosité R_a alors que l'augmentation de la vitesse de coupe permet une amélioration de l'état de surface (Tableau II.1). La valeur de IT (International Dimensionnel Précision) est donnée par la relation empirique suivante :

$$IT = 30 \times R_a \quad (II.1)$$

La figure II.5 représente l'évolution de l'IT en fonction des paramètres du régime de coupe On peut conclure que le PEEK représente un meilleur état de surface que le PEEKGF30.

Tableau II.1 : Valeurs des rugosités de surface R_a en fonction des paramètres du régime de coupe [26]

Test	V (m/min)	f (mm/rev)	Surface roughness (R_a) ^a [μm]	
			PEEK	PEEK GF30
1	150	0.05	0.7	0.88
2		0.1	1.18	1.25
3		0.2	3.01	3.39
4	250	0.05	0.65	0.84
5		0.1	1.14	1.29
6		0.2	2.81	3.23
7	377	0.05	0.62	0.70
8		0.1	1.1	1.26
9		0.2	2.56	3.06

^a Average of 2 tests.

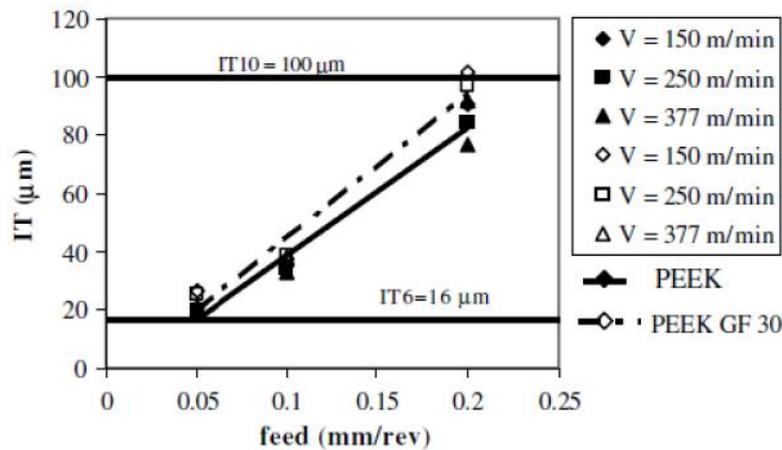


Figure II.5 : IT en fonction des paramètres du régime de coupe [26]

Cristescu [27] a investigué l'influence de la géométrie de l'outil de coupe (rayon de bec) sur l'intégrité de la surface et la précision dimensionnelle lors des opérations de chariotage du polyamide PA66–MoS2. Lors de son étude il a en utilisé deux outils en céramique ayant différents rayons de becs. L'intégrité de la surface a été évaluée par la mesure de la rugosité, micro-dureté, et la technique métallographique. Les résultats de son étude ont montré que le choix de l'outil de coupe est très décisif quant à l'intégrité de la surface aussi bien que la précision dimensionnelle obtenue. L'avance a un effet prépondérant sur la rugosité de la surface suivi par la vitesse de coupe.

Le rayon du bec de l'outil a une influence significative sur la rugosité de la surface usinée. En augmentant le rayon du bec, les valeurs de la rugosité diminuent nettement (figures II.6 et II.7). Les outils de coupe utilisés ont donné un bon état de surface à une épaisseur réduite de la couche déformée plastiquement et une meilleure précision dimensionnelle.

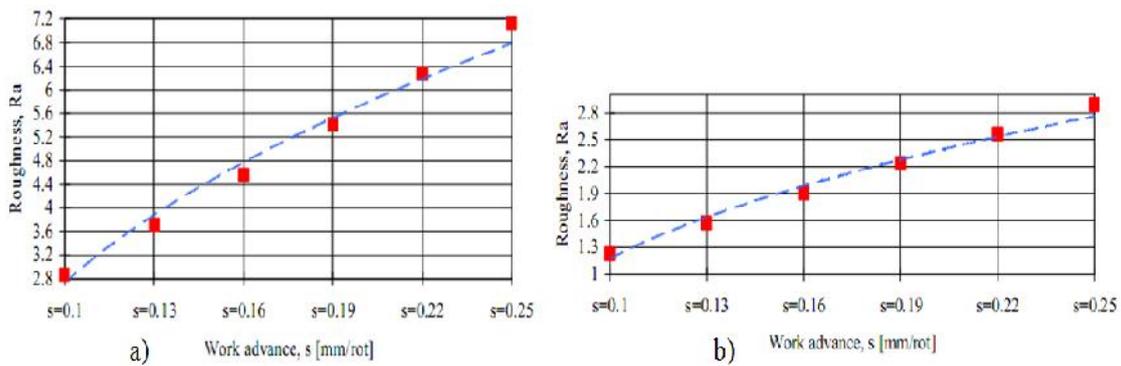


Figure II.6 : La relation entre Ra et la vitesse d'avance
a)outil avec rayon de bec =1 ; b) outil avec rayon de bec =0,4 [27]

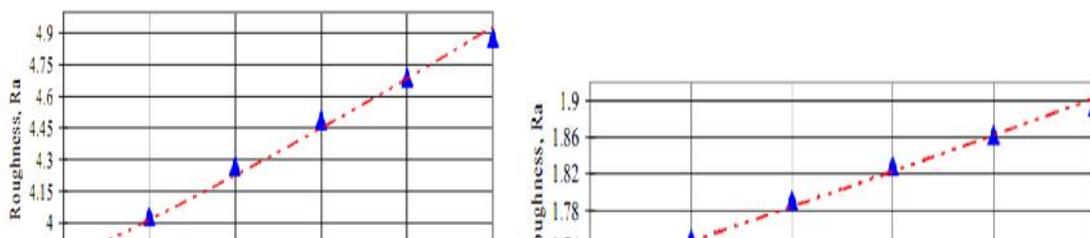


Figure II.7 : La relation entre Ra et la vitesse de coupe
a) outil avec rayon de bec =1 ; b) outil avec rayon de bec =0,4 [27]

Davim et Mata [28] ont investigué l'usinabilité du polyamide PA 66 et le polyamide renforcé par des fibres de verre à 30% PA66 GF. Les outils de coupe utilisés pour cette étude sont en CVD (diamond coated carbide), diamant polycristallin PCD , carbure non revêtu K15. Les résultats ont indiqué que le diamant revêtu (CVD) présente une précision dimensionnelle plus élevée et des petites valeurs des efforts de coupe, donc une faible consommation d'énergie par rapport aux autres outils. Ceci est expliqué par leur dureté élevée et la présence du brise-copeaux figure II.8.

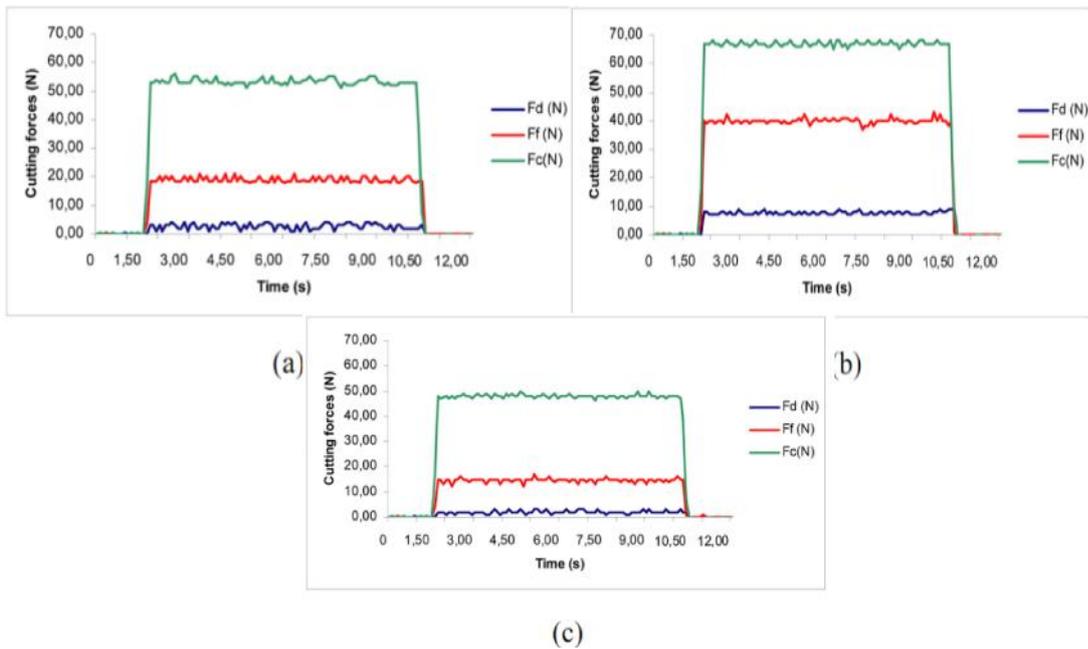


Figure II.8 : Exemples d'évolution d'efforts de coupe pour la PA66GF ($V_c=100$ m/min, $f=0.1$ mm/rev) :(a) outil de PCD; (b) K10 & (c) outil de diamant CVD [28].

La figure II.9 illustre le rapport F_x/F_z pendant l'usinage des deux polyamides, PA6 et PA66 renforcé par les fibres de verre avec trois outils de coupe K10, PCD et CVD. L'outil revêtu (CVD) présente les plus petites valeurs du rapport. Ce qui indique une efficacité importante lors de l'usinage

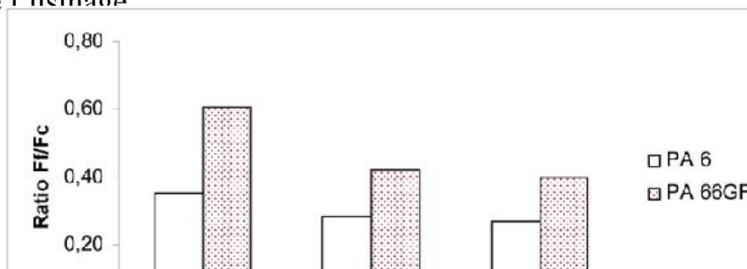


Figure II.9: Représentation de rapport F_f/F_c pour plusieurs types d'outil et les deux des matériaux ($V_c=100$ m/min, $f=0.1$ mm/rev) [28].

Kaddeche [29] a investiguée l'influence des paramètres du régime de coupe sur les efforts de coupe et l'état de surface usinée lors du tournage de deux nuances de polyéthylène de haute densité (HDPE-100 et HDPE-80). Les résultats obtenus ont montrés que l'avance est le paramètre le plus influent sur les critères de rugosité suivie par la profondeur de passe (Figure II.10). L'effort tangentiel est prépondérant par rapport aux deux autres efforts (F_r et F_a), pour les deux matériaux (figure II.11). Les augmentations de la profondeur de passe ainsi que celles des avances font augmenter la température dans la zone de coupe même à faible vitesse de coupe.

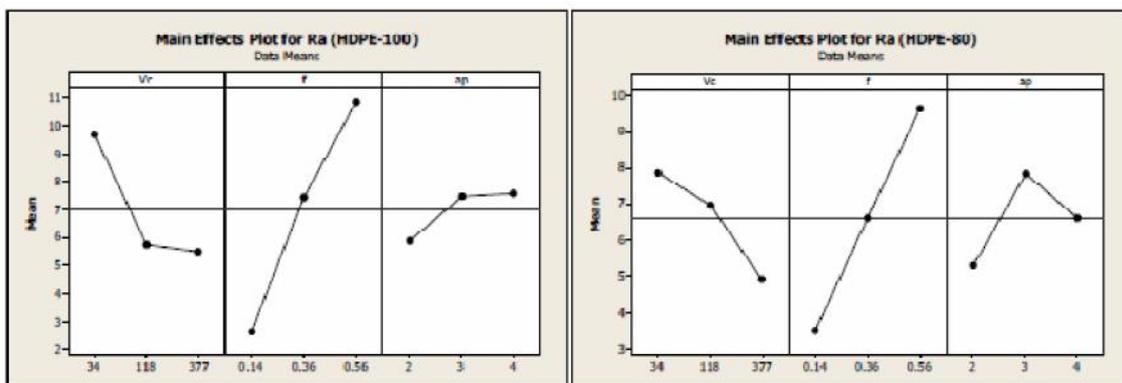


Figure II.10 : Graphique des effets principaux de Ra [29]

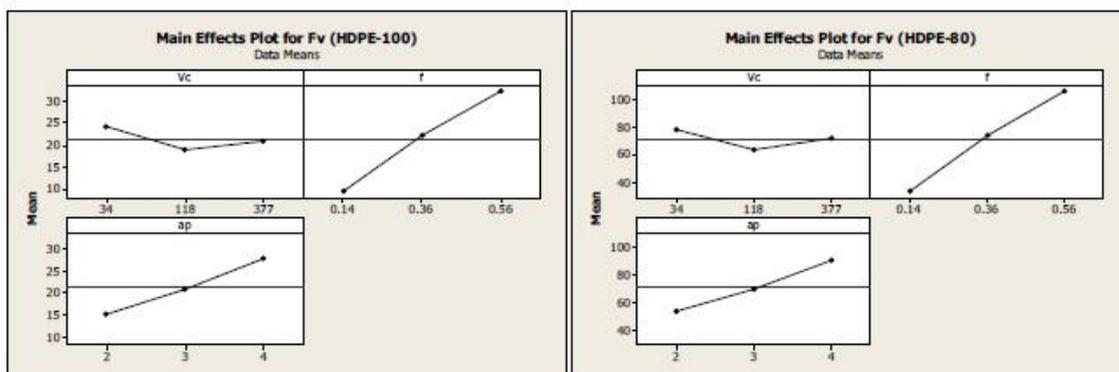


Figure II.11 : Graphique des effets principaux de Fv [29]

Motoi [30] a présenté une étude sur l'influence des éléments d'additions sur la rugosité de la surface usinée lors du chariotage longitudinal de certains polyamides. Les types de polyamide étudiés sont: PA66, PA66–GF30 et PA66MoS2. Il a observé que le polyamide PA66 donne des bons résultats en tournage longitudinale, ainsi les éléments d'additions supplémentaires à ce polyamide influencent négativement la qualité de surface dans le cas d'ébauchage figure II-12.

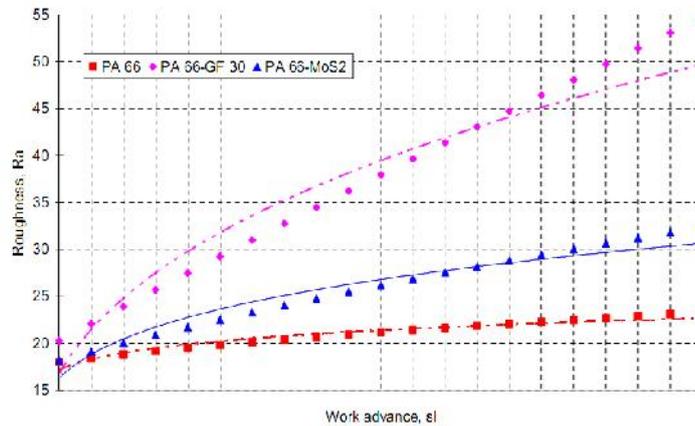


Figure II.12: Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse d'avance (V , $a_p = \text{constat}$), pour l'ébauchage [30].

Par contre dans le cas de finition en tournage des pièces en PA66 les éléments d'addition jouent un rôle significatif sur la qualité de surface, figure II.13.

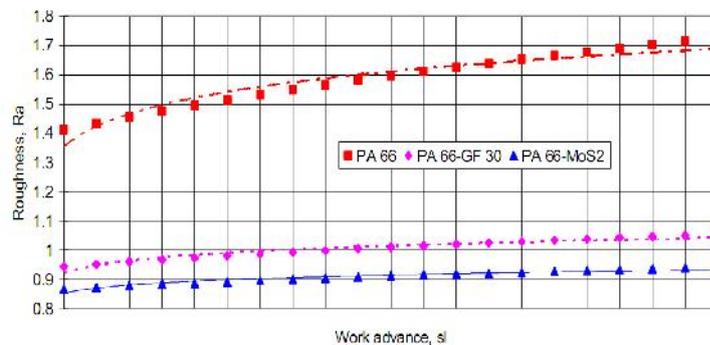


Figure II.13 : Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse d'avance Pour tournage de finition [30].

Nous pouvons donc conclure que l'utilisation des adjuvants comme le molybdène et phosphore est conseillée pour obtenir un meilleur état de surface lors du chariotage des polyamides.

Dans l'étude [31] MO OI a présenté une étude sur l'influence des paramètres et régime de coupe sur l'effort de coupe principal produit lors de l'usinage d'un plastique semi extrudé PA66 (ERTA) avec un outil en carbures cimentés non-revêtu sans brise-copeaux K15 (code CNMG 12 08 02). Les résultats sont présentés sur la figure II.14

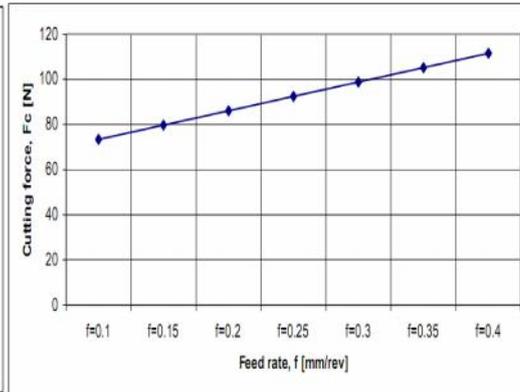
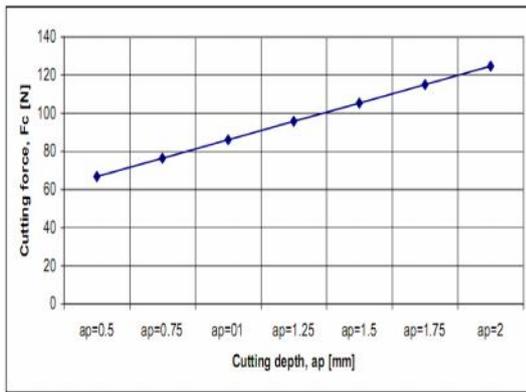


Figure II.14.a) L'effort de coupe F_c en fonction de la profondeur de passe pour $f=0.2\text{mm/rev}$, $v=117.75$ [31]

Figure II.14.b) L'effort de coupe F_c en fonction de l'avance pour $a_p=1\text{mm}$, $v=117.75$ [31]

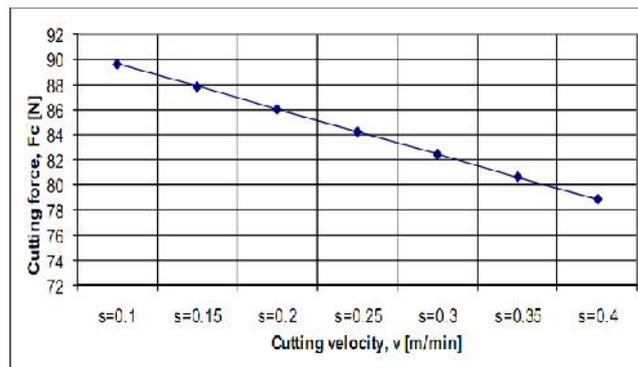


Figure II.14.c) L'effort de coupe F_c en fonction de la vitesse de coupe Pour $a_p=1\text{mm}$, $f=0.2\text{ mm/rev}$ [31]

Les résultats obtenus ont montré que la profondeur de passe (t) est le paramètre le plus influant suivie de l'avance (SL) et que la vitesse de coupe (v) a la plus petite influence sur l'effort de coupe principal. L'effort de coupe est inversement proportionnel à la vitesse de coupe.

Dans le but de caractériser l'usinabilité des polymères semi-cristallins Zaidi [32] a réalisé une étude sur l'usinage du polyamide PA6. Pour cela quatre types d'essais ont été réalisés. Usinage à sec et avec lubrification d'une part et deux outils de coupe avec et sans brise copeau. Les résultats obtenus ont montré que la vitesse de coupe est le paramètre le plus influent sur le critère de rugosité R_a suivie par l'avance. Par contre la profondeur de passe est le paramètre qui a le plus d'influence sur les efforts de coupe suivie de l'avance.

Les histogrammes des figures II.15, II.16 et II.17 présentent l'évolution des efforts de coupe pour les quatre types essais en fonction des paramètres du régime de coupe.

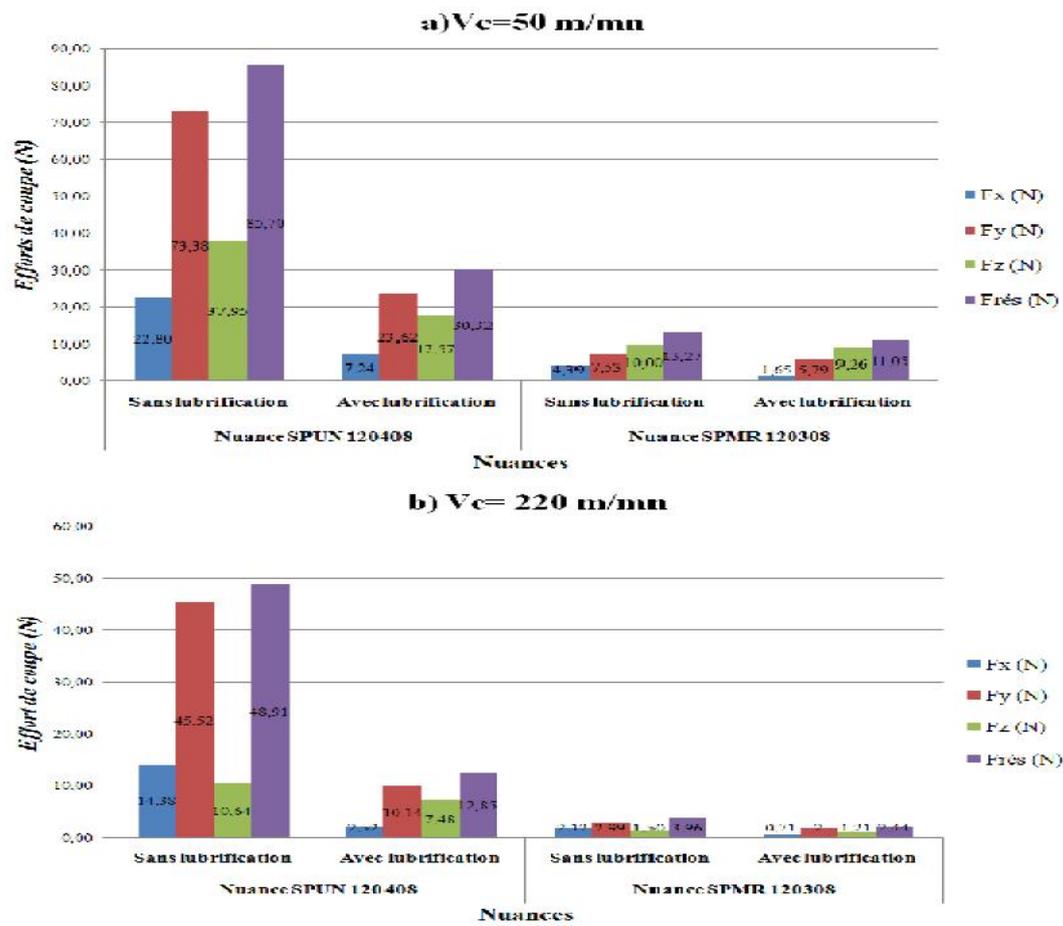


Figure II.15 : Comparaison entre les efforts enregistrés pour les deux expériences pour $f=0,08$ mm/tr; $a_p=0,2$ mm [32]

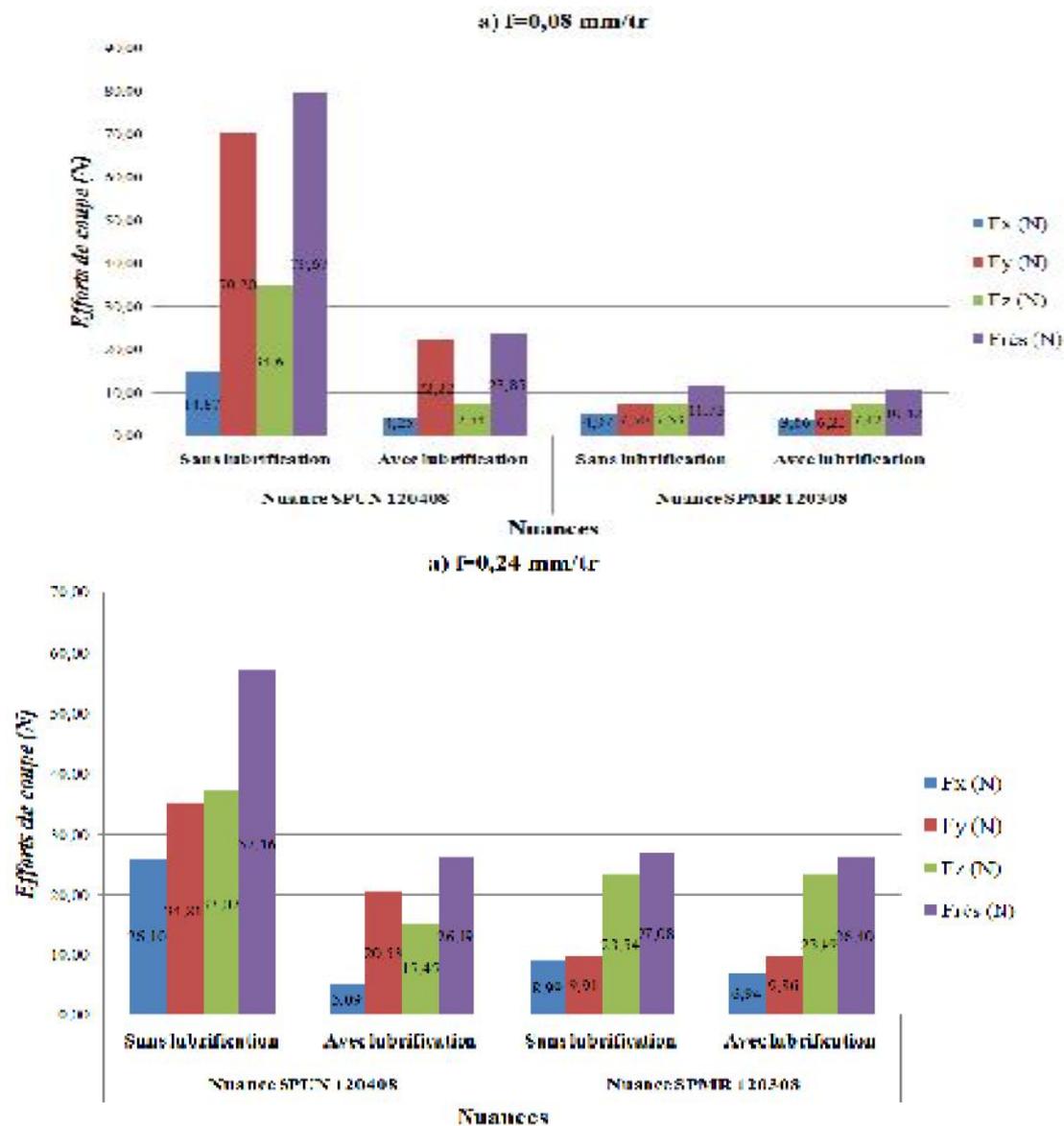


Figure II.16 : Comparaison entre les deux régime de coupe;
 $V_c=110\text{m/min}, a_p=0,2 \text{ mm}$ [32].

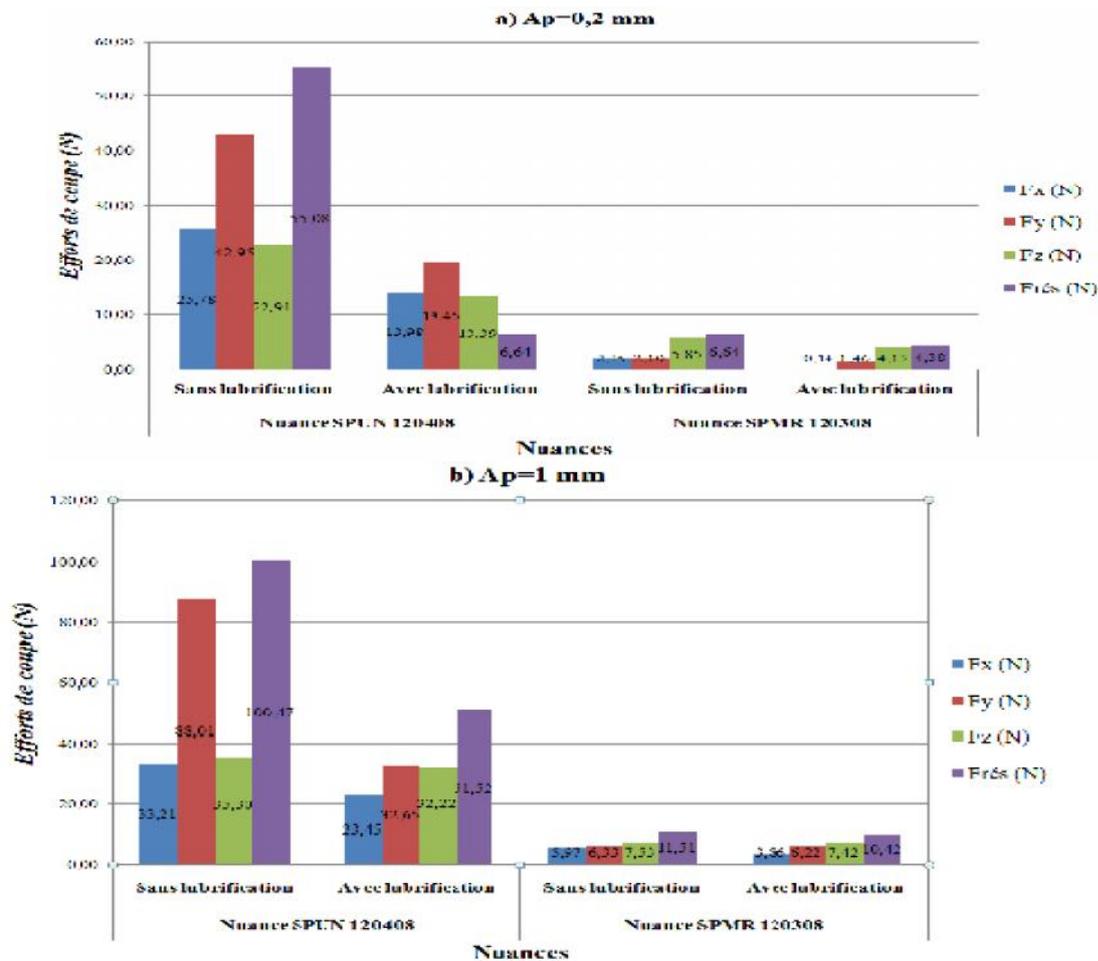


Figure II.17 : Comparaison entre les deux nuances de matériau de coupe;
 $V_c=110m/min, f=0,08mm/tr.$ [32]

En analysant les résultats de la figure II.15, on constate que les efforts de coupe diminuent avec l'augmentation de la vitesse de coupe. La présence de brise copeau est très influente sur les résultats obtenus. De la figure II.16 on peut conclure que l'avance est un facteur très significatif quand à l'évolution des efforts de coupe. La lubrification joue un rôle très important pour diminuer les efforts de coupe mais en présence de brise copeau l'effet de la lubrification est négligeable. L'effort tangentiel est le plus affecté par l'avance. Les résultats de la figure II.17 montrent que l'augmentation de la profondeur de passe engendre une nette augmentation des trois composantes des efforts de coupe.

La figure II.18 montre que la lubrification est importante lors de l'usinage à grande vitesse de coupe et que l'utilisation de brise copeau améliore l'état de surface usinée. L'avance par tour a un effet très significatif sur l'état de surface (figure II.19).

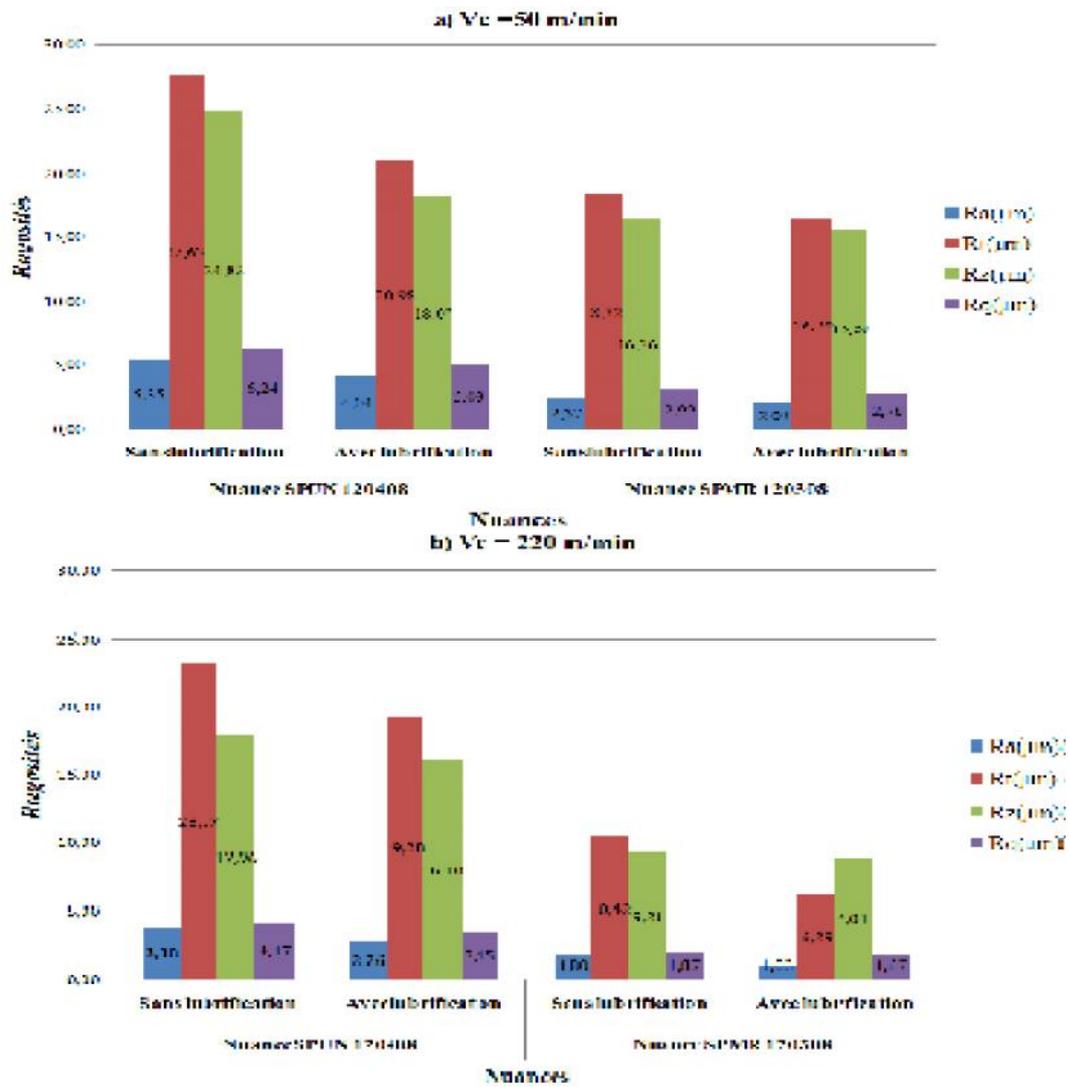


Figure II.18 : Comparaison entre les deux nuances de matériau de coupe; $a_p=0,2 \text{ m/min}$, $f=0,08\text{mm/tr}$. [32]

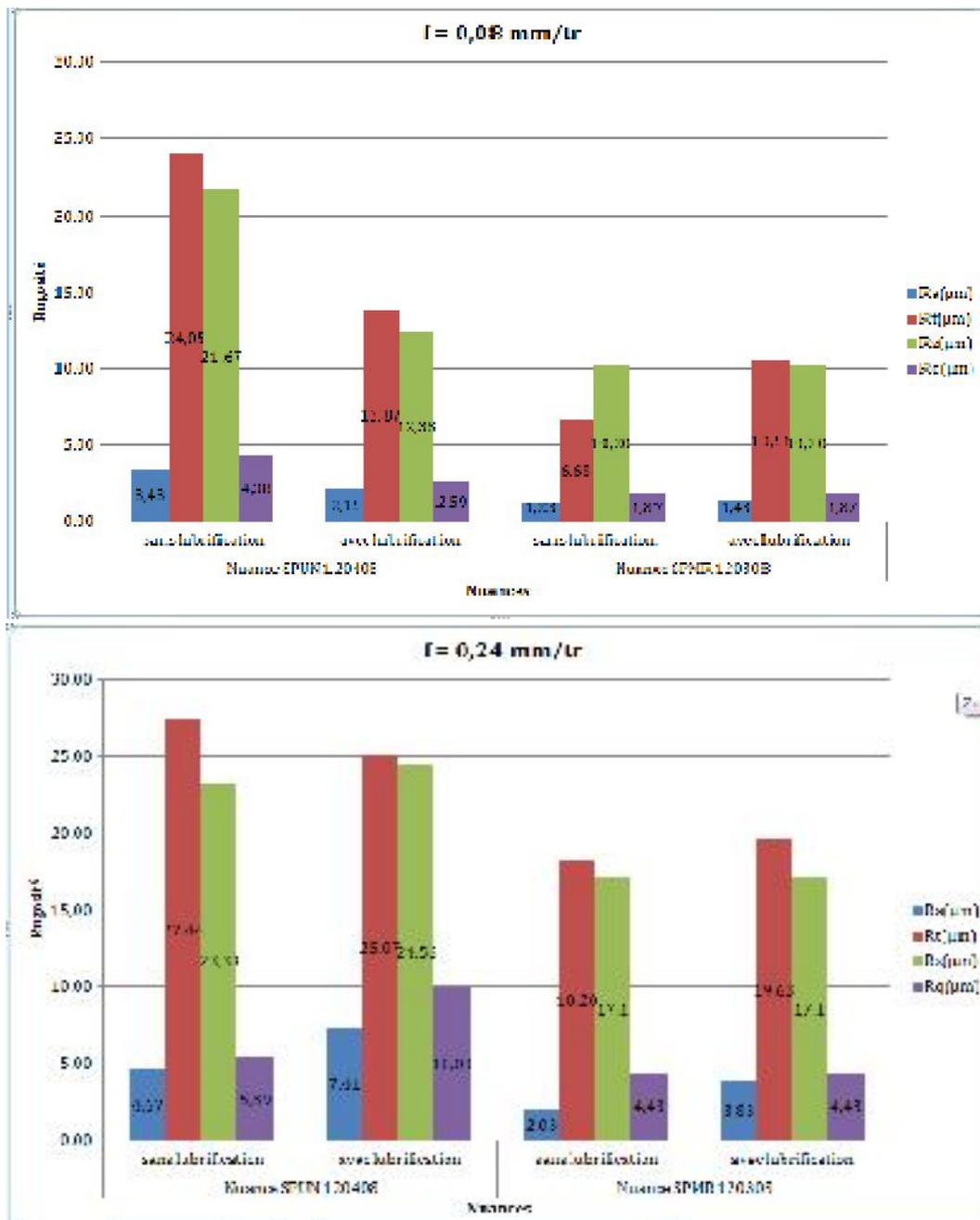


Figure II.19 : Comparaison entre les deux nuances de matériau de coupe pour $V_c=110\text{m/min}$, $a_p=0,2\text{mm}$ [32]

Dridah [33] a investigué l'usinabilité du autre polymère poly-cristallin nommé le POM-C. cette étude expérimentale a été réaliser avec un outil en carbure (SPUN120408). Les résultats obtenus ont montré que l'avance a un effet prépondérant sur l'état de surface usinée, suivie par la profondeur de passe. La vitesse de coupe n'a pas grande influence sur les critères de rugosité.

Les essais des efforts de coupe montrent que ces derniers sont inversement proportionnels à la vitesse de coupe. La profondeur de passe a une grande influence sur l'augmentation des efforts de coupe en raison de l'augmentation de la section du copeau. L'augmentation de l'angle de direction principal diminue les valeurs des composantes des efforts de coupe. En utilisant un angle $K_r = 45^\circ$ on obtient meilleur état de surface qu'en

utilisant un $K_r = 75^\circ$. La lubrification permet d'obtenir un meilleur état de surface et diminue les efforts de coupe (figures II.20 à II.24).

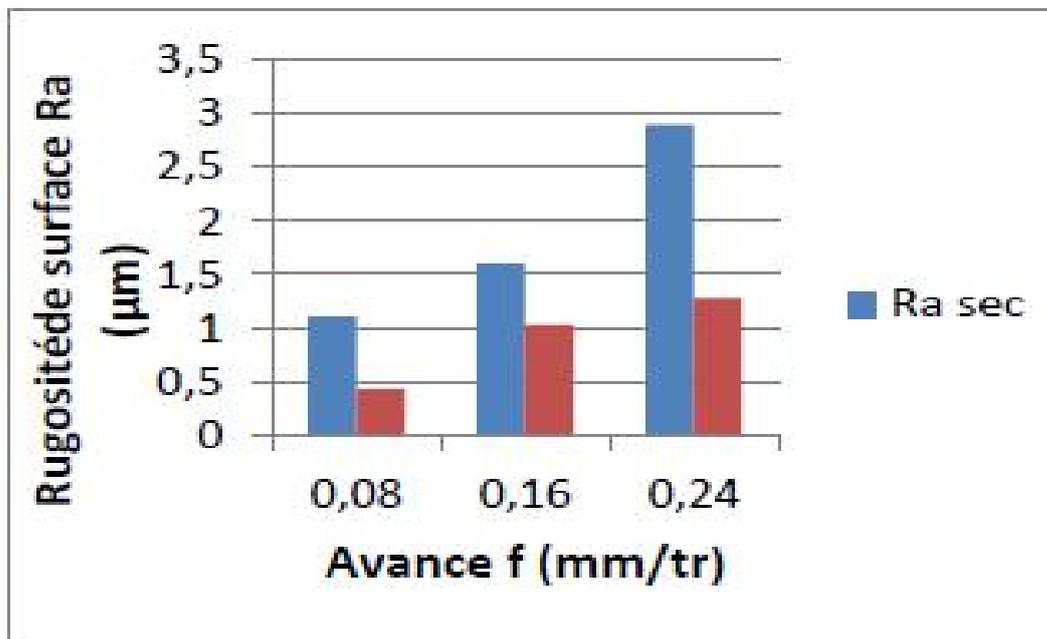


Figure II.20 : Effet de l'avance sur Ra (μm) [33]

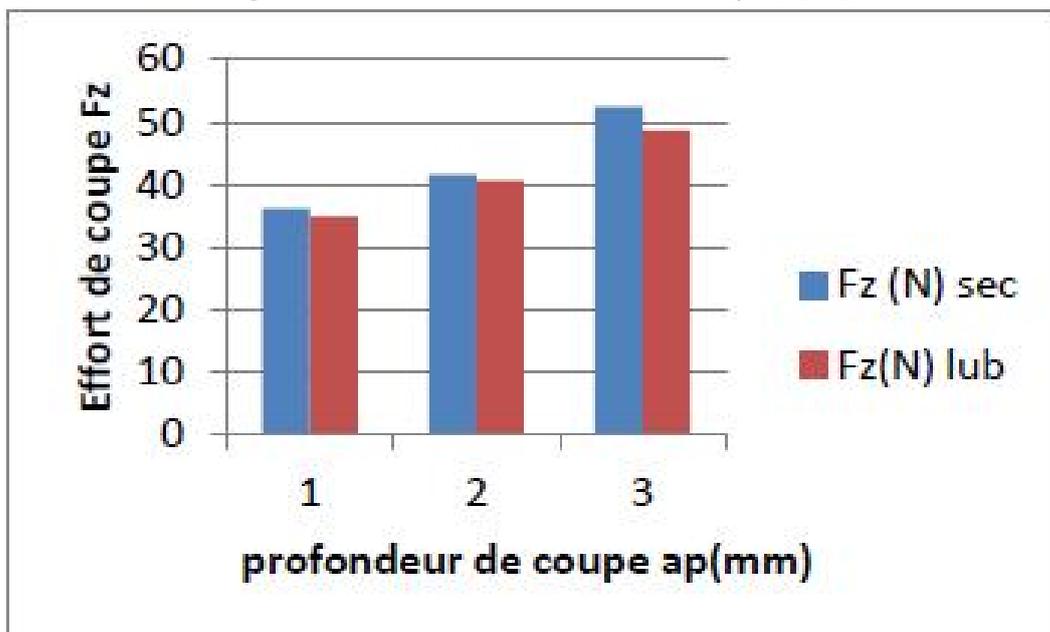


Figure II.21 : Effet d' a_p sur l'effort de coupe Fz (N) [33]

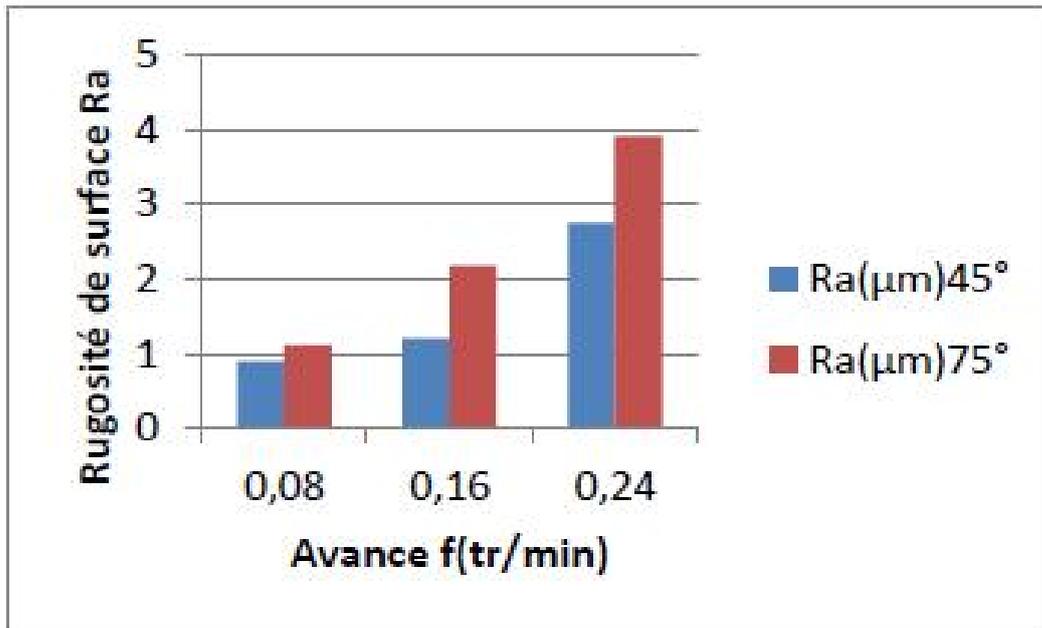


Figure II.22 : Effet de l'avance sur Ra [33]

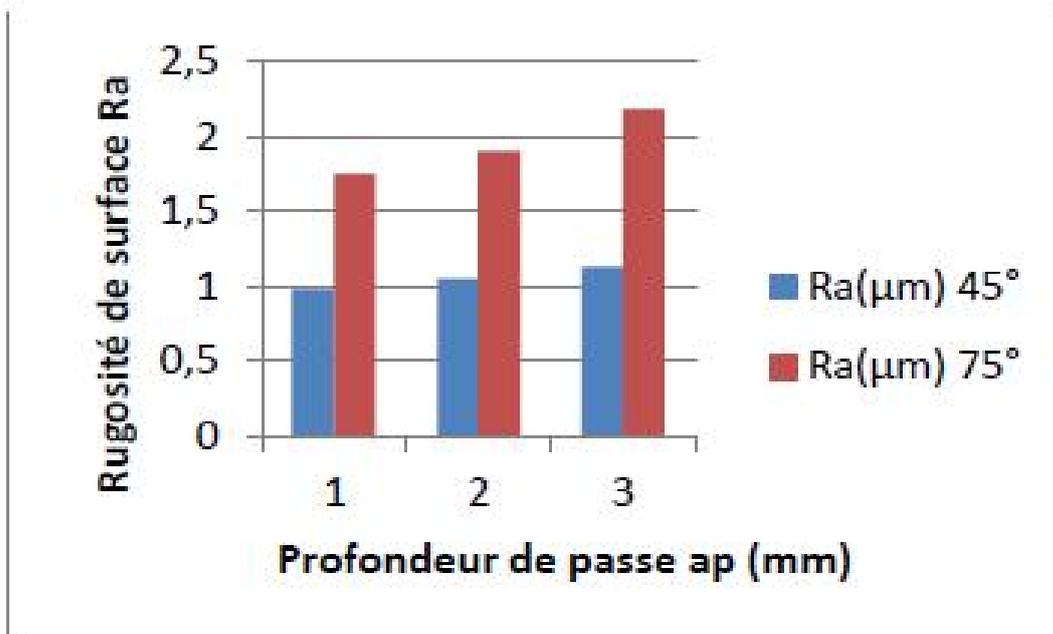


Figure II.23 : Effet de a_p sur la rugosité Ra régime de coupe $V_c=220\text{m/min}$, $f=0.12\text{ mm/tr}$ [33]

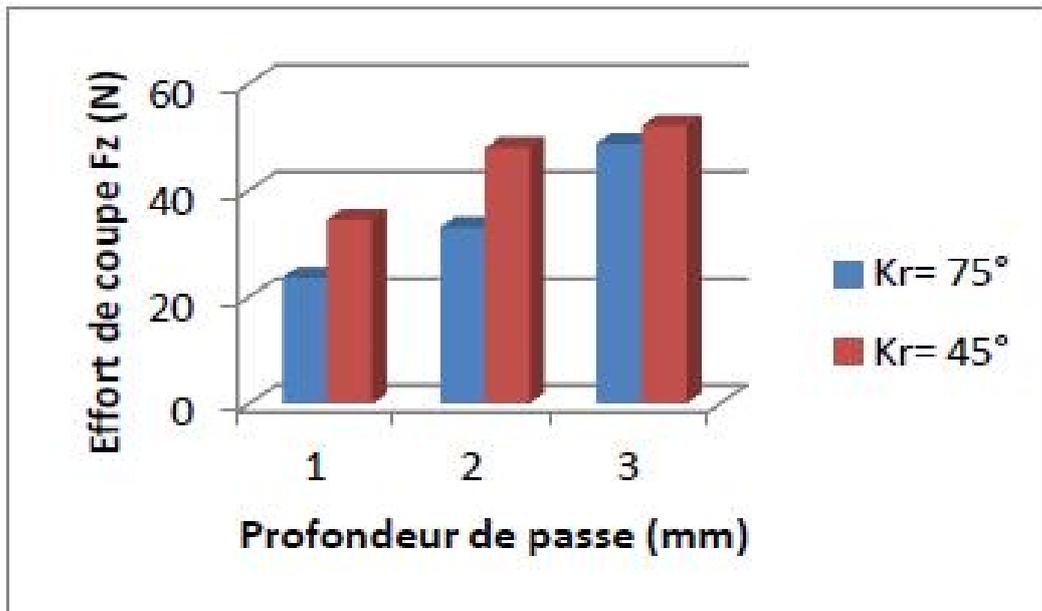


Figure II.24 : Effet de α_p sur l'effort F_z [33]

III.1.Introduction

Les polymères ont un comportement non linéaire très complexe et leurs caractéristiques sont influencées par la densité, le poids moléculaire et la distribution du poids moléculaire [17]. Gombette et Ernoult[18] ont indiqué que les coefficients de dilatations thermiques volumiques des polymères sont supérieurs à ceux des métaux ou des matériaux covalents à liaisons intenses [14]. Ils sont aussi mauvais conducteurs de chaleur ; ils conduisent 100 à 1000 fois moins de chaleur que les métaux. La combinaison de ces deux caractéristiques, fait que la chaleur engendrée par l'opération d'usinage reste concentrée sur la zone usinée et entraîne une déformation thermique importante, voir un risque de dégradation thermique. La viscosité des polymères joue un rôle décisif pour déterminer la qualité de la surface usinée. Leur déformation visqueuse dépend fortement du taux de déformation ainsi que de la température [17,18,19]. Les polymères sont très souples par rapport aux aciers et beaucoup moins durs ce qui impose, par exemple, des précautions de serrage particulières pour ne pas déformer la pièce ni en marquer la surface (Tableau III.1) Jiang [21] et Dusunceli [17] ont investigué la relation entre les paramètres du matériau, tel que la température de transition vitreuse (T_g), température de fusion et les effets de viscosité et de relaxation, et l'état de surface du produit fini. Smith [40] a étudié l'effet de la température de transition vitreuse (T_g) sur la qualité de surface des pièces thermoplastiques amorphes en tournage. Il a trouvé que la rugosité de surface des polymères est très influencée par la température de transition vitreuse. Si la température dans la zone de coupe dépasse T_g un bon état de surface est obtenu.

Le choix des conditions de coupe est essentiel [24]. Petropoulos et al. [26] ont étudié l'influence des paramètres de coupe sur la rugosité lors du tournage du polyetheretherketone (PEEK).L'analyse statistique des résultats expérimentaux a révélé que l'augmentation de l'avance cause une augmentation significative de tous les critères de rugosité alors que l'augmentation de la vitesse de coupe permet une légère diminution des critères de rugosité. Davim et al [34] ont investigué l'usinabilité du polyamide PA 66. Les résultats ont indiqué que la composante radiale de l'effort de coupe est la plus importante suivie des composantes tangentielle et axiale.

Les polymères utilisés dans cette étude sont deux copolymères demis-cristallins ; le polyacétal ou polyoxyméthylène de type C (POM-C) et le polyamide (PA6). Les polyacétals ont des propriétés qui les rendent irremplaçables pour des pièces à fortes exigences mécaniques comme les engrenages et les poulies. Ils sont solides, présentent les qualités de métaux tels que l'acier, l'aluminium ou le zinc. Ils résistent à la plupart des agents chimiques et ont un faible coefficient de frottement. Par contre, ils ont une densité élevée et une assez faible résistance à la température. La recherche vise à augmenter leur résistance au choc pour permettre la réalisation de plus grosses pièces figure III.1.



Figure III.1: Pièces en POM-C [4]

Tableau III-1 : les propriétés techniques du POM –C [4].

Générales	Valeurs	Unités
Densité	1.41	g/cm ³
Absorption d'humidité	0.2	%
Mécaniques	Valeurs	Unités
Résistance à la traction	67	MPa
Allongement à la rupture	30	%
Module d'élasticité à la traction	2800	MPa
Résistance aux chocs	6	KJ/m ³
Dureté à la bille	150	MPa
Dureté shore D	81	Echelle D
Thermiques	Valeurs	Unités
Température de fusion	165	C°
Conductibilité thermique	0.31	W/(m*k)
Capacité thermique spécifique	1.5	KJ/(Kg*k)
Température d'utilisation à long terme	50 – 100	C°
Température d'utilisation à court terme	140	C°
Electriques	Valeurs	Unités
Constante diélectrique	8.3	-
Facteur de perte diélectrique 50Hz	0.002	-
Rigidité diélectrique	40	Kv/mm
Résistance volumique	1010	*cm
Résistance spécifique	1010	

Le polyamide est l'un des polymères les plus étudiés. Il est de plus en plus utilisé dans différentes applications telles que le transport d'eau et de gaz naturel [35, 36,37]. C'est la première matière plastique à avoir été découverte en 1938. Selon la longueur des chaînes, on obtient différents types de PA que l'on distingue par des chiffres : par exemple le PA 6.6 est le nylon. Ce sont des polymères qui offrent un bon compromis entre des qualités mécaniques, thermiques et chimiques. Les polyamides sont utilisés pour réaliser des pièces moulées dans l'appareillage ménager et automobile, des tapis et des moquettes, de la robinetterie, de la serrurerie, des engrenages, des textiles (lingerie et voilages). L'inconvénient principal de tous les polyamides est qu'ils sont hydrophiles ce qui limite leur usage pour certaines pièces mécaniques [38].



Figure III.2 : Pièces en PA-6[4]

Les références [17] et [22] montrent que les techniques d'usinage affectent le comportement du POM-C et PA6 en termes de module d'élasticité et de résistance en traction. Il est donc impératif d'optimiser les différents paramètres du régime de coupe pour mieux maîtriser les opérations d'usinage comme pour d'autres matériaux [24, 39, 40].

Tableau III.2. Quelque propriétés du polyamide PA6 [4]

Généralise	Norme	Unité	Valeur
Propriété Physique			
Densité	53479	g/cm ³	1.14
Absorption d'eau 23°C HR 50%	53495	%	3.0
Dureté	53505	-	R100
Résilience	53453	KJ/m ²	>7
Allongement a la rupture	53455	%	50
Résistance à la traction	53455	N/mm ²	70
Module d'élasticité en traction	53457	N/mm ²	2800
Propriétés thermiques			
T _{max} d'utilisation en continu	52612	T _{max}	-40/+90
Point de fusion	53736	T _{max}	220
Coefficient de dilatation thermique linéaire	52828	10 E5mm/°C	8.5
T _{max} de déformation sous charge 1.85N/mm ²	-	T _{max}	7.5
Conductivité thermique	52612	W/°C . m	0.23
Classement eu feu	UL94	-	V2

Cette étude est conçue dans le but d'optimiser les paramètres de l'opération du tournage (avance, profondeur de passe et vitesse de coupe) de deux grade copolymère et polyamide (POM-C et PA6) en utilisant la méthode de Taguchi de planification des expériences associée à une analyse relationnelle Gris (GRA).

III.2.Procédure expérimentale

La procédure expérimentale consiste à réaliser des passes de chariotage en variant les Conditions de coupe (vitesse de coupe (Vc), Avance (f) et profondeur de passe (ap)) et en mesurant les critères de rugosité (Rugosité totale (Rt), moyenne arithmétique (Ra) et moyenne des hauteurs des irrégularités (Rz)), les efforts de coupe et la température dans la zone de coupe.

En appliquant les règles de construction du plan de Taguchi, citées dans les références [41] et [42], une série d'essais, de 9 expériences suivant la table orthogonale standard L9(3)3, est réalisée sur deux tubes extrudés en PA6 et POM-C de longueur 500 mm chacun. Le premier tube été en PA6 de diamètre 90 mm et le deuxième été en POM-C de diamètre extérieur 90 mm. Dans le but de minimiser les erreurs de mesure, chaque essai est repris 5 fois. Les opérations de tournage ont été faites sur un tour TOSTRENCIN modèle SN40, de puissance de 6.6 kW sur broche. Pour le montage du tube sur le tour, un mandrin en bois, ajusté au diamètre intérieur du tube, est adopté.

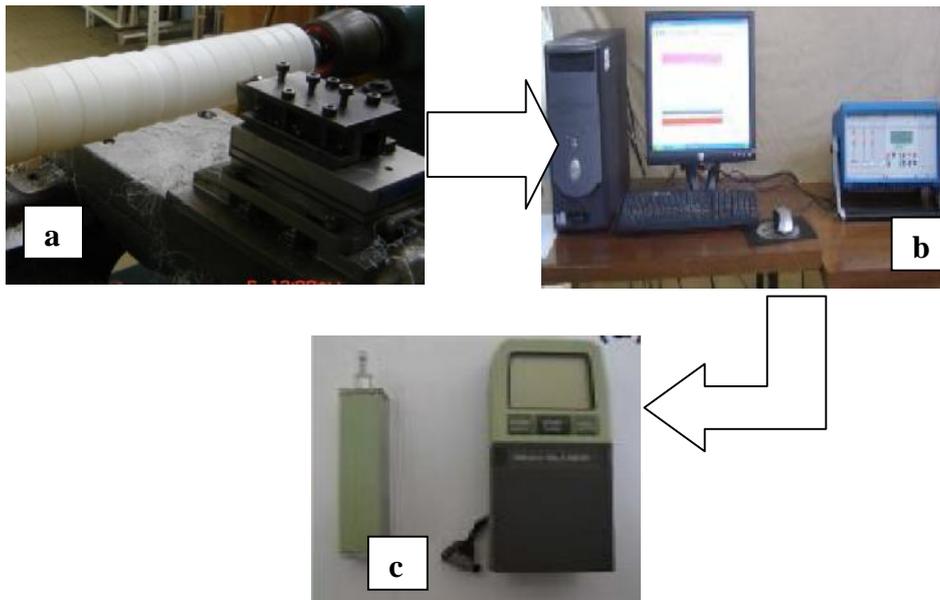


Figure III.3: Equipements utilisés : (a) Dynamomètre piézoélectrique (Kistler 9257B); (b) amplificateur et PC avec software pour l'acquisition des données; (c)Rugosimètre (Surftest 301 Mitutoyo).

La plaquette de coupe utilisée est en carbure de forme carré de désignation GC3015(K10), ayant un rayon du bec $r_\epsilon = 0.8mm$ fournie par Sandvik. Le porte outil est de désignation CSBPR2525M12 qui permet d'avoir une géométrie de la partie active matérialisée par les angles suivants: $\alpha = +5^\circ$; $r = 15^\circ$; $\beta = +6^\circ$. Un rugosimètre Surf test 301de marque Mitutoyo, piloté par un micro-ordinateur, a servi à la représentation graphique et la mesure des critères de rugosités Ra, Rt et Rz pour chaque combinaison des conditions de coupe. Ce dernier est constitué d'un palpeur en diamant, avec un rayon de pointe de $5 \mu m$, se déplaçant linéairement sur la surface mesurée, avec une longueur totale de palpation de 4 mm. La plage de mesure des critères de rugosité est de (0,06 à $45 \mu m$) pour Ra et de (0,4 à $176\mu m$) pour Rt et Rz.

Les efforts de coupe ont été mesurés dans les conditions du laboratoire à l'aide d'une plate-forme KISTLER 9257B avec une gamme de mesure qui varie de -5 à 5KN qui permet d'enregistrer les trois composantes de l'effort de coupe dans les directions X,Y,Z en temps réel. Les températures ont été mesurées à l'aide d'un pyromètre infrarouge (IR Rayner).

III-3. Planification des expériences

Les paramètres de coupe (V_c , f , a_p), sont considérés comme paramètres d'entrée. Les efforts de coupe, et la rugosité de surface représentent les paramètres de sortie. Les essais ont été réalisés suivant la méthode de planification des expériences.

III-3.1. Méthode de planification des expériences

Cette méthode permet d'organiser et d'exécuter les expériences d'une manière optimale afin d'obtenir des modèles mathématiques de simulation du procédé de coupe.

La stratégie de recherche expérimentale consiste à déterminer tout d'abord le nombre d'essais nécessaires. Le nombre d'essais est en fonction des facteurs de base (fonction entrée) et du nombre de niveaux de variation de ces facteurs.

Dans notre étude nous avons considéré l'influence de trois facteurs de base (V_c , f , a_p) sur les diverses fonctions d'optimisation (Rugosité, Efforts de coupe). Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule suivante :

$$N = q^k \quad \text{(III-1)}$$

Où: N : nombre d'essais; q : nombre de niveaux de variations des facteurs de base;
 k : nombre de facteurs de base.

Dans notre cas, nous avons trois facteurs de base ($k=3$) et chaque facteur à trois niveaux de variation (un niveau supérieur (+1), niveau moyenne (0) et un niveau inférieur (-1)) et un facteur à deux niveaux.

Nous avons alors: $N=3^3 \cdot 2=54$. Mais nous allons travailler dans cette étude seulement pour un plan de 18 essais qui représente un plan de Taguchi, car il minimise les essais.

Les essais ont été numérotés de 1 à 18. La matrice de planification donne les différentes combinaisons des facteurs de base qui constituent les différents régimes de coupe.

La matrice de planification, ainsi que la codification des facteurs sont illustrées dans le tableau III-3.

Tableau III-3 : Matrice de planification pour un plan de 18 essais.

Matière	Vc	f	ap
POM-C	200	0,08	0,8
POM-C	200	0,14	1,6
POM-C	200	0,2	2,4
POM-C	300	0,08	0,8
POM-C	300	0,14	1,6
POM-C	300	0,2	2,4
POM-C	400	0,08	1,6
POM-C	400	0,14	2,4
POM-C	400	0,2	0,8
PA-6	200	0,08	2,4
PA-6	200	0,14	0,8
PA-6	200	0,2	1,6
PA-6	300	0,08	1,6
PA-6	300	0,14	2,4
PA-6	300	0,2	0,8
PA-6	400	0,08	2,4
PA-6	400	0,14	0,8
PA-6	400	0,2	1,6

IV.1.Introduction

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude expérimentale de l'influence de certains facteurs tels que la vitesse de coupe (V_c), l'avance par tour (f) ainsi que la profondeur de passe (a_p), susceptibles d'influencer certains paramètres technologiques, à savoir les composantes de l'effort de coupe et les critères de la rugosité de surface. Des modèles mathématiques sont déduits, décrivant la relation qualitative et quantitative entre les paramètres de coupe considérés et les paramètres technologiques étudiés.

Pour cela nous avons réalisé l'usinage de deux polymères semi-cristallins ; le polyacétal ou polyoxyméthylène de type C (POM-C) et le polyamide (PA6), avec un outil en carbure revêtu (voir chapitre III paragraphe 2), suivant un plan d'expérience de Taguchi du type L_{18} .

IV.2. Influence des paramètres du régime de coupe sur les critères de rugosité

Les valeurs des paramètres de réponse considérés sont présentées dans le tableau IV.1. Ces résultats sont obtenus suivant le plan d'expérience de Taguchi à 18 essais avec 3 facteurs à 3 niveaux et 1 facteur à 2 niveaux.

Tableau IV.1.Résultats expérimentaux des critères de rugosité

N	Matière	V_c (m/min)	f (mm/tr)	a_p (mm)	R_a μ m	R_t μ m	R_z μ m
1	POM-C	200	0.08	0.8	0.61	5.49	4.51
2	POM-C	200	0.14	1.6	0.99	8.22	6.95
3	POM-C	200	0.2	2.4	1.59	8.33	7.68
4	POM-C	300	0.08	0.8	0.74	5.78	5.04
5	POM-C	300	0.14	1.6	1	6.68	5.73
6	POM-C	300	0.2	2.4	1.66	8.76	7.98
7	POM-C	400	0.08	0.8	0.83	4.4	5.78
8	POM-C	400	0.14	1.6	1.08	7.59	6.4
9	POM-C	400	0.2	2.4	1.58	8.92	7.67
10	PA-6	200	0.08	0.8	2.18	20.59	16.29
11	PA-6	200	0.14	1.6	2.47	13.42	15.3
12	PA-6	200	0.2	2.4	2.13	13.82	12.54
13	PA-6	300	0.08	0.8	1.84	15.9	13.44
14	PA-6	300	0.14	1.6	1.82	12.1	10.9
15	PA-6	300	0.2	2.4	3.55	19.51	17.3
16	PA-6	400	0.08	0.8	1.74	11.03	10.58
17	PA-6	400	0.14	1.6	2.99	15.43	14.57
18	PA-6	400	0.2	2.4	3.47	18.99	20.43

IV.2.1.Analyse de la variance (ANOVA) pour les rugosités R_a , R_t et R_z :

Les **tableaux IV.2 à IV.4** regroupent les résultats d'analyse de la variance, respectivement, pour R_a , R_t et R_z . Cette analyse est réalisée pour les valeurs de P inférieure à 0.05 c.-à-d. à 95% de confiance (Voir tableau de Fisher en annexe).

Le **tableau IV.2** résume les résultats d'analyse de la variance ANOVA pour la rugosité R_a . Le facteur le plus important qui affecte la rugosité de surface R_a est le matériau usiné avec une contribution de 60.88 % suivi par l'avance par tour (f) avec 22.72 % de contribution. Par contre la profondeur de passe (ap) et la vitesse de coupe (V_c) n'ont pas d'effet significatif sur le critère R_a .

Tableau IV.2. Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface R_a

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Cont.%
Régression	7	11.9863	11.9863	1.71233	12.2725	0.000346	89.5729958
Matière	1	8.1473	6.1262	6.12616	43.9069	0.000059	60.8843487
V_c	1	0.2465	0.0023	0.00230	0.0165	0.900328	1.84208166
f	1	3.0401	0.0011	0.00106	0.0076	0.932256	22.718509
ap	1	0.2914	0.0054	0.00541	0.0388	0.847815	2.17761703
V_c*f	1	0.1616	0.1375	0.13748	0.9853	0.344295	1.20762839
V_c*ap	1	0.0857	0.0939	0.09387	0.6728	0.431202	0.64043164
$f*ap$	1	0.0136	0.0136	0.01356	0.0972	0.761614	0.10163209
Error	10	1.3953	1.3953	0.13953			10.4270042
Total	17	13.3816					100

Sur le **tableau IV.3** sont représentés les résultats de l'analyse de la variance pour le critère de rugosité R_t . Il est à conclure que le matériau usiné affecte le critère R_t avec un pourcentage de contribution de 74.14% suivi par l'avance (f) avec un pourcentage de contribution de 4.43%. La profondeur de passe (ap) et la vitesse de coupe (V_c) n'ont pas d'effet significatif sur R_t .

Tableau IV.3. Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface R_t

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Cont.%
Régression	7	399.050	399.050	57.007	13.9715	0.000198	90.723698
Matière	1	326.146	207.602	207.602	50.8797	0.000032	74.1490319
V_c	1	1.027	4.051	4.051	0.9927	0.342577	0.23348763
f	1	19.102	5.159	5.159	1.2643	0.287098	4.3428244
ap	1	0.002	17.237	17.237	4.2245	0.066904	0.0004547
V_c*f	1	36.974	27.401	27.401	6.7156	0.026883	8.40600929
V_c*ap	1	13.221	11.351	11.351	2.7818	0.126301	3.00578376
$f*ap$	1	2.579	2.579	2.579	0.6321	0.445034	0.58633358
Error	10	40.802	40.802	4.080			9.27630203
Total	17	439.852					100

D'après les résultats du **tableau IV.4** on peut voir que les matériaux usinés est le facteur le plus prépondérant qui affecte R_z . Sa contribution est de 76.52%., suivi par L'avance avec un pourcentage de contribution de 6.83%. la vitesse de coupe (V_c) et profondeur de passe (ap) n'a pas d'influence significative.

Tableau IV.4. Analyse de la variance (ANOVA) pour la rugosité de surface R_z

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Cont.%
Régression	7	348.912	348.912	49.845	11.2059	0.000508	88.6932119
Matière	1	301.024	217.916	217.916	48.9915	0.000037	76.5201123
V_c	1	0.389	3.291	3.291	0.7398	0.409858	0.09888356
f	1	26.880	4.251	4.251	0.9558	0.351307	6.83287916
ap	1	1.733	0.768	0.768	0.1726	0.686598	0.44052751
V_c*f	1	17.240	15.384	15.384	3.4587	0.092552	4.3823972
V_c*ap	1	1.614	1.646	1.646	0.3700	0.556574	0.41027779
$f*ap$	1	0.032	0.032	0.032	0.0072	0.934229	0.00813438
Error	10	44.480	44.480	4.448			11.3067881
Total	17	393.392					100

Avec l'augmentation de la section du copeau, l'outil de coupe doit enlever plus de volume de matière, ce qui augmente la quantité de chaleur générée. La déformation plastique de la pièce usinée est généralement proportionnelle à la quantité de chaleur produite et favorise la dégradation de la rugosité de surface [14,29]. En raison de l'augmentation de la longueur de contact entre l'outil et la pièce à usiner, la profondeur de passe (ap) a un effet beaucoup plus faible par rapport à celui de la vitesse d'avance (f). Basé sur les résultats obtenus, le matériau usiné est le facteur le plus influent sur l'évolution de la rugosité de surface. Ces résultats sont en bon accord avec les travaux des chercheurs [16, 29, 32,33].

IV.2.2. Graphiques des effets principaux

Les graphiques des effets principaux sont présentés dans les figures IV.1 à IV.3. À partir de ces figures, il apparaît clairement que l'avance par tour (f) et le nature du matériau usiné affectent fortement les trois critères de rugosité Ra , Rt et Rz . La vitesse de coupe a un faible effet sur l'évolution des rugosités Ra , Rt et Rz . En outre, aucune variation significative n'a été observée sur les trois critères de rugosité en fonction de la variation de la profondeur de passe (ap). Cela a été confirmé par les résultats de l'analyse statistique ANOVA.

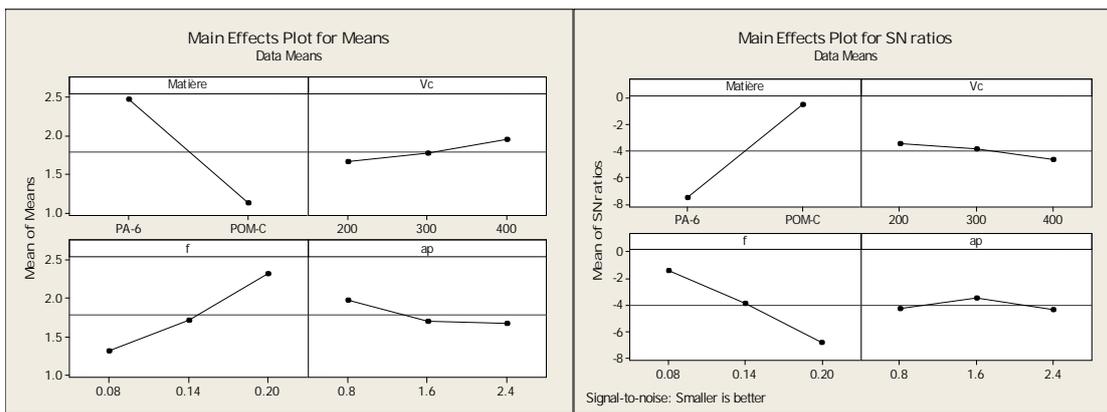


Figure IV.1. Graphiques des effets principaux pour Ra

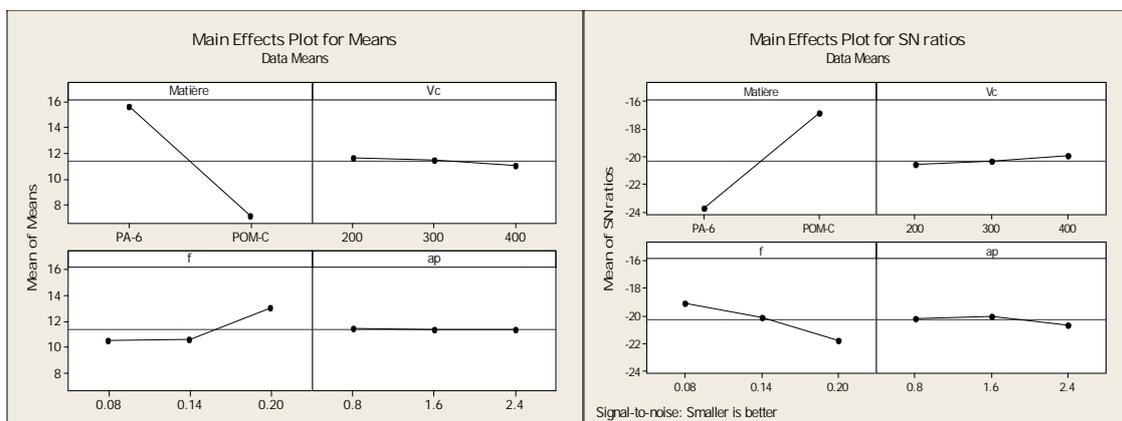


Figure IV.2. Graphiques des effets principaux pour Rt

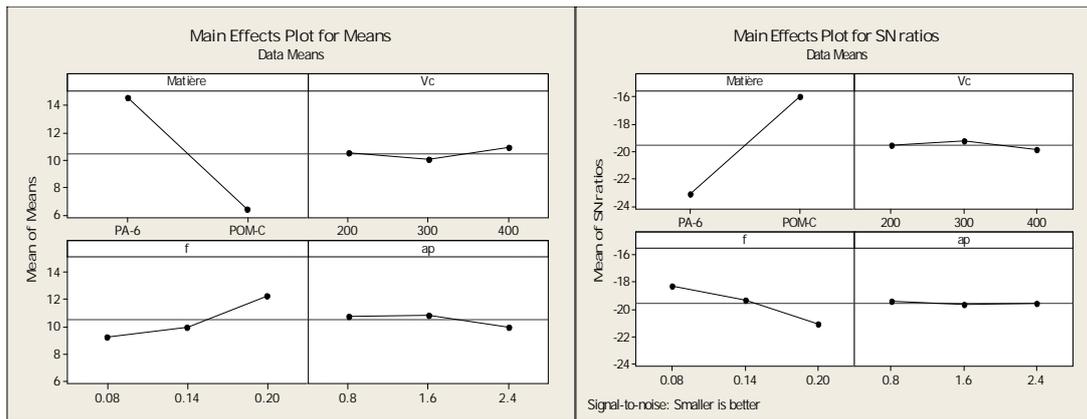


Figure IV.3. Graphiques des effets principaux pour R_z

Les diagrammes des interactions des trois critères de rugosité pour le POM-C et PA6 sont représentés sur les figures IV.4, IV.5 et IV.6. Les diagrammes des interactions nous permettent de voir l'impact de la variation d'un facteur sur les autres facteurs.

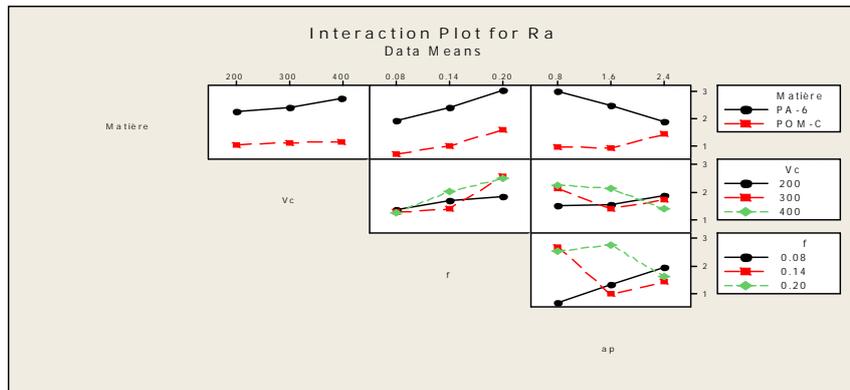


Figure IV.4. Diagramme des Interactions pour R_a

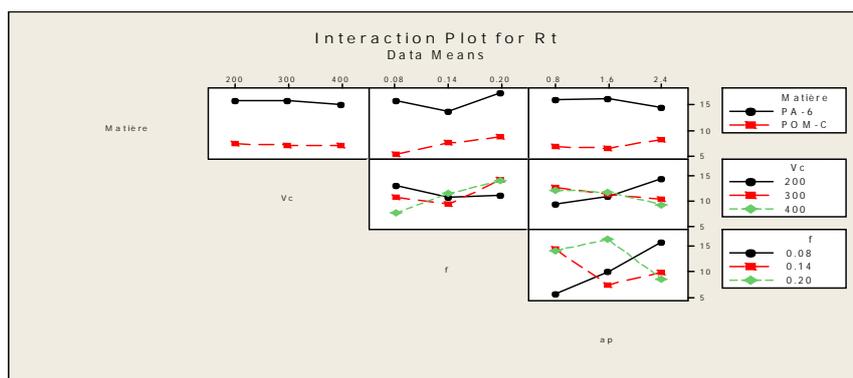


Figure IV.5. Diagramme des Interactions pour R_t

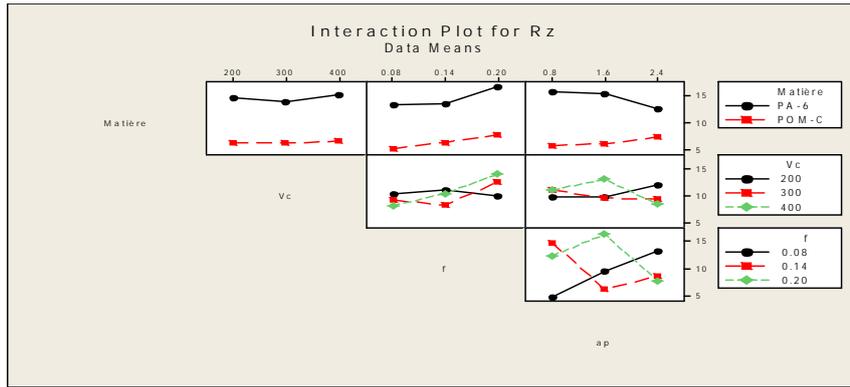


Figure IV.6. Diagramme des Interactions pour R_z

Les diagrammes des figures IV.4, IV.5 et IV.6 montrent qu'il y a une grande interaction entre les trois paramètres du régime de coupe (ap , f et V_c) pour les trois critères de rugosité (R_a , R_t et R_z). Par contre il n'y a aucune interaction entre ces paramètres et le matériau usiné.

IV.2.3. Analyse de régression pour les trois critères de rugosité R_a , R_t et R_z en fonction de V_c , f et ap

La relation entre les facteurs d'entrées (paramètres du régime de coupe) et les facteurs de sorties (critères de rugosité) a été modélisée par des équations de régression avec des interactions. Les équations de régressions obtenues sont les suivantes :

Les modèles de la rugosité moyenne arithmétique (R_a), pour les deux matériaux usinés, sont donnés par les équations (IV.1) et (IV.2) avec un coefficient de corrélation $R^2 = 89.57\%$.

$$\text{PA-6 : } R_a = 1.67831 + 0.00060718 V_c - 0.853407 f + 0.132609 ap + 0.023413 V_c * f - 0.00145097 V_c * ap + 1.08422 f * ap \quad (\text{IV.1})$$

$$\text{POM-C : } R_a = 0.298058 + 0.00060718 V_c - 0.853407 f + 0.132609 ap + 0.023413 V_c * f - 0.00145097 V_c * ap + 1.08422 f * ap \quad (\text{IV.2})$$

Les modèles de la hauteur maximale du profil (R_t), pour les deux matériaux usinés, sont donnés par les équations (IV.3) et (IV.4) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 90.72\%$).

$$\text{PA-6 : } R_t = 16.5288 - 0.025466 V_c - 59.5291 f + 7.48398 ap + 0.330538 V_c * f - 0.0159553 V_c * ap - 14.9518 f * ap \quad (\text{IV.3})$$

$$\text{POM-C : } R_t = 8.4939 - 0.025466 V_c - 59.5291 f + 7.48398 ap + 0.330538 V_c * f - 0.0159553 V_c * ap - 14.9518 f * ap \quad (\text{IV.4})$$

Les modèles du critère de rugosité (R_z), pour les deux matériaux usinés, sont donnés par les équations (IV.5) et (IV.6) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 88.69\%$).

$$\text{PA-6 : } R_z = 18.6877 - 0.022954 V_c - 54.0408 f + 1.57937 ap + 0.247672 V_c * f - 0.00607539 V_c * ap + 1.66162 f * ap \quad (\text{IV.5})$$

$$\text{POM-C : } R_z = 10.4557 - 0.022954 V_c - 54.0408 f + 1.57937 a_p + 0.247672 V_c * f - 0.00607539 V_c * a_p + 1.66162 f * a_p \quad (\text{IV.6})$$

Pour étudier l'influence des paramètres du régime de coupe (la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de passe) sur les critères de rugosité R_a , R_t et R_z , les surfaces de réponse (3D) sont tracées dans les figures IV.7 à IV.9. Les résultats d'ANOVA montrent que le matériau usiné et la vitesse d'avance sont les facteurs les plus influents sur l'évolution de la rugosité de surface. On peut observer aussi que, les rugosités de surface (R_a , R_t et R_z) augmentent proportionnellement à l'augmentation de la vitesse d'avance. Cependant, la vitesse de coupe a une faible influence sur les trois critères de rugosité de la surface. Il convient de noter que le POM-C présente un meilleur état de surface par rapport au PA-6.

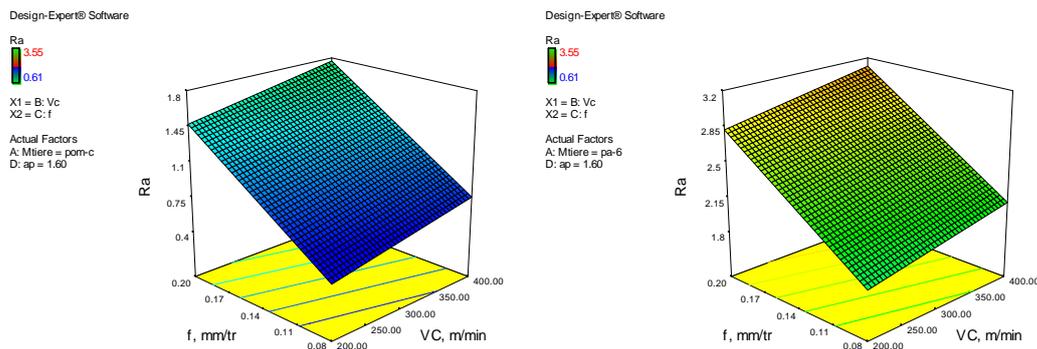


Figure IV.7: Les surfaces de réponses 3D de R_a en fonction de V_c et f

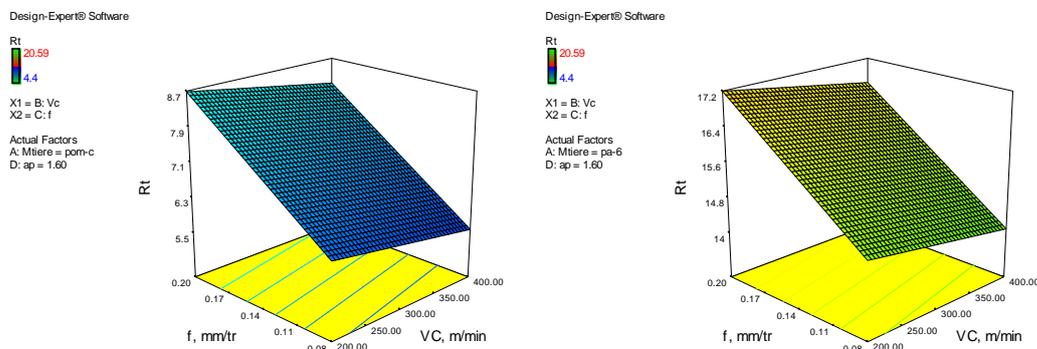


Figure IV.8: Les surfaces de réponses 3D de R_t en fonction de V_c et f

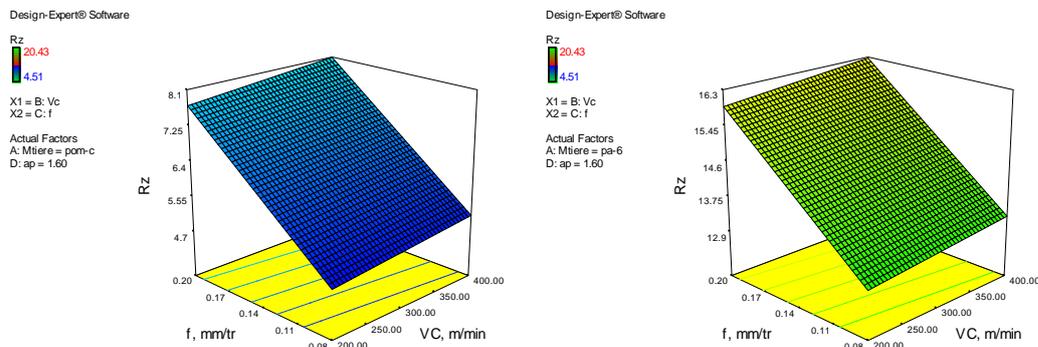


Figure IV.9: Les surfaces de réponses 3D de R_z en fonction de V_c et f

IV.3. Influence des paramètres du régime de coupe sur les composantes de l'effort de coupe

Le *tableau IV.5* présente les résultats expérimentaux correspondants aux trois composantes de l'effort de coupe F_x , F_y et F_z , lors de l'usinage de deux polymères semi-cristallins (POM-C et PA6) par un outil en carbure. Les résultats représentés dans le tableau sont une moyenne de 5 mesures.

Tableau IV.5. Résultats expérimentaux des efforts de coupe

Matière	Vc(m/min)	F (mm/tr)	Ap(mm)	$F_x(N)$	$F_y(N)$	$F_z(N)$
POM-C	200	0.08	0.8	26.12	37.99	11.59
POM-C	200	0.14	1.6	44.98	53.14	46.75
POM-C	200	0.2	2.4	74.02	80.33	78.8
POM-C	300	0.08	0.8	21.99	30.52	21.98
POM-C	300	0.14	1.6	50.19	61.26	36.83
POM-C	300	0.2	2.4	84.93	72.61	87.22
POM-C	400	0.08	0.8	46.55	55.86	37.37
POM-C	400	0.14	1.6	76.5	84.61	57.7
POM-C	400	0.2	2.4	14.19	36.49	27.89
PA-6	200	0.08	0.8	29.79	30.43	55.29
PA-6	200	0.14	1.6	12.71	6.7	29.64
PA-6	200	0.2	2.4	32.07	40.84	74.95
PA-6	300	0.08	0.8	28.37	29.58	44.7
PA-6	300	0.14	1.6	50.17	46.05	87.21
PA-6	300	0.2	2.4	7.97	6.92	25.96
PA-6	400	0.08	0.8	46.1	42.48	63.67
PA-6	400	0.14	1.6	2.11	1.03	31.17
PA-6	400	0.2	2.4	31.49	22.63	74.09

IV.3.1. Analyse de la variance (ANOVA) pour les efforts de coupe F_x , F_y et F_z

Le *tableau IV.6* expose les résultats de l'analyse de la variance ANOVA pour déterminer l'influence des différents facteurs sur l'effort axial (F_x). La profondeur de passe et le facteur qui influe énormément sur l'effort axial avec une contribution de 67.04% suivie par le matériau usiné avec 23.09% alors que l'avance par tour (1.83%), et la vitesse de coupe (0,006%) sont moins influente sur l'effort axial (F_x).

L'analyse des résultats montre que la profondeur de passe a une influence statistiquement significative avec une contribution de 47.18%. La contribution du matériau usiné est très importante aussi avec un taux de 45.90%. Par contre l'avance et la vitesse de coupe ne sont pas très influentes sur F_y .

Tableau IV.6. Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort axial F_x

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Cont %
Régression	7	9388.47	9388.47	1341.21	123.572	0.000000	98.857114
Matière	1	2193.21	1016.19	1016.19	93.627	0.000002	23.0936895
Vc	1	0.63	21.10	21.10	1.944	0.193455	0.00663367
f	1	174.42	0.53	0.53	0.049	0.828914	1.83657804
ap	1	6367.33	56.36	56.36	5.193	0.045881	67.045628
Vc*f	1	108.49	31.85	31.85	2.935	0.117458	1.14235954
Vc*ap	1	336.07	258.58	258.58	23.824	0.000641	3.5386927
f*ap	1	208.32	208.32	208.32	19.194	0.001375	2.19353249
Error	10	108.54	108.54	10.85			1.14288602
Total	17	9497.01					100

Le **tableau IV.7** regroupe les résultats d'analyse de la variance pour l'effort radial (F_y).

Tableau IV.7. Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort radial F_y

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Cont.%
Regression	7	9570.28	9570.28	1367.18	40.4229	0.000002	96.5865671
Matière	1	4548.99	3241.26	3241.26	95.8328	0.000002	45.9099763
Vc	1	3.34	0.81	0.81	0.0241	0.879780	0.03370843
f	1	90.53	97.25	97.25	2.8753	0.120803	0.91365999
ap	1	4675.22	24.40	24.40	0.7215	0.415517	47.183933
Vc*f	1	147.98	110.44	110.44	3.2654	0.100886	1.49346521
Vc*ap	1	104.19	101.62	101.62	3.0045	0.113699	1.05152142
f*ap	1	0.02	0.02	0.02	0.0007	0.979277	0.00020185
Error	10	338.22	338.22	33.82			3.41343291
Total	17	9908.50					100

Lorsque l'on considère l'effort tangentiel (F_z), les résultats du (**tableau IV.8**) indiquent que la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus important affectant l'effort tangentiel (F_z). Sa contribution est de 69.29%. Le second facteur qui a une influence significative sur l'effort tangentiel (F_z) est l'avance par tour 15.76%.

Tableau IV.8. Analyse de la variance (ANOVA) pour l'effort tangentiel F_z

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Cont.%
Regression	7	9011.50	9011.50	1287.36	24.2948	0.000017	94.4464067
Matière	1	360.46	784.56	784.56	14.8061	0.003223	3.77785627
Vc	1	2.19	25.37	25.37	0.4787	0.504740	0.02295263
f	1	1503.26	16.35	16.35	0.3086	0.590765	15.7551468
ap	1	6611.03	4.81	4.81	0.0908	0.769327	69.287913
Vc*f	1	33.20	5.77	5.77	0.1089	0.748216	0.34795769
Vc*ap	1	0.11	8.25	8.25	0.1556	0.701514	0.00115287
f*ap	1	501.24	501.24	501.24	9.4593	0.011728	5.25332263
Error	10	529.89	529.89	52.99			5.55359334
Total	17	9541.39					100

On observe que chaque hausse des composantes des efforts de coupe est le résultat de l'augmentation de la profondeur de passe (ap) et/ou l'avance par tour (f). Ceci est en bon accord avec le tournage du POM-C et du PA6 [32,33]. Quand on augmente l'avance par tour (f), la section du copeau cisailé augmente aussi, par conséquent, la force nécessaire pour l'enlèvement de matière augmente. En outre, l'augmentation de la profondeur de passe conduit à un copeau très épais (c.- à- d. un plus grand volume de matière déformé) qui nécessite de plus grands efforts

de coupe. Il est à noter que lors de l'augmentation de la profondeur de passe (ap), la coupe se fait à l'extérieur de la limite de rayon de bec de l'outil et la pièce exerce une résistance à la pénétration de l'outil dans les deux directions axiales et tangentielles. Cette situation implique que la longueur de contact entre l'outil et la pièce est devenue suffisamment élevée et l'outil ne coupe plus avec son rayon de bec comme il se doit.

IV.3.2. Graphiques des effets principaux

Les graphiques des effets principaux et des interactions sont représentés dans les figures IV.8 à IV.10. On peut conclure que la profondeur de passe (ap) affecte fortement les composantes des efforts de coupe (F_x , F_y et F_z), suivie par le matériau usiné et la vitesse d'avance (f). Comme prévu, la profondeur de passe (ap) a un effet très important alors que la vitesse de coupe a un faible effet sur les composantes des efforts de coupe.

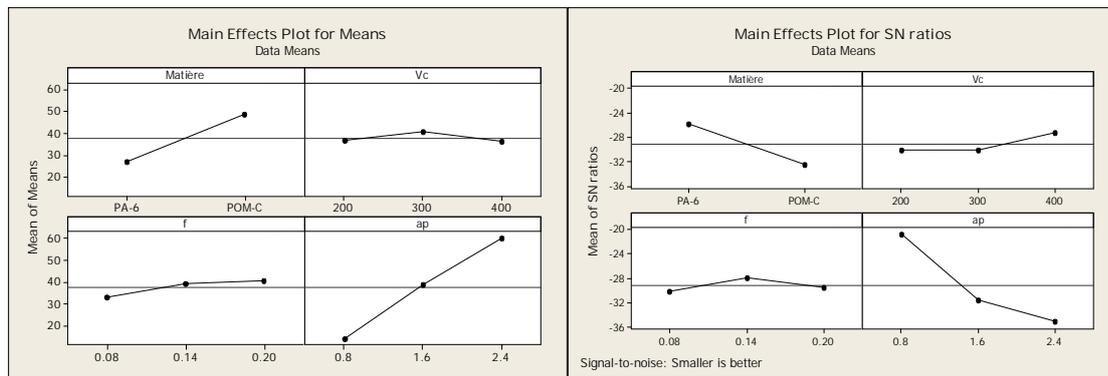


Figure IV.8. Graphiques des effets principaux pour F_x

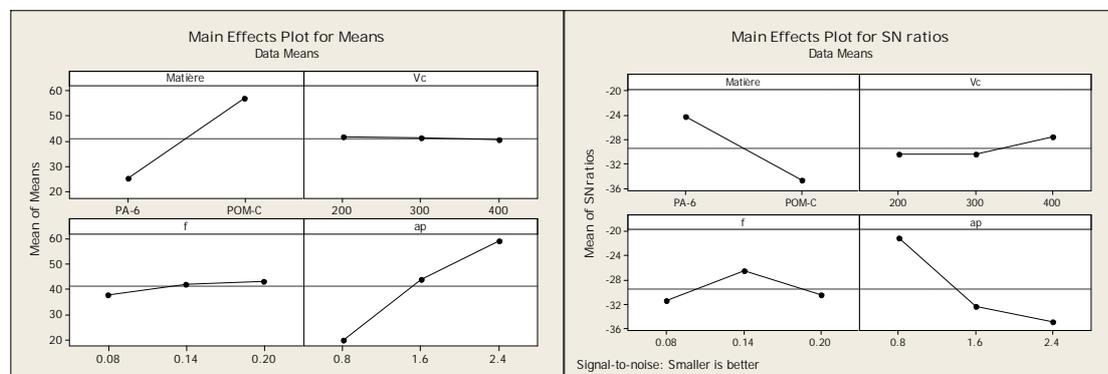


Figure IV.9. Graphiques des effets principaux pour F_y

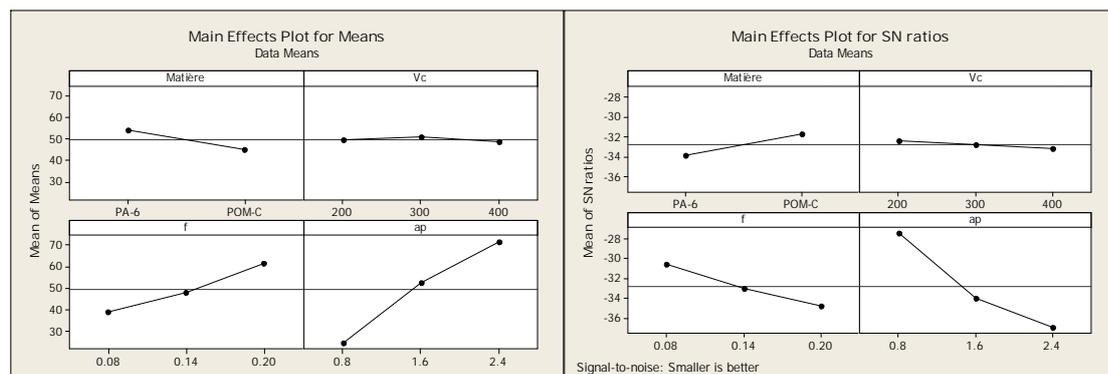


Figure IV.10. Graphiques des effets principaux pour F_z

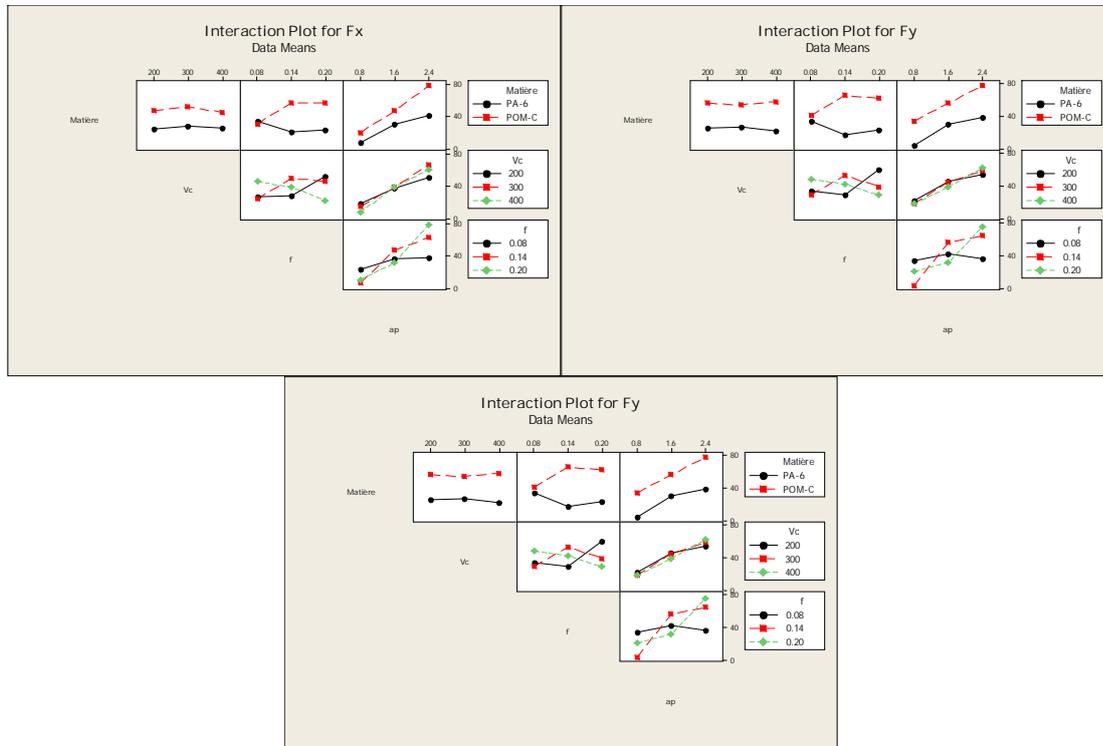


Figure IV.11. Diagramme des Interactions F_x , F_y et F_z

Les diagrammes des interactions de la figure IV.11 montrent qu'il y a très peu d'interactions entre V_c et a_p pour les trois composantes de l'effort de coupe. Par contre il y a plus d'interactions entre V_c et f et a_p et f . On peut aussi conclure qu'il n'y a aucune interaction entre le matériau usiné et les trois paramètres du régime de coupe.

IV.3.3. Analyse de régression des composantes de l'effort de coupe F_x , F_y et F_z en fonction de V_c , f et a_p

L'analyse de régression de F_x en fonction de V_c , f et a_p nous a permis d'obtenir les équations du modèle avec interaction pour les deux matériaux usinés (IV.7 et IV.8) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 98.86\%$) :

$$\text{PA-6 : } F_x = 18.988 - 0.0581192 V_c - 19.1538 f - 13.5328 a_p - 0.356386 V_c * f + 0.076154 V_c * a_p + 134.372 f * a_p \quad (\text{IV.7})$$

$$\text{POM-C : } F_x = 36.7647 - 0.0581192 V_c - 19.1538 f - 13.5328 a_p - 0.356386 V_c * f + 0.076154 V_c * a_p + 134.372 f * a_p \quad (\text{IV.8})$$

Les modèles de l'effort radial (F_y) sont donnés par les équations (IV.9) et (VI.10) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 96.59\%$).

$$\text{PA-6 : } F_y = -24.0175 + 0.011418 V_c + 258.464 f + 8.9048 a_p - 0.6636 V_c * f +$$

$$0.04774 V_c * a_p + 1.44194 f * a_p \quad (IV.9)$$

$$\begin{aligned} \text{POM-C: } F_y = & 7.73078 + 0.011418 V_c + 258.464 f + 8.9048 a_p - 0.6636 V_c * f + \\ & 0.04774 V_c * a_p + 1.44194 f * a_p \quad (IV.10) \end{aligned}$$

Les modèles de l'effort tangentielle (F_z) sont donnés par les équations (IV.11) et (VI.12) avec un coefficient de corrélation ($R^2 = 94.45\%$).

$$\begin{aligned} \text{PA-6 : } F_z = & 13.011 + 0.0637307 V_c - 105.981 f + 3.95413 a_p - 0.15168 V_c * f - \\ & 0.013599 V_c * a_p + 208.434 f * a_p \quad (IV.11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{POM-C : } F_z = & -2.60891 + 0.0637307 V_c - 105.981 f + 3.95413 a_p - 0.15168 V_c * f - \\ & - 0.013599 V_c * a_p + 208.434 f * a_p \quad (IV.12) \end{aligned}$$

Les surfaces de réponses 3D représentées sur les *figures IV.12, IV.13 et IV.14* montrent la variation des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe (V_c), l'avance (f) et la profondeur de passe (a_p). Comme observé sur les figures, la vitesse de coupe a un effet négligeable sur les trois composantes de l'effort de coupe. Des résultats similaires ont été rapportés par l'usinage de matière POM-C et PA6, avec un outil en carbure revêtu [32,33]. Alors que, pour une avance (f) donnée, les composantes des efforts de coupe augmentent fortement avec l'augmentation de la profondeur de passe. Pour les petites avances, les composantes de l'effort de coupe sont très sensibles à la profondeur de passe et pour toute augmentation de cette dernière ; les composantes de l'effort de coupe augmentent considérablement. En conséquence, il est clair que la profondeur de passe est le facteur le plus influent sur les composantes des efforts de coupe. En d'autres termes, l'effort de coupe peut être minimisé considérablement en utilisant des valeurs plus faibles de la profondeur de passe, tandis que les valeurs les plus élevées sont obtenues aux valeurs maximales des vitesses d'avance et profondeurs de passe.

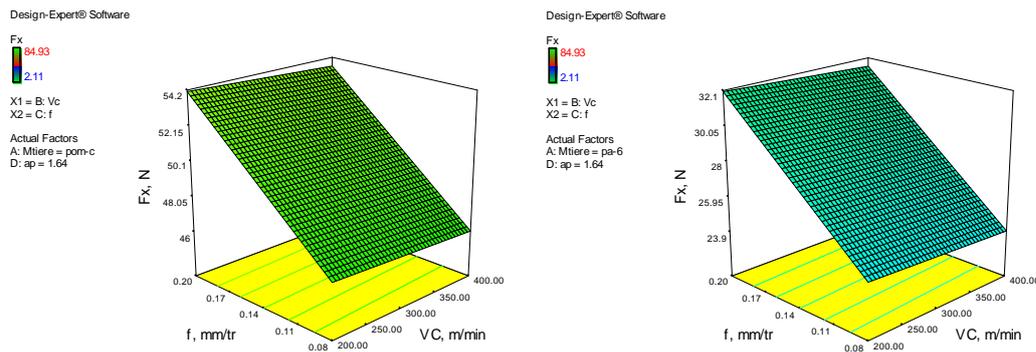


Figure IV.11: Les surfaces de réponses 3D Les effort de coupe en fonction de V_c et f

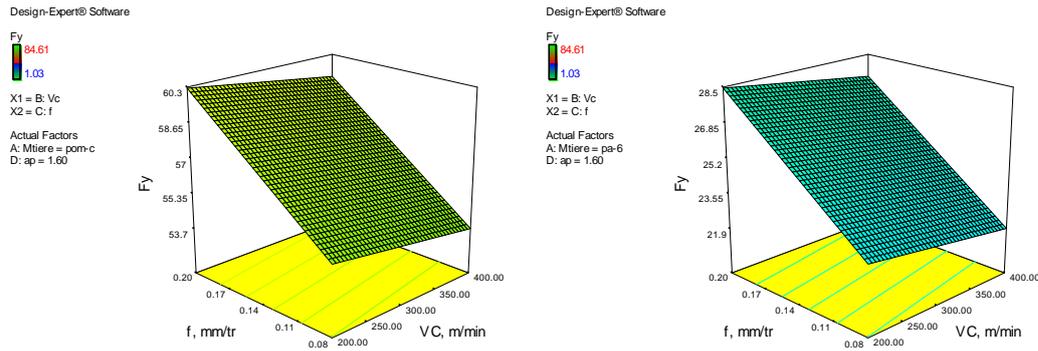


Figure IV.12: Les surfaces de réponses3D Les effort de coupe en fonction de Vc et f

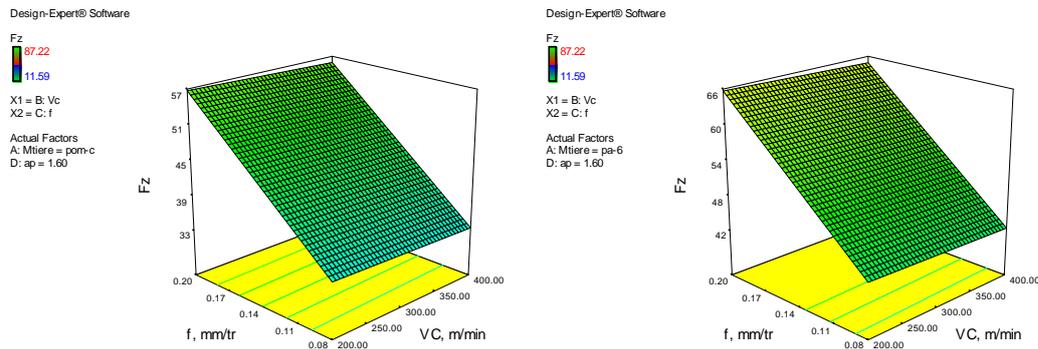


Figure IV.13: Les surfaces de réponses3D Les effort de coupe en fonction de Vc et f

IV.3. Conclusion

D'après les résultats de ce chapitre nous pouvons conclure que ;

- Le facteur le plus important qui affecte les deux critères de rugosité de surface Ra et Rt est le matériau usiné suivi par l'avance par tour (f). Par contre la profondeur de passe (ap) et la vitesse de coupe (Vc) n'ont pas d'effet significatif.
- La profondeur de passe est le facteur le plus prépondérant qui affecte le critère Rz suivi par les matériaux usinés et l'avance. La vitesse de coupe (Vc) n'a pas d'influence significative.
- Les diagrammes des interactions montrent qu'il y a une grande interaction entre les trois paramètres du régime de coupe (ap , f et Vc) pour les trois critères de rugosité (Ra , Rt et Rz). Par contre il n'y a aucune interaction entre ces paramètres et le matériau usiné.
- Il convient de noter que le POM-C présente un meilleur état de surface par rapport au PA-6.
- Les modèles des critères de rugosité, pour les deux matériaux usinés, sont obtenus avec des coefficients de corrélation supérieurs à 85%.
- Les résultats de l'analyse de la variance ANOVA pour Fx et Fy montrent que la profondeur de passe et le facteur qui influe le plus suivie parle matériau usiné alors que l'avance par tour et la vitesse de coupe sont moins influentes.

- Par contre la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus important affectant l'effort tangentiel (F_z) suivie par l'avance par tour.
- Les diagrammes des interactions montrent qu'il y a très peu d'interactions entre V_c et ap pour les trois composantes de l'effort de coupe. Par contre il y a plus d'interactions entre « V_c et f » et « ap et f ». On peut aussi conclure qu'il n'y a aucune interaction entre le matériau usiné et les trois paramètres du régime de coupe.
- L'analyse de régression des trois composantes des efforts de coupe en fonction de V_c, f et ap nous a permis d'obtenir les équations des modèles avec des coefficients de corrélation supérieurs à 94%.
- Les surfaces de réponses 3D montrent que la vitesse de coupe a un effet négligeable sur les trois composantes de l'effort de coupe. Alors que, pour une avance (f) donnée, les composantes des efforts de coupe augmentent fortement avec l'augmentation de la profondeur de passe. Pour les petites avances, les composantes de l'effort de coupe sont très sensibles à la profondeur de passe et pour toute augmentation de cette dernière ; les composantes de l'effort de coupe augmentent considérablement.
- En conséquence, il est clair que la profondeur de passe est le facteur le plus influent sur les composantes des efforts de coupe. En d'autres termes, l'effort de coupe peut être minimisé considérablement en utilisant des valeurs plus faibles de la profondeur de passe.
- Nous pouvons aussi conclure qu'il est très difficile de choisir un régime optimal qui minimise à la fois les trois critères de rugosité et les trois composantes de l'effort de coupe d'où la nécessité de procéder à une étude d'optimisation.

V.1. Introduction

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

Deux types d'optimisation ont été exploités dans ce chapitre :

- Optimisation mono-objectif : En utilisant la méthode de Taguchi ;
- Optimisation multi-objectif : En utilisant l'analyse relationnelle grise (Grey).

V.2. Optimisation mono-objectif

V.2.1. Méthode de Taguchi

Le docteur Genichi Taguchi a travaillé dans le domaine de la qualité, et a notamment mis au point une méthode nommée *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 standards, 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.

V.2.2. La démarche de la méthode de Taguchi

La démarche de Taguchi se présente en six étapes [43] :

- **Etape 1** : décrire le problème à résoudre en essayant de quantifier l'objectif à atteindre.
- **Etape 2** : 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.

➤ **Etape 4** : réaliser les essais en reproduisant, sur le produit ou le processus, chaque combinaison du plan et en consignnant 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.)

V.2.3. 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. La faible rugosité de surface et 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 les calcul. 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 [14] :

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

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

(V.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*) :

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

(V.2)

Dans le tableau V.1 sont représentés les résultats expérimentaux des ratios Signal/ Bruit (S/N) pour les paramètres de sorties du processus de coupe Ra, Rz, Rt, Fx, Fy, Fz respectivement.

Tableau V.1. Résultats expérimentaux des ratios Signal/Bruit (S/N) pour les paramètres Ra, Rz, Rt et Fx, Fy, Fz.

Matière	Vc	f	Ap	SN Ra	SN Rt	SN Rz	SN Fx	SN Fy	SN Fz
POM-C	200	0.08	0.8	-28.34	-31.59	-21.28	4.29	-14.79	-13.08
POM-C	200	0.14	1.6	-33.06	-34.51	-33.40	0.09	-18.30	-16.84
POM-C	200	0.2	2.4	-37.39	-38.10	-37.93	-4.03	-18.41	-17.71
POM-C	300	0.08	0.8	-26.84	-29.69	-26.84	2.62	-15.24	-14.05
POM-C	300	0.14	1.6	-34.01	-35.74	-31.32	0.00	-16.50	-15.16
POM-C	300	0.2	2.4	-38.58	-37.22	-38.81	-4.40	-18.85	-18.04
POM-C	400	0.08	0.8	-33.36	-34.94	-31.45	1.62	-12.87	-15.24
POM-C	400	0.14	1.6	-37.67	-38.55	-35.22	-0.67	-17.60	-16.12
POM-C	400	0.2	2.4	-23.04	-31.24	-28.91	-3.97	-19.01	-17.70
PA-6	200	0.08	0.8	-29.48	-29.67	-34.85	-6.77	-26.27	-24.24
PA-6	200	0.14	1.6	-22.08	-16.52	-29.44	-7.85	-22.56	-23.69
PA-6	200	0.2	2.4	-30.12	-32.22	-37.50	-6.57	-22.81	-21.97
PA-6	300	0.08	0.8	-29.06	-29.42	-33.01	-5.30	-24.03	-22.57
PA-6	300	0.14	1.6	-34.01	-33.26	-38.81	-5.20	-21.66	-20.75
PA-6	300	0.2	2.4	-18.03	-16.80	-28.29	-11.00	-25.81	-24.76
PA-6	400	0.08	0.8	-33.27	-32.56	-36.08	-4.81	-20.85	-20.49

PA-6	400	0.14	1.6	-6.49	-0.26	-29.87	-9.51	-23.77	-23.27
PA-6	400	0.2	2.4	-29.96	-27.09	-37.40	-10.81	-25.57	-26.21

V.3.2.4. Analyse des effets moyens des niveaux des facteurs

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

a) Analyse des effets principaux sur (Ra)

Du **tableau V.2**, il apparaît que les paramètres d'usinage (matériau, Vc, f et ap) présentent des effets différents sur la rugosité surface (Ra). La plus importante influence correspond à celle du matériau avec un effet de 7.0408, suivie de celle de l'avance avec un effet de 5.4055. Les plus faibles influences sont celles de la vitesse de coupe (Vc) et de la profondeur de passe avec des effets de 1.2194 et 0.8192 respectivement.

Tableau V.2 : Moyenne des ratios S/B du critère Ra pour chaque niveau des facteurs.

Level	Matière	Vc	F	ap
1	-7.5360	-3.4730	-1.3915	-4.2394
2	-0.4952	-3.8815	-3.8583	-3.4941
3		-4.6924	-6.7970	-4.3134
<i>Delta</i>	<i>7.0408</i>	<i>1.2194</i>	<i>5.4055</i>	<i>0.8192</i>
Rank	1	3	2	4

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la valeur la plus élevée du Signal/ Bruit (S/N) représente la meilleure performance de la réponse (Ra) correspond aux niveaux : **matière 2 Vc1 f1 ap2** (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 la rugosité de surface (Ra) sont donc : Matériau PA6, la plus basse vitesse de coupe 200 m/min, la plus basse avance 0.08 mm/tr et maximum profondeur de passe 1.6 mm.

b) Analyse des effets principaux sur (Rt)

Du **tableau V.3** il apparaît que les paramètres d'usinage (matériau, Vc, f et ap) présentent des effets différents sur le critère de la rugosité de surface (Rt).

La plus grande influence correspond à celle du matériau avec un effet de 6.86 suivie de celle de l'avance (F) avec un effet de 2.73. La plus faible influence sont celles de la profondeur de passe (ap) et la vitesse de coupe (Vc), avec des effets de 0.60 et 0.58 respectivement.

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse (Rt) correspond aux niveaux *matière2 Vc3f1 ap2*. Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de la rugosité de surface (Ra) sont donc: Matériau PA6, la plus grande vitesse de coupe 400 m/min, la plus basse avance 0.08 mm/tr et la profondeur de passe 1.6 mm.

Tableau V.3 : Moyenne des ratios S/B (Rt) pour chaque niveau des facteurs.

Level	Matière	Vc	F	Ap
1	-23.70	-20.52	-19.01	-20.19
2	-16.84	-20.35	-20.06	-20.01
3		-19.95	-21.74	-20.61
<i>Delta</i>	<i>6.86</i>	<i>0.58</i>	<i>2.73</i>	<i>0.60</i>
Rank	1	4	2	3

c) Analyse des effets principaux sur (Rz)

Sur le **tableau V.4** sont groupés les résultats du Rz. La plus importante influence correspond celle du matériau usiné avec un effet de 7.11 suivie de celle de l'avance par tour avec un effet de 2.78. Les plus faibles influences sont celles de la vitesse de coupe (Vc) et de la profondeur de passe (ap) avec un effet de 0.62 et 0.24.

Tableau V.4 : Moyenne des ratios S/B (Rz) pour chaque niveau des facteurs.

Level	Matière	Vc	F	ap
1	-23.10	-19.59	-18.28	-19.43
2	-15.99	-19.22	-19.31	-19.66
3		-19.84	-21.06	-19.56
<i>Delta</i>	<i>7.11</i>	<i>0.62</i>	<i>2.78</i>	<i>0.24</i>
Rank	1	3	2	4

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse (Rz) correspond aux niveaux : *matière2 Vc2f1 ap1*. Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de la rugosité de surface (Rz) sont donc : Matériau PA6, la vitesse de coupe 300 m/min, la plus basse avance 0.08 mm/tr et la profondeur de passe 0.8 mm.

d) Analyse des effets principaux sur l'effort axial (Fx)

Du *tableau V.5*, on remarque que les paramètres d'usinage (matériau, Vc, f et ap) présentent des effets différents sur (Fx). La plus importante influence correspond à celle de la profondeur de passe avec un effet de (14.26) suivie par celle du matériau avec un effet égal à (6.64). Les faibles influences sont celles relatives à la vitesse de coupe (Vc), l'avance par tour (f) avec des effets de (2.97) et (2.17) respectivement.

Tableau V.5 : Moyenne des ratios S/B (Fx) pour chaque niveau des facteurs.

Level	Matière	Vc	F	Ap
1	-25.83	-30.08	-30.06	-20.80
2	-32.48	-30.09	-27.89	-31.60
3		-27.30	-29.52	-35.07
<i>Delta</i>	<i>6.64</i>	<i>2.79</i>	<i>2.17</i>	<i>14.26</i>
Rank	2	3	4	1

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse (Fx) correspond aux niveaux *matière1 Vc3 f2ap1*. Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de (Fx) sont donc : Matériau POM-C, la plus grande vitesse de coupe 400 m/min, une avance de 0.14 mm/tr et minimum profondeur de passe 0.8 mm.

e) Analyse des effets principaux sur l'effort radial (Fy)

Du *tableau V.6*, on remarque que les paramètres d'usinage (matériau, Vc, f et ap) présentent des effets différents sur (Fy). La plus importante influence correspond à celle de la profondeur de passe avec un effet de (13.88) puis le matériau usiné avec un effet de (10.42). Les faibles influences sont celles de l'avance par tour (Vc) et la vitesse de coupe (Vc) avec des effets de (4.84) et (2.99) respectivement.

Tableau V.6 : Moyenne des ratios S/N de (Fy) pour chaque niveau des facteurs.

Level	Matière	Vc	F	Ap
1	-24.20	-30.43	-31.31	-21.02
2	-34.62	-30.36	-26.47	-32.32
3		-27.44	-30.45	-34.89
<i>Delta</i>	<i>10.42</i>	<i>2.99</i>	<i>4.84</i>	<i>13.88</i>
Rank	2	4	3	1

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse (Fy) correspond aux niveaux *matière1 Vc3f2ap1*. Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de (Fy) sont donc : Matériau POM-C, la plus grande vitesse de coupe 400 m/min, l'avance 0.14 mm/tr et un minimum de profondeur de passe 0.8 mm.

f) Analyse des effets principaux sur l'effort tangentiel (Fz)

Du *tableau V.7*, en remarque que, tout comme pour le cas de Fx et Fy, les paramètres d'usinage (matériau, Vc, f et ap) présentent des effets différents sur (Fz). La plus importante influence correspond à la profondeur de passe avec un effet de (9.51), puis l'avance (f) avec un effet de (4.22). Les faibles influences sont celles des facteurs relatifs à le matériau, et la vitesse de coupe (Vc) avec des effets de (2.23) et (0.76) respectivement.

Tableau V.7 : Moyenne des ratios S/N (Fz) pour chaque niveau des facteurs.

Level	Matière	Vc	F	ap
1	-33.92	-32.40	-30.59	-27.44
2	-31.69	-32.85	-33.01	-34.01
3		-33.16	-34.80	-36.95
<i>Delta</i>	<i>2.23</i>	<i>0.76</i>	<i>4.22</i>	<i>9.51</i>
Rank	3	4	2	1

Selon l'approche de Taguchi, l'optimum de la réponse (Fz) correspond aux niveaux : *matière2 Vc1f1ap1*. Les niveaux des paramètres attendus sous les conditions optimales de (Fz) sont donc : Matériau PA6, la plus basse vitesse de coupe 200 m/min, la plus basse avance 0.08 mm/tr et un minimum de profondeur de passe 0.8mm.

V.3.3. Optimisation multi-objectif

V.3.3.1. Méthode d'Analyse Relationnelle Gris (Grey method)

L'Analyse Relationnelle Gris (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) basée 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 d'optimisation. Si le but est la minimisation du critère (rugosité de surface) alors la séquence originale est normalisée comme suit:

➤ Le plus petit est le meilleur (*The-smaller-the-better*) :

$$x_i(k) = \frac{\max(x_i^0(k)) - x_i^0(k)}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))} \tag{V.3}$$

Si le but est la maximisation du critère (par exemple le volume de copeau enlevé) alors la séquence originale est normalisée comme suit :

➤ Le plus grand est le meilleur (*The-larger-the better*) :

$$x_i(k) = \frac{x_i^0(k) - \min(x_i^0(k))}{\max(x_i^0(k)) - \min(x_i^0(k))}$$

(V.4)

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

Étape 2 : Calcul des coefficients du Relationnel Gris

Les coefficients du Relationnel Gris (Grey Relational) ($\zeta_i(k)$) peuvent être calculés comme suit:

$$\zeta_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \xi \Delta_{\max}} \tag{V.5}$$

$$0 < \zeta_i(k) \leq 1$$

Où :

$\Delta_{0i}(k)$ est la différence en valeur absolue entre $x_0^k(k)$ et $x_i^k(k)$,

Δ_{\min} est la plus petite valeur de $\Delta_{0i}(k)$

Δ_{\max} est la plus grande valeur de $\Delta_{0i}(k)$ coefficient de distinction et sa valeur est comprise entre 0 à 1

$$\Delta_{0i}(k) = \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (V.6)$$

$$\Delta_{\min} = \min_{\forall j \in i} \min_{\forall k} \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (V.7)$$

$$\Delta_{\max} = \max_{\forall j \in i} \max_{\forall k} \|x_0(k) - x_i(k)\| \quad (V.8)$$

La valeur de $\Delta_{0i}(k)$ est en générale égale à (0.5).

Etape 3 : Calcul du GRG (Grey Relationnel Grade)

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

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \Delta_{0i}(k) \quad (V.9)$$

Où n est le nombre des caractéristiques de performance (dans notre cas $n=6$).

La plus grande valeur de r_i (Grey Relationnel 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 ($x_0(k)$) est la meilleure réponse dans le processus expérimental. Ainsi, le Grade Relationnel (Relationnel Grade) supérieur correspond à la combinaison des paramètres la plus proche de l'optimale

V.3.3.2. Prédiction de la combinaison optimale du processus:

Les valeurs normalisées des S/N sont calculées à partir de l'équation (V.3). Le **tableau (V.8)** contient les rapports signal/bruit (S/N ratio) et les valeurs normalisées des S/N pour les critères de rugosité de surface (Ra, Rz et Rt) et les efforts de coupe (Fx, Fy et Fz). La valeur du coefficient $\Delta_{0i}(k)$ a été prise (0.5). Les valeurs des coefficients "Gris Rationnelle Coefficients" et le rang de chaque expérience sont présentés dans le **tableau(V.9)**.

Tableau V.8: Valeurs des S/N ratio normalisé

	S/N ratios Normalisés					
N°	Ra	Rz	Rt	Fx	Fy	Fz

1	1.00	1.00	0.86	0.32	0.18	00
2	0.73	0.71	0.60	0.17	0.11	0.31
3	0.46	0.65	0.59	0.04	0.01	0.05
4	0.89	0.93	0.82	0.37	0.23	0.68
5	0.72	0.84	0.73	0.14	0.07	0.43
6	0.43	0.62	0.55	-	0.03	-
7	0.83	0.84	1.00	0.16	0.09	0.42
8	0.68	0.77	0.65	0.03	-	0.20
9	0.46	0.65	0.54	0.48	0.19	0.56
10	0.28	0.15	00	0.28	0.23	0.23
11	0.21	0.19	0.28	0.51	0.58	0.53
12	0.29	0.32	0.26	0.26	0.17	0.08
13	0.37	0.28	0.17	0.30	0.24	0.33
14	0.38	0.42	0.34	0.14	0.14	0.00
15	-	0.11	0.03	0.64	0.57	0.60
16	0.40	0.44	0.40	0.17	0.16	0.16
17	0.10	0.22	0.19	1.00	1.00	0.51
18	0.01	-	0.05	0.27	0.30	0.08

Tableau V.9: Coefficients du GR et la valeur de la qualité grise

N	Coefficients du GR (Grey Relationnel Coefficients)						Qualité Gris
	Ra	Rz	Rt	Fx	Fy	Fz	
1	1.00	1.00	0.78	0.42	0.38	1.00	0.76
2	0.65	0.64	0.55	0.38	0.36	0.42	0.50
3	0.48	0.59	0.55	0.34	0.34	0.34	0.44
4	0.82	0.87	0.74	0.44	0.39	0.61	0.65
5	0.64	0.76	0.65	0.37	0.35	0.47	0.54
6	0.47	0.57	0.53	0.33	0.34	0.33	0.43
7	0.74	0.75	1.00	0.37	0.36	0.46	0.61
8	0.61	0.68	0.59	0.34	0.33	0.39	0.49

9	0.48	0.59	0.52	0.49	0.38	0.53	0.50
10	0.41	0.37	0.33	0.41	0.39	0.39	0.39
11	0.39	0.38	0.41	0.51	0.54	0.52	0.46
12	0.41	0.42	0.40	0.40	0.37	0.35	0.40
13	0.44	0.41	0.38	0.42	0.40	0.43	0.41
14	0.45	0.46	0.43	0.37	0.37	0.33	0.40
15	0.33	0.36	0.34	0.58	0.54	0.56	0.45
16	0.46	0.47	0.46	0.37	0.37	0.37	0.42
17	0.36	0.39	0.38	1.00	1.00	0.50	0.61
18	0.34	0.33	0.35	0.41	0.42	0.35	0.36

Le niveau optimal des paramètres est le niveau correspondant au maximum de la valeur moyenne de " la qualité relationnelle gris". La combinaison optimale est obtenue à partir de la figure V.1 qui représente les effets principaux de la Qualité Gris (Grey Grade):Matériau"niveau 1", vitesse de coupe optimale: "niveau 3", l'avance optimale: "le niveau 1" et pour la profondeur de passe optimale "niveau 1". Donc la combinaison optimale des paramètres est: *matière1 Vc3flap1*. Les valeurs des paramètres du processus de coupe optimaux sont : Matériau POM-C, vitesse de coupe $V_c = 400$ m/min, avance $f = 0.08$ mm/tr et profondeur de passe $a_p = 0.8$ mm.

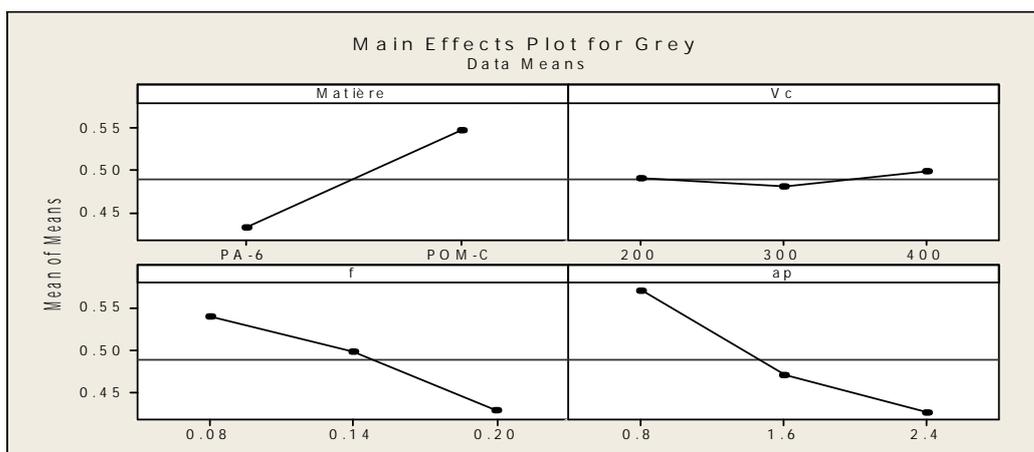


Figure V.1 : Graphique des effets principaux de Matériau, V_c , f et a_p sur ratio S/N (Grey).

V.3.3.3. Analyse de la variance ANOVA de la qualité grise (Grey Grade)

La signification des paramètres du régime de coupe a été testée par une analyse de variance. L'utilisation d'une analyse de la variance de la valeur de la qualité relationnelle grise, a été élaboré pour identifier les facteurs importants. Les résultats de l'ANOVA sont présentés dans le Tableau V.10. On observe que les facteurs déterminants sont la profondeur de passe (31.91%) et le matériau usiné (30.27%) suivies par l'avance (18.54%) et la vitesse de coupe (0.12%).

Tableau V.10: ANOVA de la qualité grise (Grey Grade)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Cont.%
Régression	7	0.164517	0.164517	0.0235025	7.86539	0.002146	84.6289571
Matière	1	0.058836	0.026061	0.0260614	8.72175	0.014454	30.2657435
Vc	1	0.000233	0.000439	0.0004389	0.14688	0.709552	0.1198572
f	1	0.036042	0.005293	0.0052934	1.77148	0.212747	18.5403142
ap	1	0.062026	0.011492	0.0114916	3.84581	0.078297	31.9067069
Vc*f	1	0.000643	0.000144	0.0001442	0.04824	0.830569	0.33076472
Vc*ap	1	0.000074	0.000010	0.0000098	0.00328	0.955439	0.03806624
f*ap	1	0.006664	0.006664	0.0066636	2.23006	0.166213	3.42801881
Error	10	0.029881	0.029881	0.0029881			15.3710429
Total	17	0.194398					100

La valeur du Grey et donnée, pour les deux matériaux, par les modèles suivants avec un coefficient de corrélation $R^2=84.63\%$;

$$\text{PA-6 Grey} = 0.809608 + 0.000265087 \text{ Vc} - 1.90687 \text{ f} - 0.193237 \text{ ap} - 0.000758134 \text{ Vc*f} - 1.48324\text{e-}005 \text{ Vc*ap} + 0.759976 \text{ f*ap}$$

(V.10)

$$\text{POM-C Grey} = 0.899633 + 0.000265087 \text{ Vc} - 1.90687 \text{ f} - 0.193237 \text{ ap} - 0.000758134 \text{ Vc*f} - 1.48324\text{e-}005 \text{ Vc*ap} + 0.759976 \text{ f*ap}$$

(V.11)

V.4. Conclusion:

- L'étude réalisée dans ce chapitre nous a permis de faire une optimisation des conditions de coupe de l'usinage de deux matériaux semi-cristallins, par l'utilisation des différentes méthodes d'optimisation.

- Deux types d'optimisation ont été exploités dans ce chapitre :

- Optimisation mono-objectif : En utilisant la méthode de Taguchi ;

- Optimisation multi-objectif : En utilisant l'analyse relationnelle grise (Grey).

- Selon l'approche de Taguchi :

L'optimum de la valeur la meilleure performance de la réponse (Ra) correspond aux niveaux : *matière2 Vc1 f1 ap2* donc : Matériau PA6, la plus basse vitesse de coupe 200 m/min, la plus basse avance 0.08 mm/tr et maximum profondeur de passe 1.6 mm.

L'optimum de la réponse (R_t) correspond aux niveaux *matière2 Vc3f1 ap2* donc: Matériau PA6, la plus grande vitesse de coupe 400 m/min, la plus basse avance 0.08 mm/tr et la profondeur de passe 1.6 mm.

L'optimum de la réponse (R_z) correspond aux niveaux : *matière2 Vc2 f1 ap1* donc : Matériau PA6, la vitesse de coupe 300 m/min, la plus basse avance 0.08 mm/tr et la profondeur de passe 0.8 mm.

L'optimum de la réponse (F_x) correspond aux niveaux *matière1 Vc3 f2ap1* donc : Matériau POM-C, la plus grande vitesse de coupe 400 m/min, une avance de 0.14 mm/tr et minimum profondeur de passe 0.8 mm.

L'optimum de la réponse (F_y) correspond aux niveaux *matière1 Vc3f2ap1* donc : Matériau POM-C, la plus grande vitesse de coupe 400 m/min, l'avance 0.14 mm/tr et un minimum de profondeur de passe 0.8 mm.

L'optimum de la réponse (F_z) correspond aux niveaux : *matière2 Vc1f1ap1* donc : Matériau PA6, la plus basse vitesse de coupe 200 m/min, la plus basse avance 0.08 mm/tr et un minimum de profondeur de passe 0.8 mm.

- L'Analyse Relationnelle Gris (GRA) est utilisée pour convertir le problème d'optimisation d'un multi-objectif en un seul objectif.

La combinaison optimale obtenue par l'approche de la Qualité Gris (Grey Grade) est : Matériau "niveau 1", vitesse de coupe optimale : "niveau 3", l'avance optimale : "le niveau 1" et pour la profondeur de passe optimale "niveau 1". Donc la combinaison optimale des paramètres est : *matière1 Vc3 f1 ap1*. Les valeurs des paramètres du processus de coupe optimaux sont : Matériau POM-C, vitesse de coupe $V_c = 400$ m/min, avance $f = 0.08$ mm/tr et profondeur de passe $ap = 0.8$ mm.

Conclusion générale :

L'étude de l'usinage des polymères semi-cristallins réalisée dans cette étude, a permis de définir les matériaux polymères, leurs classifications selon plusieurs critères et leurs modes de synthèses et certains travaux de recherche réalisés sur l'usinage des matériaux polymères. De définir aussi les différents matériaux de coupes utilisés dans l'usinage des polymères en tournage, tels que, les aciers rapides et les carbures.

➤ Dans cette étude nous avons évoqué aussi les différents paramètres d'entrée (régime de coupe, géométrie de la partie active de l'outil) sur le processus de coupe en général et en particulier sur les différents paramètres de sortie tel que, les efforts de coupe et la rugosité de la surface usinée.

➤ En se basant sur l'étude bibliographique, nous pouvons conclure que les polymères sont classés parmi les matériaux difficiles à usiner à cause de leurs caractéristiques physico-mécaniques.

➤ Pour obtenir un bon état de surface et des efforts de coupe modérés il est conseillé de choisir une avance de coupe et profondeur de passe minimales et des vitesses de coupe relativement élevées.

➤ Il est aussi recommandé de choisir un angle de coupe positif et d'usiner avec lubrification.

D'après les résultats de ce chapitre nous pouvons conclure que ;

➤ Le facteur le plus important qui affecte les deux critères de rugosité de surface R_{aet} R_{test} le matériau usiné suivi par l'avance par tour (f). Par contre la profondeur de passe (ap) et la vitesse de coupe (V_c) n'ont pas d'effet significatif.

➤ La profondeur de passe est le facteur le plus prépondérant qui affecte le critère R_z suivi par les matériaux usinés et l'avance. La vitesse de coupe (V_c) n'a pas d'influence significative.

➤ Les diagrammes des interactions montrent qu'il y a une grande interaction entre les trois paramètres du régime de coupe (ap , f et V_c) pour les trois critères de rugosité (R_a , R_t et R_z). Par contre il n'y a aucune interaction entre ces paramètres et le matériau usiné.

➤ Il convient de noter que le POM-C présente un meilleur état de surface par rapport au PA-6.

➤ Les modèles des critères de rugosité, pour les deux matériaux usinés, sont obtenus avec des coefficients de corrélation supérieurs à 85%.

➤ Les résultats de l'analyse de la variance ANOVA pour F_x et F_y montrent que la profondeur de passe et le facteur qui influe le plus suivie par le matériau usiné alors que l'avance par tour et la vitesse de coupe sont moins influentes.

➤ Par contre la profondeur de passe (ap) est le facteur le plus important affectant l'effort tangentiel (F_z) suivie par l'avance par tour.

➤ Les diagrammes des interactions montrent qu'il y a très peu d'interactions entre V_c et ap pour les trois composantes de l'effort de coupe. Par contre il y a plus d'interactions entre « V_c et f » et « ap et f ». On peut aussi conclure qu'il n'y a aucune interaction entre le matériau usiné et les trois paramètres du régime de coupe.

- L'analyse de régression des trois composantes des efforts de coupe en fonction de V_c , f et ap nous a permis d'obtenir les équations des modèles avec des coefficients de corrélation supérieurs à 94%.
- Les surfaces de réponses 3D montrent que la vitesse de coupe a un effet négligeable sur les trois composantes de l'effort de coupe. Alors que, pour une avance (f) donnée, les composantes des efforts de coupe augmentent fortement avec l'augmentation de la profondeur de passe.
- Pour les petites avances, les composantes de l'effort de coupe sont très sensibles à la profondeur de passe et pour toute augmentation de cette dernière ; les composantes de l'effort de coupe augmentent considérablement.
- Nous pouvons aussi conclure qu'il est très difficile de choisir un régime optimal qui minimise à la fois les trois critères de rugosité et les trois composantes de l'effort de coupe d'où la nécessité de procéder à une étude d'optimisation.

Les résultats de l'étude de l'optimisation nous ont permis de conclure que :

- Deux types d'optimisation ont été exploités dans ce chapitre :
 - Optimisation mono-objectif : En utilisant la méthode de Taguchi ;
 - Optimisation multi-objectif : En utilisant l'analyse relationnelle grise (Grey).
- Selon l'approche de Taguchi :
 - L'optimum de la valeur la meilleure performance de la réponse (R_a) correspond aux niveaux : **matière2 Vc1 f1 ap2** donc : Matériau PA6, la plus basse vitesse de coupe 200 m/min, la plus basse avance 0.08 mm/tr et maximum profondeur de passe 1.6 mm.
 - L'optimum de la réponse (R_t) correspond aux niveaux **matière2 Vc3 f1 ap2** donc: Matériau PA6, la plus grande vitesse de coupe 400 m/min, la plus basse avance 0.08 mm/tr et la profondeur de passe 1.6 mm.
 - L'optimum de la réponse (R_z) correspond aux niveaux : **matière2 Vc2 f1 ap1** donc : Matériau PA6, la vitesse de coupe 300 m/min, la plus basse avance 0.08 mm/tr et la profondeur de passe 0.8 mm.
 - L'optimum de la réponse (F_x) correspond aux niveaux **matière1 Vc3 f2 ap1** donc : Matériau POM-C, la plus grande vitesse de coupe 400 m/min, une avance de 0.14 mm/tr et minimum profondeur de passe 0.8 mm.
 - L'optimum de la réponse (F_y) correspond aux niveaux **matière1 Vc3 f2 ap1** donc : Matériau POM-C, la plus grande vitesse de coupe 400 m/min, l'avance 0.14 mm/tr et un minimum de profondeur de passe 0.8 mm.
 - L'optimum de la réponse (F_z) correspond aux niveaux : **matière2 Vc1 f1 ap1** donc : Matériau PA6, la plus basse vitesse de coupe 200 m/min, la plus basse avance 0.08 mm/tr et un minimum de profondeur de passe 0.8 mm.
- L'Analyse Relationnelle Gris (GRA) est utilisée pour convertir le problème d'optimisation d'un multi-objectif en un seul objectif.
 - La combinaison optimale obtenue par l'approche de la Qualité Gris (Grey Grade) est : Matériau "niveau 1", vitesse de coupe optimale : "niveau 3", l'avance optimale : "le niveau 1" et pour la profondeur de passe optimale

"niveau 1". Donc la combinaison optimale des paramètres est : **matière1 Vc3 f1 ap1**. Les valeurs des paramètres du processus de coupe optimaux sont : Matériau POM-C, vitesse de coupe $V_c = 400$ m/min, avance $f = 0.08$ mm/tr et profondeur de passe $a_p = 0.8$ mm.

Résumé

Une importante compétition sur les plans technique et économique continue d'opposer les métaux aux matériaux polymères pour la réalisation de pièces multiformes destinées à être utilisées dans des domaines variés. Les polymères présentent l'avantage d'être mis en œuvre plus facilement lors de la production par moulage ou par extrusion.

L'objectif de cette étude bibliographique est d'investiguer l'usinabilité des polymères semi-cristallins pour cerner l'intervalle des valeurs des paramètres du régime de coupe à dans un souci d'obtenir un meilleur état de surface et des efforts de coupe les plus modérés sans pour autant perdre de vue les propriétés du matériau.

D'après les résultats de cette étude nous pouvons déterminer l'influence de chacun des paramètres du régime de coupe sur l'état de surface et les efforts de coupe lors de l'usinage du POM-C et du PA6. Nous avons aussi conclu qu'il est très difficile de choisir un régime optimal qui minimise à la fois les trois critères de rugosité et les trois composantes de l'effort de coupe d'où la nécessité de procéder à une étude d'optimisation.

Les résultats de l'étude de l'optimisation nous ont permis de conclure que la combinaison optimale obtenue par l'approche de la Qualité Gris (Grey Grade) est : Matériau "niveau 1", vitesse de coupe optimale : "niveau 3", l'avance optimale : "le niveau 1" et pour la profondeur de passe optimale "niveau 1". Donc la combinaison optimale des paramètres est : matière1 Vc3 f1 ap1. Les valeurs des paramètres du processus de coupe optimaux sont : Matériau POM-C, vitesse de coupe $V_c = 400$ m/min, avance $f = 0.08$ mm/tr et profondeur de passe $a_p = 0.8$ mm.

Références bibliographiques:

- [01] SADOUN Sofiane, Contribution à l'étude expérimentale d'un polyéthylène a haute densité (PEHD), Mémoire de Magister, Université d' Annaba, juin 2007.
- [02] James E. mark, Physical properties polymers Handbook, Springer, 2007.
- [03] KADDECHE Mounia, Etude des déformations résiduelles des propriétés mécaniques des tubes épais en HDPE-80 et HDPE-100, Mémoire de magister, Université de Guelma, Septembre 2006.
- [04] J.M. HAUDIN; Matériaux pour l'ingénieur, 2006, PP46-69.
- [05] Normes ISO 4287/1-1984 et ANSI/ASME B46.1-1985.
- [06] Z. LU, T.YONEYAMA; *Micro-cutting in the micro lathe turning system*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1999, 39, PP1171–1183.
- [07] M.C. FRANCISCO & All, *Etude de l'effet des vitesses de coupe et d'avance sur la force d'usinage lors du chariotage des composés polyamides*, 2009.
- [08] W. WANG, S.H. KWEON, S.H. YANG; *A study on roughness of the micro-end milled surface produced by a miniaturized machine tool*, Journal of Materials Processing Technology, 2005, PP162–163, PP702–708.
- [09] T. MASUZAWA; *State of the art of micromachining, annals of CIRP*, 2000, 49, PP473–488.
- [10] S. BERKANI; *Etude du comportement des matériaux de coupe lors du tournage d'un acier inoxydable*, département mécanique, université Guelma, 2009, P10.
- [11]]P.G.Benardos,G.C.Vosniakos, Predicting surface roughness in machining: Review, International Journal of Machining tools & Manufacture , 43 (2003) 833-844.
- [12] T. MASUZAWA; *State of the art of micromachining, annals of CIRP*, 2000, 49, PP473–488.
- [13] F.Z. FANG, H. Wu, et ALL; *Tool geometry study in micromachining*, Journal of Micromechanics and Microengineering, 2003, 13, PP726–731.
- [14] KADDECHE Mounia, Thèse de Docteur étude de la rupture du polyéthylène sous charge constante, Universités de Annaba, 2014
- [15] CATALOGUE ZELLAMID; *ingénierie des produits plastiques semi-finis*, 2009, P20 <http://www.zellamid.com/downloads/>, le 3/10/2012.
- [16] A. DESSARTHE; *Usinage des polymères*, technique d'ingénieur, Doc: AM 3 780, PP4-12.

- [17] Dusunceli N., Aydemir B., The effects of loading history and manufacturing methods on the mechanical behavior of High-Density Polyethylene, *Journal of Elastomers and Plastics*, 43 (2011) 451-468.
- [18] **Gombette P.**, Ernoult I., *Physique des polymères: II. Propriétés mécaniques*, HERMANN EDITEURS (2005) 428-431.
- [19] **Xiao K.O.**, Zhang L.C., The role of viscous deformation in the machining of polymers, *international Journal of Mechanical Sciences* 44(2002) 2317-2336.
- [20] **Humbert S.**, Lamé O., Ségéla R., Vigier G., A re-examination of the elastic modulus dependence on crystallinity in semi-crystalline polymers, *Polymer* 52 (2011) 4899-4909.
- [21] **Jiang Q.**, Zhang L.C., Pittolo M., The dependence of surface finish of a spectacle polymer upon machining conditions, *Progress of Machining Technology*. Beijing: Aviation Industry Press., (2000) 7–12.
- [22] **Dusunceli N.**, Colak O.U., The effects of manufacturing techniques on visco-elastic and viscoplastic behavior of high density polyethylene (HDPE), *Mater. Design.*, 29 (2008) 1117–1124.
- [23] **Smith EF.**, Single-point turning of amorphous thermoplastic polymers. MS thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC, 1989.
- [24] **Alauddin M.**, *Plastics and their machining: a review*, *Journal of Materials Processing Technology*, 54 (1995) 40–46.
- [25] **Kabayashi**, *Machining of Plastics*, McGraw-Hill, New York, 1967.
- [26] **Petropoulos G.**, Mata F.J., Davim J.P., Statistical study of surface roughness in turning of peek composites, *Materials and Design* 29 (2008) 218–223.
- [27] **Cristescu**, The influence of the geometry of the lathe tool on the surface condition at the processing of the polyamide, *Technologies in machine building*, 2008, ISSN, PP 1221-4566.
- [28] **F.MATA**, J.P.DAVIM; *Performance of diamond coated tools (CVD) in machining polyamides*, *Int. J. Materials and Product Technology*, Vol. 37, No. 1/2, 2010
- [29] **M. KADDACHE**, K. CHAOUI, M.A YALESSE; *Cutting parameters effects on the machining of two high density polyethylene pipes resins*, *Journal of Mechanics & Industry*, 2012, PP307-316.

- [30] **M.MO OI**; *Studies regarding the influence of the improving elements upon the roughness of the surface processed of polyamides*, technologies in machine building, 2008, ISSN, PP1635-1636.
- [31] **M.MO OI**; *Simulation of cutting process in turning polyamide pa 66*, annals of the Oradea University. Fascicle of Management and Technological Engineering, Volume IX (XIX), 2010, NR3.
- [32] **Zaidi ahmed** ; *Contribution à l'étude de l'usinage des matériaux polymères* Mémoire de magister, Université de Guelma, 2013.
- [33] Dridah yakoub, *Contribution à l'étude de l'usinabilité des Polymères - Application (POM-C)*, Mémoire de master, Université de Guelma, 2014/2015
- [34]. Davim J.P., Silva L.R., Festas A., Abrão A.M., *Machinability study on precision turning of PA66 polyamide with and without glass fiber reinforcing*, *Materials and Design* 30 (2009) 228–234.
- [35]. Humbert S., Lame O., Vigier G., *Polyethylene yielding behaviour: What is behind the correlation between yield stress and crystallinity?*, *Polymer*, 50 (2009) 3755-3761.
- [36]. Koh-hei Nitta, Hirohito Maeda, *Creep behavior of high density polyethylene under a constant true stress*, *Polymer Testing* 29 (2010) 60–65.
- [37]. Castagnetti D., Scirè Mammano G., Dragoni E., *Effect of chlorinated water on the oxidative resistance and the mechanical strength of polyethylene pipes*, *Polymer Testing* 30 (2011) 277–285.
- [38]. Cheng J.J., Polak M.A., Penlidis A., *Influence of micromolecular structure on environmental stress cracking resistance of high density polyethylene*, *Tunnelling and Underground Space Technology* 26 (2011) 582–593.
- [39]. Mukherjee I., Ray P. K., *A review of optimization techniques in metal cutting processes*, *Computers & Industrial Engineering* 50 (2006) 15–34.
- [40]. Benardos G., Vosniakos G.-C., *Predicting surface roughness in machining: a review*, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 (2003) 833–844.
- [41]. Taguchi G., Konishi S., *Taguchi methods, Orthogonal arrays and linear graph, tools for quality engineering*. American supplier institute, pp. 35-38, (1987).
- [42]. Lin C. L., *Use of the Taguchi method and grey relational analysis turning operations with multiple performance characteristics*, *Materials and manufacturing processes*, Vol. 19, No. 2 (2004) 209-220.
- [43]. These bouzide

