

**Université du 8 mai 1945 – Guelma**

**Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Département de Génie Mécanique**



***Mémoire Fin D'étude Présente En Vue de l'obtention de  
Diplôme de Master***

Option : **Conception et Production Industrielle**

Présenté par : **ZEMMALI Yazid**

=====

***Modélisation et Optimisation des paramètres  
d'usinage lors de tournage d'un polymère  
composite renforcée de fibre de verre***

=====

Sous la Direction de :

**Pr. YALLESE M.A.**

**Année universitaire 2015/2016**

## Sommaire

I-1 Introduction	1
I-2 Les polymères	1
I-2.1 Définition	1
I-2.2 Abréviations De Nomination	1
I-2.3 Classification des polymères	2
I-2.3.1 Thermoplastiques	3
I-2.3.2 Résines thermodurcissables	3
I-2.3.3 Elastomères	4
I-2.3.4 Elastomères thermoplastiques (TPE)	4
I-2.4 Plastiques renforcés de fibres	5
I-2.4.1 Plastiques renforcés de fibres de verre	5
I-2.4.2 Plastiques renforcés de fibres de carbone (CFK)	6
I-3 Définition de l'usinabilité	7
I-3.1 Critères d'évaluation de l'usinabilité	7
I-3.2 Facteurs influençant l'usinabilité	8
I-3.2.1 La résistance mécanique	8
I-3.2.2 Les caractéristiques thermiques	8
I-4 Généralités sur l'usinage des polymères	8
I-4.1 Comportement des polymères vis-à-vis de l'usinage	9
I-4.1.1 le module d'élasticité et la dureté	9
I-4.1.2 les contraintes internes	9
I-4.1.3 La dilatation et la conductivité thermique :	10
I-4.1.4 l'usure des outils	10
I-4.1.5 l'hygrométrie	10
I-4.1.6 l'électrostatique	11
I-4.2 Spécificité du procédé	11
I-4.2.1 Matériaux d'outils	11
I-4.2.2 Refroidissement	11
I-4.2.3 Fixation des pièces	12
I-4.2.4 Tolérances dimensionnelles	12
I-4.2.5 Hygiène et sécurité	12
I-5 Usinage conventionnel des polymères	13

I-5.1 Tournage	13
I-5.2 Fraisage	14
I-5.3 Perçage	14
I-5.4 Sciage	15
I-5.5 Les efforts de coupe	16
I-5.5.1 Définition et intérêt de leur mesure	16
I-6 définition des critères de Rugosité	17
I-7 Travaux de recherches concernant l'usinage des polymères	18
I-7 Conclusion	25
<b>Chapitre II</b>	
II.1 Introduction	26
II.2 Banc d'essais et équipement de mesure	26
II.3.1 Machine-outil	26
II.3.3 porte-outil et plaquette	29
II.3.4 Equipements de mesure	30
II.3.4.1 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe	30
II.3.4.2 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité	32
II.3.4.3 Autres équipements:	33
II.6. Conclusion	36
<b>Chapitre III</b>	
III.1.Introduction	37
III.2. Teste de validité des modèles	38
III.3. Détermination du modèle de la rugosité en fonction des paramètres de coupe	40
III.3.1. Rugosité de surface Ra	40
III.3.1.1 Analyse de la variance pour la rugosité Ra :	41
III.3.1.2 facteurs influents	42
III.3.1.3 Interactions des facteurs pour le critère de la rugosité Ra	43
III.3.1.4 Analyse de régression de la rugosité (Ra) :	44
III.3.1.5 Analyse de la surface de réponse	44
III.3.1.6 Comparaison entre la rugosité expérimentale et estimée.	47
III.3.2. Rugosité Rz	48
III.3.2.1 Analyse de la variance pour la rugosité Rz :	48
III.3.2.2 Facteurs influents	49

III.3.2.3 Interactions des facteurs pour le critère de la rugosité Rz	50
III.3.2.4 Analyse de régression de la rugosité (Rz) :	50
III.3.2.5 Analyse de la surface de réponse	51
III.3.2.6 Comparaison entre le critère de la rugosité expérimentale et estimée	53
III.3.3. Rugosité Rq	54
III.3.3.1. Analyse de la variance pour la rugosité Rq :	54
III.3.3.2. facteurs influents	54
III.3.3.3. Analyse de régression de la rugosité (Rq) en fonction du régime de coupe	55
III.3.3.4. Analyse de la surface de réponses	56
III.3.3.5. Comparaison entre le critère de la rugosité expérimentale et estimée	57
III.3.4. Rugosité Rt	59
III.3.4.1. Analyse de la variance pour la rugosité Rt :	59
III.3.4.2. facteurs influents	59
III.3.4.3. Analyse de régression de la rugosité (Rt) en fonction du régime de coupe	60
III.3.4.4. Analyse de la surface de réponses	61
III.3.4.5. Comparaison entre le critère de la rugosité expérimentale et estimée	63
III.4. Détermination des modèles des efforts de coupe en fonction des paramètres de coupe.	64
III.4.1. Effort de coupe tangentiel Fz	64
III.4.1.1 Analyse des variances (ANOVA) de l'effort de coupe tangentiel Fz	64
III.4.1.2 Facteurs influents	64
III.4.1.3 Analyses de régression des efforts de coupe Fz en fonction de (r, Vc, f et ap)	65
III.4.1.4 Analyse de la surface de réponses	65
III.4.1.5 Comparaison entre le critère de la rugosité expérimentale et estimée	67
III.4.2 Effort de coupe axial (Fx) et l'effort de coupe radial (Fy)	69
III.4.2.1. Analyse de variance (ANOVA) des efforts de coupe (Fx, Fy)	69
III.4.2.2 Facteurs influents	70
III.4.2.3 Analyses de régression des efforts de coupe (Fx, Fy) en fonction du régime de coupe (r, Vc, f et ap)	72
III.4.2.4. Analyse de la surface de réponses	72
III.4.2.5. Comparaison entre les efforts de coupe expérimentaux et prédites : (a) Fx, (b) Fy	76
III.5. Détermination des modèles des efforts de coupe en fonction des paramètres	78
III.5.1. L'effort spécifique Kc	78
III.5.1.1 Résultats des expériences	78

III.5.1.2 Analyse des variances (ANOVA) de l'effort spécifique de coupe	79
III.5.1.4 Analyses de régression $K_c$ en fonction de ( $r$ , $V_c$ , $f$ et $a_p$ )	81
III.5.1.5 Analyse de la surface de réponses	81
III.5.1.6 Comparaison entre le critère de la rugosité expérimentale et estimée du $K_c$	83
III.6 Conclusions	85
<b>Chapitre IV</b>	
IV.1 : Introduction	86
IV.2 Optimisation des conditions de coupe	87
IV.3. Optimisation des conditions de coupe pour une rugosité ( $R_a$ , $R_z$ , $R_q$ et $R_t$ ).	88
IV.3.1.Valeur de la désirabilité de régime de coupe optimal pour ( $R_a$ , $R_z$ , $R_q$ et $R_t$ ).	89
IV.3.2.Variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe	90
IV.4. Optimisation des conditions de coupe pour les composantes de l'effort de coupe ( $F_x$ , $F_y$ , et $F_z$ ).	90
IV.4.1.Valeur de la désirabilité pour ( $F_x$ , $F_y$ , $F_z$ ).	92
IV.4.2.La variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe	92
IV.5.Optimisation des conditions de coupe pour l'effort spécifique $K_c$ .	93
IV.5.1.Valeur de la désirabilité pour l'effort spécifique $K_c$ minimale.	94
IV.4.2.La variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe	95
IV.5. Conclusion	96

## Introduction générale

Les polymères sont devenus l'élément essentiel d'un nombre très important d'objets de la vie courante, dans lesquels ils ont souvent remplacé les substances naturelles, ils sont présents dans de nombreux domaines industriels (Automobile, l'aviation etc...).

Les pièces des machines au cours de leur durée de vie utile sont significativement influencées par la qualité de rugosité de surface et l'effort de coupe, le processus d'usinage est plus complexe, et donc, il est très difficile de développer un modèle complet de prédiction impliquant tous les paramètres de coupe.

Parmi les types de ces polymères il y a les thermodurcissables, les élastomères et les thermoplastiques. Ces derniers présentent des difficultés lors de la coupe à cause de leurs caractéristiques distinguées telles que le faible module d'élasticité, le taux d'absorption d'humidité, le coefficient de dilatation thermique élevé et les contraintes internes.

Notre travail concerne l'étude de la mesure de la rugosité de surface et les efforts de coupe pendant le tournage du polymère PA66-GF30 en fonction de la variabilité des différents paramètres de coupe tels que le rayon de bec ( $r$ ), la vitesse de coupe ( $V_c$ ), l'avance ( $f$ ) par tours et la profondeur de coupe ( $a_p$ ).

Un plan incomplet de 18 essais ( $L_{18}$ ) est mis en œuvre pour modéliser la rugosité de surface et les efforts de coupe. Pour l'optimisation nous avons utilisé la méthode (RMS), pour modéliser la rugosité de surface et l'effort de coupe lors du tournage du polymère PA66-GF30.

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre concerne l'étude bibliographique sur l'usinabilité des matériaux et les critères de leurs évaluation, des notions sur le couple outil-matière, les différents matériaux de coupe utilisés en usinage, la classification des polymère PA66-GF30. La fin de ce chapitre débouche sur un résumé de quelques travaux de recherche (publications) qui concernent l'usinage des polymère PA66-GF30 ainsi que les méthodes de modélisation et d'optimisation des conditions de coupe.

Dans le deuxième chapitre nous présentons les conditions de coupe ainsi que les équipements et le matériel de mesure utilisés tels que ; tour, rugosimètre, plate forme Kistler pour la mesure des efforts de coupe...etc. Egalement, les matériaux à usinés

(polymère PA66-GF30) sont présentés d'une manière détaillée ainsi que l'approche expérimentale adoptée

Dans le troisième chapitre nous avons présenté les résultats des différents essais réalisés tels que :

- L'évolution de la rugosité en fonction des éléments du régime de coupe ( $r, f, V_c$  et  $a_p$ ).
- L'évolution des efforts et des pressions de coupe en fonction des paramètres de coupe ( $r, f, V_c, a_p$ ); et nous avons présenté une étude statistique (analyse de variance, interactions) basée sur la méthode de surface de réponse et cela dans le but de déterminer des modèles mathématiques qui permettent la prédiction de la rugosité, des efforts de coupe et cela en fonction des paramètres de coupe ( $r, V_c, f$  et  $a_p$ ).

Le quatrième chapitre est réservé à l'optimisation des paramètres technologiques mis en étude ( $R_a, R_z, R_q, R_t, F_x, F_y, F_z$ , et  $K_c$ ), à l'aide de deux logiciels « Design expert 9, Minitab16 »

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

## I-1 Introduction

Depuis toujours, le fabricant essaye dans les stratégies d'optimisation des processus d'usinage actuellement préconisées visent à l'augmentation de la productivité, de la qualité de surface, ou à réduire les coûts par plusieurs voies, par l'optimisation d'enlèvement de matière, amélioration de la précision de l'usinage, réduction du nombre d'opérations (traitement thermique et rectification finale par exemple) et recherche d'une plus grande fiabilité au niveau des propriétés d'usage des pièces usinées [1].

Au cours des dernières décennies, les domaines d'application des matériaux polymères se sont diversifiés et leur production a en conséquence atteint des niveaux au départ difficilement prévisible. Ces matériaux semblent encore promis à un essor extraordinaire jusque dans un futur indéfini. L'application des matériaux polymères dans des secteurs innovants et des conditions de sollicitation élevée est possible grâce aux progrès réalisés en conception, dans les techniques de mise en forme sur les caractéristiques finales [2].

## I-2 Les polymères

### I-2.1 Définition

Le centre d'étude des matières plastiques donne une définition acceptable qui est la suivante : " *Une matière plastique est un mélange contenant une matière de base qui est susceptible d'être moulé ou qui a été moulé. La matière de base est en général un mélange de macromolécules au hauts polymères organiques ou semi-organique à caractère résineux, résultat le plus souvent d'une réaction naturelle ou artificielle de polycondensation ou de polymérisation* " [3].

### I-2.2 Abréviations De Nomination

Les polymères peuvent être désignés de façon abrégée, à l'aide de sigles anglo-saxons **Tableau I-1**.

Ainsi, dans le langage courant, on parle beaucoup plus de PVC pour Poly (VinylChloride) que de PCV poly (chlorure de vinyle) [4].



**Tableau I-1** Nom et désignation des quelques matières plastiques [5].

<i>Désignation</i>	<i>Appellation</i>	<i>Appellation commerciale</i>
PA 6	Polyamide 6	Nylon, Ertalon, Nylatron, Akulon, Durethan, Sniamid, Ultramid B, Orgamide, zellamid 202.
PA 6G	Polyamide 6G	Ertalon 6 XAU+, Ertalon LFX, Nylatron MC 901, Nylatron NSM, Ultralon.
PA 11	Polyamide 11	Rilsan, Ertalon 11 SA; Grilon .
PA 12	Polyamide 12	Vestamid, Grilon, zellamid 1200.
PA 66	Polyamide 66	Nylon 66, Ertalon 66 SA, Celanese, Nylatron, Vydine, Ultramid A;
PC	Polycarbonate	Axxis PC; Lexan; Makrolon; Erta PC; Xantar; Panlite; Calibre;
PEBD	Polyéthylène Basse Densité	Lupolan, Vestolen, Hostalengur.
PEHD	Polyéthylène Haute Densité	Ertalen HD, Cesticolor, Cestidur, Cestitech, Cestiguide, Cestishield, Borolène Cestilite, Ultrawear, Alathon, Alcathène, Baylon, Bluemax, Celene, Cestilène, Dekalen, Dylan, Eltex, Hostalen, Lotrene, Polydur, Robalon, Supralon
PEEK	Polyéther-éthercétone	Victrex-PEEK, Ketron. zellamid 1500
PVC	PVC Polychlorure de vinyle	Armodur, Trovidur, Hostalit, Bréon, Vinoflex, Simona, Astralon, Benvic, Corvic, Ekavyl, Gedevyl, Géon, Irvinyl, Lucoflex, Marvinol, Rhodopas, Sicron, Solvic, Supradur, Trovidur, Vestolit, Vinnol, Vinopac, Welvic.
PI	Polyamide	Kinel, Vespel, Kapton, zellamid 2200.
PMMA	Polyméthacrylate de méthyle	Altuglass, Plexiglass, Casocryl, Transpalite, Perspex (sous forme des feuilles), Orgalan, Sustonat, Jupilon, Campco C119, Lucite, Diakon.
PP	Polypropylène	Ertalène PP, Hostalen PP, Vestalen, Novolen, Napryl, Eltex, Moplen, Coroflex, Daplen, Escon, Lotren P, Noblen, Poly-pro, Propathène, Pro- fax, Propylex, Prylène, Rhiamer PP, Symalen, Trolen, Trovidur PP.

### I-2.3 Classification des polymères

Les polymères sont classés en fonction de leur structure, des propriétés en résultant et de leur comportement à l'échauffement. L'on distingue généralement trois types des

polymères :

\*Thermoplastique (le polymère devient ductile à haute température, thermoplastiques ou plastomères)

\*Thermodurcisseur (le polymère se décompose à haute température sans devenir ductile au préalable, résines thermodurcissables)

\* Elastomérique (le polymère présente déjà à température ambiante un comportement caoutchouc élastique, élastomères) [6].

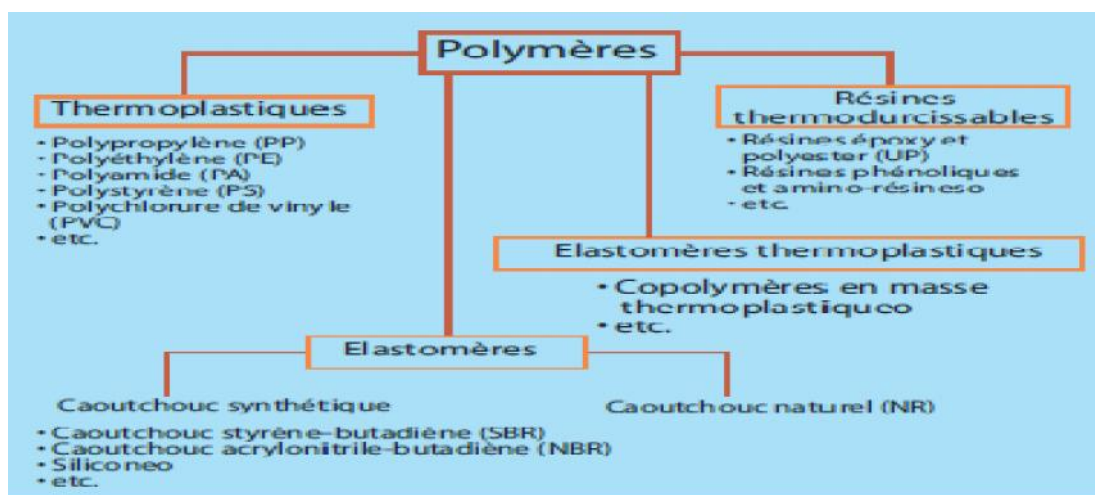


Figure I.1 : Aperçu de polymères [6]

### I-2.3.1 Thermoplastiques

Les thermoplastiques se présentent sous la forme de polymères amorphes et partiellement cristallins. Ils se composent de macromolécules linéaires ou ramifiées, s'amollissent à l'échauffement de manière répétée jusqu'à la fusion et se solidifient par refroidissement. Les thermoplastiques sont soudables. Des produits semi-finis en thermoplastiques durs peuvent largement être formés à chaud. Suivant le domaine d'application, les thermoplastiques se divisent en :

- plastiques de masse**, par ex. polyéthylène (PE), polystyrène (PS), polychlorure de vinyle rigide ou souple (PVC-H, PVC-W) polypropylène (PP), polycarbonate (PC),
- plastiques techniques**, tels que polyamide (PA), polyoxyméthylène (POM),
- polymères hautes performances**, tels que le polyacryléthercétone (PAEK) D'autres thermoplastiques importants sont, par ex., le polyméthylméthacrylate (PMMA – verre acrylique, Plexiglas) et le polytétrafluoréthylène (PTFE – Téflon) [6].

### I-2.3.2 Résines thermodurcissables

Si les résines thermodurcissables sont chauffées, leur comportement mécanique ne change que *modérément*. Ces polymères ne sont pas réticulés avant le traitement

(généralement liquides) et durcissent ensuite par chauffage ou adjonction d'un durcisseur sous leur forme définitive. Ils deviennent alors particulièrement résistants à la chaleur et aux produits chimiques et ne sont plus ductiles. Le phénomène n'est pas reproductible. Ils sont plus durs et plus cassants que les thermoplastiques.

Les résines thermodurcissables ne sont pas soudables, solubles sous la forme durcie dans des solvants organiques et parfois gonflables. Les produits en amont thermodurcissables sont d'une part disponibles comme « matières à mouler » pour traitement via la fusion, puis durcissement thermique, d'autre part, comme « résines composites ou à couler », liquides qui peuvent être traitées à température ambiante et durcies catalytiquement. Exemples de résines thermodurcissables :

- résines phénoliques (PF), amino-résines
- résines polyuréthane (PUR)
- résines époxy (EP), souvent renforcées de fibres de verre, transformées en plastiques renforcés de fibres de verre (GFK)
- résines polyester insaturées (UP) – résines à couler [6]

### I-2.3.3 Elastomères

Les élastomères sont des polymères qui se caractérisent par une grande élasticité au sein d'une large plage de températures. En fonction du type, ils sont plus ou moins élastiques durs ou tendres. Après l'allongement, l'élastomère reprend quasi complètement son état ainsi que sa longueur d'origine.

Le traitement des élastomères précède généralement la réticulation à l'état plastique sous adjonction d'un agent de vulcanisation ou d'un accélérateur de réticulation.

Exemples :

- \* Caoutchouc naturel (NR)
- \* Caoutchouc chloroprène (CR)
- \* Caoutchouc acrylonitrile-butadiène (NBR)
- \* Terpolymère d'éthylène-propylène-diène (EPDM)
- \* Caoutchouc styrène-butadiène (SBR) [6].

### I-2.3.4 Elastomères thermoplastiques (TPE)

Les élastomères thermoplastiques sont des polymères transformables thermoplastiquement avec des propriétés élastomériques. Ils ne sont pas réticulés chimiquement. Les TPE sont généralement des copolymères en masse avec des zones

« dures » et « tendres ». Au-delà d'une température déterminée par la structure chimique, ces polymères sont thermoplastiquement aptes au fluage [6].

### **I-2.4 Plastiques renforcés de fibres**

Les matériaux composites sont composés de plusieurs matériaux, constituant un seul matériau. Les propriétés désirées des différents matériaux sont ainsi réunies dans un seul matériau.

La matière qui dans l'assemblage permet une augmentation de la résistance ou de la dureté, s'appelle renfort, l'autre matière, qui assure la cohésion du corps, s'appelle matrice ou liant. Si le renfort est composé de fibres, il s'agit de matériau composite renforcé de fibres.

Grâce au renforcement, les matériaux composites sont améliorés sur le plan de la résistance, rigidité et dureté. En outre, il est possible d'augmenter en fonction de la combinaison, d'autres propriétés, telles que la conductibilité thermique et électrique, la thermorésistance et la résistance à l'usure. L'effet renforçateur des fibres ainsi que les propriétés mécaniques du matériau composite sont déterminés d'une part par la longueur, le diamètre et la structure chimique des fibres, et d'autre part par la quantité et la position des fibres.

Tous les thermoplastiques et résines durcissables peuvent être utilisés comme matrice, dont les élastomères et les dispersions. Dans la catégorie des thermoplastiques, le polypropylène (PP) et le polyamide (PA) ainsi que PC, PS, PE sont essentiellement utilisés. Pour les résines thermodurcissables, les résines époxy (EP), polyester, de silicone et d'ester de vinyle sont essentiellement utilisées en raison de leurs propriétés mécaniques et électriques exceptionnelles ainsi que leurs excellentes propriétés de mouillage.

Un grand avantage des matériaux composites fibreux réside dans le fait que l'utilisateur peut former une matière spécialement pour son application grâce à une intégration appropriée des fibres dans la matrice. Outre le verre, fibre classique, les fibres de carbone, comparativement plus onéreuses, sont essentiellement ajoutées au polymère de base [6].

### I-2.4.1 Plastiques renforcés de fibres de verre



**Figure I.2** : Tige en plastique renforcé de fibre de verre (**GRP**), noir

Les polymères renforcés de fibres de verre sont essentiellement composés des résines thermodurcissables polyester ou époxy ainsi que de fibres de verre. Etant donné la manipulation difficile des différentes fibres de verre (densité réduite), on peut les retrouver sous forme d'écheveaux (rovings), tissées, nattées ou en couche. Pendant la fabrication des pièces moulées, le plastique est liquide, puis durci.

Les propriétés des polymères sont déterminées par la résine utilisée et le type de fibres de verre, par le pourcentage de fibres de verre sur le volume global ainsi que par leur disposition. La résistance augmente parallèlement à la teneur en fibres et l'orientation des fibres dans un sens donné [6].

Type de renfort	Teneur en verre [poids-%]	Module d'élasticité [N/mm <sup>2</sup> ]
Fibre de verre-natté	25	6000
	35	8000
	45	10000
Fibre de verre-tissé	45	12000
	55	16000
	65	20000
Fibre de verre-roving	75	40000

**Tableau I-2** : Relation entre le module d'élasticité de la teneur en verre et le type de renfort pour les résines polyester renforcées de fibres de verre [6].

### I-2.4.2 Plastiques renforcés de fibres de carbone (CFK)

Les pièces en polymère renforcé de fibres de carbone se composent d'une fibre thermorésistante, très dure et déterminant la résistance (renforts) basée sur du carbone, qui est intégrée dans une matrice ductile présentant une résistance moindre à

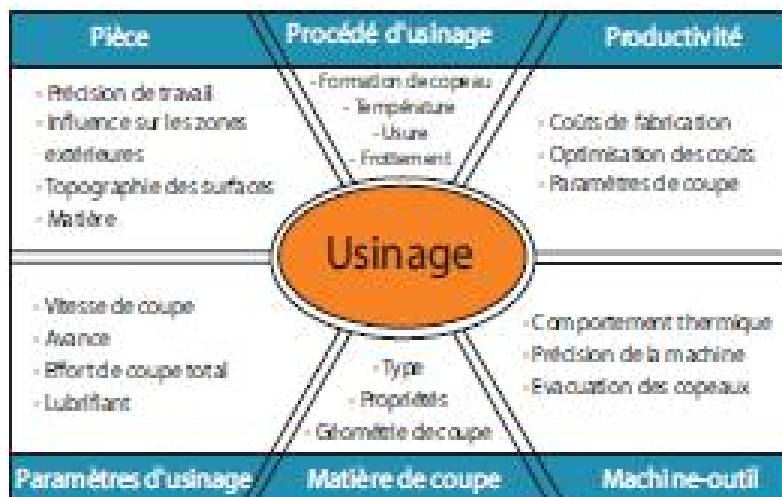
la température. Les différentes fibres de carbone peuvent ensuite être associées de diverses manières aux matrices polymères en question. Cela engendre une diversité de combinaisons de matières avec des propriétés partiellement très différentes l'une de l'autre. Ces matières sont résumées sous l'abréviation « CFK ».

Pour utiliser de manière optimale les propriétés exceptionnelles, les fibres de carbone sont aujourd'hui normalement utilisées comme filament, pour une teneur volumétrique en fibres de 50 à 65%.

D'abord, les polymères renforcés de fibres de carbone sont utilisés dans le secteur de la navigation aérienne (p. ex. boîtiers de dérives, entretoises, volets de freinage) ou également dans la construction mécanique, où des tâches doivent être remplies, telles que la réduction de l'inertie de masse ou un bon comportement d'amortissement (composants mécaniques hautement dynamiques). Ces matières sont également utilisées dans le secteur des loisirs et des articles de sport (raquettes de tennis, planches de surf, cadres de vélos) [6].

### I-3 Définition de l'usinabilité

Un ensemble de facteurs, issus de l'interaction entre pièce, outil, machine-outil et processus de formation de copeaux proprement dit, sont déterminants pour le résultat d'un travail d'usinage par enlèvement de copeaux. **La figure I.3** résume quelques-uns de ces facteurs d'influence possibles [6].



**Figure I.3** Facteurs d'influence sur le processus de travail par enlèvement de copeaux [6].

### **I-3.1 Critères d'évaluation de l'usinabilité**

Les critères pouvant permettre d'évaluer l'usinabilité d'un matériau sont nombreux et dépendent non seulement du type d'opération, mais aussi de l'usineur. Cette notion d'usinabilité reste néanmoins toujours liée à la production au moindre coût. Les principaux paramètres pris en compte lors de la caractérisation de l'usinabilité sont:

- La durée de vie des outils, éventuellement l'évolution de leurs usures au cours du temps ;
- les conditions de coupe;
- les efforts de coupe et la puissance consommée par la coupe;
- le fractionnement du copeau ;
- l'état de surface obtenu sur la pièce, dont la rugosité;
- la productivité, qui est liée à la plupart des paramètres ci-dessus cités [1].

### **I-3.2 Facteurs influençant l'usinabilité**

#### **I-3.2.1 La résistance mécanique**

Dans les polymères les éléments d'addition jouent un rôle significatif comme dans le cas des polyamides PA6, l'ajout de 1% de charge bisulfure de molybdène, en comparaison avec le PA6 non chargé, les propriétés de glissement sont améliorées avec une résistance à la compression légèrement supérieure.

Le PA6 possède aussi une meilleure résistance à l'usure et une abrasion plus faible que le PA6 non chargé. L'absorption d'humidité est aussi plus faible, Donc on peut avoir une usinabilité meilleure dans l'état le plus dur. On rencontre alors des difficultés de trouver les conditions d'usinage due au changement brutal de caractéristique de la matière chargé avec des additifs [1].

#### **I-3.2.2 Les caractéristiques thermiques**

Le tableau I-3 présente la conductivité thermique de quelques polymères comparé avec d'autres matériaux. Cette caractéristique est en relation étroite avec l'usinabilité car les polymères qui ont une conductivité réduite ne dissipent pas rapidement la chaleur générée lors de la coupe, ce qui conduit à la concentration de la chaleur au niveau du contact pièce-outil-copeau et par conséquent à la diminution de la qualité de surface usinée par l'effet de l'apport du métal sur l'outil de coupe [1].

Matériau	Conductivité thermique W/(m.°K)
Diamant	900 ~ 2320
Argent	429
Cuivre	380
Or	318
Aluminium	200
Acier inoxydable	12,11 ~ 45,0
Zellamid 250 XPE	0,27
PEEK	0,25
Zellamid 202 PA6	0,23

**Tableau I-3** Valeurs approximatives de la conductivité thermique  
Pour une série de matériaux [1].

#### I-4 Généralités sur l'usinage des polymères

Les caractéristiques physiques des polymères (point de fusion et la conductibilité thermique), ont des valeurs inférieures à celles des métaux et il est donc nécessaire de limiter au minimum la chaleur engendrée en diminuant la friction. Des outils émoussés ou bien des tranchants qui raclent plutôt qu'ils ne coupent provoquent un dégagement de chaleur excessif, qui risque de générer des contraintes internes préjudiciables à la géométrie et à la fiabilité de la pièce finie. Les arêtes des outils doivent donc être toujours parfaitement affûtées et la dépouille doit être suffisante pour garantir que seule l'arête de coupe soit en contact avec la pièce usinée. On obtient généralement les meilleurs résultats en travaillant à très grandes vitesses avec une faible avance et des outils bien affûtés et lisses. Pour les pièces de faibles sections, une passe trop profonde est susceptible de provoquer son fléchissement. L'utilisation d'une lunette est conseillée pour les pièces assez longues, et pour les plastiques ayant un point de fusion bas, la lunette sera équipée de galets car des sabots risqueraient de porter la pièce en fusion. L'emploi d'un fluide de refroidissement est indispensable pour la réalisation de ces pièces [1].

##### I-4.1 Comportement des polymères vis-à-vis de l'usinage

Les caractéristiques des polymères qui, de près ou de loin, ont une influence sur les opérations d'usinage, sont les suivantes :

**I-4.1.1 le module d'élasticité et la dureté** : les polymères sont très souples par rapport aux aciers (modules compris entre 1 000 et 20 000 (MPa)) 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 ;



**I-4.1.2 les contraintes internes** : les pièces en polymère contiennent souvent des contraintes internes après moulage, dues, en particulier, au *retrait de la matière* passant de l'état liquide à l'état solide. Il arrive fréquemment que l'usinage modifie la répartition de ces contraintes. Des précautions doivent par conséquent être prises pour qu'il n'y ait pas d'accumulation de contraintes susceptibles d'entraîner des fissurations. Un des remèdes peut être de pratiquer un recuit des pièces après moulage. La vitesse de refroidissement est un élément essentiel pour réduire les contraintes internes. Plus la température de recuit est élevée, plus la baisse de température doit être lente (tableau I.4) [7].

<b>Tableau I.4 – Exemples de conditions de recuit sur plaques extrudées [7]</b>			
<b>Matière</b>	<b>Température (°C)</b>	<b>Durée de chauffage selon épaisseur</b>	<b>Refroidissement</b>
Polyéthylène – HD	120	2 h pour 20 mm à 7 h pour 120 mm	Baisse de 10 °C  par heure et retirer les pièces à environ 25 °C
Polypropylène	140		
PVDF	150	1,5 h pour 10 mm à 2,5 h pour 30 mm	

Parfois, l'usinage est réalisé après dégrossissage d'une ébauche. Dans ce cas, l'ébauche est généralement sans contraintes car celles-ci sont libérées lors du dégrossissage ;

#### I-4.1.3 La dilatation et la conductivité thermique :

Les matières polymères non chargées ont des coefficients de dilatation thermique généralement compris entre 50 et 200 mm/m.K. Ce sont des matériaux isolants, sauf ceux chargés de particules métalliques ou de fibres de carbone. La combinaison de ces

deux caractéristiques, grande dilatation thermique et faible conductivité, fait que la chaleur engendrée par l'opération d'usinage reste concentrée sur la zone usinée et entraîne une déformation thermique importante, voire un risque de dégradation thermique [7].

#### **I-4.1.4 l'usure des outils :**

une grande partie des polymères non chargés ont un comportement autolubrifiant et ne créent pas d'usure importante des outils. Par contre, ceux qui comportent des charges minérales (verre) ont tendance à accentuer l'usure des outils traditionnels d'usinage par enlèvement de copeaux [7].

**I-4.1.5 l'hygrométrie :** certains polymères absorbent un taux important d'humidité (polyamides, par exemple). Les phénomènes d'absorption ne sont pas instantanés mais se produisent au bout de quelques minutes, voire de quelques heures. Cela modifie les caractéristiques mécaniques et dimensionnelles\*. Il faut donc tenir compte du comportement du polymère en présence d'humidité, de la durée d'usinage, de la présence ou non d'un liquide de refroidissement, de l'ambiance hygrométrique de l'atelier, du fait que l'échauffement dû à l'usinage va sécher le matériau en surface [7]

**I-4.1.6 l'électrostatique :** certains polymères développent des charges électrostatiques superficielles importantes par frottement, qui attirent les copeaux ou la poudre issus de l'usinage [7].

### **I-4.2 Spécificité du procédé**

Les polymères ne sont généralement pas conducteurs d'électricité, l'usinage par électroérosion est donc impossible. D'autre part, l'usinage par ultrasons convient aux matériaux durs, ce qui n'est pas le cas des plastiques. Cela limite les procédés à l'usinage conventionnel, souvent qualifié d'usinage par enlèvement de copeaux et à la découpe par laser ou au jet d'eau.

L'usinage par enlèvement de copeaux des polymères présente les caractéristiques générales suivantes [7].

#### **I-4.2.1 Matériaux d'outils**

\* **Aciers rapides :** ce sont les moins chers à l'achat ; ils ont une durée de vie moins longue, surtout avec les matériaux renforcés de fibres de verre. L'acier rapide est un

acier allié comportant du carbone, du chrome et du tungstène (parfois du molybdène, du vanadium et du cobalt).

\* **Carbures** : ils ont une plus grande résistance à l'abrasion que les aciers rapides et sont d'un bon rapport prix/usure. L'outil peut être entièrement en carbure de tungstène (de cobalt, de titane ou de tantale parfois) ou plus souvent, car moins cher, constitué d'une plaquette rapportée et fixée sur un support métallique classique.

\* **Diamants** : ce sont les plus chers et ils sont plutôt réservés à l'usinage de composites très abrasifs.

De nombreux développements sont en cours pour mettre au point des outils plus résistants à l'usure possédant des revêtements à base de nitrure de titane, par exemple [7].

#### I-4.2.2 Refroidissement

L'eau, sous forme de jet liquide continu ou vaporisé en fines gouttelettes.

Le mélange eau-huile soluble (dans la mesure où l'huile est compatible avec le plastique).

L'air, sous forme d'air comprimé soufflé ou par aspiration.

**NB** : Dans ce 2<sup>ème</sup> cas, il s'agit d'usinage créant de la poudre ou des copeaux très petits ; on a alors l'avantage de les récupérer dès leur formation.

Parfois, le refroidissement n'est pas nécessaire. C'est le cas de certains usinages des polymères à faible coefficient de frottement (polyéthylène, par exemple). 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 [7]

#### I-4.2.3 Fixation des pièces

La précaution essentielle consiste à éviter toute déformation. Il faut penser 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 que les métaux et fléchissent davantage que ces derniers ; c'est pourquoi les profondeurs de passe et les avances ne doivent pas être excessives.

On obtient généralement les meilleurs résultats en travaillant à très grande vitesse avec une faible avance et des outils bien affûtés et lisses [7].

#### I-4.2.4 Tolérances dimensionnelles

Les mesures des cotes doivent toujours être effectuées après retour de la pièce à la température ambiante. Une tolérance de 0,1 à 0,2 % de la cote nominale est accessible sans précautions spéciales (**tableau I-5**) [7].

**Tableau I.5.** Tolérances accessibles en conditions normales [7].

Dimensions (mm)	Tolérance (mm)			
	tournage	fraisage	rabotage	perçage
< 25	0,04	0,05	0,1	0,05
25 à 50	0,05	0,08	0,15	–
50 à 100	0,08	0,1	–	–
100 à 300	0,1	0,15	–	–
> 300	0,15 à 0,3	0,18 à 0,25	–	–

#### I-4.2.5 Hygiène et sécurité

L'usinage de certains polymères peut créer un seul et unique copeau non fragmenté.

À l'inverse, l'usinage de ceux très chargés en fibres de verre produit une poussière qui peut provoquer des risques pour l'opérateur et des dégradations sur les machines (rayures des glissières).

D'autre part, l'échauffement des polymères pendant l'usinage peut générer un dégagement de gaz, en très petite quantité, mais qui à la longue peut s'avérer nocif pour l'opérateur (exemple le polyoxyméthylène dégage du formol, le PVC dégage des composés chlorés). Des aspirations efficaces sont alors impérativement recommandées. Il y a lieu, en cas de doute, de se renseigner sur les risques encourus et les précautions à prendre auprès de la Caisse régionale d'assurance maladie ou de l'Institut national de recherche et sécurité [7].

### I-5 Usinage conventionnel des polymères

Les polymères s'usinent bien avec des outils affûtés. Il faut s'efforcer d'obtenir une profondeur de passe aussi grande que possible avec une faible avance. Un léger arrondi du profil de l'arête de coupe évite la production de rainures à arête vive sur la surface de la pièce. Un refroidissement est souvent inutile. Il suffit, le cas échéant, de souffler de l'air comprimé sur le point de coupe. Les aciers rapides usuels satisfont à la plupart des exigences. L'emploi de plaquettes rapportées en métal dur fritté n'offre

des avantages que dans des cas particuliers, notamment pour des quantités importantes, des tolérances serrées, ou des plastiques contenant des charges minérales ou des fibres de verre [7].

### I-5.1 Tournage

Le tournage ne présente pas de difficultés particulières. Comme pour les autres techniques d'usinage, il faut veiller au choix des outils, à leur bon affûtage, au respect des vitesses de coupe et d'avance. Dans la majorité des cas, pour les matériaux thermoplastiques, les copeaux sont longs et doivent être rapidement dégagés pour éviter qu'ils s'enroulent sur les pièces. Pour les matériaux thermodurcissables, les copeaux sont courts avec de la poussière de résine. Dans ce cas, une aspiration efficace est nécessaire, voire obligatoire [8].

La figure I. 4 définit les différents angles d'un outil de tour. On trouve souvent un vocabulaire légèrement différent selon les documentations .Les autres paramètres d'usinage sont (tableau I.6) [7]:

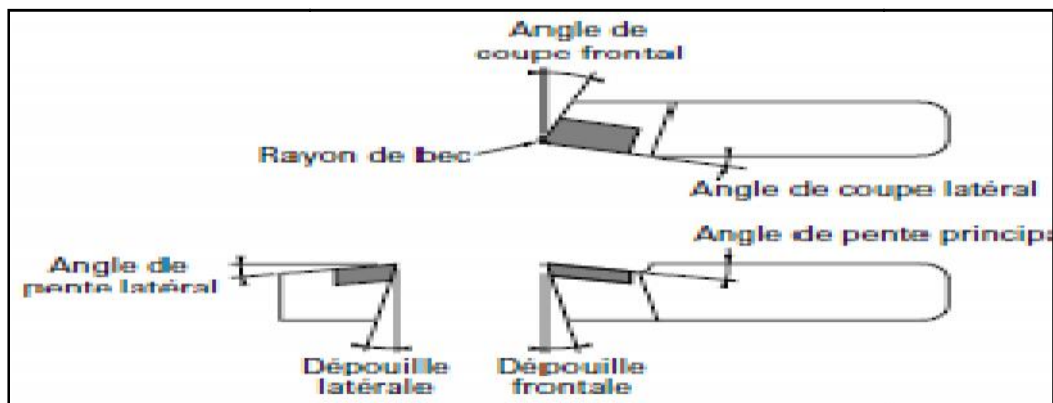


Figure I.4 – Géométrie type d'un outil de tournage [7]

Tableau I.6 : tournage des polyamides [8]

	Angle de dépouille $\alpha(^{\circ})$	Pente d'affûtage $\gamma(^{\circ})$	Vitesse de coupe V (m/mn)	Avance S (mm/Rev)	Angle d'arête $\varphi(^{\circ})$
PA 6 / PA 66	5 - 15	0 - 10	50 - 150	0,05 - 0,5	0 - 45
PA 66 GF30	5 - 15	0 - 10	100 - 200	0,05 - 0,3	0 - 45
PA 12	10-20	5 - 8	400 - 500	0,08 - 1	10 - 20
PA 4-6	5 - 15	0 - 10	50 - 150	0,05 - 0,5	0 - 45

— l'avance : déplacement de l'outil en millimètres par tour de rotation de la pièce ;

- *la profondeur de passe* : épaisseur de matière enlevée par l'outil en un passage ;
- *la vitesse de coupe* : vitesse linéaire de rotation de la pièce.

## I-5.2 Fraisage

Pour réaliser un bon fraisage, il est conseillé d'utiliser des fraises à plaquettes rapportées qui favorisent l'évacuation des copeaux et restent affûtées et opérationnelles plus longtemps. [8]

**Tableau I.7** : fraisage des polyamides [8]

	Angle de dépouille $\alpha$	Pente d'affûtage $\gamma$	Vitesse de coupe V (m/mn)	Avance S (mm/Rev)
<b>PA 6 / PA 66</b>	5 - 15	0 - 15	200 - 500	$\leq 0,05$
<b>PA 66 GF30</b>	5 - 15	0 - 15	50 - 150	$\leq 0,05$
<b>PA 12</b>	5 - 10	10 - 15	200 - 400	$\leq 0,05$
<b>PA 4-6</b>	5 - 15	0 - 15	200 - 500	$\leq 0,05$

## I-5.3 Perçage

Le perçage est une opération délicate car il entraîne un échauffement rapide du matériau avec la génération de contraintes internes.

Les forets en acier rapide conviennent pour le perçage des matériaux synthétiques mais génèrent rapidement un échauffement important. Pour limiter cet échauffement, il est nécessaire d'utiliser un réfrigérant et de dégager régulièrement le foret (déburrage) pour évacuer les copeaux, surtout dans le cas de perçage profond.

Pour le forage de trous de grand diamètre, il est conseillé :

- D'utiliser un foret à lame affinée pour limiter la friction en fond de perçage, et par conséquent l'échauffement qui peut être à l'origine de la création de contraintes internes jusqu'à l'éclatement des ébauches.
- de procéder par étape en réalisant un avant trou (maxi 15 mm), puis en agrandissant progressivement avec des forets de diamètres de plus en plus gros et/ou avec un grain d'alésage 1 point à col de cygne jusqu'au diamètre final.

Pour des matériaux comme le PA66GF30, le PETP, le PEEK, le PPS, il est recommandé de percer par carottage avec un outil à lame plate et rigide dont l'arête de coupe est exactement à hauteur du centre.

Dans le cas de trous débouchant, la vitesse d'avance doit être réduite en fin de coupe pour éviter une sortie brutale et éviter les bavures et les éclats. [8]

**Tableau I.8** : perçage des polyamides [8]

	Angle de dépouille $\alpha$ (°)	Pente d'affûtage $\gamma$ (°)	Vitesse de coupe V (m/mn)	Avance S (mm/Rev)	Angle de pointe $\varphi$ (°)
PA 6 / PA 66	10 - 15	3 - 5	50 - 100	0,1 – 0,3	90 - 120
PA 66 GF30	5 - 10	3 - 5	50 - 80	0,1 – 0,3	90 - 120
PA 12	10 - 20	3 - 5	20 - 50	0,1 – 0,3	90 - 120
PA 4-6	10 - 15	3 - 5	50 - 100	0,1 – 0,3	90 - 120

### I-5.4 Sciage

Pour le sciage, il est possible d'utiliser des scies à ruban, des scies circulaires (de préférence) ou des scies alternatives. Les dents doivent être bien espacées et la voie suffisante pour permettre la bonne évacuation des copeaux. Elles doivent être bien affûtées pour réduire la friction et l'échauffement consécutif, pour éviter le serrage à l'arrière de l'arête de coupe causant un échauffement pouvant entraîner le blocage de la scie pendant l'opération de sciage, la pièce doit être convenablement maintenue pour éviter les vibrations. [8]

**Tableau I.9** : le sciage a ruban des polyamides [8]

	Angle de dépouille $\alpha$	Pente d'affûtage $\gamma$	Vitesse de coupe V (m/mn)	Pas de denture t (dent/mm)
PA 6 / PA 66	25 - 40	0 - 8	50 - 500	4 - 10
PA 66 GF30	25 - 40	0 - 8	50 - 200	4 - 6
PA 12	30 - 40	5 - 8	500 - 1500	4 - 10
PA 4-6	25 - 40	0 - 8	50 - 500	4 - 10

**Tableau I.10** : le sciage circulaire des polyamides [8]

	Angle de dépouille $\alpha$	Pente d'affûtage $\gamma$	Vitesse de coupe V (m/mn)	Pas de denture t (dent/mm)
PA 6 / PA 66	10 - 15	0 - 15	1000 - 3000	8 - 45
PA 66 GF30	10 - 15	0 - 15	1000 - 3000	8 - 25
PA 12	30 - 40	5 - 8	600 - 1200	6 - 10
PA 4-6	10 - 15	0 - 15	1000 - 3000	8 - 45

### I-5.5 Les efforts de coupe

Les efforts de coupe sont à l'origine des déformations plastiques et donc des élévations de température qui se produisent au cours de la coupe. Pour toutes autres conditions de coupe égales, l'augmentation de la vitesse de coupe ne s'accompagne

pas d'une variation notable des efforts de coupe (10% de baisse environ), alors que l'augmentation de la vitesse d'avance entraîne une augmentation de la valeur de l'effort tangentiel (relation linéaire, l'effort double environ quand la vitesse d'avance double).

### I-5.5.1 Définition et 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, comme montre la figure I-5.

- **F<sub>z</sub> = F<sub>c</sub>**: composante dans le sens de la vitesse de coupe, appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe.
- **F<sub>x</sub> = F<sub>a</sub>**: 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<sub>y</sub> = F<sub>p</sub>**: composante dans le sens perpendiculaire appelée effort de refoulement ou effort radial, n'a aux deux autres, qu'une importance secondaire est disparaît dans le cas de coupe orthogonale pure [1].

#### Rapport des composantes

La résultante de coupe **F<sub>rés</sub>** étant une diagonale de parallélépipède est :

$$F_{rés} = \sqrt{F_X^2 + F_Y^2 + F_Z^2}$$

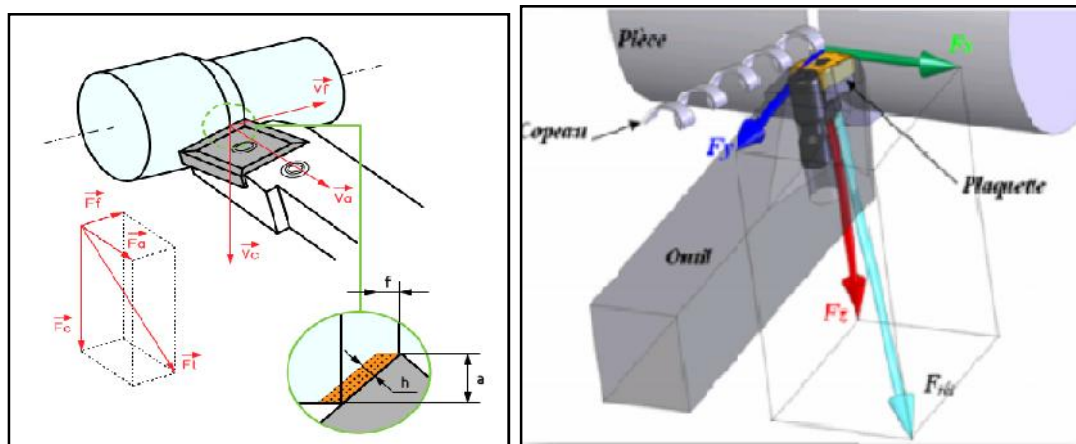


Figure I.5 : Les efforts de coupe en tournage [1]

## I-6 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[29]. 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) [27].

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

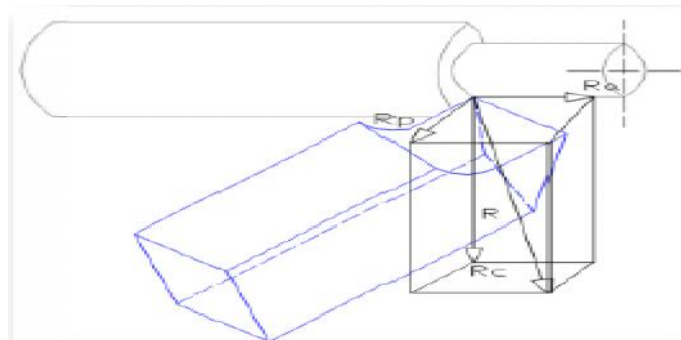
**La hauteur des irrégularités sur dix points Rz :** Moyenne des valeurs absolues des hauteurs, des cinq saillies du profil les plus hautes et des profondeurs des cinq creux du profil les plus bas, à l'intérieur de la longueur de base.

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

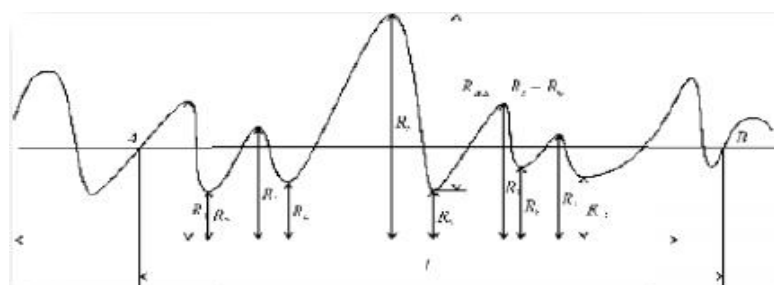
**La hauteur maximale du profil Rt :** Distance entre la ligne des saillies et la ligne des creux à l'intérieur de la longueur de base.

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

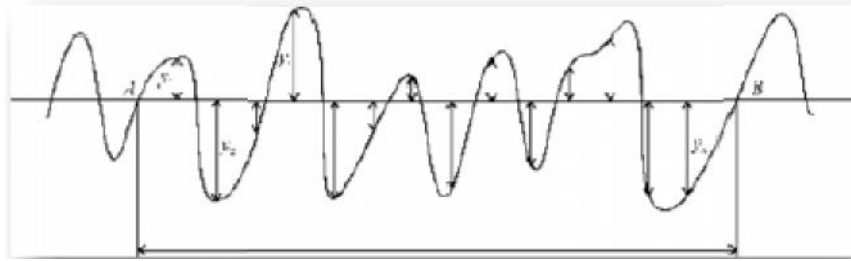
$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx = \frac{1}{n} \sum |y_i|$$



**Figure I-6** critères de rugosité [28].



**Figure I-7** hauteur des irrégularités sur dix points Rz [30].



**Figure I-8** Écart moyen arithmétique du profil Ra [30].

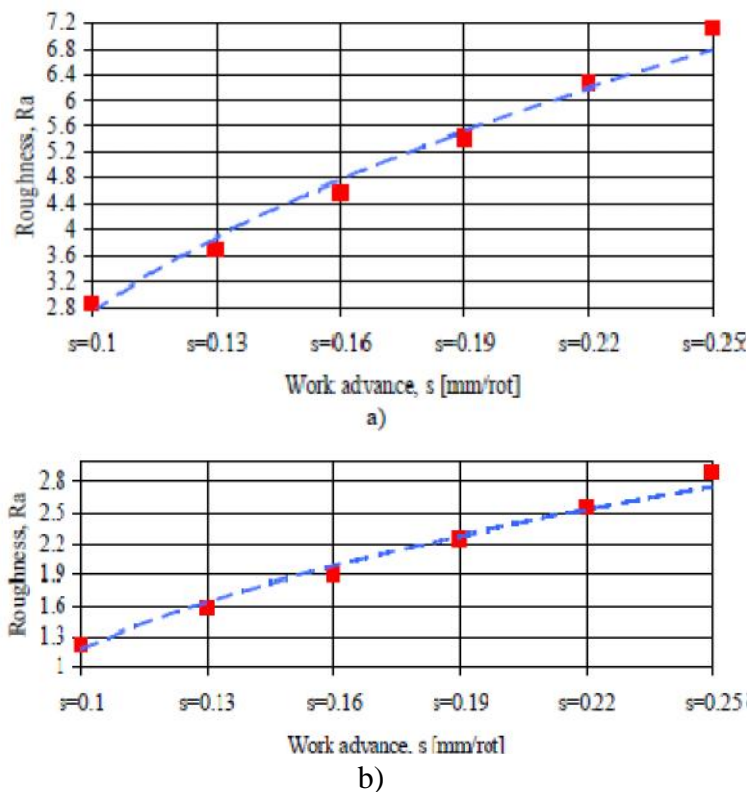
## I-7 Travaux de recherches concernant l'usinage des polymères

Cette partie récapitule la recherche 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 des paramètres de coupe optimaux, l'usure de l'outil, l'influence de différents types de substrats et l'effet de l'usinage à sec sur l'usinabilité de ces polymères. Plusieurs articles ont été publiés dans ces domaines, parmi eux on cite [1] :

**U. Jagtap & al** [9] ont analysé dans un article review les travaux de plusieurs recherches sur l'usinage des polymères. Parmi eux les travaux de **Kobayashi**, **Hirakawa** [10], **Jagtap** [11], **Keresztes** [12], **Salles** [13], **Lazarevic** [14], **Silva** [15], **Mehdi**, [16] **Kini**, [17] **Gupta** [18], **Whereas 6Kumar** [19] et **Hussain** [20]. En conclusion ils ont constaté que pendant le tournage des polymères, la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe ont un maximum d'influence sur la mesure de la rugosité de la surface. L'usinabilité est différente pour les différents types de matières plastiques. Par exemple, l'avance, pour le PA66, augmente la rugosité de la surface, alors qu'il est indifférent à PA66 renforcé. La vitesse de coupe affecte la rugosité de surface du PMMA, mais elle est insensible au PA6. Cette différence des matières plastiques propose la nécessité d'une investigation sur l'usinage de chaque matière plastique séparément. Pour l'outil de diamant utilisé par les chercheurs pendant le tournage du PMMA, ils ont observé que lorsque la vitesse de coupe est inférieure la planéité de surface est préférable, et pendant le tournage de l'UHMWPE, l'avance est directement proportionnelle à la rugosité de surface par contre la vitesse

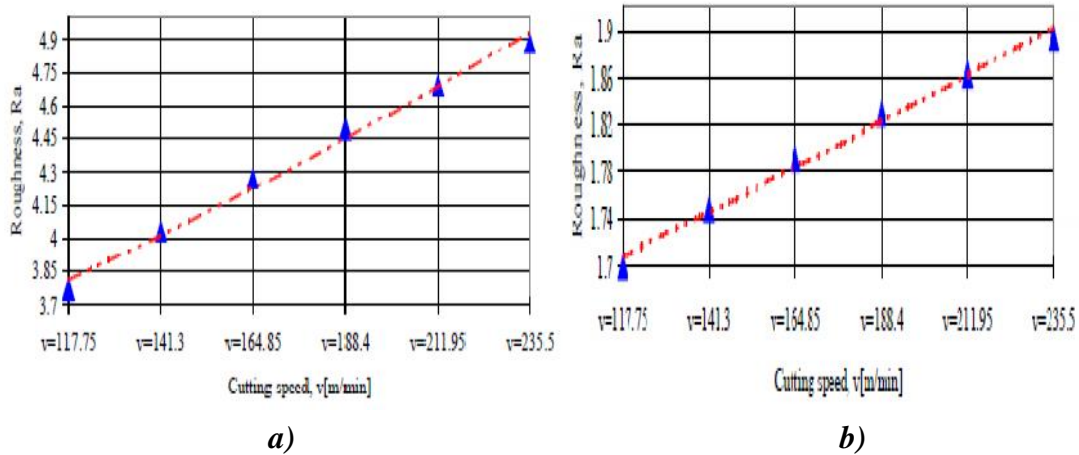
de coupe n'a pas une grande incidence sur la rugosité du surface. Généralement, pendant le tournage du composite GFRP, l'avance est inversement proportionnelle à la rugosité de surface.

**Marin Mo oi & al** [21] ont présenté une recherche sur l'influence de la géométrie de l'outil (rayon de bec) sur l'intégrité de la surface et la précision dimensionnelle lors des opérations chariotage du polyamide PA66–MoS2. Ils ont utilisé deux nuances différentes des outils de coupe 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. L'outil de coupe s'est avéré avoir un effet significatif sur l'intégrité de la surface aussi bien que la précision dimensionnelle. L'auteur a observé que la plus grande influence sur la rugosité de la surface entre les paramètres de coupe est d'avance, suivi par la vitesse de coupe et enfin la profondeur de passe avec une très petite influence. Le rayon de bec de l'outil a une influence positive sur la rugosité de la surface usinée. En augmentant le rayon de bec, les valeurs de la rugosité diminuent jusqu'à une valeur minimale. Ces outils de coupe donnent un bon état de surface à une épaisseur réduite de la couche déformée plastiquement et une meilleure précision dimensionnelle



**Figure I-9** : la relation entre Ra et la vitesse d'avance

a) outil avec rayon de bec=1 ; b) outil avec rayon de bec= 0.4 [21]



**Figure I-10** La relation entre Ra et la vitesse de coupe

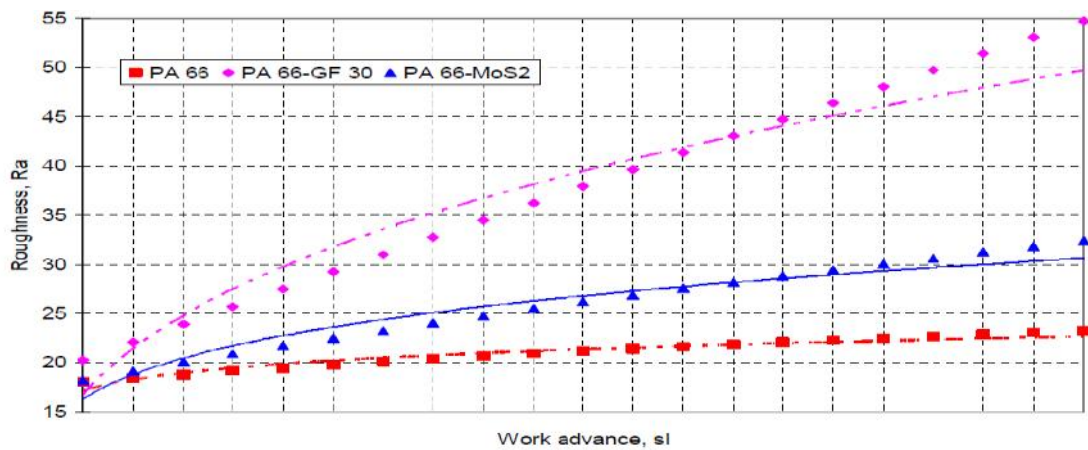
a) outil avec rayon de bec =1 ; b) outil avec rayon de bec =0,4 [21].

**V.N.Gaitonde et al** [22] ont fait une analyse des effets des paramètres de coupe, la vitesse de coupe ( $v$ ) et l'avance par tour ( $f$ ) sur des aspects d'usinabilité, tels que l'effort de coupe ( $F_c$ ), rugosité de la surface ( $R_a$ ), effort de coupe spécifique ( $K_s$ ), et puissance ( $p$ ) pendant le micro-usinage du polyamide avec 30% des fibres (PA66 GF30) avec l'outil de PCD, la méthodologie de surface de réponse (RSM) a été employée. Les résultats des expériences de micro-usinage trouvés par les auteurs montrent :

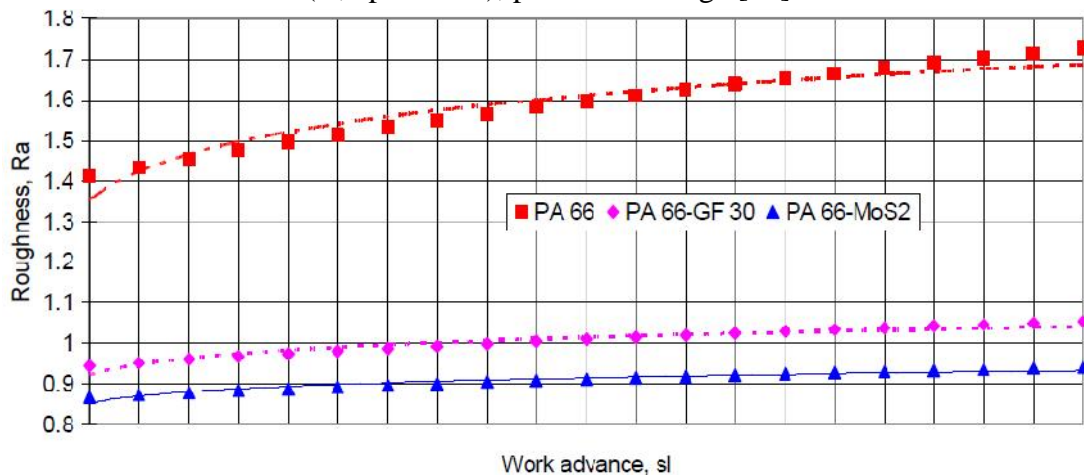
- 1) L'analyse de la variance (ANOVA) indique que les modèles quadratiques d'usinabilité sont proportionnés à l'intervalle de confiance de 99%.
- 2) L'effort de coupe augmente avec l'avance par tour pour une vitesse de coupe fixe. De plus, l'effort de coupe diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe. L'effort de coupe est sensible à des valeurs plus élevées d'avance par tour par rapport à des valeurs plus basses de vitesse de coupe.
- 3) la rugosité de la surface diminue avec des valeurs plus basses d'avance et des valeurs plus élevées de vitesse de coupe.
- 4) l'effort de coupe spécifique est minimal à une avance de 60 microns/rev et d'une vitesse de coupe de 200 m/min.
- 5) Pour réduire la puissance en minimum il faut prendre des valeurs plus basses possibles de vitesse de coupe et d'avance.

**Cristescu et al** [23] ont présenté une étude sur l'influence des éléments d'additions

sur la rugosité de la surface usinée lors du chariotage longitudinal des certaines polyamides. Les types de polyamide étudiés sont: PA66, PA66–GF30 et PA66MoS2 (PA avec MoS2). Ils ont observé que le polyamide PA66 donne des bons résultats en tournage longitudinale, ainsi les éléments d’additions supplémentaires à ce polyamide influencent négativement sur la qualité de surface dans le cas d’ébauchage. La différence entre les valeurs moyennes approximatives de l’avances sont, 42% vis-à-vis de la PA 66-GF30 et de 18% pour le PA66MoS2, figure I-11. 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 I-12. Pour obtenir un meilleur état de surface des polyamides l’utilisation des adjuvants comme le molybdène et phosphore sont conseillés. Si la qualité de surface réalisée n’est pas importante, il est préférable d’utiliser le PA66GF30

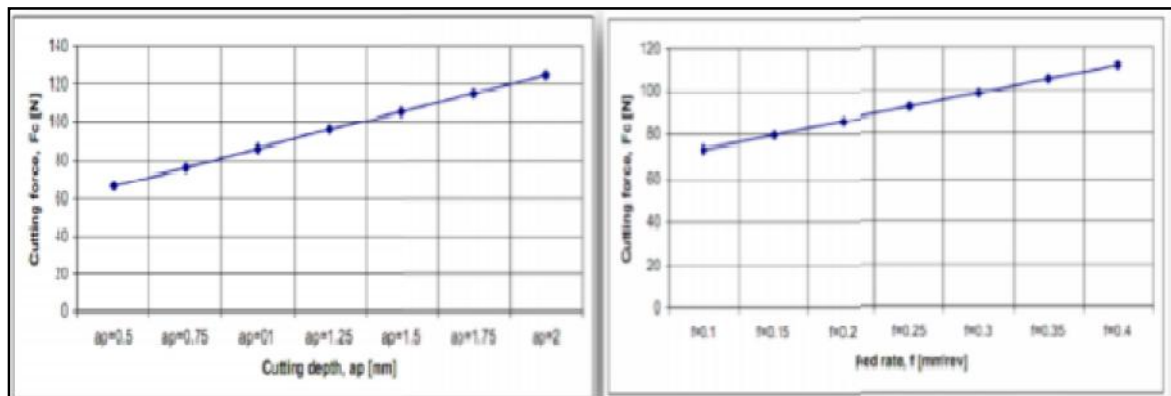


**Figure I-11** Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe ( $V, a_p = \text{const}$ ), pour l'ébauchage [23].

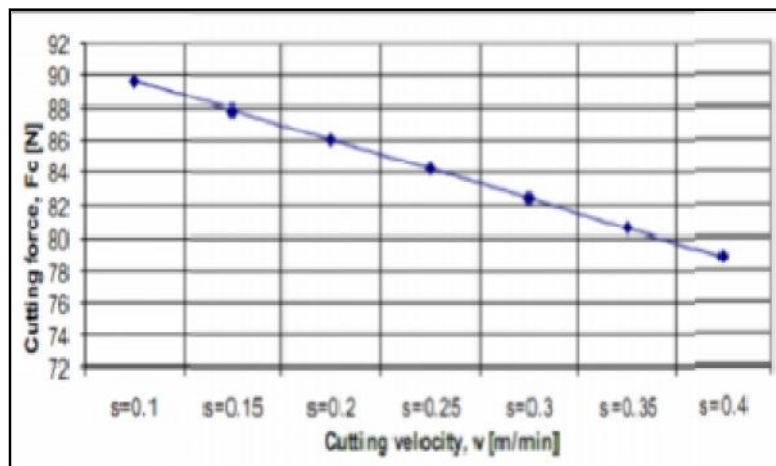


**Figure I-12** Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse d'avance Pour tournage de finition [23].

**Marin Mo oi**, [24] a présenté une étude sur l'influence des paramètres et régime de coupe sur l'effort de coupe principal produit lors d'usinage de plastique semi extradé PA66 (ERTA) avec un outil en carbures cémentés non-revêtue sans brise-copeaux K15 (code CNMG 12 08 02). Il a utilisé la méthode d'analyse de variance ANOVA pour indiquer l'influence des facteurs de coupe sur l'effort de coupe principale. Il a observé que la plus grande influence sur l'effort de coupe principal entre les paramètres de coupe est successivement la profondeur de passe ( $f$ ) et la vitesse de coupe ( $V_c$ ). La vitesse d'avance La vitesse de coupe a une influence négative sur la force de coupe. En augmentant la vitesse de coupe, les valeurs de la force diminuent, Figure I-13.



a) Force de coupe  $F_c=f$  (la profondeur de passe) Pour ( $f=0.2\text{mm/rev}$ ,  $v=117.75$ )      b) Force de coupe  $F_c f$  (vitesses d'avance) pour ( $a_p=1\text{mm}$ ,  $v=117.75$ )

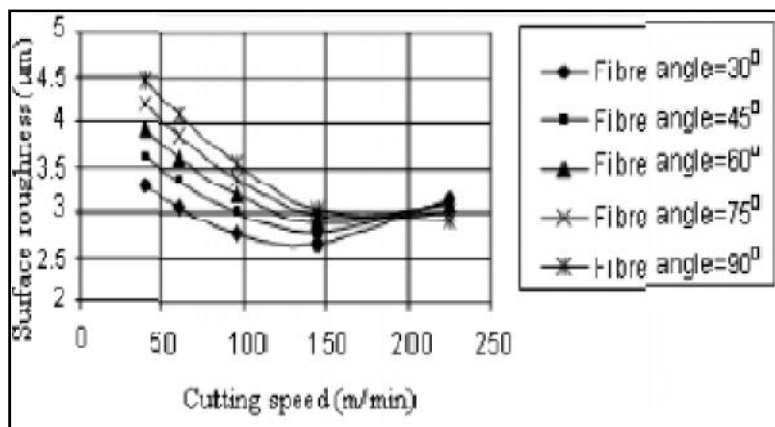


c) Force de coupe  $F_c=f$  (vitesse de coupe) pour ( $a_p=1\text{mm}$ ,  $f=0.2\text{ mm/rev}$ )

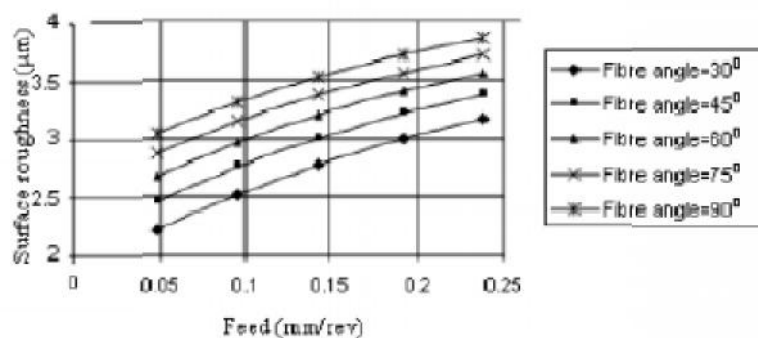
**Figure I-13** influence de paramètre de coupe Sur la l'effort de coupe [24]

Syed A. H. et al [25] ont étudié l'évolution d'orientation des fibres sur la rugosité de surface lors de l'usinage d'un plastique renforcé en fibres de verre carbure K20. Les auteurs ont élaboré des modèles de second ordre FRP par l'outil du de la rugosité en fonction de paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ) et l'angle orientation des fibres ( $\theta$ ) basé sur la méthode de surface de réponse (RSM). Selon les résultats, les auteurs ont observé que la rugosité de surface est minimum pour une vitesse de 147 m/min et une profondeur de 1mm pour différents angles d'orientation ( $\theta$ ), et meilleure dans le cas au la vitesse d'avance et l'angle d'orientation de fibre sont minimum figure I-14.

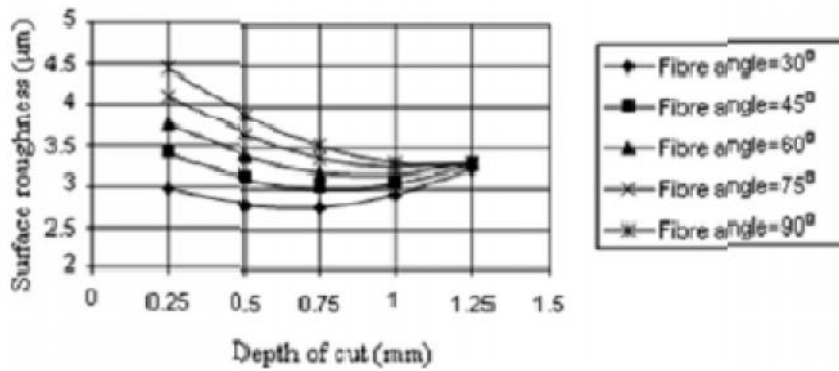
L'avance est le paramètre dominant qui affecte la rugosité de la surface des composés de GFRP, suivie de vitesse de coupe, angle d'orientation de fibre. La profondeur de passe montre un effet minimal sur la rugosité de la surface comparée à d'autres paramètres.



a)  $V_c$  et  $a_p$  constants.



b)  $f$  et  $a_p$  constants.



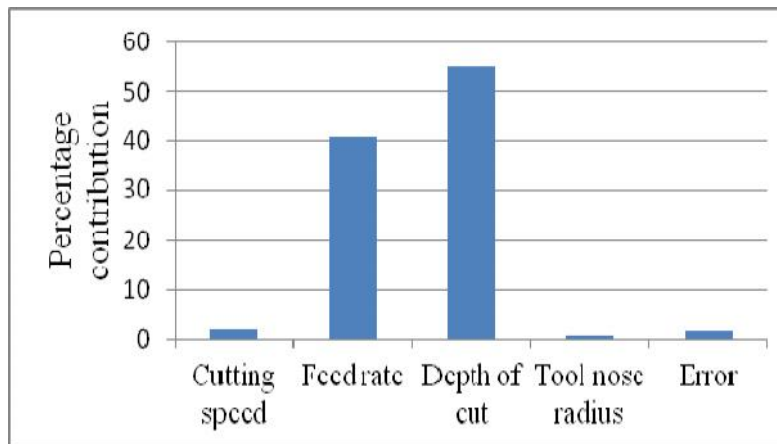
c)  $V_c$  et  $f$  constants.

**Figure I- 14** L'évolution de la rugosité de surface En fonction d'orientation des fibres [25].

**Dragoljub Lazarevi et al** [26] a présenté la méthodologie d'optimisation robuste pour la réduction de l'effort de coupe dans le processus de tournage de polyamide PA-6 on utilisant la méthode de Taguchi. Quatre paramètres de tournage ont été modifiés dans l'expérience, «la vitesse de coupe, l'avance, la profondeur et le rayon de bec ». Sur la base des résultats expérimentaux et l'analyse présentée par l'auteur, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- la profondeur de passe suivie par l'avance est le paramètre de coupe le plus important affectant l'effort de coupe. (Figure I- 15)
- L'effet de la vitesse de coupe est beaucoup plus faible, alors que l'effet du rayon de bec est négligeable.
- Les effets de l'interaction des paramètres de coupe ne sont pas prononcés.
- Les résultats obtenus suggèrent que la vitesse de coupe élevée, l'avance faible et la profondeur de coupe, et plus petit rayon de la plaquette sont bénéfiques pour la réduction de la force de coupe principale dans lors du tournage du polyamide PA-6.





**Figure I- 15** Contribution en pourcentage des paramètres de tournage sur S / N pour l'effort de coupe [26]

### I-7 Conclusion

L'étude bibliographique sur la coupe de métaux réalisée dans ce chapitre, a permis de définir les matériaux polymères, leurs classifications selon plusieurs critères, les différents matériaux de coupes utilisés lors de l'usinage des polymères en tournage. Nous avons présenté aussi quelques travaux de recherche (publications) réalisés sur l'usinage des matériaux polymères et qui s'intéressent à l'usinabilité, la modélisation et l'impact des paramètres de coupe sur les paramètres technologiques d'usinage.

## **II.1 Introduction**

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

Les expériences sont effectuées au laboratoire de coupe des métaux du département de Génie Mécanique et au laboratoire de LMS à l'Université de 08 Mai 1945.

## **II.2 Banc d'essais et équipement de mesure**

Nous présentons dans ce point le matériel utilisé pour l'élaboration des expériences, et Un banc d'essais comportant un tour à charioter et à fileter, une plate forme *Kistler* pour l'acquisition des efforts de coupe, un rugosimètre pour déterminer la rugosité de la pièce usinée.

## **II.3 Matériels utilisés**

### **II.3.1 Machine-outil**

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour parallèle de la société tchèque «**TOS TRENCIN**», modèle **SN 40C** de puissance sur la broche égale à 6,6 KW (*fig. II.1*).

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

Les avances disponibles sur la machine sont : (0,08; 0,10; 0,11; 0,12; 0,14; 0,16; 0,18; 0,20; 0,22; 0,24;...0,8... ; 6,4) mm/tr.



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

### **II.3.2 Le matériau utilisé pour les essais d'usinage**

Le matériau est le **PA66-GF30** ; Les plastiques renforcés de fibres de verre sont essentiellement composés des résines thermodurcissables polyester ou époxy ainsi que de fibres de verre. Etant donné la manipulation difficile des différentes fibres de verre (densité réduite), on peut les retrouver sous forme d'écheveaux, tissées, nattées ou en couche.

Les propriétés des plastiques sont déterminées par la résine utilisée et le type de fibres de verre, par le pourcentage de fibres de verre sur le volume global ainsi que par leur disposition. La résistance augmente parallèlement à la teneur en fibres et l'orientation des fibres dans un sens donné. Leurs caractéristiques techniques sont données par le tableau suivant [6] :

Grâce à ce renforcement par fibres de verre, le matériau fait preuve d'une résistance à la compression et à la rupture améliorée tout comme une bonne résistance mécanique. Ceci confère au matériau une absorption réduite de l'humidité et de ce fait une meilleure stabilité dimensionnelle par rapport aux autres sortes de PA. Il convient particulièrement aux pièces de structure hautement sollicitées. Lors d'utilisation dynamique, il faut prendre en considération le fait que les fibres de verre peuvent attaquer le partenaire d'engrenage.

- haute résistance mécanique
- bonne stabilité dimensionnelle

**Tableau II.1:** caractéristiques techniques PA66-GF30. [6]

Groupe de matière	Symbole	Désignation	EX.de désignation commerciales	Densité (g/cm <sup>3</sup> ) DIN 53479	résistance [N/m <sup>2</sup> ] DIN 53455	Module E[N/m <sup>2</sup> ] DIN 53457	Résilience [K.l/m <sup>2</sup> ] DIN 53453	Coefficient de dilatation Linéique [10e-6/K] DIN 52328	T°D'utilisation [C°]	Résistance chimique a R- Résistant, RR- résistance bi limitée I-instable					Propriétés particule	Utilisation
										Huile minérale	Essence	Trichlor-éthylène	Acide dilués	Bases diluées		
20.2	Plastiques renforcés de fibres															
	PA66-GF30	Polyamide +30% de fibre de verre	Etalon 66-GF30	1.29	110 <sup>2</sup>	5200		-55	-20-10	R	R	R	RR	RR	Excellente résistance a l'usure utilisation à des températures supérieures élevées	Plastique technique Roues dentées pièces de guidage et de couplage pièces de carters

**Tableau II.2 :** Relation entre le module d'élasticité de la teneur en verre et le type de renfort pour les résines polyester renforcées de fibres de verre. [6]

Type de renfort	teneurr enverre(poids-%)	Module d'élasticité [N/mm <sup>2</sup> ]
Fibre de verre-naté	25	6000
	35	8000
	45	10000
Fibre de verre-tissé	45	12000
	55	16000
	65	20000
Fibre de verre-roving	75	40000

Dans notre cas si des fibres de verre-naté entre 25% et 30% avec un Module d'élasticité entre (6000-8000) N/mm<sup>2</sup>



**Figure II.2 :** *Éprouvette utilisée.*

### **II.3.3 porte-outil et plaquette**

#### **II.3.3 .1 Porte-outil**

Pour la réalisation des essais d'usinage, nous avons utilisé un porte outil de désignation SDJCL2020 K11 sur le quel on fixe la plaquette mécaniquement. La plaquette amovible est fermement serrée au moyen d'un fort élément de serrage dans le porte outil, une cale-support en carbure métallique vissé et rectifiée, protège le porte outil et garantit un contact parfait de la plaquette.



**Figure II.3:** Porte outil utilisé.

#### **II.3.3.2 Plaquettes de coupe**

Les plaquettes utilisées sont amovibles de forme carrée Elles sont de marque Sandvik et de désignation (SPUN 12 03 04) et (SPUN 12 03 08) avec deux rayons d'arrondie



**Figure II.4:** plaquette de coupe utilisée

## II.3.4 Equipements de mesure

### II.3.4.1 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe

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

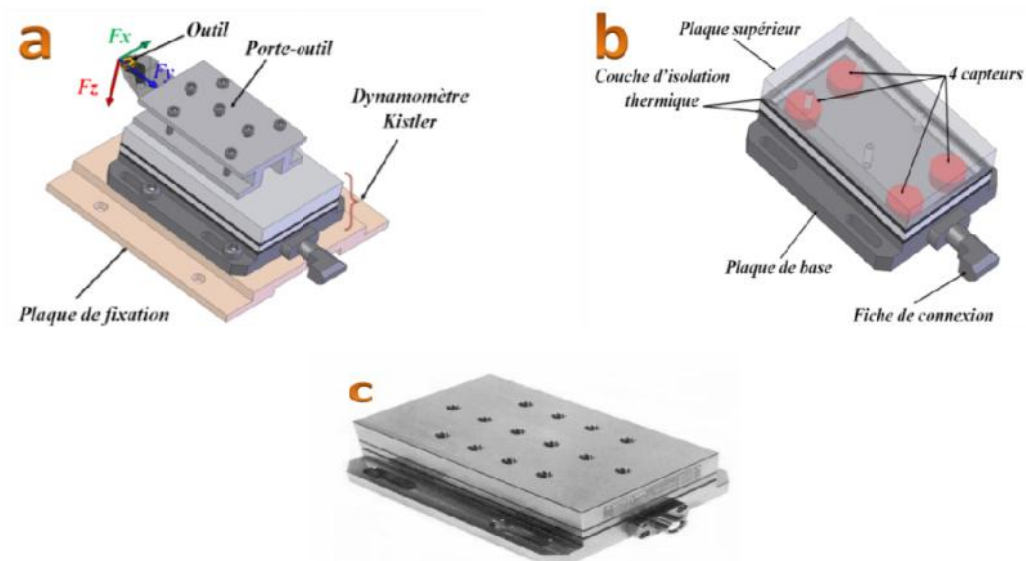
Ce dispositif comporte plusieurs éléments dont on en cite : la plateforme, l'amplificateur de signaux, le PC avec le logiciel et enfin un traceur ou une imprimante pour tracer les courbes.

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil est fixe. Ce dernier est monté sur la plateforme (*fig. II.5a*), appelée aussi table, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine outil. La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure (*fig. II.5c*). Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz (*fig. II.5b*).

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

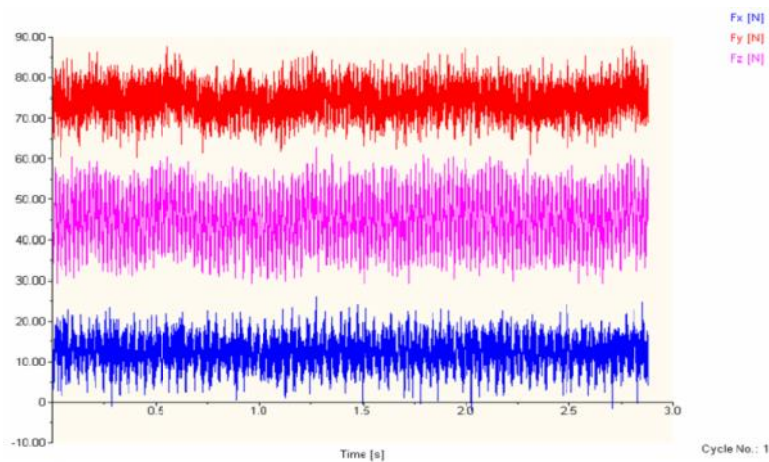
Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (**DYNOWARE**) analyse (*fig II.6*) et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimée en trois composantes :

- force axiale :  $F_x(Fa)$ ;
- force radiale :  $F_y(Fr)$ ;
- force tangentielle :  $F_z(Fv)$ .



**Figure II.5 :** Platte forme KISTLER

- a) Montage du dynamomètre sur la table de la machine. b) Capteur d'effort de coupe KISTLER.  
c) Plate forme d'effort de coupe KISTLER.



**Figure II.6:** Exemple d'acquisition du logiciel « *DYNOWARE* ».

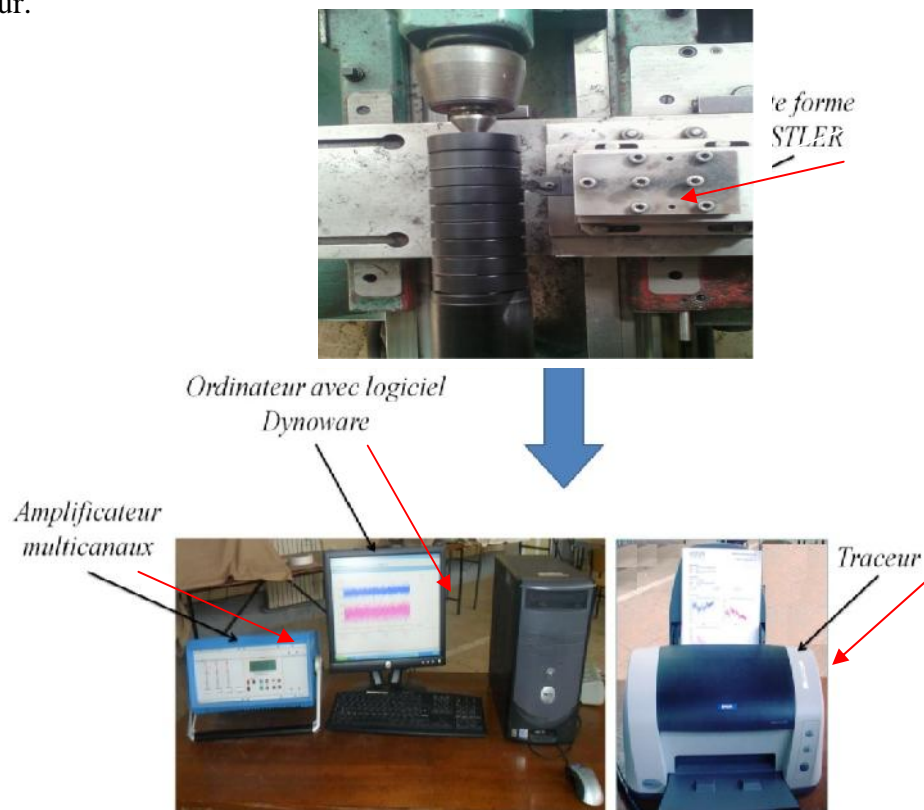
### Chaîne de mesure et caractéristiques

Dynamomètre à trois composantes (9257 B): la porte outil type 9403 vissable est employée pour des outils de tournage avec une section maximum de 26×26 (fig. II.6).

Grande rigidité, fréquence propre très élevée;

- Large gamme de mesure ;
- Bonne linéarité, sans hystérésis;
- Faible interaction (<1%) ;
- Utilisation simple (prêt à l'emploi);

- Construction compacte ;
- Résistant au lubrifiant selon mode de protection IP 67 ;
- Câble spécial à haute isolation de la connexion entre le dynamomètre et l'amplificateur (5m de longueur, 8mm de diamètre) ;
- Amplificateur multi canaux, destiné à la mesure des efforts de coupe ;
- Ordinateur personnel (PC) ;
- Traceur.



**Figure II.7:** Chaîne de mesure des efforts de coupe.

### II.3.4.2 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

Pour la mesure des différents critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_t$  et  $R_z$ ) nous avons utilisé un rugosimètre (2D) SurfTest 201 (Mitutoyo) figure II.8(a)(c). Il est constitué d'une pointe en diamant (palpeur), avec un rayon de pointe de  $5\mu\text{m}$  se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. Afin d'éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce (fig. II.8(b)).





**Figure II.8 :** Mesure de la rugosité.

- a)* Calibrage du rugosimètre    *b)* Mesure de rugosité sans démontage de la pièce  
*c)* Rugosimètre

### II.3.4.3 Autres équipements:

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

## II.4 Planification des expériences

L'expérimentateur, quel que soit son domaine d'étude, est toujours confronté au problème difficile de l'organisation optimale de ses essais. Comment obtenir les bonnes informations dans les meilleurs délais et pour le moindre coût ?

L'utilisation des plans d'expériences, et en particulier les tables orthogonales de Taguchi, a permis la détermination de l'influence des effets simultanés et de l'interaction des paramètres opératoires sur les efforts de coupe et la rugosité de surface.

La technique des plans d'expériences va permettre de répondre à nos exigences. En effet, son principe consiste à faire varier simultanément les niveaux de un ou plusieurs facteurs (qui sont les variables, discrètes ou continues) à chaque essai. Ceci va permettre de diminuer fortement le nombre d'expériences à réaliser tout en

augmentant le nombre de facteurs étudiés, en détectant les interactions entre les facteurs et les optimaux par rapport à une réponse, c'est-à-dire une grandeur utilisée comme critère et en permettant de modéliser facilement les résultats.

Le point délicat dans l'utilisation des plans d'expériences sera donc de minimiser le plus possible le nombre d'expériences à mener sans sacrifier la précision sur les résultats.

Les paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ), ainsi que le rayon de bec ( $r$ ), sont considérés comme paramètres d'entrée. Les efforts de coupe, la rugosité,... représentent les paramètres de sortie. Les essais ont été réalisés suivant la méthode de planification des expériences.

**II.4 .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 quatre facteurs de base ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ,  $r$ ) sur l'optimisation de la rugosité et l'effort de coupe, Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule Suivante:

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

Où:

- N: *nombre d'essais ;*
- q: *nombre de niveaux de variations des facteurs de base ;*
- K: *nombre de facteurs de base.*

Dans notre cas, nous avons quatre facteurs de base ( $q=3$ ) et chaque facteur à trois niveaux de Variation ( $k=4$ ), un facteur qui se change une fois et trois facteurs qui se changent trois fois

Nous avons alors:  $N=3^3+1^2$ , Mais nous allons travailler dans cette étude seulement pour un plan de  $L_{18}$  essais qui représente un plan de *Taguchi*, car il minimise les essais qui sont 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 II- 3.

**Tableau II.3 :** Matrice de planification pour un plan de *Taguchi* mixte

Nombre d'essai	r (mm)	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	1	3	3
4	1	2	1	1
5	1	2	2	2
6	1	2	3	3
7	1	3	1	2
8	1	3	2	3
9	1	3	3	1
10	2	1	1	3
11	2	1	2	1
12	2	1	3	2
13	2	2	1	2
14	2	2	2	3
15	2	2	3	1
16	2	3	1	3
17	2	3	2	1
18	2	3	3	2

## II.5 : Conditions de coupe

Les essais de chariotage sont effectués sur un matériau **PA66-GF30**, La pièce est maintenue en montage mixte. L'usinage est réalisé sans lubrification sous les conditions de coupe indiquées dans le tableau II.4.

**Tableau II.4 :** conditions de coupe

Les paramètres	Valeurs
----------------	---------

<b>r (mm)</b>	04 ; 08
<b>Vc (m/min)</b>	125 ; 175 ; 245
<b>f (mm/tr)</b>	0,08; 0,11; 0,16
<b>ap (mm)</b>	0,8 ; 1,6 ; 2,4

## **II.6. Conclusion**

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

## **II.1 Introduction**

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

Les expériences sont effectuées au laboratoire de coupe des métaux du département de Génie Mécanique et au laboratoire de LMS à l'Université de 08 Mai 1945.

## **II.2 Banc d'essais et équipement de mesure**

Nous présentons dans ce point le matériel utilisé pour l'élaboration des expériences, et Un banc d'essais comportant un tour à charioter et à fileter, une plate forme *Kistler* pour l'acquisition des efforts de coupe, un rugosimètre pour déterminer la rugosité de la pièce usinée.

## **II.3 Matériels utilisés**

### **II.3.1 Machine-outil**

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour parallèle de la société tchèque «**TOS TRENCIN**», modèle **SN 40C** de puissance sur la broche égale à 6,6 KW (*fig. II.1*).

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

Les avances disponibles sur la machine sont : (0,08; 0,10; 0,11; 0,12; 0,14; 0,16; 0,18; 0,20; 0,22; 0,24;...0,8... ; 6,4) mm/tr.



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

### **II.3.2 Le matériau utilisé pour les essais d'usinage**

Le matériau est le **PA66-GF30** ; Les plastiques renforcés de fibres de verre sont essentiellement composés des résines thermodurcissables polyester ou époxy ainsi que de fibres de verre. Etant donné la manipulation difficile des différentes fibres de verre (densité réduite), on peut les retrouver sous forme d'écheveaux, tissées, nattées ou en couche.

Les propriétés des plastiques sont déterminées par la résine utilisée et le type de fibres de verre, par le pourcentage de fibres de verre sur le volume global ainsi que par leur disposition. La résistance augmente parallèlement à la teneur en fibres et l'orientation des fibres dans un sens donné. Leurs caractéristiques techniques sont données par le tableau suivant [6] :

Grâce à ce renforcement par fibres de verre, le matériau fait preuve d'une résistance à la compression et à la rupture améliorée tout comme une bonne résistance mécanique. Ceci confère au matériau une absorption réduite de l'humidité et de ce fait une meilleure stabilité dimensionnelle par rapport aux autres sortes de PA. Il convient particulièrement aux pièces de structure hautement sollicitées. Lors d'utilisation dynamique, il faut prendre en considération le fait que les fibres de verre peuvent attaquer le partenaire d'engrenage.

- haute résistance mécanique
- bonne stabilité dimensionnelle

**Tableau II.1:** caractéristiques techniques PA66-GF30. [6]

Groupe de matière	Symbole	Désignation	EX.de désignation commerciales	Densité (g/cm <sup>3</sup> ) DIN 53479	résistance [N/m <sup>2</sup> ] DIN 53455	Module E[N/m <sup>2</sup> ] DIN 53457	Résilience [K.l/m <sup>2</sup> ] DIN 53453	Coefficient de dilatation Linéique [10e-6/K] DIN 52328	T°D'utilisation [C°]	Résistance chimique a R- Résistant, RR- résistance bi limitée I-instable					Propriétés particule	Utilisation
										Huile minérale	Essence	Trichlor-éthylène	Acide dilués	Bases diluées		
20.2	Plastiques renforcés de fibres															
	PA66-GF30	Polyamide +30% de fibre de verre	Etalon 66-GF30	1.29	110 <sup>2</sup>	5200		-55	-20-10	R	R	R	RR	RR	Excellente résistance a l'usure utilisation à des températures supérieures élevées	Plastique technique Roues dentées pièces de guidage et de couplage pièces de carters

**Tableau II.2 :** Relation entre le module d'élasticité de la teneur en verre et le type de renfort pour les résines polyester renforcées de fibres de verre. [6]

Type de renfort	teneurr enverre(poids-%)	Module d'élasticité [N/mm <sup>2</sup> ]
Fibre de verre-naté	25	6000
	35	8000
	45	10000
Fibre de verre-tissé	45	12000
	55	16000
	65	20000
Fibre de verre-roving	75	40000

Dans notre cas si des fibres de verre-naté entre 25% et 30% avec un Module d'élasticité entre (6000-8000) N/mm<sup>2</sup>



**Figure II.2 :** *Éprouvette utilisée.*

### **II.3.3 porte-outil et plaquette**

#### **II.3.3 .1 Porte-outil**

Pour la réalisation des essais d'usinage, nous avons utilisé un porte outil de désignation SDJCL2020 K11 sur le quel on fixe la plaquette mécaniquement. La plaquette amovible est fermement serrée au moyen d'un fort élément de serrage dans le porte outil, une cale-support en carbure métallique vissé et rectifiée, protège le porte outil et garantit un contact parfait de la plaquette.



**Figure II.3:** Porte outil utilisé.

#### **II.3.3.2 Plaquettes de coupe**

Les plaquettes utilisées sont amovibles de forme carrée Elles sont de marque Sandvik et de désignation (SPUN 12 03 04) et (SPUN 12 03 08) avec deux rayons d'arrondie



**Figure II.4:** plaquette de coupe utilisée



## II.3.4 Equipements de mesure

### II.3.4.1 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe

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

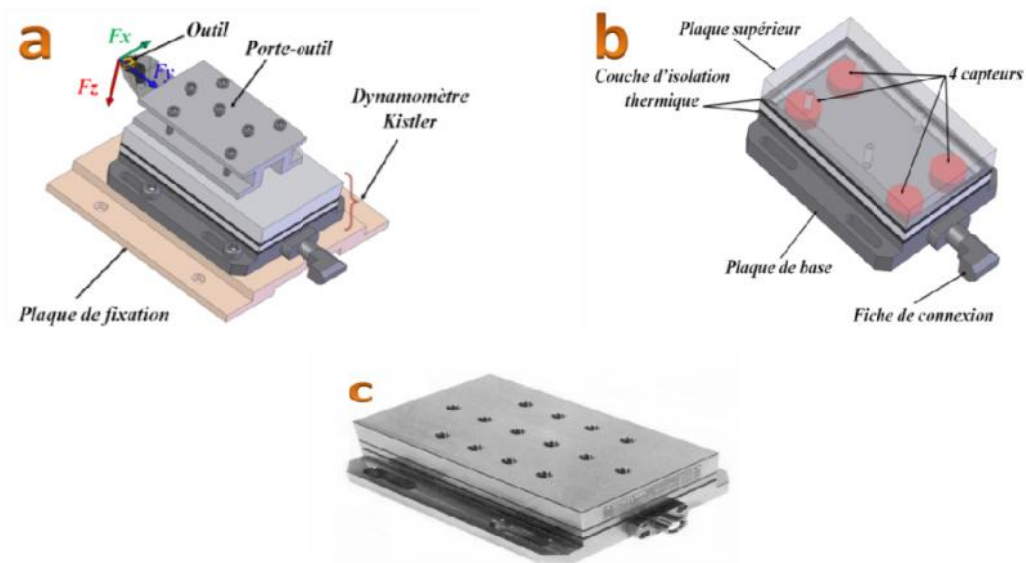
Ce dispositif comporte plusieurs éléments dont on en site : la plateforme, l'amplificateur de signaux, le PC avec le logiciel et enfin un traceur ou une imprimante pour tracer les courbes.

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézo-électrique. Lors du tournage, le mouvement de rotation est généralement attribué à la pièce, par contre l'outil est fixe. Ce dernier est monté sur la plateforme (*fig. II.5a*), appelée aussi table, qui elle-même est fixée sur le chariot transversal de la machine outil. La plateforme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure (*fig. II.5c*),. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz (*fig. II.5b*).

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

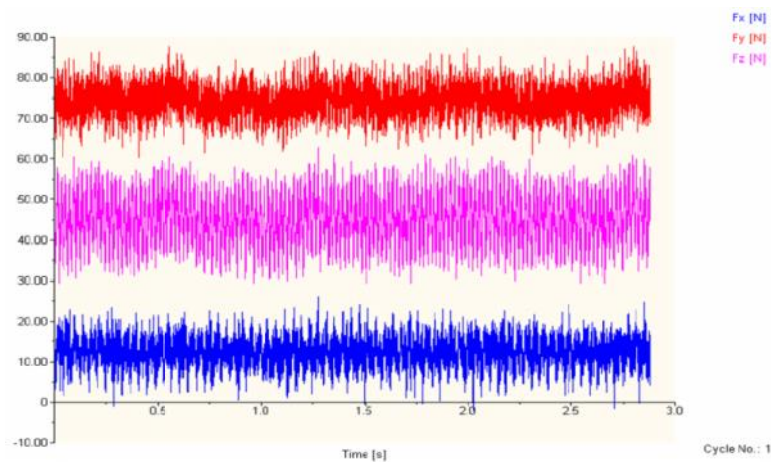
Ces signaux amplifiés sont ensuite acquis par le PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale de ce dernier. Un logiciel (**DYNOWARE**) analyse (*fig II.6*) et traite ces signaux et la force produite lors du processus du tournage est alors directement exprimée en trois composantes :

- force axiale :  $F_x(Fa)$ ;
- force radiale :  $F_y(Fr)$ ;
- force tangentielle :  $F_z(Fv)$ .



**Figure II.5 :** Platte forme KISTLER

- a) Montage du dynamomètre sur la table de la machine. b) Capteur d'effort de coupe KISTLER.  
c) Plate forme d'effort de coupe KISTLER.



**Figure II.6:** Exemple d'acquisition du logiciel « *DYNOWARE* ».

### Chaîne de mesure et caractéristiques

Dynamomètre à trois composantes (9257 B): la porte outil type 9403 *vissable* est employée pour des outils de tournage avec une section maximum de 26×26 (fig. II.6).

Grande rigidité, fréquence propre très élevée;

- Large gamme de mesure ;
- Bonne linéarité, sans hystérésis;
- Faible interaction (<1%) ;
- Utilisation simple (prêt à l'emploi);

- Construction compacte ;
- Résistant au lubrifiant selon mode de protection IP 67 ;
- Câble spécial à haute isolation de la connexion entre le dynamomètre et l'amplificateur (5m de longueur, 8mm de diamètre) ;
- Amplificateur multi canaux, destiné à la mesure des efforts de coupe ;
- Ordinateur personnel (PC) ;
- Traceur.



**Figure II.7:** Chaîne de mesure des efforts de coupe.

### II.3.4.2 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

Pour la mesure des différents critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_t$  et  $R_z$ ) nous avons utilisé un rugosimètre (2D) SurfTest 201 (Mitutoyo) figure II.8(a)(c). Il est constitué d'une pointe en diamant (palpeur), avec un rayon de pointe de  $5\mu\text{m}$  se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. Afin d'éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la machine et sans démontage de la pièce (fig. II.8(b)).



**Figure II.8 :** Mesure de la rugosité.

- b)* Calibrage du rugosimètre    *b)* Mesure de rugosité sans démontage de la pièce  
 C) Rugosimètre

### II.3.4.3 Autres équipements:

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

## II.4 Planification des expériences

L'expérimentateur, quel que soit son domaine d'étude, est toujours confronté au problème difficile de l'organisation optimale de ses essais. Comment obtenir les bonnes informations dans les meilleurs délais et pour le moindre coût ?

L'utilisation des plans d'expériences, et en particulier les tables orthogonales de Taguchi, a permis la détermination de l'influence des effets simultanés et de l'interaction des paramètres opératoires sur les efforts de coupe et la rugosité de surface.

La technique des plans d'expériences va permettre de répondre à nos exigences. En effet, son principe consiste à faire varier simultanément les niveaux de un ou plusieurs facteurs (qui sont les variables, discrètes ou continues) à chaque essai. Ceci va permettre de diminuer fortement le nombre d'expériences à réaliser tout en

augmentant le nombre de facteurs étudiés, en détectant les interactions entre les facteurs et les optimaux par rapport à une réponse, c'est-à-dire une grandeur utilisée comme critère et en permettant de modéliser facilement les résultats.

Le point délicat dans l'utilisation des plans d'expériences sera donc de minimiser le plus possible le nombre d'expériences à mener sans sacrifier la précision sur les résultats.

Les paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ), ainsi que le rayon de bec ( $r$ ), sont considérés comme paramètres d'entrée. Les efforts de coupe, la rugosité,... représentent les paramètres de sortie. Les essais ont été réalisés suivant la méthode de planification des expériences.

#### **II.4 .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 quatre facteurs de base ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ,  $r$ ) sur l'optimisation de la rugosité et l'effort de coupe, Pour déterminer le nombre d'essais nécessaires nous appliquons la formule Suivante:

$$N = q^k \dots\dots\dots$$

(II.1)

Où:

- N: *nombre d'essais ;*
- q: *nombre de niveaux de variations des facteurs de base ;*
- K: *nombre de facteurs de base.*

Dans notre cas, nous avons quatre facteurs de base ( $q=4$ ) et chaque facteur à trois niveaux de Variation ( $k=3$ ), un facteur qui se change une fois et trois facteurs qui se changent trois fois

Nous avons alors:  $N=3^3+1^2$ , Mais nous allons travailler dans cette étude seulement pour un plan de  $L_{18}$  essais qui représente un plan de *Taguchi*, car il minimise les essais qui sont 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 II- 3.

**Tableau II.3 :** Matrice de planification pour un plan de *Taguchi* mixte

Nombre d'essai	r (mm)	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	1	3	3
4	1	2	1	1
5	1	2	2	2
6	1	2	3	3
7	1	3	1	2
8	1	3	2	3
9	1	3	3	1
10	2	1	1	3
11	2	1	2	1
12	2	1	3	2
13	2	2	1	2
14	2	2	2	3
15	2	2	3	1
16	2	3	1	3
17	2	3	2	1
18	2	3	3	2

## II.5 : Conditions de coupe

Les essais de chariotage sont effectués sur un matériau **PA66-GF30**, La pièce est maintenue en montage mixte. L'usinage est réalisé sans lubrification sous les conditions de coupe indiquées dans le tableau II.4.

**Tableau II.4 :** conditions de coupe

Les paramètres	Valeurs
----------------	---------

<b>r (mm)</b>	04 ; 08
<b>Vc (m/min)</b>	125 ; 175 ; 245
<b>f (mm/tr)</b>	0,08; 0,11; 0,16
<b>ap (mm)</b>	0,8 ; 1,6 ; 2,4

## **II.6. Conclusion**

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

## IV.1 : Introduction

L'optimisation d'une réponse ou la recherche d'un compromis entre plusieurs réponses consiste à définir, au sein du domaine expérimental, un réglage des facteurs permettant de satisfaire au mieux les exigences énoncées en termes de réponse. Dans le but d'optimiser les paramètres de coupe, chaque paramètre dans la conception (MSR) a été étudié à quatre niveaux différents. Le choix de quatre niveaux pour chaque variable est exigé par cette conception afin d'explorer la région de la surface de réponse à proximité de l'optimum. L'optimisation des réponses par la méthodologie de surface de réponse (MSR) aide à identifier la combinaison des paramètres des variables d'entrées qui optimisent une réponse unique ou un ensemble de réponses. Une optimisation commune doit satisfaire aux conditions requises pour toutes les réponses de l'ensemble. L'optimisation de réponses multiples est une méthode permettant un compromis entre diverses réponses grâce à la fonction de désirabilité qui permet de rassembler des critères ayant des unités différentes par le biais de fonction de désirabilité élémentaire et variant entre 0 et 1. Une désirabilité de 0, c'est-à-dire une désirabilité élémentaire prenant la valeur nulle, représente une configuration inacceptable pour la réponse sélectionnée, alors qu'une désirabilité prenant la valeur 1 représente le cas idéal.

L'objectif le plus important de cette étude est de parvenir à la rugosité de surface ( $R_a$ ) et les composantes de la force de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$ ) souhaitées avec les paramètres de coupe optimale. Pour atteindre ce but, l'exploitation de la méthode de surface de réponse (MSR) pour l'optimisation semblé être une technique utile. Ici, le but est de minimiser la rugosité de surface ( $R_a$ ) et les efforts de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  et  $K_c$ ).

Pour résoudre ce type de problème de conception des paramètres, une fonction objective,  $F(x)$ , est définie comme suit [32]:

$$DF = \left( \prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n w_i}} \quad (\text{IV.1})$$
$$F(x) = -DF$$

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



$$di = 0 \text{ Si } Y_i \leq Inf_i$$

$$di = \left[ \frac{Y_i - Inf_i}{T_i - Inf_i} \right] \text{ Si } Inf_i \leq Y_i \leq T_i \quad \text{(IV.2)}$$

$$di = \left[ \frac{Y_i - Sup_i}{T_i - Sup_i} \right] \text{ Si } T_i \leq Y_i \leq Sup_i$$

$$di = 0 \text{ Si } Y_i \geq Sup_i$$

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

$$di = 0 \text{ Si } Y_i \leq Inf_i$$

$$di = \left[ \frac{Y_i - Inf_i}{Sup_i - Inf_i} \right] \text{ Si } Inf_i \leq Y_i \leq Sup_i \quad \text{(IV.3)}$$

$$di = 1 \text{ Si } Y_i \geq Sup_i$$

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

$$di = 1 \text{ Si } Y_i \leq Inf_i$$

$$di = \left[ \frac{Sup_i - Y_i}{Sup_i - Inf_i} \right] \text{ Si } Inf_i \leq Y_i \leq Sup_i \quad \text{(IV.4)}$$

$$di = 0 \text{ Si } Y_i \geq Sup_i$$

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

## IV.2 Optimisation des conditions de coupe

Dans notre étude nous proposons de rechercher le régime de coupe optimal, qui satisfait les objectifs suivants :

- Bon état de surface ( $Ra$  mini)
- Faible pression sur l'outil ( $KC$  mini)
- Faible efforts de coupe ( $F_x, F_y$  et  $F_z$  mini)

### IV.3. Optimisation des conditions de coupe pour une rugosité ( $Ra$ , $Rz$ , $Rq$ et $Rt$ ).

Le tableau (IV.1) présente les conditions d'optimisations des paramètres de coupe lors l'usinage de **PA66-GF30**, pour les critères de la rugosité ( $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rq$  et  $Rt$ )

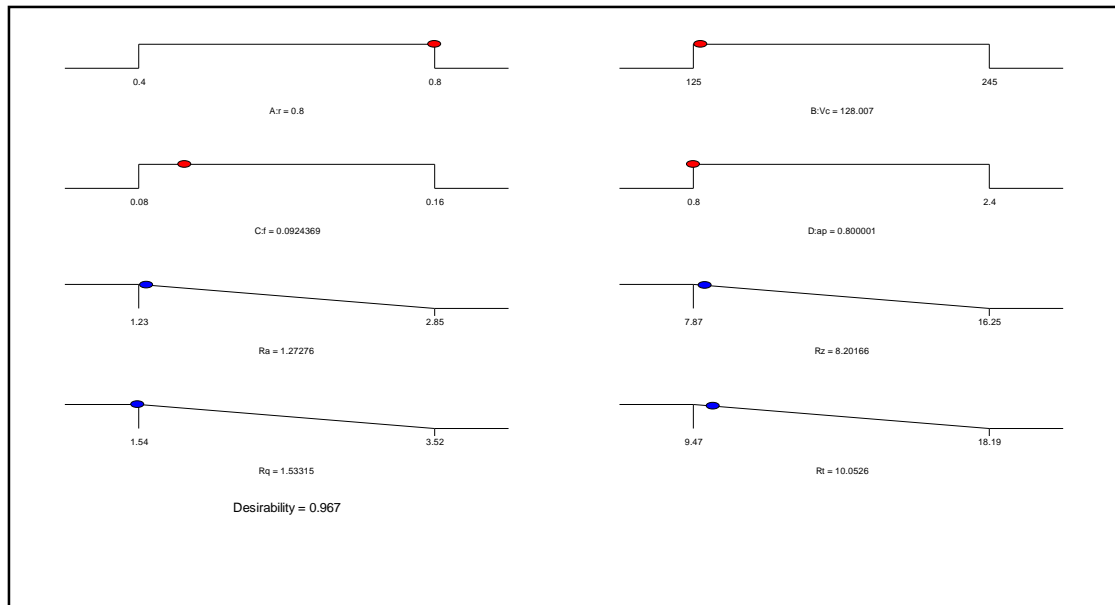
**Tableau IV.1** : Conditions d'optimisation pour la rugosité ( $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rq$  et  $Rt$ ).

Name	Objectifs	Limite inférieur	Limite supérieur	poids inférieur	poids supérieur	Importance
$r$	Gamme	0.4	0.8	1	1	3
$Vc$	Gamme	125	245	1	1	3
$f$	Gamme	0.08	0.16	1	1	3
$ap$	Gamme	0.8	2.4	1	1	3
$Ra$	minimisé	1.23	2.85	1	1	3
$Rz$	minimisé	7.87	16.25	1	1	3
$Rq$	minimisé	1.54	3.52	1	1	3
$Rt$	minimisé	9.47	18.19	1	1	3

Les valeurs des paramètres de coupe optimales, obtenues en utilisant le logiciel «*Design Expert 9*», sont présentées dans le tableau (IV.2) et la (fig. IV.1). Ces résultats montrent que pour l'obtention des valeurs minimales des critères de rugosité considérés, le régime de coupe à adopter correspond à un rayon de bec ( $r=0.8\text{mm}$ ), vitesse de coupe ( $Vc= 128\text{m/min}$ ), l'avance de ( $f= 0,09\text{mm/tr}$ ), la profondeur de passe de ( $ap=0.8 \text{ mm}$ ).

**Tableau IV.2 Résultats des valeurs optimales des paramètres étudiés**

N°	$r$ (mm)	$Vc$ (m/min)	$f$ (mm/tr)	$ap$ (mm)	$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	$Rz$ ( $\mu\text{m}$ )	$Rq$ ( $\mu\text{m}$ )	$Rt$ ( $\mu\text{m}$ )	Désirabilité
88	0.6	245	0.08	2.4	1.15	7.60	1.50	9.64	1.00
89	0.8	125	0.10	0.8	1.21	7.89	1.47	9.70	0.99
90	0.6	245	0.08	2.4	1.21	7.80	1.57	9.68	0.99
91	0.4	245	0.09	2.4	1.05	7.36	1.41	9.80	0.99
92	0.7	245	0.08	2.4	1.24	7.84	1.59	9.65	0.99
93	0.4	231	0.08	2.4	0.98	7.36	1.36	9.93	0.99
94	0.6	235	0.08	2.4	1.17	7.84	1.54	9.96	0.99
95	0.7	245	0.08	2.4	1.24	7.87	1.59	9.68	0.99
96	0.7	245	0.08	2.4	1.25	7.87	1.60	9.66	0.98
97	0.6	245	0.08	2.3	1.23	7.92	1.59	9.82	0.98
98	0.8	125	0.12	1.1	1.30	8.10	1.60	9.70	0.97
99	<u>0.8</u>	<u>128</u>	<u>0.09</u>	<u>0.8</u>	<u>1.27</u>	<u>8.20</u>	<u>1.53</u>	<u>10.05</u>	<u>0.97</u>
100	0.7	245	0.08	2.4	1.31	8.05	1.66	9.73	0.96

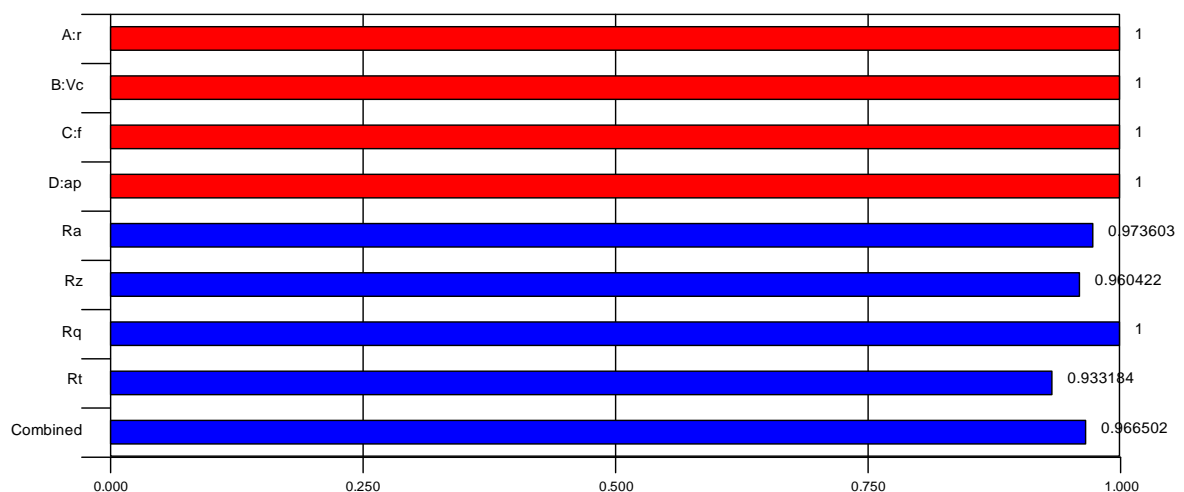


**Figure. IV.1.** Régime de coupe optimale pour  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rq$ ,  $Rt$  minimale.

Ce régime a été choisi comme optimal parce qu'il correspond à la fonction de désirabilité globale maximale (0.97). Il est à noter que la désirabilité globale correspond à la moyenne des désirabilités de chacun des paramètres des critères d'optimisation ( $Ra$  min,  $Rz$  min,  $Rq$  min,  $Rt$  min).

#### IV.3.1. Valeur de la désirabilité de régime de coupe optimal pour ( $Ra$ , $Rz$ , $Rq$ et $Rt$ ).

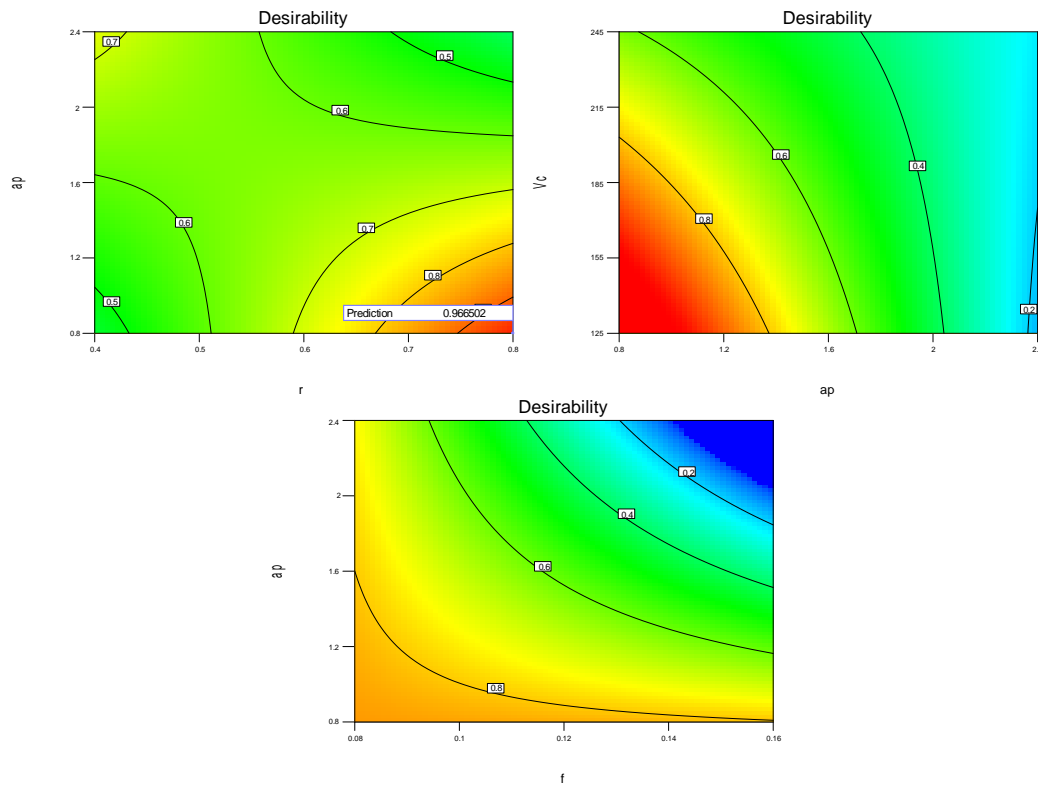
La figure IV.2 présente la valeur de la désirabilité pour que la rugosité ( $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rq$ ,  $Rt$ ) soit minimale. Sa valeur est de 0.97



**Figure IV.2.** Les valeurs des désirabilités des paramètres technologiques.

### IV.3.2. Variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe

La figure (IV.3), présente la variation de la désirabilité en fonction des valeurs des éléments du régime de coupe ( $r$ ,  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ).



**Figure IV.1 :** Variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe.

A partir des graphes de la figure IV.3 on peut déterminer la valeur de la désirabilité en fonction des conditions de coupe

### IV.4. Optimisation des conditions de coupe pour les composantes de l'effort de coupe ( $F_x$ , $F_y$ , et $F_z$ ).

Le tableau (IV.3) présente les conditions d'optimisations des paramètres de coupe lors l'usinage de **PA66-GF30**, sur les composantes de l'effort de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ).

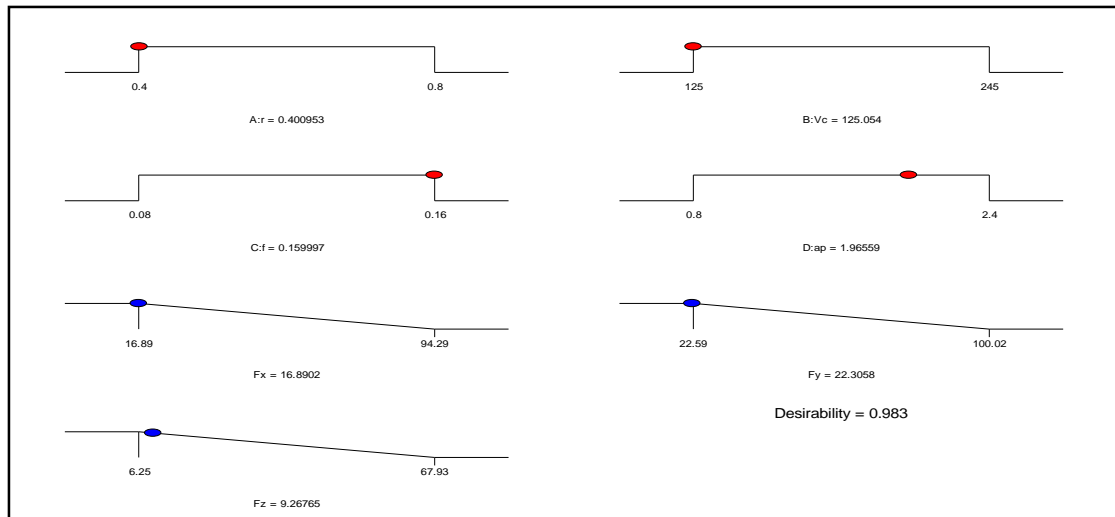
**Tableau IV.3 :** Conditions d'optimisation pour les composantes de l'effort de coupe ( $F_x, F_y, F_z$ ).

Name	Objectifs	Limite inférieur	Limite supérieur	poids inférieur	poids supérieur	Importance
$r$	Gamme	0.4	0.8	1	1	3
$V_c$	Gamme	125	245	1	1	3
$f$	Gamme	0.08	0.16	1	1	3
$ap$	Gamme	0.8	2.4	1	1	3
$F_x$	minimisé	16.89	94.29	1	1	3
$F_y$	minimisé	22.59	100.02	1	1	3
$F_z$	minimisé	6.25	67.93	1	1	3

Les valeurs des paramètres de coupe optimales, obtenues sont présentées dans le tableau (IV.4) et la (fig. IV.4). Ces résultats montrent que pour l'obtention des valeurs minimales des efforts de coupe, le régime de coupe à adopter correspond à un rayon de bec ( $r=0.4$ ), vitesse de coupe ( $V_c= 125\text{m/min}$ ), l'avance de ( $f= 0,16\text{mm/tr}$ ) et la profondeur de passe de ( $ap=0.1.97\text{mm}$ ).

**Tableau IV.4 Résultats des valeurs optimales des paramètres étudiés**

N°	$r$ (mm)	$V_c$ (m/min)	$f$ (mm/tr)	$ap$ (mm)	$F_x$ (N)	$F_y$ (N)	$F_z$ (N)	Désirabilité
70	0.8	245	0.08	1.07	10.1	25.6	-13.47	0.99
71	0.8	245	0.08	0.80	10.7	25.6	-11.90	0.99
72	0.8	245	0.08	0.80	10.9	25.7	-11.47	0.99
73	0.8	245	0.08	1.05	10.5	25.8	-12.95	0.99
74	0.8	245	0.08	0.80	11.4	26.0	-10.50	0.98
75	0.4	125	0.16	1.59	12.7	16.9	8.99	0.98
76	0.8	245	0.08	1.14	10.8	26.1	-12.06	0.98
77	0.8	245	0.08	0.81	11.8	26.3	-9.85	0.98
78	0.4	125	0.16	1.97	16.9	22.3	9.27	0.98
79	0.4	125	0.16	0.80	5.2	6.5	9.36	0.98

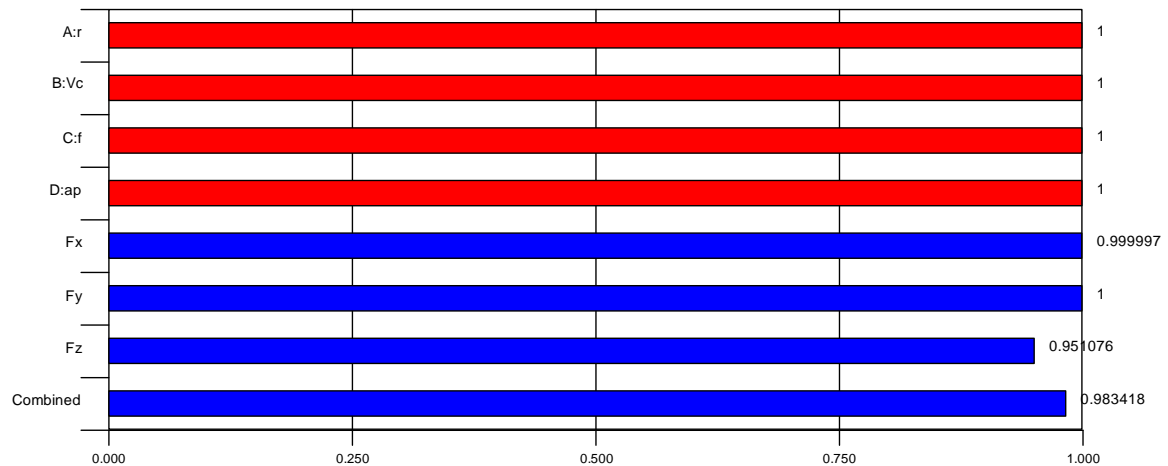


**Figure IV.4.** Régime de coupe optimale pour les composantes de l'effort de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ).

Ce régime a été choisi comme optimal parce qu'il correspond à la fonction de désirabilité globale maximale (0.98). Il est à noter que la désirabilité globale correspond à la moyenne des désirabilités de chacun des paramètres des critères d'optimisation ( $F_x$  min,  $F_y$  min,  $F_z$  min).

#### IV.4.1. Valeur de la désirabilité pour ( $F_x$ , $F_y$ , $F_z$ ).

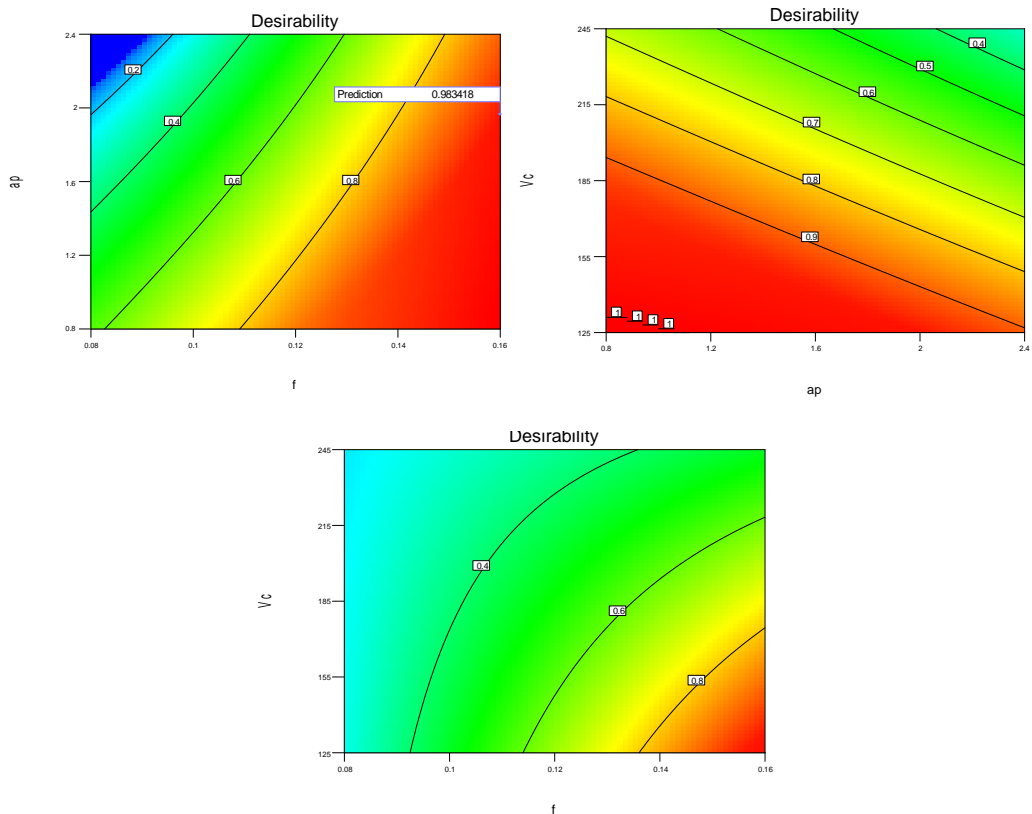
La figure IV.5 présente la valeur de la désirabilité pour que les composantes de l'effort de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) soit minimale. Sa valeur est de 0.98.



**Figure IV.5.** Les valeurs des désirabilités des paramètres technologiques.

#### IV.4.2. Variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe

La figure (IV.6), présente la variation de la désirabilité en fonction des valeurs des éléments du régime de coupe (r, Vc, f et ap).



**Figure IV.6 :** Variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe.

A partir des graphes de la figure IV.6 on peut déterminer la valeur de la désirabilité en fonction des conditions de coupe

#### IV.5.Optimisation des conditions de coupe pour l'effort spécifique $K_c$ .

Le tableau (IV.5) présente les conditions d'optimisations des paramètres de coupe lors l'usinage de **PA66-GF30**, sur l'effort spécifique  $K_c$ .

**Tableau IV.5:** Conditions d'optimisation pour l'effort spécifique  $K_c$

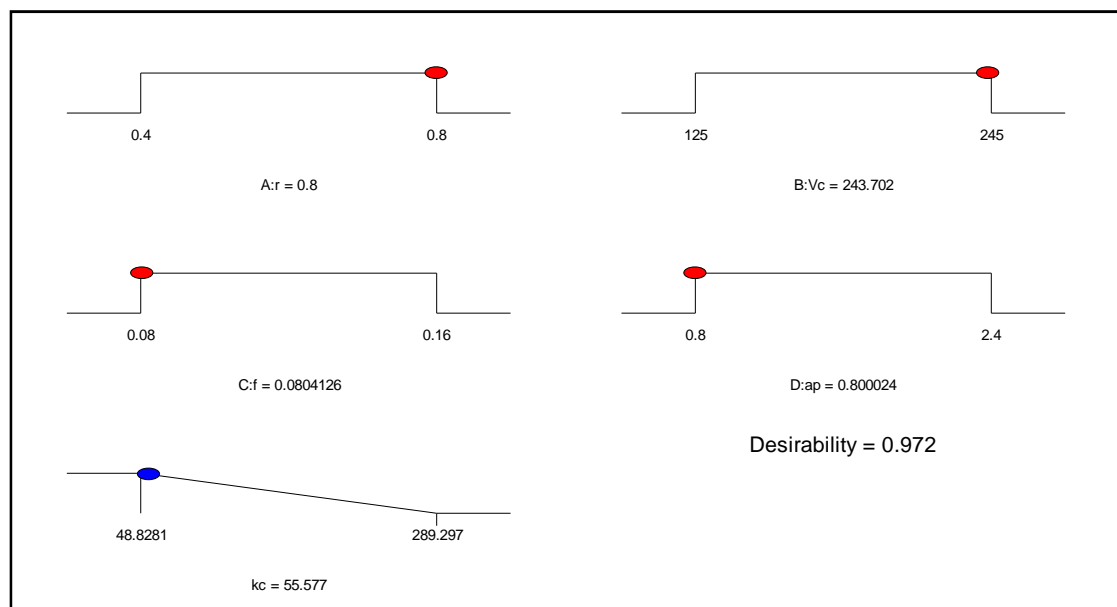
Name	Objectifs	Limite inférieur	Limite supérieur	poids inférieur	poids supérieur	Importance
$r$	Gamme	0.4	0.8	1	1	3
$V_c$	Gamme	125	245	1	1	3
$f$	Gamme	0.08	0.16	1	1	3
$ap$	Gamme	0.8	2.4	1	1	3
$K_c$	minimisé	48.83	289.30	1	1	3

Les valeurs des paramètres de coupe optimales, obtenues sont présentées dans le tableau (IV.6) et la (fig. IV.6). Ces résultats montrent que pour l'obtention des valeurs minimales de l'effort spécifique  $K_c$ , le régime de coupe à adopter correspond à un

rayon de bec ( $r=0.8$ ), vitesse de coupe ( $V_c= 244\text{m/min}$ ), l'avance de ( $f= 0,08\text{mm/tr}$ ), la profondeur de passe de ( $ap=0.8\text{ mm}$ ).

**Tableau IV.6 Résultats des valeurs optimales des paramètres étudiés.**

N°	r (mm)	Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Kc (MPa)	Désirabilité
90	0.8	245	0.10	0.8	54.8	0.98
91	0.8	245	0.08	0.8	54.9	0.97
92	0.8	245	0.15	0.8	54.9	0.97
93	0.8	245	0.09	0.8	55.1	0.97
94	0.8	244	0.09	0.8	55.4	0.97
95	0.8	244	0.08	0.8	55.6	0.97
96	0.8	245	0.16	0.8	55.9	0.97
97	0.8	245	0.08	0.8	55.9	0.97
98	0.8	244	0.08	0.8	56.6	0.97
99	0.8	245	0.15	0.8	56.8	0.97



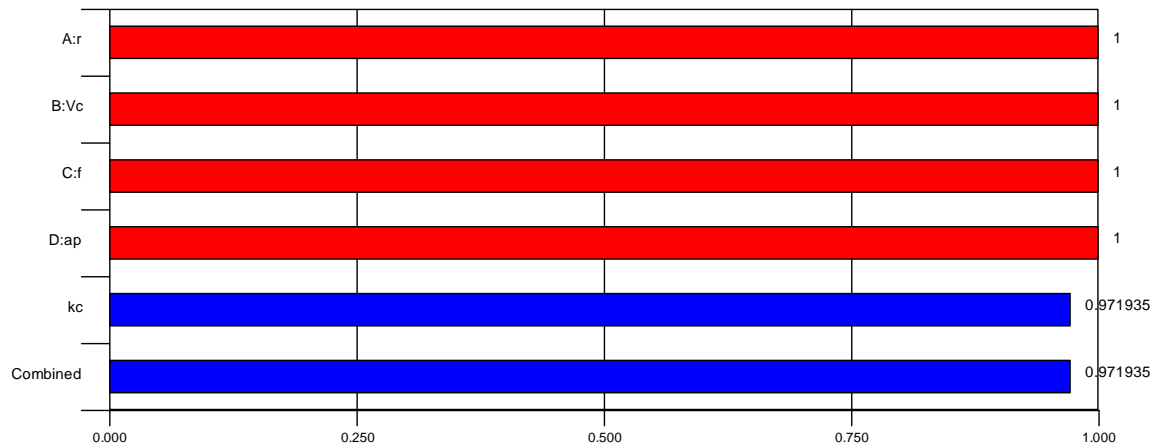
**Figure. IV.6.** Régime de coupe optimale pour l'effort spécifique  $K_c$ .

Ce régime a été choisi comme optimal parce qu'il correspond à la fonction de désirabilité globale maximale (0.972).

#### IV.5.1. Valeur de la désirabilité pour l'effort spécifique $K_c$ minimale.

La figure IV.6 présente la valeur de la désirabilité pour que l'effort spécifique  $K_c$ , soit minimal. Sa valeur est de 0.972.

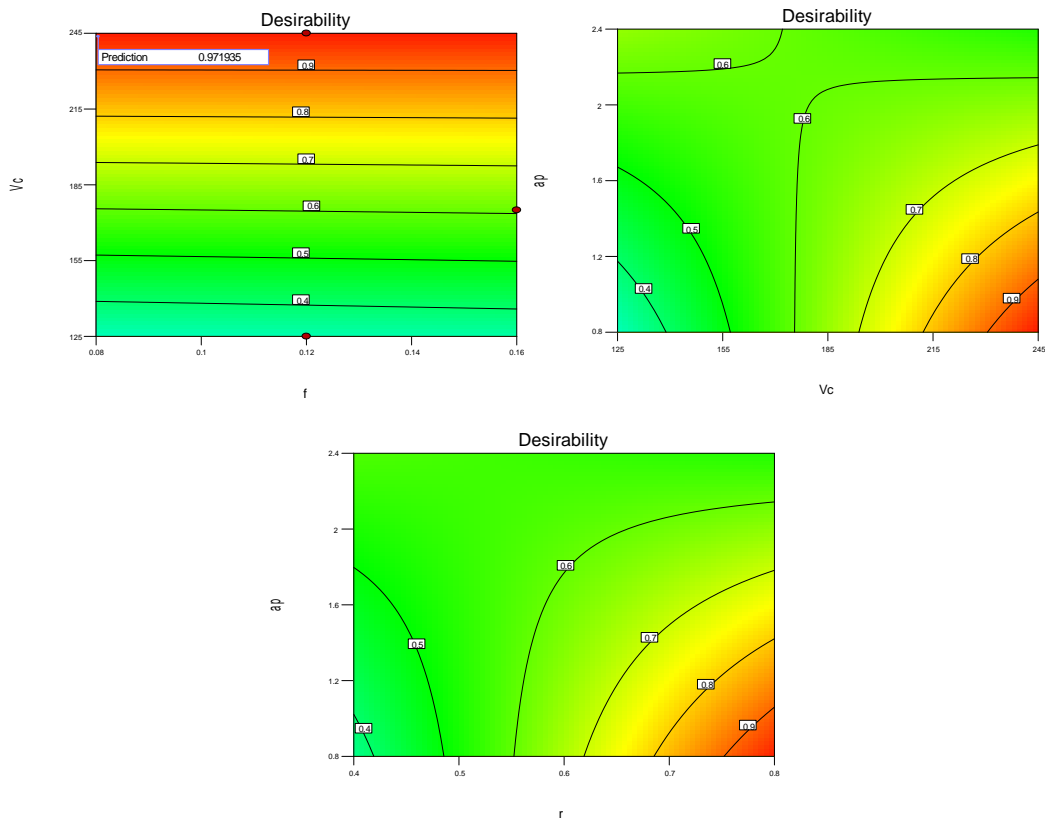




**Figure IV.7.** Les valeurs des désirabilités des paramètres technologiques.

#### IV.4.2. variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe

La figure (IV.7), présente la variation de la désirabilité en fonction des valeurs des éléments du régime de coupe ( $r$ ,  $V_c$ ,  $f$  et  $a_p$ ).



**Figure IV.8 :** Variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe.

A partir des graphes de la figure IV.6 on peut déterminer la valeur de la désirabilité en fonction des conditions de coupe

#### IV.5. Conclusion

L'optimisation peut être définie comme la science qui détermine la meilleure solution à certains problèmes mathématiquement définie, qui sont souvent des modèles de physique réelle. C'est une technique qui permet de « quantifier » les compromis entre des critères parfois non commensurables. En fait, l'optimisation cherche à améliorer une performance en se rapprochant d'un point optimum

Dans ce chapitre nous a permis de faire une optimisation des conditions de coupe ( $r$ ,  $V_c$ ,  $f$ ,  $ap$ ) pour les paramètres technologiques lors de l'usinage du PA66-GF30. Les résultats obtenus nous ont conduits aux conclusions suivantes :

- Les résultats d'optimisation montrent que le régime de coupe à adopter pour l'obtention des valeurs minimales des critères de rugosité considérés, le régime de coupe à adopter correspond à un rayon de bec ( $r=0.8$  mm), vitesse de coupe ( $V_c= 128$ m/min), l'avance de ( $f= 0,09$  mm/tr), la profondeur de passe de ( $ap=0.8$  mm).
- le régime de coupe à adopter pour l'obtention des valeurs minimales des efforts de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ), le régime de coupe à adopter correspond à un rayon de bec ( $r=0.4$  mm), vitesse de coupe ( $V_c= 126$ m/min), l'avance de ( $f= 0,16$  mm/tr), la profondeur de passe de ( $ap=0.8$  mm).
- le régime de coupe à adopter pour l'obtention des valeurs minimales l'effort spécifique  $K_c$ , il est correspond à un rayon de bec ( $r=0.8$  mm), vitesse de coupe ( $V_c= 244$  m/min), l'avance de ( $f= 0,08$  mm/tr), la profondeur de passe de ( $ap=0.8$  mm).

# **Conclusion**

## **Générale**

## Conclusion générale

L'étude expérimentale du comportement des matériaux de coupe lors du tournage du polyamide renforcé PA66-GF30 avec deux plaquettes de coupe de rayon 0.4mm et 0.8mm, nous a permis d'étudier l'usinabilité de ce polymère en se basant sur les critères suivants : efforts, les pressions de coupe et la rugosité des surfaces usinées. A cet effet nous pouvons tirer les conclusions suivantes:

- L'analyse de la variance (ANOVA) des rugosités de surface montre que la vitesse d'avance  $f$  est le facteur le plus dominant sur la rugosité de surface et elle représente une contribution de  $R_a=71.21\%$ ,  $R_z=62.83\%$ ,  $R_q=62.64\%$ ,  $R_t=58.40\%$
- L'analyse de variance (ANOVA) des composantes de l'effort de coupe indiquent que la profondeur de passe ( $a_p$ ) reste le facteur qui influe énormément sur les différentes composantes de l'effort de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ), sa contribution 71.50% pour  $F_x$ , 52.71% pour  $F_y$  et 44.71% pour  $F_z$ .
- L'analyse de la variance (ANOVA) Pour l'effort de coupe spécifique  $K_c$  montre que le carré de la vitesse de coupe ( $V_c^2$ ) par 32.82% et le facteur le plus dominant par une contribution de 32.82% suivie par les interactions ( $v_c^2 \cdot a_p$ ) et ( $r^2 \cdot v_c$ ).
- Les modèles de régression trouvés permettent de faire des prédictions sur les rugosités de surface ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_q$  et  $R_t$ ) car le  $R^2$  des modèles est de (99.20%, 96.41%, 98.66% et 94.83%) respectivement et la même prédiction sur les efforts de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  et  $K_c$ ) parce que le  $R^2$  des modèles trouvés est de (99.26%, 99.41%, 96.40% et 89.86%) respectivement
- La comparaison entre les valeurs expérimentales des rugosités et les efforts de coupe avec les valeurs estimées montre qu'ils sont très proches. Donc on peut conclure que les modèles issus de la méthode de surface de réponse (MSR) donnent des très bons résultats.
- Le régime de coupe optimal trouvé dans cette étude pour l'obtention des valeurs minimales des critères de rugosité pour l'usinage du PA66-GF30 est comme suite :  $r=0.4\text{mm}$ ,  $V_c =130 \text{ m/min}$ ,  $f = 0,15 \text{ mm/tr}$  et  $a_p = 1.23 \text{ mm}$ .  
Les réponses optimisées sont:  $R_a = 1.09 \text{ } (\mu\text{m})$ ,  $R_z=6.99 \text{ } (\mu\text{m})$ ,  $R_q=1.39 \text{ } (\mu\text{m})$ ,  $R_t=8.34 \text{ } (\mu\text{m})$ .

- pour les efforts de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ), le régime de coupe trouve correspond à un rayon de bec ( $r=0.4$ ), vitesse de coupe ( $V_c= 126\text{m/min}$ ), l'avance de ( $f= 0,16 \text{ mm/tr}$ ), la profondeur de passe de ( $ap=0.8 \text{ mm}$ ).

Les réponses optimisées sont:  $F_x = 1.80\text{N}$ ,  $F_y = 2.94\text{N}$  et  $F_z = 6.23\text{N}$ .

- pour le régime de coupe à adopter a l'effort spécifique  $K_c$ , il est correspond à un rayon de bec ( $r=0.4$ ), vitesse de coupe ( $V_c= 129\text{m/min}$ ), l'avance de ( $f= 0,08 \text{ mm/tr}$ ), la profondeur de passe de ( $ap=2.38 \text{ mm}$ ).

La réponse optimisée est:  $K_c = 31.31\text{MPa}$

## Liste des figures

### Chapitre I

Figure I.1 : Aperçu de polymères	5
Figure I.2 : Tige en plastique renforcé de fibre de verre (GRP), noir	7
Figure I.3 Facteurs d'influence sur le processus de travail par enlèvement de copeaux	9
Figure I.4 - Géométrie type d'un outil de tournage]	15
Figure I.5 : Les efforts de coupe en tournage	18
Figure I-6 critères de rugosité	19
Figure I-7 hauteur des irrégularités sur dix points Rz	20
Figure I-8 Écart moyen arithmétique du profil Ra.	20
Figure I-9 : la relation entre Ra et la vitesse d'avance	22
Figure I-10 La relation entre Ra et la vitesse de coupe	22
Figure I-11 Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse de coupe	23
Figure I-12 Evolution de la rugosité en fonction de la vitesse d'avance	23
Figure I-13 influence de paramètre de coupe Sur la l'effort de coupe	24
Figure I- 14 L'évolution de la rugosité de surface En fonction d'orientation des fibres	26
Figure I- 15 Contribution en pourcentage des paramètres de tournage sur S / N pour l'effort de coupe	26

### Chapitre II

Figure II.1: Tour à charioter et à fileter modèle SN40.	2
Figure II.2 : Éprouvette utilisée.	4
Figure II.3: Porte outil utilisé.	4
Figure II.4: plaquette de coupe utilisée	5
Figure II.5 : Platte forme KISTLER	6
Figure II.6: Exemple d'acquisition du logiciel " DYNOWARE "	6
Figure II.7: Chaîne de mesure des efforts de coupe.	7
Figure II.8 : Mesure de la rugosité.	8

### Chapitre III

Figure III.1: Graphique des effets principaux pour le critère de la rugosité (Ra)	42
---	----

Figure III.2:Graphique des interactions des facteurs pour le critère de la rugosité (Ra) en fonction de r, Vc, f et ap.	43
Figure III.3 : Surface de réponse estimée pour le critère de la rugosité Ra.	45
Figure III.4:Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la rugosité Ra	46
Figure III.5: Graphique des effets principaux pour le critère de la rugosité (Rz) en fonction	48
Figure III.6:Graphique des interactions des facteurs pour le critère de la rugosité (Rz).	49
Figure III.7 : Surface de réponse estimée pour le critère de la rugosité Rz,en fonction de r, Vc, f, ap.	51
Figure III.8:Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la rugosité Rz	52
Figure III.9: Graphique des effets principaux pour le critère de la rugosité (Rq) en fonction	53
Figure III.10:Graphique des interactions des facteurs pour le critère de la rugosité (Rq) en	54
Figure III.11 : Surface de réponse estimée pour le critère de la rugosité Rq, en fonction de r,Vc,ap et f	56
Figure III.12:Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la rugosité Rq.	57
Figure III.13: Graphique des effets principaux pour le critère de la rugosité (Rt) en fonction	58
Figure III.14:Graphique des interactions des facteurs pour le critère de la rugosité (Rt) en	59
Figure III.15 : Surface de réponse estimée pour le critère de la rugosité Rt.	61
Figure III.16:Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour la rugosité Rt.	62
Figure III.17: Graphique des effets principaux pour l'efforts de coupe : Fz en fonction de r, Vc, f, ap.	63
Figure III.18: Surface de réponse estimée pour le critère de l'effort Fz, en fonction de	65
Figure III.19 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour Fz	66
Figure III.20(a), (b): Graphique des effets principaux des efforts de coupe : a)Fx, b)Fy	69
Figure III.21. (a), (b): Graphique des interactions des efforts de coupe : a)Fx, b)Fy	70
Figure III.22 :a),b) Surface de réponse estimée pour les composantes de l'effort de coupe Fx et Fy	73
Figure III.23: Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites pour les efforts de coupe : (a)Fx, (b) Fy.	75
Figure III.24: Graphique des effets principaux pour la pression de coupe (Kc)	77
Figure III.25 : Graphique des interactions de: Kc en fonction der, Vc, f, ap.	78
Figure III.26: Surface de réponse estimée pour Kc en fonction de r, Vc, f, ap,et graphes de contour	80
La figure III.27 : les valeurs expérimentales et les valeurs estimées de Kc.	81

Figure. IV.1. Régime de coupe optimale pour Ra, Rz, Rq, Rt	86
Figure IV.2. Les valeurs des désirabilités des paramètres technologiques.	86
Figure IV.1 : Variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe.	87
Figure. IV.4. Régime de coupe optimale pour les composantes de l'effort de coupe ( $F_x$ , $F_y$ , $z$ ).	88
Figure IV.5. Les valeurs des désirabilités des paramètres technologiques.	89
Figure IV.6 : Variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe.	89
Figure. IV.6. Régime de coupe optimale pour l'effort spécifique $K_c$ .	91
Figure IV.7. Les valeurs des désirabilités des paramètres technologiques.	91
Figure IV.8 : Variation de la désirabilité en fonction des conditions de coupe.	92



## Liste des Tableaux

### Chapitre I

<u>Tableau I.1 Nom et désignation des quelques matières plastiques</u>	9
<u>Tableau I.2 : Relation entre le module d'élasticité de la teneur en verre et le type de renfort pour les résines polyester renforcées de fibres de verre</u>	13
<u>Tableau I.3 Valeurs approximatives de la conductivité thermique</u>	16
<u>Tableau I.4 Exemples de conditions de recuit sur plaques extrudées....</u>	Erreur ! Signet non défini.
<u>Tableau I.5.Tolérances accessibles en conditions normales</u>	20
<u>Tableau I.6 : tournage des polyamides</u>	21
<u>Tableau I.7 : fraisage des polyamides</u>	22
<u>Tableau I.8 : perçage des polyamides</u>	22
<u>Tableau I.9 : le sciage a ruban des polyamides</u>	23
<u>Tableau I.10 : le sciage circulaire des polyamides</u>	23

### Chapitre II

<u>Tableau II.1: caractéristiques techniques PA66-GF30</u>	36
<u>Tableau II.2 : Relation entre le module d'élasticité de la teneur en verre et le type de renfort pour les résines polyester renforcées de fibres de verre</u>	36
<u>Tableau II.3 : Matrice de planification pour un plan de Taguchi mixte</u>	43
Tableau II.4 : conditions de coupe	43

### Chapitre III

Tableau III.1. Résultats de la rugosité ( $Ra$ ) en fonction des paramètres du régime de coupe ( $r$ , $Vc$ , $f$ , et $ap$ ). Erreur ! Signet non défini.	
Tableau III.2 : Coefficients des modèles mathématiques	Erreur ! Signet non défini.
Tableau III.3. Régression de la surface de réponse pour le critère de rugosité $Ra$ en fonction Erreur ! Signet non défini.	
Tableau III.4: Pourcentage d'erreur entre les valeurs expérimentales et prédites pour $Ra$ . Erreur ! Signet non défini.	
Tableau III.5 : Coefficients des modèles mathématiques	Erreur ! Signet non défini.

Tableau III.6. **Régression de la surface de réponse pour le critère de rugosité  $R_z$  en fonction**  
**Erreur ! Signet non défini.**

Tableau III.7: **Pourcentage d'erreur entre les valeurs expérimentales et prédites pour  $R_z$**   
**Erreur ! Signet non défini.**

Tableau III.8: **ANOVA pour la rugosité  $R_q$**  Erreur ! Signet non défini.

Tableau III.9: **Pourcentage d'erreur entre les valeurs expérimentales et prédites pour  $R_q$ .**  
**Erreur ! Signet non défini.**

Tableau III.10 : **ANOVA pour la rugosité  $R_t$**  Erreur ! Signet non défini.

Tableau III.11: **Pourcentage d'erreur entre les valeurs expérimentales et prédites pour  $R_t$ .**  
**Erreur ! Signet non défini.**

Tableau III.12 : **ANOVA de l'effort de coupe  $F_z$**  Erreur ! Signet non défini.

Tableau III.13: **Pourcentage d'erreur entre les valeurs expérimentales et prédites pour  $F_z$**   
**Erreur ! Signet non défini.**

Tableau III.14 (a): **ANOVA pour l'effort  $F_x$**  Erreur ! Signet non défini.

Tableau III.14 (b): **ANOVA pour l'effort  $F_y$**  Erreur ! Signet non défini.

Tableau III.15a),b) : **Comparaison entre les efforts de coupe expérimentaux et estimés :**  
**Erreur ! Signet non défini.**

Tableau III.16. : **Les valeurs expérimentales de la force spécifique  $K_c$**  Erreur ! Signet non  
**défini.**

Le tableau III.17 : **les résultats Analyse des variances (ANOVA) de la pression de coupe ( $K_c$ )**  
**Erreur ! Signet non défini.**

Tableau III.18 : **Pourcentage d'erreur entre les valeurs expérimentales et prédites pour  $K_c$ .**  
**Erreur ! Signet non défini.**

## Chapitre IV

Tableau IV.1 : **Conditions d'optimisation pour la rugosité ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_q$  et  $R_t$ ).** 58

Tableau IV.2 **Résultats des valeurs optimales des paramètres étudiés** 58

Tableau IV.3 : **Conditions d'optimisation pour les composantes de l'effort de coupe ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  
 $F_z$ ).** 61

Tableau IV.4 **Résultats des valeurs optimales des paramètres étudiés** 61

Tableau IV.5: **Conditions d'optimisation pour l'effort spécifique  $K_c$**  63

Tableau IV.6 **Résultats des valeurs optimales des paramètres étudiés.** 64

## **Résumé**

L'objectif de ce travail est d'une part d'examiner les différents phénomènes intervenants lors de l'usinage de PA66-GF30 tels que, les efforts de coupe, la rugosité et l'usure, avec la variation de différents paramètres du régime de coupe (rayon de bec, vitesse de coupe, avance par tour et profondeur de passe). D'autre part, nous avons fait une analyse statistique des résultats basée sur l'analyse de variance (ANOVA) et la méthodologie de surface de réponse MSR et cela dans le but de proposer des modèles mathématiques de la rugosité, des efforts de coupe et d'effort spécifique  $K_c$ . A la fin, l'étude débouche sur une optimisation des conditions de coupe.

**Mots clés :** PA66-GF30, tournage, optimisation, plan d'expérience, ANOVA, RSM, conditions de coupe.

## **Abstract**

The objective of this research is firstly to examine the various intervening phenomena during the machining of PA66-GF30 such as, the cutting pressures, roughness and wear, with the variation of various cutting parameters (ray of nozzle, cutting speed, feed rate and depth of cut). Moreover, we made a statistical analysis of the results based on the variance analysis (ANOVA) and the methodology of surface of answer MSR and that with an aim to propose mathematical models of surface roughness, cutting effort and specific cutting effort  $K_c$ .

**Key words:** PA66-GF30, turning, optimization, experimental design, ANOVA, RSM, cutting conditions.

## Bibliographie

- [1] **Zaidi Ahmed** ; Mémoire *Magister* (Contribution A L'étude De L'usinage Des Matériaux Polymères) soutenu au **2013** Université de Guelma
- [2] **Afef Azzi** ; Mémoire Magister (Etude Des Déformations Résiduelles Dans Les Anneaux De Tubes En Polyéthylène Haute Densité) soutenu au **2012** Université de Annaba **2012**
- [3] **J. Aubry** ; Les Matières Plastiques, Technologie 5ème Edition, 2011, PP1-49.
- [4] **J.M. Haudin**; Matériaux Pour L'ingénieur, 2006, PP46-69.
- [5] **Guide De Conception** ; Utilisation Marine De Pièces En Thermoplastique, 1997, PP6-7.
- [6] **Manuel D'usinage Garant** ; Matières [www.garant-tools.com](http://www.garant-tools.com) pp75-97.
- [7] **Alain Dessarthe** ; Ingénieur Responsable Du Service Conception-Industrialisation Des Polymères Et Composites (CETIM) **Usinage Des Polymères** © Techniques de l'Ingénieur, traité Génie Mécanique BM 7 426 – 1
- [8] **Guide D'usinage Des Matières Plastiques Techniques** ; « *Les Balus* » Boulevard de la Robiquette 35760 SAINT GREGOIRE pp1-12
- [9] **Jagtap & al; Machining of Plastics: A Review**; International Journal Of Engineering Research And General Science Volume 3, Issue 2, Part 2, March-April, 2015 ISSN 2091-2730
- [10] **Kobayashi, Hirakawa**; Ultraprecision Machining Of Plastics. Part1. Polymethyl Methacrylate, Polymer-Plastic Technology and Engineering (1984), Vol. 22, No. 1, pp. 15-25.
- [11] **Jagtap, Pawade** ;experimental Investigation On The Influence Of Cutting Parameters On Surface Quality Obtained In SPDT Of PMMA; International Journal Of Advanced Design And Manufacturing Technology (2014), Vol. 7, No. 2, pp. 53-58.
- [12] **Keresztes, Kalacska, Zsidai, Dobrocsi**; Machinability of engineering polymers , Sustainable Construction and Design (2011), pp. 106-114.
- [13] **Salles, Goncalves**; effects Of Machining Parameters On Surface Quality Of The Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE), Conamet/SAM-SIMPOSIO Materia (2002).
- [14] **Pawade, Jagtap, Balasubramaniam**; Some Investigations On Surface Characteristics In Precision Turning Of Nylon And Polypropylene;, International Journal Of Electronics, Communication & Soft Computing Science & Engineering (2012), pp. 236-240.
- [15] **Lazarevic, Madic, Jankovic**; Surface Roughness Minimization Of Polyamide PA-6 Turning By Taguchi Method, Journal Of Production Engineering (2012), Vol.15, No.1, Pp. 29-32.
- [16] **Silva, Davim, Festas, Abrao**; Machinability Study On Precision Turning Of PA66 Polyamide With And Without Glass Fiber Reinforcing , Materials and Design (2009), Vol. 30, pp. 228–234.

[17] **Mehdi, Zinati, Razfar**, Experimental And Modeling Study Of The Turning Process Of PA 6/Nano Calcium Carbonate Composite , Journal Of Composites (2013), Article No. 970954.

[18] **Kini, Chincholkar**, Effect Of Machining Parameters On Surface Roughness And Material Removal Rate In Finish Turning Of  $\pm 300$  Glass Fiber Reinforced Polymer Pipes , Materials And Design (2009), Vol. 31, pp. 3590-3598.

[19] **Gupta, Kumar**, Multi-Objective Optimization Of Cutting Parameters In Turning Using Grey Relational Analysis , International Journal Of Industrial Engineering Computations (2013), Vol. 4, pp. 547–558.

[20] **Kumar, Meenu, Satsangi**, Experimental Investigation And Optimization In Turning Of UD-GFRP Composite Material By Regression Analysis Using PCD Tool , International Journal Of Advanced Engineering Technology (2012), Vol. 3, No. 3, pp. 32-38.

[21] **Marin Mo oi & al**; The Influence Of The Geometry Of The Lathe Tool On The Surface Condition At The Processing Of The Polyamides, Technologies In Machine Building, 2008, ISSN, PP1221-4566.

[22] **V.N.Gaitonde& al**; Machinability Study In Micro-Turning Of PA66 GF30 Polyamide With A PCD Tool, Journal Of Composite Materials, 2009; 43; P725.

[23] **Cristescu & al** ; 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.

[24] **Marin Mo oi** ; Studies On The Main Cutting Force In Turning Polyamide PA66, Annals Of The Oradea University, Fascicle Of Management And Technological Engineering, Volume IX (XIX), 2010, NR2.

[25] **A.H. Syed & al**; Surface Roughness Analysis In Machining Of GFRP Composites By Carbide Tool (K20), European Journal Of Scientific Research, ISSN 1450-216X Vol.41 No.1, 2010, PP84-98.

[26] **Dragoljub Lazarevi & al**; Robust Conditions For Cutting Force Minimization In Polyamide Turning Process Faculty of Mechanical Engineering in Niš, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Serbia doi:10.5937/fmet1502114L FME Transactions (2015) 43, 114-118

[27]: **Z. LU et al**; Micro-Cutting In The Micro Lathe Turning System, International Journal Of Machine Tools And Manufacture, 1999, 39, PP1171–1183.

[28]: **M.C. Francisco et al**, Etude De L'effet Des Vitesses De Coupe Et D'avance Sur La Force D'usinage Lors Du Chariotage Des Composés Polyamides, 2009.

[29]: **Normes ISO 4287/1-1984 et ANSI/ASME B46.1-1985.**

[30]: **W. Wang et al**; A Study on Roughness of the Micro-End Milled Surface Produced by a Miniatured Machine Tool, Journal of Materials Processing Technology, 2005, PP162–163, PP702–708.

[31]: **VN. Gained, SR. Karnik, M. Faustino, JP. Davim**, *Machinability analysis in turning tungsten-copper composite for application in EDM electrodes*, Int J Refract Metals hard

[32]: **R.H Myers, D.C. Montgomery**, *Response Surface Methodology, 2nd Ed.*, WILEY C SONS (Éditeurs), New York, NY, USA, (2002).

[33]: **BELLOUFI Abderrahim** *Thèse de Doctorat en sciences en : Génie Mécanique Université Mohamed Khider – Biskra-2015*