

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR**

**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**



**MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER**

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : **Fabrication mécanique et productique**

Par :

**TALAOUGHERAS Siham**

**AOUF Yousra**

**Thème :**

---

**Etude numérique et expérimentale de l'influence des paramètres d'usinage sur la  
topographie de surface de l'aluminium AL-7075**

---

Soutenu le **02/07/2024** devant le jury composé de :

<b>Dr. HADJOU Madjid</b>	Président
<b>Dr. IDIR Abdelhek</b>	Rapporteur
<b>Dr. BELAMRI Abdelatif</b>	Examineur

**Année Universitaire 2023-2024**

## *Remerciements*

Je tiens tout d'abord à remercier en premier lieu **ALLAH**, le tout puissant  
De m'avoir donné autant de courage, de patience et de volonté pour atteindre ce but.

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Je souhaite remercier mon encadrant, **Mr. IDIR Abdelhak**, pour ses conseils avisés et son accompagnement tout au long de cette recherche. Un grand merci à mes professeurs et à l'ensemble de l'équipe pédagogique de Université de Béjaïa pour leur enseignement et leur soutien.

Je remercie également l'équipe de halle de technologie pour leur aide technique et les ressources mises à ma disposition. Leur disponibilité et compétence ont été essentielles à ce projet.

Enfin, je suis reconnaissant envers mes amis et camarades de promotion pour leur soutien moral et leurs discussions enrichissantes. Leur présence à mes côtés a rendu cette expérience plus agréable et stimulante.

## Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Ma famille pour leur amour, leur soutien constant et leurs encouragements qui m'ont inspiré tout au long de mon parcours académique.

Mes chers amis, pour leur présence, leur soutien moral et leurs précieux conseils tout au long de cette aventure.

Mes enseignants pour leur dévouement, leur expertise et leur soutien, essentiels à mon apprentissage et à la réalisation de ce projet

Ma binôme, **YOUSRA**, pour sa collaboration, son soutien et son travail acharné tout au long de ce mémoire. Merci également à toute sa famille pour leur accueil chaleureux et leur soutien moral.

Tout la promotion 2023/2024, pour les moments partagés, l'entraide et la camaraderie qui ont rendu ces années d'études mémorables et enrichissantes.

*Siham*

## Dédicace

Je dédie ce travail à

**Mon Père** et **Ma Mère** pour leur amour, leur soutien constant et leurs encouragements qui m'ont inspiré tout au long de mon parcours académique.

Mes sœurs « **Asma, Amel, Thiziri et Amina** » qui m'ont encouragé et soutenues durant la réalisation de ce mémoire

Mes chers amis, « **Ilham, Linda, Namir et Bouzid** » pour leur présence, leur soutien moral et leurs précieux conseils tout au long de cette aventure.

Aussi à notre premier ingénieur de la famille « **Oualid** »

Mes enseignants pour leur dévouement, leur expertise et leur soutien, essentiel à mon apprentissage et à la réalisation de ce mémoire.

Ma binôme, **SIHAM**, pour sa collaboration, son soutien et son travail tout au long de la réalisation de ce mémoire. Je remercie également toute sa famille pour leur accueil chaleureux et leur soutien moral.

Tout la promotion **2023/2024**, sur tout « **LINDA, SAMIRA, IMENE, NASSIM, WASSIM, HOUCINE** » pour les moments partagés, l'entraide et la camaraderie qui ont rendu ces années d'études mémorables et enrichissantes.

**yousra**

## Nomenclature

---

**Ap** : Profondeur de passe [mm].

**f** : Avance par tour [mm/tr].

**f<sub>z</sub>** : Avance par dent [mm/tr].

**V<sub>c</sub>** : Vitesse de coupe [m/min].

**N** : Vitesse de rotation [tr/min].

**D** : Diamètre de la pièce en tournage ou le diamètre de la fraise en chariotage [mm].

**V<sub>fz</sub>** : Vitesse d'avance en fraisage [mm/min].

**V<sub>f</sub>** : Vitesse d'avance en tournage [mm/min].

**Ra** : Rugosité arithmétique [μm].

**Rq** : Ecart moyen quadratique [μm].

**Rp** : La hauteur maximale du pic [μm].

**Rt** : Rugosité totale [μm].

**Tmax** : La température maximale [°C]

**Rε** : Rayon de bec [mm].

**Aγ** : Face de coupe.

**Aα** : Face de dépouille.

**S** : Arête de coupe.

**Pr** : Plan de référence.

**Pf** : Plan de travail conventionnel.

**Ps** : Plan d'arête.

**Po** : Plan orthogonal.

**Pb** : Plan de base.

**λs** : Angle d'inclinaison d'arête [°].

**Kr** : Angle de direction d'arête [°].

## Nomenclature

---

**$\epsilon r$**  : Angle de pointe [ $^{\circ}$ ].

**$\alpha o$**  : Angle de dépouille orthogonal [ $^{\circ}$ ].

**$\gamma o$**  : Angle de coupe orthogonal [ $^{\circ}$ ].

**$\beta o$**  : Angle de taillant orthogonal [ $^{\circ}$ ].

**VB** : La largeur moyenne de bande d'usure [mm].

**KT** : La profondeur du cratère [mm].

**Fc** : L'effort de coupe [N].

**Fz** : Effort tangentiel [N].

**Fx** : Effort axial [N].

**Fy** : Effort radial [N].

**$e_c$**  : L'épaisseur du copeau [mm].

**A** : limite d'élasticité, loi de comportement de Johnson-Cook [Mpa].

**B** : Facteur d'écrouissage, loi de comportement de Johnson-Cook [Mpa].

**n** : Exposant d'écrouissage, loi de comportement de Johnson-Cook.

**c** : Coefficient de sensibilité à la vitesse de déformation, loi de comportement de Johnson-Cook.

**m** : Exposant d'adoucissement thermique, loi de comportement de Johnson-Cook.

**(d1, d2, d3, d4, d5)** : Constantes de matériaux, loi de comportement de Johnson-Cook.

**Tf** : la température de fusion [ $^{\circ}$ C].

**T0** : la température de référence [ $^{\circ}$ C].

**E** : Le module de Young [Mpa].

**DL** : Des degrés de liberté.

**SC** : La somme des carrés des écarts.

**CM** : Les carrés moyens.

**Fs** : La propriété statistique.

**P** : La probabilité.

**CMe** : Les carrés moyens d'erreurs.

## **Nomenclature**

---

**RSM** : La méthode de surface de réponse.

**ANOVA** : Analyse de la variance.

**PC** : La contribution en pourcentage [%].

**Y** : La réponse désirée.

**F** : La fonction de réponse.

**a0, a1, a2, a3, a12 et a13, a23** : Les coefficients de regression.

**R<sup>2</sup>** : Coefficient de détermination.

<b>Chapitre I : l'usinage conventionnel par enlèvement de matière, contexte et état de l'art</b>	
<b>1</b>	<b>Introduction :..... 5</b>
<b>2</b>	<b>Généralité sur l'usinage par enlèvement de matières :..... 5</b>
<b>3</b>	<b>L'usinage conventionnel :..... 6</b>
3.1	Définition :..... 6
3.2	Principe d'usinage conventionnel :..... 6
<b>4</b>	<b>Les paramètres d'usinage par enlèvement de matières :..... 7</b>
4.1	La vitesse de coupe :..... 7
4.2	La vitesse d'avance et l'avance : ..... 8
4.3	La profondeur de passe :..... 9
4.4	L'ubrification :..... 10
4.5	La géométrie d'outils de coupe : ..... 10
4.5.1	Définition des faces de l'outil : ..... 10
4.5.2	Définition des plans de l'outil :..... 11
4.5.3	Repérage des plans de l'outil :..... 12
4.5.4	Définition des angles caractéristiques :..... 13
4.5.5	Autres outils de coupe :..... 14
4.6	Les matériaux d'outil de coupe : ..... 15
4.6.1	Les aciers rapides : ..... 15
4.6.2	Les carbures : ..... 15
4.6.3	Outils à plaquettes carbure :..... 16
4.6.4	Les céramiques :..... 16
4.6.5	Les carbures brasés : ..... 17
4.6.6	Les diamants industriels :..... 17
<b>5</b>	<b>Les paramètres technologiques de l'usinage : ..... 18</b>
5.1	Usure des outils de coupe :..... 18
5.1.1	Usure en dépouille :..... 18
5.1.2	Usure suivant la surface d'attaque : ..... 18
5.1.3	Fissuration de l'arête :..... 18
5.1.4	Rupture (cassure) de la pointe :..... 18
5.1.5	Déformation plastique :..... 18
5.1.6	Entaille : ..... 19
5.2	Etat de surface : ..... 19
5.3	Efforts de coupe :..... 21
<b>6</b>	<b>Les machine d'usinage conventionnel :..... 22</b>

## Sommaire

---

6.1	Les fraiseuses :.....	22
6.1.1	Les fraiseuses conventionnelles :.....	22
6.2	Les tours .....	24
<b>7</b>	<b>Les techniques d'usinage :.....</b>	<b>24</b>
7.1	Tournage :.....	24
7.2	Le fraisage : .....	25
7.2.1	Les modes de fraisage .....	25
7.2.2	Directions de fraisage.....	27
<b>8</b>	<b>L'usinabilité des matériaux :.....</b>	<b>31</b>
8.1	Les matériaux usinables : .....	31
8.2	Les matériaux difficiles à usiner : .....	31
8.3	Les matériaux non usinables : .....	31
<b>9</b>	<b>L'usinage d'aluminium : .....</b>	<b>31</b>
9.1	Caractéristiques de l'aluminium :.....	31
9.2	Défis de l'usinage de l'aluminium : .....	32
<b>10</b>	<b>Des études précédemment réalisées : .....</b>	<b>32</b>
	Article 01 :.....	32
	Article 02 :.....	34

## Chapitre II : Procédure expérimentale.

<b>1</b>	<b>Introduction :.....</b>	<b>37</b>
<b>2</b>	<b>Equipement et préparation des expériences :.....</b>	<b>37</b>
2.1	Le tour conventionnel :.....	37
2.1.1	Les outils de coupes utilisées : .....	37
2.1.2	Porte outil (plaquette) :.....	38
2.1.3	Eprouvettes d'usinage : .....	38
2.2	La fraiseuse conventionnelle : .....	39
2.2.1	Les outils de coupes utilisées : .....	39
2.2.2	Eprouvettes d'usinage : .....	40
2.3	Rugosimètre :.....	40
2.4	Thermomètre : .....	41
<b>3</b>	<b>Conditions de coupe :.....</b>	<b>41</b>

### Chapitre III : modélisation numérique et simulation .

<b>1</b>	<b>Introduction :</b> .....	<b>43</b>
<b>2</b>	<b>Problématique :</b> .....	<b>43</b>
2.1	Coupe orthogonale en tournage :.....	43
2.2	Coupe en bout en fraisage : .....	44
<b>3</b>	<b>Modèle :</b> .....	<b>44</b>
3.1	Choix de Lois de comportement de l’outil et du matériau usiné :.....	44
3.2	Modèle de comportement de type Johnson-Cook : .....	44
<b>4</b>	<b>Application au modèle numérique :</b> .....	<b>45</b>
4.1	Présentation du code de calcul ABAQUS : .....	45
4.2	Caractéristiques géométriques du modèle : .....	45
4.3	Caractéristiques de matériaux : .....	45
4.4	Procédure à suivre : .....	46
4.4.1	Coupe orthogonale : .....	47
4.4.1.1	Création des géométries de l’outil et de la pièce :.....	47
4.4.1.2	Propriétés des matériaux usinés et de coupe : .....	47
4.4.1.3	Maillage de la pièce :.....	48
4.4.1.4	Contact outil-pièce :.....	48
4.4.2	Coupe en bout : .....	49
4.4.2.1	Création des géométries de l’outil et de la pièce :.....	49
4.4.2.2	Propriétés des matériaux usinés et de coupe : .....	49
4.4.2.3	Maillage de la pièce :.....	50
4.4.2.4	Contact outil-pièce :.....	50
4.5	Unités dans Abaqus : .....	51
<b>5</b>	<b>Résultats de simulation :</b> .....	<b>51</b>
5.1	Les distributions du champ de la contrainte équivalent de Von Mises : .....	51
5.1.1	Coupe orthogonale. ....	52
5.1.2	Fraisage en bout .....	53
5.2	Type de coupeau .....	54
5.2.1	Coupe orthogonale .....	54
5.2.1.1	Répartition des contraintes .....	54
5.2.2	Fraisage en bout .....	55

### Chapitre VI : résultat et discussion

<b>1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>57</b>
<b>2</b>	<b>Modélisation de la rugosité et de la température : .....</b>	<b>57</b>
2.1	Tournage (Opération de dressage) : .....	57
2.2	Fraisage (Opération de surfaçage) : .....	59
<b>3</b>	<b>Analyse de la variance : .....</b>	<b>60</b>
3.1	Analyse de la variance pour un plan de 18 essais avec un outil carbure brasé sur Ra et Tmax : .....	61
3.2	Analyse de la variance pour un plan de 5 meilleurs essais avec un outil carbure tungstène sur Ra et Tmax. ....	62
3.3	Analyse de la variance pour un plan de 12 essai sur Ra et Tmax : .....	64
<b>4</b>	<b>La méthode de surface de réponse(RSM) : .....</b>	<b>66</b>
4.1	Analyse de régression .....	67
4.1.1	Analyse de régression pour la rugosité (Ra) de plan d'expérience de 18 essais avec un outil de coupe en carbure brasé.....	67
4.1.2	Analyse de régression pour la rugosité (Ra) de plan d'expérience de 5 meilleurs essais avec un outil de coupe en carbure tungstène .....	68
4.1.3	Analyse de régression pour la rugosité (Ra) de plan d'expérience de 12 essai avec un outil de coupe en carbure brasé.....	68
4.1.4	Analyse de régression pour la température (Tmax) de plan d'expérience de 18 essais avec un outil de coupe en carbure brasé .....	68
4.1.5	Analyse de régression pour la température (Tmax) de plan d'expérience de 5 meilleurs essais avec un outil de coupe en carbure tungstène.....	69
4.1.6	Analyse de régression pour la température (Tmax) de plan d'expérience de 12 essai avec un outil de coupe en carbure brasé .....	69
<b>5</b>	<b>Comparaison entre les valeurs prédites et les valeurs mesurées.....</b>	<b>69</b>
5.1	Les valeurs prédites et les valeurs mesurées de la rugosité (Ra) pour le plan d'expérience de 18 essais avec un outil de coupe en carbure brasé : .....	69
5.2	Les valeurs prédites et les valeurs mesurées de la rugosité (Ra) pour les meilleurs 5 essais avec un outil de coupe en carbure tungstène : .....	70
5.3	Les valeurs prédites et les valeurs mesurées de la rugosité (Ra) pour le plan d'expérience de 12 essai.....	71
5.4	Les valeurs prédites et les valeurs mesurées de la température Tmax pour 18 essai avec un outil carbure brasé.....	71
5.5	Les valeurs prédites et les valeurs mesurées de la température Tmax pour 5 essai avec un outil carbure tungstène .....	72
5.6	Les valeurs prédites et les valeurs mesurées de la température Tmax pour 12 essai	73

<b>6</b>	<b>Comparaison des valeurs de la rugosité (Ra) et la température (Tmax) entre l'outil carbure brase et l'outil carbure tungstène.....</b>	<b>74</b>
	<b>D'après l'étude qui on a fait sur logiciel Mini-tabe statistical .....</b>	<b>74</b>
<b>7</b>	<b>Représentation graphique 3D. ....</b>	<b>75</b>
7.1	La rugosité Ra 18 essais avec un outil carbure brasé : .....	75
7.2	La température Tmax 18 essais avec un outil carbure brasé : .....	76
7.3	La rugosité Ra 5 essai outil carbure tungstène .....	77
7.4	La température Tmax 5 essai avec un outil carbure tungstène .....	78
7.5	La rugosité Ra 12essai .....	79
7.6	La température Tmax 12 essais .....	80
<b>8</b>	<b>L'optimisations des conditions de coupe pour la rugosité de surface. ....</b>	<b>81</b>

### Chapitre I : l'usinage conventionnel par enlèvement de matière, contexte et état de l'art

<b>Figure I.1.</b> L'usinage conventionnel .	6
<b>Figure I.2.</b> Les opérations de l'usinage conventionnel [3].	7
<b>Figure I.3.</b> La vitesse de coupe. A) fraisage. B) tournage	8
<b>Figure I.4.</b> L'avance et la vitesse d'avance. A) tournage [22]. B) fraisage	9
<b>Figure I.5.</b> La profondeur de passe. A) En tournage. B) En fraisage	9
<b>Figure I.6.</b> La lubrification en usinage	10
<b>Figure I.7.</b> Les faces de l'outil de coupe [8].	11
<b>Figure I.8.</b> Les plans d'outil de coupe [8].	12
<b>Figure I.9.</b> Les différents plans de l'outil [8].	12
<b>Figure I.10.</b> Les angles d'arêtes de l'outil [8].	13
<b>Figure I.11.</b> Les angles des faces de l'outil [8].	13
<b>Figure I.12.</b> Fraise deux tailles ARS monobloc [8].	14
<b>Figure I.13.</b> Les outils. A) foret ARS a118°. B) outil a plaquette carbure STDC [8].	14
<b>Figure I.14.</b> Les outils en acier rapide.	15
<b>Figure I.15.</b> Les outils en carbure.	15
<b>Figure I.16.</b> Les outils avec plaquette en carbure.	16
<b>Figure I.17.</b> Les outils en céramiques	16
<b>Figure I.18.</b> Les outils en carbure brasés.	17
<b>Figure I.19.</b> Les outils en diamant.	17
<b>Figure I.20.</b> Décomposition d'une surface mesurée [11].	19
<b>Figure I.21.</b> Rugosité moyenne arithmétique Ra [11].	20
<b>Figure I.22.</b> Paramètres de rugosité [10].	20
<b>Figure I.23.</b> Les composantes de l'effort de coupe [13].	21
<b>Figure I.24.</b> Les fraiseuses conventionnelles.	22
<b>Figure I.25.</b> Les fraiseuses horizontales.	23
<b>Figure I.26.</b> La fraiseuse verticale.	23
<b>Figure I.27.</b> La fraiseuse universelle	23
<b>Figure I.28.</b> Le tour conventionnel.	24
<b>Figure I.29.</b> Les composants de tour	24
<b>Figure I.30.</b> Tournage intérieur.	25
<b>Figure I.31.</b> Tournage extérieur.	25
<b>Figure I.32.</b> Le fraisage en bout [15].	26
<b>Figure I.33.</b> La forme du copeau enlevé par une dent pour le fraisage en bout [15].	26
<b>Figure I.34.</b> Les principaux paramètres géométriques du copeau pour le fraisage en roulant. Copeau mini [15].	27
<b>Figure I.35.</b> Fraisage en roulant : travail en opposition [15].	28
<b>Figure I.36.</b> Le fraisage en bout : travail en opposition [15].	28
<b>Figure I.37.</b> Fraisage en roulant : en avalant ou en concordance [15].	29
<b>Figure I.38.</b> Le fraisage en bout : travail en avalant [15].	29
<b>Figure I.39.</b> Optimisation des paramètres de coupe en tournage.	32
<b>Figure I.40.</b> Mouvement de coupe.	33
<b>Figure I.41.</b> Analyse des résidus.	33
<b>Figure I.42.</b> Ra expérimentale/théorique	33
<b>Figure I.43.</b> Schéma du montage expérimental.	34

## Liste des figures

---

<b>Figure I.44.</b> Les effets moyens de Ra.....	34
<b>Figure I.45.</b> Les graphes de surface de réponse .....	35

### Chapitre II : procédure expérimentale.

<b>Figure II.1.</b> Tour modèle SN 40C. ....	37
<b>Figure II.2.</b> Outil de coupe en Carbone brasé. ....	37
<b>Figure II.3.</b> Plaquettes de coupe en carbure avec revêtement. ....	38
<b>Figure II.4.</b> Porte des plaquettes de coupe en carbure.....	38
<b>Figure II.5.</b> Eprouvette utilisée pour les essais. ....	39
<b>Figure II.6.</b> Figure 6. Fraiseuse modèle « Almo FH ». ....	39
<b>Figure II.7.</b> Fraise pour surfacage en carbure brasé.....	40
<b>Figure II.8.</b> Eprouvette utilisée pour les essais. ....	40
<b>Figure II.9.</b> Rugosimètre. ....	40
<b>Figure II.10.</b> Thermomètre 63 IR.....	41

### Chapitre III : modélisation numérique et simulation .

<b>Figure III.1.</b> Représentation en coupe orthogonale des zones de déformation. [27] .....	43
<b>Figure III.2.</b> Géométrie de l'outil .....	47
<b>Figure III.3.</b> Géométrie de la pièce. ....	47
<b>Figure III.4.</b> Propriétés du matériau usiné. ....	48
<b>Figure III.5.</b> Maillage de la pièce.....	48
<b>Figure III.6.</b> Module interaction. ....	49
<b>Figure III.7.</b> Géométrie de l'outil .....	49
<b>Figure III.8.</b> Géométrie de la pièce.....	49
<b>Figure III.9.</b> Propriétés du matériau usiné .....	50
<b>Figure III.10.</b> Maillage de la pièce.....	50
<b>Figure III.11.</b> Module interaction. ....	51
<b>Figure III.12.</b> Les distributions du champ de la contrainte équivalent de Von Mises.....	52
<b>Figure III.13.</b> Les distributions du champ de la contrainte équivalent de Von Mises.....	53
<b>Figure III.14.</b> Forme du coupeaux discontinue.....	54
<b>Figure III.15.</b> Répartition des contraintes dans la zone de déformation. ....	54
<b>Figure III.16.</b> Forme du coupeaux est négligeable .....	55

### Chapitre VI : résultat et discussion .

<b>Figure VI.1.</b> Les effets principaux de Ra. ....	61
<b>Figure VI.2.</b> Les effets principaux de (Tmax).....	62
<b>Figure VI.3.</b> Les effets principaux de Ra .....	63
<b>Figure VI.4.</b> Les effets principaux de Tmax .....	64
<b>Figure VI.5.</b> Les effets principaux de Ra .....	65
<b>Figure VI.6.</b> Les effets principaux de Tmax. ....	66
<b>Figure VI.7.</b> Comparaison entre Ra mesurées et Ra prévues.....	70
<b>Figure VI.8.</b> Comparaison entre (Ra carbure) mesurées et (Ra pre) prévues. ....	70
<b>Figure VI.9.</b> Comparaison entre (Ra) mesurées et (Ra pre) prévues .....	71

## Liste des figures

---

<b>Figure VI.10.</b> Comparaison entre Tmax mesurées et Tmax prévues .....	72
<b>Figure VI.11.</b> Comparaison entre Tmax mesurées et Tmax prévues .....	72
<b>Figure VI.12.</b> Comparaison entre Tmax mesurées et Tmax prévues .....	73
<b>Figure VI.13.</b> Représente la comparaison entre les valeurs de la rugosité (Ra) avec outil carbure brasé et la rugosité (Ra carbure) avec outil carbure tungstène.....	74
<b>Figure VI.14.</b> Représente la comparaison entre les valeurs de la température (Tmax) avec outil carbure brasé et la température (Tmax_2) avec outil carbure tungstène. ....	74
<b>Figure VI.15.</b> Représente l'influence de la vitesse de coupe et l'avance sur la rugosité arithmétique.....	75
<b>Figure VI.16.</b> Représente l'influence de la vitesse de coupe et la profondeur de passe sur la rugosité arithmétique d'après cette représentation la combinaison des moyennes vitesse de coupe et profondeur de passe donnent la meilleure rugosité. ....	75
<b>Figure VI.17.</b> Représente l'influence de l'avance et la profondeur de passe sur la rugosité arithmétique d'après cette représentation la combinaison des plus grande avance et profondeur de passe donnent la meilleure rugosité.....	75
<b>Figure VI.18.</b> Représente l'influence de la vitesse de coupe et l'avance sur la température maximale. D'après cette représentation la combinaison de vitesse de coupe moyenne et l'avance le plus petite donnent la température la plus basse.....	76
<b>Figure VI.19.</b> Représente l'influence de la vitesse de coupe et la profondeur de passe sur la température maximale. D'après cette représentation la combinaison des plus petites vitesses de coupe et profondeur de passe donnent la température la plus basse. ....	76
<b>Figure VI.20.</b> Représente l'influence de l'avance et la profondeur de passe sur la température maximale D'après cette représentation la combinaison de l'avance moyenne et la profondeur de passe la plus grande donnent la température la plus basse.....	76
<b>Figure VI.21.</b> Représente l'influence de la vitesse de coupe et l'avance sur la rugosité arithmétique d'après cette représentation la combinaison de vitesse de coupe la plus grande et avance le plus petite donnent la meilleure rugosité.....	77
<b>Figure VI.22.</b> Représente l'influence de la vitesse de coupe et la profondeur de passe sur la rugosité arithmétique. D'après cette représentation la combinaison des moyenne vitesse de coupe et la profondeur de passe la plus grande donnent la meilleure rugosité .....	77
<b>Figure VI.23.</b> Représente l'influence de l'avance et la profondeur de passe sur la rugosité arithmétique d'après cette représentation la combinaison de l'avance le plus petite et la profondeur de passe la plus grande donnent la meilleure rugosité.....	77
<b>Figure VI.24.</b> Représente l'influence de la vitesse de coupe et l'avance sur la température maximale. D'après cette représentation la combinaison de la vitesse de coupe la plus grande et l'avance le plus petite donnent la température la plus basse.....	78
<b>Figure VI.25.</b> Représente l'influence de la vitesse de coupe et la profondeur de passe sur la température maximale. D'après cette représentation la combinaison de moyenne vitesse de coupe et plus petite profondeur de passe donnent la température la plus basse.....	78
<b>Figure VI.26.</b> Représente l'influence de l'avance et la profondeur de passe sur la température maximale. D'après cette représentation la combinaison de l'avance le plus petite et la profondeur de passe la plus grande donnent la température la plus basse. ....	78
<b>Figure VI.27.</b> Représente l'influence de la vitesse de coupe et l'avance sur la rugosité arithmétique. D'après cette représentation la combinaison des moyenne vitesse de coupe et l'avance donnent la meilleure rugosité.....	79

## Liste des figures

---

- Figure VI.28.** Représente l'influence de la vitesse de coupe et la profondeur de passe sur la rugosité arithmétique. D'après cette représentation la combinaison de moyenne vitesse de coupe et la plus petite profondeur de passe donnent la meilleure rugosité. .... 79
- Figure VI.29.** Représente l'influence de l'avance et la profondeur de passe sur la rugosité arithmétique. D'après cette représentation la combinaison des plus petite avance et profondeur de passe donnent la meilleure rugosité. .... 79
- Figure VI.30.** Représente l'influence de la vitesse de coupe et l'avance sur la température maximale. D'après cette représentation la combinaison de la vitesse de coupe la plus grande et l'avance le plus petite donnent la température la plus basse. .... 80
- Figure VI.31.** Représente l'influence de la vitesse de coupe et la profondeur de passe sur la température maximale D'après cette représentation la combinaison des plus grandes valeurs de vitesse de coupe et profondeur de passe donnent la température la plus basse. .... 80
- Figure VI.32.** Représente l'influence de l'avance et la profondeur de passe sur la température maximale. D'après cette représentation la combinaison des plus petites valeurs de l'avance et profondeur de passe donnent la température la plus basse. .... 80

## Liste des tableaux

---

### Chapitre III : modélisation numérique et simulation.

<b>Tableau 1.</b> Caractéristiques mécaniques d'aluminium AL_7075. ....	46
<b>Tableau 2.</b> Coefficients de Johnson-Cook d'aluminium AL_7075. ....	46
<b>Tableau 3.</b> Coefficients d'endommagement de Johnson-Cook d'aluminium AL_7075.....	46
<b>Tableau 4.</b> Choix des unités .....	51

### Chapitre IV : Résultats et discussion

<b>Tableau 1.</b> Plan d'expérience de 18 essai et critère de rugosité et de température. ....	58
<b>Tableau 2.</b> Plan pour 5 essai d'expérience du critère de rugosité et de température. ....	59
<b>Tableau 3.</b> Plan pour 12 essai d'expérience du critère de rugosité et de température .....	59
<b>Tableau 4.</b> résultats d'optimisation Ra et Tmax .....	81

**Introduction**

**générale**

## Introduction générale

---

### Introduction générale

Dans un contexte industriel de plus en plus compétitif, l'optimisation des processus d'usinage est essentielle pour améliorer la qualité des produits tout en réduisant les coûts de la production. L'aluminium **AL\_7075**, en raison de ses excellentes propriétés de formabilité et de légèreté, est largement utilisé dans divers secteurs industriels, notamment l'aérospatiale, l'automobile et l'électronique. Cependant, l'usinage de cet alliage pose des défis particuliers en raison de sa tendance à adhérer aux outils de coupe et de sa propension à générer de la chaleur pendant l'usinage, ce qui peut affecter négativement la qualité de la surface usinée.

L'objectif principal de ce mémoire est d'étudier l'influence des paramètres d'usinage sur l'état de surface et la température de l'aluminium **AL\_7075**.

Ce travail est organisé en quatre chapitres distincts.

Le premier chapitre, représente l'étude bibliographique, nous examinerons les principes, les paramètres et les techniques de base de cette méthode d'usinage, en mettant l'accent sur le tour et la fraiseuse conventionnelle, nous discuterons aussi sur des défis spécifiques liés à l'usinage de l'aluminium, ainsi que des meilleures pratiques et des techniques recommandées pour obtenir des résultats optimaux.

Dans le deuxième chapitre, nous exposerons les équipements et les conditions expérimentales utilisés pour mener cette recherche. Les dispositifs de mesure et le couple outil - matière sont présentés d'une manière précise avec des détails nécessaires pour une étude expérimentale de la coupe.

Le troisième chapitre, concerne une étude numérique de la coupe orthogonale par éléments finis, il consiste à l'exécution de la simulation par Abaqus, à l'extraction des résultats et leur discussion.

Le quatrième chapitre, concerne une étude statistique pour des plans d'expérience, l'analyse de la variance ANOVA des résultats expérimentaux basée sur la méthodologie de la surface de réponse a été réalisée en utilisant le logiciel Minitab. L'objectif est de déterminer des modèles mathématiques qui permettent à la prédiction de la rugosité de surface, température maximale. Le quatrième et dernier chapitre, nous élaborons une méthode d'optimisation, méthode des surfaces de réponse. L'objectif est le choix des conditions de coupe les plus

## **Introduction générale**

---

convenables, afin d'obtenir les résultats désirés pour une rugosité arithmétique voulus et une température basse. Enfin, nous clôturons avec une conclusion générale.

# **Chapitre I**

L'usinage conventionnel  
Par enlèvement de matière,  
contexte et d'art

## **1 Introduction**

L'usinage par enlèvement de matière est une technique fondamentale dans le domaine de la fabrication mécanique. Il consiste à façonner une pièce en retirant progressivement des copeaux de matière à l'aide des outils spécifiques. Parmi les machines-outils les plus couramment utilisées pour cette opération, on trouve les tours et les fraiseuses, qui existent à la fois sous forme conventionnelle et à commande numérique.

Dans ce chapitre, nous examinons les principes, les paramètres et les techniques de base de cette méthode d'usinage, en mettant l'accent sur le tour et la fraiseuse conventionnels, nous discuterons aussi sur des défis spécifiques liés à l'usinage de l'aluminium, ainsi que des meilleures pratiques et des techniques recommandées pour obtenir des résultats optimaux.

## **2 Généralité sur l'usinage par enlèvement de matières**

L'usinage qualifie l'opération qui consiste à soumettre une pièce à l'action d'une ou de plusieurs machines-outils essentiellement dans le cas où cette action consiste à un enlèvement de matière. Le terme usinage, synonyme du mot enlèvement de matière ou enlèvement de copeaux, désigne tous les moyens mis en œuvre pour obtenir une pièce ayant des côtes et des tolérances fixées à l'avance, à partir d'une pièce brute venue de la forge ou de fonderie [1].

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

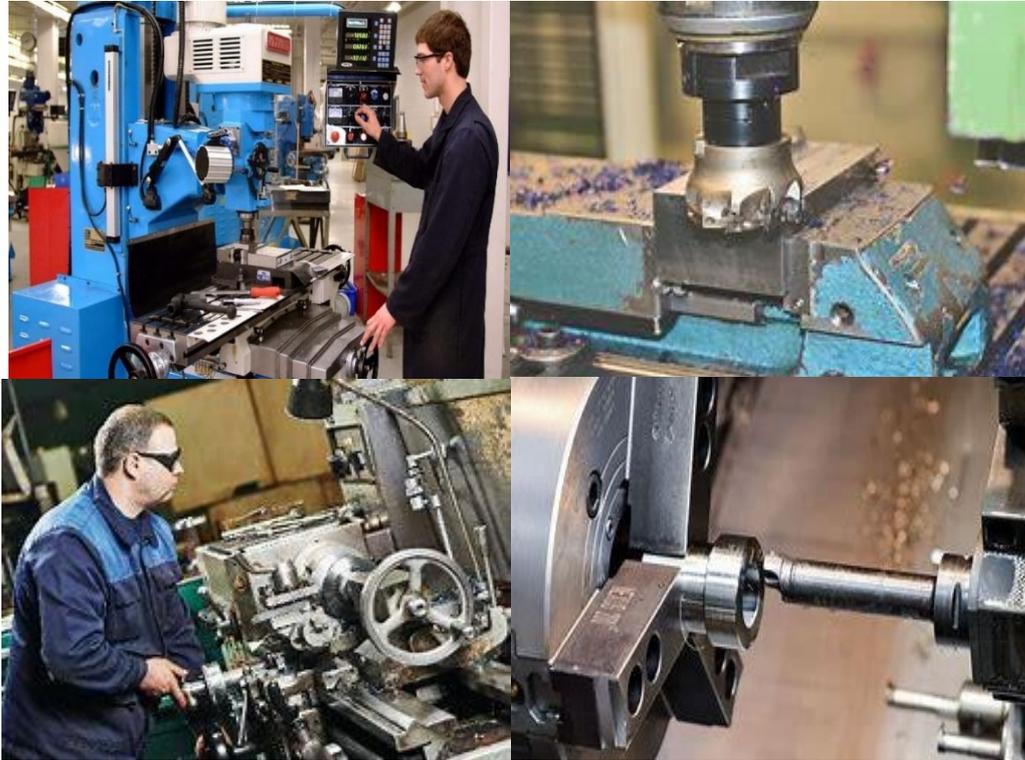
En usinage, il existe plusieurs configurations utilisables selon le procédé de coupe (le fraisage, le rabotage, le tournage ...). Durant notre étude, nous nous intéresserons plus précisément à la technique d'enlèvement de matière par fraisage conventionnel et tournage conventionnel [2].

## **3 L'usinage conventionnel**

### **3.1 Définition**

L'usinage conventionnel est une méthode de fabrication dans laquelle des pièces métalliques ou d'autres matériaux sont formées, coupées ou façonnées à l'aide d'outils coupants tels que des tours, des fraiseuses, des perceuses, etc., qui sont manipulés manuellement par un opérateur

qualifié Cela nécessite souvent une grande expertise pour obtenir des résultats précis et de haute qualité. Ce type d'usinage ne dépend pas de la programmation informatique pour guider les mouvements de l'outil. Au lieu de cela, l'opérateur contrôle manuellement les mouvements de l'outil par le biais de volants, de manivelles ou d'autres dispositifs mécaniques.



**Figure I.1.** L'usinage conventionnel.

### **3.2 Principe d'usinage conventionnel**

Les machines manuelles sont contrôlées à la main, y compris toutes les machines traditionnelles telles que les scies à ruban, les perceuses à colonne, les meuleuses, les fraiseuses en bout et les tours. Avec ces machines manuelles, les machinistes peuvent créer un grand nombre d'articles de prototypage à des fins diverses. Cependant, par rapport à l'usinage MOCN contrôlé par l'automatisation ou un ordinateur, l'usinage manuel prend plus de temps et plus d'attention pour exécuter n'importe quelle fonction.



**Figure I.2.** Les opérations de l'usinage conventionnel [3].

#### **4 Les paramètres d'usinage par enlèvement de matières**

Dans l'usinage conventionnel, les paramètres tels que la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de coupe sont généralement réglés manuellement par l'opérateur, en fonction de son expérience, de la pièce à usiner et du matériau utilisé. Ces paramètres peuvent varier considérablement d'une opération à l'autre et peuvent nécessiter des ajustements fréquents tout au long du processus d'usinage [5].

##### **4.1 La vitesse de coupe**

La vitesse de coupe est un paramètre fondamental pour la formation du copeau.

La valeur de la vitesse de coupe varie selon :

- La nature de l'opération ;
- Le type de matériau à usiner ;
- Le type de matériau de l'outil de coupe ;
- Les conditions de lubrification ;

Augmenter la vitesse de coupe accroît la température et réduit ainsi la durée de vie de l'outil de coupe

$$V_c = \frac{N\pi D}{1000} \dots\dots\dots(1)$$

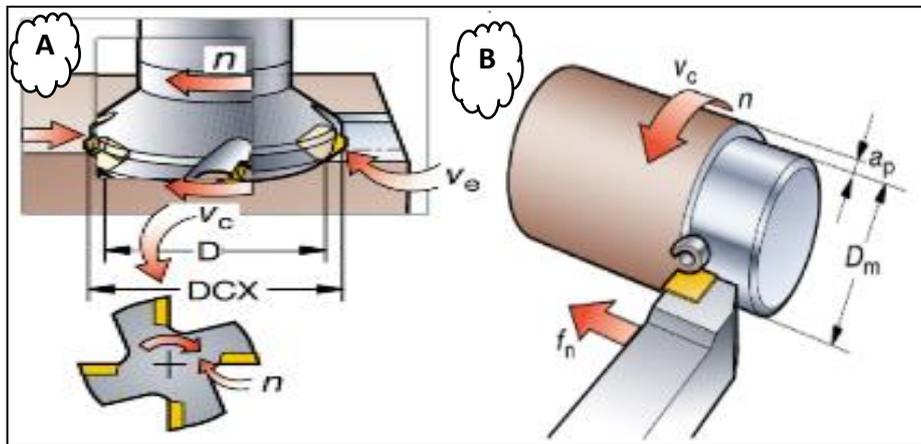
$$N = \frac{V_c 1000}{\pi D} \dots\dots\dots(2)$$

Avec :

D : Diamètre de l'outil en fraisage ou diamètre de la pièce en tournage (mm).

N : vitesse de broche (tr/min).

Vc : vitesse de coupe (m/min).



**Figure I.3.** La vitesse de coupe. A) fraisage. B) tournage.

#### 4.2 La vitesse d'avance et l'avance

C'est le déplacement de l'arête tranchante principale de l'outil par rapport à la surface usinée. Sa valeur influence la qualité du fini de surface de la pièce à usinée. Sa valeur est souvent grande pour les opérations d'ébauche. Ce qui permet d'augmenter la productivité, et faible pour les opérations de finition pour obtenir la qualité [6].

**En tournage :**

$$V_f = N \cdot f \dots\dots\dots (3)$$

$$f = \frac{V_f}{N} \dots\dots\dots (4)$$

**En fraisage :**

$$V_{fz} = f_z \cdot N \cdot Z \dots\dots\dots (5)$$

$$f_z = \frac{V_{fz}}{N \cdot Z} \dots\dots\dots (6)$$

Avec.

Z : Nombre de dents de l'outil.

Vf : Vitesse d'avance en mm/min.

Vfz : la vitesse d'avance mm/min

fz : Avance par dent en mm/tr/dent.

N : Fréquence de rotation en tours par minute (tr/min).

f : l'avance de l'outil en mm/tr

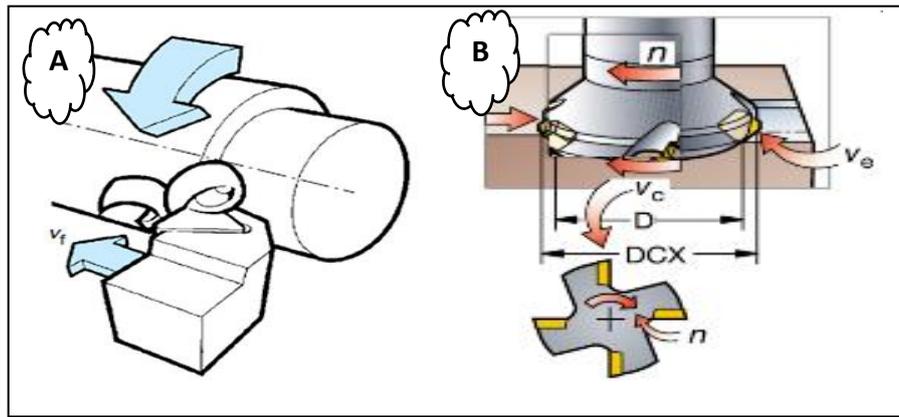


Figure I.4. L'avance et la vitesse d'avance. A) tournage [20]. B) fraisage.

### 4.3 La profondeur de passe

La profondeur de passe est le déplacement de l'outil déterminant la quantité de matière à enlever sur la pièce. Elle est désignée par ( $A_p$ ) et est exprimée en millimètre.

Elle est déterminée en fonction de :

- La quantité de matière à enlever
- La forme de la pièce à usinée
- La puissance et la rigidité de la machine
- La rigidité de l'outil de coupe

Il vaut mieux enlever les surépaisseurs d'usinage sans faire beaucoup de passes. Pourtant, quand on prend une profondeur de passe très grande, la précision d'usinage diminue à cause de la présence des efforts de coupe très élevés. D'habitude, on choisit la profondeur de passe en dépendance des surépaisseurs d'usinage et de la rugosité superficielle demandée [4].

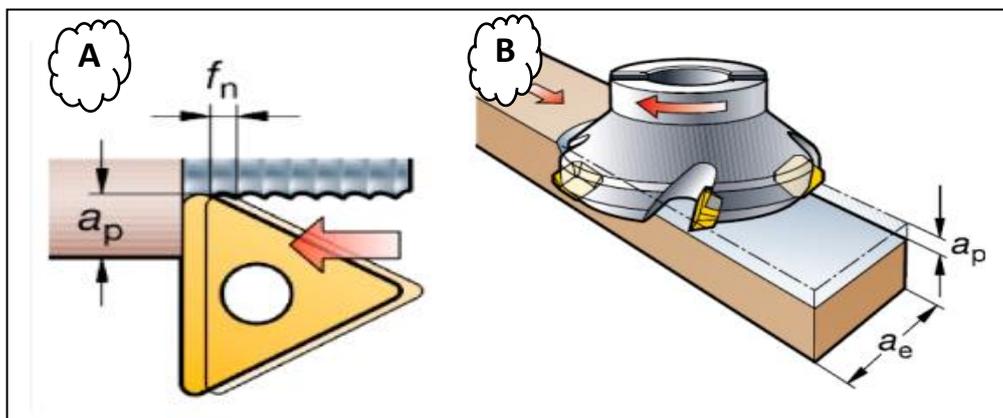


Figure I.5. La profondeur de passe. A) En tournage. B) En fraisage.

#### 4.4 Lubrification

Les liquides de coupe sont principalement composés de l'eau, huiles minérales et additifs chimiques ; ils permettent d'assurer les fonctions suivantes :

- Le refroidissement de l'outil ;
- La diminution du coefficient de frottement ;
- L'amélioration de l'état de surface ;
- L'évacuation des copeaux et de la chaleur [5].



**Figure I.6.** La lubrification en usinage.

#### 4.5 La géométrie d'outils de coupe

L'outil de coupe est choisi en fonction de la matière du matériau à usiner et des capacités de la machine-outil utilisée. Un outil coupant est constitué d'un corps d'outil comportant une ou plusieurs parties actives. La partie active est constituée d'une arête de coupe, intersection de la face de coupe ( $A\gamma$ ) et de la face de dépouille ( $A\alpha$ ) [8].

##### 4.5.1 Définition des faces de l'outil

$A\gamma$  : face de coupe ( $\gamma$  : 'gamma') Face sur laquelle glisse le copeau.

$A\alpha$  : face de dépouille ( $\alpha$  : 'alpha') Face devant laquelle passe la surface qui vient d'être usinée.

S : arête de coupe : arête de coupe principale intersection entre  $A\gamma$  et  $A\alpha$  [8].

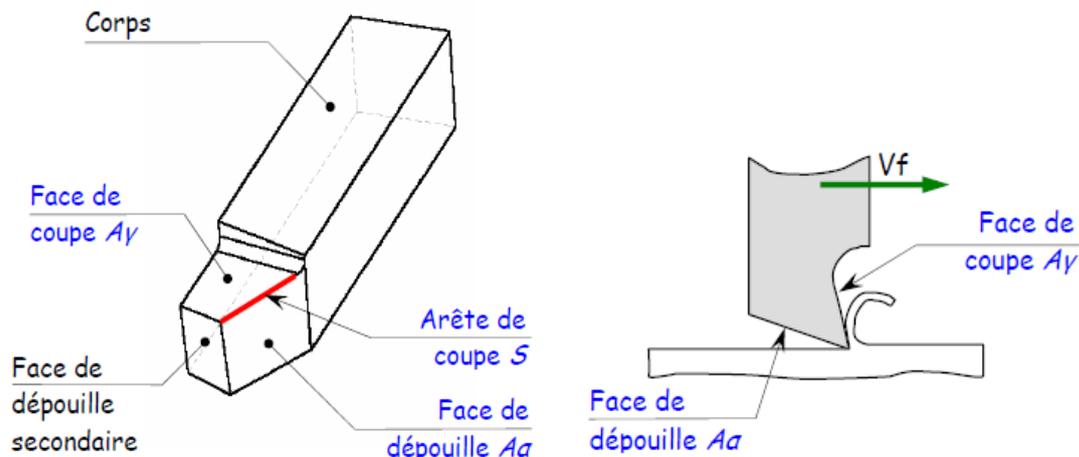


Figure I.7. Les faces de l'outil de coupe [8].

Le sens de l'outil est défini par la position de l'arête de coupe (S). En considérant l'arête de coupe (S). L'outil tenu en main verticalement et le bec en bas :

- l'outil est dit à droite, si, son arête tranchante est orientée vers la droite.
- l'outil est dit à gauche, si son arête tranchante est orientée vers la gauche.
- Si la partie active de l'outil est symétrique par rapport à l'axe de l'outil, ce dernier travaille indifféremment à droite et à gauche, l'outil est neutre [8].

#### 4.5.2 Définition des plans de l'outil

**Pr (Plan de référence) :** C'est un plan perpendiculaire au vecteur  $V_c$  (vitesse de coupe) et passant par le point considéré A de l'arête de coupe. Pour un outil rotatif, Pr passe aussi par l'axe de rotation.

**Pf (Plan de travail conventionnel) :** C'est le plan perpendiculaire au plan de référence Pr, qui contient le vecteur  $V_f$  (vitesse d'avance) et passant par le point considéré A de l'arête de coupe.

**Ps (Plan d'arête) :** C'est le plan perpendiculaire au plan de référence Pr, qui contient la tangente à l'arête de coupe, au point considéré A.

**Po (Plan orthogonal) :** C'est le plan perpendiculaire au plan de référence Pr et au plan d'arête Ps, passant par le point considéré A de l'arête de coupe [8].

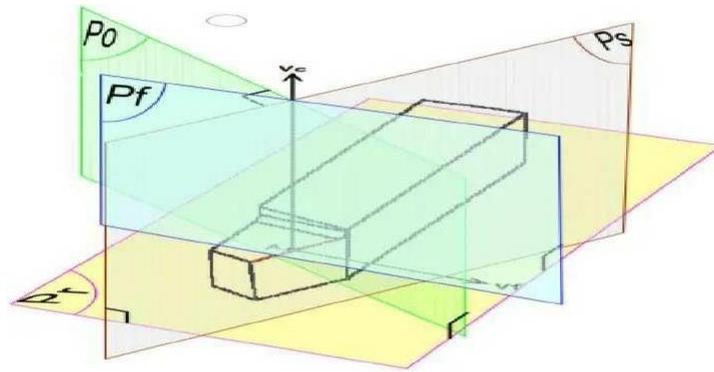


Figure I.8. Les plans d'outil de coupe [8].

#### 4.5.3 Repérage des plans de l'outil

- 1)  $P_b$  : plan de base, surface d'appui de l'outil base.
- 2)  $M$  : point considéré de l'arête de coupe.
  - ( $V$ ) : Vecteur supposé du sens de coupe.
  - ( $f$ ) : Vecteur supposé du sens d'avance.
- 3)  $P_r$  : plan de référence, parallèle à  $P_b$  et contenant  $M$  et  $f$ .
- 4)  $P_f$  : plan de travail conventionnel, perpendiculaire à  $P_r$  et contenant  $M$ ,  $V$  et  $f$ .
- 5)  $P_s$  : plan d'arête de l'outil, perpendiculaire à  $P_r$  et tangent à l'arête de coupe en  $M$  [8].

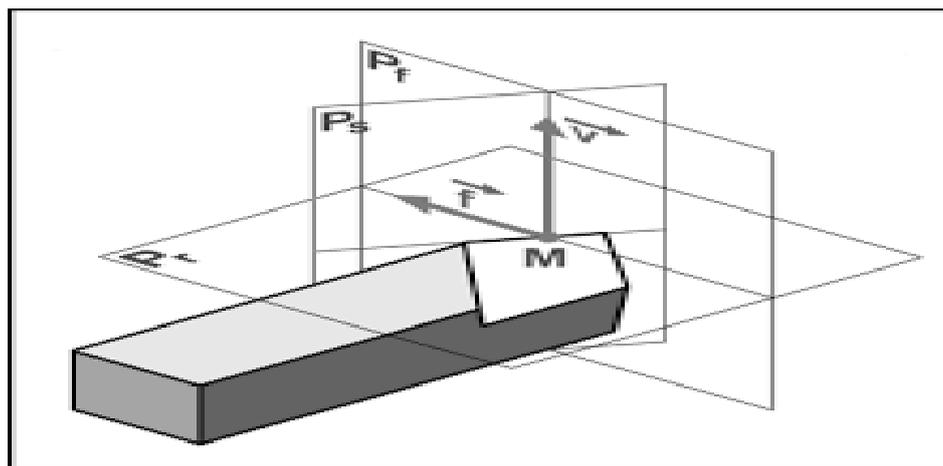


Figure I.9. Les différents plans de l'outil [8].

#### 4.5.4 Définition des angles caractéristiques

- $\lambda_s$  = Angle d'inclinaison d'arête "Lambda s" : Angle aigu mesurer dans  $P_s$ , compris entre  $P_r$  et la tangente à l'arête, au point A. Il peut être positif ou négatif.
- $\kappa_r$  = Angle de direction d'arête "Kappa r" : angle aigu mesurer dans  $P_r$ , compris entre  $P_f$  et  $P_s$ .
- $\epsilon_r$  = Angle de pointe "epsilon r" : Angle mesuré dans  $P_r$  entre l'arête de coupe principale S et l'arête de coupe secondaire S'

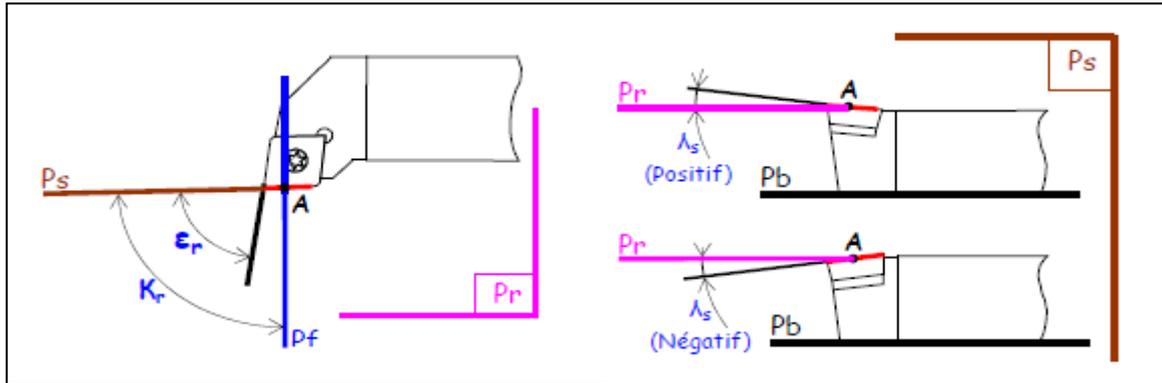


Figure I.10. Les angles d'arêtes de l'outil [8].

- $\alpha_o$  = Angle de dépouille orthogonal : Angle aigu mesurer dans  $P_o$ , compris entre  $P_s$  et  $A\alpha$ .
- $\beta_o$  = Angle de taillant orthogonal : Angle mesuré dans  $P_o$ , compris entre  $A\alpha$  et  $A\gamma$ .
- $\gamma_o$  = Angle de coupe orthogonal : Angle aigu mesurer dans  $P_o$ , compris entre  $P_r$  et  $A\gamma$ .

Remarque :  $\alpha_o + \beta_o + \gamma_o = 90^\circ$

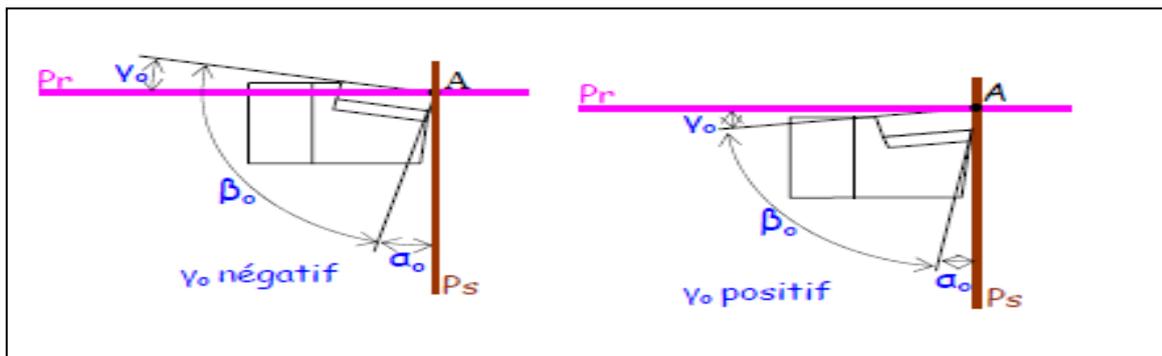


Figure I.11. Les angles des faces de l'outil [8].

### 4.5.5 Autres outils de coupe

Dans l'usinage on a plusieurs autres outils de coupe et leur

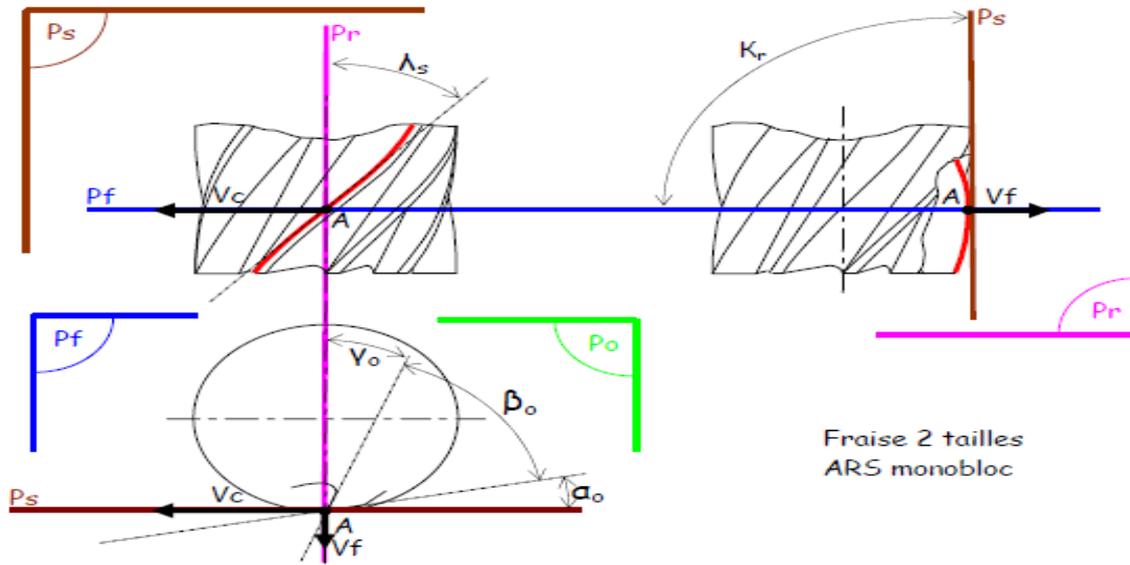


Figure I.12. Fraise deux tailles ARS monobloc [8].

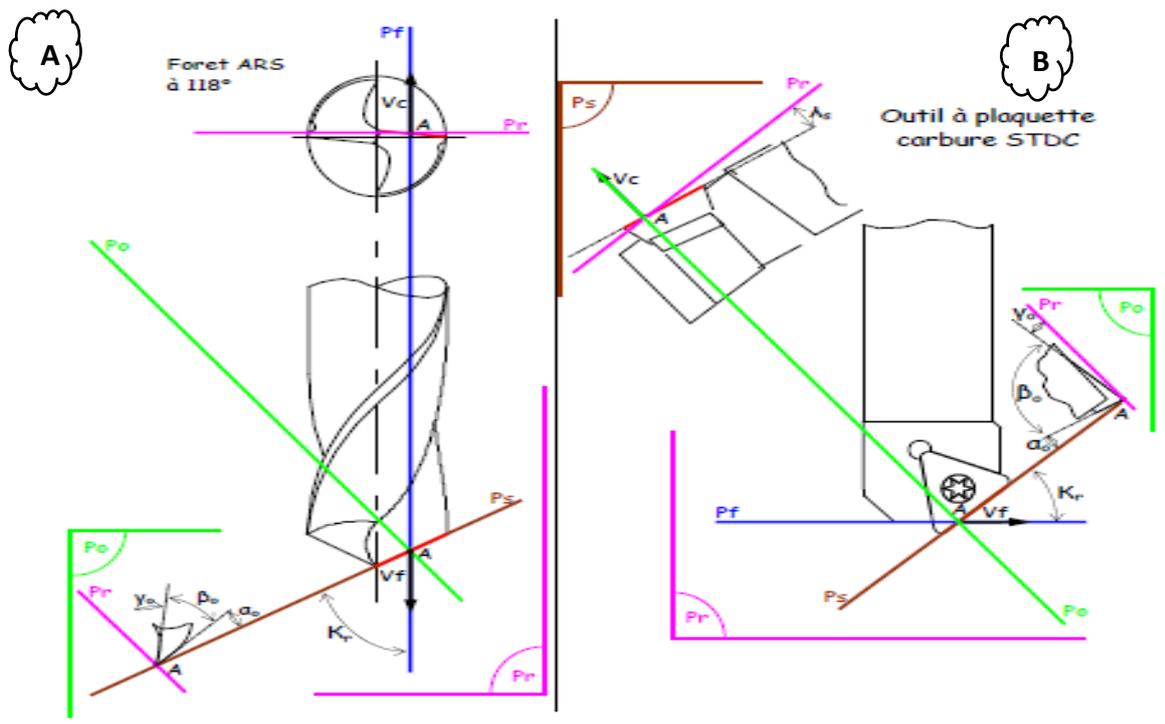


Figure I.13. Les outils. A) foret ARS à 118°. B) outil à plaquette carbure STDC [8].

## **4.6 Les matériaux d'outil de coupe**

### **4.6.1 Les aciers rapides**

Sont les outils qui ont une capacité de conserver leur trempe a haut température. Ils sont notamment employés pour le découpe a haut vitesse. Les aciers sont généralement utilisés pour leur propriété de dureté élevées (>60 HRC) et leur niveau de résilience acceptable. Ils présentent en générale une forte résistance à l'usure de fait de leur alliage et la présence significative d'élément producteurs de carbures durs tel que le tungstène de vanadium [9].



**Figure I.14.** Les outils en acier rapide.

### **4.6.2 Les carbures**

Les carbure de coupe sont des mélanges pulvérulents de carbure de tungstène et de titane très durs agglomères dans du cobalt. Cette naturelle n'est pas presque pas réduire à chaud (70HR a 800HR) ce qui permet des vitesses de coupe très élevées quatre fois celle des aciers rapides et 16 fois celle des aciers au carbure fragile et d'un affutage lent et difficile. Ils permettent des travaux d'ébauche et de finition sur les fonts et aciers durs à des vitesses de coupe allant de 50à 200 m/min [9].



**Figure I.15 .** Les outils en carbure.

### 4.6.3 Outils à plaquettes carbure

Les carbures sont des agglomères de cobalt et de carbure divers fabriqués par frittage. Ils conservent leur dureté à température extrême. Outils de base pour le tournage traditionnelle (conventionnelle) et numérique. Ils possèdent des vitesses de coupe élevées (jusqu'à 200 m/min) comme pour les plaquettes qui offrent 3 ou 4 arêtes de coupe sur chacune des deux faces (cas le plus courant) de plus. La plus grande précision du système de fixation permet de tourner la plaquette sur son support sans refaire le réglage de celui-ci par rapport à la pièce à usiner [9].



**Figure I.16.** Les outils avec plaquette en carbure.

### 4.6.4 Les céramiques

Ce sont des composés d'oxyde d'aluminium très durs agglomérés dans des oxydes de chrome comme liant frittés à 800°C concurrentes des carbures avec une dureté naturelle à chaud de 82HR sans formation de copeau sur l'outil avec des vitesses de coupe très élevées (100 à 800 m/min) ils sont sensibles aux chocs et aux vibrations.

Les plaquettes de céramique ne peuvent pas être brasées mais soigneusement ajustées et fixées mécaniquement sur le corps d'outil elles sont dites « à jeter » car non affutables, mais comme pour les carbures elles présentent plusieurs arêtes de coupe à usage successif [6].



**Figure I.17.** Les outils en céramiques

#### **4.6.5 Les carbures brasés**

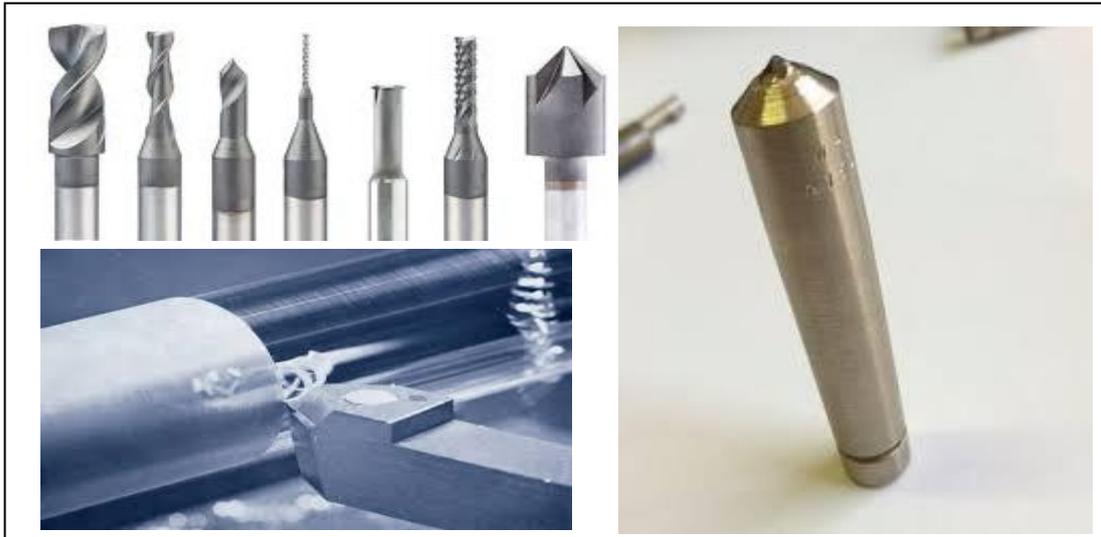
Ces outils ont un corps en acier ordinaire avec une plaquette carbure brasée directement dessus. Ils sont utilisés tant pour les travaux d'ébauche à grande vitesse de coupe que pour les travaux de finition, on peut les affûter en fonction de l'usinage recherché et l'état de surface désirée. Ce montage permet également de protéger la plaquette en carbure qui supporte mal les chocs et sa durée de vie peut en être un peu prolongée [9].



**Figure I.18.** Les outils en carbure brasés.

#### **4.6.6 Les diamants industriels**

Les diamants industriels, sertis à l'extrémité d'une tige d'acier, peuvent être utilisés pour le travail du cuivre, du bronze, de l'aluminium à très grande vitesse de rotation et faible avance pour obtenir un aspect de surface proche du miroir [9].



**Figure I.19.** Les outils en diamant.

## **5 Les paramètres technologiques de l'usinage**

### **5.1 Usure des outils de coupe**

L'usure est définie par la matière qui sort définitivement du contact outil – pièce.

L'usure de l'outil est la conséquence directe des sollicitations très sévères que subissent les faces de coupe et de dépouille. Ces sollicitations sont de nature mécanique, accentuées par les effets thermiques.

En fonction des conditions d'usinage (la nature de l'outil, du matériau usiné, du type d'usinage et des conditions de coupe) nous pouvons avoir les types d'usures suivantes [10] :

#### **5.1.1 Usure en dépouille**

Ou usure frontale due aux frottements de la surface de coupe de la pièce sur la surface en dépouille de l'outil. Elle se manifeste par l'apparition d'une bande striée et brillante parallèle à l'arête tranchante de l'outil [11].

#### **5.1.2 Usure suivant la surface d'attaque**

Elle se caractérise par une cuvette dite "cratère" formée sur la surface d'attaque de l'outil suite au frottement du copeau sur celle-ci. Cette forme d'usure est due à l'existence des températures élevées au contact du copeau et de l'outil provoquant une diffusion importante. Cette usure peut jouer un rôle important quand à l'enroulement et la fragmentation du copeau [11].

### **5.1.3 Fissuration de l'arête**

On observe l'apparition de fissures sur l'arête coupante dans le cas des usinages avec des chocs mécaniques ou thermiques, ou avec des vibrations périodiques des efforts provoqués par une coupe discontinue. Elle est propre aux outils en carbure métalliques [11].

### **5.1.4 Rupture (cassure) de la pointe**

C'est la destruction totale du bec de l'outil (Observée dans le cas des outils en acier rapide) [11].

### **5.1.5 Déformation plastique**

La pointe de l'outil peut subir une déformation permanente sous l'effet des températures élevées et des hautes pressions dans la zone de coupe.

Cette déformation de la pointe de l'outil influe sur sa géométrie et par conséquent sur la précision et l'état de surface usinée [11].

### **5.1.6 Entaille**

Dans certaines conditions de coupe, il se produit des arrachements, l'arête tranchante à la hauteur du diamètre périphérique s'use et il y a un effondrement à cet endroit. L'entaille est due à des passages successifs de l'outil sur une couche écrouie par le passage précédent, donc plus dure [11].

## **5.2 Etat de surface**

L'état de surface d'une pièce correspond à des irrégularités de surface. Les mesures de rugosité permettent de quantifier l'état géométrique de surface de cette pièce. Les mesures de rugosité peuvent s'effectuer à l'aide d'un rugosimètres 2D ou 3D. Les résultats de mesures sont alors un profil (mesure 2D) ou une surface reconstruite à partir de plusieurs profils (mesure 3D, exemple figure I.5 Le relief d'une surface mesuré en 2D peut-être représenté sous la forme d'une fonction  $z(x) = h$  où  $x$  est la position du point courant sur la longueur d'évaluation de la surface et  $h$  la mesure de la hauteur du défaut à cette position [11].

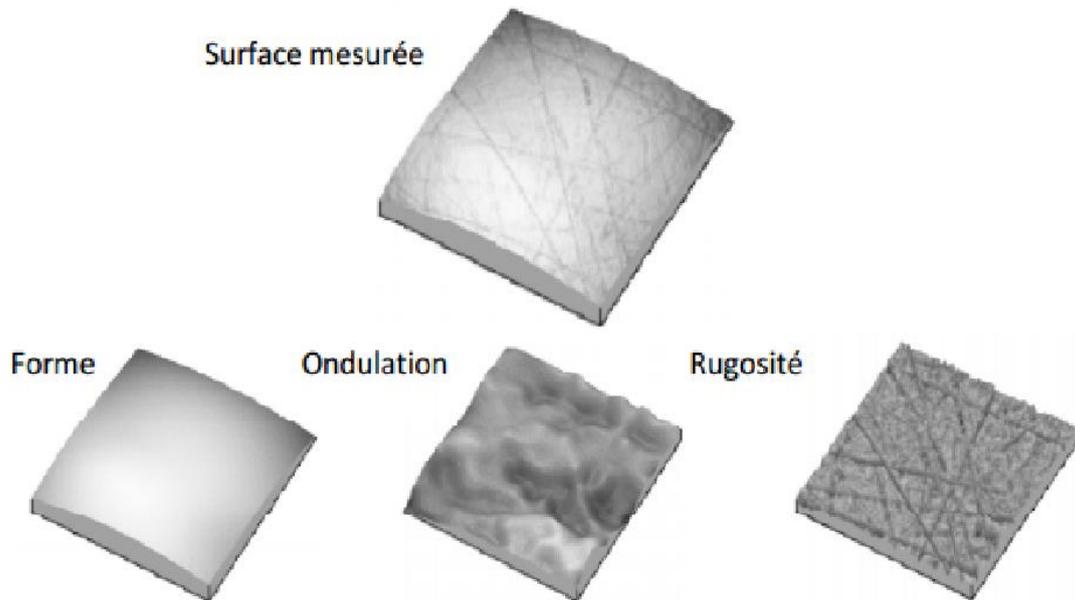


Figure I.20. Décomposition d'une surface mesurée [11].

Le paramètre de rugosité le plus fréquemment utilisé est (Ra). Il correspond à la rugosité arithmétique et représente la moyenne arithmétique des pics et des creux par rapport à la ligne moyenne, mesurée sur une longueur d'évaluation. Son expression est la suivante :

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \dots\dots\dots (7)$$

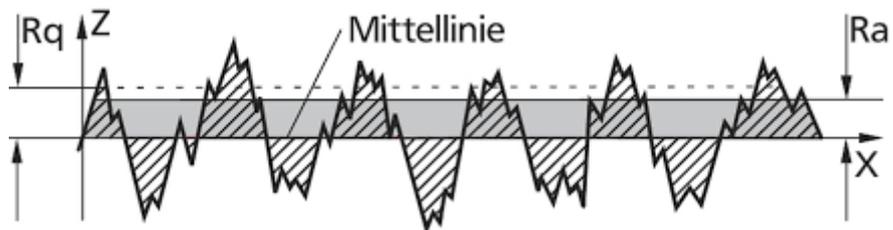


Figure I.21. Rugosité moyenne arithmétique Ra [11].

Les procédés courants d'usinage permettent d'obtenir un Ra compris entre 1,6 et 6,3 µm.

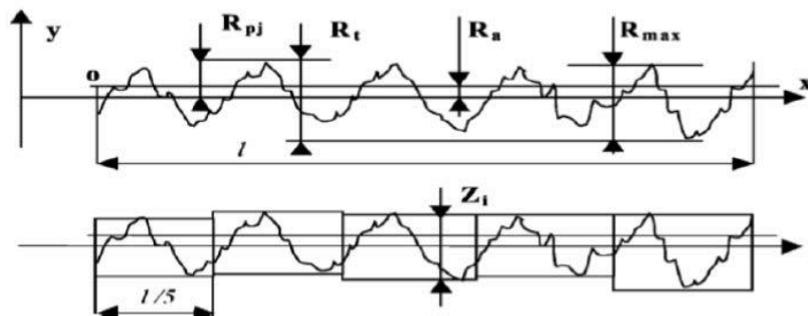
En tournage et en fraisage, un certain nombre de facteurs agissent particulièrement sur la rugosité. L'état de surface en tournage de finition dépend principalement de l'avance (f) et du rayon de bec (r). Le choix de l'outil et des conditions de coupe doit tenir compte de ces influences.

D'autres paramètres classiques sont définis comme suit :

**R<sub>p</sub>** : la hauteur maximale du pic le plus élevé observé par rapport à la ligne moyenne sur la longueur analysée

**R<sub>t</sub>** : rugosité totale, la hauteur entre le pic le plus élevé et la vallée la plus profonde sur la longueur analysée

**R<sub>q</sub>** : écart moyen quadratique [10].



**Figure I.22.** Paramètres de rugosité [10].

### 5.3 Efforts de coupe

L'effort de coupe ( $F_c$ ), appelé effort « générateur de puissance », est décisif, tout comme la vitesse de coupe, pour le calcul de la puissance de coupe ou d'entraînement de la machine-outil [12].

L'importance de l'effort de coupe dépend essentiellement de la matière à usiner et des Conditions de coupe actives.

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 [12].

\* **F<sub>z</sub>** : composante dans le sens de la vitesse de coupe, appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe.

\* **F<sub>x</sub>** : composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance ou effort axial en tournage, joue un rôle fondamental dans le processus de coupe.

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

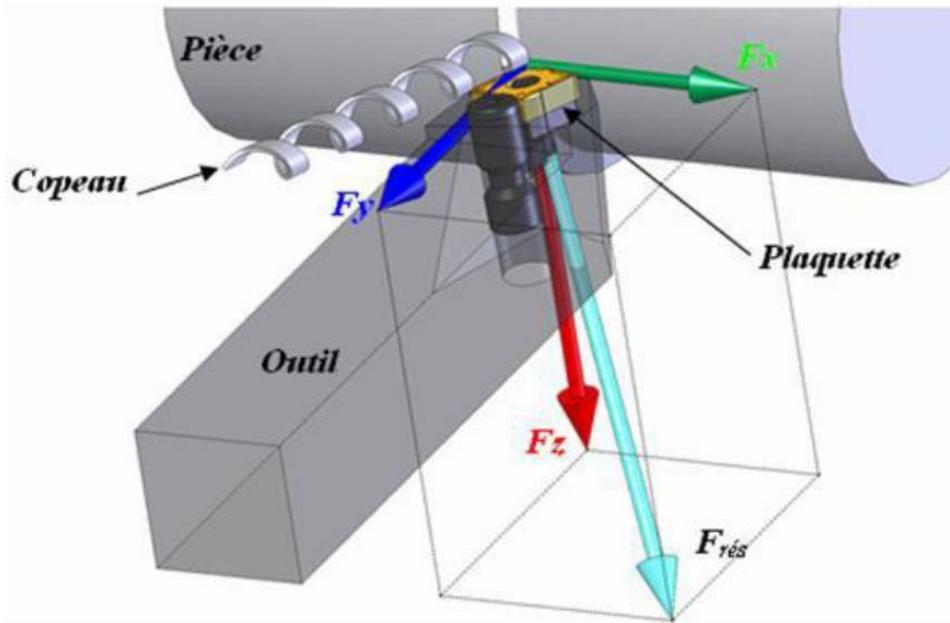


Figure I.23. Les composantes de l'effort de coupe [13].

## 6 Les machine d'usinage conventionnel

### 6.1 Les fraiseuses

Une fraiseuse est une machine-outil utilisée pour usiner tous types de pièces plan, à l'unité ou en série, par enlèvement de matière à partir de blocs de matière, à l'aide d'un outil coupant nommé. En dehors de fraise cet outil qui lui a donné son nom, une fraiseuse peut également être équipée de foret, de taraud ou d'alésoir. La fraise munie de dents est mise en rotation et taille la matière grâce à sa rotation et au mouvement relatif de la fraise par rapport à la pièce. La forme de la fraise est variable ; elle peut être cylindrique, torique, conique, hémisphérique ou quelquefois de forme encore plus complexe. La fraise et la pièce sont montées sur des glissières et peuvent se déplacer relativement suivant des coordonnées X Y ou Z (on parle alors de fraiseuse trois axes). Par convention, l'axe Z est l'axe de rotation de la broche, les axes X et Y sont contenus dans un plan perpendiculaire à Z [14].

### 6.1.1 Les fraiseuses conventionnelles

Afin de répondre à tous les besoins de l'industrie (complexité des pièces, temps d'usinage, capacités), les tours ont évolué. Certains tours sont si complexes qu'ils peuvent être une alternative aux centres d'usinage. Voici les principaux types de fraiseuses :



**Figure I.24.** Les fraiseuses conventionnelles.

#### Les fraiseuses horizontales

L'axe de la broche est parallèle à la table. Cette solution permet aux copeaux de tomber et donc de ne pas rester sur la pièce. De cette manière, on n'usine pas les copeaux, et la qualité de la pièce est meilleure. Mais ce type de montage était surtout destiné à installer des fraises 3 tailles ou fraises disques dans le but de réaliser des rainurages de profilés plats [13].



**Figure I.25.** Les fraiseuses horizontales.

### **La fraiseuse verticale**

L'axe de la broche est perpendiculaire à la table [13].



**Figure I.26.** La fraiseuse verticale.

### **La fraiseuse universelle**

L'axe de la broche est réglable : tête bi-rotative, avec 2 coulisses circulaires (perpendiculaires l'une par rapport à l'autre) ; tête oblique, avec 2 coulisses circulaires (incliné à 45°) ; tête articulée[13].



**Figure I.27.** La fraiseuse universelle

## **6.2 Les tours**

Afin de répondre à tous les besoins de l'industrie (complexité des pièces, temps d'usinage, capacités), les tours ont évolué. Certains tours sont si complexes qu'ils peuvent être une alternative aux centres d'usinage. Voici les principaux types de tours [13].

Le tour conventionnel :

Ce sont les tours de base. Les opérations sont réalisées par un opérateur qui doit régler les différents paramètres et lancer les opérations. Toute les taches sont manuelles [13].



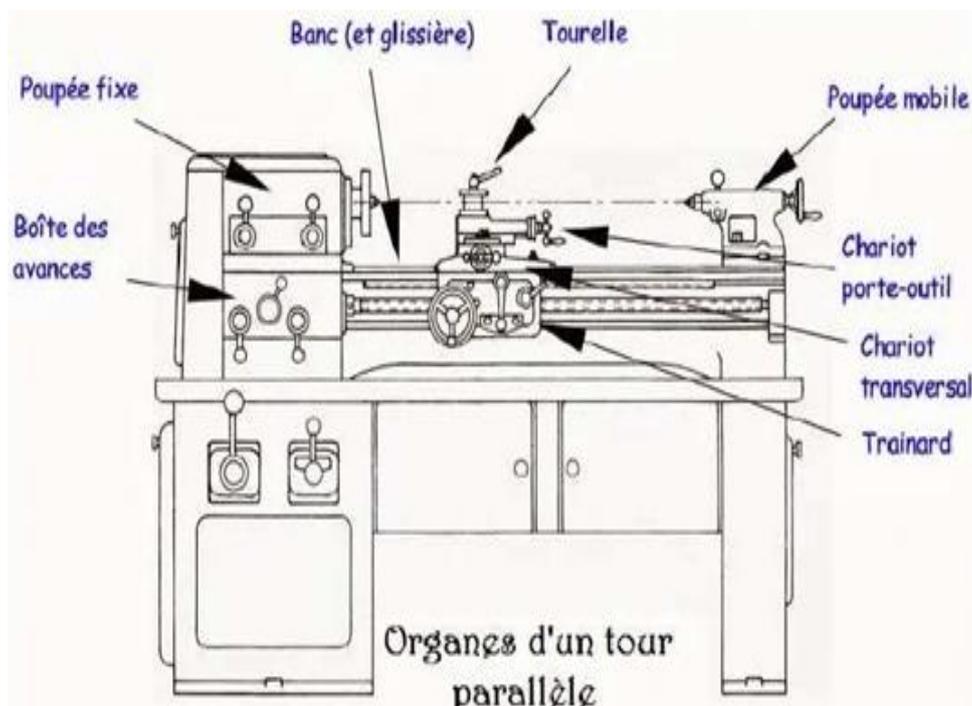
**Figure I.28.** Le tour conventionnel.

## 7 Les techniques d'usinage

Dans le domaine de la fabrication y'a plusieurs techniques d'usinage tout dépend la matière, l'opération et le besoin. On le présenté comme suite :

### 7.1 Tournage

Le tournage est un procédé d'usinage par enlèvement de copeaux qui consiste à l'obtention de pièces de forme cylindrique ou/et conique à l'aide d'outils coupants sur des machines appelées tours. En tournage, le mouvement de coupe est obtenu par rotation de la pièce serrée entre les mors d'un mandrin ou dans une pince spécifique, tandis que le mouvement d'avance est obtenu par le déplacement de l'outil coupant.



**Figure I.29.** Les composants de tour

### Tournage intérieur

Alésage, dressage,  
Tournage intérieur par contournage  
Tournage de dégagement, gorges  
Taraudage, réalisation d'un filetage intérieur,  
Chambrages.

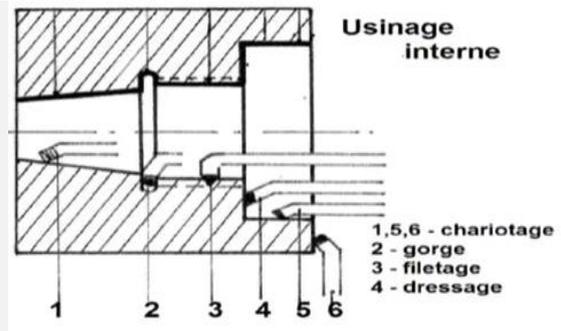


Figure I.30. Tournage intérieur.

### Tournage extérieur

Tournage longitudinal (chariotage, axe z),  
réalisation diamètre ;  
Tournage transversal (dressage, axe x),  
réalisation d'une face, d'un épaulement ;  
Tournage par profilage ou contournage, réalisé  
par copiage ou utilisation d'une commande  
numérique ;  
Tournage de gorges, dégagements ;  
Filetage, réalisation d'un pas de vis ;  
Tronçonnage.

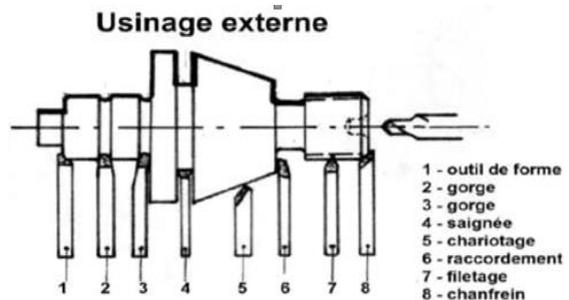


Figure I.31. Tournage extérieur.

## 7.2 Le fraisage

Le fraisage est un procédé de fabrication où l'enlèvement de matière sous forme de copeaux résulte de la combinaison de deux mouvements : la rotation de l'outil de coupe, d'une part, et l'avancée de la pièce à usiner d'autre part. Le fraisage est habituellement réalisé par une machine-outil, la fraiseuse qui est particulièrement adaptée à l'usinage de pièces prismatiques.

[1]

### 7.2.1 Les modes de fraisage

On distingue deux modes : le fraisage en bout et le fraisage en roulant.

#### 7.2.1.1 Fraisage en bout

Pour ce type d'usinage la surface à réaliser est perpendiculaire à l'axe de la fraise.

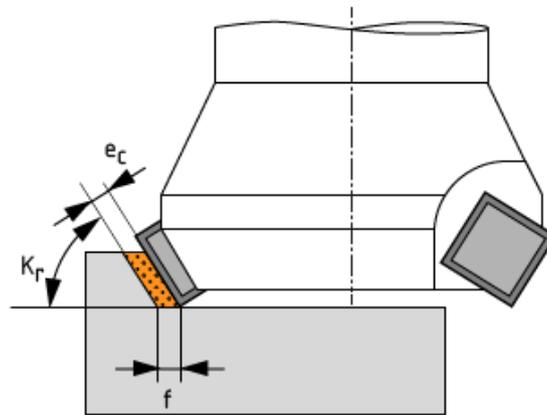


Figure I.32. Le fraisage en bout [15].

Ce mode de fraisage est réalisé avec le bout d'une fraise "deux tailles ou une taille", d'une fraise à dents rapportées, avec les faces d'une fraise trois tailles et se trouve combiné (face et profil) dans l'usinage associé des surfaces. La surface obtenue est généralement d'une précision géométrique meilleure que celle obtenue en fraisage de profil. Lorsque l'axe de la fraise est perpendiculaire à la surface, chaque dent laisse un trait croisé sur la pièce (voir figure) et il est nécessaire que la fraise sorte complètement de la pièce, ce qui augmente la course de travail [15].

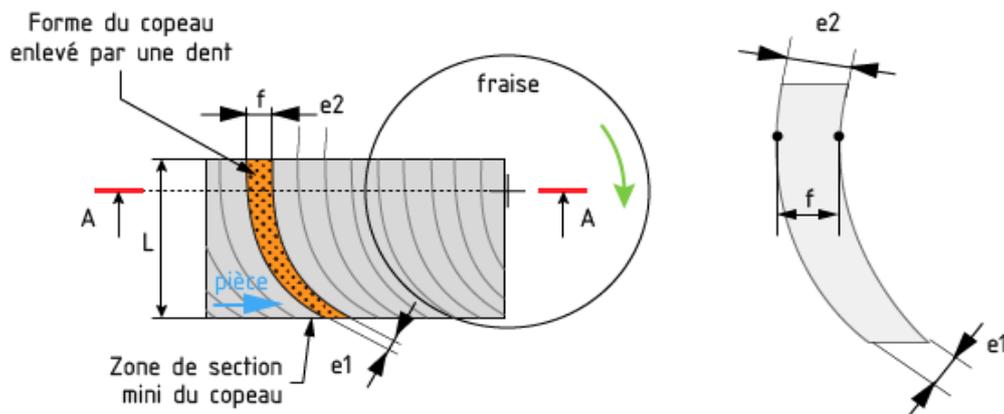


Figure I.33. La forme du copeau enlevé par une dent pour le fraisage en bout [15].

On peut toutefois incliner la fraise d'un angle de  $2'$  en utilisant une fraise de grand diamètre, la concavité laissée par l'outil est souvent acceptable et ainsi la course de travail limitée à environ la longueur à fraiser. Si l'axe de l'outil n'est pas perpendiculaire au mouvement d'avance on risque de réaliser une surface creuse.

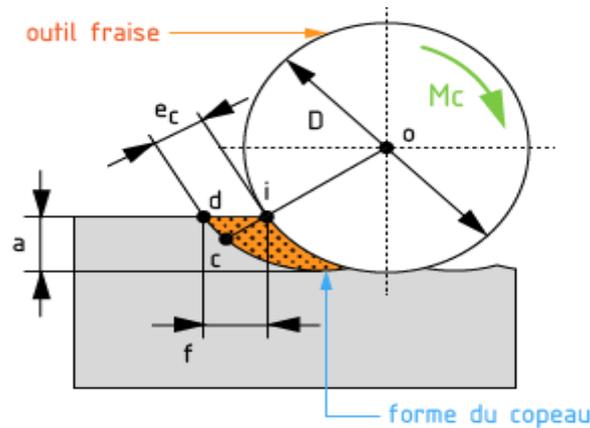
L'épaisseur du copeau varie pour ce type d'usinage de  $e$  à  $f$  mais peut être réduite encore en modifiant l'angle de direction d'arête  $K_r$ .

On doit vérifier la relation :

$$e_c = f \sin(K_r) \dots\dots\dots(8)$$

**7.2.1.2 Fraisage en roulant**

Pour ce type d'usinage la surface à réaliser est parallèle à l'axe de la fraise, elle est réalisée par une génératrice de l'outil de coupe. On peut travailler respectivement :



**Figure I.34.** Les principaux paramètres géométriques du copeau pour le fraisage en roulant. Copeau mini [15].

Les deux modes de fraisage peuvent se trouver en application au cours d'une même Opération.

**7.2.2 Directions de fraisage**

La fraise effectue un mouvement de rotation tandis que la pièce avance dans sa direction. La coupe est donc ainsi définie par les paramètres impliqués. Il existe deux manières de procéder, selon le sens de rotation de l'outil par rapport à la pièce. Cette différence joue un rôle fondamental et affecte le processus de fraisage sous divers aspects. La pièce peut avancer, selon le cas, dans le sens de la rotation ou dans le sens opposé, ce qui a tout spécialement son importance en début et en fin de coupe. [26]

**7.2.2.1 Le fraisage en opposition**

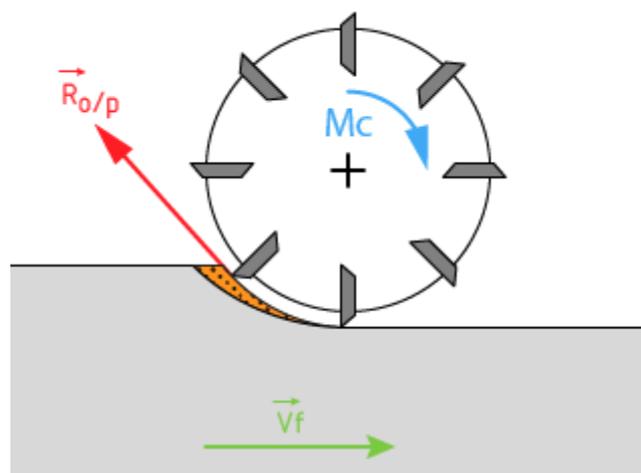
Il travaille en opposition lorsque la projection de l'effort de l'outil sur la pièce (RO/P) est en sens contraire à la direction du mouvement d'avance.

Attention : ne pas confondre l'effort Ro/p et le vecteur vitesse de coupe.

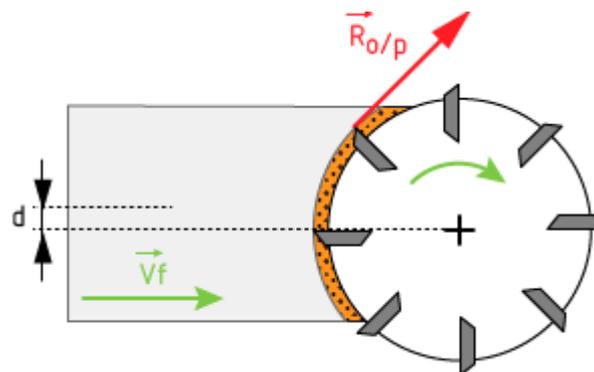
Le mouvement de coupe donné à l'outil est donc l'inverse du mouvement d'avance donné à la pièce.

L'attaque d'une dent se fait avec une épaisseur de copeau nulle (voir figure ci-après) et sur une matière écrouie par le passage de la dent précédente. Chaque dent glisse sur la pièce et ne peut tailler le métal que lorsque celui-ci atteint l'épaisseur du copeau minimum. Le résultat est un rendement peu élevé, l'usure prématurée de l'outil et l'écrouissage de la pièce.

Le fraisage en opposition est donc une opération qui est à éviter pour les matériaux très écrouissables [15].



**Figure I.35.** Fraisage en roulant : travail en opposition [15].



**Figure I.36.** Le fraisage en bout : travail en opposition [15].

### 7.2.2.2 Le fraisage en avalant ou en concordance

Il y a travail en concordance lorsque la projection de l'effort de l'outil sur la pièce sur la direction du mouvement d'avance est dans le même sens que ce dernier. Le mouvement de coupe et le mouvement d'avance ont donc le même sens. La dent attaque une épaisseur de copeau maxi et sur une surface non-écrouie. Chaque dent de la fraise coupe un copeau maximum en début de l'attaque ; lorsque la dent quitte la pièce, le copeau, devenu inférieur au copeau minimum, est détaché presque sans pression. Les efforts de coupe plaquent la pièce sur le montage. Le résultat de ce type d'usinage est un état de surface amélioré par rapport au fraisage en opposition, mais il est nécessaire d'employer des machines avec un dispositif de transmission de mouvement sans jeu.

C'est une opération à conseiller pour les matériaux très écrouissables, pour les pièces minces et difficiles à brider. Le fraisage en avalant est à éviter sur les machines-outils sans rattrapage de jeu (engagement de la pièce sous la fraise).

Le principal risque pour ce type de fraisage est l'apparition d'ondulations, en raison de la flexion et du faux rond de l'outil fraise [15].

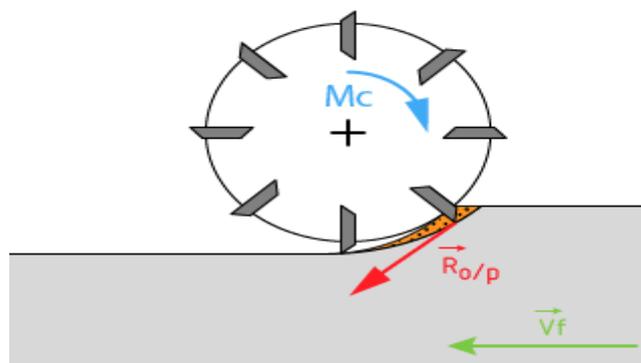


Figure I.37. Fraisage en roulant : en avalant ou en concordance [15].

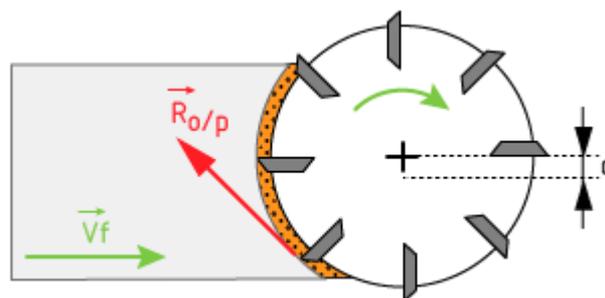


Figure I.38. Le fraisage en bout : travail en avalant [15].

### **7.2.2.3 La différence entre le fraisage en avalant et opposition**

Le fraisage en avalant et le fraisage en opposition sont deux techniques utilisées en usinage pour enlever de la matière d'une pièce. Voici les principales différences entre ces deux méthodes [16] :

#### **a) Fraisage en Avalant**

\*Dans le fraisage en avalant, l'outil avance dans le sens de sa rotation.

\*Cette méthode est préférée lorsque la machine-outil, le bridage et la pièce le permettent.

\*Les copeaux produits lors du fraisage en avalant sont plus épais à l'entrée qu'à la sortie.

##### **● Avantages**

-Empêche l'arête de frotter contre la surface et de subir un brunissage avant de s'engager en coupe.

-Les forces de coupe tendent à tirer la pièce et à faire avancer la fraise en maintenant l'arête engagée [16].

##### **● Inconvénients**

-La fraise peut être tirée vers l'intérieur de la pièce, ce qui peut entraîner une épaisseur de copeaux excessive et la rupture de l'arête.

-Nécessite un dispositif de rattrapage de jeu pour contrôler l'avance de la table [16].

#### **b) Fraisage en Opposition**

\*Dans le fraisage en opposition, la direction de l'avance est opposée au sens de rotation de l'outil.

\*L'épaisseur des copeaux commence à zéro et augmente vers la fin de la coupe [16].

##### **● Avantages**

-Permet de travailler avec de grandes variations dans la surépaisseur d'usinage.

-Peut être utilisé pour dégrossir sur des surfaces brutes [16].

##### **● Inconvénients**

-L'arête de coupe doit entrer en coupe par la force, ce qui réduit la durée de vie de l'outil.

-Les copeaux épais en sortie et la température élevée exercent des contraintes sur les arêtes et peuvent entraîner leur défaillance [16].

## **8 L'usinabilité des matériaux**

L'usinabilité des matériaux fait référence à la facilité avec laquelle un matériau peut être usiné lors d'opérations telles que le fraisage, le tournage, le perçage, etc. Elle dépend des propriétés physiques, mécaniques et chimiques du matériau. En production de série, il est recommandé d'adopter un temps d'usure d'arête de coupe d'outil de 10 à 20 % inférieur au temps déterminé par l'usure pour optimiser la production des pièces en termes de qualité géométrique[19].

En bref, un matériau avec une bonne usinabilité est plus facile à couper ou à travailler, provoque moins d'usure des outils et permet d'obtenir une finition sans effort excessif.

### **8.1 Les matériaux usinables**

Les manufacturables sont des matériaux relativement faciles à fabriquer dans des processus de fabrication tels que le fraisage, le tournage, le perçage, etc. Sa convertibilité dépend de plusieurs facteurs, comme :

Bois, métaux, plastiques recyclés, acier, caoutchouc, et les céramiques

### **8.2 Les matériaux difficiles à usiner**

Sont des matériaux qui ont des propriétés métallurgiques ainsi qu'une grande résistance, un durcissement élevé et une faible conductivité thermique. Ces types des matériaux se trouve dans l'industrie automobile, nucléaire et médicales.

### **8.3 Les matériaux non usinables**

Les matériaux non usinables sont des substances qui ne peuvent pas être facilement façonnées ou transformées par des processus d'usinage traditionnels. Voici quelques exemples de matériaux difficiles à usiner comme : céramiques techniques, matériaux composites, superalliage, verre, matériaux réfractaires, matériaux magnétiques.

## **9 L'usinage d'aluminium**

Est un processus essentiel utilisé dans diverses industries telles que l'aéronautique, l'automobile et la mécanique générale pour fabriquer des pièces mécaniques. Voici quelques points clés concernant l'usinage de l'aluminium :

### **9.1 Caractéristiques de l'aluminium**

**Usinabilité :** L'aluminium est reconnu pour son excellente usinabilité, ce qui en fait un choix privilégié pour la réalisation de pièces mécaniques de haute précision.

**Légèreté :** L'aluminium est léger, ce qui le rend idéal pour les applications où le poids est un facteur critique.

**Résistance à la corrosion :** L'aluminium résiste bien à la corrosion, ce qui en fait un matériau durable [20].

## 9.2 Défis de l'usinage de l'aluminium

**Variations thermiques :** L'aluminium est sensible aux variations thermiques, ce qui peut causer des distorsions pendant le processus d'usinage.

**Affinité avec l'outil de coupe :** L'aluminium a une affinité naturelle avec l'outil de coupe, ce qui peut provoquer un phénomène de collage nuisant à la qualité de la surface usinée [20].

## 10 Des études précédemment réalisées

Des études ont été réalisées par rapport à notre travail :

**Article 01 :** Les Travaux de **Mr. Hicham CHIBANE** et ses collaborateurs sur l'optimisation des paramètres de coupe en tournage.

Se penche sur l'impact des paramètres de coupe sur la qualité de surface des pièces usinées, la productivité, les efforts de coupe et les vibrations de l'outil lors du tournage de l'acier 100C6. L'objectif est de déterminer les conditions optimales de coupe pour améliorer ces aspects tout en réduisant les coûts et en augmentant l'efficacité des opérations d'usinage.



**Figure I.39.** Optimisation des paramètres de coupe en tournage.

Le tournage est un procédé d'usinage crucial dans l'industrie mécanique. L'optimisation des paramètres de coupe est essentielle pour améliorer la qualité de surface, prolonger la durée de vie des outils et augmenter la productivité. Les paramètres de coupe principaux étudiés incluent la vitesse de coupe, la profondeur de passe, l'avance par tour et la sortie d'outil, chacun ayant une influence directe sur la qualité de surface et les efforts de coupe.

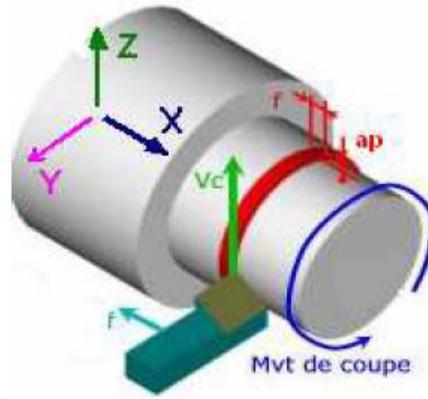


Figure I.40. Mouvement de coupe.

Pour modéliser et analyser ces effets, les auteurs ont utilisé des méthodes comme la régression linéaire et l'analyse de variance (ANOVA). De plus, un algorithme génétique d'optimisation (GAO) a été employé pour déterminer les conditions de coupe optimales, en simplifiant le problème multi-objectifs en un seul objectif grâce à la méthode des sommes pondérées.

Les résultats de l'étude ont conduit à la création d'un outil numérique permettant de choisir les conditions de coupe optimales avec un minimum d'essais. Cet outil a été testé avec succès sur diverses configurations, prouvant son efficacité.

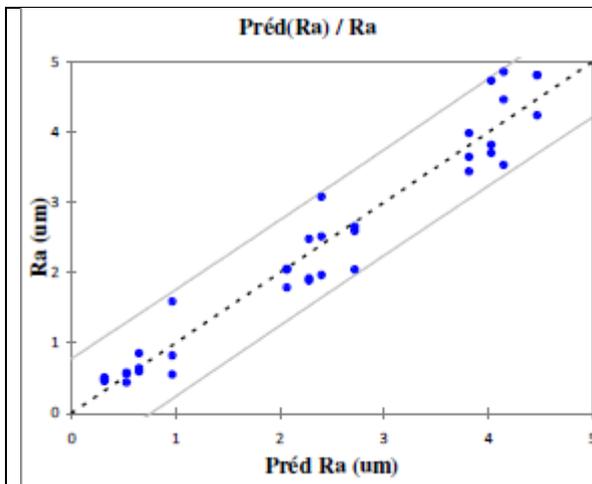


Figure I.41. Analyse des résidus.

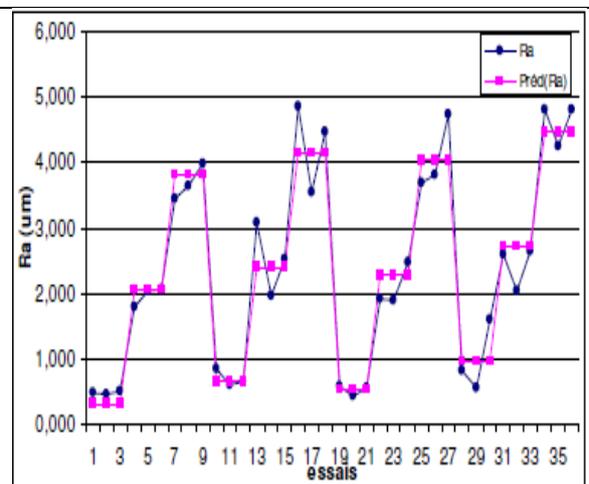


Figure I.42. Ra expérimentale/théorique

En résumé, cette recherche propose une méthode scientifique et pratique pour optimiser les paramètres de coupe en tournage, combinant des méthodes statistiques, analytiques et expérimentales. L'outil développé est particulièrement utile pour les professionnels de l'usinage, permettant d'améliorer l'efficacité et la qualité des opérations tout en réduisant les coûts.

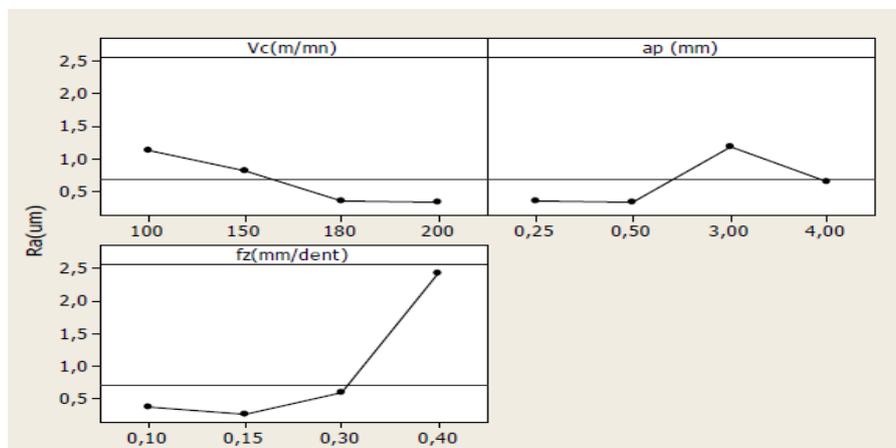
**Article 02 :** Les Travaux de **Mr. Ahmed LAGRRED** et ses collaborateurs (2016) sur la Contribution à l'amélioration de la qualité de surface en optimisant les paramètres de coupe par la méthodologie de surface de réponse en fraisage à sec.

L'article explore l'impact des paramètres de coupe sur la qualité de surface des pièces usinées lors du fraisage à sec, en se concentrant sur l'optimisation de ces paramètres pour améliorer la rugosité de surface (Ra). Les essais expérimentaux ont été réalisés sur de l'acier C45 en utilisant des outils de coupe en carbure métallique P25.



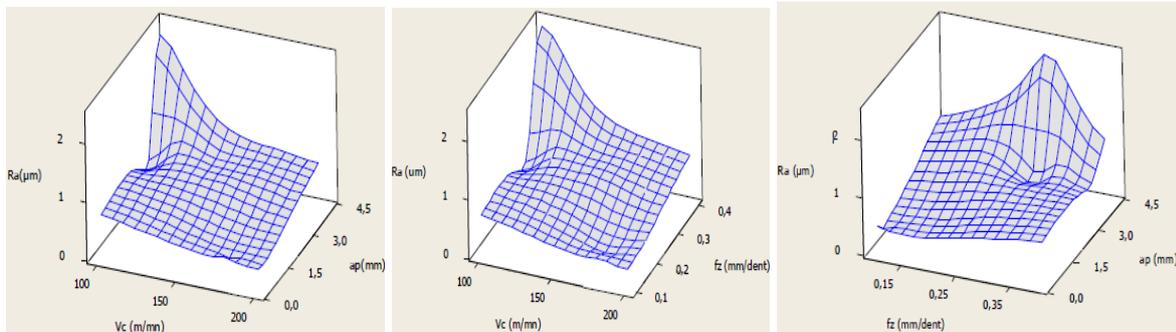
**Figure I.43.** Schéma du montage expérimental.

L'objectif principal de l'étude est de déterminer les conditions optimales de coupe pour obtenir la meilleure qualité de surface possible. À cette fin, les chercheurs ont utilisé la méthodologie de surface de réponse (RSM) pour analyser et modéliser les interactions entre les différents paramètres de coupe. Ils ont également appliqué l'analyse de variance (ANOVA) pour évaluer l'influence de chaque paramètre.



**Figure I.44.** Les effets moyens de Ra.

Les résultats montrent que l'avance par dent est le facteur le plus influent sur la rugosité de surface, suivi par la vitesse de coupe. La profondeur de passe  $a_p$ , quant à elle, a un impact moindre. Les conditions optimales identifiées pour obtenir la meilleure rugosité de surface sont une vitesse de coupe de 180 m/min, une avance par dent de 0,10 mm/dent, et une profondeur de passe de 0,25 mm.



**Figure I.45.** Les graphes de surface de réponse

En conclusion, l'étude souligne l'importance d'optimiser les paramètres de coupe pour améliorer la qualité de surface des pièces usinées en acier C45, en mettant en avant l'efficacité de la méthodologie de surface de réponse pour atteindre cet objectif.

# **Chapitre II**

## Procédure expérimentale

## 1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble d'équipement utilisé pour notre expérience nous présentons aussi les différents outils de coupe pour réaliser notre opération. Les mesures concernent la rugosité de surface et ainsi que des informations concernant le couple outil-matière, les conditions de coupe et le plan d'expérience utilisé.

## 2 Equipement et préparation des expériences

Pour réalisation des expériences, il est nécessaire de préparer les équipements, les éprouvettes ainsi que les outils de coupe pour chaque opération.

### 2.1 Le tour conventionnel

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais **Figure II.1** est un tour à charioter et à fileter de la société Tchèque « TOS TENCIN » modèle SN 40 d'une puissance de 6.6KW sur la broche, ayant une gamme de vitesse de 45 à 2000 tr/min et d'avances de 0.08 à 6.4 mm/tr.



**Figure II.1.** Tour modèle SN 40C.

#### 2.1.1 Les outils de coupes utilisées

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé deux types des outils de coupe qui sont :

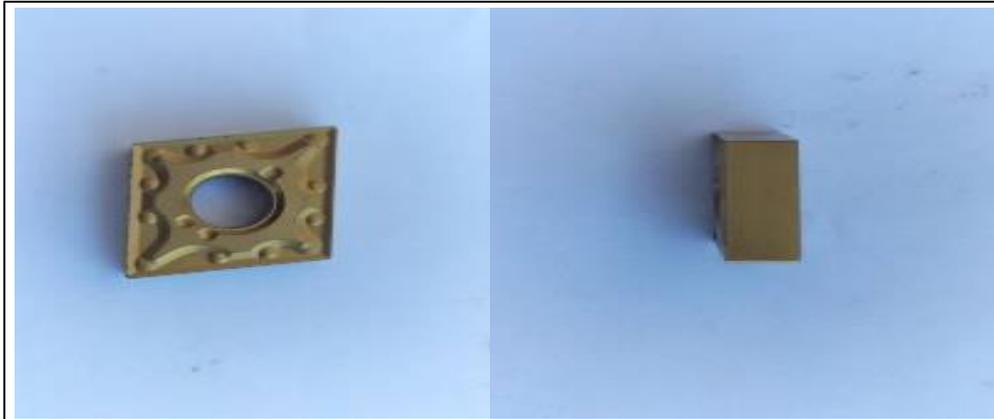
- Outil en Carbure brasé de la marque MCT ISO6 2020 K10 de forme **Figure II.2** pour réaliser les premier 18 essai.



**Figure II.2.** Outil de coupe en Carbure brasé.

- Outil avec des plaquettes en Carbure tungstène de la forme carrée à fixation par trou central **Figure II.3** pour réaliser les 5 meilleurs essais qui ont été faits avec l'outil de Carbure brasé avec les caractéristiques suivantes :

- Rayon de bec : 0.2
- Géométries : carrée



**Figure II.3.** Plaquettes de coupe en carbure avec revêtement.

### 2.1.2 Porte outil (plaquette)

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé d'un porte-outil **Figure II.4** sur lesquels se fixe la plaquette mécaniquement par levier pour plaquette avec trou.

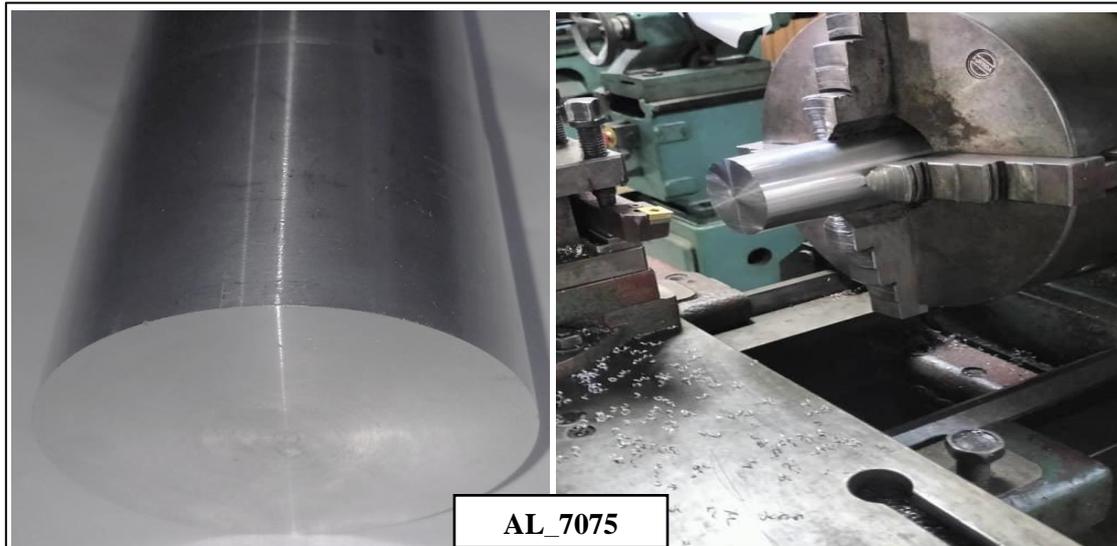


**Figure II.4.** Porte des plaquettes de coupe en carbure.

### 2.1.3 Eprouvettes d'usinage

Les essais ont été réalisés sur une pièce cylindrique d'aluminium AL\_7075 **Figure II.5**, ce dernier est un alliage d'aluminium à haute pureté, avec une teneur en aluminium de 88.20%. Il peut avoir la ductilité la plus faible parmi les alliages de la série 7000 de la base de données. Sa bonne résistance à la corrosion et sa facilité de formage.

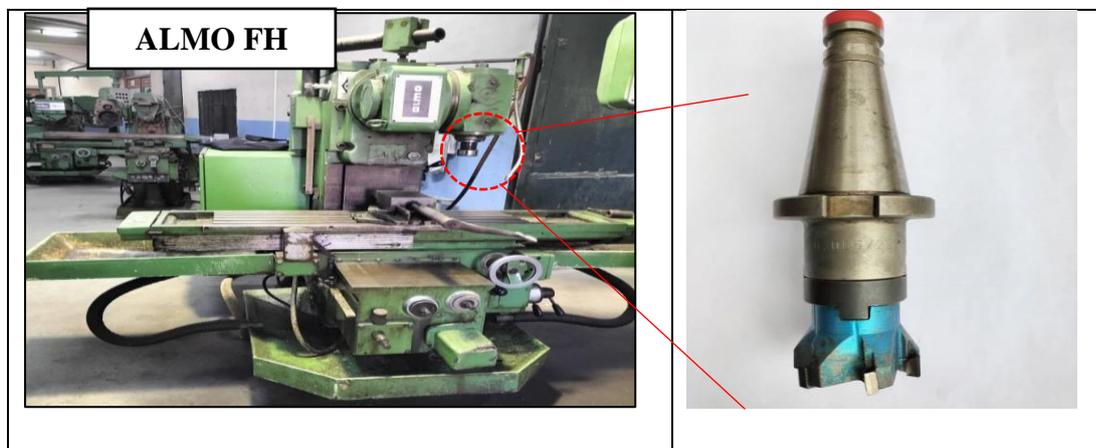
De plus, sa conductivité électrique et thermique en fait un matériau idéal pour les applications nécessitant dissipation thermique efficace. Cet alliage est largement utilisé dans diverses applications industrielles telles que la fabrication de feuilles, de plaques, de pièces embouties et d'autres composants nécessitant une combinaison de légèreté et de résistance.



**Figure II.5.** Eprouvette utilisée pour les essais.

## 2.2 La fraiseuse conventionnelle

La fraiseuse qui a servi pour effectuer nos essais **Figure II.6** est une fraiseuse verticale et à fileter de la société Algérienne « Almo » modèle FH d'une puissance de 4,49KW sur la broche, ayant une gamme de vitesse de 45 à 2000 tr/min et une vitesse d'avance de 16 à 800 mm/min.



**Figure II.6.** Fraiseuse modèle « Almo FH ».

### 2.2.1 Les outils de coupes utilisées

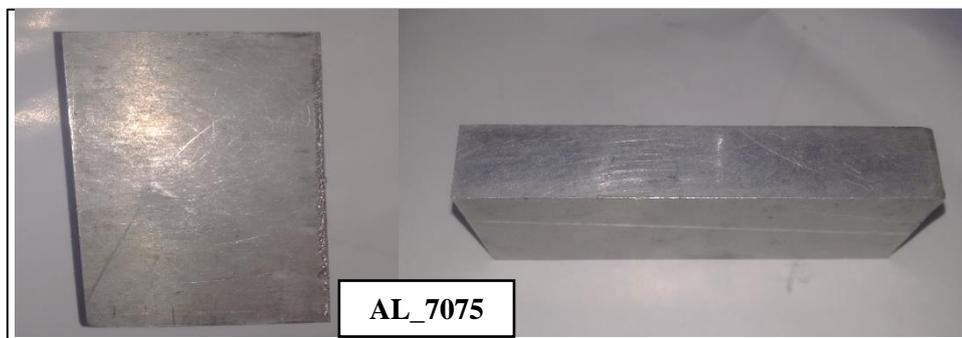
Les opérations de surfacage ont été faites par un outil de coupe en Carbure brasé de la marque (PMO Ø50-P20), est possède 6 dents de coupe **Figure II.7**



**Figure II.7.** Fraise pour surfacage en carbure brasé

### 2.2.2 Eprouvettes d'usinage

Les essais ont été réalisés sur une pièce prismatique d'aluminium AL\_7075 **Figure II.8**



**Figure II.8.** Eprouvette utilisée pour les essais.

### 2.3 Rugosimètre

La caractérisation de la topographie de surface (2D) de la pièce usinée est effectuée grâce au rugosi-mètre de la marque LITE SURF. Ce dernier est doté :

- D'un menu intuitif avec fonctions multiples personnalisables (Ra, Rc, Ry, Rz, Rt...).



**Figure II.9.** Rugosimètre.

## 2.4 Thermomètre

C'est un instrument de mesure la température de marque « **FLUKE** » il a une capacité de mesure plus de 200°C d'une distance de 4 mètre et une charge d'un heure ont a utilisé cela pour mesure la température de contact pièce-outil.



**Figure II.10.** Thermomètre 63 IR.

## 3 Conditions de coupe

Plusieurs facteurs influents sur le système d'usinage, dans notre travail nous nous sommes intéressés à cet ensemble d'éléments : vitesse de coupe ( $V_c$ ), avance par tour ( $f$ ), profondeur de passe ( $A_p$ ). Les paramètres de sortie (résultats) à observer sont : la rugosité de surface ( $R_a$ ), la températures maximale .Les conditions de coupe utilisées pour les différents essais varient dans les intervalles suivants :

- En tournage (dressage) avec outil de coupe en carbure brasé:

$V_c$  [120-375] m/min ;  $f$  [0.09-0.88] mm/tr ;  $A_p$  [0.1-0.8] mm.

On a sélectionné les 5 essais moins rugueux et en a refait les opérations avec un outil de coupe en carbure tungstène

- En fraisage (surfaçage) avec un outil de coupe en carbure brasé :

$V_c$  [110-315] m/min ;  $V_f$  [400-800] mm/min ;  $A_p$  [0.5-1] mm.

Les conditions de coupe utilisées pour les différents essais sont indiquées dans les **Tableaux [1-2-3]** dans chapitre 4 résultant et discussion et Tous les essais d'usinage ont été réalisés sans lubrification.

# **Chapitre III**

## Modélisation numérique et simulation

## 1 Introduction

Dans le domaine de l'ingénierie des procédés de fabrication, la modélisation et la simulation jouent un rôle crucial important dans la compréhension. L'optimisation et l'innovation des technologies de production. Ces outils permettent de prédire et d'analyser le comportement des systèmes complexes, offrant ainsi aux ingénieurs la possibilité d'explorer une multitude de scénarios virtuels avant de passer à des tests réels coûteux. Dans ce chapitre nous abordons spécifiquement la modélisation et la simulation appliquées à l'étude comparative de l'état de surface des pièces en aluminium, produites par différentes technologies de fabrication.

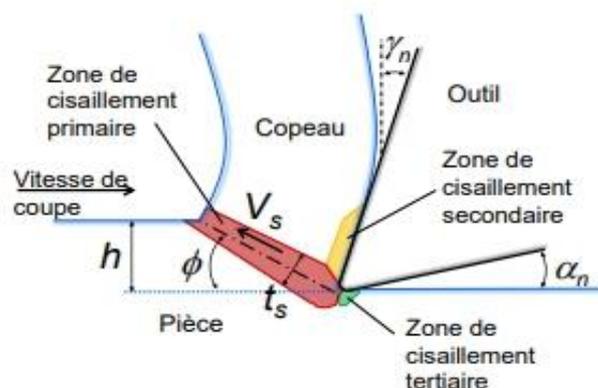
La modélisation représente mathématiquement les phénomènes intervenant dans un processus de fabrication, tandis que la simulation exécute ces modèles pour prédire le comportement de système.

Leur importance réside dans l'optimisation des processus, la réduction des risques, l'innovation et la compréhension des phénomènes physique.

## 2 Problématique

### 2.1 Coupe orthogonale en tournage

En raison de la complexité des phénomènes thermomécaniques intervenant lors des différents procédés d'usinage, ceux-ci sont étudiés en émettant des hypothèses, ces dernières ont pour objectif d'avoir une approche simplifiée et de permettre ainsi une facilitation des études menées. Dans ce contexte, les procédés de coupe sont souvent étudiés sous des hypothèses de la coupe orthogonale 2D illustrée sur la **figure III.1**, où la direction d'avance et la vitesse de coupe sont perpendiculaires à l'arête de coupe. [28]



**Figure III.1.** Représentation en coupe orthogonale des zones de déformation. [27]

La coupe orthogonale a l'avantage de simplifier la modélisation tout en réduisant le nombre de paramètres mis en jeu. Sous l'action de l'arête de coupe de l'outil, le matériau de la pièce usinée subit une forte compression et se déforme plastiquement [28]

### 3 Modèle

#### 3.1 Choix de Lois de comportement de l'outil et du matériau usiné

Le choix de la loi de comportement du matériau usiné est capital en simulation numérique de l'usinage. En effet, pour bien simuler le comportement du matériau usiné, il faut choisir un modèle qui colle au mieux à celui-ci sous les diverses sollicitations thermomécaniques auxquelles il fait face dans des conditions réelles d'usinage, Il existe divers modèles performants de comportement des matériaux utilisables en simulation numérique de l'usinage. Cependant, leurs utilisations exigent l'identification de paramètres quand ils ne sont pas disponibles, une identification qui a des coûts non négligeables. Nous pouvons choisir parmi les lois de comportement disponibles en simulation numérique de l'usinage, celle de Johnson-Cook l'une des plus utilisées et très répandue [28].

#### 3.2 Modèle de comportement de type Johnson-Cook

En usinage, ce modèle est très souvent utilisé pour modéliser le comportement du matériau usiné. Le modèle de Johnson–Cook est un modèle empirique qui prend en considération l'effet de l'érouissage, de la viscosité et de l'adoucissement thermique selon l'équation Avec  $A$ ,  $B$ ,  $n$ ,  $C$  et  $m$  des constantes du matériau usiné à déterminer expérimentalement,  $v_f$  est la vitesse de déformation de référence,  $T_f$  et  $T_0$  sont respectivement la température de fusion et la température de référence [26].

Pour décrire l'initiation de l'endommagement, le modèle de Johnson–Cook est souvent couplé à une loi d'endommagement sous la forme suivante :

$$\epsilon_f = [d_1 + d_2 \epsilon^{(-d_3 \frac{\epsilon}{\epsilon_0})}] [1 + d_4 \ln(\frac{\epsilon}{\epsilon_0})] [1 - d_5 (\frac{T - T_0}{T_f - T_0})]$$

Avec  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ ,  $d_4$  et  $d_5$  sont les paramètres d'endommagement du modèle de Johnson–Cook associés au matériau usiné [25].

## 4 Application au modèle numérique

Dans cette modélisation nous avons utilisé le code de calcul Abaqus afin d'étudier le comportement mécanique du couple outil-pièce lors de l'usinage orthogonal en tournage et la coupe en bout en fraisage.

### 4.1 Présentation du code de calcul ABAQUS

ABAQUS est un code de calcul par la méthode des éléments finis créé en 1978. Le code de calcul ABAQUS est un code commercial généraliste. Il se distingue par son grand champ d'action qui varie de la thermomécanique à l'acoustique en passant par la mécanique des fluides. Deux grands codes :

- **ABAQUS/Standard** : résolution par un algorithme statique implicite.
- **ABAQUS/Explicit** : résolution par un algorithme dynamique explicite.

Nous utiliserons pour notre démarche de simulation, la version explicit du logiciel ABAQUS. La version explicit d'ABAQUS est un produit d'analyse d'élément fini qui emploie un schéma d'intégration explicite pour résoudre des problèmes dynamiques ou quasi-statiques non linéaires.

L'habilité d'ABAQUS/Explicit pour supporter des comportements non linéaires comme des contacts, le rend intéressant pour notre simulation. La méthode explicite se caractérise également par une grande facilité de mise en œuvre dans le cas de problèmes non linéaires. La contrepartie est un pas de temps nécessairement très petits. Le caractère direct de l'intégration explicite permet aussi de faciliter la gestion des contacts et donc des frottements [11].

### 4.2 Caractéristiques géométriques du modèle

Pour mettre en place un modèle de calcul fiable pour les essais d'usinage, un modèle EF 3D a été développé. Une seule condition de coupe, a été retenue dans cette étude (l'avance linéaire), du fait que c'est l'influence des paramètres numériques du modèle EF qui feront l'objet de cette étude. Ce qui permettra d'ajuster ces paramètres et par conséquent de réduire leur influence sur le résultat final (la contrainte équivalant de Von Mises, type du copeau, ...).

### 4.3 Caractéristiques de matériaux

Notre étude porte sur un bloc d'aluminium de nuance **AL\_7075** définie par les paramètres suivants :

**Tableau 1.** Caractéristiques mécaniques d'aluminium AL\_7075. [29]

Module d'Young (MPa)	70000
Coefficient de poisson	0.32
Densité (Kg/m3)	3000

- Les coefficients des lois de Johnson-Cook [30] :

**Tableau 2.** Coefficients de Johnson-Cook d'aluminium AL\_7075.

A(MPa)	B(MPa)	n	c	m
546	678	0,71	0,024	1,56

- Les coefficients du critère d'endommagement de Johnson-Cook [31] :

**Tableau 3.** Coefficients d'endommagement de Johnson-Cook d'aluminium AL\_7075

d1	d2	d3	d4	d5
0,5	0,5	-1,5	0,011	1

- La température de fusion : 640°C
- La température de transition : 20°C

#### 4.4 Procédure à suivre

Nous allons décrire toutes les étapes à suivre pour intégrer les caractéristiques nécessaires à la modélisation d'une coupe orthogonale et la coupe en bout avec ABAQUS. Nous procéderons en paramétrant chaque module du logiciel dans l'ordre suivant :

- Part (création) : : permet de créer tous les objets géométriques nécessaires au problème traité, soit en les dessinant dans Abaqus, soit en les important d'un logiciel de dessin tiers
- Property (Propriété) : permet, comme son nom l'indique, de définir toutes les propriétés d'un objet géométrique ou d'une partie de ces objets.
- Assembly (Assemblage) : assemble les différents objets géométriques créés dans un même repère de coordonnées global.
- Step (Configuration) : permet de définir toutes les étapes et les requêtes pour le post traitement, c'est à dire le moment (temps) à partir duquel une force est appliquée et

jusqu'à quand ; il est aussi possible de créer des forces ou des conditions aux limites qui s'activent à des moments donnés.

- Interaction : grâce à ce module, il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'Abaqus ne prend en compte que les interactions explicitement définies.
- Load (Charge) : permet de spécifier tous les chargements, conditions aux limites, et champs. Il faut savoir que les chargements et les conditions aux limites sont dépendants du module STEP.
- Mesh (Maillage) : contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini sur un assemblage.
- Job (Exécution) : une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser ce module pour réaliser tous les calculs nécessaires et en tirer des résultats.

#### 4.4.1 Coupe orthogonale

##### 4.4.1.1 Création des géométries de l'outil et de la pièce

Dans un usinage, les éléments mis en interaction sont l'outil et la pièce ; les figures qui suivent montrent les géométries retenues pour ces éléments.

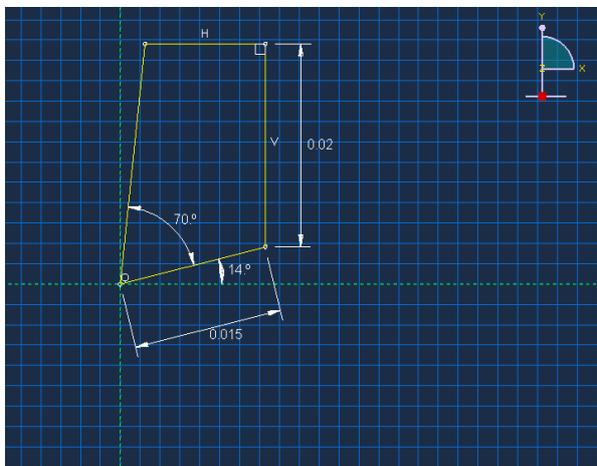


Figure III.2. Géométrie de l'outil

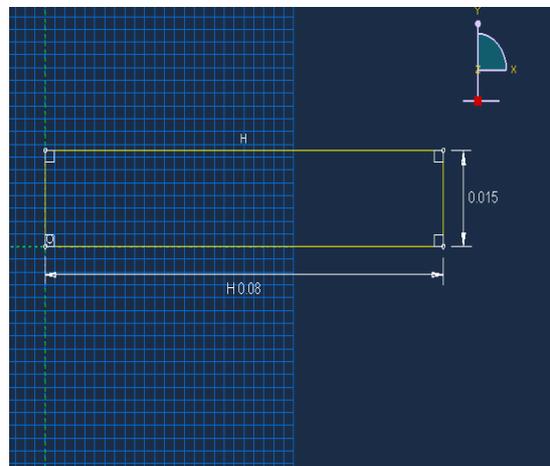
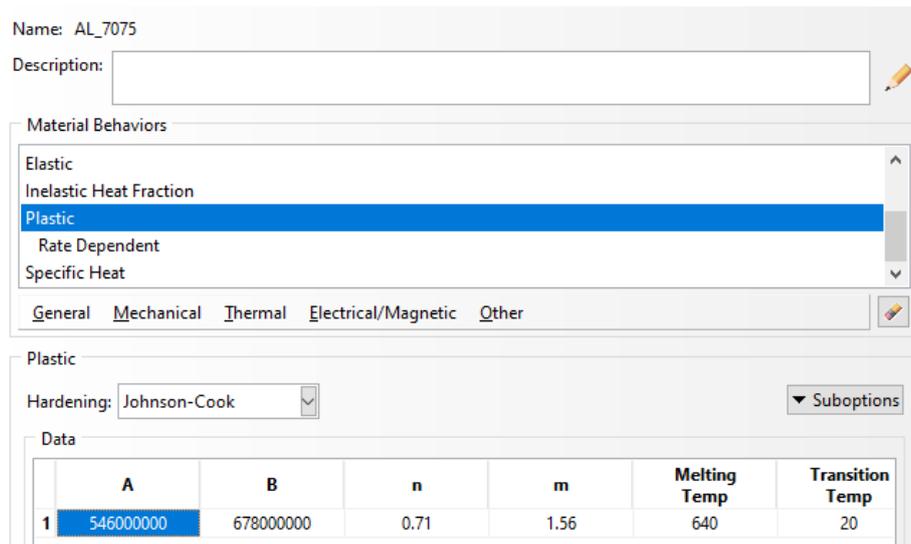


Figure III.3. Géométrie de la pièce.

##### 4.4.1.2 Propriétés des matériaux usinés et de coupe

A priori, l'outil de coupe (matériau de coupe) est assimilé à un corps rigide ; donc, pas de champ de déformation sur celui-ci. Aussi, nous ne sommes pas obligés à introduire sur Abaqus les propriétés du matériau de coupe. Le matériau usiné (pièce) étant un corps déformable plastique

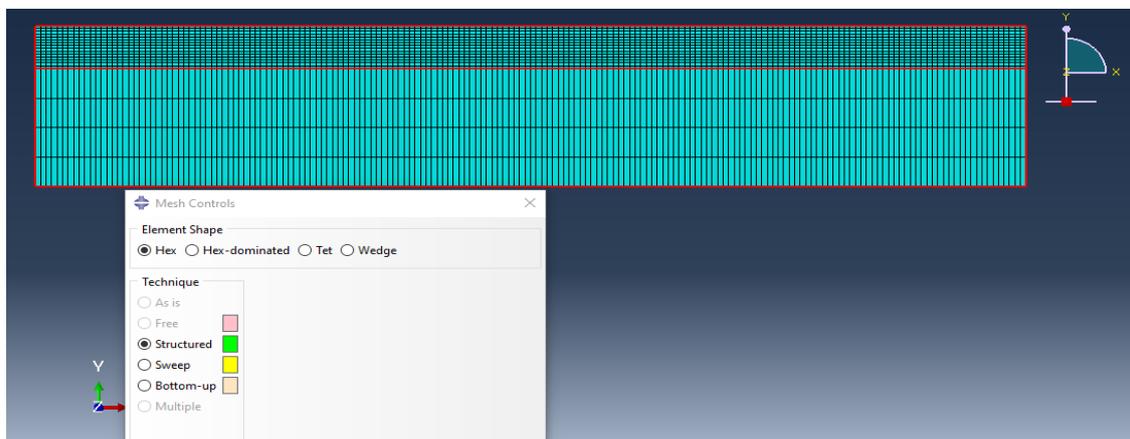
; son modèle constitutif est celui de Johnson-Cook. La figure qui suit montre l'introduction des paramètres de ce modèle dans Abaqus.



**Figure III.4.** Propriétés du matériau usiné.

#### 4.4.1.3 Maillage de la pièce

Le progiciel Abaqus propose le type d'éléments finis (triangulaire, quadrilatéral, ...) ; Pour notre cas, nous avons choisi a priori des éléments hexaèdres pour des raisons de simplicité



**Figure III.5.** Maillage de la pièce.

#### 4.4.1.4 Contact outil-pièce

A cette étape nous définissons l'outil comme un corps rigide en créant une contrainte de type « Rigide Body » (voir, Figure III.6)

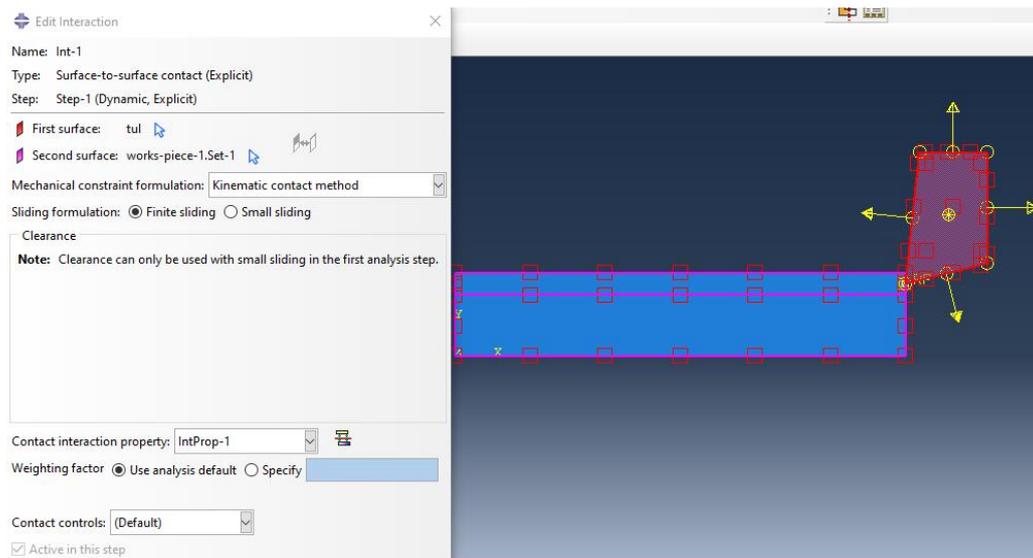


Figure III.6. Module interaction.

## 4.4.2 Coupe en bout

### 4.4.2.1 Création des géométries de l'outil et de la pièce

Dans un usinage, les éléments mis en interaction sont l'outil et la pièce ; la figure qui suit montre les géométries retenues pour ces éléments.

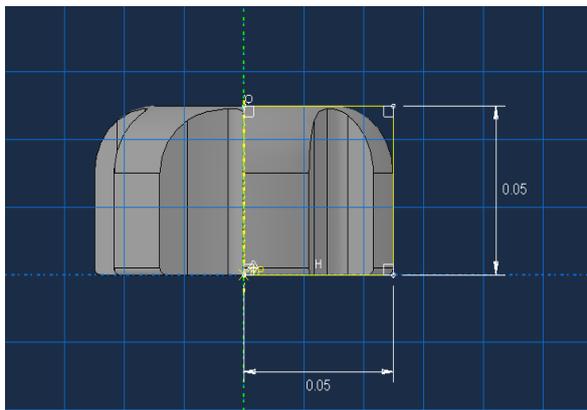


Figure III.7. Géométrie de l'outil

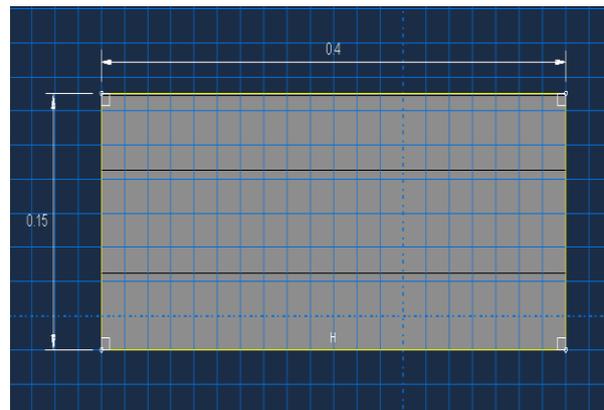


Figure III.8. Géométrie de la pièce.

#### 4.4.2.2 Propriétés des matériaux usinés et de coupe

Les propriétés de matériau usinée sont les mêmes que la procédure précédant

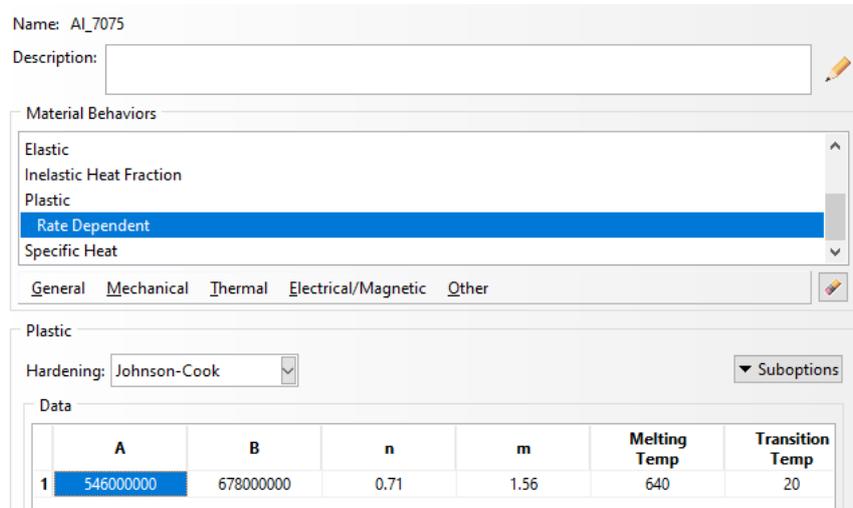


Figure III.9. Propriétés du matériau usiné

#### 4.4.2.3 Maillage de la pièce

Le progiciel Abaqus propose le type d'éléments finis (triangulaire, quadrilatéral, ...) ; Pour notre cas, nous avons choisi a priori des éléments hexaèdres pour des raisons de simplicité

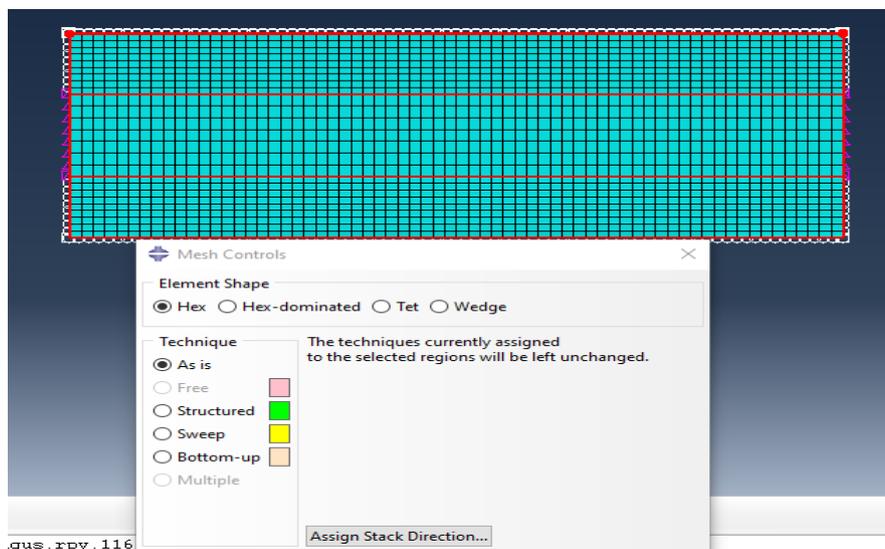


Figure III.10. Maillage de la pièce

#### 4.4.2.4 Contact outil-pièce

A cette étape nous définissons l'outil comme un corps rigide en créant une contrainte de type « Rigid Body » (voir, Figure III.11).

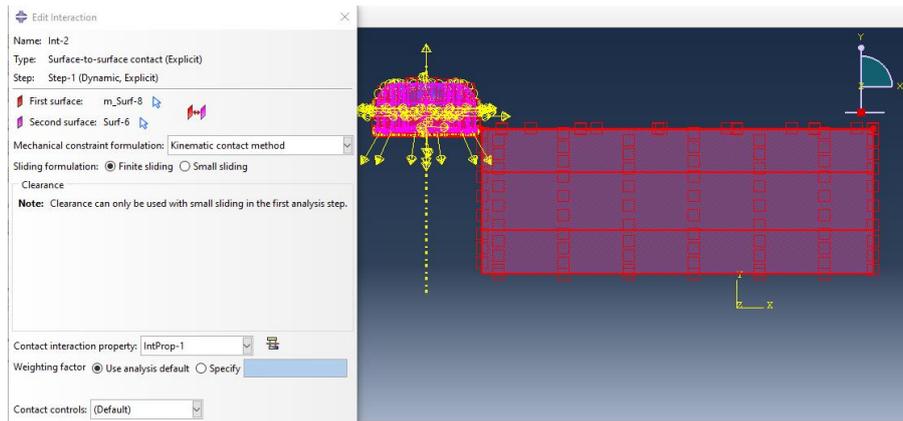


Figure III.11. Module interaction.

### 4.5 Unités dans Abaqus

Le logiciel Abaqus n'indique pas les unités des grandeurs physiques ; c'est à l'utilisateur de faire un choix du système d'unités. Pour notre travail, nous avons choisi les unités qui suivent :

Tableau 4. Choix des unités

distance	temp	masse	Masse volumique	Force	Contrainte	Temperature
[m]	[s]	[Kg]	[Kg/m <sup>3</sup> ]	[N]	[ Pa]	[°C]

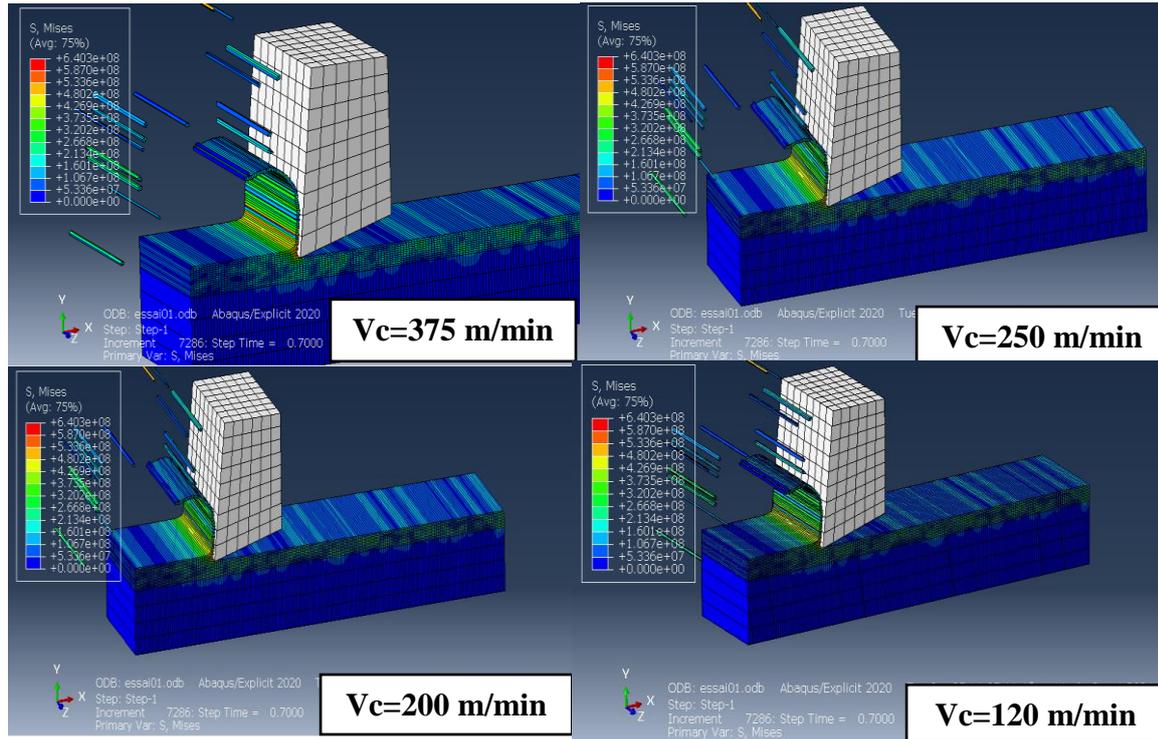
## 5 Résultats de simulation

Cette étude porte sur l'élaboration d'un modèle de coupe orthogonale et de la coupe en bout simulant l'usinage de l'aluminium **AL\_7075** usiné par carbure brasé à sec. L'objectif principal est d'apporter une contribution aux approches et aux méthodologies numériques existantes. Ceci permettra d'une part, la modélisation de la formation du copeau et d'autre part, l'étude des conséquences induites sur les distributions du champ de la contrainte équivalent de Von Mises résultante. Le comportement thermo-visco-plastique est décrit par le modèle de Johnson & Cook. Le travail s'est focalisé sur la modélisation de l'influence des conditions opératoires sur l'évolution la contrainte de Von Mises générés par le procédé. La morphologie du copeau a également été étudiée en fonction du régime de coupe. Les résultats numériques obtenus ont été comparés aux résultats expérimentaux en termes de la morphologie du copeau.

### 5.1 Les distributions du champ de la contrainte équivalent de Von Mises

Nous allons maintenant présenter les résultats relatifs à la simulation numérique de la coupe orthogonale et le fraisage en bout. Après divers réglages sur le logiciel Abaqus.

### 5.1.1 Coupe orthogonale



**Figure III.12.** Les distributions du champ de la contrainte équivalent de Von Mises

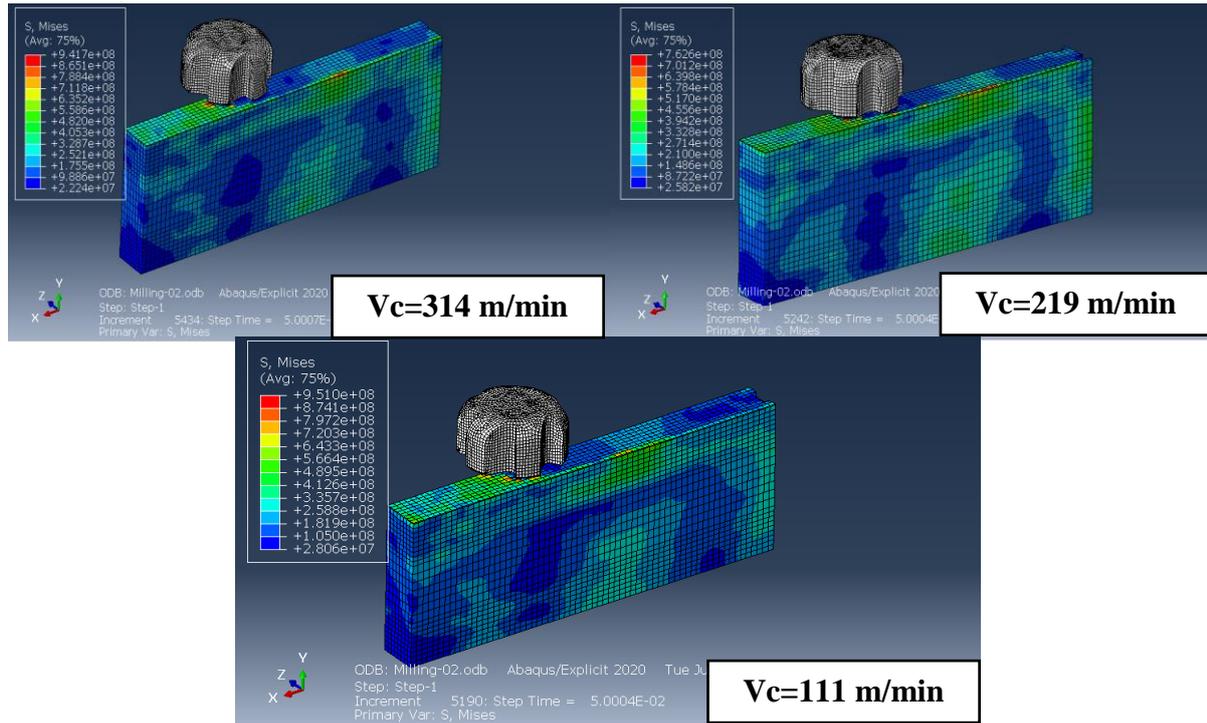
La **Figure III.12** représente la distribution de la contrainte Von Mises dans la zone de cisaillement pour les différentes vitesses de coupes qui sont respectivement comme suit **375, 250,200 ,120 m/min**, de la profondeur de passe constant  **$A_p = 0,8$**  et de l'avance constant  **$f = 0,09$**

On remarque bien que les contraintes sont concentrées dans la zone de cisaillement primaire, dans cette région l'outil exerce un effort de compression qui fait la séparation entre la pièce usinée et le copeau. Donc les valeurs de la contrainte sont comme se suit :

- A une vitesse de 375 m/min la contrainte prend la valeur de 640 MPa
- A 250 m/min, la valeur de la contrainte est de 640 MPa
- Pour la vitesse de 200 m/min la contrainte est de 640 MPa
- Pour la vitesse de 120 m/min la contrainte est de 640 MPa

A partir de ses résultats on constate que la valeur de la contrainte équivalente de Von Mises reste constante pour les quatre vitesses de coupe.

### 5.1.2 Fraisage en bout



**Figure III.13.** Les distributions du champ de la contrainte équivalent de Von Mises

La **Figure III.13** représente la distribution de la contrainte Von Mises dans la zone de cisaillement pour les différentes vitesses de coupes qui sont respectivement comme suit **314, 219,111 m/mi**, de la profondeur de passe constant  **$A_p = 0,5$**

On remarque bien que les contraintes sont concentrées dans la zone de cisaillement primaire. Donc les valeurs de la contrainte sont comme se suit :

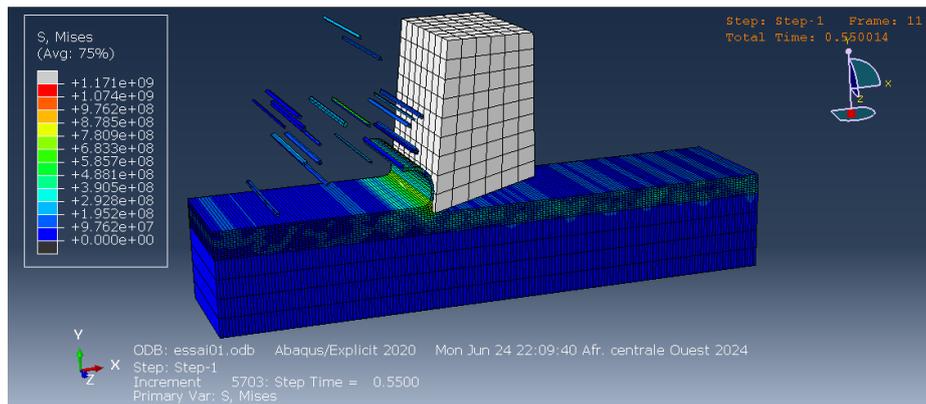
- A une vitesse de 314 m/min la contrainte prend la valeur de 941 MPa
- A 219 m/min, la valeur de la contrainte est de 762 MPa
- Pour la vitesse de 111 m/min la contrainte est de 951 MPa

A partir de ses résultats on constate que la valeur de la contrainte équivalente de Von Mises diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe à 219 m/min après augmente avec  $V_c=314\text{m/min}$

## 5.2 Type de coupeau

### 5.2.1 Coupe orthogonale

Dans cette partie on s'intéresse au type du coupeau en coupe orthogonale de **AL\_7075**, ce dernier présente une discontinuité lors de la simulation avec Abaqus ( $V_c = 375$  m/min,  $a_p = 0.8$  mm), (**Figure III.14**), qui est similaire à la forme réelle du coupeau.

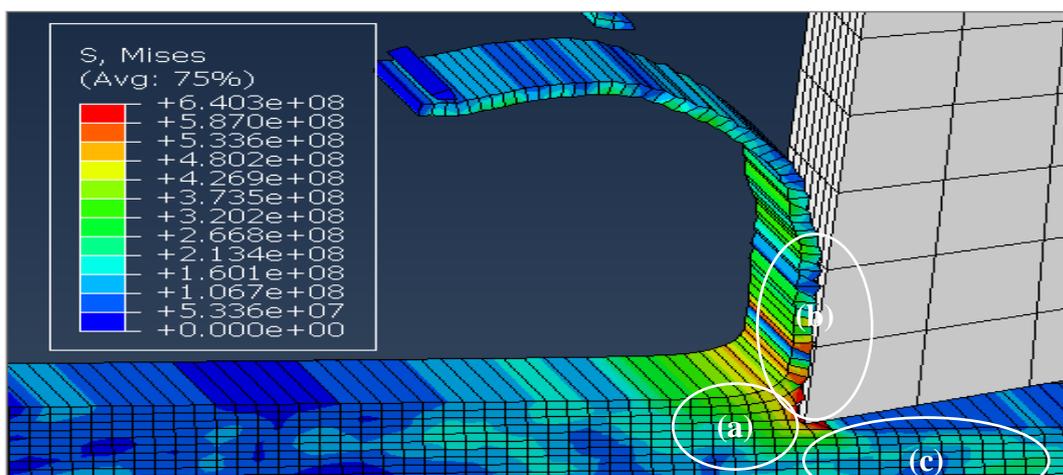


**Figure III.14.** Forme du coupeaux discontinue

#### 5.2.1.1 Répartition des contraintes

Dans cette partie à la définition des trois zones cisaillement :

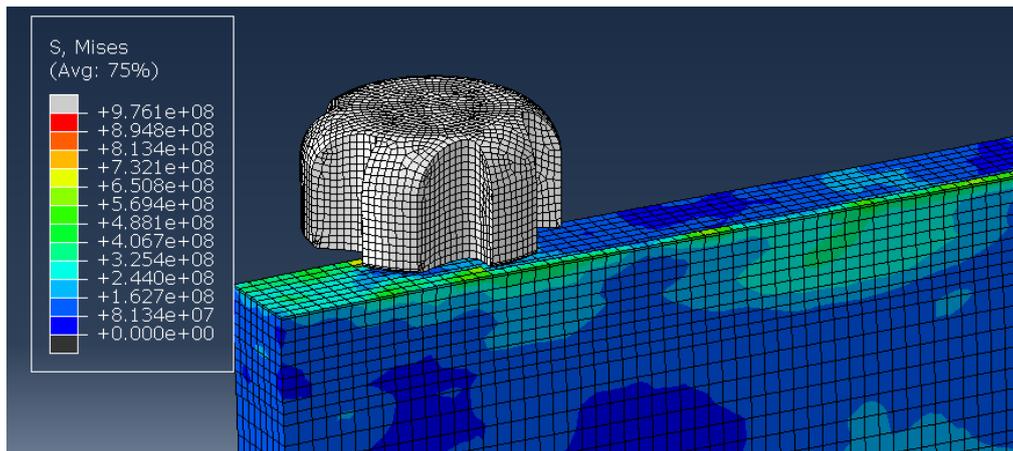
- (a) La zone de cisaillement primaire
- (b) La zone de cisaillement secondaire
- (c) La zone de cisaillement tertiaire



**Figure III.15.** Répartition des contraintes dans la zone de déformation.

### 5.2.2 Fraisage en bout

Dans cette partie on s'intéresse au type du coupeau en fraisage en bout de l'alliage d'aluminium **AL\_7075**, ce dernier est négligeable lors de la simulation avec Abaqus ( $V_c = 314$  m/min,  $A_p=1$ mm), (**Figure III.16**), qui est similaire à la forme réelle du coupeau (des grains très fins qui ne peuvent pas ramasser)



**Figure III.16.** Forme du coupeaux est négligeable.

# **Chapitre IV**

## Résultats et Discussion

## 1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les résultats des essais réalisés, ainsi que la modélisation mathématique des différents phénomènes étudiés. Ces modèles permettent d'étudier la relation entre les paramètres d'entrée : la vitesse de coupe ( $V_c$  en [m/min]), l'avance par tour ( $f$  en [mm/tr]) et la profondeur de passe ( $A_p$  en [mm]), et les paramètres de sortie : la rugosité de surface ( $R_a$  en [ $\mu\text{m}$ ]) et la température ( $T_{\text{max}}$  en [ $^{\circ}\text{C}$ ]).

Afin de déterminer les modèles mathématiques et les coefficients de corrélation de chaque modèle, ainsi que la présentation 3D sous forme d'une surface de réponse, nous avons utilisé un logiciel de statistique nommé « Minitab statistical ». Ce logiciel nous a permis de faire des statistiques basées sur l'analyse de la variance, afin de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur la rugosité ( $R_a$ ) et la température ( $T_{\text{max}}$ ).

## 2 Modélisation de la rugosité et de la température

Les résultats vont servir à la détermination des modèles mathématiques qui expriment la relation entre les paramètres d'entrée ( $V_c$ ,  $f$ ,  $A_p$ ) et les paramètres de sortie ( $R_a$ ,  $T_{\text{max}}$ ). L'objectif principal de cette modélisation est d'essayer de faire des prédictions.

### 2.1 Tournage (Opération de dressage)

Les résultats sont obtenus suite aux essais de tournage (dressage) de l'aluminium **AL\_7075** par un outil en carbure brasé pour un plan de 18 essais sont présentés dans le **Tableau 1** qui résume tous les essais qui ont à réaliser avec des différents paramètres d'entrée. Et à la suite de chaque essai on a vérifié l'état de surface et mesuré la température maximale pendant l'usinage.

**Tableau 1.** Plan d'expérience de 18 essais et critères de rugosité et de température.

Essai N°	Paramètres d'entrée (Facteurs)			Paramètres de sortie (Réponses)	
	Vc (m/min)	Ap (mm)	f (mm/tr)	Ra (µm)	Tmax (°C)
1	120	0,1	0,09	0,52	27,8
2	120	0,3	0,09	0,57	29,3
3	120	0,8	0,09	0,54	28,4
4	200	0,1	0,2	0,3	28,6
5	200	0,3	0,2	0,13	28,2
6	200	0,8	0,2	0,23	26
7	200	0,1	0,88	0,21	35,2
8	200	0,3	0,88	0,2	49
9	200	0,8	0,88	0,17	33,4
10	250	0,1	0,09	0,4	30,4
11	250	0,3	0,09	0,43	28,9
12	250	0,8	0,09	0,2	32,4
13	375	0,1	0,09	0,33	30,8
14	375	0,3	0,09	0,28	46
15	375	0,8	0,09	0,21	29,8
16	375	0,1	0,2	0,21	31,4
17	375	0,3	0,2	0,23	27
18	375	0,8	0,2	0,21	28,6

Dans le tableau suivant (**Tableau 2**) en à prendre les cinq meilleurs résultats et les refaire avec un autre outil de coupe « plaquette en carbure tungstène » pour une petite comparaison entre les deux.

**Tableau 2.** Plan pour 5 essai d'expérience du critère de rugosité et de température.

Essai N°	Paramètres d'entrée (Facteurs)			Paramètres de sortie (Réponses)	
	Vc (m/min)	Ap (mm)	f (mm/tr)	Ra (µm)	Tmax (°C)
1	200	0,3	0,2	0,24	45,6
2	200	0,8	0,88	0,35	30,6
3	250	0,8	0,09	0,23	31,2
4	375	0,8	0,09	0,19	26,2
5	375	0,8	0,2	0,29	46,8

## 2.2 Fraisage (Opération de surfacage)

Les résultats sont obtenus suite à un ensemble des expériences de fraisage (surfacage) de l'aluminium AL\_7075 par une fraise en carbure brasé pour un plan d'expérience de 12 essai sont présentés dans le **Tableau 3**

**Tableau 3.** Plan pour 12 essai d'expérience du critère de rugosité et de température

Essai N°	Paramètres d'entrée (Facteurs)			Paramètres de sortie (Réponses)	
	Vc (m/min)	Ap (mm)	f (mm/tr)	Ra (µm)	Tmax (°C)
1	111	0,5	0,09	0,7	42,4
2	111	1	0,09	0,92	36,6
3	111	0,5	0,18	1,3	34,2
4	111	1	0,18	1,2	33,2
5	219	0,5	0,04	0,33	35,3
6	219	1	0,04	0,45	35,6
7	219	0,5	0,09	0,3	38,4
8	219	1	0,09	0,28	28,4
9	314	0,5	0,03	0,41	29,6
10	314	1	0,03	0,5	30,2
11	314	0,5	0,06	0,63	30,2
12	314	1	0,06	0,55	29,8

### 3 Analyse de la variance

Les résultats présentés dans les **Tableau [4-9]** sont analysés par le logiciel **Minitab statistical** en appliquant l'analyse de variance (ANOVA). L'objectif de cette étude est de déterminer l'influence des paramètres d'entrée vitesse de coupe (Vc), la profondeur de passe (Ap), l'avance (f) sur la rugosité (Ra) et la température maximal (Tmax). Cette analyse a été effectuée pour un niveau de signification de 5 % et pour un niveau de confiance de 95 % [27].

Dans ces tableaux sont indiquées les valeurs :

- **Des degrés de liberté (DL)** : est le nombre de degrés de liberté pour le modèle retenu (correspondant à la partie erreur).
- **La somme des carrés des écarts (SC)** : est utilisée pour estimer le carrée de la déviation de la moyenne générale.

$$SC = \frac{N}{Nnf} \sum_{i=1}^{Nnf} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (1)$$

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

$Y_i$  réponse moyenne observée dans les expériences où le facteur f prend son niveau, N nombre total d'expériences, niveau de chaque facteur f.

- **Les carrés moyens (CM)** : est estimée en divisant la somme des carrés sur le degré de liberté

$$MC = \frac{SC}{CMe} \quad (2)$$

- **La propriété statistique (Fs)** : est utilisé avec la base que les valeurs de F-calculées devraient être supérieures à celles obtenues à partir du F-table. La formule de calcul La propriété statistique (F) est donnée par l'équation (3) :

$$FS = \frac{CM}{CMe} \quad (3)$$

Avec CMe les carrés moyens des erreurs.

- **La probabilité (P)** : (allant de 0 à 1) que les résultats observés dans une étude (ou résultats

plus extrêmes) ont pu se produire par hasard.

- Si  $P > 0,05$ , le paramètre est insignifiant

- Si  $P < 0,05$ , le paramètre est significatif

- **La contribution en pourcentage (PC %)** : montre la contribution des facteurs (en pourcentage, %) sur la variation totale, indiquant le degré d'influence sur le résultat. PC%

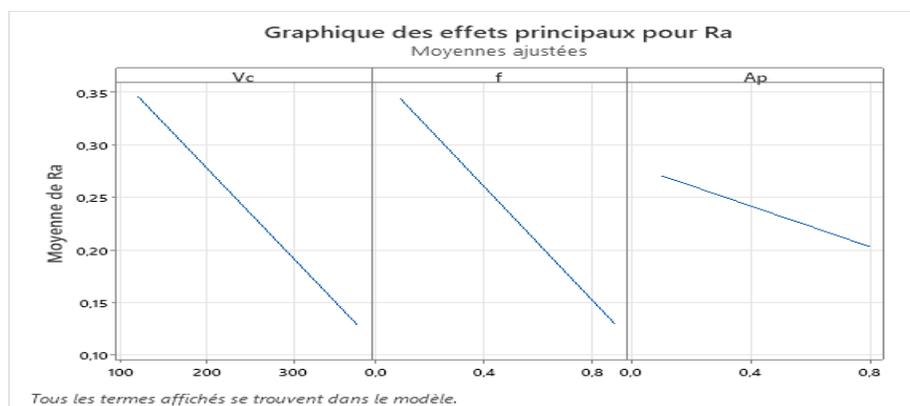
$$= \frac{SC}{SC_{total}} \times 100 \quad (4)$$

Plus le pourcentage de contribution (PC %) est grand, plus le facteur a un effet sur les paramètres étudiés [28].

### 3.1 Analyse de la variance pour un plan de 18 essais avec un outil carbure brasé sur Ra et Tmax

- **Rugosité (Ra)**

D'après les résultats du **Tableau 4**, dans **l'annexe 1** le facteur de la vitesse de coupe ( $V_c$ ) a une grande influence sur la rugosité (Ra) pendant l'usinage avec une contribution de 35,29%. Ensuite vient l'avance (f) avec une contribution de 32,15%, et en dernier lieu la profondeur de passe (Ap) qui a une contribution de 4,64%.



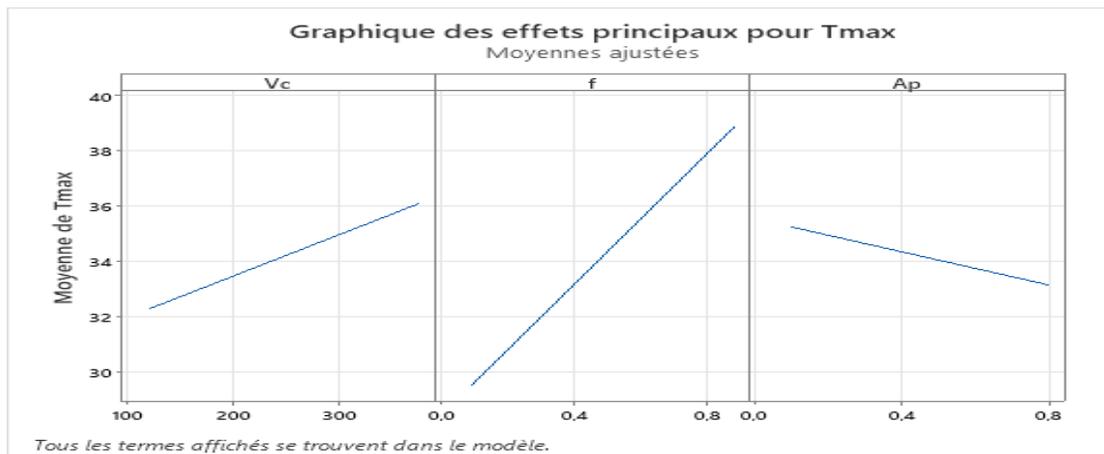
**Figure VI.1.** Les effets principaux de Ra.

La **figure VI.1** illustre les effets moyens des paramètres de coupe sur la température. D'après cette figure on remarque que la vitesse de coupe a un effet significatif sur la rugosité. Plus la vitesse de coupe ( $V_c$ ) augmente plus la rugosité (Ra) diminue. L'augmentation de l'avance (f) diminue la

valeur de la rugosité (Ra), aussi plus la profondeur de passe ( $A_p$ ) augmente la rugosité (Ra) diminue.

### ➤ Température ( $T_{max}$ )

D'après les résultats du **Tableau 5**, dans **l'annexe 2** le facteur de l'avance (f) a une grande influence sur la température ( $T_{max}$ ) pendant l'usinage avec une contribution de 29,43%. Ensuite vient la vitesse de coupe ( $V_c$ ) avec une contribution de 5,25%, et en dernier lieu la profondeur de passe ( $A_p$ ) qui a une contribution de 2,14%.



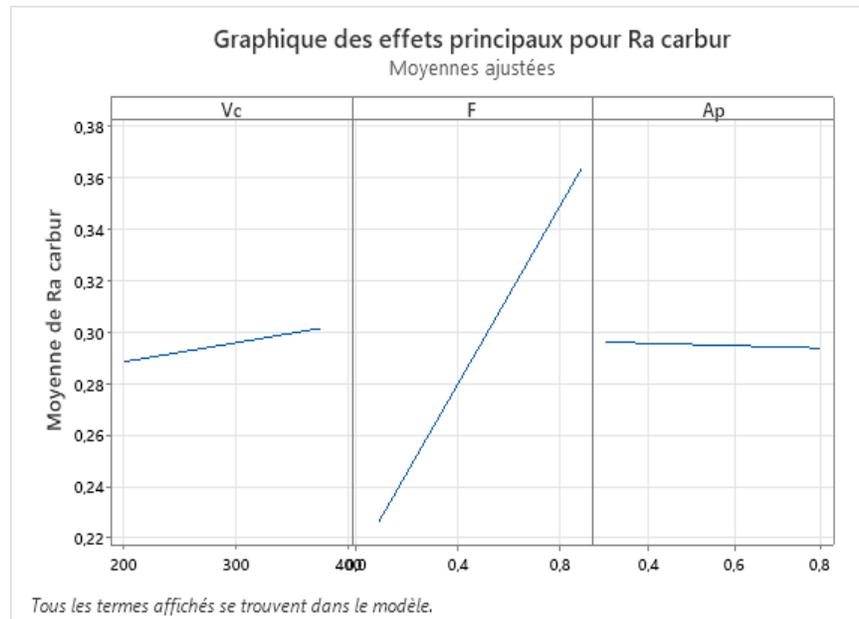
**Figure VI.2.** Les effets principaux de ( $T_{max}$ )

La **figure VI.2** illustre les effets moyens des paramètres de coupe sur la température ( $T_{max}$ ). D'après cette figure on remarque que l'avance (f) a un effet significatif sur la température ( $T_{max}$ ). Plus l'avance (f) augmente plus la température ( $T_{max}$ ) augmente. L'augmentation de la vitesse de coupe ( $V_c$ ) diminue la valeur de la température ( $T_{max}$ ), aussi plus la profondeur de passe ( $A_p$ ) augmente plus la température ( $T_{max}$ ) diminue.

### 3.2 Analyse de la variance pour un plan de 5 meilleurs essais avec un outil carbure tungstène sur Ra et $T_{max}$

#### ➤ Rugosité (Ra)

D'après les résultats du **Tableau 6**, dans **l'annexe 3** le facteur de l'avance (f) a une grande influence sur la rugosité de surface (Ra) avec une contribution de 44,01%. Ensuite vient la vitesse de coupe ( $V_c$ ) avec une contribution de 0,44%, et en dernier lieu la profondeur de passe ( $A_p$ ) qui a une contribution de 0,02%.

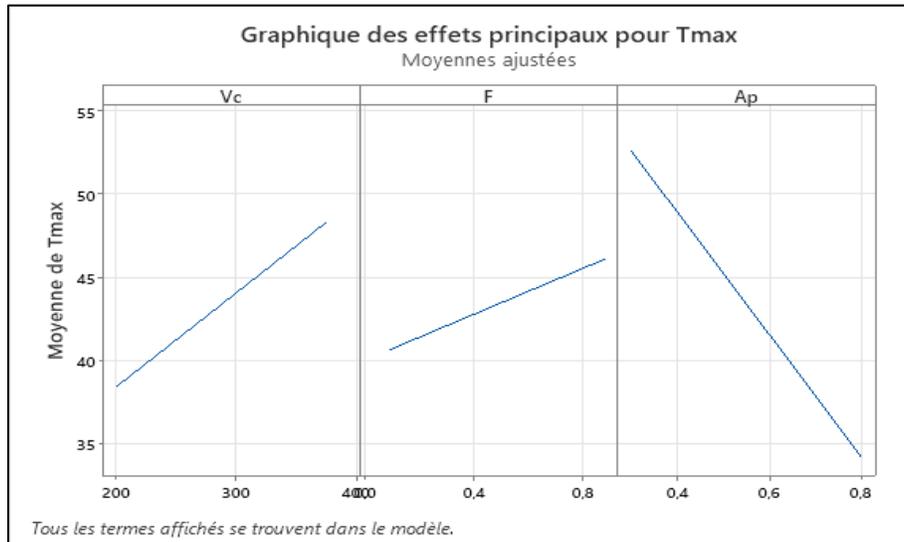


**Figure VI.3.** Les effets principaux de Ra

La **figure VI.3** illustre les effets moyens des paramètres de coupe sur la rugosité de (Ra). D'après cette figure on remarque que l'avance (f) et la vitesse de coupe (Vc) a un effet significatif sur la rugosité (Ra). Plus l'avance (f) augmente plus la rugosité (Ra) augmente. L'augmentation de la vitesse de coupe (Vc) augmente de la valeur de la rugosité (Ra), plus la profondeur de passe (Ap) augmente plus la rugosité (Ra) diminue

#### ➤ **Température (Tmax)**

D'après les résultats du **Tableau 7**, dans **l'annexe 4** le facteur de profondeur de passe (Ap) a une grande influence sur la température (Tmax) avec une contribution de 38,72%. Ensuite vient la vitesse de coupe (Vc) avec une contribution de 10,32%, et en dernier lieu l'avance (f) qui a une contribution de 2,80%.



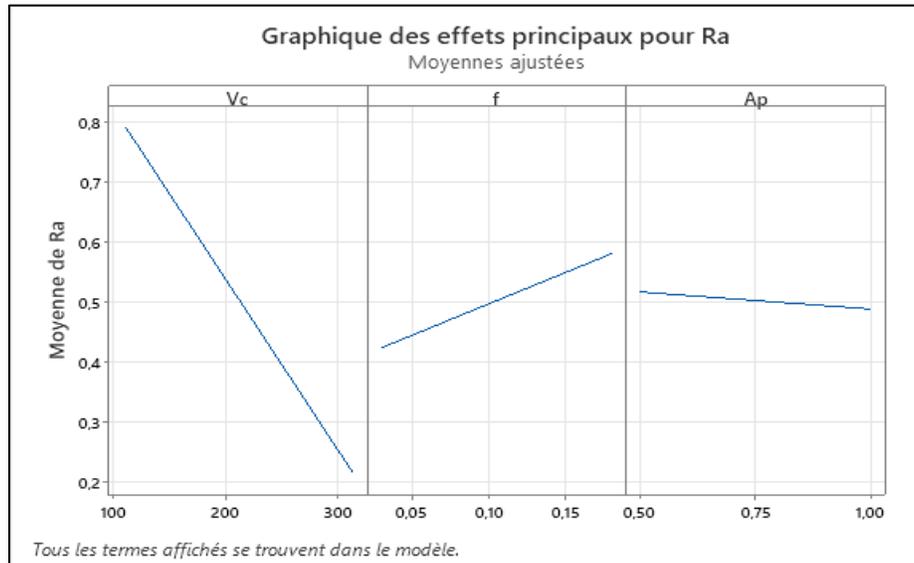
**Figure VI.4.** Les effets principaux de Tmax

La **figure VI.4** illustre les effets moyens des paramètres de coupe sur la température (Tmax). D'après cette figure on remarque que l'avance (f) et la vitesse de coupe (Vc) a un effet significatif sur la température (Tmax). Plus l'avance (f) augmente plus la température (Tmax) augmente. L'augmentation de la vitesse de coupe (Vc) augmente de la valeur de la température (Tmax), plus la profondeur de passe (Ap) augmente plus la température (Tmax) diminue.

### 3.3 Analyse de la variance pour un plan de 12 essai sur Ra et Tmax

#### ➤ Rugosité (Ra)

D'après les résultats du **Tableau 8**, dans l'**annexe 5** l'interaction de la vitesse de coupe (Vc) et l'avance (f) a une grande influence sur la rugosité (Ra) avec une contribution de 14,75%. Ensuite vient la vitesse de coupe (Vc) avec une contribution de 10,47%, puis l'interaction de l'avance (f) et la profondeur de passe (Ap) avec une contribution de 2,64% après elle vient l'interaction de la vitesse de coupe (Vc) et la profondeur de passe (Ap) avec une contribution de 2,08% puis l'avance (f) avec une contribution de 0,54% et en dernier lieu la profondeur de passe (Ap) qui a une contribution de 0,13%.

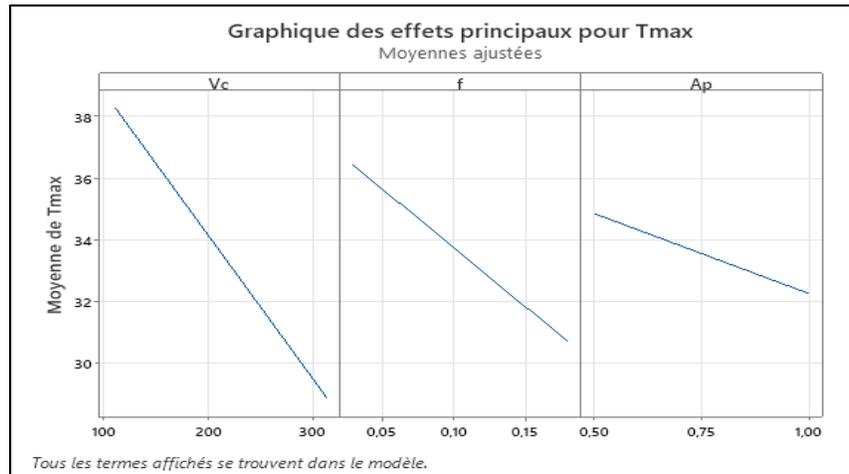


**Figure VI.5 .Les effets principaux de Ra**

La **figure VI.5** illustre les effets moyens des paramètres de coupe sur la rugosité de (Ra). D'après cette figure on remarque que la vitesse de coupe ( $V_c$ ) a un effet significatif sur la rugosité (Ra). Plus la vitesse de coupe ( $V_c$ ) augmente plus la rugosité (Ra) diminue. L'augmentation de l'avance ( $f$ ) augmente de la valeur de la rugosité (Ra), plus la profondeur de passe ( $A_p$ ) augmente plus la rugosité (Ra) diminue.

#### ➤ **Température ( $T_{max}$ )**

D'après les résultats du **Tableau 9**, dans l'**annexe 6** le facteur de la vitesse de coupe ( $V_c$ ) a une grande influence sur la température ( $T_{max}$ ) avec une contribution de 18,12%. Ensuite vient la profondeur de passe ( $A_p$ ) avec une contribution de 7,03%, et en dernier lieu l'avance ( $f$ ) qui a une contribution de 4,65%.



**Figure VI.6.** Les effets principaux de Tmax.

La **figure VI.6** illustre les effets moyens des paramètres de coupe sur la température (Tmax). D'après cette figure on remarque que l'avance (f) et la vitesse de coupe (Vc) a un effet significatif sur la température (Tmax). Plus l'avance (f) augmente plus la température (Tmax) diminue. L'augmentation de la vitesse de coupe (Vc) diminue de la valeur de la température (Tmax), plus la profondeur de passe (Ap) augmente plus la température (Tmax) diminue.

#### 4 La méthode de surface de réponse(RSM)

La méthodologie de surface de réponse (MSR) permet d'optimiser une ou plusieurs variables des réponses [25]. Le principe est de faire une modélisation de la surface de réponse expérimentale [26]. Elle est utilisée pour déterminer la relation entre les paramètres indépendants du processus d'usinage (Vc, f, Ap) avec la réponse souhaitée (Ra) et (Tmax), ce qui permet d'explorer l'effet de ces paramètres sur les réponses considérées. Dans cette étude, la relation entre les conditions de coupe et les paramètres technologiques d'usinage est donnée par l'équation (5) pour fraisage et (6) pour tournage :

$$Y = F(Vc, f, Ap) \quad (5)$$

$$Y = F(Vc, f, Ap) \quad (6)$$

Y est la réponse désirée et F la fonction de réponse.

L'approximation de Y est proposée à l'aide d'un modèle mathématique non linéaire, qui convient pour l'étude des effets des interactions des paramètres de régime de coupe sur les caractéristiques d'usinabilité. Dans le présent travail, le modèle mathématique linéaire avec interaction basée sur MSR est donné par l'équation (7) :

$$Y = a_0 + a_1 V_c + a_2 f + a_3 A_p + a_{12} V_c \times f + a_{13} V_c \times A_p + a_{23} f \times A_p \quad (7)$$

Y est la réponse désirée de la rugosité de surface (Ra) ou la température maximal (Tmax) et  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_{12}$  et  $a_{13}$ ,  $a_{23}$ , sont les coefficients de régression à déterminer pour chaque réponse.

$R^2$  est un coefficient de détermination multiple des réponses mesurées [19]. La valeur de  $R^2$  varie entre 0 et 1. Si elle est proche de 1 le modèle est bon et significatif. Le coefficient de détermination de la régression  $R^2$  est défini par le rapport de la dispersion des résultats, donné par la relation (8) :

$$R^2 = 1 - \frac{SC_{error}}{SC_{total}} \quad (8)$$

Cette valeur du coefficient de détermination montre que les mesures des rugosités obtenues sont modélisées de façon très satisfaisante par le modèle obtenu.

#### 4.1 Analyse de régression

La régression est une méthode statistique visant à analyser la relation (association) entre une variable dépendante particulière et une ou plusieurs variables indépendantes.

##### 4.1.1 Analyse de régression pour la rugosité (Ra) de plan d'expérience de 18 essais avec un outil de coupe en carbure brasé

L'analyse de régression de la rugosité (Ra) en fonction du régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $A_p$ ) donne l'équation du modèle linéaire (9).

$$Ra = 0,6242 - 0,000856V_c - 0,2722f - 0,0968A_p \quad (9)$$

Le coefficient de corrélation est  $R^2 = 0,60$

Cela nous donne que 60,06% des variations des rugosités sont expliquées par le modèle et que 39,94% restent par conséquent inexpliquées

#### 4.1.2 Analyse de régression pour la rugosité (Ra) de plan d'expérience de 5 meilleurs essais avec un outil de coupe en carbure tungstène

L'analyse de régression de la rugosité (Ra) en fonction du régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $A_p$ ) donne l'équation du modèle linéaire (10).

$$Ra = 0,192 + 0,000074V_c + 0,173f - 0,005A_p \quad (10)$$

Le coefficient de corrélation est  $R^2 = 0,77$

Cela nous donne que 77,84 % des variations des rugosités sont expliquées par le modèle et que 22,16% restent par conséquent inexpliquées

#### 4.1.3 Analyse de régression pour la rugosité (Ra) de plan d'expérience de 12 essais avec un outil de coupe en carbure brasé

L'analyse de régression de la rugosité (Ra) en fonction du régime de coupe ( $V_c, f, A_p$ ) donne l'équation du modèle linéaire avec interaction complet (11).

$$Ra = -1,17 + 0,00514V_c + 16,86f + 1,35A_p - 0,0515V_c \times f - 0,00343V_c \times A_p - 6,47f \times A_p \quad (11)$$

Le coefficient de corrélation est  $R^2 = 0,86$

Cela nous donne que 86,48% des variations des rugosités sont expliquées par le modèle et que 13,52% restent par conséquent inexpliquées

#### 4.1.4 Analyse de régression pour la température (Tmax) de plan d'expérience de 18 essais avec un outil de coupe en carbure brasé

L'analyse de régression de la température (Tmax) en fonction du régime de coupe ( $V_c$ ,  $f$ ,  $a_p$ ) donne l'équation du modèle linéaire (12).

$$T_{max} = 26,07 + 0,0150V_c + 11,84f - 2,99A_p \quad (12)$$

Le coefficient de corrélation est  $R^2 = 0,239$

Cela nous donne que 23,90% des variations des rugosités sont expliquées par le modèle et que 76,1% restent par conséquent inexpliquées

#### 4.1.5 Analyse de régression pour la température (Tmax) de plan d'expérience de 5 meilleurs essais avec un outil de coupe en carbure tungstène

L'analyse de régression de la température (Tmax) en fonction du régime de coupe (Vc, f, Ap) donne l'équation du modèle linéaire (13).

$$T_{\max} = 43,9 + 0,057V_c + 6,9f - 36,7A_p \quad (13)$$

Le coefficient de corrélation est  $R^2 = 0,43$

Cela nous donne que 43,32% des variations des rugosités sont expliquées par le modèle et que 56,68% restent par conséquent inexpliquées

#### 4.1.6 Analyse de régression pour la température (Tmax) de plan d'expérience de 12 essais avec un outil de coupe en carbure brasé

L'analyse de régression de la température (Tmax) en fonction du régime de coupe (Vc, f, Ap) donne l'équation du modèle linéaire avec interaction complet (14).

$$T_{\max} = 63,4 - 0,0984 V_c - 93,9f - 14,8 A_p + 0,216V_c \times f + 0,0388V_c \times A_p + 13f \times A_p \quad (14)$$

Le coefficient de corrélation est  $R^2 = 0,79$

Cela nous donne que 79,36% des variations des rugosités sont expliquées par le modèle et que 20,64% restent par conséquent inexpliquées.

### 5 Comparaison entre les valeurs prédites et les valeurs mesurées

Pour valider le modèle, il est nécessaire d'étudier la comparaison entre les valeurs expérimentales (mesurées) des critères de rugosité et de la température et celles estimées (prévues) par le modèle mathématique obtenu.

#### 5.1 Les valeurs prédites et les valeurs mesurées de la rugosité (Ra) pour le plan d'expérience de 18 essais avec un outil de coupe en carbure brasé :

Le **tableau 10** dans l'**annexe 7** représente l'erreurs des valeurs de la rugosité mesurée et de la rugosité calculée avec l'équation de modèle

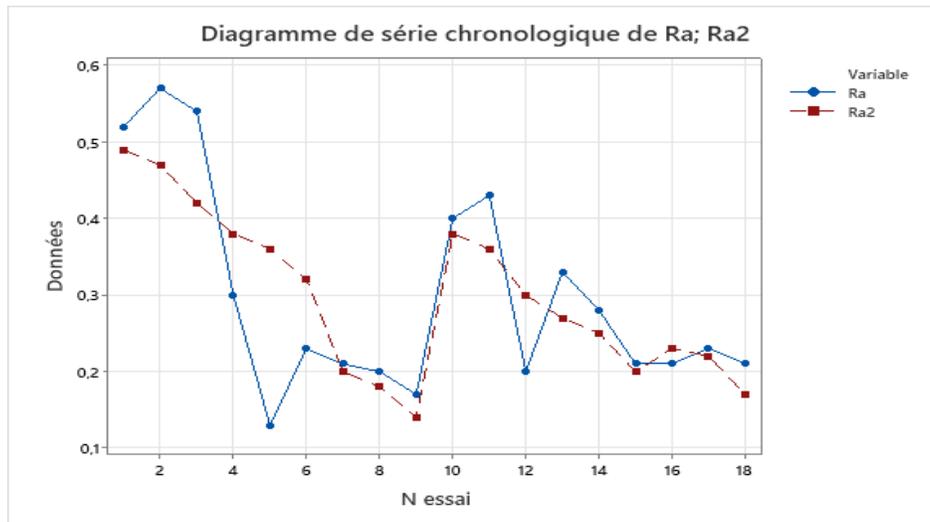


Figure VI.7. Comparaison entre Ra mesurées et Ra prévues

D’après la **figure VI.7**, les valeurs expérimentales et les valeurs prévues sont très proches avec un intervalle de confiance de 95 %. Il apparaît que le modèle issu de la méthodologie de surface de réponse (MSR) donne des résultats satisfaisants

### 5.2 Les valeurs prédites et les valeurs mesurées de la rugosité (Ra) pour les meilleurs 5 essais avec un outil de coupe en carbure tungstène

Le **tableau 11** dans l’**annexe 8** représente l’erreurs des valeurs de la rugosité mesurée et de la rugosité calculée avec l’équation de modèle

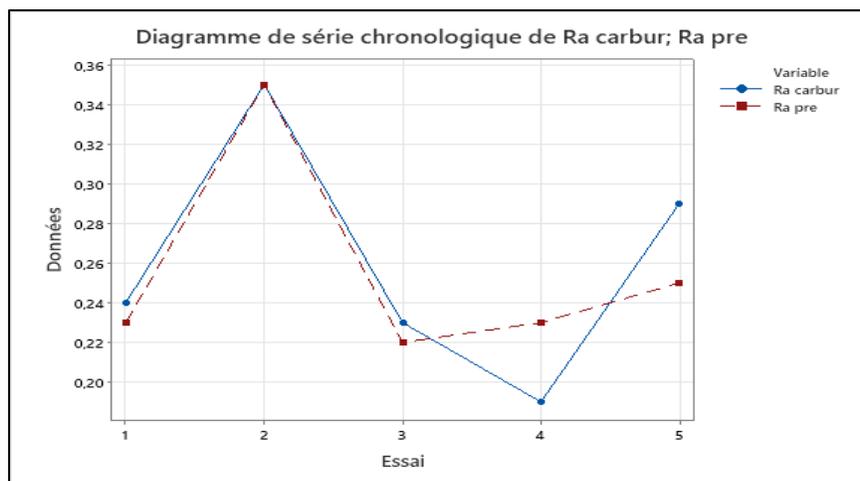
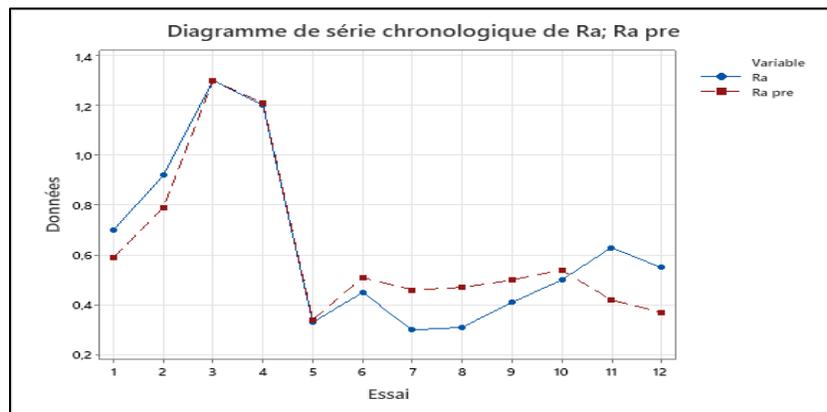


Figure VI.8. Comparaison entre (Ra carbure) mesurées et (Ra pre) prévues.

D'après la **figure VI.8**, les valeurs expérimentales et les valeurs prévues sont très proches avec un intervalle de confiance de 95 %. Il apparaît que le modèle issu de la méthodologie de surface de réponse (MSR) donne des résultats satisfaisants

### 5.3 Les valeurs prédites et les valeurs mesurées de la rugosité (Ra) pour le plan d'expérience de 12 essai

Le **tableau 12** dans l'**annexe 9** représente l'erreurs des valeurs de la rugosité mesurée et de la rugosité calculée avec l'équation de modèle

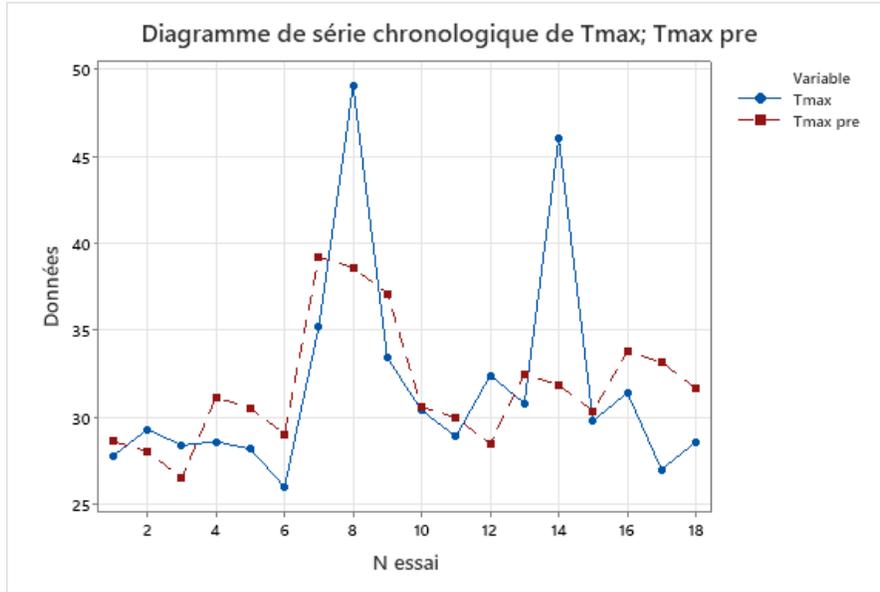


**Figure VI.9.** Comparaison entre (Ra) mesurées et (Ra pre) prévues

D'après la **figure VI.9**, les valeurs expérimentales et les valeurs prévues sont très proches avec un intervalle de confiance de 95 %. Il apparaît que le modèle issu de la méthodologie de surface de réponse (MSR) donne des résultats satisfaisants.

### 5.4 Les valeurs prédites et les valeurs mesurées de la température Tmax pour 18 essai avec un outil carbure brase

Le **tableau 13** dans l'**annexe 10** représente l'erreurs des valeurs de la température mesurée et de la température calculée avec l'équation de modèle.

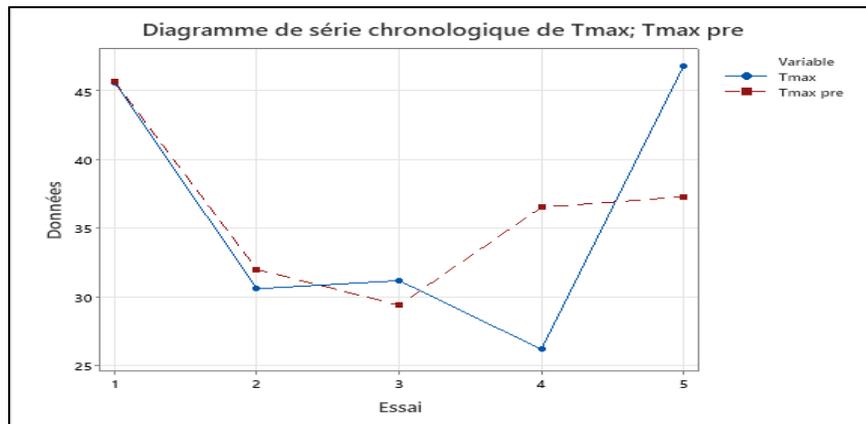


**Figure VI.10.** Comparaison entre Tmax mesurées et Tmax prévues

D’après la **figure VI.10**, les valeurs expérimentales et les valeurs prévues sont très proches avec un intervalle de confiance de 95 %. Il apparaît que le modèle issu de la méthodologie de surface de réponse (MSR) donne des résultats satisfaisants

### 5.5 Les valeurs prédites et les valeurs mesurées de la température Tmax pour 5 essai avec un outil carbure tungstène

Le **tableau 14** dans l’**annexe 11** représente l’erreurs des valeurs de la température mesurée et de la températures calculée avec l’équation de modèle.

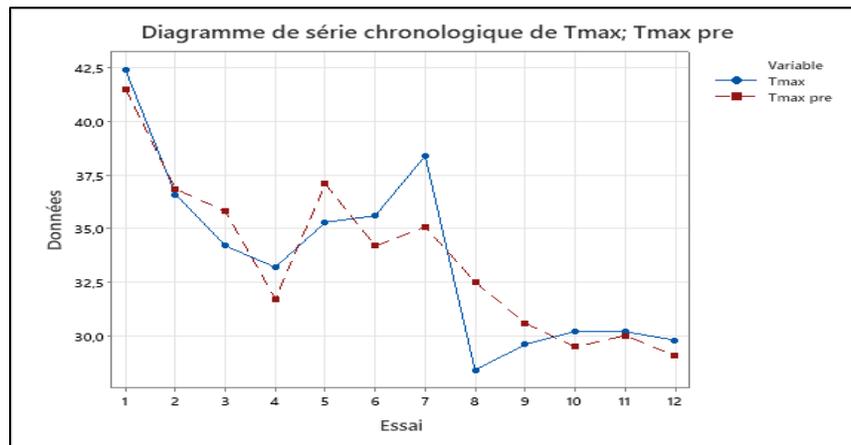


**Figure VI.11.** Comparaison entre Tmax mesurées et Tmax prévues

D'après la **figure VI.11**, les valeurs expérimentales et les valeurs prévues sont très proches avec un intervalle de confiance de 95 %. Il apparaît que le modèle issu de la méthodologie de surface de réponse (MSR) donne des résultats satisfaisants

### 5.6 Les valeurs prédites et les valeurs mesurées de la température Tmax pour 12 essai

Le **tableau 15** dans l'**annexe 12** représente l'erreurs des valeurs de la température mesurée et de la températures calculée avec l'équation de modèle

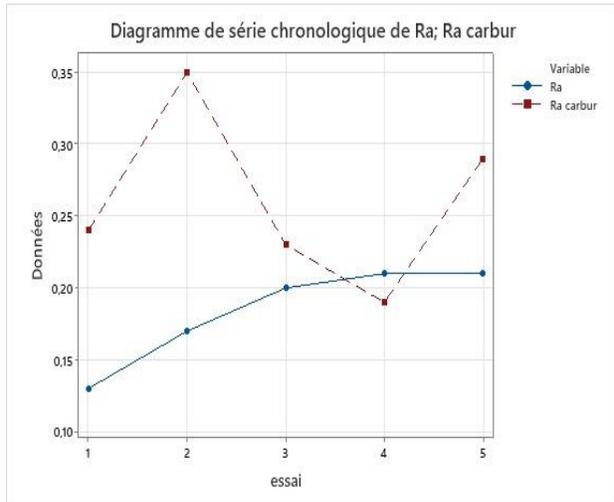


**Figure VI.12.** Comparaison entre Tmax mesurées et Tmax prévues.

D'après la **figure VI.12**, les valeurs expérimentales et les valeurs prévues sont très proches avec un intervalle de confiance de 95 %. Il apparaît que le modèle issu de la méthodologie de surface de réponse (MSR) donne des résultats satisfaisants.

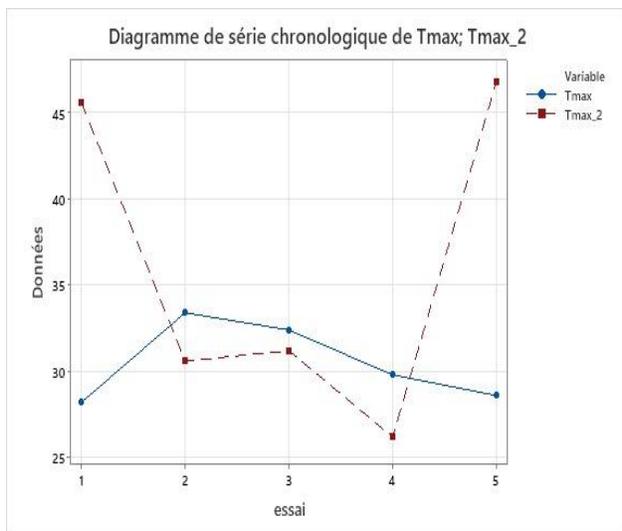
## 6 Comparaison des valeurs de la rugosité (Ra) et la température (Tmax) entre l'outil carbure brasé et l'outil carbure tungstène

D'après l'étude qui on a fait sur logiciel Minitab statistical



**Figure VI.13.** Représente la comparaison entre les valeurs de la rugosité (Ra) avec outil carbure brasé et la rugosité (Ra carbur) avec outil carbure tungstène.

On a remarqué que les valeurs obtenues par outil carbure brasé sont moins rugueux par rapport à les valeurs obtenues par outil carbure tungstène.



**Figure VI.14.** Représente la comparaison entre les valeurs de la température (Tmax) avec outil carbure brasé et la température (Tmax\_2) avec outil carbure tungstène.

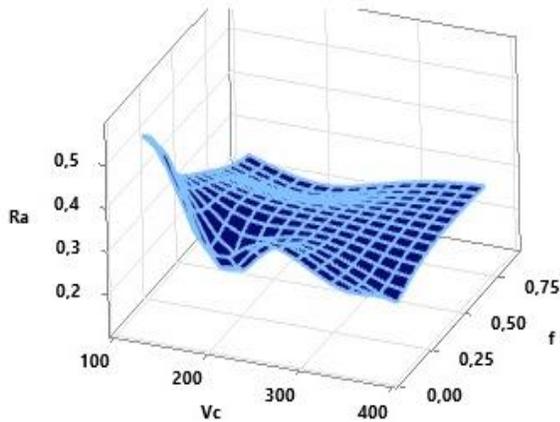
On a remarqué que les valeurs obtenues par outil carbure brasé sont moins basse par rapport à les valeurs obtenues par outil carbure tungstène.

## 7 Représentation graphique 3D

L'analyse tridimensionnelle des surfaces de réponse et résume dans les figure [VI.15-VI.32]

### 7.1 La rugosité Ra 18 essais avec un outil carbure brasé

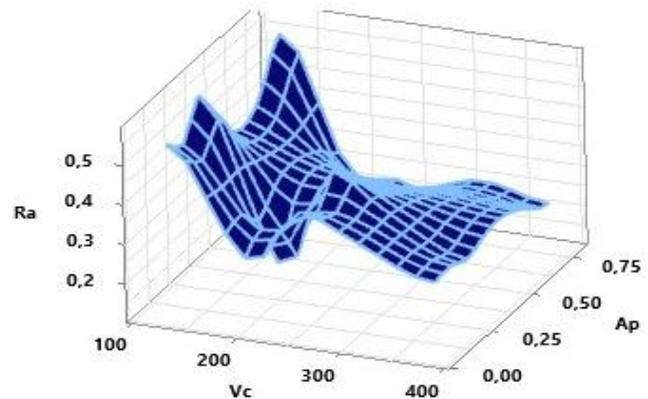
Diagramme de surface de Ra et f; Vc



**Figure VI.16.** Représente l'influence de la vitesse de coupe et la profondeur de passe sur la rugosité arithmétique d'après cette représentation la combinaison des moyennes vitesse de coupe et profondeur de passe donnent la meilleure rugosité.

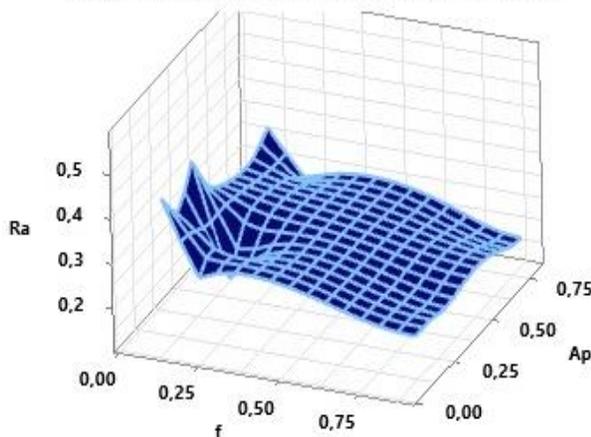
La **Figure VI.15** . Représente l'influence de la vitesse de coupe et l'avance sur la rugosité arithmétique. D'après cette représentation la combinaison de la vitesse de coupe moyenne et l'avance le plus grande donnent la meilleure rugosité.

Diagramme de surface de Ra et Ap; Vc



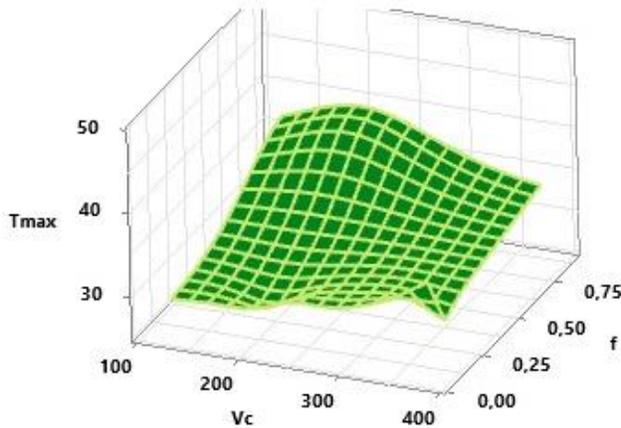
**Figure VI.17.** Représente l'influence de l'avance et la profondeur de passe sur la rugosité arithmétique d'après cette représentation la combinaison des plus grande avance et profondeur de passe donnent la meilleure rugosité.

Diagramme de surface de Ra et Ap; f



## 7.2 La température Tmax 18 essais avec un outil carbure brasé

Diagramme de surface de Tmax et f; Vc



**Figure VI.18.** Représente l'influence de la vitesse de coupe et l'avance sur la température maximale. D'après cette représentation la combinaison de vitesse de coupe moyenne et l'avance le plus petite donnent la température la plus basse.

**Figure VI.19.** Représente l'influence de la vitesse de coupe et la profondeur de passe sur la température maximale. D'après cette représentation la combinaison des plus petites vitesses de coupe et profondeur de passe donnent la température la plus basse.

Diagramme de surface de Tmax et Ap; Vc

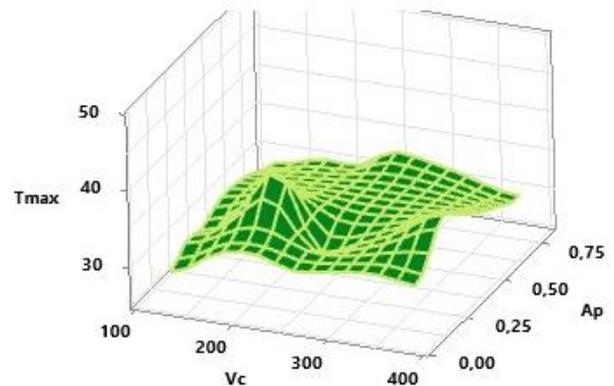
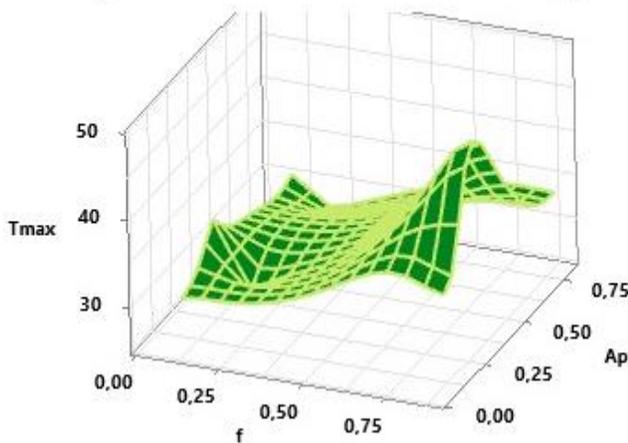


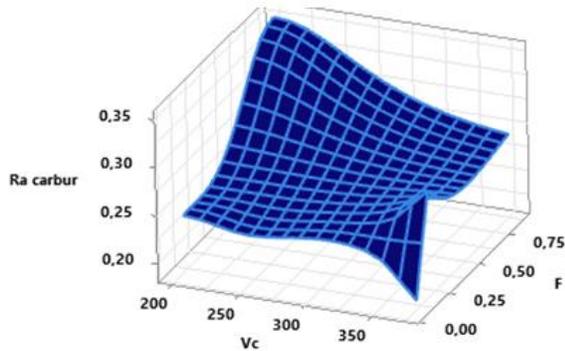
Diagramme de surface de Tmax et Ap; f



**Figure VI.20.** Représente l'influence de l'avance et la profondeur de passe sur la température maximale. D'après cette représentation la combinaison de l'avance moyenne et la profondeur de passe la plus grande donnent la température la plus basse.

### 7.3 La rugosité Ra 5 essai outil carbure tungstène

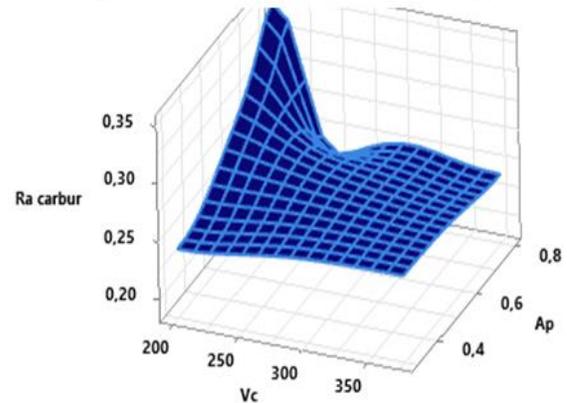
Diagramme de surface de Ra carbur et F; Vc



La **Figure VI.21** représente l'influence de la vitesse de coupe et l'avance sur la rugosité arithmétique d'après cette représentation la combinaison de vitesse de coupe la plus grande et avance le plus petite donnent la meilleure rugosité.

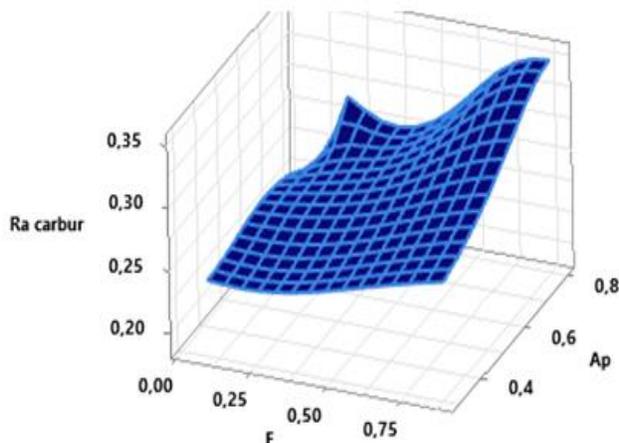
**Figure VI. 22.** Représente l'influence de la vitesse de coupe et la profondeur de passe sur la rugosité arithmétique. D'après cette représentation la combinaison des moyenne vitesse de coupe et la profondeur de passe la plus grande donnent la meilleure rugosité

Diagramme de surface de Ra carbur et Ap; Vc



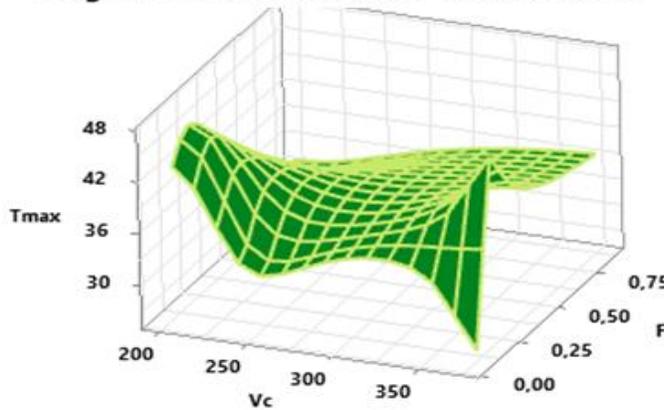
**Figure VI.23.** Représente l'influence de l'avance et la profondeur de passe sur la rugosité arithmétique d'après cette représentation la combinaison de l'avance le plus petite et la profondeur de passe la plus grande donnent la meilleure rugosité.

Diagramme de surface de Ra carbur et Ap; F



7.4 La température  $T_{max}$  5 essai avec un outil carbure tungstène

Diagramme de surface de  $T_{max}$  et  $F$ ;  $V_c$



**Figure VI.24.** Représente l'influence de la vitesse de coupe et l'avance sur la température maximale. D'après cette représentation la combinaison de la vitesse de coupe la plus grande et l'avance le plus petite donnent la température la plus basse.

**Figure VI.25.** Représente l'influence de la vitesse de coupe et la profondeur de passe sur la température maximale. D'après cette représentation la combinaison de moyenne vitesse de coupe et plus petite profondeur de passe donnent la température la plus basse.

Diagramme de surface de  $T_{max}$  et  $A_p$ ;  $V_c$

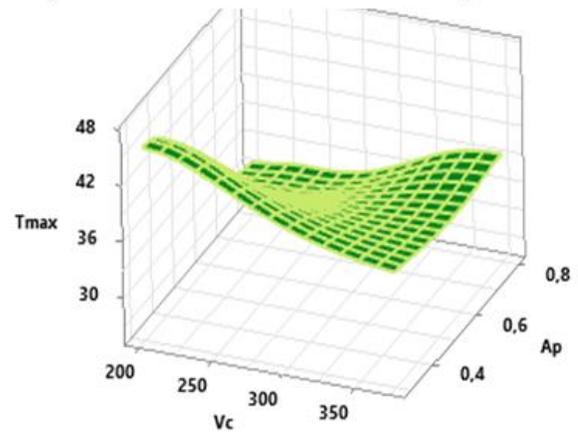
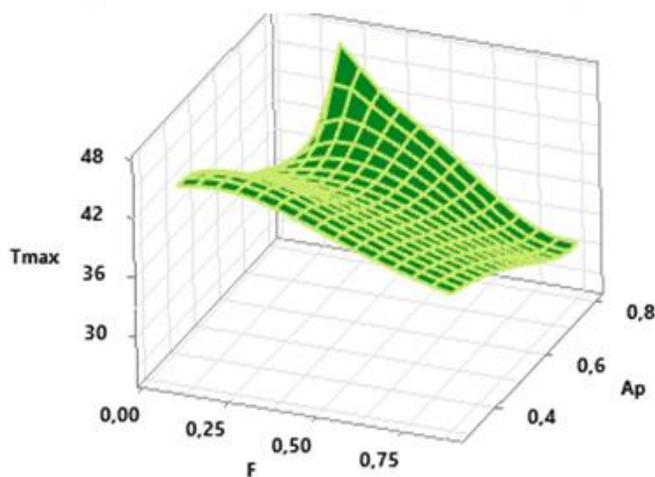


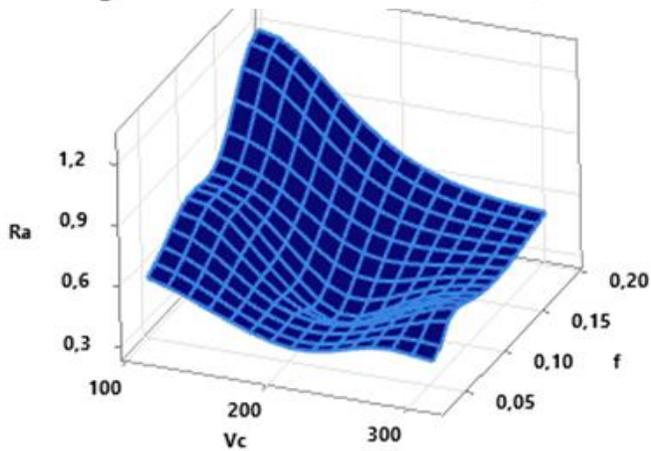
Diagramme de surface de  $T_{max}$  et  $A_p$ ;  $F$



**Figure VI.26.** Représente l'influence de l'avance et la profondeur de passe sur la température maximale. D'après cette représentation la combinaison de l'avance le plus petite et la profondeur de passe la plus grande donnent la température la plus basse.

### 7.5 La rugosité Ra 12essai

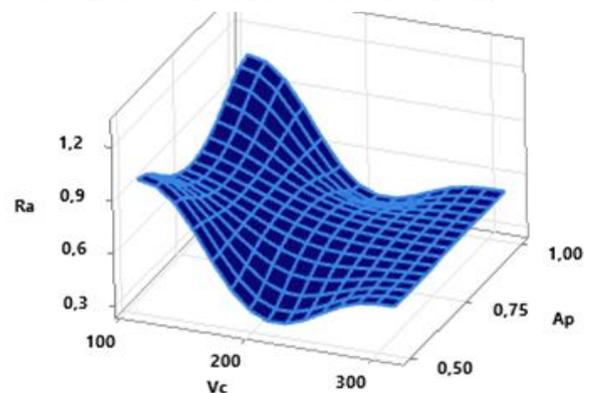
Diagramme de surface de Ra et f; Vc



**Figure VI.28.** Représente l'influence de la vitesse de coupe et la profondeur de passe sur la rugosité arithmétique. D'après cette représentation la combinaison de moyenne vitesse de coupe et la plus petite profondeur de passe donnent la meilleure rugosité.

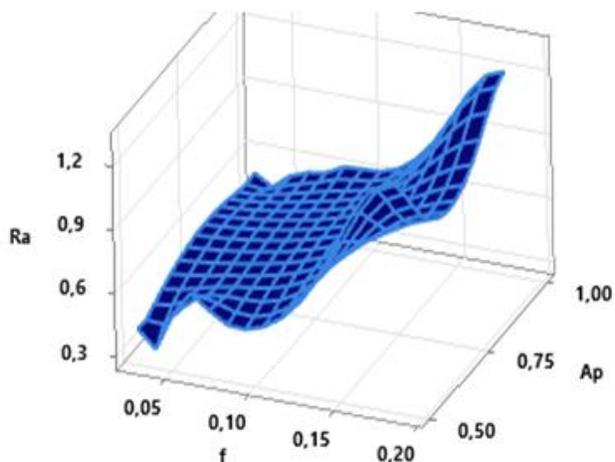
**Figure VI.27.** . Représente l'influence de la vitesse de coupe et l'avance sur la rugosité arithmétique. D'après cette représentation la combinaison des moyenne vitesse de coupe et l'avance donnent la meilleure rugosité.

Diagramme de surface de Ra et Ap; Vc



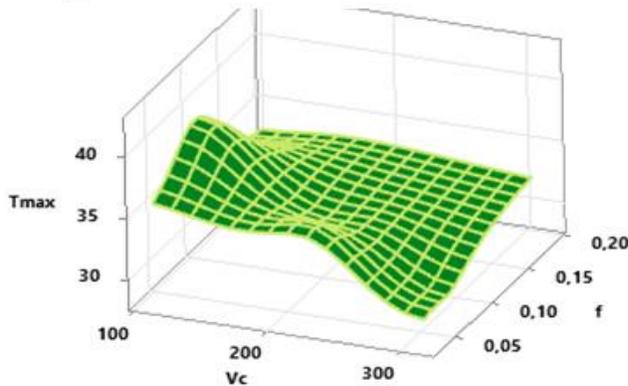
**Figure VI.29.** Représente l'influence de l'avance et la profondeur de passe sur la rugosité arithmétique. D'après cette représentation la combinaison des plus petite avance et profondeur de passe donnent la meilleure rugosité.

Diagramme de surface de Ra et Ap; f



### 7.6 La température Tmax 12 essais

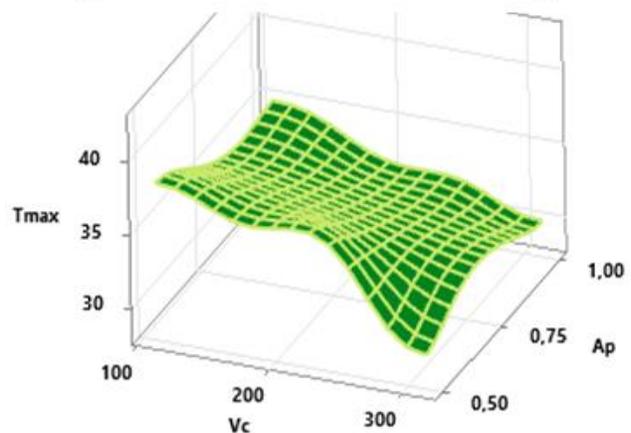
Diagramme de surface de Tmax et f; Vc



La **Figure VI.31**. Représente l'influence de la vitesse de coupe et la profondeur de passe sur la température maximale. D'après cette représentation la combinaison des plus grandes valeurs de vitesse de coupe et profondeur de passe donnent la température la plus basse.

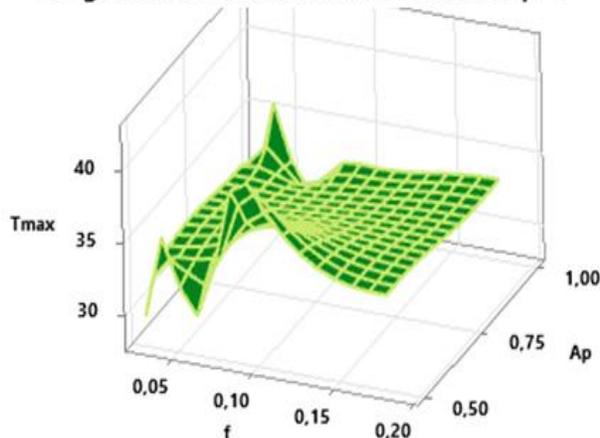
La **Figure VI.30**. Représente l'influence de la vitesse de coupe et l'avance sur la température maximale. D'après cette représentation la combinaison de la vitesse de coupe la plus grande et l'avance le plus petite donnent la température la plus basse.

Diagramme de surface de Tmax et Ap; Vc



La **Figure VI.32**. Représente l'influence de l'avance et la profondeur de passe sur la température maximale. D'après cette représentation la combinaison des plus petites valeurs de l'avance et profondeur de passe donnent la température la plus basse.

Diagramme de surface de Tmax et Ap; f



### 8 L'optimisations des conditions de coupe pour la rugosité de surface

Dans le tableau suivant on a présenté les conditions d'optimisation des paramètres d'usinage lors de tournage d'aluminium AL\_7075 avec un outil de coupe « carbure brasé ».

**Tableau 4.** résultats d'optimisation Ra et Tmax

Condition	Objectifs	Limite inférieur	Limite supérieur
Vc (m/min)	Gamme	120	375
f (mm/tr)	Gamme	0,09	0,88
Ap (mm)	Gamme	0,1	0,8
Ra (µm)	Minimum	0,13	0,57
Tmax (°C)	Minimum	26	49

Le tableau présente les résultats de l'optimisation par la méthodologie de surface de réponse (MSR) de la rugosité Ra. Les paramètres de coupe optimaux obtenus s'avèrent : la vitesse de coupe est égale à 375 m/min, l'avance : 0,88 mm/tr et la profondeur de passe : 0,8 mm, la valeur minimale de la rugosité est : Ra = 0,013µm.

Vc (m/min)	f ( mm/tr)	Ap(mm)	Ra (µm)	Désirabilité
375	0,88	0,8	0,013	1

Le tableau présente les résultats de l'optimisation par la méthodologie de surface de réponse (MSR) de la température maximale. Les paramètres de coupe optimaux obtenus s'avèrent : la vitesse de coupe est égale à 120 m/min, l'avance : 0,09 mm/dent et la profondeur de passe : 0,8 mm, la valeur minimale de la température est : Tmax = 26,54°C

Vc (m/min)	f ( mm/tr)	Ap(mm)	Tmax (°C)	Désirabilité
120	0,09	0,8	26,54	0,97

Dans le tableau suivant on a présenté les conditions d'optimisation des paramètres d'usinage lors de fraisage d'aluminium AL\_7075 avec un outil de coupe « carbure brasé ».

Condition	Objectifs	Limite inférieur	Limite supérieur
Vc (m/min)	Gamme	111	314
f (mm/tr)	Gamme	0,03	0,18
Ap (mm)	Gamme	0,5	01
Ra (µm)	Minimum	0,28	1,30
Tmax (°C)	Minimum	28,40	42,40

Le tableau présente les résultats de l'optimisation par la méthodologie de surface de réponse (MSR) de la rugosité Ra. Les paramètres de coupe optimaux obtenus s'avèrent : la vitesse de coupe est égale à 314 m/min, l'avance :0.18 mm/dent et la profondeur de passe : 1 mm, la valeur minimale de la rugosité (Ra) et de température(Tmax) est : Ra = 0.32 µm. Et Tmax=27.50 °C

Vc (m/min)	f ( mm/tr)	Ap(mm)	Tmax (°C)	Ra (µm)	Désirabilité
314	0,18	1	27,50	0,32	1

# **Conclusion**

## **générale**

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale

En conclusion, cette étude a permis de mettre en lumière l'importance cruciale de l'optimisation des paramètres d'usinage dans l'amélioration de la qualité de surface et la maîtrise de la température lors de l'usinage de l'aluminium **AL-7075**. À travers une méthodologie rigoureuse combinant des expérimentations pratiques et des simulations numériques, nous avons pu répondre à nos objectifs de recherche et tirer plusieurs conclusions significatives.

Nous avons observé que les paramètres d'usinage, tels que la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe, ont un impact direct sur la rugosité arithmétique de la surface usinée. Par exemple, une augmentation de la vitesse de coupe a souvent conduit à une réduction de la rugosité, tandis que des combinaisons spécifiques de paramètres ont été identifiées pour minimiser la température générée pendant l'opération.

De plus, notre étude comparative entre les outils en carbure brasé et en carbure tungstène a révélé des différences significatives en termes de performances d'usinage. Les outils en carbure brasé ont généralement produit des surfaces plus lisses avec des températures de coupe plus basses, ce qui souligne leur efficacité dans les opérations d'usinage de l'aluminium **AL\_7075**.

La simulation numérique avec le logiciel Abaqus a également confirmé nos résultats expérimentaux et nous a permis de visualiser la morphologie des copeaux, fournissant ainsi une compréhension approfondie des mécanismes physiques impliqués dans le processus d'usinage.

Enfin, cette recherche a des implications importantes pour l'industrie, en proposant des recommandations pratiques pour l'optimisation des processus d'usinage de l'aluminium **AL\_7075**.

Pour les perspectives futures, il serait intéressant d'explorer d'autres paramètres d'usinage, tels que l'utilisation de lubrifiants et de fluides de coupe, ainsi que d'étudier l'impact de ces paramètres sur d'autres caractéristiques de la qualité de surface, comme la microstructure.

En conclusion, cette étude contribue significativement à l'amélioration des connaissances sur l'usinage de l'aluminium **AL\_7075**. Et ouvre la voie à de nouvelles recherches visant à perfectionner les techniques d'usinage dans l'industrie moderne.

# **Annexes**

## Annexes

---

### Annexe 1

**Tableau 4.** Analyse de variance pour Ra

Source	DL	SC	CM	Fs	P	PC%
Modèle	3	0,18921	0,063070	7,02	0,004	60,06
Vc	1	0,11118	0,111187	12,37	0,003	35,29
f	1	0,10128	0,101283	11,27	0,005	32,15
Ap	1	0,01462	0,014616	1,63	0,223	4,64
Erreur	14	0,12584	0,008989			39,94
Total	17	0,31505				

### Annexe 2

**Tableau 5.** Analyse de variance pour Tmax

Source	DL	SC	CM	Fs	P	PC%
Modèle	3	214,04	71,35	2,28	0,124	32,86
Vc	1	34,19	34,19	1,09	0,313	5,25
f	1	191,66	191,66	6,14	0,027	29,43
Ap	1	13,92	13,92	0,45	0,515	2,14
Erreur	14	437,30	31,24			67,14
Total	17	651,34				

### Annexe 3

**Tableau 6.** Analyse de variance pour Ra

Source	DL	SC	CM	Fs	P	PC%
Modèle	3	0,011833	0,003944	1,17	0,576	77,84
Vc	1	0,000067	0,000067	0,02	0,911	0,44
f	1	0,006691	0,006691	1,99	0,393	44,01
Ap	1	0,000002	0,000002	0,00	0,984	0,02
Erreur	1	0,003367	0,003367			22,15
Total	4	0,015200				

## Annexes

---

### Annexe 4

**Tableau 7.** Analyse de variance pour Tmax

Source	DL	SC	CM	Fs	P	PC%
<b>Modèle</b>	3	154,69	51,56	0,25	0,858	43.32
<b>Vc</b>	1	39,06	39,06	0,19	0,736	10.32
<b>f</b>	1	10,62	10,62	0,05	0,857	2.80
<b>Ap</b>	1	138,25	138,25	0,68	0,560	38.72
<b>Erreur</b>	1	202,32	202,32			56.67
<b>Total</b>	4	357,01				

### Annexe 5

**Tableau 8.** Analyse de variance pour Ra

Source	DL	SC	CM	Fs	P	PC%
<b>Modèle</b>	6	1,09672	0,182787	5,33	0,043	86.48%
<b>Vc</b>	1	0,13281	0,132815	3,88	0,106	10.47%
<b>f</b>	1	0,00692	0,006923	0,20	0,672	0.54
<b>Ap</b>	1	0,00165	0,001651	0,05	0,835	0.13
<b>Vc × f</b>	1	0,18706	0,187063	5,46	0,067	14.75
<b>Vc × Ap</b>	1	0,02640	0,026396	0,77	0,420	2.08
<b>f × Ap</b>	1	0,03350	0,033498	0,98	0,368	2.64
<b>Erreur</b>	5	0,17134	0,034269			13.51
<b>Total</b>	11	1,26807				

### Annexe 6

**Tableau 9.** Analyse de variance pour Tmax

Source	DL	SC	CM	Fs	P	PC%
<b>Modèle</b>	6	156,704	26,1173	3,20	0,111	79,36
<b>Vc</b>	1	35,782	35,7816	4,39	0,090	18,12
<b>f</b>	1	9,182	9,1817	1,13	0,337	4,65
<b>Ap</b>	1	13,899	13,8986	1,71	0,248	7,03
<b>Vc × f</b>	1	3,290	3,2903	0,40	0,553	1,66
<b>Vc × Ap</b>	1	3,392	3,3917	0,42	0,547	1,71
<b>f × Ap</b>	1	0,132	0,1316	0,02	0,904	0,06
<b>Erreur</b>	5	40,746	8,1491			20,63
<b>Total</b>	11	197,449				

## Annexes

---

### Annexe 7

**Tableau 10.** L'erreur pour les 18 essais réalisés avec un outil carbure brasé

<b>N° Essais</b>	<b>Ra mesurées</b>	<b>Ra prédites</b>	<b>Erreur (<math>\epsilon</math>)</b>
<b>1</b>	0,52	0,49	0,03
<b>2</b>	0,57	0,47	0,10
<b>3</b>	0,54	0,42	0,12
<b>4</b>	0,3	0,38	0,08
<b>5</b>	0,13	0,36	0,23
<b>6</b>	0,23	0,32	0,09
<b>7</b>	0,21	0,20	0,01
<b>8</b>	0,20	0,18	0,02
<b>9</b>	0,17	0,14	0,03
<b>10</b>	0,40	0,38	0,02
<b>11</b>	0,43	0,36	0,07
<b>12</b>	0,20	0,30	0,1
<b>13</b>	0,33	0,27	0,06
<b>14</b>	0,28	0,25	0,03
<b>15</b>	0,21	0,20	0,01
<b>16</b>	0,21	0,23	0,02
<b>17</b>	0,23	0,22	0,01
<b>18</b>	0,21	0,17	0,04

### Annexe 8

**Tableau 11.** L'erreur pour les 5 essais réalisés avec un outil carbure tungstène

<b>N° Essais</b>	<b>Ra mesurées</b>	<b>Ra prédites</b>	<b>Erreur (<math>\epsilon</math>)</b>
<b>1</b>	0,24	0,23	0,01
<b>2</b>	0,35	0,35	0,00
<b>3</b>	0,23	0,22	0,01
<b>4</b>	0,19	0,23	0,04
<b>5</b>	0,29	0,25	0,04

## Annexes

---

### Annexe 9

**Tableau 12.** L'erreur pour les 12 essais réalisés

<b>N° Essais</b>	<b>Ra mesurées</b>	<b>Ra prédites</b>	<b>Erreur (<math>\epsilon</math>)</b>
<b>1</b>	0,70	0,59	0,11
<b>2</b>	0,92	0,79	0,13
<b>3</b>	1,3	1,30	0,00
<b>4</b>	1,2	1,21	0,01
<b>5</b>	0,33	0,34	0,01
<b>6</b>	0,45	0,51	0,06
<b>7</b>	0,3	0,46	0,16
<b>8</b>	0,28	0,47	0,19
<b>9</b>	0,41	0,50	0,09
<b>10</b>	0,5	0,54	0,04
<b>11</b>	0,63	0,42	0,21
<b>12</b>	0,55	0,37	0,18

## Annexes

---

### Annexe 10

**Tableau 13.** L'erreur pour les 18 essais réalisés avec un outil carbure brasé

N° Essais	Tmax mesurées	Tmax prédites	Erreur ( $\epsilon$ )
1	27,8	28,63	0,83
2	29,3	28,03	1,27
3	28,4	26,54	1,86
4	28,6	31,14	2,54
5	28,2	30,54	2,34
6	26	29,05	3,05
7	35,2	39,19	3,99
8	49	38,59	10,41
9	33,4	37,09	3,69
10	30,4	30,58	0,18
11	28,9	29,98	1,08
12	32,4	28,49	3,91
13	30,8	32,46	1,66
14	46	31,86	14,14
15	29,8	30,36	0,56
16	31,4	33,76	2,36
17	27	33,16	6,16
18	28,6	31,67	3,07

### Annexe 11

**Tableau 14.** L'erreur pour les 5 essais réalisés avec un outil carbure tungstène

N° Essais	Tmax mesurées	Tmax prédites	Erreur ( $\epsilon$ )
1	45,6	45,67	0,07
2	30,6	32,01	1,41
3	31,2	29,41	1,79
4	26,2	36,53	7,33
5	46,8	37,29	9,51

## Annexes

---

### Annexe 12

**Tableau 15.** L'erreur pour les 12 essais réalisés

<b>N° Essais</b>	<b>Tmax mesurées</b>	<b>Tmax prédites</b>	<b>Erreur (<math>\epsilon</math>)</b>
<b>1</b>	42,4	41,52	0,88
<b>2</b>	36,6	36,86	0,26
<b>3</b>	34,2	35,81	1,61
<b>4</b>	33,2	31,73	1,83
<b>5</b>	35,3	37,09	1,79
<b>6</b>	35,6	34,20	1,4
<b>7</b>	38,4	35,09	3,31
<b>8</b>	28,4	32,52	4,12
<b>9</b>	29,6	30,60	1
<b>10</b>	30,2	29,49	0,71
<b>11</b>	30,2	30,01	0,19
<b>12</b>	29,8	29,10	0,7

## **Bibliographies**

---

### **Bibliographies**

- [1] M. Issaadi et A. Merabtine (2015) « étude de l'influence des paramètres de coupe sur la précision de l'état de surface obtenue par usinage en tournage » mémoire de fin d'étude université de mouloud Mammeri de Tizi Ouzou Algérie.
- [2] AOUAD, RAZIKA, ANALYSE ET OPTIMISATION DES PERFORMANCES EN USINAGE A GRANDE VITESSE, mémoire de magister en Génie Mécanique, Université Mentouri Constantine, 2010.
- [3] DJAMAA, Mohamed Cherif, FABRICATION MECANIQUE, POLYCOPIE DE COURS, UNIVERSITE 8 MAI 1945 – GUELMA, 2020.
- [4] Bentaleb, Fayçal, Impact du phénomène de coupe sur la géométrie des outils de coupe, mémoire de magister en Génie Mécanique, UNIVERSITE MENTOURI – CONSTANTINE, 2007.
- [5] PDF introduction à l'usinage « généralité sur l'usinage » cours 2017.
- [6] Aouad Razika (2010) « Analyse et optimisation des performances en usinage à grande vitesse. » Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de magistère Génie Mécanique. Université Mentouri Constantine.
- [7] Y. Hacheme M.L. Gandeouze (2018) « prédication de la rugosité des surface USINE lors de fraisage de l'acier AISI1060 en utilisant la logique floue » mémoire de master kasdi marbah Ouargla Algérie.
- [8] La coupe des métaux : identification des paramètre « géométrie de l'outil de coupe ».
- [9] A. Belloufi, Cours Procédés de Fabrication, Master Maintenance Industrielle, Université d'Ouargla, 2010.
- [10] Dr Lakhdar BOUZID thèse doctorat Optimisation des conditions de coupe et analyse de leur effet sur les paramètres technologiques d'usinage -Application à l'usinage de l'acier inoxydable X20Cr13-(2015).
- [11] ALLAL Mohammed, Mémoire de fin d'étude d'un diplôme de Master Optimisation des conditions de coupe lors de l'usinage de l'acier AISI 52100 en utilisant la méthode RSM et l'approche de Taguchi.

## Bibliographies

---

- [12] BOUSSAID Khawla, Mémoire de fin d'étude d'un diplôme de Master Prédiction des paramètres technologiques d'usinage en tournage de l'acier inoxydable AISI 304 par la méthodologie de surface de réponse. (2017).
- [13] Nair, A., Govindan, P., & Ganesan, H. (2014). A comparison between different optimization techniques for CNC end milling process. *Procedia Engineering*, 97, 36-46.
- [14] K. fedaoui (2019) « cours de technologie de fabrication, 1<sup>er</sup> année licence prof génie industrielle et maintenance » institut des sciences appliquée Constantine
- [15] Préparation de Production en Productique Mécanique - Étude de Fabrication et Analyse d'Usinage (3PM-EFAU) - Le fraisage en bout (fraisage de face) (univ-lille.fr)
- [16] DEBONGNIE, Jean-François. Usinage. Editions du CEFAL, 2006.
- [17] Notes de cours de Farid Asma UNIVERSITE MOULOUD MAMRI DE TIZI OUZOU ALGERIE 2007/2008. Chapitre 1 introduction à la commande numérique Chapitre 1 : Introduction à la commande numérique | mosram rebelle - Academia.edu.
- [18] A. Bougaila et O. Ben Yousef Zamouchi (2021) « conception et réalisation d'une machine CNC à 3 axes », mémoire de fin d'étude pour obtention de diplôme de master en fabrication mécanique et productique, université de Blida 1.
- [19] Les défis d'usinage de précision de l'aluminium (2024) récupèrent le 20avril 2024 de puis [dmg-usitech.com](https://www.dmg-usitech.com)
- [20] Société SANDVIK-COROMANT, fraisage et tournage, technique d'ingénierie trait génie mécanique, BM.7082,2001.
- [21] Qu'est-ce que l'usinabilité? - Spiegato. L'usinabilité des matériaux.
- [22] C. Bedrin, Les conditions de coupe à grande vitesse ; principes généraux et aspects spécifiques, laboratoire CASM, INSA de LYON
- [23] Chibane H, Serra R, Morandea A, Leroy R. 2011. Selection of machining conditions for aeronautic composite by vibratory analysis. *Comptes Rendus des JNC 17*. Poitiers 2011, France.
- [24] Bouzid L., Yaltese M.A., Chaoui K., Mabrouki T., Boulanouar L., 2015. Mathematical modeling for turning on AISI 420 stainless steel using surface response methodology, *J. Engineering Manufacture*. Vol. 229 (1) pp. 45–61.

## Bibliographies

---

- [25] Samiha, Renforcement des voutes métalliques cylindriques : Étude théorique et expérimentale, Mémoire de Magister. Université d'Annaba (2010).
- [26] dr. MECHAKRA.H 2024 compte rendu TP fabrication mécanique tournage et fraisage » université m'Hamed bougara-boumerdas.
- [27] ZOUAIDIA Khaled « Analyse de l'état de surface et des efforts de coupe lors de l'usinage de l'acier XC 48 en utilisant la MSR et PCA »2020. Mémoire Fin D'étude pour l'obtention de Diplôme de Master en construction Mécanique. Université du 8 mai 1945 Guelma
- [28] BOUAITA Mounir 2017. « Etudes, Modalisation et simulation de l'usinage orthogonale par la méthode des éléments finis » Mémoire présentée en vue de l'obtention du diplôme de master Université Badji Mokhtar – Annaba.
- [29] <https://www.makeitfrom.com/material-group/Aluminum-Alloy>.
- [30] A.Varvani. Farahani et al « the influence of low-plasticity burnishing process on the fatigue life of friction-stir-processed AL7075-T6 samples Article in Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures · November 2018.
- [31] Burak bal « determination of material response and optimization of Johnson-cook damage parameters of aluminum 7075alloy ».Selcuk Univ. J. Eng. Sci. Tech., v.6, n.2, pp. 343-354, 2018.

## Résumé

Cette étude porte sur l'effet des paramètres de coupe en fraisage et en tournage à sec sur l'état de surface des pièces usinées. Les résultats enregistrés en tournage montrent que la vitesse de coupe a l'effet le plus significatif sur l'état de surface d'autre part l'avance a un effet plus significatif sur la température. En fraisage montrent que l'interaction de la vitesse de coupe et l'avance a l'effet le plus significatif sur l'état de surface d'autre part la vitesse de coupe a un effet plus significatif sur la température.

**Mots clés :** tournage-fraisage - rugosité – température - conditions de coupe – Anova - optimisation.

## Abstract

This study focuses on the effect of milling and dry-turning cutting parameters on the surface finish of machined parts. The results recorded during turning show that the cutting speed has the most significant effect on the surface finish, on the other hand the feed has a more significant effect on the temperature. In milling show that the interaction of cutting speed and feed has the most significant effect on the surface finish, on the other hand the cutting speed has a more significant effect on the temperature.

**Key words:** turning - milling - roughness - temperature - cutting conditions - Anova - optimization.

## ملخص:

تركز هذه الدراسة على تأثير معاملات الطحن والقطع الجاف على تشطيب سطح الأجزاء الآلية. تظهر النتائج المسجلة أثناء الدوران أن سرعة القطع لها التأثير الأكثر أهمية على تشطيب السطح، في حين أن التغذية لها تأثير أكثر أهمية على درجة الحرارة. في الطحن تبين أن التفاعل بين سرعة القطع والتغذية له السطح، من ناحية أخرى، فإن سرعة القطع لها تأثير أكثر أهمية على التأثير الأكثر أهمية على تشطيب درجة الحرارة.

الكلمات المفتاحية: الخراطة - الطحن - الخشونة - درجة الحرارة - ظروف القطع - التباين - التحسين