

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Thèse

Présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences

Spécialité: Génie Mécanique

Par

FARID ABDELKRIM

Modélisation des phénomènes thermomécaniques à l'interface outil-pièce à l'aide de l'intelligence artificielle en fraisage

Soutenue publiquement le **07/12/2023**, devant le jury composé de :

Bouakba Moustapha	Professeur, Université de Ouargla	Président
BELLOUFI Abderrahim	Professeur, Université de Ouargla	Rapporteur
Ameur Toufik	Maitre de conférences A, Université de Ouargla	Examineur
Makhloufi Rafik	Maitre de conférences A, Université de Batna 2	Examineur
Bourih Abdellah	Maitre de conférences A, Université de Batna 2	Examineur
Gulani Laala	Maitre de conférences A, Université de khanchla	Examineur
Abdelkrim Mourad	Maitre de conférences A, Université de Ouargla	Invité

Année universitaire : 2022/2023

REMERCIEMENTS

*Au terme de ce modeste travail, nous tenons à exprimer toute notre gratitude et reconnaissance envers notre encadreur, le Dr. **Belloufi Abderrahim**, professeur à l'Université de Ouargla, pour sa patience, ses précieux conseils, et d'avoir accepté de diriger ce travail. Il a mis à notre disposition tous les moyens nécessaires qui nous ont permis de mener à bien cette étude. Nous le remercions également pour sa contribution significative à la réalisation de ce travail, grâce à ses conseils avisés et à ses encouragements.*

*Je tiens à exprimer ma vive gratitude envers **Monsieur Mostafa Bouaakba**, Professeur à l'Université de Ouargla, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de cette thèse, consacrant ainsi son temps. Je le remercie également de m'avoir confié ce sujet de recherche, de la confiance qu'il m'a accordée, et d'avoir bien voulu partager avec moi sa passion pour la recherche.*

Je remercie également tous les membres du jury qui ont accepté de lire, examiner, juger et valider ce travail de thèse, notamment :

- ***Monsieur Dr. Ameer Toufik**, Maître de conférences à l'Université de Ouargla.*
- ***Monsieur Dr. Gulani Laala**, Maître de conférences à l'Université de Khanchla.*
- ***Monsieur Dr. Makhloufi Rafik**, Maître de conférences à l'Université de Batna 2.*
- ***Monsieur Dr. Bourih Abdellah**, Maître de conférences à l'Université de Batna 2.*

*Je tiens à exprimer ma gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué à cette étude, en particulier envers mon frère, le **Dr Abdelkrim Mourad**, Maître de conférences à l'Université d'Ouargla. Sa précieuse assistance, ses conseils avisés et sa disponibilité constante ont été d'une aide inestimable tout au long de ce travail."*

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance envers ma famille qui m'a toujours soutenu, en particulier ma mère pour sa générosité, son excellence, et son soutien inconditionnel, ainsi que ma femme pour sa patience et sa compréhension.

Farid ABDELKRIM

Sommaire

Introduction générale.....	01
CHAPITRE I : Synthèse bibliographique	
I.1 Introduction.....	03
I.2 Fraisage.....	03
I.2-1 Les avantages du fraisage.....	03
I.3 Les opérations de fraisage.....	05
I.3.1 Fraisage en bout.....	04
I.3.2 Fraisage périphérique	04
a) Fraisage conventionnel.....	04
b) Fraisage en aval.....	05
I.3.3 Fraisage combiné (en bout et de profil).....	05
a) L'épaulement.....	05
b) Rainurage	06
c) Usinage des poches.....	06
I.4 Conditions de coupe.....	07
I.4.1 Vitesse de coupe.....	07
I.4.2 Vitesse d'avance.....	08
I.4.3 Avance par dent	08
I.4.4 Avance par tour.....	09
I.4.5 profondeur de passe.....	09
I.5 Mécanismes d'endommagement des outils.....	10
I.5.1 Endommagement des outils de coupe par l'usure	10
a) Endommagement par usure adhésion.....	11
b) Endommagement par usure abrasion.....	11
c) Endommagement par usure diffusion	12
d) Endommagement par usure érosion.....	12
I.5.2 Endommagement par fatigue thermique et mécanique.....	12
I.5.3 Endommagement par déformation plastique.....	12
I.5.4 Endommagement par fluage et oxydation.....	13
I.6 Température de coupe	13
I.7 Méthode de mesure	13
I.7.1 Mesures de température indirectes	14

Sommaire

I.7.2 Mesures de températures directes.....	14
a) Méthode de mesure par thermocouple.....	14
a.1) Avantages des thermocouples	16
a.2) Inconvénients des thermocouples.....	16
b) Mesure de la température par rayonnement.....	16
b .1) Pyromètre infrarouge	17
b .2) Caméra infrarouge.....	17
I.8 Les facteurs affectants la température pendant le fraisage... ..	17
I.8.1 Influence des paramètres de coupe sur la température.....	18
a) vitesse de coupe et vitesse d'avance.....	18
b) L'avance et la profondeur de coupe.....	18
I.8.2Matériau de la pièce et de l'outil.....	18
I.8.2.1Géométrie de l'outil.....	18
I.8.3Fluide de coupe	18
I.9 Analyse de la littérature.....	19
I.9 1 Etude de la température en fraisage.....	19
a) Approche expérimentale.....	19
b) Approche Numérique et Analytique.....	29
I.10 Conclusion.....	33

CHAPITRE II : Procédure expérimentale

II.1 Introduction.....	34
II.2 présentation de léquipement.....	34
II. 2.1 Matériau utilisé.....	34
a) Domaine d'application	35
b) Composition chimique.....	35
c) Propriétés physiques	36
d) Propriétés mécaniques.....	36
e) Propriétés thermiques.....	37
f) Microstructure de l'acier AISI 1060.....	37
II.2.2 Outil de coupe.....	38
II.2.3 Machine utilisée.....	38
II.2.4 Appareil de mesure utilisés (caméra infrarouge).....	39
II.3 Préparation des essais.....	40

Sommaire

II.3.1 préparation de la pièce brute.....	40
II.3.2 Montage de la pièce.....	40
II.3.3 Montage de l'outil.....	41
II.3.4 Montage de la Caméra infrarouge.....	41
II.4 Réalisation expérimentales.....	42
II.4.1 Préparation des expériences.....	42
II.4.2 Démarche a suivre pendant les essais.....	42
II.5 Banc d'essai.....	43
II.6 Conclusion.....	45

CHAPITRE III : Résulta et discussion

III.1 Introduction.....	46
III.2 Étude des résultats des tests.....	46
III.2.1 Étude de la fidélité du système de mesure	46
III.2.2 Résultat des mesures de température obtenues	48
III.2.3 Influence du temps sur la température de coupe	49
III.2.4 Effet de la vitesse de coupe sur la température	54
III.2.5 Influence de la vitesse d'avance par dents sur la température de coupe	56
III.2.6 Influence de la profondeur de passe sur la température de coupe	58
III.3 Les formes des coupeaux produites	61
III.4 Conclusion.....	62

CHAPITRE IV: Prédiction intelligente de la température de coupe en fraisage

IV.1 Introduction.....	63
IV.2 Modèle flou pour le fraisage.....	63
IV.2.1 Expressions floues.....	64
IV.2.2 Fonction de degré d'appartenance (triangulaire, trapézoïdale, gaussienne).....	66
IV.2.3 Règles floues	68
IV.2.4 Exemples des opérateurs flous utilisés dans les règles	70
IV.3 Défuzzification	70
IV.4 Résultats.....	71
IV.4.1 Evolution de la température expérimentale et prédite en corrélation avec le nombre d'essais	71
IV.4.2 Précision et erreurs du système flou pour les tests de validation.....	73
IV.4.3 Représentation graphique de la température de coupe floue (surfaces en 3D).....	75

Sommaire

IV .5 Comparaison des différents travaux sur la prédiction de la température de coupe.....	76
IV .6 Conclusion.....	78
Conclusion générale et perspective	79
Références Bibliographiques.....	81

Liste des figures

CHAPITRE I Synthèse bibliographique

Figure I.1	Fraisage en bout	04
Figure I.2.a	Fraisage conventionnel.....	05
Figure I.2.b	Fraisage en aval.....	05
Figure I.3	Fraisage combiné	05
Figure I.4	Réalisation d'un épaulement	06
Figure I.5	Réalisation d'un rainurage	06
Figure I.6	Fraisage des poches.....	06
Figure I.7	Mode de génération des surfaces par fraisage : (a) surfacages, (b) fraisage combiné, (c) Rainurage.....	07
Figure I.8	Vitesse de coupe.....	08
Figure I.9	Vitesse d'avance.....	08
Figure I.10	Profondeur de coupe.....	09
Figure I.11	Schéma de principe de l'usinage	10
Figure I.12	Evolution de l'usure dans le temps.....	11
Figure I.13	a) Après l'usinage d'alliage de titane : Abrasion de la face de coupe. b) Après l'usinage de duralcan : Abrasion de la surface de la dépouille.....	11
Figure I.14	Principe de fonctionnement des thermocouples	15
Figure I.15	Mesure de température lors de surfacage de l' alliage de Mg	15
Figure I.16	a) Pyromètre infrarouge, b) Températures spécifiques de l'outil en différents endroits.....	17
Figure I.17	Disposition expérimentale dans le processus de fraisage en bout	19
Figure I.18	Mésure de la température pendant le fraisage de l'aluminium.....	20
Figure I.19	Configuration expérimentale	20
Figure I.20	Mesure de la température lors du fraisage d'un acier au carbone avec un dispositif inséré dans l'outil et relié à un pyromètre.	21
Figure I.21	Imagerie thermique du fraisage : Résultats de deux études	22

Figure I.22	a) Dispositif par caméra de thermographie et b) Image obtenue	22
Figure I.23	a) Insertion d'un thermocouple dans la pièce et b) Acquisition du signal.	23
Figure I.24	Obtention de signaux de température	23
Figure I.25	a) Insertion d'un thermocouple dans l'échantillon osseux. b) Gradient de température dans la sous-surface usinée	24
Figure I.26	a) Instrumentation d'un porte-outil avec thermocouple et (b) Acquisition des signaux d'effort et de température	24
Figure I.27	Schéma d'un dispositif de mesure de température avec un thermocouple semi-artificiel.....	25
Figure I.28	Défauts de bavures et collage de copeaux sur l'outil pendant le fraisage périphérique	26
Figure I.29	Montage expérimental pour mesurer la température	26
Figure I.30	Mesure la température superficielle(a) et de la couche de sous-surface (b).	27
Figure I.31	Montage expérimental pour mesurer la température de surfaçage	27
Figure I.32	Système d'acquisition pour mesurer la température de l'outil.....	28
Figure I.33	Schéma d'un dispositif de mesure utilisant un thermocouple intégré pour mesurer les distributions de température.....	29
Figure I.34	Modèle de fraisage par éléments finis	29
Figure I.35	Comparaison entre les températures maximales simulées et celles obtenues par caméra infrarouge :	30
Figure I.36	Effets des facteurs de coupe sur la température.....	31
Figure I.37	La distribution de température de fraisage de l'Inconel 718.....	32
Figure I.38	La distribution de température de fraisage de l'alliage de titane Ti6Al4V...	32

Chapitre II

Procédure Expérimentale

Figure II.1	Matériau utilisé AISI 1060.....	34
Figure II.2	Pièces fabriquées	35
Figure II.3	Microstructure de l'acier AISI 1060.....	37
Figure II.4	Plaquettes 08T308E-ML 1040	38
Figure II.5	Fraiseuse de type Rapimill 700.....	38
Figure II.6	Caméra de thermographie infrarouge FLIR A325	39
Figure II. 7	Etapes de préparations des pièces	40
Figure II.8	Fixation de pièce sur la table de travail.....	40
Figure II.9	Positionnement de la fraise.....	41
Figure II.10	Caméra de thermographie infrarouge placée orthogonalement au flux de la pièce pour mesurer la température de coupe sur une face latérale	41
Figure II.11	Peinture noire mate est appliquée à une zone de la surface de la pièce	42
Figure II.12	Procédures à suivre pour déterminer la température.....	44

Chapitre III

Résulta et discussion

Figure III.1	Étude de la fidélité du système de mesure	46
Figure III.2	L'analyse des images par le logiciel de contrôle FLIR Tools pour déterminer la température maximale	48
Figure III.3-a	Température en relation du temps pour $V_c = 100$ mm/min, $f=0,09$ mm/dent et $a = 0,25$ mm.....	50
Figure III.3-b	Température en relation du temps pour $V_c=100$ mm/min, $f = 0,12$ mm/dent et $a = 0,50$ mm.....	50
Figure III.3-c	Température en relation du temps pour $V_c=150$ mm/min, $f=0,09$ mm/dent et $a = 0.25$ mm.....	51

Figure III.3-d	Température en relation du temps pour $V_c = 200$ mm/min, $f = 0.15$ mm/dent et $a = 0.25$ mm.....	51
Figure III.3-e	Température en relation du temps pour $V_c = 250$ mm/min, $f = 0,09$ mm/dent et $a = 0.25$ mm	52
Figure III.3-f	Température en relation du temps pour $V_c = 300$ mm/min, $f = 0,09$ mm/dent et $a = 0,5$ mm	52
Figure III.3-g	Température en relation du temps pour $V_c = 300$ mm/min, $f = 0,12$ mm/dent et $a = 0,50$ mm.....	53
Figure III.4	Changement de température de phase et thermographies associés.....	54
Figure III.5-a	Température de coupe en relation avec la vitesse de coupe pour ($f = 0.09, 0.12, 0.15, 0.18$ mm/dent et $a = 0.25$ mm).....	55
Figure III.5-b	Température de coupe en relation avec la vitesse de coupe pour ($f = 0.09, 0.12, 0.15, 0.18$ mm/dent et $a = 0.50$ mm).....	55
Figure III.5-c	Température de coupe en relation avec la vitesse de coupe pour ($f = 0.09, 0.12, 0.15, 0.18$ mm/dent et $a = 0.75$ mm).....	56
Figure III.6-a	Température de coupe en relation avec la vitesse d'avance pour $a = 0.25$ mm et ($v_c = 100, 150, 200, 250$ et 300 m/min).....	57
Figure III.6-b	Température de coupe en relation avec la vitesse d'avance pour $a = 0.50$ mm et ($v_c = 100, 150, 200, 250$ et 300 m/min).....	57
Figure III.6-c	Température de coupe en relation avec la vitesse d'avance pour $a = 0.75$ mm et ($v_c = 100, 150, 200, 250$ et 300 m/min).....	58
Figure III.7-a	Température en relation avec la profondeur de coupe pour $V_c = 100$ m/min et ($f = 0.09, 0.12, 0.15,$ et 0.18 mm/dent).....	59
Figure III.7-b	Température en relation avec la profondeur de coupe pour $V_c = 150$ m/min et ($f = 0.09, 0.12, 0.15,$ et 0.18 mm/dent).....	59
Figure III.7-c	Température en relation avec la profondeur de coupe pour $V_c = 200$ m/min et ($f = 0.09, 0.12, 0.15,$ et 0.18 mm/dent).....	60
Figure III.7-d	Température en relation avec la profondeur de coupe pour $V_c = 250$ m/min et ($f = 0.09, 0.12, 0.15,$ et 0.18 mm/dent).....	60
Figure III.8	Les copeaux générés durant l'opération de fraisage.....	61

Chapitre IV
Prédiction intelligente de la température de coupe en fraisage

Figure IV.1	Système floue	63
Figure IV.2	Variables linguistiques pour la profondeur de coupe	64
Figure IV.3	Variables linguistiques de l'avance par dent.	64
Figure IV.4	Variables linguistiques de la vitesse de coupe.....	65
Figure IV.5	Valeurs de la température de coupe pour tous les tests	65
Figure IV.6	Variables linguistiques pour la température de coupe.....	66
Figure IV.7	Fonction d'appartenance triangulaires	67
Figure IV.8	Fonction d'appartenance trapézoïdale	67
Figure IV.9	Fonction d'appartenance Gaussienne	68
Figure IV.10	Evolution de la température expérimentale et prédite en fonction avec du nombre de tests.....	71
Figure IV.11	Comparaison entre les températures de coupe prédites et mesurées expérimentalement.....	74
Figure IV.12	Évolution de la température prédite par le système de logique floue en corrélation avec les conditions de coupe.....	75

Liste des tableaux

Tableau II.1	Composition chimique typique	35
Tableau II.2	Propriétés physiques de l'acier AISI 1060	36
Tableau II.3	Propriétés mécaniques de l'acier AISI 1060	36
Tableau II.4	Quelque propriété thermique de l'acier AISI 1060	37
Tableau II.5	Conditions expérimentales utilisées.....	43
Tableau III.1	Résultats des tests de reproductibilité	47
Tableau III.2	Résultats expérimentaux.....	49
Tableau IV.1	Tableau d'interférence.....	69
Tableau IV.2	Tests de confirmation.....	72
Tableau IV.3	Précision des dix tests de vérification et erreur du système flou	73
Tableau IV.4	Comparaison des différents travaux sur la prédiction de la température de coupe.....	78

Nomenclature

Symbole	Unité	Désignation
A	%	Précision
a	mm	Profondeur de passe
a _p	mm	Profondeur de passe radial
a _r	mm	Profondeur de passe axial
ANOVA		Analyse de la variance
CNC		Commande numérique par ordinateur
CBN		Nitride de bore à structure cubique
CFRP		plastiques renforcés de fibres de carbone
D	mm	Diamètre de la pièce
e _i	%	Erreur
<i>f</i>	mm/dent	L'avance par dent
IR		Infra -rouge
<i>KT</i>	μm	Usure en cratère
<i>L</i>	mm	Longueur de la pièce
Mc		Movement de coupe
RSM		méthode surface réponse
TIC		Thermal Imaging Camera
T _{Exp}	°C	expérimentaux
T _{TRIANG}		Triangular
T _{Gauss}		Gaussien
T _{Préd}		prédictifs
<i>T</i>	°C	Température
TC1	°C	Température thermocouple 1
TC2	°C	Température thermocouple 2
UGV		Usinage à grande vitesse
<i>V_c</i>	m/min	Vitesse de coupe
<i>V_f</i>	mm/min	Vitesse d'avance
VB	mm	Usure en dépouille
WC		Carbure de tungstène
Z		Nombre de dent
σ		Ecartype

Introduction générale

Introduction générale

Les techniques de production mécanique évoluent constamment via des avancements majeurs visant à améliorer la qualité et propriétés mécaniques des pièces fabriquées et à réduire les frais de production en optimisant les conditions associées à tous les processus. Le processus de fabrication le plus répandu est l'utilisation d'outils de coupe pour extraire la matière. Il est encore largement utilisé dans l'industrie.

Il existe plusieurs techniques d'usinage remarquables telles que le tournage, le fraisage et le perçage. Le fraisage est la principale technique de production par usinage de matières durant le processus de coupe, les phénomènes physiques complexes et intenses caractérisent les interactions entre l'outil de coupe et la pièce à usiner.

Les opérations de fraisage sont souvent confrontées à divers problèmes telles que l'augmentation des températures, qui affectent la résistance, la dureté, la résistance à l'usure et la longévité de l'outil de coupe. Les températures de coupe doivent être contrôlées du début à la fin de l'opération, à l'aide d'instruments de mesure et de technologies intelligentes. Pour faciliter notre travail on utilise une technique appelée la logique floue, cette technique est une branche de l'intelligence artificielle.

L'intelligence artificielle est souvent utilisée dans des domaines tels que la robotique, les systèmes de contrôle, l'analyse d'images et la reconnaissance de formes.

L'objectif de cette étude est d'utiliser la logique floue afin d'analyser la relation entre les paramètres de coupe et la température à l'interface outil-pièce pendant l'opération d'usinage de l'acier AISI 1060.

L'application de l'intelligence artificielle (la logique floue) doit remplir deux fonctions objectives : réduire les coûts et le temps de production.

Pour atteindre cet objectif nous proposons une approche qui consiste:

- ✓ Réalisation des essais expérimentaux pour enregistrer les températures à l'aide d'une caméra thermique intelligente.
- ✓ Ces mesures permettront de mieux comprendre les événements thermiques qui se déroulent pendant l'usinage et de concevoir des stratégies pour les contrôler et les optimiser.
- ✓ Analyse et traitement des résultats. (étudier l'effet de temps et les paramètres de coupe sur la température).
- ✓ Prédiction de la température pendant le processus de fraisage.

- ✓ Comparaison des résultats obtenus par deux méthodes différentes: expérimentale et logique floue.

La thèse est organisée de la manière suivante:

Le chapitre I présente une synthèse de la littérature sur le fraisage et les phénomènes connexes (par exemple, l'augmentation de la température pendant la coupe), les facteurs affectant la température et les méthodes de mesure.

Ensuite, nous présentons quelques recherches scientifiques les plus importantes qui étudient la température de coupe dans tous les procédés, en particulier dans le fraisage avec différents approches expérimentales ou numériques.

Le chapitre II fournit des informations sur la méthode expérimentale et la technique utilisée dans cette étude. Il fournit également des informations approfondies sur la pièce à usinée et l'outil utilisé, la méthodologie expérimentale, le dispositif d'essai réel, l'équipement utilisé pour mesurer la température, et étudier l'impact du temps et les conditions de coupe sur la température, pendant l'opération de fraisage.

Le chapitre III se concentre sur une analyse approfondie et une discussion détaillée des résultats issus des essais expérimentaux. Le but de cette série de mesures est de surveiller et d'évaluer l'effet du temps et l'influence de différents paramètres de coupe, tels que la vitesse de coupe, l'avance par dent et la profondeur de passe, sur l'évolution de la température de coupe lors de l'usinabilité de l'acier par fraisage.

Dans le quatrième chapitre, l'accent est mis sur l'application de la méthode de la logique floue. En se basant sur des mesures expérimentales de la température de coupe, les fonctions d'appartenance et les règles floues ont été établies.

La logique floue peut être utilisée pour prédire l'impact des paramètres de coupe sur la température et aussi pour modéliser la corrélation entre la température et les paramètres de coupe.

Finalement nous suggérerons quelques perspectives pour une future étude.

Chapitre I

Synthèse bibliographie

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons une revue bibliographique sur le processus de fraisage, ainsi que les phénomènes qui lui sont associés, tels que l'augmentation de la température lors de la coupe, les facteurs influençant la température et les méthodes de mesure. Nous présentons ensuite quelques-unes des recherches scientifiques les plus importantes qui ont étudié la température de coupe dans divers procédés, en particulier dans le fraisage avec différents approches expérimentales ou numériques.

I.2 Fraisage

Le fraisage est un processus de production de formes plates et complexes à l'aide d'outils de coupe à plusieurs points (ou à plusieurs dents) sur une fraise rotative. La fraise tourne à grande vitesse et, en appuyant contre la pièce, elle enlève de la matière pour donner la forme désirée. L'opération de fraisage se distingue des autres opérations d'usinage sur la base de l'orientation entre l'axe de l'outil et la direction d'alimentation. Cependant, dans d'autres opérations comme le perçage, le tournage, etc., l'outil est alimenté dans la direction parallèle à l'axe de rotation.

Le fraisage est plus complexe que d'autres procédés d'usinage tels que le tournage ou le perçage, en raison de la configuration de l'outil et des mouvements de coupe et d'avance générés par la fraise [1]. En raison de sa grande polyvalence, le fraisage se présente comme une technique offrant des possibilités uniques pour la production de pièces précises et efficaces. Utilisé dans des secteurs variés, du domaine mécanique à la micromécanique, il joue un rôle essentiel grâce à ses caractéristiques de rendement, de finition et de précision [2].

I.2.1 Les avantages du fraisage

L'un des principaux avantages du fraisage réside dans sa grande précision lors de la coupe des matériaux. Grâce aux machines modernes de fraisage CNC (Commande Numérique par Ordinateur), il devient possible de réaliser des formes surfaciques assez complexes [2].

Le fraisage se distingue également par son efficacité dans la production de pièces en grandes quantités, offrant une grande cohérence et une qualité constante. De plus, les machines de fraisage peuvent être équipées de nombreux outils différents, permettant la production d'une large gamme de formes et de surfaces.

Le fraisage peut produire des finitions de surface de haute qualité, réduisant parfois la nécessité d'étapes supplémentaires de finition. Il est applicable à une variété de matériaux tels que les métaux, les plastiques et même certains composites, élargissant ainsi considérablement son champ d'application. L'ensemble de ces avantages positionne le fraisage comme une méthode d'usinage largement adoptée dans divers secteurs industriels.

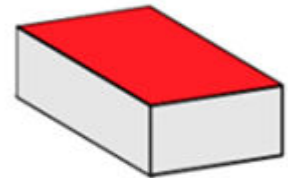
I.3 Les opérations de fraisage

I.3.1 Fraisage en bout

Le fraisage en bout (Fig I.1), également appelé fraisage d'enveloppe ou surfaçage, est l'opération qui comporte le plus de paramètres, car elle permet de générer des surfaces en trois dimensions. Le fraisage en bout peut être utilisé pour créer des cavités, des contours, des rainures et des surfaces planes ou inclinées sur la pièce à usiner. De plus, le fraisage en bout est utilisé pour usiner une variété de matériaux, tels que les céramiques, les composites, les métaux, et les plastiques.



Surface concave



Surface plane

Figure I.1 : Fraisage en bout [3].

I.3.2 Fraisage périphérique

Le fraisage périphérique est un type d'usinage dans lequel les arêtes de coupe se trouvent à l'extérieur de la fraise. Il est classé en deux catégories:

a) Fraisage conventionnel

La pièce, montée sur la table, est alimentée à contre-courant de la rotation de la fraise, générant une force de coupe minimale au début et maximale à la fin de la coupe. L'épaisseur du copeau est plus importante à la fin de la coupe. Comme la force de coupe est dirigée vers le haut, elle a tendance à soulever la pièce de travail des fixations, ce qui peut entraîner une qualité de surface ondulée. Cette méthode largement, utilisée, est illustrée dans la figure I.2.a.

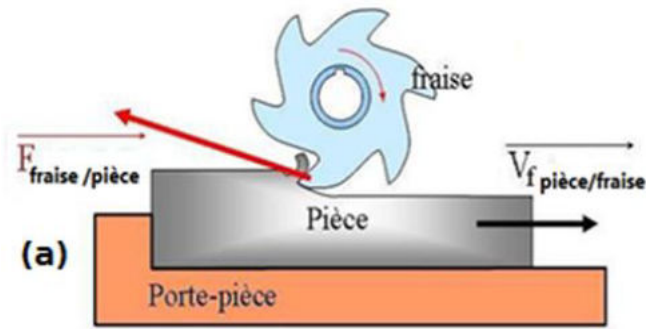


Figure I.2.a : Fraisage conventionnel [3].

b) Fraisage en aval

La pièce, montée sur la table, est déplacée dans la même direction que la rotation de la fraise. La force de coupe est maximale au début de la coupe et minimale à la fin. L'épaisseur du copeau est plus importante au début de la coupe, ce qui contribue à une qualité de finition de surface élevée, comme illustré dans la figure I.2.b.

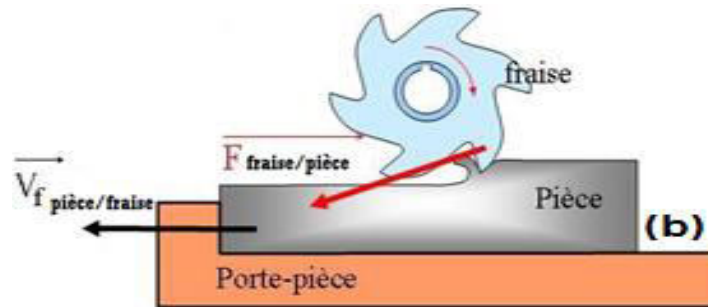


Figure I.2. b : Fraisage en aval [3].

I.3.3 Fraisage combiné (en bout et de profil)

Le fraisage combiné crée deux surfaces finies, où la partie frontale et le diamètre de la fraise sont utilisés pour la coupe, comme illustré dans la figure I.3 [4].

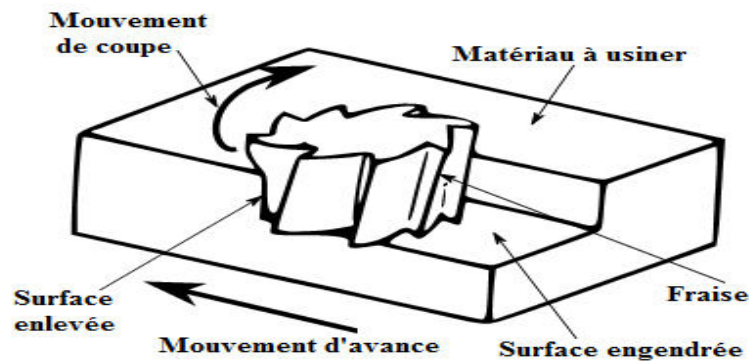


Figure I.3 : Fraisage combiné [4].

a) Epaulement

Il s'agit d'une tâche d'usinage importante qui consiste à réaliser deux surfaces planes orthogonales entre elles sur une pièce, comme indiqué dans la figure I.4. Cette opération est couramment utilisée pour obtenir des pièces mécaniques précises et fonctionnelles dans de

nombreux secteurs de l'industrie, notamment l'automobile, la construction navale et l'aéronautique.

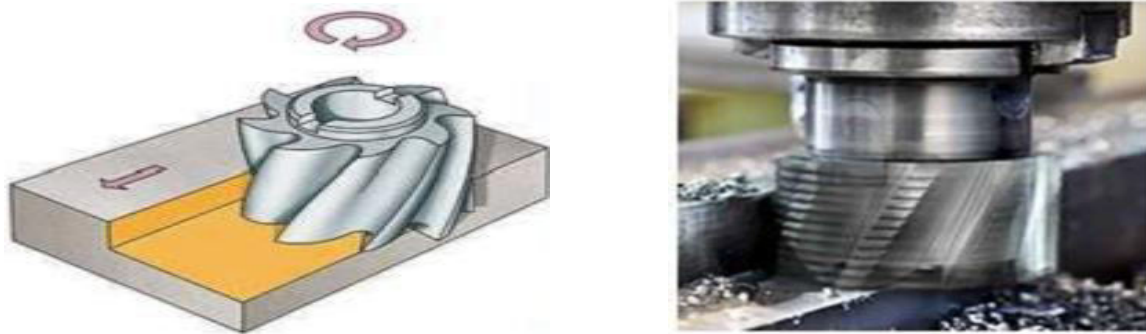


Figure I.4 : Réalisation d'un épaulement [4].

b) Rainurage

Le rainurage est l'opération de fraisage qui consiste à usiner entre elles trois surfaces orthogonales, comme illustré dans la figure I.5. En fonction de la définition de la rainure, une fraise 2T ou 3T (en ARS ou en carbure) peut être utilisée pour réaliser cette opération [5].

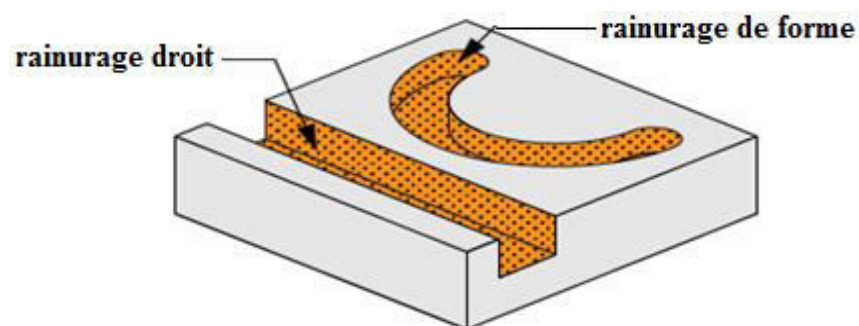


Figure I.5 : Réalisation d'un rainurage [5].

C) Usinage des poches

Une poche est délimitée par des surfaces verticales ou avec dépouilles, qu'elles soient cylindriques ou planes, comme illustré dans la figure I.6.

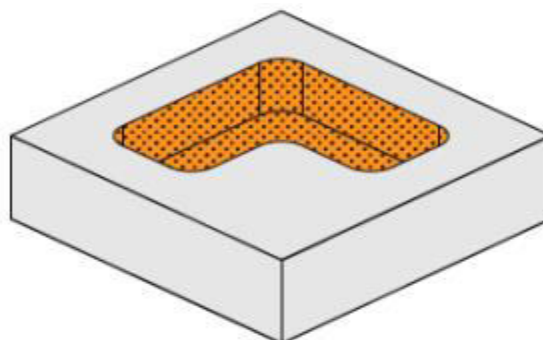


Figure I.6 : Fraisage des poches [5].

En générale l'opération de fraisage permet la génération d'une surface (surfaçage) (Figure 1-7 a), 2 surfaces fraisage combiné (surfaçage- dressage) (Figure 1-7 b), et de 3 surfaces (rainurage) (Figure 1-7 c) [2].

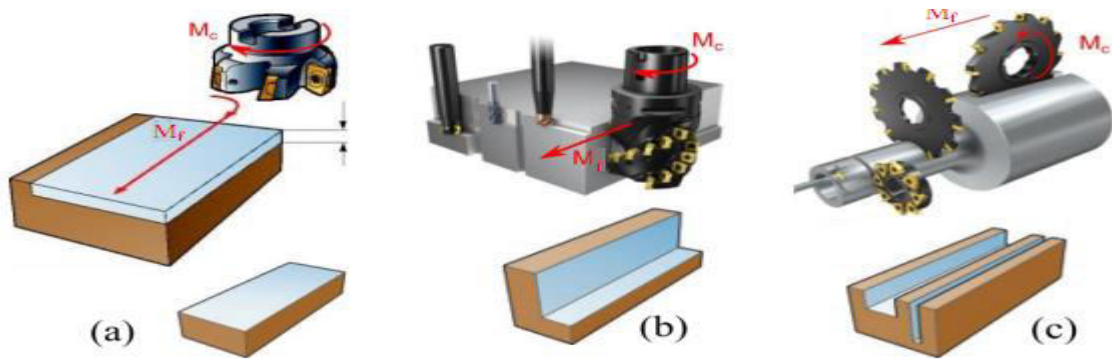


Figure I -7 : Mode de generation des surfaces par fraisage : (a) Surfaçages, (b) Fraisage combiné, (c) Rainurage [2].

I.4 Conditions de coupe

Les conditions se réfèrent aux différents facteurs qui influençant le processus d'usinage. Ces conditions comprennent la profondeur de passe , la vitesse de l'outil, l'avance, les propriétés des matériaux de la pièce et de l'outil de coupe, ainsi que le refroidissement et la lubrification de l'outil.

Les conditions de coupe sont influencées par la dureté et la résistance des matériaux de la pièce et de l'outil de coupe. Pour éviter l'usure et la rupture des outils de coupe, les matériaux plus durs nécessitent des vitesses plus lentes et des débits d'avance plus faibles. [2]

I.4.1 Vitesse de coupe V_C

La vitesse de coupe correspond à l'espace parcouru (en mètres) par l'extrémité d'une dent de l'outil en une minute. Dans le contexte du fraisage, elle représente la distance parcourue par minute par l'extrémité d'une dent de fraise. Cette vitesse, symbolisée par un vecteur tangent à l'élément en rotation, dépend de divers facteurs tels que l'outil, la pièce, le couple outil-pièce, et la machine, comme illustré dans la Figure I.8. Elle exerce une influence directe sur la durée de vie de l'outil ; une augmentation de la vitesse entraîne également une hausse de la température, susceptible d'endommager l'outil.

La relation de la vitesse de coupe est donnée par l'équation(I.1) suivante : $V_c = \frac{\pi \times D \times N}{1000}$

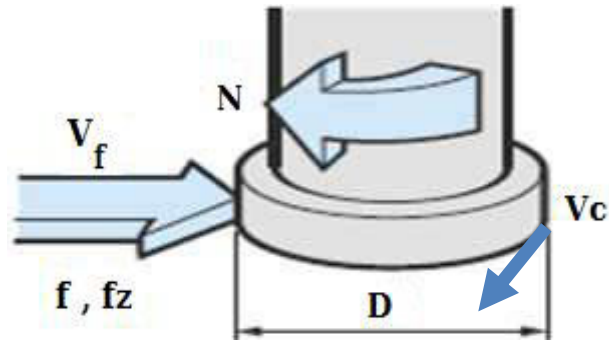


Figure I.8 : Vitesse de coupe [2].

I.4.2 Vitesse d'avance V_f

C'est la vitesse de translation de la pièce/outil, comme indiquée dans la figure (I.09), qui sera affichée sur la machine. Ce paramètre se calcule selon l'équation (I.2) suivante :

$V_f = f_z \times N \times Z$, où Z représente le nombre de dents de la fraise et N la fréquence de rotation. Il est important de noter que ce paramètre s'utilise uniquement en fraisage, car en tournage, les déplacements sont directement affichés par le paramètre f (mm/tour).

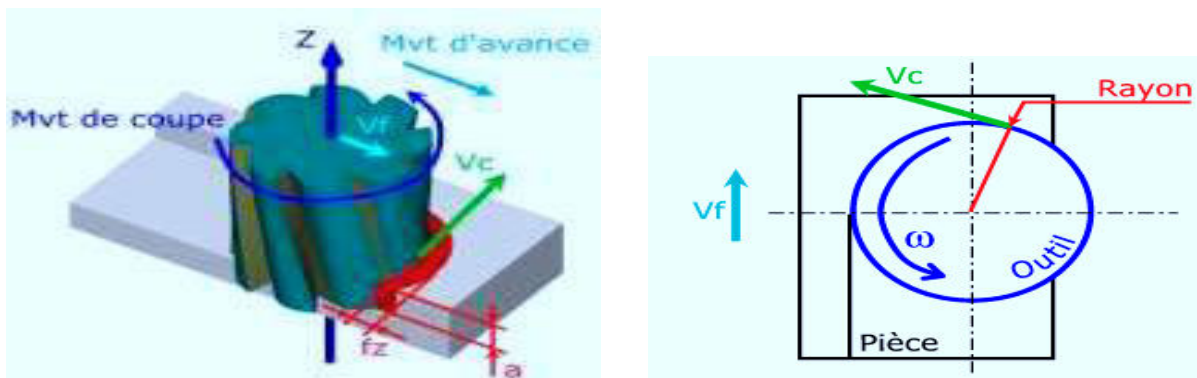


Figure I.09 : Vitesse d'avance [6].

I.4.3 Avance par dent F_z

L'avance est un terme de fraisage désigné par F_z et mesuré en mm. Elle représente la distance que la fraise avance dans le matériau à chaque passage de dent. La valeur de l'avance se calcule à partir de l'épaisseur maximale recommandée des copeaux. La géométrie de la fraise, la vitesse de rotation de la fraise, la vitesse d'avance de la table et la profondeur de coupe sont des facteurs qui déterminent l'avance par dent. Le choix de la bonne avance par dent dépend du matériau à usiner, du type de fraise utilisée, des conditions de coupe et des exigences spécifiques de l'usinage. La relation de calcul de l'avance par dent est donnée par l'équation (I.3): $F_z = V_f / N \times Z$.

I.4.4 Avance par tour F

L'avance par tour est une mesure de la distance parcourue par une fraise lors d'une rotation complète autour de son axe. Elle est exprimée en millimètres par tour (mm/tour). L'avance par tour dépend de plusieurs facteurs tels que la géométrie de la fraise, la vitesse de rotation de la fraise, la vitesse d'avance de la table et la profondeur de coupe. Cependant, il convient de noter qu'une avance par tour plus élevée peut permettre de retirer plus rapidement de la matière, mais cela peut entraîner une finition de surface moins précise et moins lisse. Ainsi, le choix de l'avance par tour doit être équilibré en fonction des besoins spécifiques de l'usinage. L'avance par tour est également une mesure importante de la capacité de la fraise à produire une finition de surface de haute qualité. Cette mesure peut être calculée en utilisant l'équation (I.4) $F = \frac{V_f}{N}$.

I.4.5 Profondeur de passe

La profondeur de passe est la quantité de matériau qui est enlevée à chaque passage de l'outil sur la pièce; l'épaisseur enlevée peut varier en fonction de plusieurs facteurs tels que la dureté de matériau usinée, type fraise, la vitesse d'avance, et de coupe, etc. (fig. I.10).

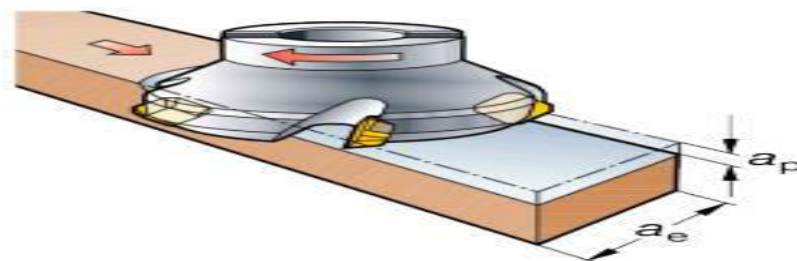


Figure I.10 : Profondeur de coupe [2].

La profondeur est un facteur important dans l'usinage, car elle influe sur les forces de coupe, le type de surface utilisé et la durée de vie de la fraise. Une profondeur de coupe plus importante entraîne une force plus élevée, susceptible de provoquer des vibrations et des bruits. En revanche, une profondeur de coupe plus faible réduit la force de coupe, mais peut nécessiter plus de passes pour enlever la quantité de matériau souhaitée, ce qui peut augmenter le temps de cycle.

La profondeur de coupe appropriée dépend de divers facteurs, tels que le matériau usiné, l'état et la géométrie de la fraise, ainsi que la rigidité de la machine-outil. Plus la coupe est profonde, plus le taux de production sera rapide. Cependant, cela dépend toujours de la force de la fraise et du matériau à couper. La relation de profondeur de coupe est donnée par l'équation (I.5) suivante: $a_p = k \times d$.

I.5 Mécanismes d'endommagement des outils

Les outils de coupe sont soumis à divers mécanismes d'endommagement lors de leur utilisation. Parmi les plus courants, on peut citer l'usure, les dommages thermiques, les dommages chimiques, la rupture par fatigue et les dommages causés par les vibrations. Comprendre ces mécanismes qui endommagent les outils de coupe est essentiel pour sélectionner le bon matériau, la bonne géométrie appropriés de l'outil, optimiser les conditions de coupe et mettre en œuvre des stratégies efficaces de maintenance et de remplacement des outils. Les outils en céramique peuvent être endommagés par des mécanismes d'origine mécanique ou physico-chimique.

[F. LE MAITRE. 1980] [7] a démontré que l'endommagement de l'outil diminue lorsque l'angle d'impact (α) est supérieur à l'angle minimal (α_m), et augmente lorsque α est inférieure à α_m . La relation définissant l'angle d'impact α en fonction du paramètre d'engagement radial est donnée par l'équation $\cos\alpha = 1 - 2a_e / D$, comme illustré dans la Figure I.11.

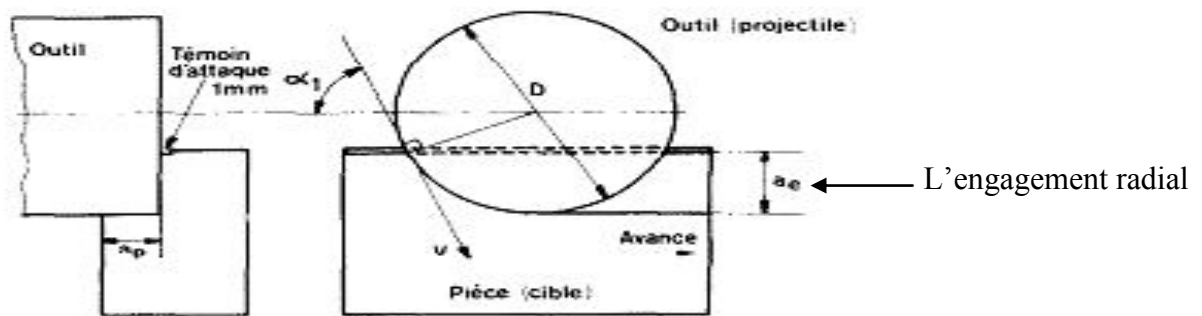


Figure I.11 : Schéma de principe de l'usinage [7].

I.5.1. Endommagement des outils de coupe par l'usure

L'usure est l'endommagement le plus courant des outils de coupe. Cela se produit en raison du contact physique entre l'outil et la pièce à usiner, ce qui entraîne la perte progressive de matière. L'usure peut être classée en différents types, tels que l'usure des flancs, l'usure des cratères, l'attrition et l'écaillage des bords.

[Taylor1907] [8] a proposé pour la première fois en 1907 un modèle mathématique reliant le temps (t) de coupe effectif de l'outil aux paramètres de coupe. Taylor considérait que l'usure de l'outil serait plus significative et que la pièce pourrait être endommagée si la température atteignait des valeurs excessives. Actuellement ce modèle est encore le plus utilisé pour tous les matériaux d'outils, car il représente simplement l'usure de dépouille V_b en fonction de la durée de coupe effective. En pratique et en théorie, les valeurs moyennes de l'usure en dépouille, $V_b \text{ moyen} < 0,3\text{mm}$ et $V_b \text{ max} < 0,6\text{mm}$.

En pratique et en théorie, l'usure en dépouille V_b suit un schéma en trois zones, tel que représenté dans la figure I.12 : le rodage, la stabilisation de l'usure et l'usure accélérée [9].

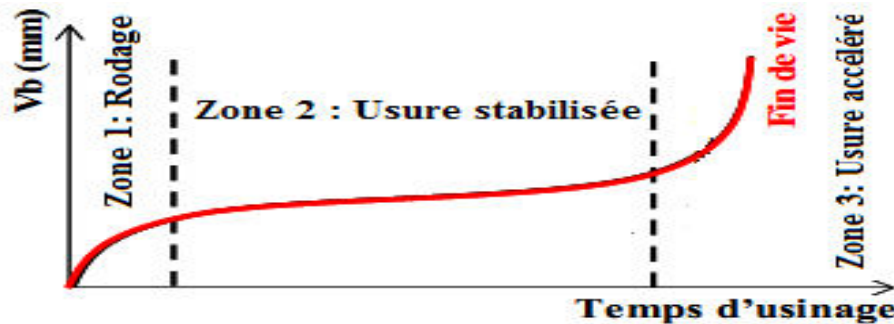


Figure I.12 : Evolution de l'usure dans le temps [9].

a) Endommagement par usure adhésion

L'usure par adhésion se produit généralement lors des contacts glissants entre les matériaux, où les surfaces subissent une pression et une friction accrues, ce qui peut causer une détérioration de la surface avec le temps. Pour minimiser cet endommagement, des revêtements et des lubrifiants peuvent être appliqués aux surfaces en contact afin de réduire l'adhésion entre elles.

[Ezugwu and Wang, 1997] [Nouari et al., 2008] [10,11] l'usure par adhésion est un phénomène qui se produit lorsque deux surfaces en contact glissent l'une contre l'autre sous des sollicitations importantes pendant le processus d'usinage. Ces sollicitations peuvent être de nature mécanique. Les atomes des deux matériaux peuvent adhérer en raison des forces interatomiques. Lorsque ces micro-soudures se rompent, le matériau de l'outil est arraché, provoquant ainsi une usure et créant une adhérence entre les surfaces.

b) Endommagement par usure abrasion

L'usure abrasive se manifeste par des bandes dans le sens du contact ou du glissement des copeaux sur la pièce, apparaissant sur la face de coupe (Figure I.13.a) et sur la face de dépouille de l'outil (Figure I.13.b) [12]. Elle résulte de particules abrasives présentes dans la pièce usinée, l'air ambiant ou le liquide de coupe.

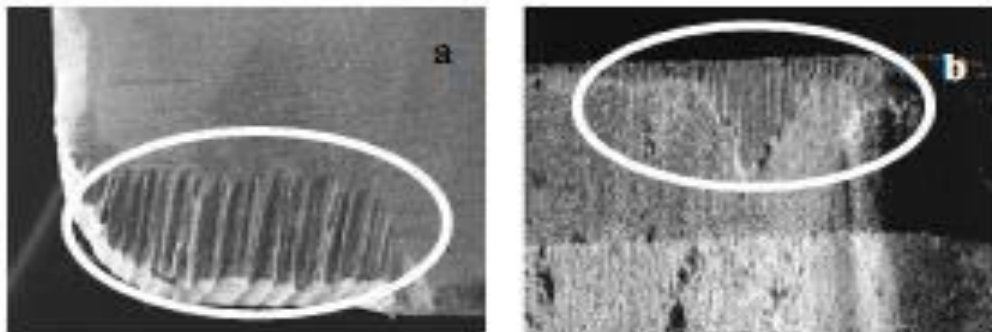


Figure I.13 : (a) Après l'usinage d'alliage de titane : Abrasion de la face de coupe [13].
(b) Après l'usinage de Duralcan : Abrasion de la surface de la dépouille [14].

[Nabhani, 2001] [Che-Haron, 2001] [15,16] L'usure abrasive se produit lorsqu'il y a frottement entre des particules dures (comme des carbures, des nitrures et des oxydes) présentes dans la pièce à usiner et la surface de la fraise. La dégradation brutale est le résultat de différents types d'usure et survient lorsque la forme de l'arête de l'outil est altérée de manière significative par le frottement.

c) Endommagement par usure diffusion

[Naher_77, Geko_02] [17,18] L'endommagement par usure diffusion peut être causé par la diffusion entre la fraise et le copeau lorsqu'une coupe est effectuée à une vitesse élevée. Les atomes se diffusent en raison de différences de concentration, ce qui altère la composition chimique et affecte la résistance et la durée de vie de l'outil.

d) Endommagement par usure érosion

Lors de l'usinage de matériaux durs avec des outils de coupe, un endommagement par usure érosion peut se produire. Lorsque les copeaux adhèrent à l'outil et sont évacués, ils rompent une partie de la couche superficielle de l'outil. L'érosion peut entraîner des variations périodiques de l'avance et de l'angle de coupe de l'outil, ce qui peut altérer la qualité et la précision de l'usinage [19]. La formation d'une arête rapportée est un mécanisme lié à l'érouissage de la matière et peut se produire à des vitesses de coupe faibles [20].

I.5.2 Endommagement par fatigue thermique et mécanique

L'endommagement des outils par fatigue thermique et mécanique résulte de la conjonction de phénomènes mécaniques et thermiques. La fatigue thermique est causée par les variations de température pendant le processus de coupe, ce qui peut entraîner la formation de fissures dans les outils. La fatigue mécanique résulte des contraintes mécaniques répétées subies par les outils, pouvant également conduire à la formation de fissures dans la fraise. Les chocs thermiques peuvent causer des dommages significatifs à la surface et à la structure de l'outil. Lorsqu'un choc thermique se produit, la surface de la fraise subit une tension, ce qui peut conduire à la formation de fissures thermiques [21].

I.5.3 Endommagement par déformation plastique

Lors de l'usinage de matériaux à haute température et haute pression, les déformations plastiques sont fréquentes. Elles résultent de la pression extrême exercée par la fraise sur la pièce, entraînant des altérations au niveau des pointes des outils et des surfaces de coupe. Ces déformations se manifestent particulièrement dans des paramètres d'usinage exigeants, telles que des avances importantes et des vitesses de coupe élevées. La dureté supérieure de certaines pièces favorise ces phénomènes [22].

Afin de minimiser les déformations plastiques, il est recommandé d'utiliser des outils de coupe de haute qualité et de régler les paramètres de coupe tels que la vitesse et l'avance en fonction des propriétés des matériaux usinés. Il est également possible d'appliquer des techniques d'usinage à basse température ou d'utiliser des lubrifiants pour réduire la chaleur et la pression générées pendant l'usinage [22].

I.5.4 Endommagement par fluage et oxydation

Des mécanismes d'endommagement tels que le fluage et l'oxydation peuvent se produire à des vitesses de coupe élevées, lors de l'usinage. Le fluage se manifeste par une déformation permanente causée par des contraintes de compression sur la partie tranchante de l'outil, tandis que l'oxydation affaiblit l'outil en réduisant sa durée de vie. Afin de minimiser ces phénomènes, il est crucial de sélectionner des matériaux d'outil résistants à la chaleur et à l'oxydation et de maintenir des conditions de coupe appropriées en ajustant les vitesses de coupe en fonction du matériau et de la géométrie de fraise. Il convient également d'éviter des vitesses excessives qui pourraient endommager l'outil [22].

I. 6 Température de coupe

C'est la température générée lorsque la fraise entre en contact avec le matériau lors du fraisage. Elle est un facteur important qui influe sur la durée de vie de l'outil. Des températures élevées peuvent causer des dommages à l'outil, tels que l'usure et l'écaillage de l'arête de coupe [23, 24].

Les recherches menées par [Boothroyd et al 1982] [25] démontrent que la variation de température de l'outil peut atteindre jusqu'à 200°C par millimètre. Il est difficile de préciser une température de coupe exacte dans ces conditions. Par conséquent, la température de coupe est généralement considérée comme moyenne de la température du champ d'une section spécifique, comme l'interface entre l'outil et copeau. Selon les travaux de Kitigawa et al [Kitigawa 1997] [26] La première partie d'un signal est la température de coupe, qui correspond au temps d'engagement d'une arête de coupe en fraisage.

I.7 Méthodes de mesure

En raison de la forme complexe de l'outil, et de la présence de copeaux, la mesure de la température dans les processus d'usinage peut être difficile. Cependant, la température de coupe est un paramètre clé qui a un impact direct sur la vitesse, l'usinage, la pièce finie et la longévité de l'outil [27]. Il existe plusieurs techniques permettant de mesurer et de contrôler la température de coupe, notamment l'utilisation de capteurs thermiques, de simulations numériques et de caméras infrarouges.

I.7.1 Mesures de température indirectes

La méthode indirecte consiste à utiliser une technique qui permet de déduire la température de l'outil sans effectuer une mesure directe.

En 1971, Rosseto et al. [**Rosseto 1971**] [28] ont utilisé un vernis thermosensible pour mesurer la température de coupe. Ce vernis change de couleur en fonction de la température, et la limite entre les deux couleurs présente l'isotherme. Lorsque le vernis est appliqué sur l'outil de coupe, la chaleur générée par la friction entre l'outil et la pièce à usiner provoque une élévation de température dans l'outil, Ce qui engendre un changement de couleur du vernis.

La méthode expérimentale proposée en 1989 par **Lo Casto** [**Lo Casto 1989**] [29] s'inspire de la méthode de Rosseto et al. Elle nécessite la mise en place d'une poudre dont le seuil de fusion est connue entre deux sections de la plaquette.

Lors de l'usinage, la chaleur générée par la friction entre l'outil et la pièce à usiner fait fondre la poudre. Le test est arrêté lorsque la poudre atteint son point de fusion, et le point de fusion forme une isotherme. Cette méthode permet ainsi d'estimer la température. Il y a diverses approches indirectes telles que:

- ✚ **La mesure et l'analyse de la couleur des copeaux:** des copeaux courts et fragmentés peuvent indiquer une température élevée, tandis que des copeaux longs et enroulés peuvent indiquer une température plus basse.
- ✚ **Mesure de la force de coupe:** peut être utilisée comme une indication indirecte de la température de coupe. Une augmentation de la force de coupe peut indiquer une augmentation de la température.
- ✚ **Pyromètres sans contact :** Les pyromètres sans contact utilisent le rayonnement thermique pour mesurer la température de surface de la pièce ou de l'outil
- ✚ **Modélisation thermique:** Les modèles thermiques sont utilisés pour simuler les conditions de coupe et estimer la température de manière indirecte.

I.7.2 Mesures de température directes

a- Méthode de mesure par thermocouple

Ils sont des dispositifs simples, peu coûteux, et faciles à utiliser, offrant ainsi une mesure rapide et précise de la température de coupe. Cette méthode trouve une large application dans la recherche et l'industrie, comme illustré dans la figure I.14 [30].

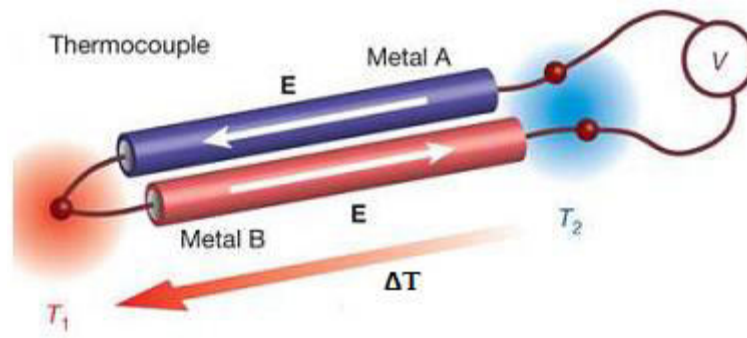


Figure I.14: Principe de fonctionnement des thermocouples [30].

Afin de mesurer la température de l'alliage de magnésium AM50A, un thermocouple a été utilisé. Le schéma illustre la disposition de l'outil, de la pièce, et du thermocouple, ainsi que le circuit électrique employé. La précision de la mesure de la température à la section de coupe est assurée car la jonction de mesure du thermocouple est en contact direct avec la pièce. La configuration expérimentale est représentée à la figure I.15 [31].

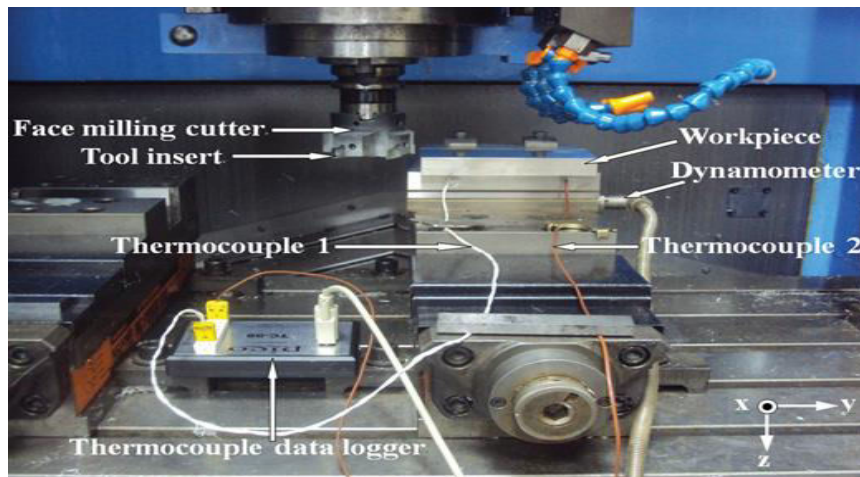


Figure I.15 : Mesure de température lors de surfacage de l'alliage de Mg (AM50A) [31].

Les fraises rotatives ont connu des évolutions technologiques pour permettre l'insertion de thermocouples dans l'outil. Cependant, ces techniques sont aujourd'hui dépassées, car elles impliquent l'utilisation de thermocouples éloignés du champ de coupe. Pour comparer les températures de l'outil, cette méthode requiert une approche inverse.

[Ghafarizadeh et al 2016][32] Ils ont utilisé une technique de mesure avec des thermocouples de type K intégrés aux deux arêtes de coupe de la fraise pour mesurer la température de coupe. Un système numérique sans fil a été employé pour transmettre les signaux des thermocouples. Ces signaux de transmission ont été détectés par une antenne radiofréquence, puis convertis en signaux de température analogiques. Les températures ont été enregistrées lors du fraisage du matériau CFRP.

[Krishna et al., 2012] [33] Ils ont utilisé un outil de type de carbure K-20 pour tester la température par thermocouples à différentes vitesses et profondeurs de passe. La répartition de température dans les régions de coupe, de cisaillement et d'interface est rapportée en élévation.

a.1) Avantages des thermocouples

Les thermocouples présentent de nombreux avantages, notamment leur simplicité, leur flexibilité, leur coût relativement faible, leur fiabilité et leur précision.

- **Les thermocouples standards** : sont les plus utilisés en raison de leur compatibilité avec de nombreuses applications et types de matériaux, ainsi que de leur capacité à mesurer des températures très élevées et à résister à des environnements difficiles.

- **Les thermocouples dynamiques**: sont un outil important en tribologie pour mesurer les températures à des vitesses élevées et dans des environnements où la température change rapidement.

Les thermocouples dynamiques ont été utilisés dans le domaine de la tribologie par Trigger et al. [Trigger 1948][Trigger 1949] [34,35] pendant l'usinage et à l'interface outil-copeau, La température a été estimée grâce à ces études, qui offrent des informations cruciales pour comprendre les phénomènes d'usinage et optimiser les paramètres d'usinage.

a.2) Inconvénients des thermocouples

1. **Précision limitée**: Les thermocouples ont une précision limitée par rapport à d'autres types de capteurs de température. Les erreurs de mesure peuvent provenir de la qualité des fils, de l'étalonnage ou de la température ambiante.
2. **Effet Seebeck inverse**: Les thermocouples peuvent subir un effet Seebeck inverse, ce qui peut entraîner une inversion de la polarité du signal de sortie.
3. **Non-linéarité**: Les thermocouples peuvent ne pas être linéaires sur toute la plage de mesure de température.
4. **Effets de soudure froide**: Les thermocouples peuvent être affectés par des effets de soudure froide, qui se produisent lorsqu'il y a une discontinuité dans le circuit thermique du thermocouple.

b) Mesure de température par rayonnement

Des méthodes basées sur la détection du rayonnement thermique émis par un objet chauffé, telles que les pyromètres infrarouges, les caméras infrarouges et les caméras proches infrarouges, sont utilisées pour mesurer la température indépendamment de l'évolution du contact entre la pièce, l'outil et le copeau [36].

b.1) Pyromètre infrarouge

Les pyromètres infrarouges sont des dispositifs optiques capables de mesurer la température d'un objet sans nécessiter de contact physique. Ils fonctionnent en mesurant l'énergie électromagnétique émise par l'objet, en particulier la radiation infrarouge Figure I.16a. Le pyromètre infrarouge compare l'énergie émise par l'objet avec celle émise par une source étalon, généralement un corps noir. La méthode utilisée consiste à positionner le pyromètre à une distance spécifique de la zone de coupe et à lire sa température avec précision Figure I.16b [36].

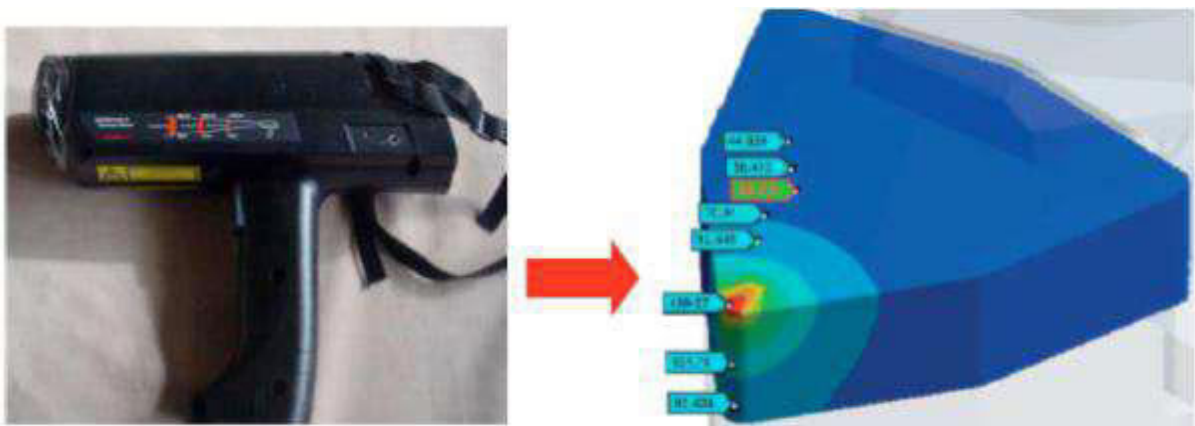


Figure I.16: (a) Pyromètre infrarouge, (b) Températures spécifiques de l'outil en différents endroits [36].

b.2) Caméra infrarouge

La caméra infrarouge est un outil pratique pour mesurer rapidement et précisément la température sans contact. Elle est pratique dans les situations où il est difficile ou dangereux de s'approcher de l'objet à mesurer. La caméra détecte les radiations infrarouges émises par les objets, les convertit en une image visible sur l'écran et associe chaque couleur à une plage de température spécifique.

I.8. Les facteurs affectants la température pendant le fraisage

Lors du processus de fraisage, la température peut être influencée par plusieurs facteurs, tels que les condition de coupe , le matériau de plaquette de coupe, les caractéristiques de l'outil de coupe (matériau, forme, géométrie des arêtes de coupe), ainsi que la qualité et les propriétés du fluide de coupe utilisé. Tous ces facteurs peuvent avoir un impact significatif sur la température.

I.8.1 Influence des paramètres de coupe sur la température.

a) Vitesse de coupe et vitesse d'avance.

En général, une vitesse de coupe élevée peut augmenter la température de l'outil et de la pièce à usiner. Cela est dû à l'augmentation de l'énergie de coupe pendant le processus de coupe, qui est transformée en chaleur pendant l'usinage. L'augmentation de la vitesse de coupe peut également entraîner une usure accrue et une durée de vie plus courte de l'outil de coupe.

b) L'avance et la profondeur de coupe

L'augmentation de l'avance et de la profondeur de coupe conduit à une élévation de la température de coupe en raison de l'augmentation du matériau retiré, entraînant ainsi une production de chaleur supplémentaire due à l'augmentation du frottement.

I.8.2 Matériau de la pièce et de l'outil

- Si le matériau est très dur et a une résistance à la traction plus élevée, il faudra exercer plus de force pour le couper. Cela générera plus de chaleur, ce qui entraînera une température de coupe plus élevée.

- Si la chaleur spécifique et la conductivité thermique du matériau, de l'outil de coupe et de la pièce usinée sont élevées, la conduction thermique sera facilitée et la température de coupe sera réduite.

I.8.2. 1 Géométrie de l'outil

Le choix de l'angle de coupe a un impact important sur la température de coupe. En augmentant l'angle de coupe dans le sens positif, la force de coupe diminue, ce qui réduit la production de chaleur. un angle de coupe négatif entraîne une déformation plus importante de la pièce et une augmentation de la production de chaleur.

I.8.3 Fluides de coupe

L'utilisation d'un fluide de coupe permet de réduire la quantité de chaleur générée pendant l'usinage et de limiter la friction entre la pièce et l'outil. Les fluides ayant une conductivité thermique et une chaleur spécifique plus élevées ont un effet de refroidissement plus efficace lors du processus d'usinage.

[LECOZ Gaël décembre 2012][37] L'utilisation d'un liquide de coupe a un impact significatif sur la température sous-surface. A faibles vitesses de coupe, le fluide de coupe est efficace pour limiter la température générée. Cependant, à des vitesses de coupe élevées, le système de lubrification peut ne pas être suffisamment efficace pour réduire la température générée, ce qui entraîne des températures maximales similaires à celles observées en l'absence de fluide.

I.9 Analyse de la littérature

I.9.1 Etude de la température en fraisage

De nombreuses études ont examiné la température de coupe à l'aide de techniques numériques, analytiques et expérimentales. Les méthodes numériques sont souvent complexes et nécessitent des calculs prolongés. En raison de la corrélation entre la chaleur produite et la longévité des outils, L'analyse de la température peut être difficile lors de l'étude de la température pendant l'opération de fraisage.

a) Approche expérimentale.

L'utilisation d'un dispositif de mesure tel qu'un thermocouple, un capteur de température infrarouge ou un capteur de flux thermique est nécessaire dans l'approche expérimentale de mesure de la température de fraisage. Ces appareils sont placés à différents endroits de l'outil, de la pièce ou de la table de travail pour mesurer la température pendant l'usinage. Ensuite, les données sont traitées pour déterminer la température de coupe moyenne, maximale et minimale, ainsi que la répartition de la chaleur dans la zone d'usinage. Cette méthode est largement utilisée en fraisage car elle fournit des données précises et fiables pour la validation des modèles prédictifs.

La température de surface d'un acier au carbone XC48TS (AISI1050) a été mesurée juste après le passage de la fraise dans l'étude de Lin [Lin 1995] [38]. Pour cela, un pyromètre infrarouge avec un point de mesure de 1 mm a été utilisé. Afin d'éviter les perturbations causées par l'interaction des copeaux, ce pyromètre a été positionné à une proximité de 17 mm par rapport à la surface récemment usinée. Le signal de température a été accumulé dans un ordinateur personnel et un enregistreur. Les tests ont été menés à 500 tr/min Figure I.17.

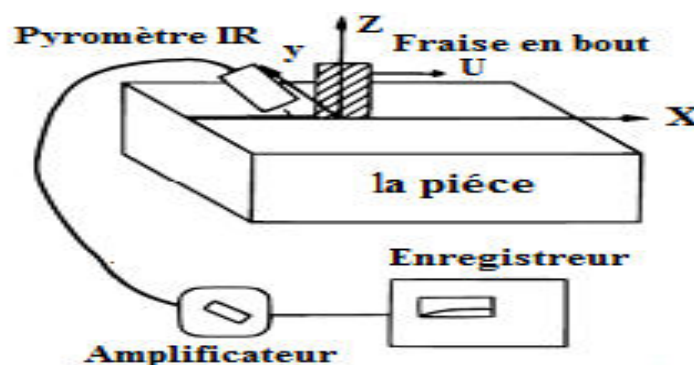


Figure I.17 : Disposition expérimentale dans le processus de fraisage en bout [38].

Ming et al. [Ming 2003] [39] ont également utilisé un pyromètre pour évaluer la température pendant le fraisage de l'aluminium en suivant une méthode similaire. Ils ont fabriqué une paroi fine d'environ 3 à 4,5 mm d'épaisseur à l'aide de l'outil, derrière laquelle un pyromètre a été positionné, comme illustré dans la figure I.18.

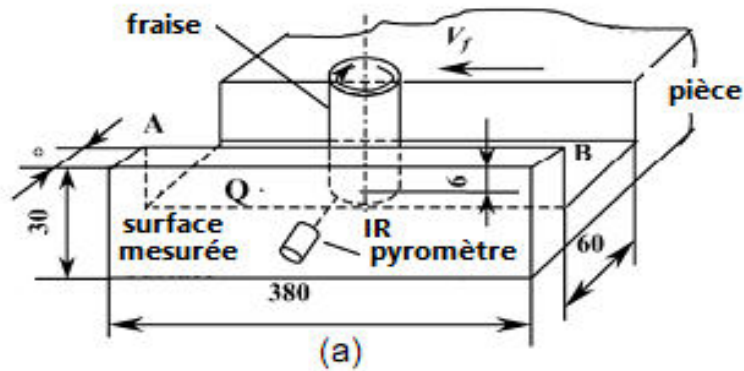


Figure I.18 : Mesure de la température pendant le fraisage de l'aluminium [39].

Ueda et al. [Ueda 2001][40] ont réalisé deux expériences en utilisant la méthode de mesure de pyromètre couplée à des fibres optiques. Dans la première expérience, ils ont mesuré la température de la surface latérale pendant la coupe. Une fibre optique a été insérée dans un petit trou à partir de la surface extérieure et fixée à un point où la distance entre la surface de la pièce à usiner et la face d'incidence est de 0,5 mm. Cette fibre optique est capable de capter l'énergie infrarouge émise par la surface latérale de l'outil.

Dans la deuxième expérience, ils ont mesuré la température sur la surface latérale de l'outil de coupe à différents intervalles après la coupe. La fibre optique capte les rayons infrarouges émis par l'outil lorsque celui-ci passe au-dessus de la face d'incidence de la fibre optique. La figure I.19 représente la configuration expérimentale.

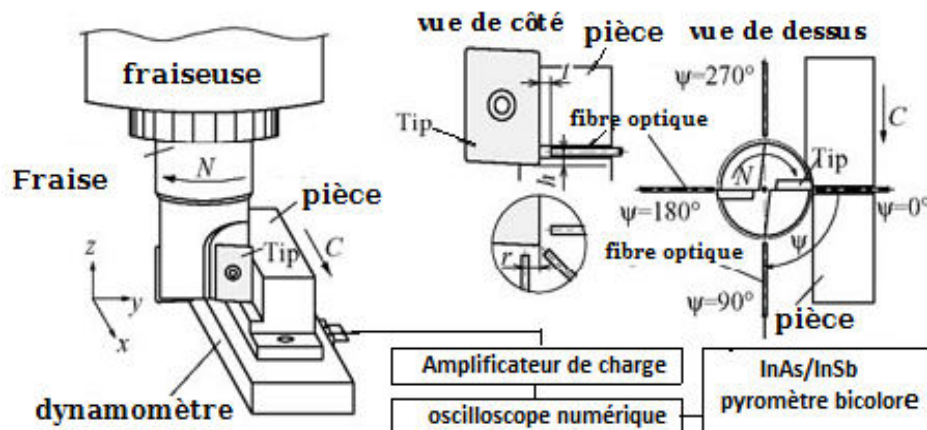


Figure I.19 : Configuration expérimentale [40].

Les techniques de mesure de température d'un outil ont été améliorées par Sato et al. [Sato 2007] [41] ainsi que par Ueda et al. [Ueda 2008][42]. Ils ont adapté la technique du pyromètre en utilisant des fibres optiques. Une plaquette située sous un insert CBN contient une fibre optique qui remonte jusqu'au corps de l'outil rotatif.

La température est mesurée par la fibre optique et transmise à un pyromètre par une seconde fibre optique. Un calibrage est effectué pour établir la relation de la température à l'interface outil-copeau et celle mesurée de l'insert CBN. Cette méthode est utilisée pour déterminer la température d'un acier au carbone lors du fraisage comme illustré dans la figure I.20.

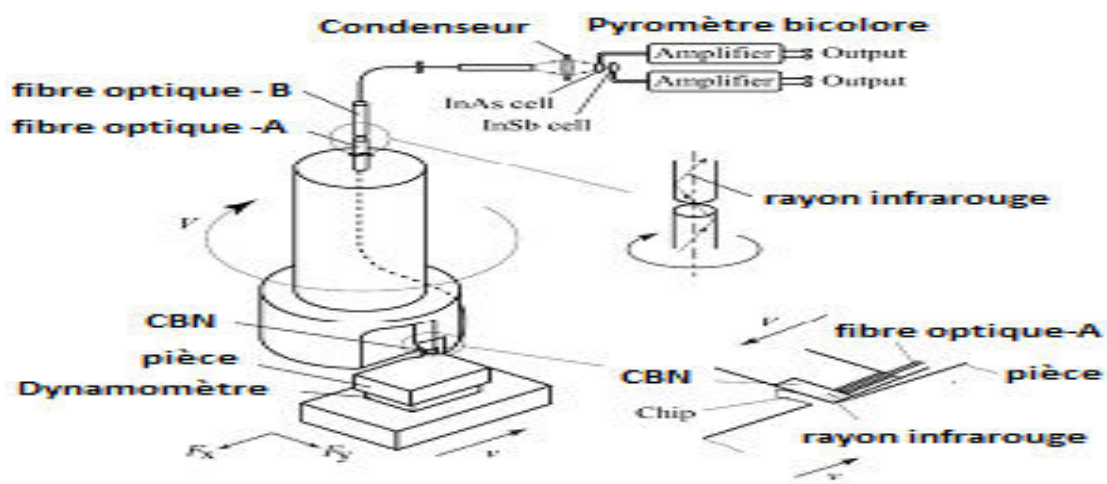


Figure I.20 : Mesure de la température lors du fraisage d'un acier au carbone avec un dispositif insérées dans l'outil et reliées à un pyromètre [42].

Il existe des études qui utilisent des caméras de thermographie pour caractériser les températures pendant les opérations de fraisage. Cette technique donne une image complète de l'opération de fraisage au lieu d'un simple point de mesure.

[Dewes et al 1999] [43] En utilisant une caméra de thermographie infrarouge pour obtenir une image de la zone de coupe, et en complément avec un thermocouple dynamique. Étant donné que l'interface outil/copeau ou outil/pièce n'était pas accessible, seule la température maximale du copeau a pu être mesurée.

Toh [Toh 2005] [44] a suivi une approche similaire en mesurant la température maximale des copeaux, comme présenté dans la figure I.21 , et également tiré des conclusions similaires sur la corrélation entre l'usure de l'outil et la température.

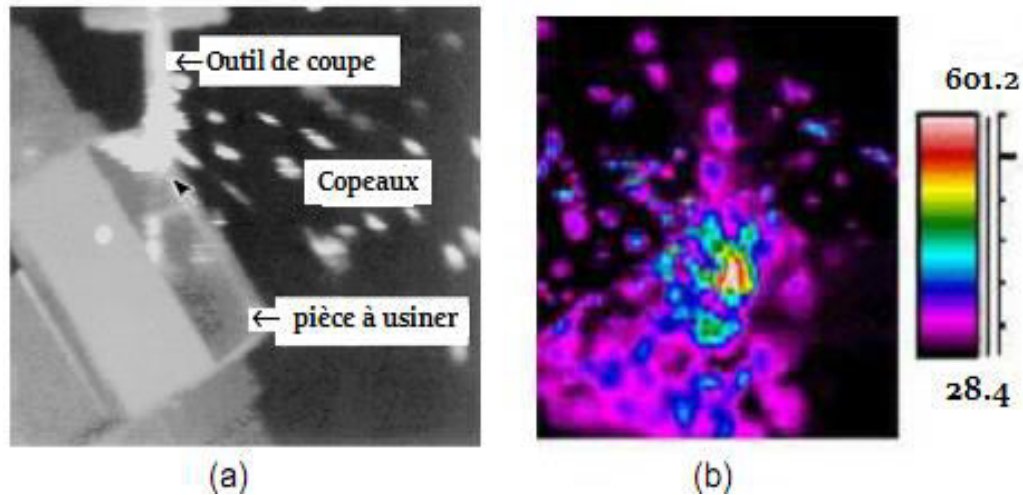


Figure I.21: Imagerie thermique du fraisage : Résultats de deux études [43] et [44].

Pittala et Monno [Pittala 2011] [45] ont utilisé la méthode développée par Ming et al. [Ming 2003], mais ont amélioré la technique en remplaçant le pyromètre par une caméra de thermographie comme indiqué dans la figure I.22 (a).

Lors du fraisage d'un alliage de titane TA6V, la température maximale enregistrée apparaît sur l'image, comme illustré dans la figure I.22 (b).

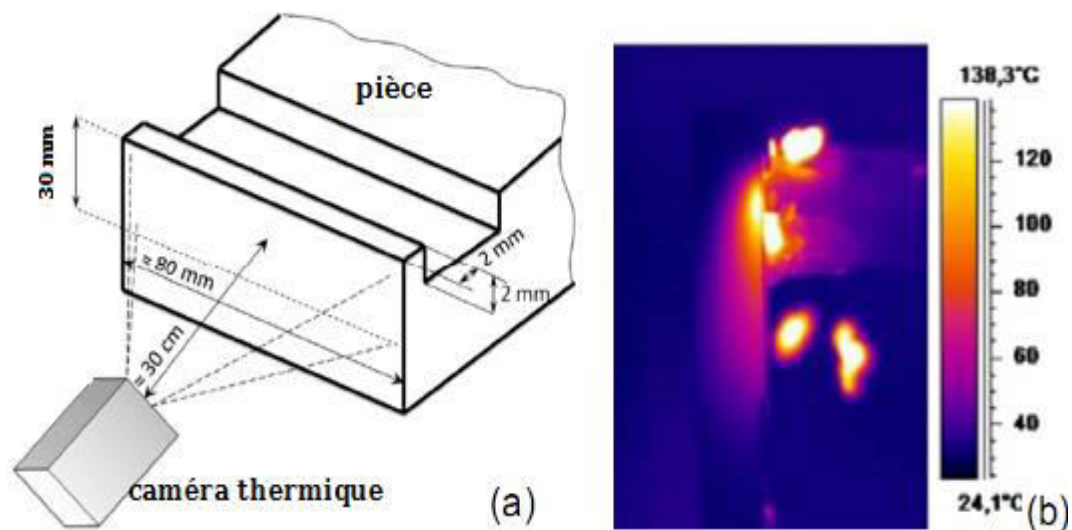


Figure I.22: a) Dispositif par caméra de thermographie et b) Image obtenue [45].

Dans leur étude, Kim et al [Kim 2001] [46] Ils ont utilisé l'insertion d'un thermocouple dans la pièce afin de mesurer la température en sous-surface de la pièce usinée lors du fraisage d'un acier dur, comme illustré dans la figure I.23 (a). Le signal enregistré a révélé une température élevée lorsque l'arête de l'outil s'approchait du thermocouple. Figure I.23(b).

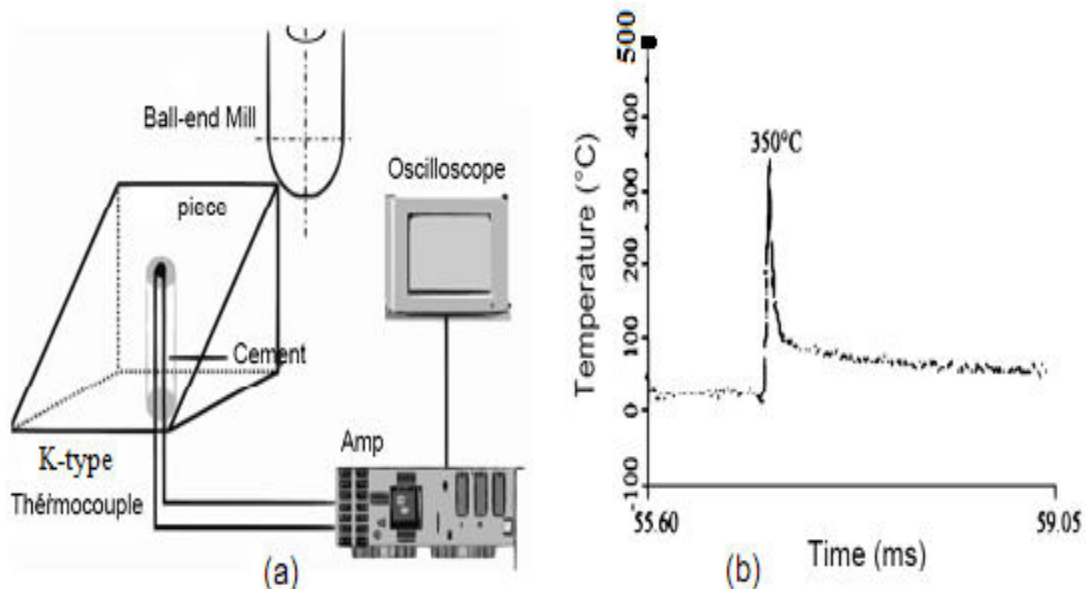


Figure I.23 : a) Insertion d'un thermocouple dans la pièce et b) acquisition du signal [46].

Ng et al [Ng 2002] [47] Ils ont utilisé un dispositif similaire pour déterminer la température de l'Inconel 718 lors du fraisage. Un thermocouple d'un diamètre de 0,3 mm a été utilisé. Les signaux de température obtenus par le thermocouple inséré dans la pièce sont présentés dans la figure (I.24).

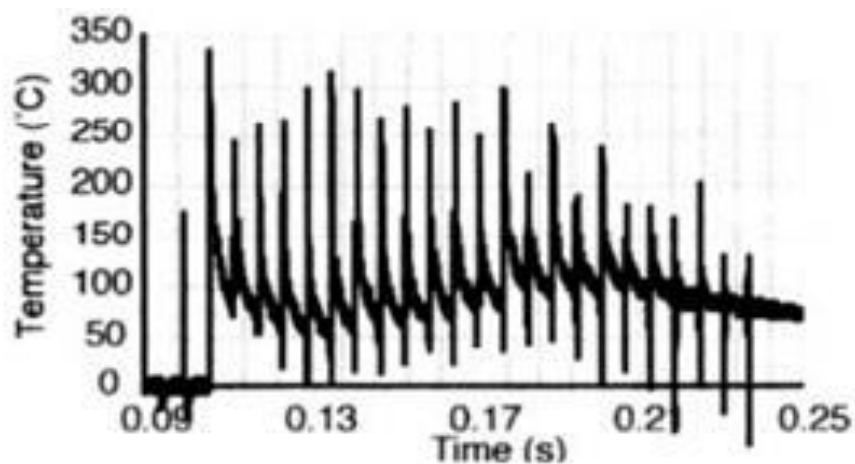


Figure I.24: Obtention de signaux de température [47].

Sugita et al. [Sugita 2009][48] ont utilisé un thermocouple dans le domaine biomédical pour mesurer la température lors du fraisage. Pour évaluer la température de l'usinage de l'os, un thermocouple a été inséré dans une pièce d'os de porc sectionnée en deux (Figure I.25(a)).

Un signal a été enregistré, ce qui a permis de mesurer le gradient de température dans la pièce et de déterminer la zone thermiquement affectée (Figure I.25(b)). Les résultats ont montré un écart de température d'environ 30°C entre la sous-surface et la surface de la pièce.

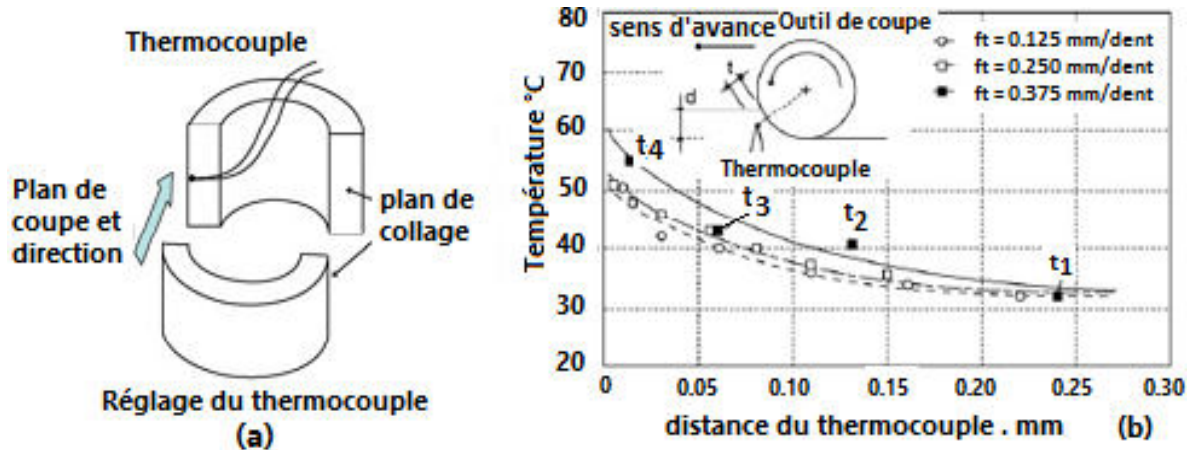


Figure I.25 : a) Insertion d'un thermocouple dans l'échantillon osseux.

b) Gradient de température dans la sous-surface usinée [48].

Suprock et al. [Suprock 2009][49] ont développé un porte-outil équipé pour mesurer les forces et les températures pendant le fraisage (Figure I.26 (a)). Un thermocouple est placé dans un trou central du corps de l'outil à plaquettes spécialement conçu pour effectuer des mesures de température.

Un branchement permet la connexion entre le thermocouple et le porte-outil, facilitant la transmission des données vers un PC. Cependant, en raison de la position du thermocouple dans le corps de l'outil, il y a un décalage temporel significatif d'environ 4 secondes entre l'entrée de l'outil et l'observation de l'évolution thermique (Figure I.26 (b)).

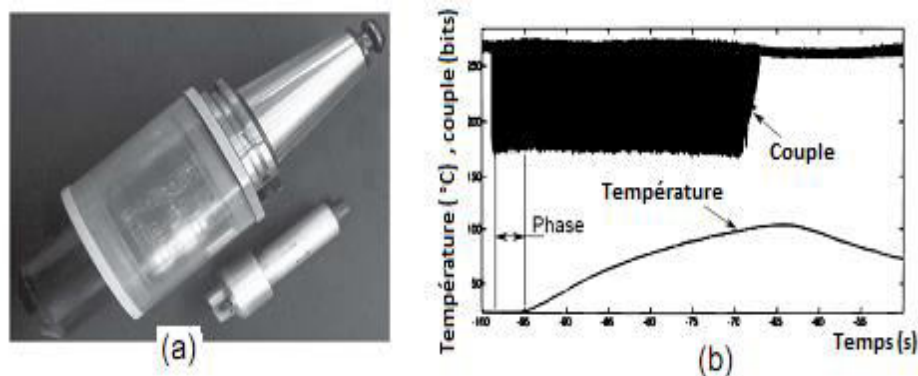


Figure I.26 : a) Instrumentation d'un porte-outil avec thermocouple et (b) Acquisition des signaux d'effort et de température [49].

Le but de l'étude réalisée par Yujing et al. [Yujing et al 2014] [50] était d'évaluer l'influence des paramètres de coupe sur la température de fraisage du Ti6Al4V. La température de coupe a été mesurée par les chercheurs à l'aide d'un thermocouple semi-artificiel (Figure I.27). Les résultats ont démontré une corrélation positive entre l'élévation des paramètres de coupe et l'élévation de la température de la pièce-outil. Cela implique que la vitesse, l'avance et la profondeur de passe plus élevées augmentent la température pendant le processus de coupe.[50]

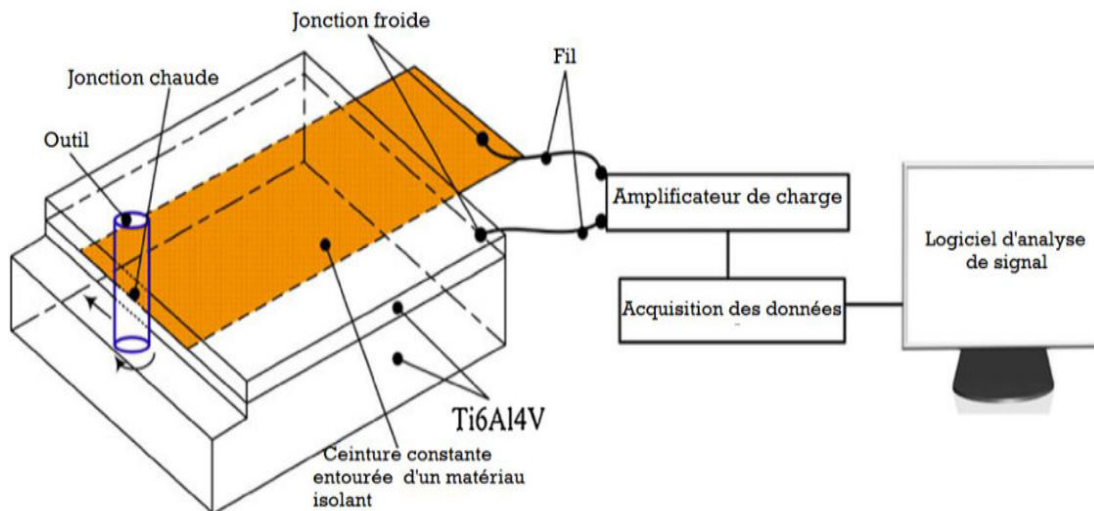


Figure I.27 : Schéma d'un dispositif de mesure de température avec un thermocouple Semi-artificiel [50].

[W.J. Bai et al 2008] [51] Ils ont utilisé un dispositif de thermocouple semi-artificiel développé pour mesurer la température de Al 7050-T7451 lors de fraisage à grande vitesse. Les résultats ont révélé une corrélation satisfaisante entre les valeurs théoriquement prédites et les valeurs mesurées.

L'étude de Liao et al. [Liao 2008] [52] a examiné les essais de rainurage lors du fraisage avec un outil en carbure. À une vitesse de coupe inférieure à 56 m/min, la température restait en dessous de 650 °C et la dureté du matériau augmentait. Cependant, à des vitesses de coupe très élevées (au-delà de 124 m/min), la température devenait excessive pour l'outil en carbure, entraînant des défauts de bavures et le collage des copeaux sur l'outil pendant le fraisage périphérique (voir figure I.28).

La présence de ces défauts ralentissait la suppression des nouveaux copeaux, ce qui provoquait une augmentation significative de la température. Cette chaleur supplémentaire ne pouvait pas être dissipée par les nouveaux copeaux [52].

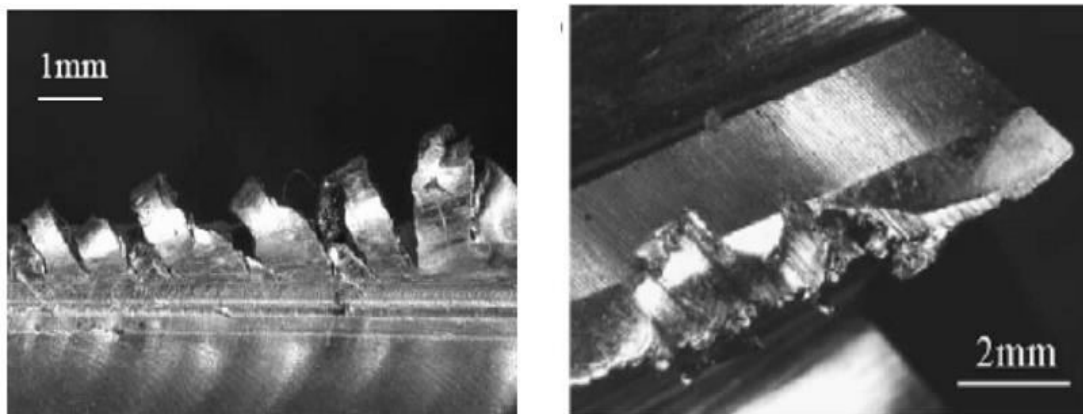


Figure I.28: Défauts de bavures et collage de copeaux sur l'outil pendant le fraisage périphérique [52].

[Ruihu Zhou1 2020] [53] a utilisé un thermocouple artificiel pour mesurer l'appréciation de la température à une certaine profondeur de la surface. Le thermocouple est inséré dans un trou percé dans la pièce, à une profondeur de 10 mm. La pièce est en bronze nickel-aluminium (NAB), un matériau largement utilisé dans les équipements marins. La Figure I.29 illustre le dispositif expérimental utilisé pour mesurer la température de fraisage, où les thermocouples sont espacés de 20 mm et placés à un écart de 10 mm de la paroi latérale de la pièce.

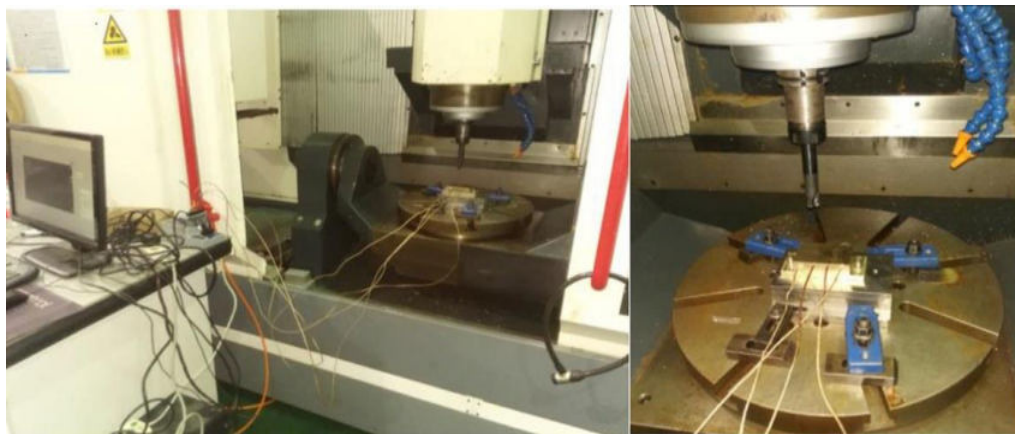


Figure I.29: Montage expérimental pour mesurer la température [53].

[G. Le Coz et D. Dudzinski 2014] [54] ont utilisé un thermocouple spécialement développé pour mesurer la température superficielle et le gradient de température de la surface usinée (voir Figure I.30-a) ainsi que de la couche sous-surface (voir Figure I.30-b) lors du fraisage périphérique à sec d'Inconel 718 pour différentes valeurs de vitesse de coupe.

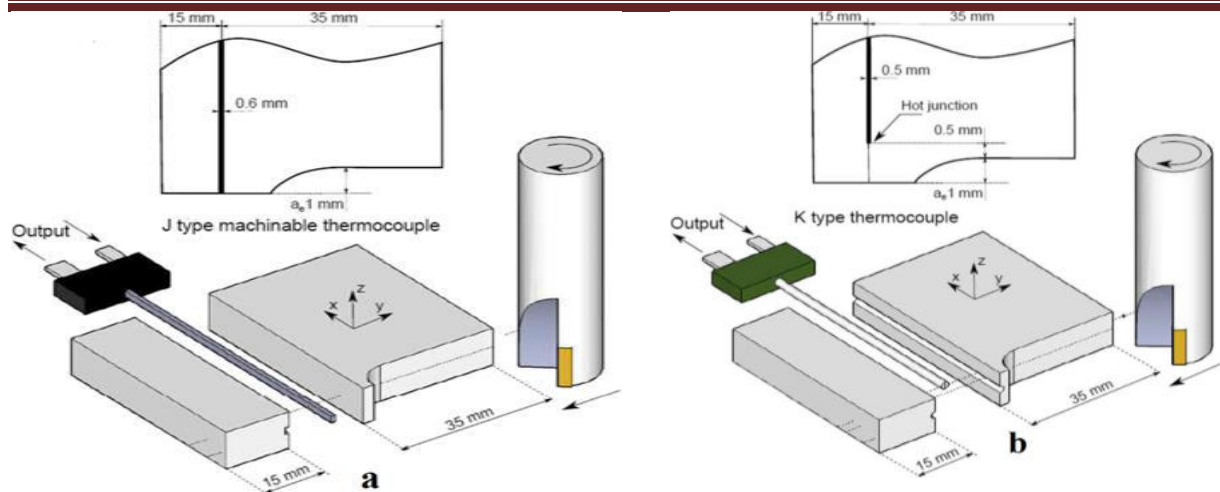


Figure I.30 : Mesure la température superficielle (a) et de la couche de sous- surface (b) [54].

Les conclusions principales sont les suivantes:

- ✚ Un gradient élevé de température de la surface à la sous-surface a été observé, particulièrement à des vitesses de coupe élevées. Pour une épaisseur de couche de 0,5 mm, le gradient de température peut atteindre 600 °C à une vitesse de coupe de 320 m/min. La faible diffusivité thermique de l'Inconel 718 est la cause de cette forte variation de température.

- ✚ Une valeur minimale du gradient de température a été remarquée pour une vitesse de coupe de 60 m/min. Cette vitesse de coupe semble être la plus efficace lors du fraisage périphérique à sec d'Inconel 718.

[Umut Karaguzela et al. 2016] [55] ont utilisé une nouvelle technique expérimentale, illustrée dans la figure I.31, pour mesurer la température de surfacage et valider le modèle analytique développé. Les résultats montrent une concordance satisfaisante entre les prédictions du modèle et les expériences de coupe à sec menées à différentes vitesses de coupe. Cette méthode expérimentale permet de mesurer la température transitoire générée lors des opérations de fraisage.

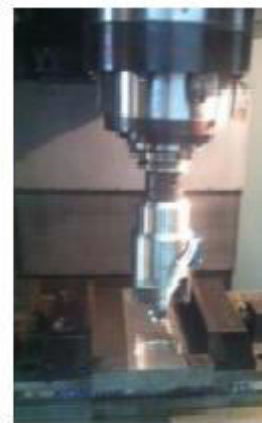
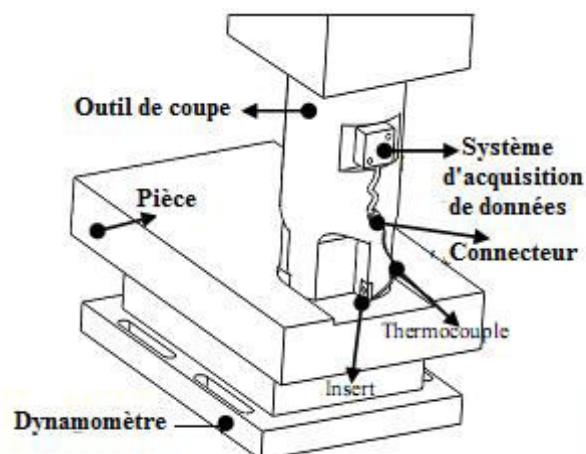


Figure I.31: Montage expérimental pour mesurer la température de surfacage [55].

Dans leur étude, Andrej Czana et al. [Andrej Czana et al. 2017][56] ont utilisé un thermocouple spécialement développé pour mesurer la température de surface, et dans la sous-surface de fraisage périphérique de l'alliage de nickel type Inconel 718. Les mesures réalisées ont permis de déterminer les températures ainsi que la distribution thermique.

[Pavel Kovac et al., septembre 2018] [57], ont utilisé la méthode de la température du thermocouple pour prédire la longévité de l'outil. Cette approche implique la mesure de la température à l'interface entre l'outil, la pièce, et le copeau. Le thermocouple représente une solution pratique et peu coûteuse, ce qui le rend facilement accessible aux utilisateurs. L'équipe de recherche a développé un logiciel dédié à l'enregistrement et au traitement des valeurs mesurées (voir Figure I.32).

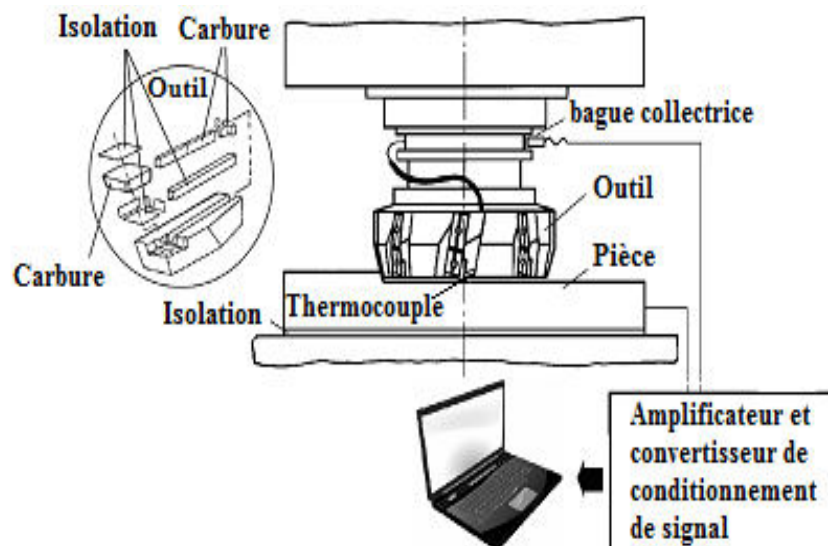


Figure I.32 : Système d'acquisition pour mesurer la température de l'outil [57].

Dans leur étude expérimentale, Alexandre II et al. [Alexandre II et al. 2018][58] ont examiné l'impact des paramètres de coupe sur la température interne des plaques minces en Al2024-T3 lors du fraisage. Comme illustré dans la Figure I.33, ils ont utilisé un dispositif de mesure comprenant des thermocouples intégrés dans la plaque en aluminium pour évaluer les distributions de température sous la surface en aluminium.

Les résultats de l'étude indiquent que la température interne de la pièce augmente à mesure que l'avance diminue [58].

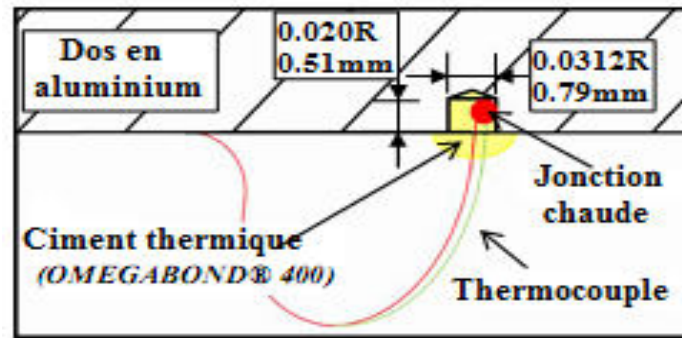


Figure I.33 : Schéma d'un dispositif de mesure utilisant un thermocouple intégré pour mesurer les distributions de température [58].

b) Approche Numérique et Analytique.

Les approches numériques et analytiques sont les plus couramment utilisées pour modéliser la température. Joliet et al. [Joliet et al., 2013] [59] ont développé un modèle par éléments finis pour calculer la quantité de chaleur thermique transférée à la pièce pendant le fraisage. Ce modèle prend en compte divers facteurs, tels que la vitesse de coupe, le type de contact entre l'outil et la pièce, et l'épaisseur du contact. La Figure 1-34 présente la modélisation du maillage de la section de contact entre la pièce et l'outil. Les résultats démontrent que même avec une augmentation de la profondeur axiale engagée, la température de la pièce diminue, tout en maintenant un transfert de chaleur constant vers la pièce.

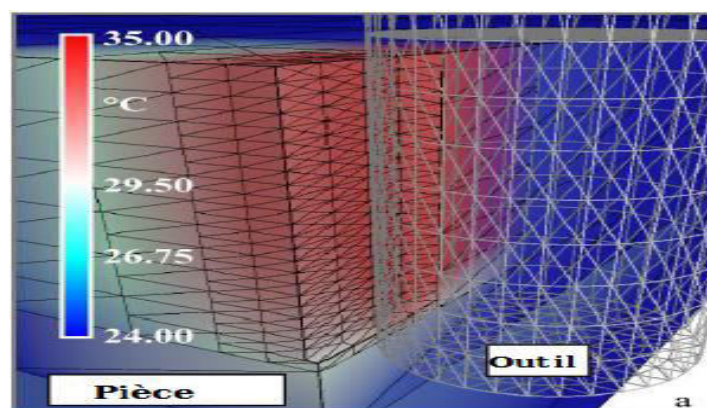


Figure I.34 : Modèle de fraisage par éléments finis [59].

[D.J. Richardson et al. 2005] [60] ont utilisé un modèle thermique développé pour prédire les températures induites par le processus de fraisage périphérique à sec des alliages d'aluminium aérospatiaux. L'approche analytique développée permet de déterminer l'amplitude et la distribution des températures de la pièce. Ce modèle intègre des éléments de la nature physique du processus de coupe du métal avec des approches analytiques développées pour le meulage, fournissant ainsi un modèle thermique de fraisage périphérique directement applicable à l'industrie.

Dans leur étude, [Wadii Yousfi et al. 2017][61] ont utilisé une nouvelle méthode d'analyse basée sur la modélisation analytique en 3D pour appréhender les variations de température dans les trois zones de coupe pendant l'usinage, notamment le fraisage. Ils ont également appliqué cette méthode pour calculer les profils de température en prenant en compte les flux de chaleur générés par les actions mécaniques. L'intégration de techniques numériques et analytiques visant à simuler les actions mécaniques, les déformations, les taux de déformation et les variations de température vise à améliorer la compréhension des phénomènes liés à l'usinage et à optimiser les paramètres de coupe en vue d'obtenir de meilleures performances.

Dans leur recherche [I. Lazoglu et B. Bugdayci 2014] [62], une nouvelle modélisation thermique fondée sur une approche semi-analytique a été appliquée pour prédire rapidement et avec précision les températures de l'outil pendant les opérations de fraisage en bout. Les mesures de température obtenues avec une caméra infrarouge ont été comparées aux résultats de cette modélisation. La Figure I.35 présente les températures maximales simulées.

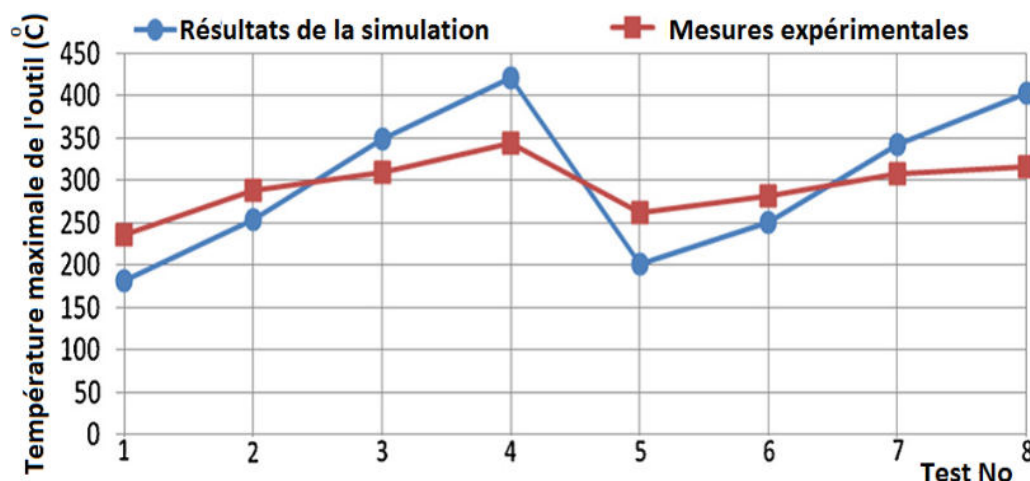


Figure I.35: Comparaison entre les températures maximales simulées et celles obtenues par caméra infrarouge [62].

Dans leur étude, [M. Abdelkrim et al. 2018] [63], ils ont utilisé la méthode de surface de réponse pour étudier l'impact des paramètres de coupe sur la température lors du fraisage de l'acier au carbone AISI 1045.

Les effets de l'interaction entre ces conditions et la température de coupe ont été évalués et représentés en 3D, comme illustré dans la Figure I.36.

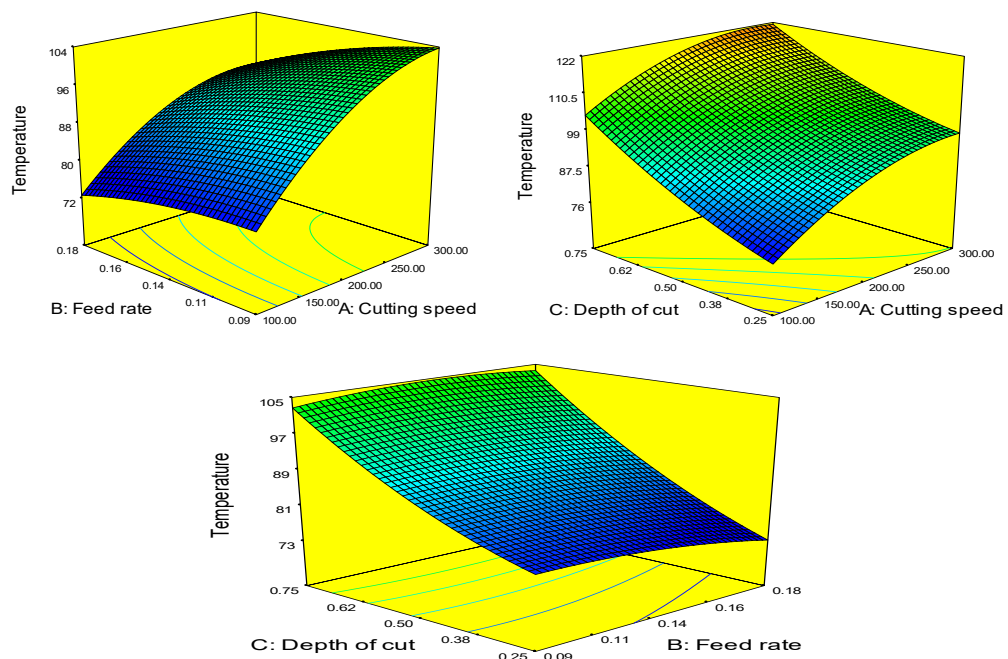


Figure I.36 : Effets des facteurs de coupe sur la température [63].

Les conséquences indiquent que même si la vitesse d'avance n'a aucun effet significatif sur la température, celle-ci augmente considérablement en fonction de la profondeur de passe et de la vitesse de coupe.

[Yujing Sun et al., 2014] [64] ont étudié l'effet des paramètres de coupe sur la température lors du fraisage de Ti6Al4V en utilisant l'ANOVA (analyse de la variance). Les résultats révèlent que la température de l'outil et de la pièce augmente de manière similaire en fonction des paramètres de coupe.

[Zhenxin Peng et Jiao Li, 2018] [65] ont employé un modèle théorique ainsi qu'un modèle de simulation pour évaluer la répartition de la température dans la pièce. Ils ont également utilisé une méthode d'évaluation inverse itérative afin de déterminer l'intensité de la source de chaleur et évaluer les déformations résultantes. Grâce à cette approche intégrée, ils ont pu recueillir des données significatives sur les températures et les déformations résultantes du micro-fraisage. Ces résultats ont contribué à une meilleure compréhension et optimisation du processus de fabrication.

[Yong Yang et Weiwei Zhu, 2014] [66] ont utilisé un modèle d'éléments finis pour étudier la température de coupe dans le contexte d'une coupe hélicoïdale à double tranchant. Leurs résultats ont révélé que la zone la plus chaude se situe à l'interface entre l'outil et la pièce, plus près du bord de coupe, et que la surface de coupe de l'outil est plus chaude que la face dépouillée. La compréhension détaillée de la répartition de la température s'avère cruciale pour améliorer les processus de fabrication et optimiser les performances des outils.

[Nasri et al., 2011] [67] ont analysé la répartition de la température dans l'outil en carbure, le copeau et la pièce à usiner à l'aide d'un modèle par éléments finis (FE). Selon ce modèle, la principale source de chaleur était la section de cisaillement. Ils ont utilisé la force de coupe élémentaire obtenue à partir d'une modélisation analytique pour calculer la chaleur élémentaire générée dans ces zones. Le rapport entre la chaleur élémentaire générée et le volume de la zone de cisaillement a été utilisé pour calculer la génération de chaleur volumétrique.

[Mohsen Soori et Mohammed Asmael, 2021] [68] ont employé la méthode des éléments finis (FEM) pour simuler l'opération de fraisage dans un environnement virtuel. Cette approche a démontré sa capacité à prédire les températures lors de la création de copeaux pour des matériaux difficiles à couper tels que le superalliage à base de nickel gH4133B, l'alliage de titane Ti6Al4V et l'Inconel 718. Les figures I.37 et I.38 illustrent les distributions de température obtenues lors de la simulation du fraisage.

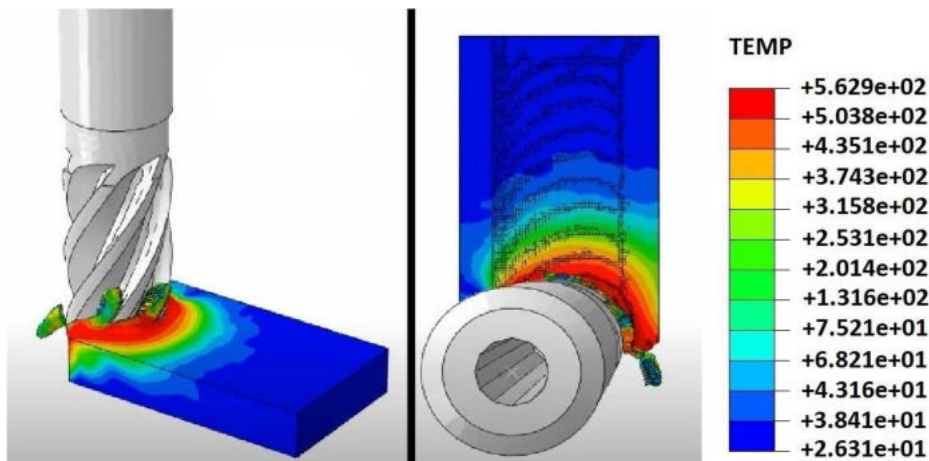


Figure I.37: Distribution de température lors du fraisage de l'Inconel 718 [68].

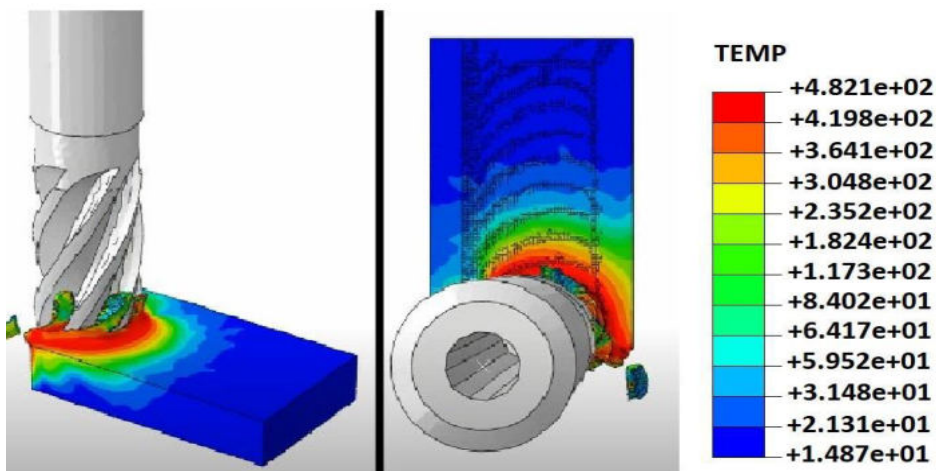


Figure I.38: Distribution de température lors du fraisage de l'alliage de titane Ti6Al4V [68].

La distribution des températures dans une zone de coupe peut être déterminée à l'aide de diverses méthodes expérimentales. L'utilisation de caméras infrarouges est l'une de ces techniques, efficaces pour mesurer la température et sa distribution [69].

[Y. Guétari, 2005][70] a utilisé une caméra à rayonnement infrarouge capable de capturer 3200 images par seconde afin de déterminer la température pendant le processus de fraisage.

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons discuté du processus de fraisage, En se concentrant sur diverses opérations telles que le fraisage en bout, le fraisage combiné, etc. De plus, nous avons examiné les conditions de coupe associées à ces opérations.

Nous avons également étudié les mécanismes d'endommagement des outils en fraisage, ainsi que l'importance de la température de coupe et son impact sur le processus de fraisage.

En outre, nous avons présenté en détail diverses techniques de mesure de la température afin de mieux comprendre précisément les variations thermiques lors de l'usinage. Ensuite, nous avons discuté des facteurs qui influent sur la température de coupe pendant le fraisage.

Enfin, nous avons effectué une synthèse bibliographique sur la température de coupe en fraisage en nous appuyant sur des études numériques, expérimentales et analytiques. Cette synthèse nous a aidés à situer notre étude dans le contexte existant et à acquérir une meilleure compréhension.

Chapitre II

Procédure expérimentale

II .1 Introduction

La détermination des températures dans une zone de coupe peut s'effectuer par diverses approches expérimentales. Parmi les méthodes modernes et efficaces, l'utilisation de caméras infrarouges présente de nombreux avantages, notamment la possibilité de mesurer rapidement la température sans être exposé à la chaleur. Cette technique permet d'évaluer la température en se basant sur l'énergie thermique émise par la surface d'un objet, rendant la caméra infrarouge un outil précieux pour une évaluation précise.

Ce chapitre présente la méthodologie expérimentale et la technique utilisée dans cette recherche, incluant des détails sur le matériau et l'outil utilisé. La planification expérimentale, la mise en place des essais pratiques, l'équipement utilisé, les conditions expérimentales de coupe et les étapes nécessaires pour déterminer la température sont toutes des parties importantes de l'expérience.

II .2 Présentation de l'équipement

II .2 .1 Matériau utilisé

L'acier AISI 1060 a été utilisé dans notre thèse. Cet acier est largement répandu et est représenté dans la figure II.1. Il est spécifiquement élaboré pour la production de pièces automobiles et d'équipements de construction, ainsi que pour son application dans les secteurs pétrolier et gazier, notamment dans la fabrication de tuyaux et d'équipements de forage.

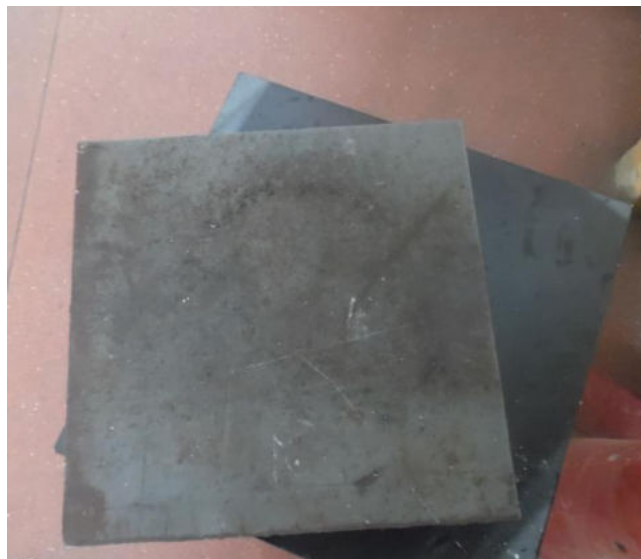


Figure II .1: Matériau utilisé AISI 1060.

a) Domaine d'application

L'acier AISI 1060 trouve une application très large dans diverses pièces nécessitant une bonne résistance aux chocs, telles que les axes, les engrenages, les vis sans fin, les paliers, les pignons, la boulonnerie, ainsi que dans la forge pour la fabrication de leviers et d'arbres (voir Figure II.2).



Figure II.2: Pièces fabriquées.

b) Composition chimique

L'AISI 1060 contient une teneur en carbone d'environ 0,6 %. La composition chimique exacte peut varier selon le fabricant et le processus de fabrication utilisé. Le pourcentage des éléments chimiques présents dans l'acier est indiqué dans le tableau II.1:

Eléments	Pourcentages %
Fer (Fe)	98.35% à 98.85%
Manganèse (Mn)	0,60% à 0,90%
Carbone (C)	0,55% à 0,66%
Soufre (S)	0,05% maximum
Phosphore (P)	0,04% maximum
Silicium (Si)	0,15% à 0,35%

Tableau II.1: Composition chimique typique [71].

Il peut également contenir des traces d'autres éléments exemple le cuivre (Cu), le nickel (Ni), le chrome (Cr) et le molybdène (Mo), en fonction du procédé de fabrication et de l'utilisation prévue de l'acier.

c) Propriétés Physiques

Tableau II.2 présente quelques propriétés physiques, qui peuvent varier Suivant de son traitement thermique, de son état de surface et de sa composition précise.

Propriétés physiques	Valeurs
Densité	7.85 g/cm ³
Température de Fusion	1510°C
Conductivité électrique	2,06 × 10 ⁶ S/m

Tableau II.2 : Propriétés physiques de l'acier AISI 1060 [71].

d) Propriétés Mécaniques

Le Tableau II.3 présente quelques propriétés mécaniques de l'acier lorsqu'il est soumis à un processus d'étirage à froid. Ces propriétés peuvent être modifiées en fonction des conditions telles que la température et la vitesse de déformation.

Caractéristiques mécaniques	Valeurs
Résistance à la traction	620-700 MPa
Module d'élasticité	190 à 210 GPa
Dureté Brinell	183 - 217 HB
Dureté knoop	180 à 220 HK
Dureté Rockwell	74 - 81 HRB
Dureté Vickers	160 - 190 HV

Tableau II.3 : Propriétés mécaniques de l'acier AISI 1060 [71].

e) Propriétés Thermiques

Le tableau II.4 présente quelques propriétés thermiques qui peuvent varier en fonction de conditions spécifiques, telles que la composition chimique, le traitement thermique et la microstructure du matériau.

Propriétés thermiques	valeurs
Coefficient de dilatation	11 μ m/m.°c
Conduction thermique	50 W/m. °K
Capacité thermique moyenne	460 - 480 (J/ (kg.°K)).
Point de fusion	1480°C - 1520°C

Tableau II.4: Quelques propriétés thermiques de l'acier AISI 1060 [71].

f) Microstructure de l'AISI 1060

L'AISI 1060 est un acier au carbone contenant environ 0,60 % de carbone. Il appartient à la catégorie des aciers à haute teneur en carbone. La microstructure de cet acier a été observée au microscope optique, comme indiqué dans la Figure II.3 [72].



Figure II.3: Microstructure de l'AISI 1060 [72].

II .2 .2 Outil de coupe

L'outil de coupe utilisé était constitué de plaquettes Sandvik 409 R du type 08T308E-ML 1040, employées pour effectuer tous les tests (voir Figure II.4)



Figure II.4: Plaquettes 08T308E-ML 1040 [73].

II .2 .3 Machine utilisée

La fraiseuse Rapimill 700 utilisée lors de l'expérience est représentée à la Figure II.5. Cette machine a une avance maximale de 157 mm/min et une vitesse maximale de broche de 10^4 tr/min.



Figure II.5: Fraiseuse de type Rapimill 700.

II .2 .4 Appareils de mesure utilisés (caméra infrarouge)

Pour mesurer la température de coupe, nous utilisons une caméra thermique infrarouge intelligente de type FLIR A325, représentée dans la Figure II.6.

Cette caméra est utilisée pour des applications de recherche scientifique, notamment pour obtenir une imagerie thermographique précise et effectuer des mesures de température répétées avec fiabilité.

Ces images sont analysées par le logiciel de contrôle FLIR Tools afin de déterminer la température maximale dans la section coupée. La FLIR A325 génère plus de 76 000 mesures de température précises dans chaque image.

La caméra infrarouge associée au logiciel ResearchIR permet de visualiser et d'enregistrer des images à grande vitesse. Elle offre la possibilité d'effectuer un post-traitement des événements thermiques rapides et de tracer l'évolution des températures dans le temps à partir des images en direct ou enregistrées [74].



Figure II.6: Caméra de thermographie infrarouge FLIR A325 [74]

- **Caméra thermique FLIR A325 :** Caméra infrarouge fabriquée par FLIR Systems (Forward Looking Infrared). Ces caméras sont utilisées pour capturer et visualiser les images thermiques, convertissant les différences de température en une image visible.
- **FLIR A325 ResearchIR :** Est une combinaison d'une caméra thermique de la marque FLIR et du logiciel ResearchIR.
- **ResearchIR :** Est un logiciel développé par FLIR, spécialement conçu pour analyser et gérer les données thermiques provenant des caméras infrarouges.

II .3 Préparation des essais

Les différentes étapes pour préparer les essais sont les suivantes:

II .3.1 Préparation de la pièce brute.

Les étapes de préparation des échantillons à utiliser dans le test de température de coupe comprennent tout d'abord la découpe des pièces à la taille souhaitée à l'aide d'une scie mécanique. Ensuite, toutes les surfaces sont surfacées à l'aide d'une fraiseuse universelle. Enfin, les formes nécessaires sont réalisées, comme indiqué sur la Figure II.7.

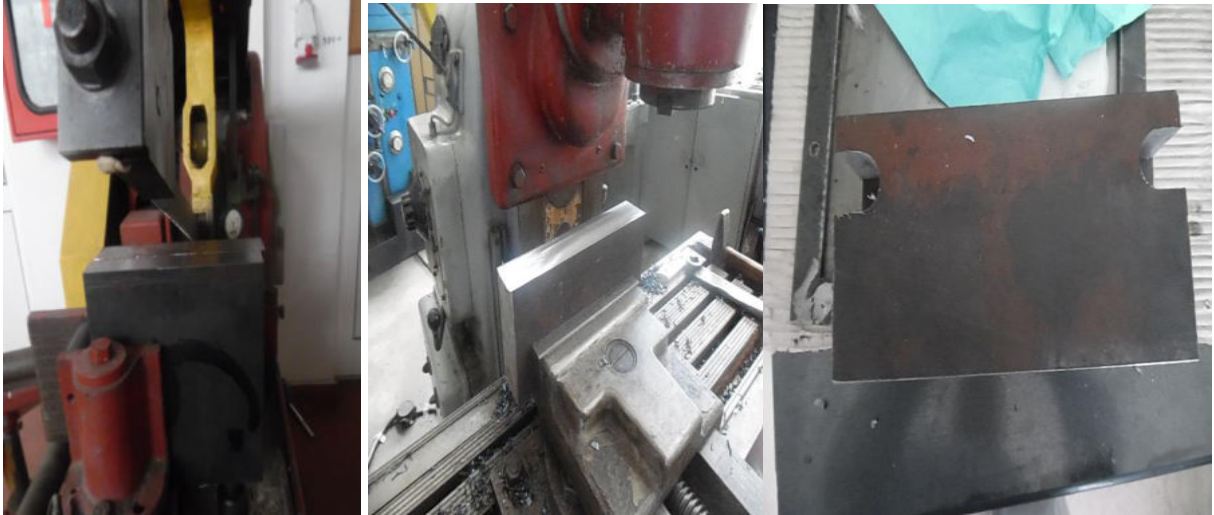


Figure II .7: Étapes de préparation des pièces.

II .3.2 Montage de la pièce

Une fois la pièce d'acier préparée, on fixe la pièce sur la table de travail à l'aide de brides (Figure II.8).



Figure II.08: Fixation de pièce sur la table de travail.

II .3.3 Montage de l'outil

Le maintien de la fraise se fait à l'aide d'un porte-outil, tel que présenté dans la Figure II.9. Afin d'assurer un usinage optimal, il est important que la pièce à usiner et la fraise soient positionnées perpendiculairement l'une par rapport à l'autre.

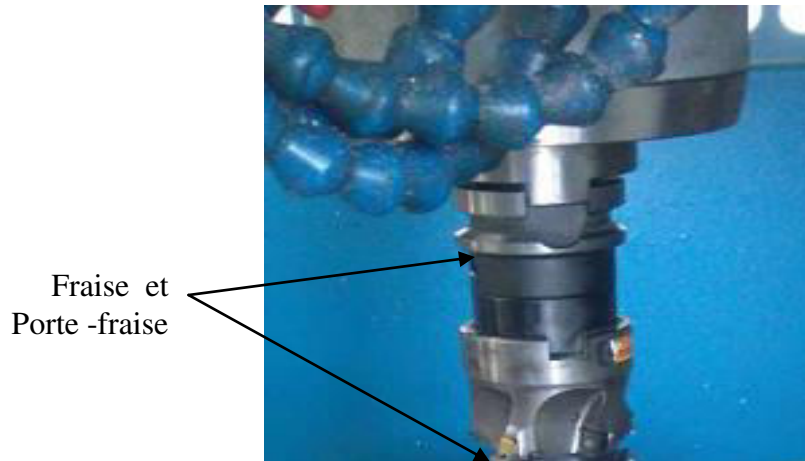


Figure II.9: Positionnement de la fraise.

II .3.4 Montage de la caméra infrarouge

Dans ce travail, La température a été déterminée à travers d'une caméra FLIR A325; cette caméra est placée orthogonalement au flux de la pièce, pour mesurer la température sur une face latérale figure II.10.

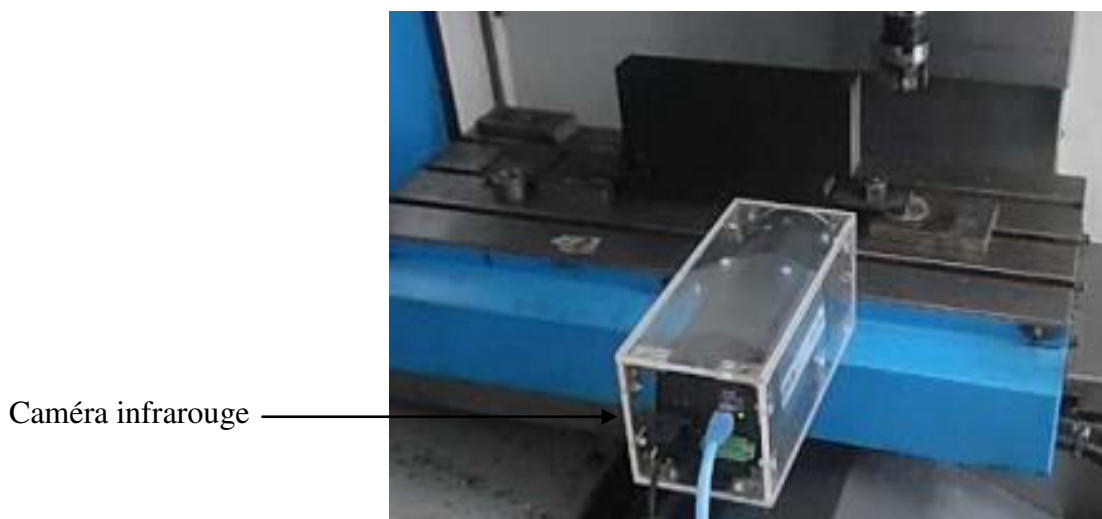


Figure II.10: Caméra de thermographie infrarouge placée orthogonalement au flux de la pièce pour mesurer la température de coupe sur une face latérale [63].

II .4 Réalisations expérimentales

II .4 .1 Préparation des expériences

Afin de déterminer l'émissivité, une peinture noire mate est appliquée à une zone de la surface de la pièce pour afficher une émissivité supérieure à 0,95 (Figure II.11).



Figure II.11: Peinture noire mate est appliquée à une zone de la surface de la pièce.

Cependant, plusieurs facteurs influent sur l'émissivité d'un corps, notamment la température, la configuration de mesure, la composition et la géométrie de la surface mesurée. La précision de cette technique dépend de la méthode d'étalonnage utilisée, principalement liée à l'estimation de l'émissivité.

De plus, avec les caméras infrarouges, tous les matériaux n'ont pas la même capacité à absorber ou émettre de l'énergie infrarouge par rayonnement.

Il est donc indispensable d'ajuster l'émissivité pour s'adapter au matériau à mesurer et obtenir une mesure plus précise.

II .4 .2 Démarches à suivre pendant les essais

Les tests de fraisage ont été réalisés avec une fraiseuse CNC de type Rapimill 700 de la marque Knuth, en utilisant des conditions de coupe à sec.

Les tests ont été effectués en surfaçant des pièces prismatiques en acier au carbone AISI 1060.

Tous les essais ont été réalisés dans un environnement identique.

Le tableau II.5 présente les conditions expérimentales utilisées.

Conditions de coupes expérimentales		
Avance par dent (fz mm/dent)	Vitesse de coupe (Vc mm/min)	Profondeur de passe (ap mm)
0.09	100	0.25
0.12	150	0.5
0.15	200	0.75
0.18	250	
	300	

Tableau II.5: Conditions expérimentales utilisées.

Les essais sont menés de la manière suivante :

- ✚ Mise en position de la pièce sur la table de fraiseuse.
- ✚ Réglage de l'avance, de la profondeur de passe et choix de la plage de vitesse.
- ✚ Mesure de la température.
- ✚ Démonter l'insert.
- ✚ Observation visuelle régulière des plaquettes utilisées (surfaces de coupe et de dépouille).
- ✚ Analyse et traitement des résultats.
- ✚ La qualité de la performance est fortement influencée par deux facteurs: le matériau utilisé et la géométrie de l'outil.

II .5 Banc d'essai

Il est essentiel de connaître la température de coupe car cela affecte considérablement la sélection des matériaux ainsi que les conditions d'usinage les plus appropriés.

La détermination de la température pendant les opérations de fraisage est très difficile en raison des obstructions des copeaux, du mouvement rotatif de l'outil et de la complexité de la géométrie de l'outil. Une configuration expérimentale est utilisée pour mesurer la température (Figure II.12).

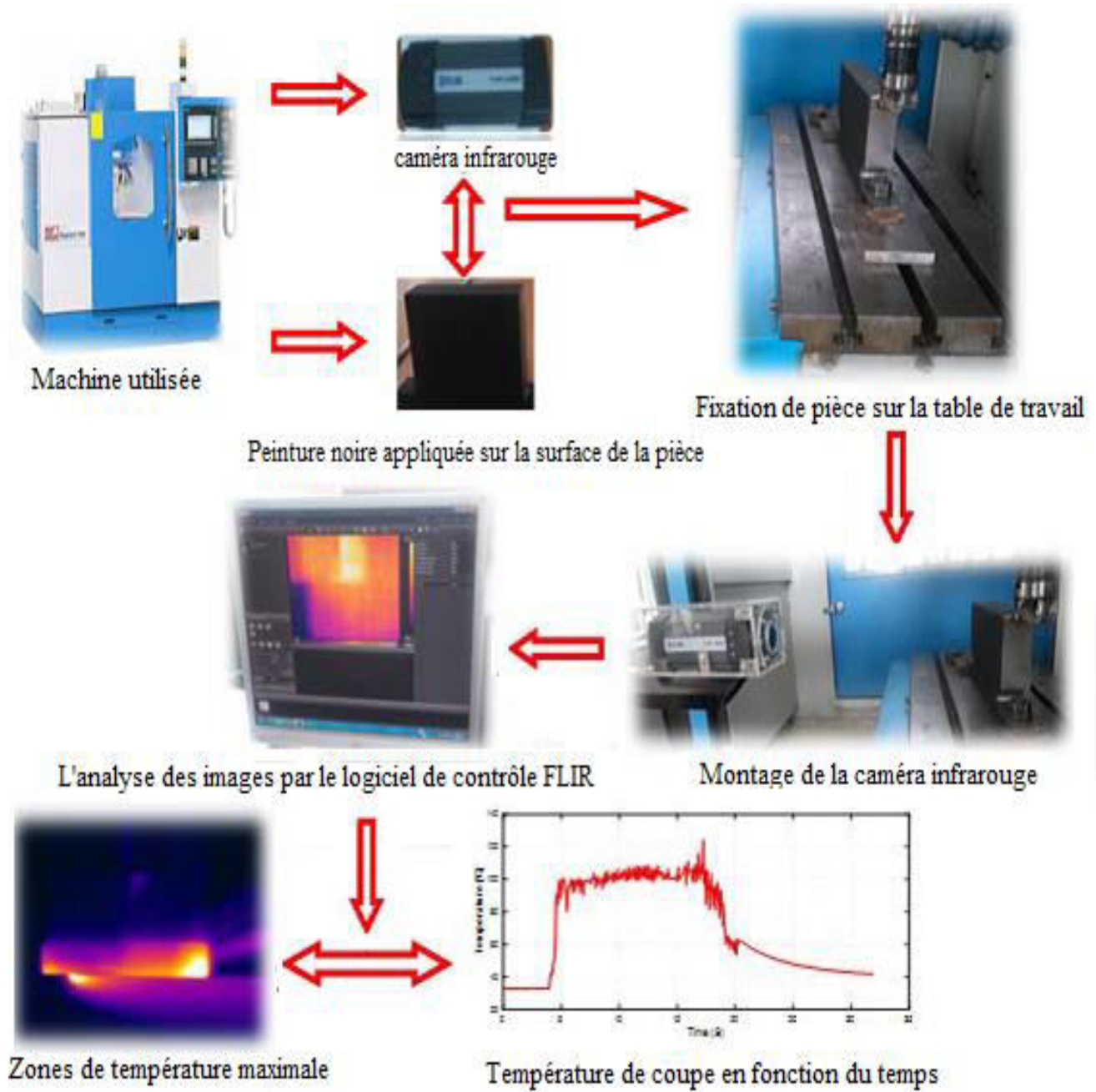


Figure II.12 : Procédures à suivre pour déterminer la température.

II .6 Conclusion

L'utilisation d'une caméra infrarouge se révèle avantageuse pour déterminer la température maximale pendant le fraisage de l'acier AISI 1060 avec des outils en carbure. Cette caméra permet une mesure précise de la température dans la zone de coupe au fil du temps, offrant la possibilité d'enregistrer simultanément le profil de la température de coupe et sa variation au cours du processus. La méthode expérimentale adoptée dans cette étude pour évaluer la température de coupe en fraisage est pratique et peut être appliquée de manière réaliste. La technique expérimentale suggérée pour mesurer la température lors du fraisage de l'AISI 1060 à l'aide d'outils en carbure est à la fois pratique et économique, se distinguant par sa facilité d'installation et d'utilisation.

Chapitre III

Résultats et Discussions

III .1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les résultats des tests expérimentaux obtenus, ainsi que leur analyse lors de la coupe. Nous étudions les facteurs qui influencent la température et examinons plus spécifiquement son évolution au fil du temps, en prenant en compte les différentes conditions expérimentales de coupe lors du processus de fraisage. Le but de ces essais était d'approfondir notre compréhension de l'aptitude à l'usinabilité de l'AISI 1060 lors de l'opération de fraisage. En outre, ce chapitre présentera les formes des copeaux qui sont créés en utilisant différents paramètres de coupe.

III. 2 Étude des résultats des tests

III .2.1 Étude de la fidélité du système de mesure

Nous avons réalisé trois essais de mesure de température dans des conditions de coupe identiques afin d'évaluer la précision de notre système de mesure. L'objectif de la vérification de la précision de notre système de mesure est de garantir des résultats fiables et conformes aux normes. Les résultats de chacun de ces essais, qui mettent en évidence la variation de la température de coupe au fil du temps, sont représentés à la figure III.1.

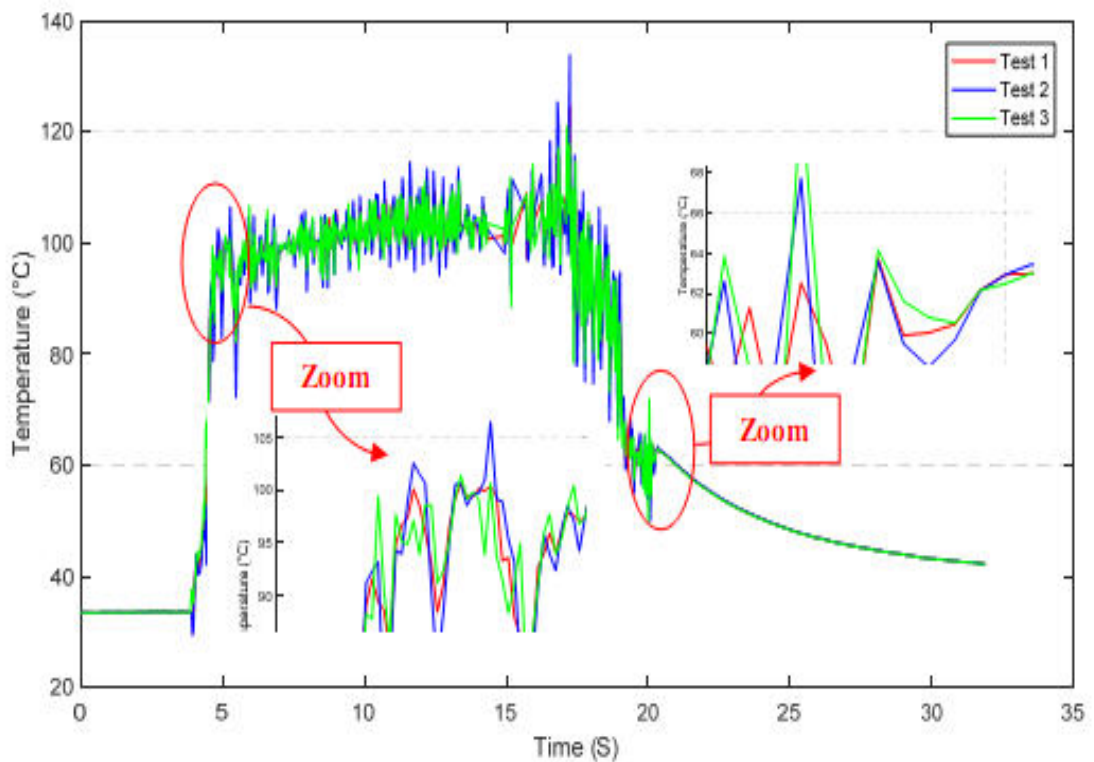


Figure III.1: Étude de la fidélité du système de mesure.

Les résultats des tests de reproductibilité sont regroupés dans le tableau III.1.

Essais	Températures (°c)
Essai 1	69.188
Essai 2	69.255
Essai 3	69.046
Moyenne	30.3225
Ecart-type σ	0.087

Tableau III.1 : Résultats des tests de reproductibilité.

L'équation III.1 suivante donne l'écart-type :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{\text{pred}} - T_{\text{exp}})^2}$$

Les valeurs de température présentent un écart d'environ 0,087 et sont proches de la moyenne. Nous pouvons donc conclure que les mesures de température des trois tests sont identiques.

T_{pred} :Température prédite.

T_{exp} :Température expérimental.

N : nombre des tests (N=4).

III .2.2 Résultats des mesures de température obtenus

Les images de rayonnement thermique représentent les mesures des températures obtenues, comme illustré dans la Figure III.2. Le logiciel ResearchIR permet d'obtenir des informations numériques sur les températures, consultables dans des tableaux ou des graphiques. Il facilite l'exploration visuelle et l'analyse quantitative des images thermiques, permettant ainsi d'analyser les variations de température et de rechercher la température maximale.

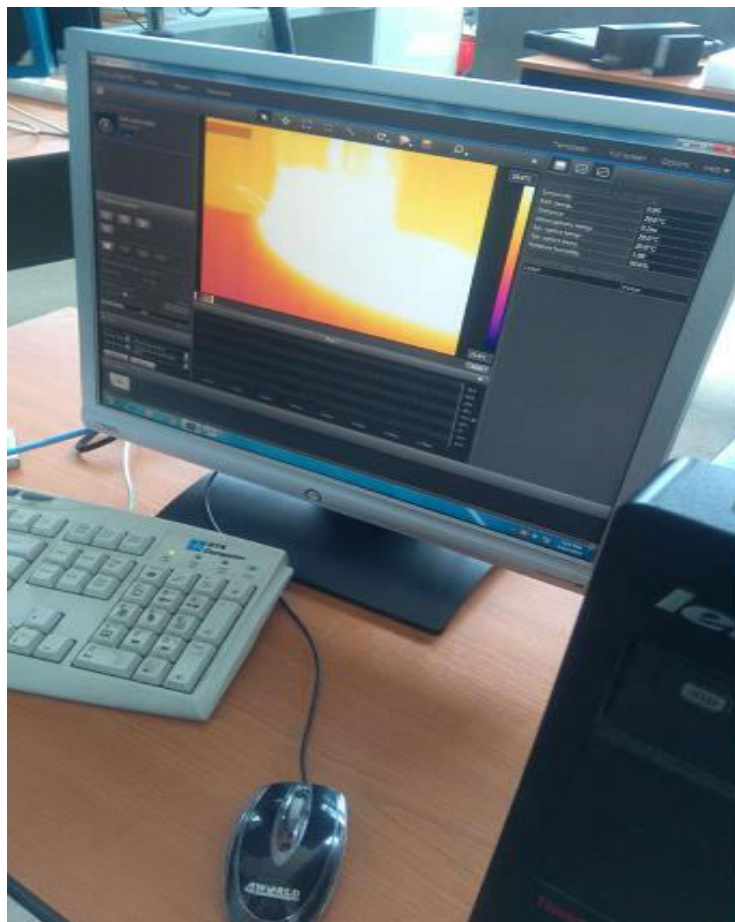


Figure III.2 : L'analyse des images par le logiciel de contrôle ResearchIR pour déterminer la température maximale.

Les principaux paramètres tels que le temps, la vitesse de coupe, l'avance par dents et la profondeur de passe ont un impact significatif sur la température de fraisage de l'acier AISI 1060.

Les résultats des températures liées à des conditions de coupe sont présentés dans le tableau III.2.

a (mm)		0,25	0,5	0,75
fz (mm/dent)	vc (mm/min)	Les valeurs de la température (°C)		
0,09	100	74,73	101,00	91,55
	150	91,62	101,50	117,80
	200	90,10	107,90	112,00
	250	99,54	114,60	125,50
	300	101,40	119,30	127,30
0,12	100	79,23	88,59	105,40
	150	85,59	98,96	114,10
	200	93,00	102,4	117,00
	250	96,65	109,40	120,80
	300	101,50	113,00	123,10
0,15	100	78,46	86,33	104,20
	150	83,90	97,00	112,20
	200	91,14	100,20	122,60
	250	94,49	102,90	118,10
	300	101,60	104,30	122,40
0,18	100	80,39	88,83	103,00
	150	84,25	97,83	110,20
	200	94,59	102,10	120,50
	250	91,50	102,90	123,00
	300	99,65	105,80	126,10

Tableau III.2 : Résultats expérimentaux.

III.2.3 Influence du temps sur la température de coupe

L'évolution de la température en fonction du temps est illustrée dans les figures III.3 a, b, c, d, e, f et g lors du fraisage de l'acier AISI 1060.

Nous avons utilisé différentes vitesses de coupe ($V_c = 100, 150, 200, 250$ et 300 m/min), différentes profondeurs de passe ($a = 0,25$ et $0,5$ mm) et différentes valeurs d'avance par dent ($f = 0,09, 0,12$ et $0,15$ mm/dent).

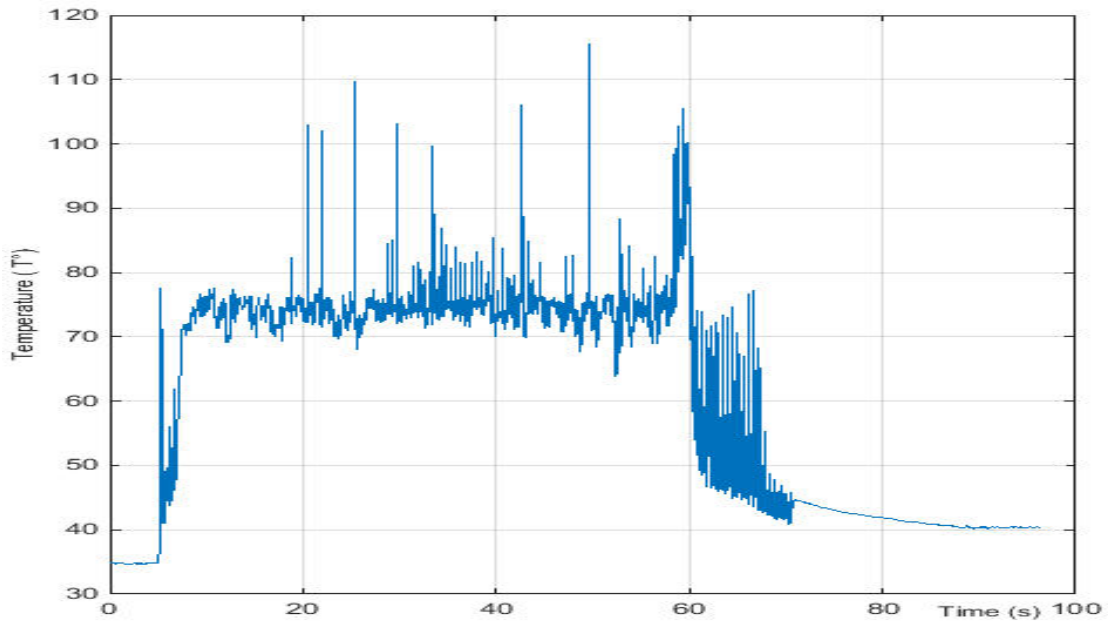


Figure III.3-a: Température en relation du temps pour $v_c=100$ mm/min, $f=0,09$ mm/dent et $a=0,25$ mm .

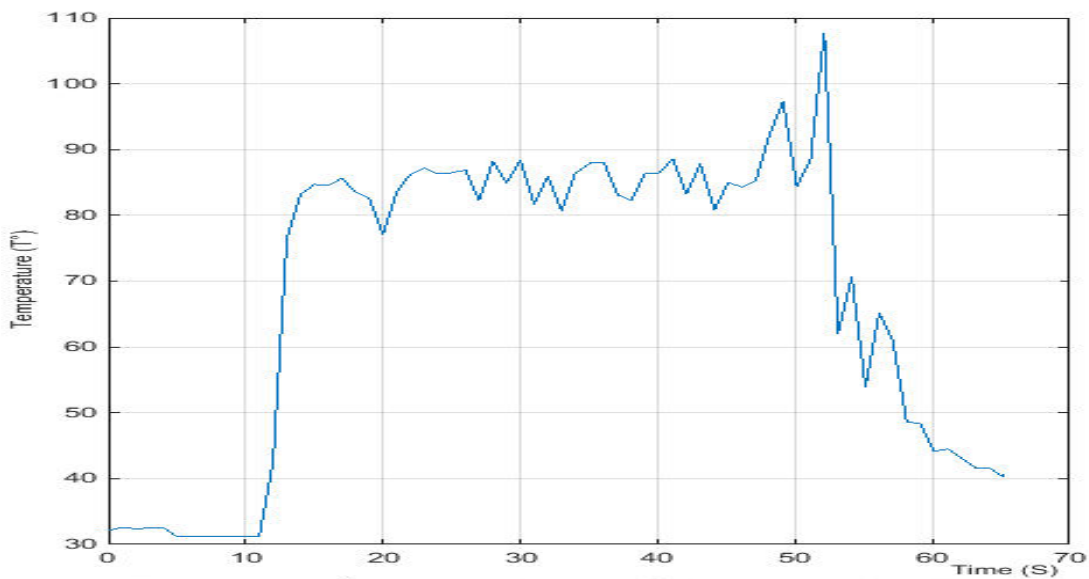


Figure III.3-b: Température en relation du temps pour $v_c=100$ mm/min, $f=0,12$ mm/dent et $a=0,50$ mm.

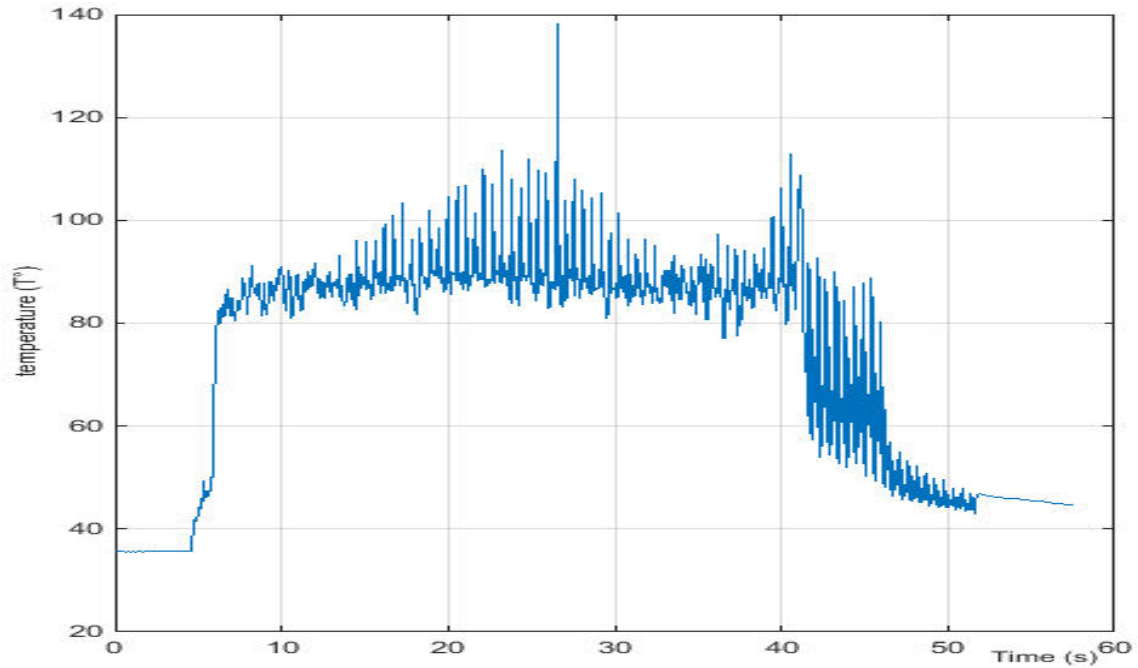


Figure III.3-c: Température en relation du temps pour $V_c = 150$ mm/min,
 $f = 0,09$ mm/dent et $a = 0.25$ mm.

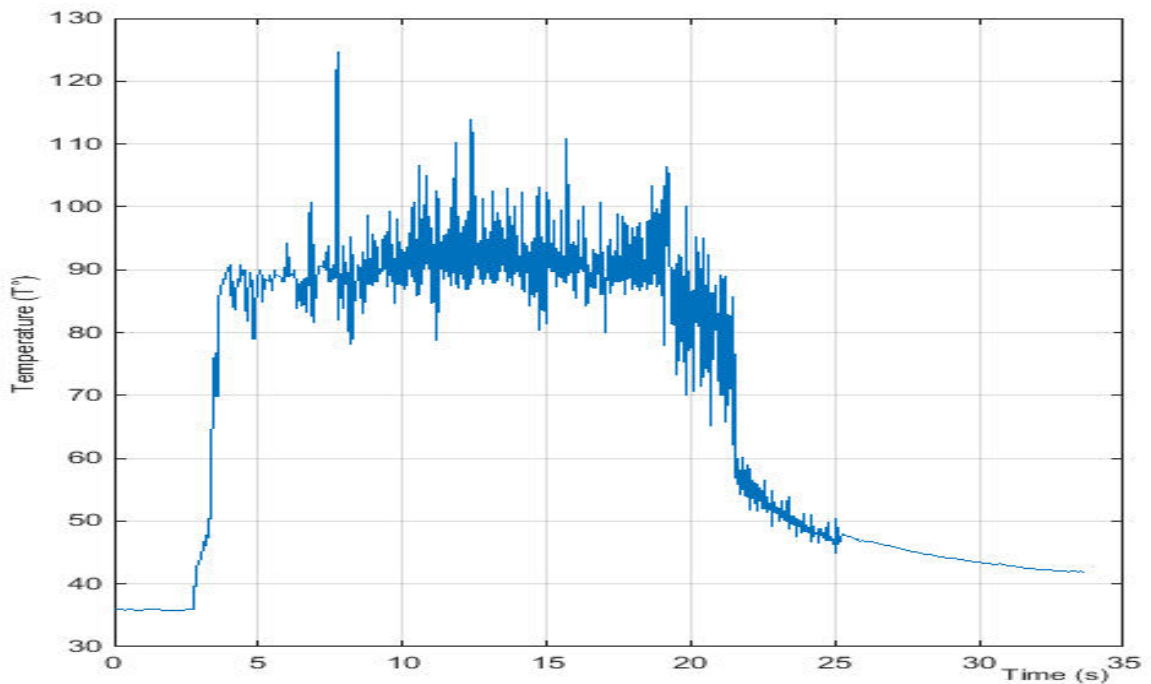


Figure III.3-d: La température en relation du temps pour $V_c = 200$ mm/min,
 $f = 0.15$ mm/dent et $a = 0.25$ mm.

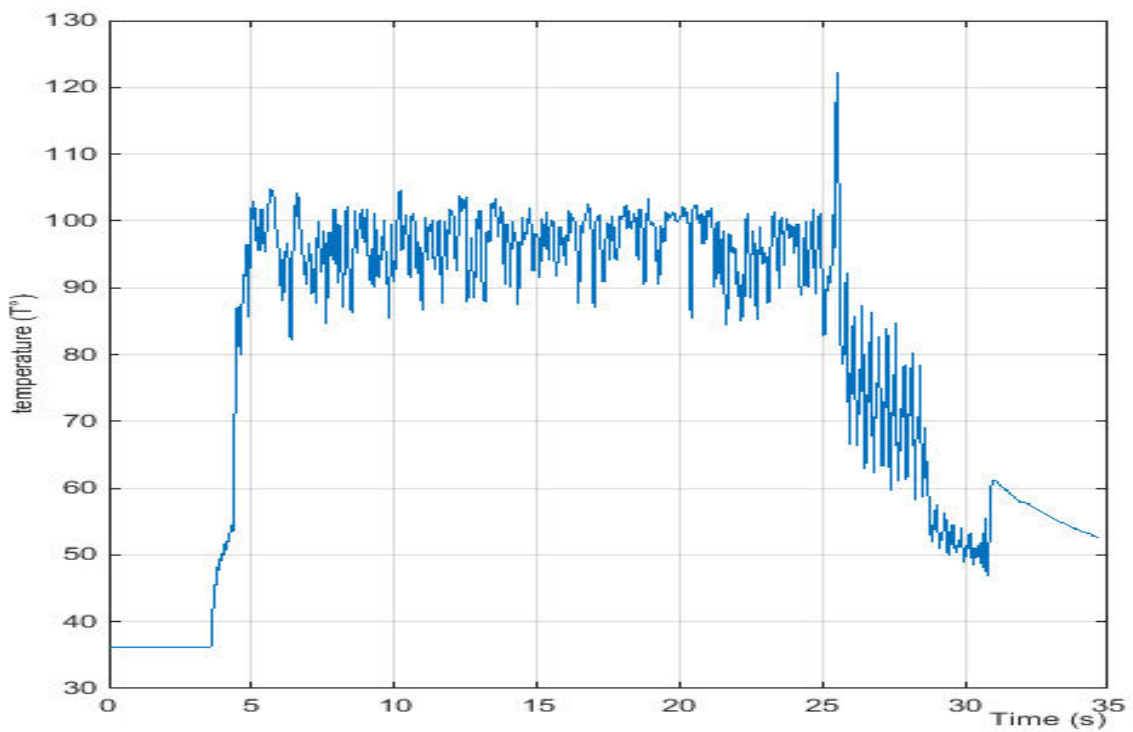


Figure III.3-e: Température en relation du temps pour $V_c = 250$ mm/min,
 $f = 0,09$ mm/dent et $a = 0.25$ mm.

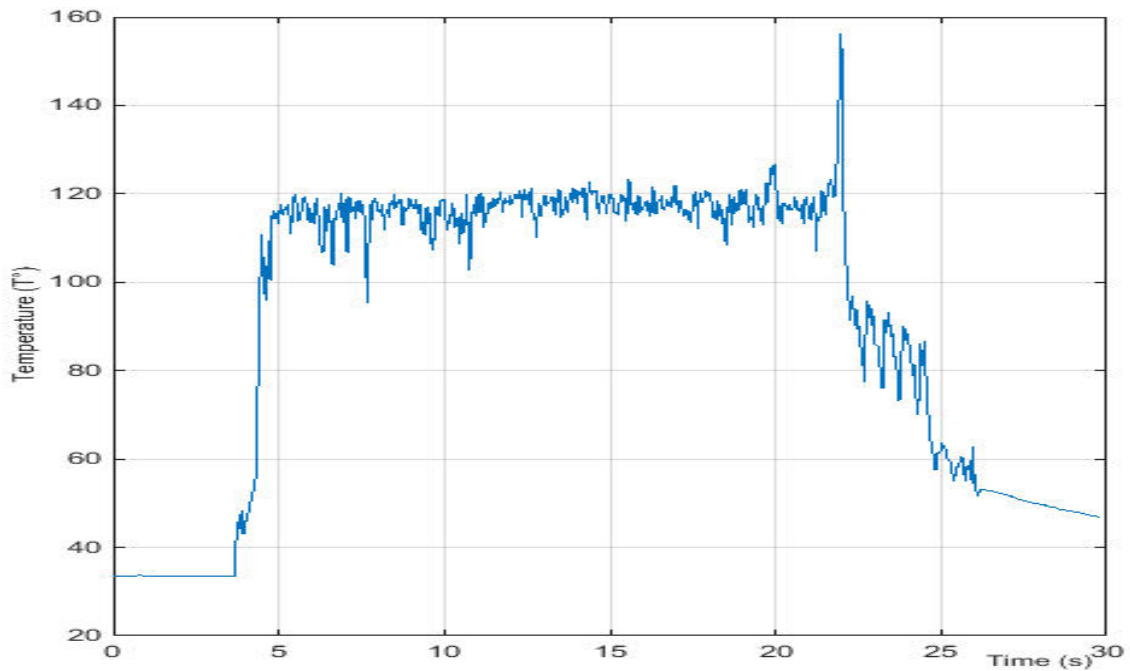


Figure III.3.f: Température en relation du temps pour $V_c = 300$ mm/min,
 $f = 0,09$ mm/dent et $a = 0,5$ mm .

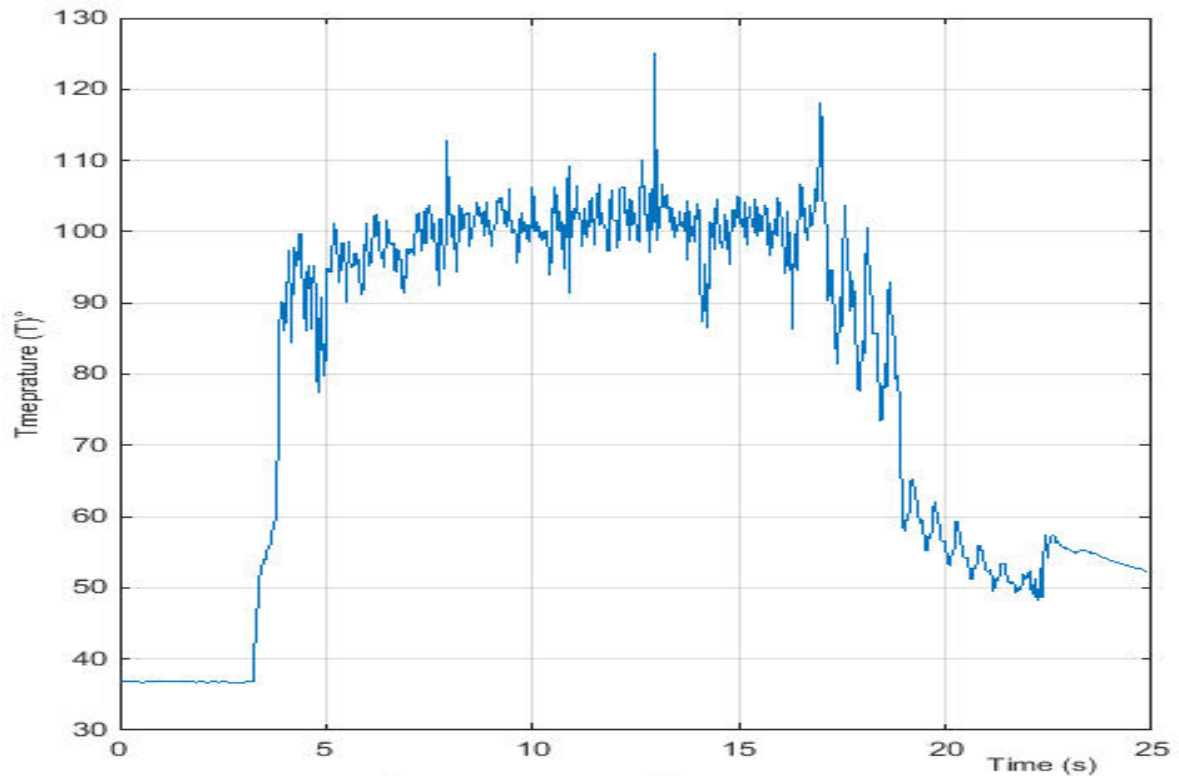


Figure III.3-g: Température en relation du temps pour $V_c = 300$ mm/min, $f = 0,12$ mm/dent et $a = 0,50$ mm.

Comme le montrent les figures III.3 (a, b, c, d, e, f et g), la température de coupe atteint sa valeur maximale pour une vitesse de coupe moyenne (200 m/min) et une profondeur de coupe maximale. Cependant, les températures les plus basses se produisent lorsque la vitesse et la profondeur de coupe sont les plus faibles.

La température de coupe augmente progressivement au fil du fraisage, se stabilise puis réduit après l'opération, comme le montrent les figures III.3.

Cette évolution suit une tendance similaire pour tous les essais, ainsi que pour tous les paramètres de coupe. Chaque courbe de température traverse trois étapes distinctes : expansion, stabilité et réduction.

La zone de température maximale entourée par le cercle et les pics observés par intermittence dans la courbe de la figure III.4 sont le résultat de l'écrasement des copeaux entre l'outil et la pièce, ce qui entraîne une surchauffe de la pièce, comme indiqué par le thermographe annexé à la figure III.4.

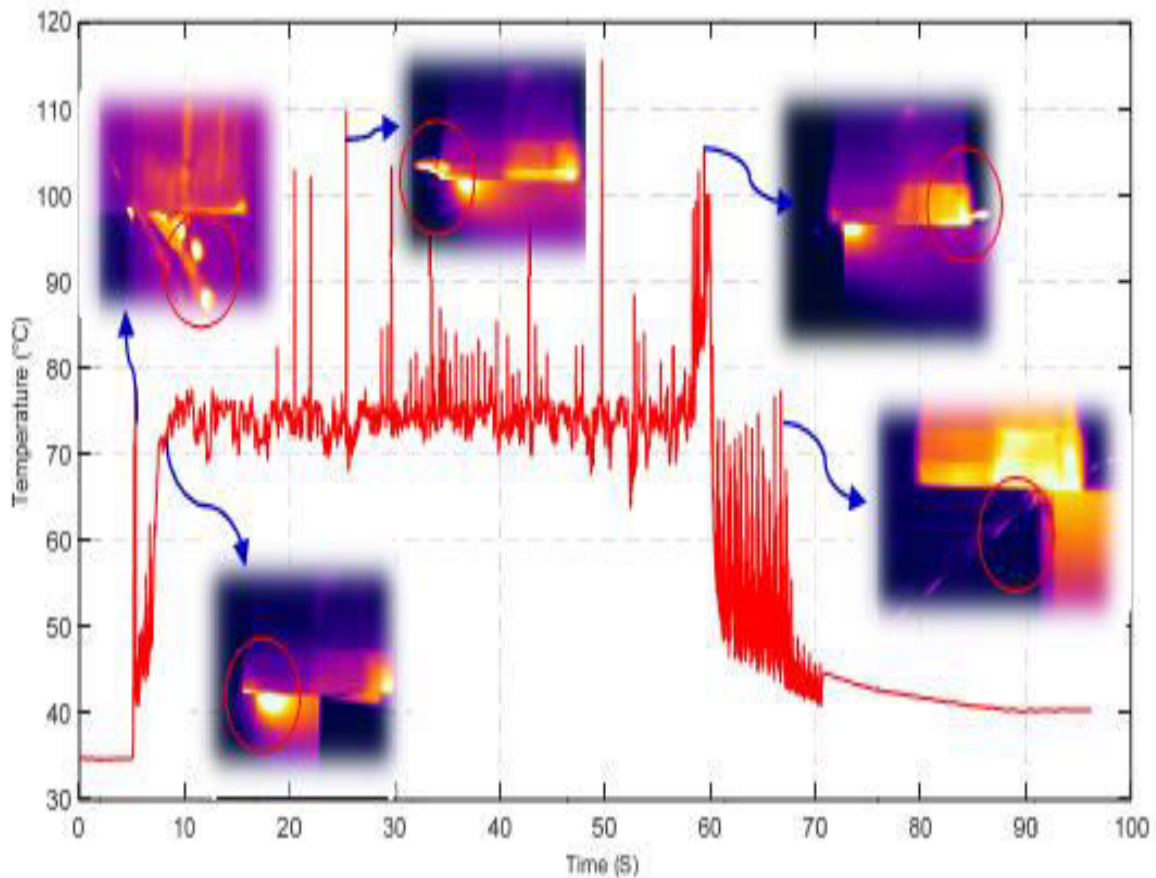


Figure III.4: Changement de température de phase et thermographies associés.

III.2.4 Effet de la vitesse de coupe sur la température

Les valeurs de profondeur de passe ($a = 0.25, 0.5$ et 0.75 mm) et les valeurs d'avance par dent ($f = 0.09, 0.12, 0.15$ et 0.18 mm/dent) ont été utilisées pour déterminer l'influence de la vitesse de coupe sur la température de coupe .

Les figures III.5 a, b et c montrent les résultats de la variation de la température en fonction de la vitesse de coupe.

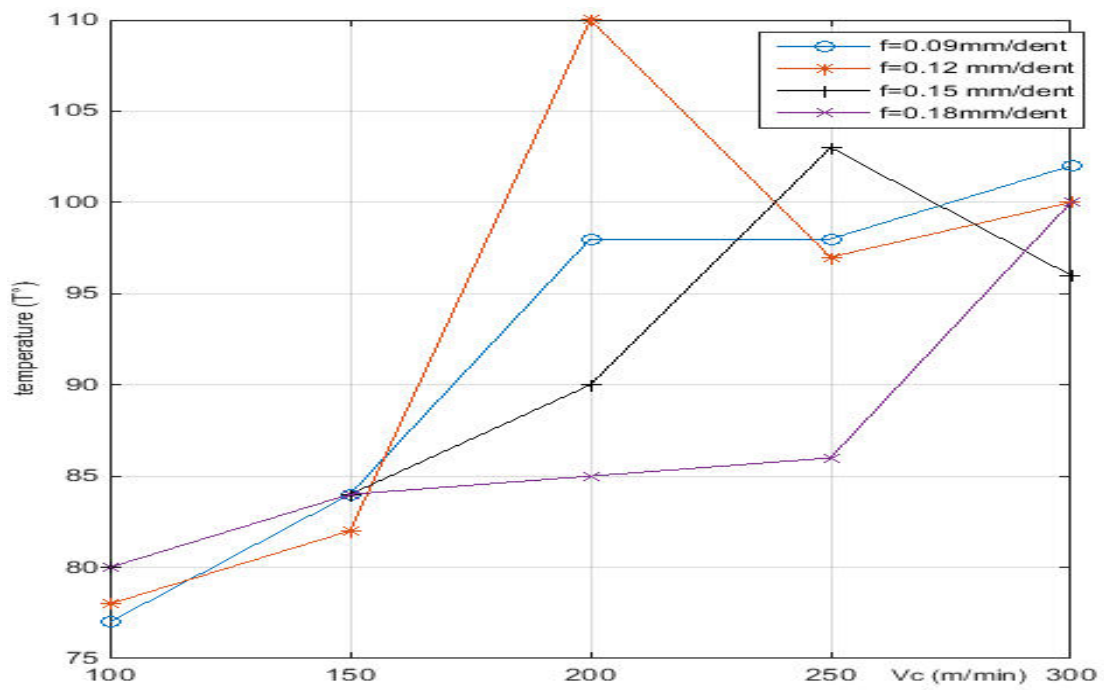


Figure III.5-a : Température de coupe en relation avec la vitesse de coupe pour (f = 0.09, 0.12, 0.15, 0.18mm/dent et a = 0.25mm).

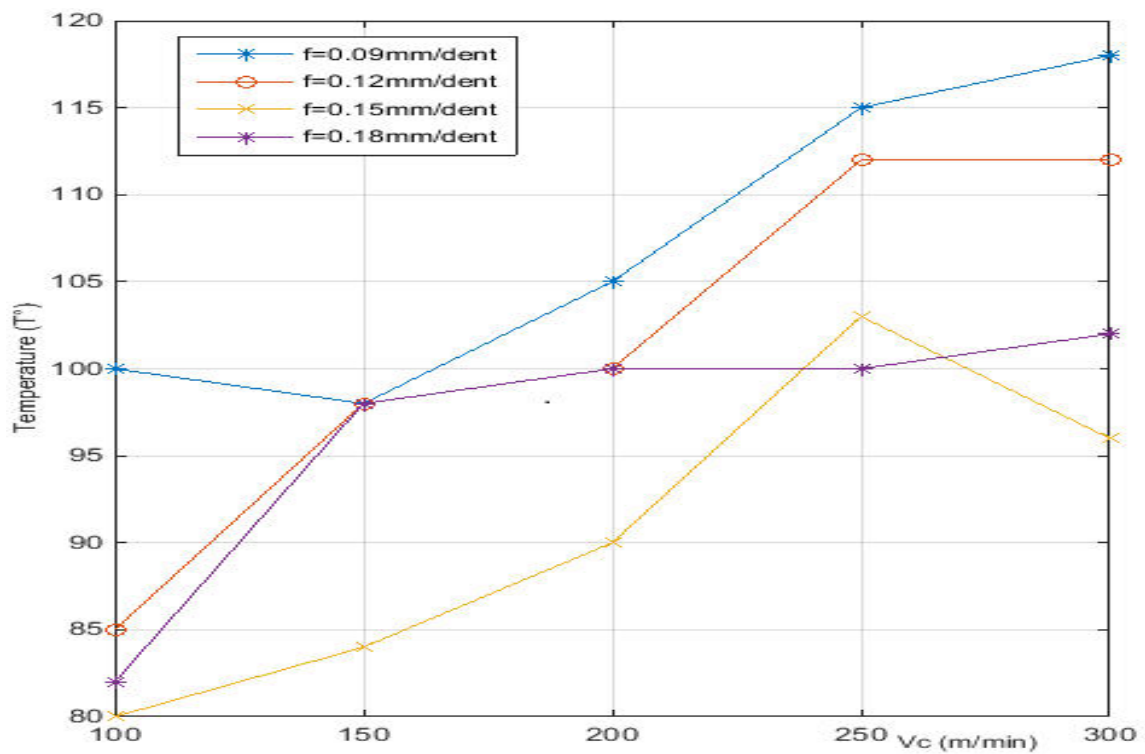


Figure III.5-b : Température de coupe en relation avec la vitesse de coupe pour (f = 0.09, 0.12, 0.15, 0.18mm/dent et a = 0.50 mm).

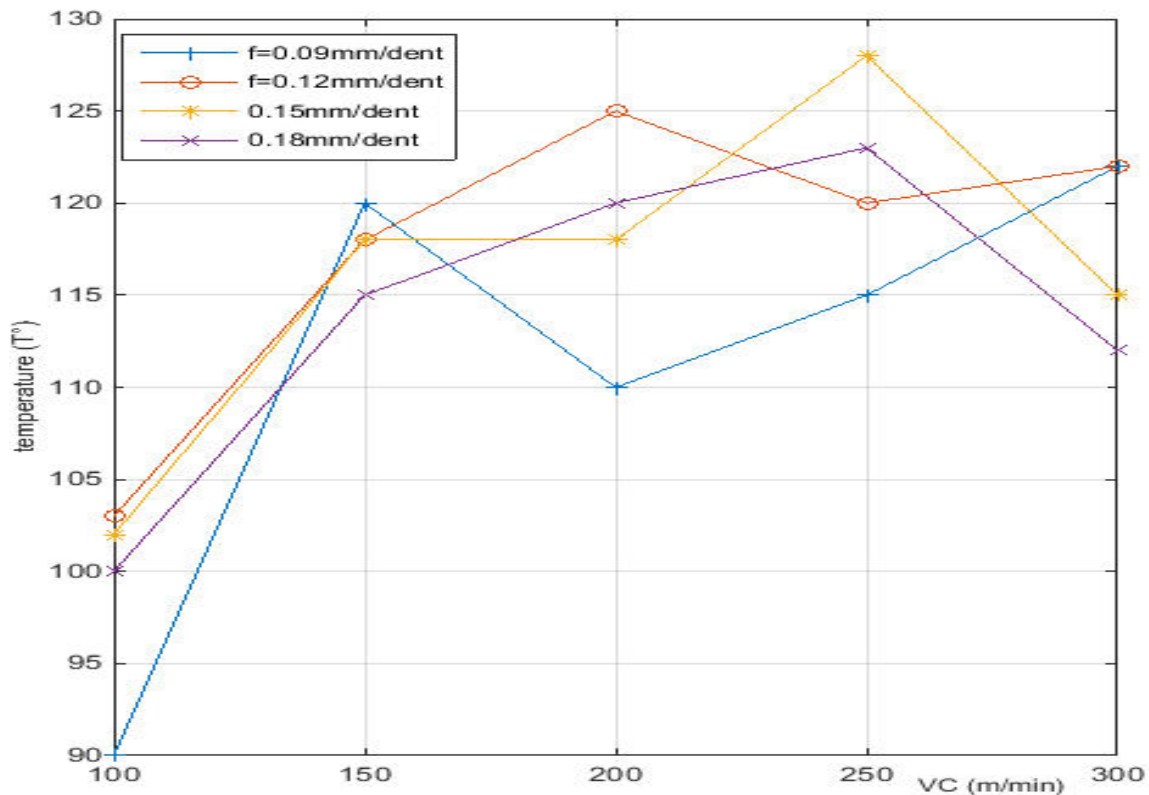


Figure III.5 - c : Température de coupe en relation avec la vitesse de coupe pour ($f = 0.09, 0.12, 0.15, 0.18$ mm/dent et $a = 0.75$ mm).

Les valeurs de profondeur de passe suivantes ($a = 0.25, 0.5$ et 0.75 mm) et les valeurs d'avance par dent ($f = 0,09, 0,12, 0,15$ et $0,18$ mm/dent) sont illustrées dans la figure III.5.a, b, c.

L'impact de la vitesse de coupe sur la température de coupe est significatif, comme le révèle l'analyse des graphiques illustrant son évolution. En effet, quelle que soit la valeur de l'avance par dent, la température augmente automatiquement avec la vitesse de coupe.

III.2.5 Influence de la vitesse d'avance par dent sur la température de coupe

Nous avons étudié l'impact de l'avance par dent sur la température de coupe pour diverses valeurs de vitesse de coupe ($V_c = 100, 150, 200, 250$ et 300 m/min) ainsi que pour différentes valeurs de profondeur de passe ($a = 0.25, 0.5$ et 0.75 mm).

Les figures (III.6 - a, b, c) ci-dessous montrent les courbes de température en relation avec l'avance.

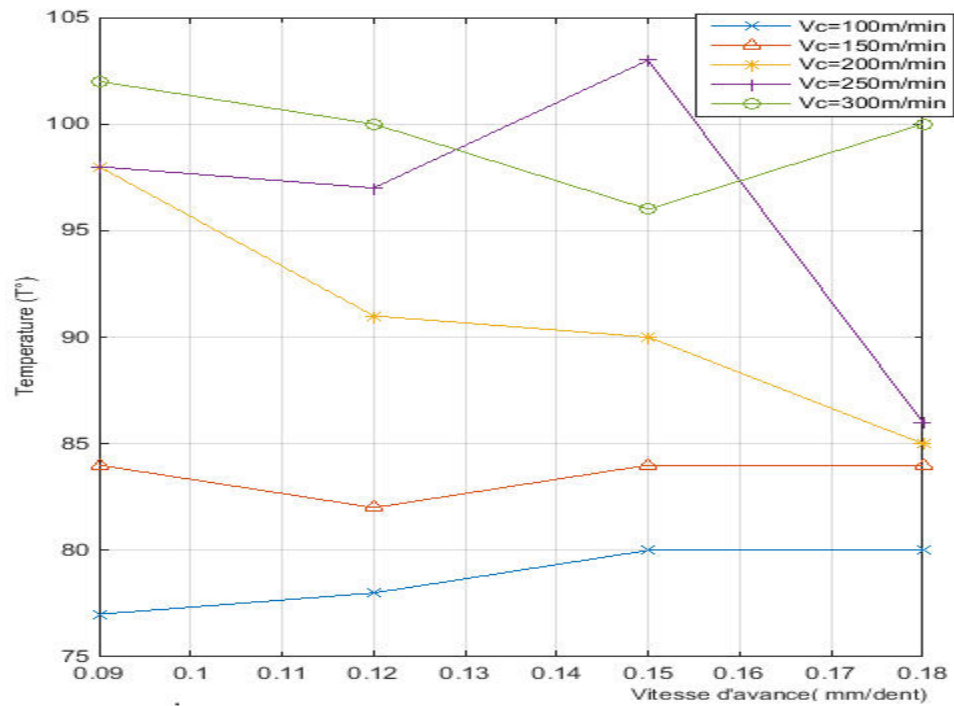


Figure III.6 – a : Température de coupe en relation avec la vitesse d'avance pour a = 0.25 mm et (vc =100, 150, 200, 250 et 300 m/min).

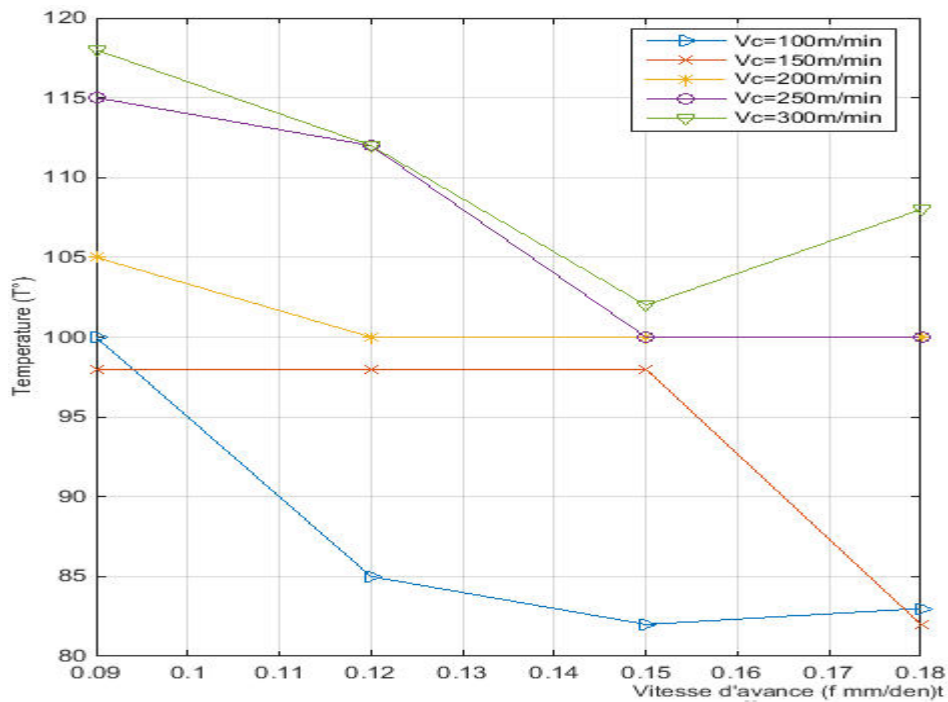


Figure III.6 - b : Température de coupe en relation avec la vitesse d'avance pour a = 0.50 mm et (vc =100, 150, 200, 250 et 300 m/min).

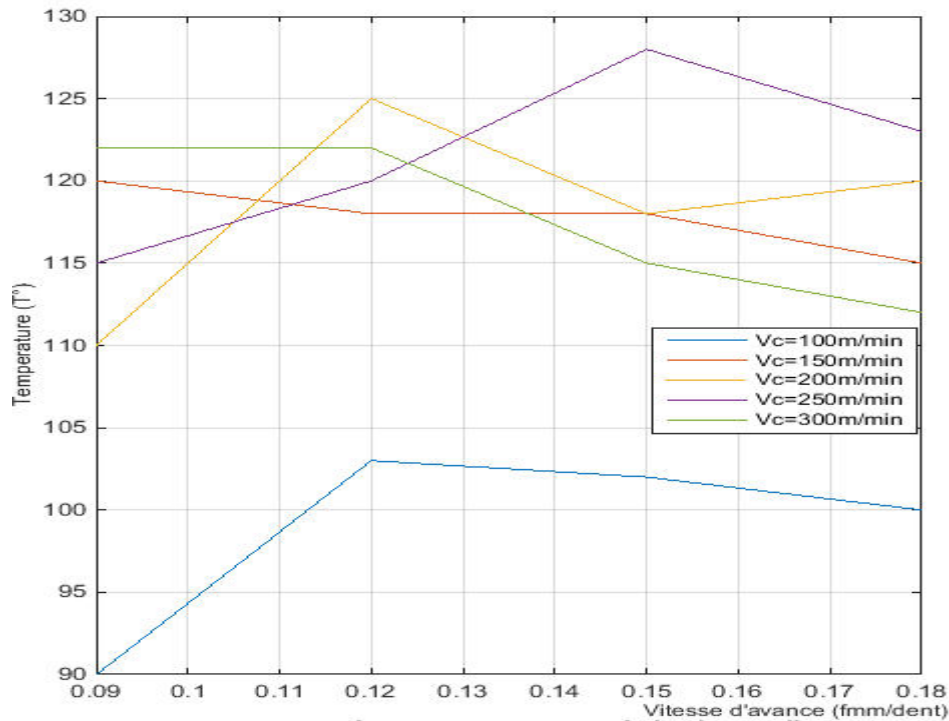


Figure III.6 - c : Température de coupe en relation avec la vitesse d'avance pour $a = 0.75$ mm et ($v_c = 100, 150, 200, 250$ et 300 m/min).

Les figures (III.6-a, b, c, d) démontrent que l'influence de l'avance par dent (vitesse d'avance) sur la variation de température pour différentes profondeurs de passe est négligeable, sauf lorsque les valeurs de la vitesse de coupe atteignent leur maximum.

III.2.6 Influence de la profondeur de passe sur la température de coupe

Les figures (III.7-a, b, c) illustrent les effets de la profondeur de passe sur la température lors du fraisage de l'acier AISI 1060.

Ces effets sont examinés pour différentes valeurs de vitesse de coupe ($V_c = 100, 150, 200, 250$ m/min) et d'avance par dent ($f = 0,09, 0,12, 0,15$ et $0,18$ mm/dent).

Les résultats sont illustrés dans les figures (III.7 a, b, c) ci-dessous :

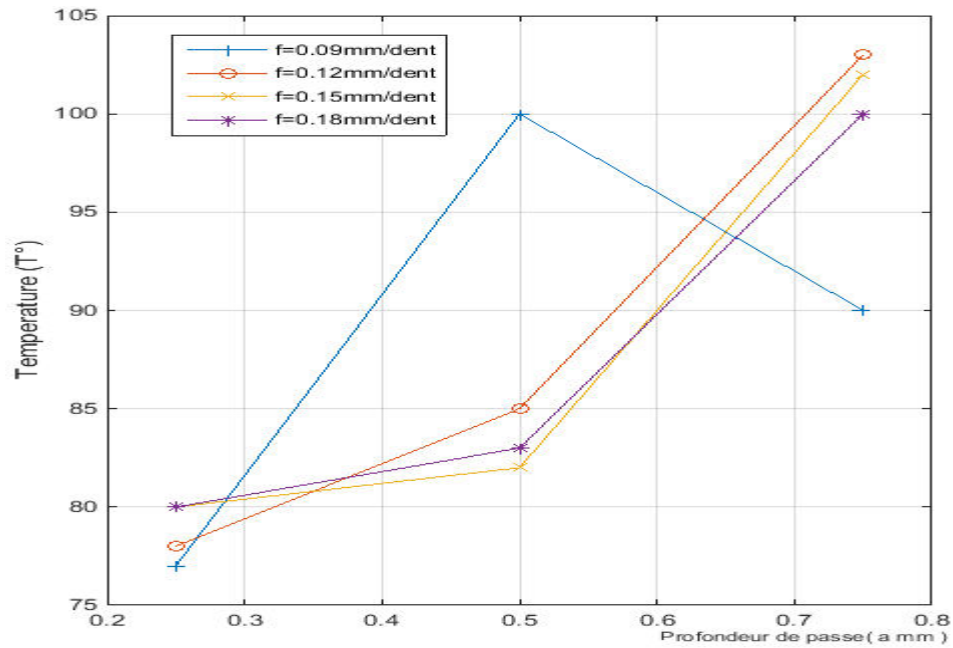


Figure III.7 - a : Température en relation de la profondeur de coupe pour $V_c = 100$ m/min et ($f = 0.09, 0.12, 0.15,$ et 0.18 mm/dent).

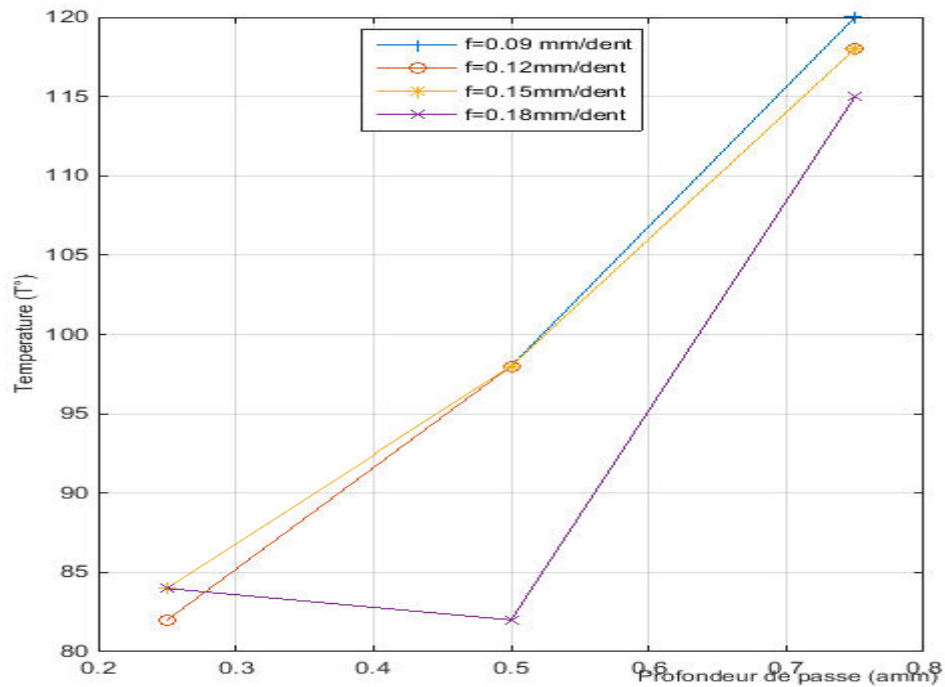


Figure III.7 - b : Température en relation de la profondeur de coupe pour $V_c = 150$ m/min et ($f = 0.09, 0.12, 0.15,$ et 0.18 mm/dent).

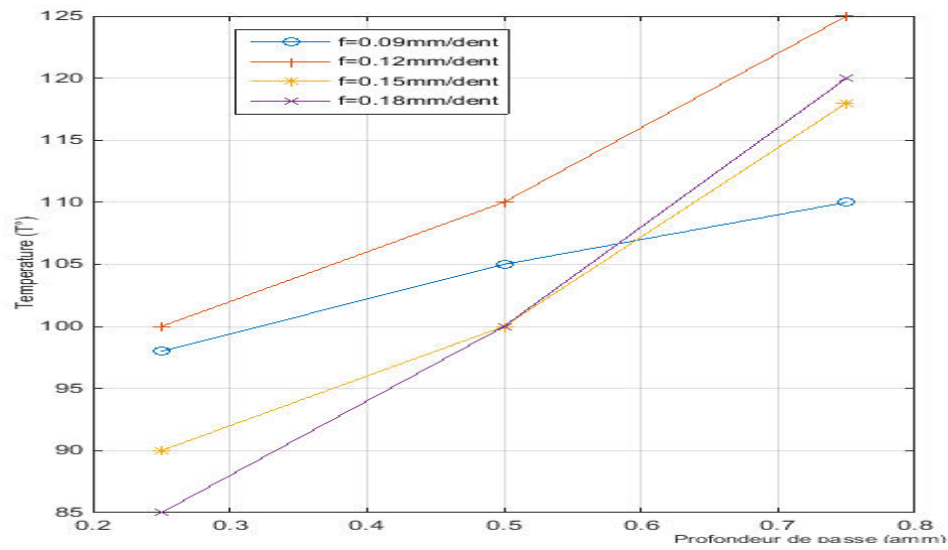


Figure III.7 - c : Température en relation de la profondeur de coupe pour $V_c = 200$ m/min et ($f = 0.09, 0.12, 0.15,$ et 0.18 mm/dent).

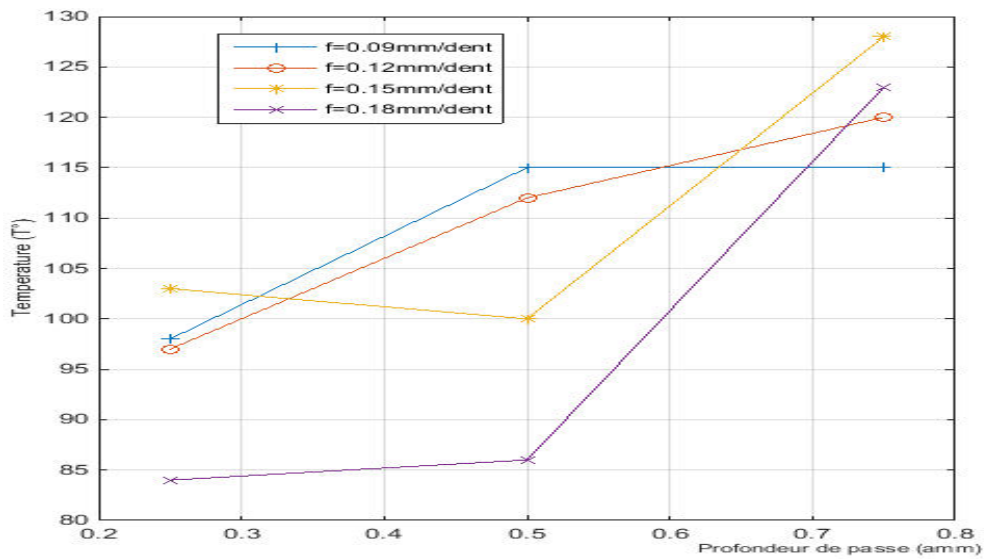


Figure III.7 - d : Température en relation de la profondeur de coupe pour $V_c = 250$ m/min et ($f = 0.09, 0.12, 0.15,$ et 0.18 mm/dent).

Les résultats indiquent que la profondeur de passe a un impact significatif sur la température de coupe. En effet, indépendamment de l'avance par dent et de la vitesse de coupe, la température augmente avec la profondeur de passe. Ainsi, la température était directement proportionnelle à la profondeur de passe, tandis que l'augmentation de la vitesse d'avance n'avait aucun impact significatif sur la température de coupe.

III. 3 Les formes des copeaux produites

La figure suivante (III.8) représente les formes des copeaux générés au cours de l'opération d'usinage (copeaux enroulés, des copeaux brisés, Des copeaux en forme d'arc et enchevêtrés).



Figure III.8: les copeaux générés durant l'opération fraisage.

La forme et le type de copeaux peuvent donner des indications sur la qualité de l'usinage, ainsi que sur les paramètres de coupe utilisés. Les copeaux peuvent également être collectés et analysés pour évaluer la qualité et la performance de l'outil utilisé.

III. 4 Conclusion.

Ce chapitre explore l'impact de différents paramètres sur la température générée pendant le fraisage de l'acier AISI 1060. Notre attention se portera principalement sur les effets de la vitesse de coupe, de l'avance par dent, de la profondeur de passe et de la durée, ainsi que sur les interactions entre ces variables.

Les résultats de notre étude sont les suivants:

- En observant l'évolution de la température de coupe au fil du temps, nous constatons qu'elle augmente initialement, puis se stabilise et finalement diminue progressivement à la fin du processus d'usinage.
- En fonction du temps, nous constatons que la température augmente proportionnellement à la profondeur de passage et à la vitesse de coupe.
- La température de fraisage augmente systématiquement avec la vitesse de coupe, indépendamment de la valeur de l'avance par dent.
- Enfin, nous avons noté que la profondeur de passe avait l'impact le plus important et le plus significatif sur la température de coupe. à l'exception des valeurs maximales de vitesse de coupe, l'avance a moins d'impact sur la température.

En conclusion, cette étude fournit des informations précieuses pour optimiser les paramètres de coupe afin de réduire les effets néfastes de la température sur la qualité des pièces usinées et d'améliorer les performances de l'opération de fraisage.

Chapitre IV

Prédiction intelligente de la température de coupe en fraisage

IV.1 Introduction

Lotfi Zadeh a inventé la logique floue en 1965 [75], une extension de la logique booléenne qui permet de traiter les incertitudes et les imprécisions lors du raisonnement et de la prise de décision. Le concept de degré d'appartenance est introduit dans la théorie classique des ensembles par la théorie des ensembles flous mathématiques.

La logique floue permet l'utilisation de variables avec une valeur de vérité partielle, c'est-à-dire des variables qui peuvent prendre une valeur comprise entre 0 (faux) et 1 (vrai), avec toutes les valeurs intermédiaires possibles. Cette approche diffère de la logique classique qui se base sur des variables binaires (vrai ou faux). Cette méthode permet de modéliser des concepts et des situations du monde réel de manière plus précise et plus proches de la réalité. La logique floue est particulièrement adaptée à l'utilisation et au raisonnement, car elle prend en compte les imprécisions et les incertitudes [76]. Il est très apprécié dans de nombreux domaines tels que le contrôle industriel, la reconnaissance de formes, la commande de systèmes et l'intelligence artificielle.

Ce chapitre explique comment déterminer la température de fraisage de l'acier AISI 1060 en se basant sur des essais de mesure expérimentaux et des paramètres de coupe. L'approche floue est une technique d'intelligence artificielle basée sur un système d'inférence floue. Les règles floues ont été utilisées pour créer un modèle, qui a ensuite été testé avec des données expérimentales.

Enfin, un mécanisme de raisonnement exécute les règles pour fournir une réponse.

IV.2 Modèle flou pour le fraisage

Dans ce travail, le modèle flou conçu pour prédire la température de coupe lors des opérations de fraisage de l'acier AIS1060 utilise trois entrées et une sortie. La profondeur de coupe, l'avance par dent et la vitesse de coupe sont les entrées, et la température de coupe est la sortie du système (Figure IV.1). Un système d'inférence flou est structuré en trois composants : une base de règles floues, des fonctions d'appartenance élaborées à partir d'une base de données, et un mécanisme de raisonnement. Le système d'inférence flou de type Mamdani est utilisé dans cette étude..

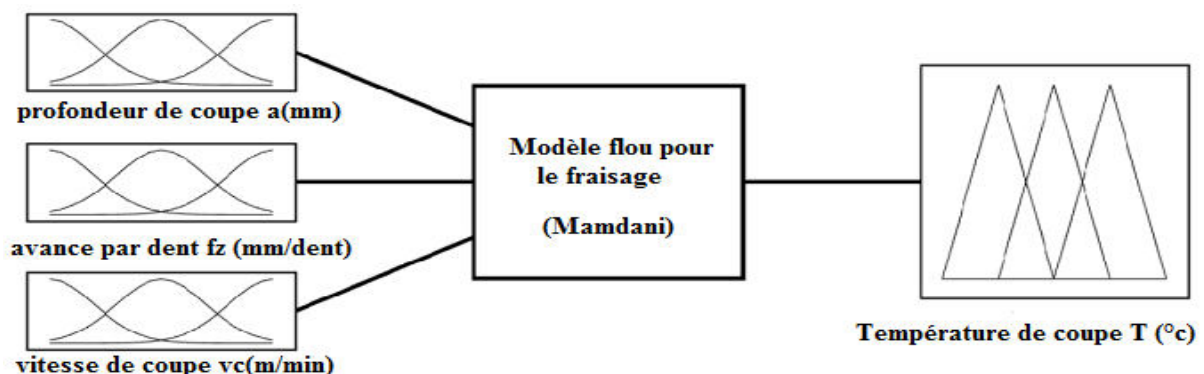


Figure IV.1: Système flou.

Deux bases de données distinctes sont utilisées pour le développement du système d'inférence flou ; la première base de données est constituée de 50 essais pour la conception du modèle flou, tandis que la deuxième base de données est constituée de 10 essais pour la confirmation. La première étape de l'étude de l'algorithme de prédiction de la température de coupe consiste à choisir les formes des fonctions d'appartenance pour les variables de processus en fonction de la base de données expérimentale qui a été utilisée sur la machine-outil.

IV .2.1 Expressions floues

Les expressions floues impliquent des variables linguistiques et des fonctions d'appartenance pour représenter l'incertitude ou le flou. Ces expressions permettent la représentation et la manipulation de concepts flous, ce qui facilite le raisonnement et la prise de décision dans des situations où des valeurs numériques précises ne sont pas disponibles. Les valeurs numériques des entrées et des sorties sont associées à un ensemble de variables linguistiques, et ces associations sont établies en créant des fonctions d'appartenance composées de plusieurs valeurs floues.

Les expressions floues pour la profondeur de coupe, l'avance par dent, la vitesse de coupe et la température de coupe sont respectivement présentées dans les Figures IV.2-IV.6.

La Figure IV.2 montre comment les valeurs numériques de la profondeur de fraisage (0.25, 0.5, 0.75) sont associées à des termes linguistiques (Petit, Moyen, Grand).

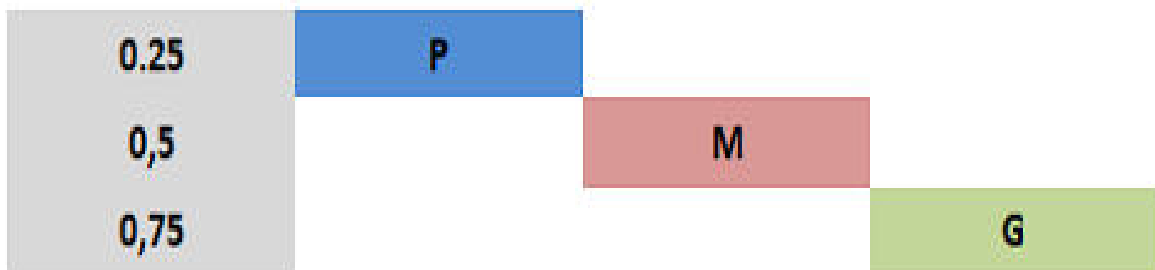


Figure IV.2: Variables linguistiques pour la profondeur de coupe.

La Figure IV.3 montre comment les valeurs numériques de l'avance par dent (0.09, 0.12, 0.15, 0.18) sont associées à des termes linguistiques.

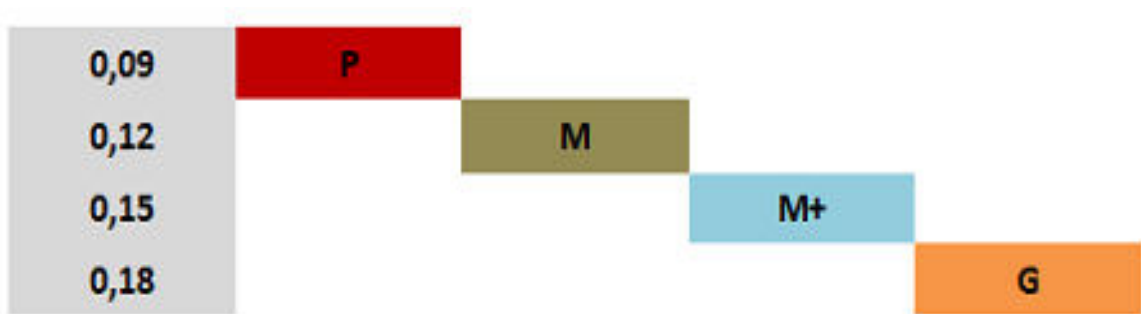


Figure IV.3: Variables linguistiques de l'avance par dent.

La Figure IV.4 représente la relation entre les termes linguistiques et les valeurs numériques de la vitesse de coupe (100, 150, 200, 250,300).

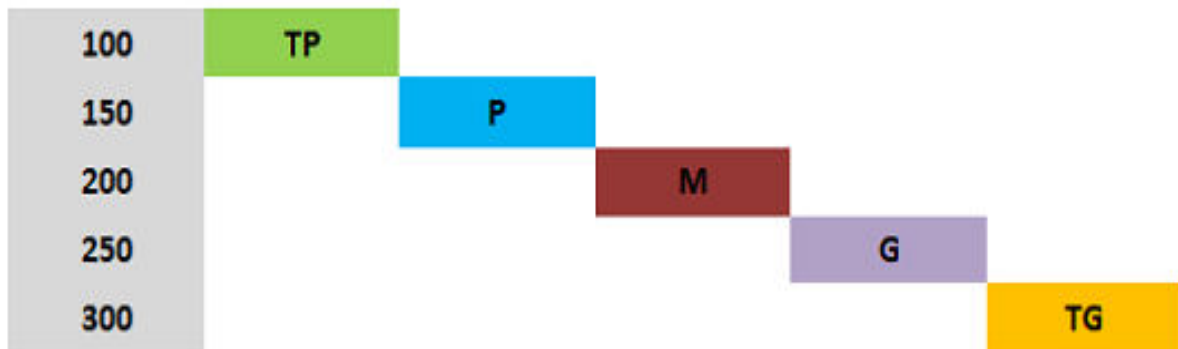


Figure IV.4: Variables linguistiques de la vitesse de coupe.

Une représentation sous forme de points, Figure IV.5, est utilisée pour illustrer le lien entre les valeurs numériques et les variables linguistiques liées à la température de coupe.

En prenant en compte la répartition expérimentale des températures, le modèle de nuages a été proposé pour déterminer les variables linguistiques. Cela garantit une détermination parfaite du domaine de chaque variable linguistique.

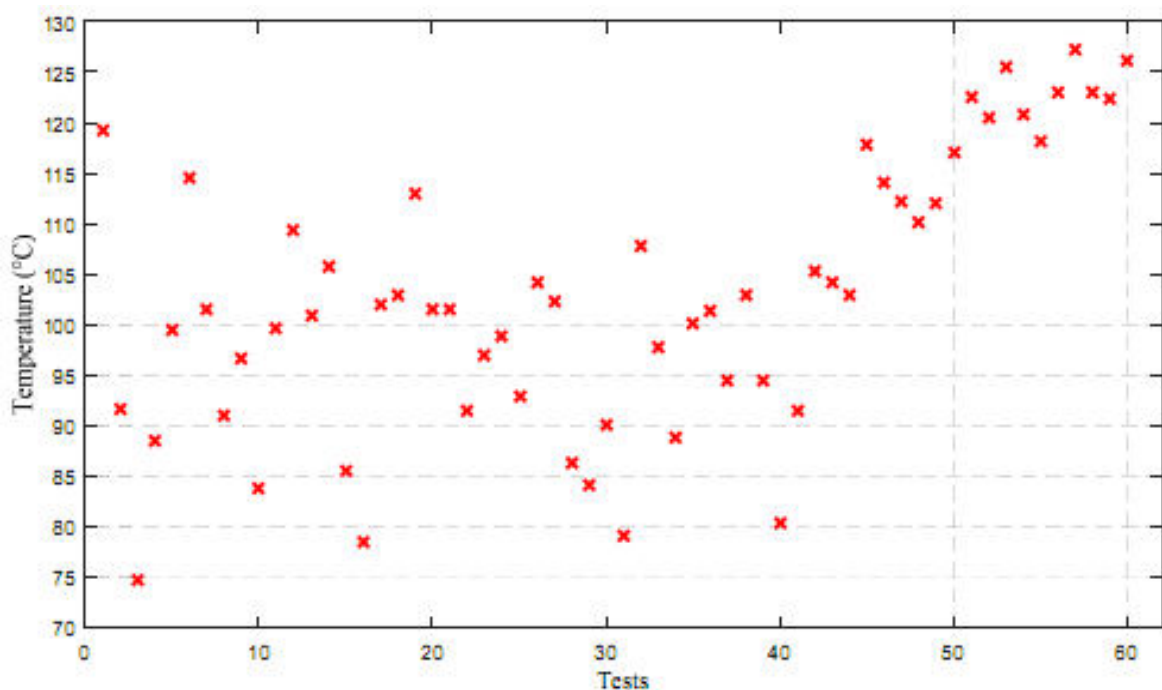


Figure IV.5 : Valeurs de la température de coupe pour tous les tests.

Les variables linguistiques sont associées aux grandeurs numériques de la température (74.73, 80, 90, 100, 110, 120, 127.3°C), comme illustré dans la Figure IV.6.

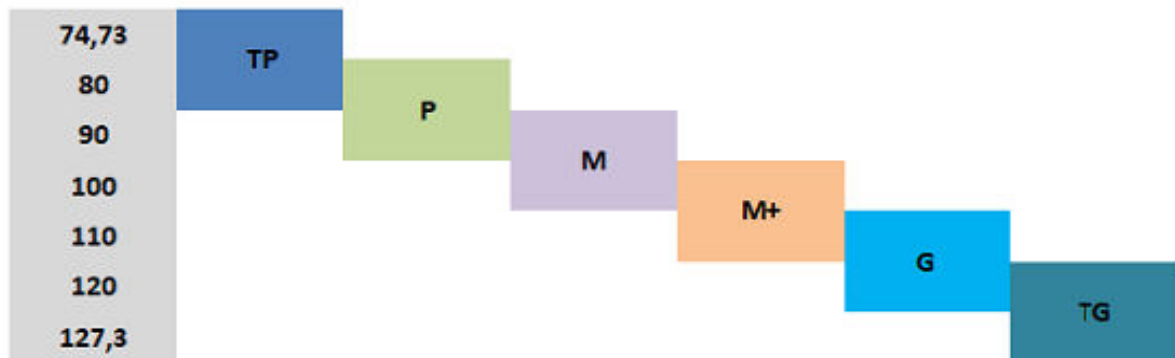


Figure IV.6 : Variables linguistiques pour la température de coupe.

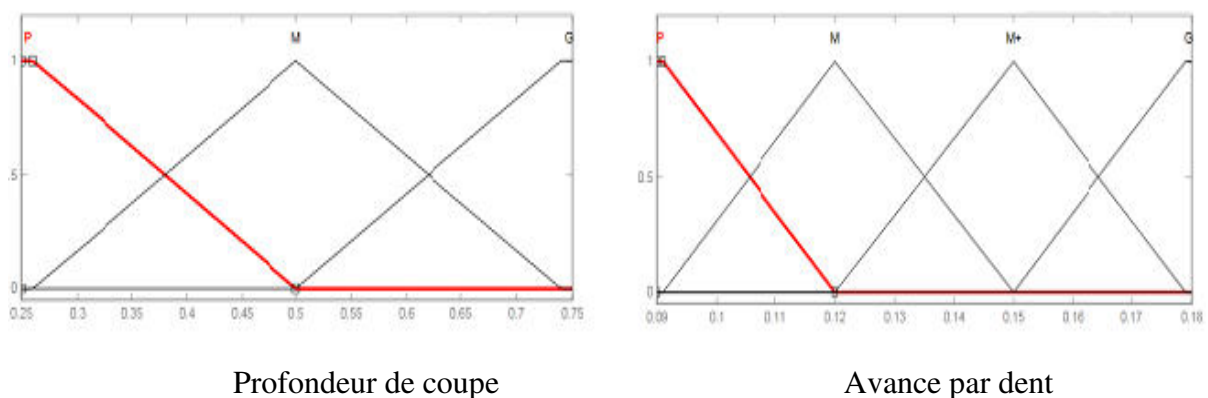
IV .2.2 Fonction de degré d'appartenance (triangulaire, trapézoïdale, gaussienne)

Les fonctions d'appartenance de représentation floue existent sous de nombreuses formes, telles que les fonctions triangulaires, trapézoïdales ou gaussiennes, ont été utilisées dans cette étude pour modéliser les variables d'entrée et le paramètre de sortie.

La méthode intègre une base de règles floues, des fonctions d'appartenance développées à partir d'une base de données, et un mécanisme de raisonnement qui applique ces règles pour générer une réponse. Six fonctions d'appartenance ont été sélectionnées et utilisées pour la réponse de sortie.

L'augmentation du nombre de fonctions d'appartenance conduit à des résultats plus précis, mais en même temps, cela conduit à l'utilisation d'un plus grand nombre de règles, ce qui nécessite plus de temps de calcul. Tous les ensembles flous sont définis par des fonctions d'appartenance distinctes. La sortie du système d'inférence flou est visualisée sous forme de valeurs floues qui doivent être défuzzifiées à la dernière étape.

La figure IV.7 présente les fonctions de degré d'appartenance triangulaires associées aux paramètres d'entrée et de sortie.



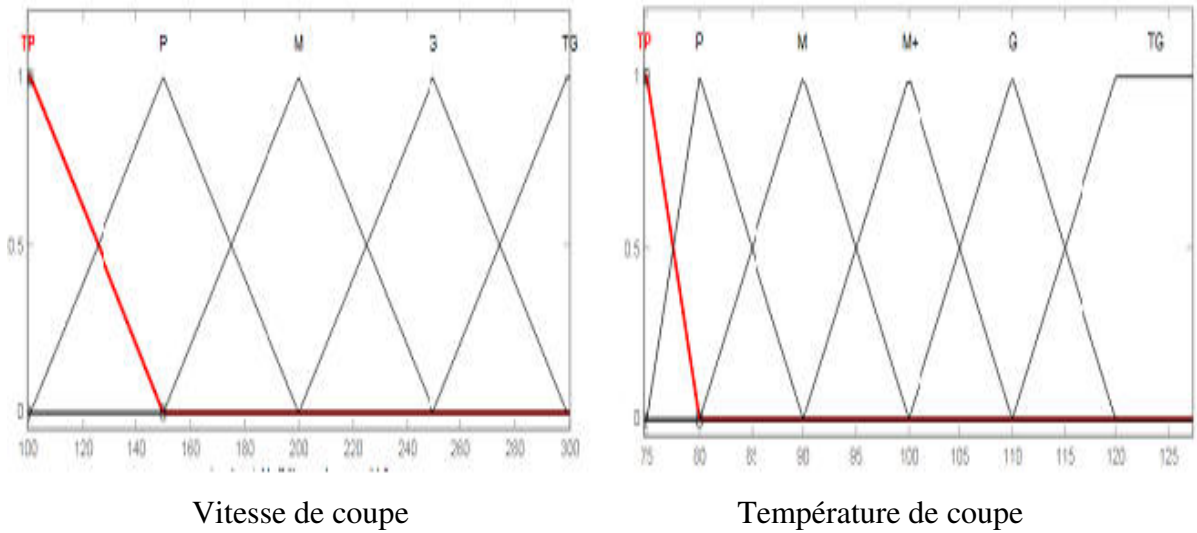


Figure IV.7 : Fonctions d'appartenance triangulaires.

La figure IV.8 présente les fonctions de degré d'appartenance trapézoïdale associées aux conditions d'entrée et de sortie.

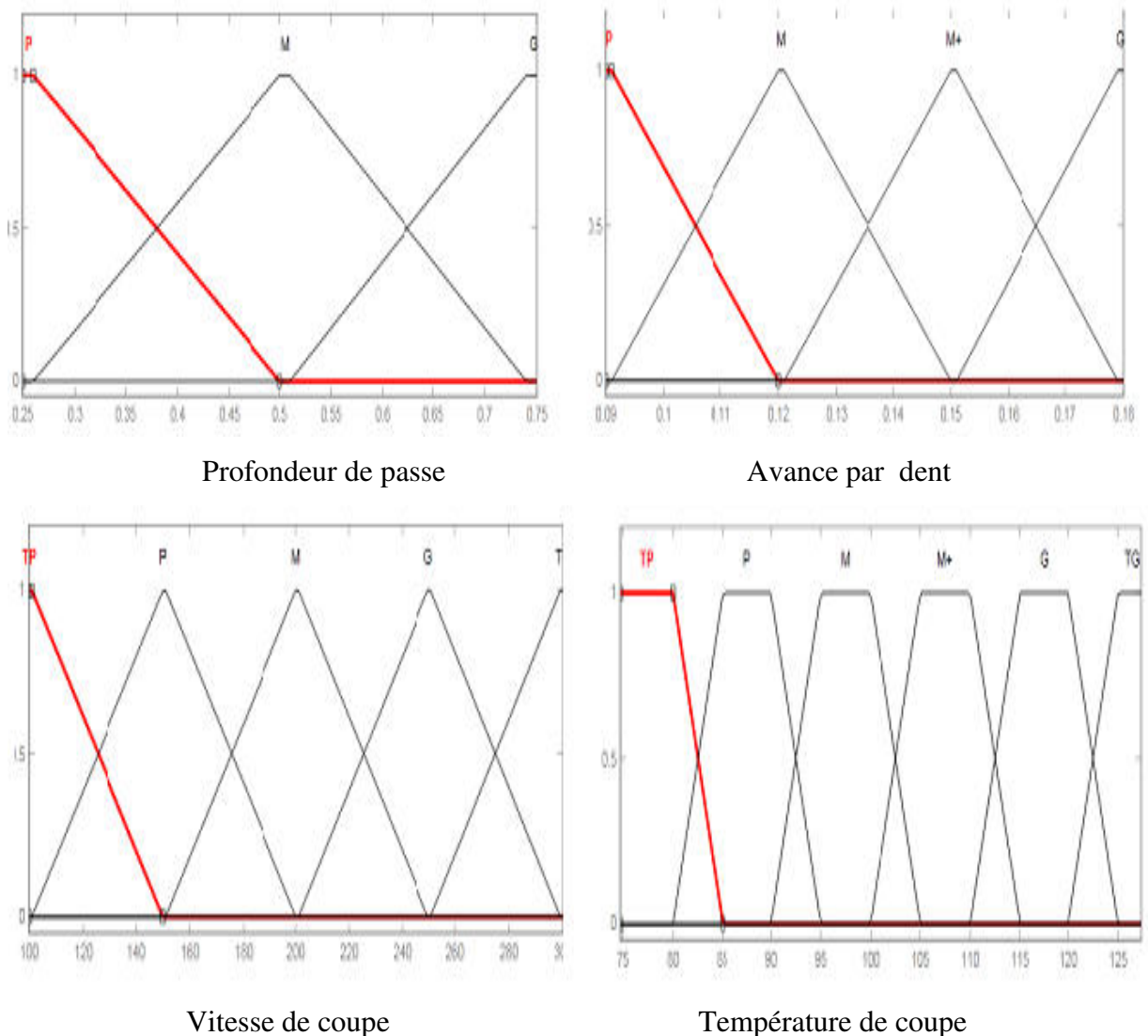


Figure IV.8 : Fonctions d'appartenance trapézoïdale

La figure IV.9 présente les fonctions de degré d'appartenance gaussiennes associées aux conditions d'entrée et de sortie.

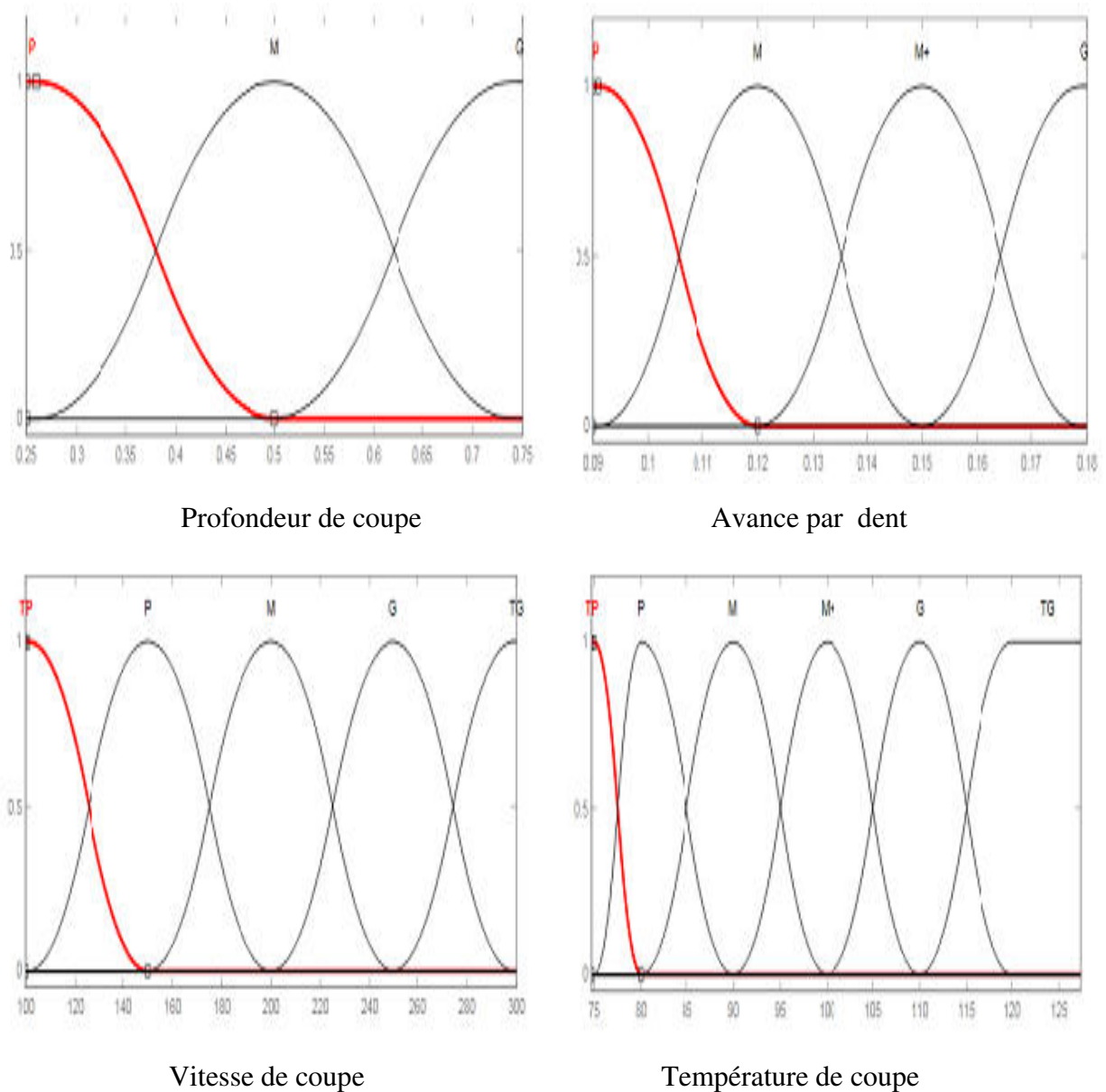


Figure IV.9 : Fonctions d'appartenance Gaussienne.

IV .2 .3 Règles floues

Le système flou a été construit en utilisant cinquante (50) règles floues créées à partir de soixante (60) expériences expérimentales. Pour valider le modèle flou, dix (10) données expérimentales supplémentaires seront ultérieurement utilisées. Trois paramètres d'entrée sont utilisés par le système flou pour générer une sortie. Les matrices peuvent être employées pour représenter les règles floues. La base de données expérimentale, comprenant les résultats des températures, est utilisée pour générer l'ensemble de règles floues.

Les règles floues peuvent être décrites sous forme de matrice, et le tableau IV.1 montre l'ensemble des règles matricielles liant la vitesse de coupe, l'avance par dent, la profondeur de coupe et les températures de coupe correspondantes.

a (mm)		Petite profondeur (p)	Moyenne profondeur (M)	Grande profondeur (G)
fz (mm/dent)	vc (m/min)	Les températures de coupe linguistiques correspondantes		
P	TP	TP	M+	-
	P	M	-	TG
	M	M	G	G
	G	M+	G	TG
	TG	-	TG	TG
M	TP	P	-	G
	P	M	M+	G
	M	-	M+	TG
	G	M+	G	TG
	TG	M+	G	TG
M+	TP	P	-	M+
	P	-	M+	-
	M	M	M+	-
	G	M	M+	TG
	TG	M+	M+	TG
G	TP	P	M	-
	P	P	M+	G
	M	M	M+	TG
	G	M	M+	TG
	TG	M+	G	TG

Tableau IV.1 : Tableau d'inférence.

La première ligne indique les ensembles flous associés à la profondeur de coupe (petite profondeur (P), moyenne profondeur (M), grande profondeur (G)), allant de la petite profondeur à la grande profondeur.

La première colonne indique les ensembles flous pour l'avance par dent variant de faible à grande avance (petite avance par dent (P), avance moyenne par dent (M), avance par dent supérieure à la moyenne (M+), grande avance par dent (G)).

La deuxième colonne indique les ensembles flous pour la vitesse de coupe variant de très faible à très élevée (très petite vitesse de coupe (TP), petite vitesse de coupe (P), moyenne vitesse de coupe (M), grande vitesse de coupe (G), très grande vitesse de coupe (TG)).

Le contenu de la matrice est le résultat obtenu, correspondant à la température de coupe pour cette étude. Les opérateurs flous utilisés sont "et" et "ou".

IV .2.4) Exemples des opérateurs flous utilisés dans les règles

Les paramètres utilisés dans les règles floues si/alors définissent la région floue des entrées, tandis que les paramètres de sortie fournissent la réponse correspondante

Voici quelques règles linguistiquement floues:

1. Si fz est (P : petit) et Vc est (TP : très bas) et a est (P : petit) Alors T est (TP : très bas)
2. Si fz est (P : petit) et Vc est (TP : très bas) et a est (M : moyen) Alors T est (M + : plus que la moyenne M + : plus que la moyenne))
3. Si fz est (P : petit) et Vc est (P : bas) et a est (P : petit) Alors T est (M : moyen).

•
•
•

50. Si fz est (G : grand) et Vc est (TG : très élevé) et a est (G : grand) Alors T est (TG : très élevé).

IV .3 Défuzzification

La défuzzification utilise toutes les variables d'entrée (vitesse de coupe, avance par dent et profondeur de coupe) ainsi que la variable de sortie (température de coupe) pour fusionner les différentes règles générées par le moteur d'inférence flou. Cela permet d'obtenir une seule valeur de température de coupe et de transformer cette variable de sortie linguistique en données numériques en calculant l'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance.

Le modèle peut traiter une large gamme de valeurs pour les variables d'entrée, ce qui permet une grande flexibilité dans la modélisation et la prédiction des températures de coupe. Cette opération permet de prendre des décisions ou des actions concrètes basées sur les résultats obtenus par le moteur d'inférence flou.

IV.4 Résultats

IV.4.1 Évolution de la température expérimentale et prédite en corrélation avec le nombre d'essais.

La Figure IV.10 montre Les résultats obtenus de la défuzzification, qui sont la phase finale de la logique floue.

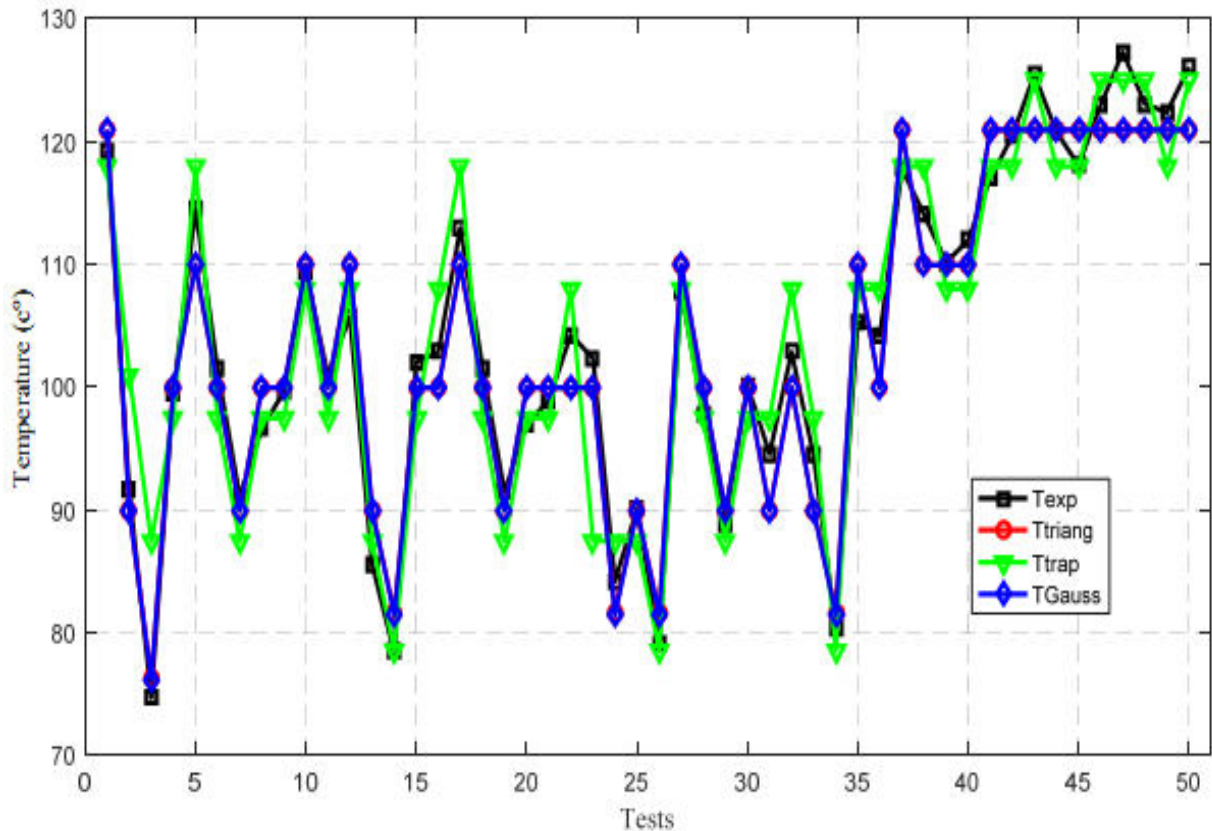


Figure IV.10 : Évolution de la température expérimentale et prédite en fonction du nombre de tests.

Les résultats de dix autres expériences, qui n'ont pas été inclus dans la création du modèle de processus, seront vérifiés.

Les conditions de ces expériences étaient identiques à celles des expériences précédentes, à l'exception des paramètres de coupe qui étaient différents.

La défuzzification est le processus dans la logique floue qui consiste à convertir un ensemble flou de résultats en une valeur nette ou une décision spécifique..

Le tableau IV.2 regroupe les résultats des dix nouveaux tests prédits par le modèle de logique floue.

Essais	Paramètres de coupe			Températures de coupe (°C)			
	Vc (m/min)	fz (mm/dent)	a (mm)	Texp	Ttriang	Ttrapez	TGauss
1	100	0,12	0,50	88,59	90	87,5	90
2	150	0,15	0,25	83,90	81,7	87,5	81,5
3	150	0,09	0,50	101,5	100	92,5	100
4	200	0,12	0,25	93,00	90	97,5	90
5	100	0,15	0,50	86,33	90	87,5	90
6	300	0,09	0,25	101,4	100	97,5	100
7	100	0,09	0,75	91,55	90	87,5	90
8	100	0,18	0,75	103,0	100	108	100
9	150	0,15	0,75	112,2	110	108	110
10	200	0,15	0,75	122,6	121	125	121

Tableau IV.2 : Tests de confirmation.

Pour choisir entre les fonctions d'appartenance de type triangulaire, trapézoïdale et gaussienne, nous calculons l'écart-type de chaque fonction d'appartenance afin de définir les valeurs les plus proches des résultats expérimentaux. Le nombre d'essais utilisés est $N = 10$.

Différentes valeurs d'écart moyen ont été trouvées:

- ✚ Pour les fonctions d'appartenance **triangulaire**, l'écart moyen était de **2,2871**.
- ✚ Pour les fonctions d'appartenance **trapézoïdales**, l'écart moyen était de **4,4359**.
- ✚ Pour les fonctions d'appartenance **gaussiennes**, l'écart moyen était de **2,3071**.

Après comparaison, les résultats des fonctions d'appartenance **triangulaire** étaient les plus proches des résultats **expérimentaux**.

IV .4.2 Précision et erreurs du système flou pour les tests de validation.

Nous utilisons l'équation IV.1 suivante pour déterminer le taux d'erreur des dix (10) tests :

$$e_i = \left[\frac{|T_{\text{exp}} - T_{\text{pred}}|}{T_{\text{exp}}} \right] \times 100$$

L'équation IV -2 suivante est utilisée pour déterminer Le taux de précision des (10) dix tests.

$$A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[1 - \frac{|T_{\text{exp}} - T_{\text{pred}}|}{T_{\text{exp}}} \right] \times 100$$

La précision du modèle flou des dix tests de vérification et erreur du système flou sont regroupés dans le tableau IV.3.

N d'essais	Paramètres de coupe			Température de coupe (°c)			
	V _c (m/min)	fz (mm/dent)	a (mm)	Texp(°c)	Ttriang	Erreur%	Précision%
01	100	0.12	0.5	88.59	90	1.5916	98.4083
02	150	0.15	0.25	83.9	81.7	2.6221	97.3778
03	150	0.09	0.50	101.5	100	1.4778	98.5221
04	200	0.12	0.25	93	90	3.2258	96.7741
05	100	0.15	0.5	86.33	90	4.2511	95.7488
06	300	0.09	0.25	101.4	100	1.3806	98.6193
07	100	0.09	0.75	91.55	90	1.6930	98.3069
08	100	0.18	0.75	103	100	2.9126	97.0873
09	150	0.15	0.75	112.2	110	1.9607	98.0392
10	200	0.15	0.75	122.6	121	1.3050	98.6949
Précision moyenne							97.7579

Tableau IV.3 : Précision des dix tests de vérification et erreur du système flou.

La Figure IV.11 illustre la comparaison entre les prédictions du modèle de raisonnement flou et les mesures expérimentales de température pendant l'opération de surfacage.

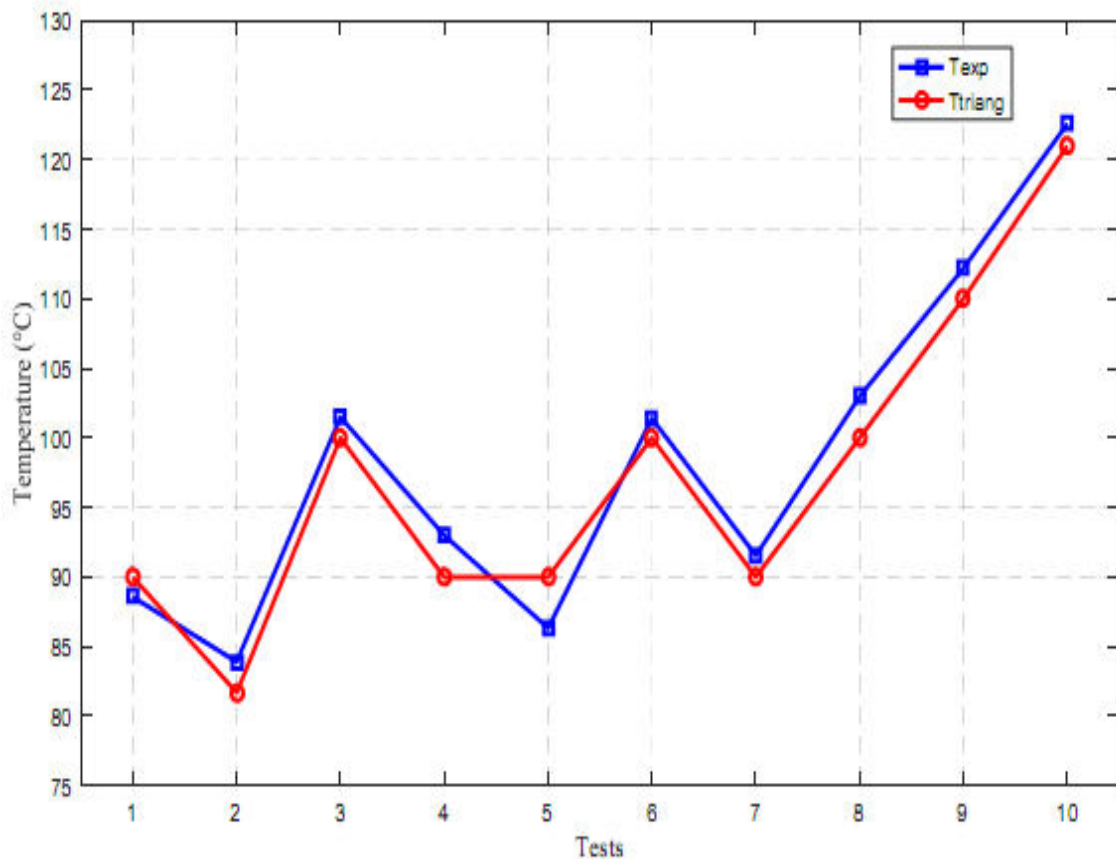


Figure IV.11 : Comparaison entre les températures de coupe prédites et mesurées expérimentalement.

La figure IV.11 montre que le modèle proposé a démontré une grande précision dans la prédiction des températures de fraisage. Les similitudes entre les valeurs de température de coupe et divers paramètres de coupe indiquent que la logique floue est une méthode efficace pour prédire les températures de coupe dans une plage particulière de ces paramètres. Par conséquent, le modèle de la logique floue peut être considéré comme un moyen prometteur de prédire les températures de coupe.

La concordance des résultats obtenus par le modèle d'inférence flou développé avec les résultats expérimentaux reflète le bon choix des fonctions d'appartenance, l'adéquation du mécanisme de raisonnement et la méthode de défuzzification sélectionnée.

IV .4.3 Représentation graphique de la température de coupe floue (surfaces en 3D)

La figure IV.12 montre une représentation graphique de la température de coupe floue en fonction des trois paramètres de coupe.

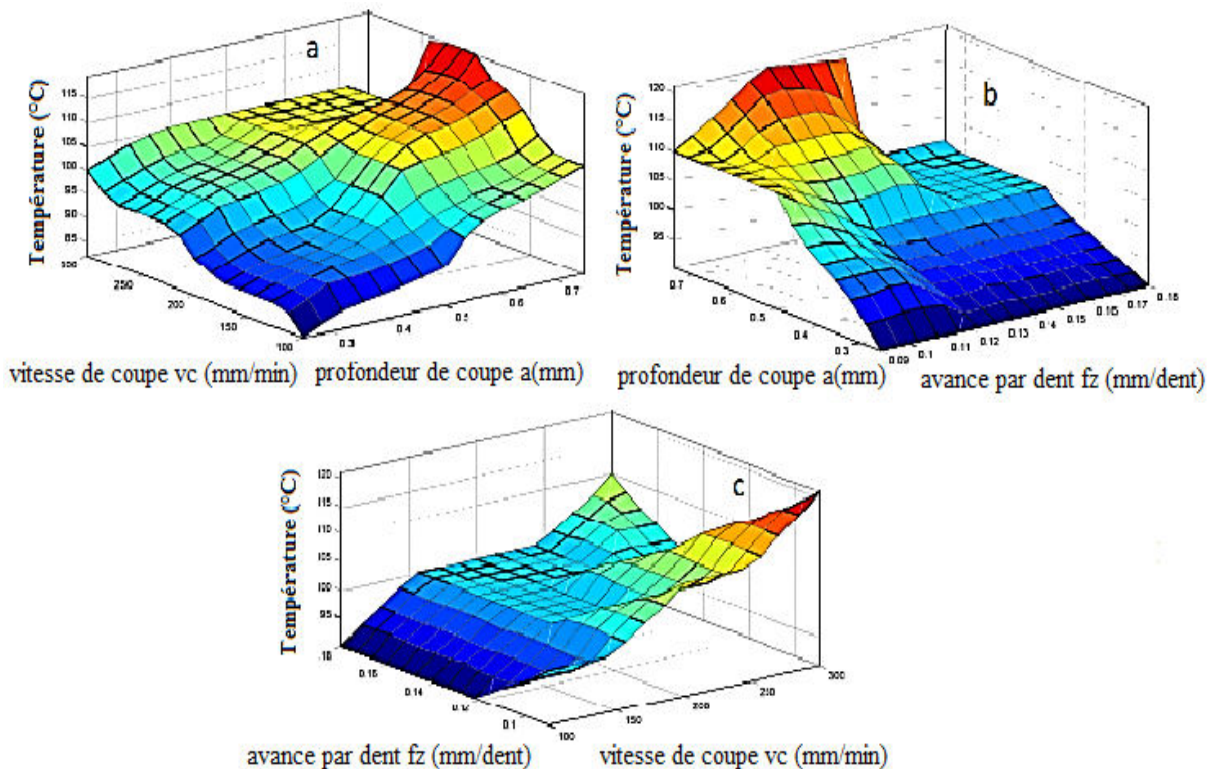


Figure IV. 12 : Évolution de la température prédite par le système de logique floue en corrélation avec les conditions de coupe.

La **Figure IV.12 (a)** montre que la température de coupe atteint son maximum avec une vitesse de coupe moyenne de 200 m/min et une profondeur de coupe maximale, tandis que la température minimale est obtenue avec une vitesse et une profondeur minimales.

De plus, la température augmente également avec la profondeur de coupe, comme indiqué dans la figure IV.12 (a), (b). La température s'accroît également avec l'élévation de la profondeur de coupe. Indépendamment des deux autres valeurs des paramètres.

La **figure IV.12 (b)** indique que la température atteint son maximum lorsque la profondeur de coupe est élevée et l'avance par dent est minimale. Cependant, l'impact de ce facteur sur la température est limité aux cas où la profondeur de coupe est minimale.

La **Figure IV.12 (c)** montre que la température de coupe augmente avec la vitesse de coupe, indépendamment de la valeur de l'avance par dent. Pour les valeurs de vitesse de coupe maximales, l'impact de l'avance par dent est négligeable.

D'après la Figure IV.12, il est clairement observé que la profondeur de coupe a un impact significatif et croissant sur la température. Cela confirme que la profondeur de coupe est le facteur le plus déterminant dans l'évolution de la température de coupe.

IV .5 Comparaison des différents travaux sur la prédiction de la température de coupe

Le tableau IV.3 présente une comparaison des différents travaux sur la prédiction de la température de coupe utilisant des méthodes empiriques. Cette comparaison montre clairement que la technique choisie a réussi à prédire la température de coupe avec une très faible erreur de prédiction par rapport aux travaux publiés.

Les travaux qui devraient être considérés comme concurrents dans la littérature sont la méthode **RSM** de (Tamilarasan et al., 2016), la méthode RSM couplée à l'analyse de relation de gris de (Tamilarasan & Marimuthu, 2014) et la régression polynomiale de **Ji et al. en 2021**, ainsi que la méthode ANN-GA de (Kumar et al., 2018).

Cependant, la logique floue a surpassé les autres méthodes, car sa grande précision a été démontrée par dix (10) expériences de confirmation, tandis que les autres méthodes n'ont été confirmées que par un maximum de cinq (05) expériences de confirmation, ce qui pourrait influencer leur précision en cas d'augmentation du nombre d'expériences de confirmation. La précision élevée de la technique proposée a été validée à travers plusieurs valeurs différentes des conditions de coupe.

Les auteurs	Les méthodes de modélisation.	Matériau de la pièce / matériau de l'outil	Paramètres du modèle.	Nombre de tests de confirmation.	Déviaton (température de coupe modélisée / température de coupe mesurée)	Remarques
(Sivasakthive & Sudhakaran, 2012)	RSM	Al-6063/HSS	Angle d'hélice, Vitesse de broche, Vitesse d'avance, Profondeur de coupe axiale, Profondeur de coupe radiale	0	~ 5%	Le paramètre le plus influent est l'angle d'hélice
(Chawale et al., 2013)	Taguchi	Acier doux fonte / Non spécifié	Métal de la pièce à usiner, Vitesse de coupe, Profondeur de coupe, vitesse d'avance	0	Non spécifié	Le paramètre le plus influent est la vitesse d'avance
(Al Hazza et al., 2012)	RSM	AISI H 13/ Carbure revêtu	Vitesse de coupe, Profondeur de coupe, vitesse d'avance	0	9.6%	-
(Kovac et al., 2014)	La logique floue	AISI 1060/ SPAN 12 03 ER (P25)	Vitesse de coupe, Profondeur de coupe, Avance par dent, Usure du flanc	5	3.28%	Le facteur le plus significatif sur la température de coupe est la profondeur de coupe.

(Patel et al., 2014)	RSM	Acier doux/carbide	Vitesse de coupe, vitesse d'avance, Profondeur de coupe	0	Non spécifié	Le paramètre le plus influent est la profondeur de coupe
(Sun et al., 2013)	Matrice orthogonal	Ti-6Al-4V/ carbure	Vitesse de coupe, Avance par dent, Profondeur de coupe axiale, Profondeur de coupe radiale	0	Non spécifié	Le paramètre le plus influent est la vitesse de coupe
(Tamilarasan & Marimuthu, 2014)	La méthode RSM couplée à l'analyse relationnelle grise	11MnCrW4/ carbure revêtu	Dureté du matériau de travail, rayon de l'arête, avance, profondeur de coupe radiale, profondeur de coupe axiale.	1	1.28%	Le paramètre le plus influent est l'avance.
(Santhanakrishnan et al., 2015)	RSM	Al-6351/HSS	L'angle de dépouille, le rayon de bout, la vitesse de coupe et la profondeur de coupe axiale	0	~ 5%	Le paramètre le plus influent est l'angle de coupe, l'effet de la vitesse d'avance n'est pas pris en compte.
(Tamilarasan et al., 2016)	RSM	11MnCrW4/ carbure revêtu	Vitesse de coupe, Avance par dent, Profondeur de coupe axiale, Profondeur de coupe radiale	4	~ 0.64%	Le paramètre le plus influent est la vitesse de coupe et l'avance par dent.
(Pabst et al., 2010)	Régression polynomiale	Fonte grise/ Carbure revêtu	Vitesse de coupe, Vitesse d'avance, profondeur de coupe, largeur de coupe, angle de dépouille, rayon de l'arête de coupe.	0	3%	-
(Kumar et al., 2018)	ANN-GA	Al 6061 T6/ carbure	La vitesse de coupe, la profondeur de coupe, l'avance et le survol (ou pas d'avance)	4	~ 0.91%	Le paramètre le plus influent est la profondeur de coupe.
(Zhu et al., 2020)	RSM	Pierre-Composite en plastique	angle de cône, vitesse de broche, vitesse d'avance, profondeur de coupe	1	4%	-

(Ji et al., 2021)	Régression polynomiale	alliage d'aluminium 7050 / carbure ultrafin à grains	Vitesse de coupe, Avance par dent, Profondeur de coupe axiale, Profondeur de coupe radiale, Diamètre de l'outil, Rayon émoussé, Angle d'hélice, Angle de dépouille	5	~ 1.6%	-
(Kumar et al., 2022)	GMEG- flou	Inconel 625/ carbure cimenté	vitesse de coupe, profondeur de coupe, avance, dépassement, diamètre de l'outil	5	5.85%	Le paramètre le plus influent est l'avance.
Étude présente	La logique floue	AISI 1060/ Sandvik 490R-08T308E-ML 1040	Vitesse de coupe, profondeur de coupe, avance par dent.	10	2.24%	Le paramètre le plus influent est la profondeur de coupe.

Tableau IV.4 : Comparaison des différents travaux sur la prédiction de la température de coupe [77-78-79-80-81-82-83-84-85-86-87-88-89-90].

IV .5 Conclusion

Le dernier chapitre se focalise sur les fonctions d'appartenance et les règles floues qui ont été créées pour modéliser la température de coupe en utilisant des mesures expérimentales comme base. Des recherches ont été menées pour étudier les effets des paramètres de coupe sur la température floue, ce qui a révélé que certains paramètres de coupe (la profondeur de coupe) ont une influence plus importante que d'autres sur la température de coupe.

Le modèle basé sur la logique floue donne des résultats précis qui sont très corrélés aux données expérimentales. Après vérification, le modèle flou a été jugé suffisant avec un niveau de précision de **97,757%**. La fiabilité de prédiction du modèle pour la température de coupe lors du fraisage de l'acier AISI 1060 a été démontrée par une erreur moyenne de prédiction d'environ **2,242 %**.

La technique de modélisation floue est un moyen économique et efficace de prédire la température de coupe et la durée de vie de l'outil. Cette méthode présente un potentiel considérable pour maximiser le rendement et renforcer l'efficacité des processus d'usinage tout en optimisant les performances de l'outil.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

L'objectif recherché par cette thèse est de développer et d'étudier les techniques liées aux opérations de fraisage. Pour atteindre cet objectif, une approche expérimentale combinée à l'utilisation de la logique floue est adoptée pour étudier le processus d'usinage. Dans cette approche une comparaison est menée entre l'étude expérimentale et l'utilisation de techniques d'intelligence artificielle (la logique floue) pour évaluer les résultats obtenus.

Afin de valider les résultats provenant de la logique floue pendant l'opération de fraisage, des tests ont été effectués pour mesurer la température de coupe, À cet effet, une caméra thermique infrarouge intelligente a été utilisée pour mesurer la propagation de la température au sein de l'outil.

Les tests de température de coupe, ainsi que l'application de l'intelligence artificielle, ont conduit aux conclusions suivantes.

- ✓ L'approche expérimentale utilisée pour mesurer la température de coupe dans le fraisage est pratique et économique. Elle permet de suivre l'évolution de la température d'usinage de l'acier AISI 1060 avec des outils en carbure. La technique expérimentale proposée est facile à utiliser et à mettre en place.
- ✓ En règle générale, la profondeur de passe est le facteur le plus essentiel et le plus influent pour la température de coupe. Plus cette profondeur augmente, plus la température s'élève, de même que la vitesse de coupe. En outre, même en maintenant la valeur de l'avance par dent constante, L'accroissement de la vitesse d'usinage induit une élévation de la température de coupe,
- ✓ La température est généralement faiblement impactée par le paramètre de l'avance par dent, sauf pour les valeurs maximales de vitesse de coupe. Ainsi, l'avance par dent n'est pas un facteur critique pour la température de coupe, sauf dans des conditions extrêmes de la vitesse de coupe.
- ✓ la température de coupe a tendance à croître progressivement à mesure que le temps de coupe augmente, puis elle se stabilise et finit par diminuer une fois l'opération d'usinage terminée.
- ✓ Après vérification, le modèle flou développé a été jugé adéquat avec un niveau de précision de 97,757%. L'erreur moyenne du modèle était d'environ 2,242%, ce qui prouve de manière concluante que l'approche de la logique floue est capable

de prédire avec une grande précision la température lors de l'opération de fraisage de l'acier AISI 1060.

- ✓ L'analyse comparative et la vérification des résultats obtenus par le modèle flou avec les données expérimentales ont démontré une forte corrélation entre les deux approches, confirmant ainsi la grande précision du modèle.
- ✓ Cette analyse croisée entre les résultats expérimentaux et l'intelligence artificielle a ainsi permis de vérifier la fiabilité et la qualité des modèles élaborés.
- ✓ La modélisation floue pourrait constituer une solution efficace et une approche peu coûteuse pour prédire avec précision la température de coupe.
- ✓ Cette approche présente une alternative intéressante pour les industries qui cherchent à améliorer leurs méthodes de production tout en réduisant les coûts associés à la surveillance de la température de coupe

Perspectives

Après la conclusion de cette étude, de nombreuses opportunités se sont présentées, notamment.

- La méthode de la logique floue pourrait être appliquée à d'autres techniques d'usinage telles que le perçage, le tournage, l'affûtage.
- Il serait possible de renforcer cette étude sur la température de coupe en y ajoutant une analyse des copeaux produits pendant l'usinage.
- L'approche par la logique floue présentée dans cette thèse pourrait être utilisée pour une variété de matériaux et d'outils de coupe.

Référence Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] **W. Yousfi** " Modélisation thermomécanique 3D en fraisage ", février 2017 pp,1-163 2015, doi: 10.13140/RG.2.1.3729.7685.
- [2] **Société Sandvik . coromant .** " Fraisage - Principes ".T. d. l'ingénieur, Réf : BM7082 Vol., pp. 3-21 Date de publication : 10 janv 2001.
- [3] **Gilles Prod'Homme**, Commande Numérique des Machines-Outils , Technique de l'ingénieur, Traité Génie Mécanique, B 7130, pp.3, 1997.
- [4] **D. Veeramani, Y. Gau**, « Technologie de la Machine-outil », éd. CIP Tram élan, 1997.
- [5] **Référence internat** , http://analyse-fabrication.univ-lille1.fr/co/chapitre_2_4_2_3.html.
- [6]**F.Barbachov** " le fraisage " Traduit du russe par V.polonski 1975, Traduction française édition MIR 1980.
- [7] **F. LE MAITRE** relation entre energie de coupe et Endommagement des outils Ecole Nationale Supérieure de Mécanique, Nantes France (Reçu le 28 décembre 1979)
- [8] **Taylor, F. (1907)**, On the art of cutting metals. ASME 28, pages 121_163.
- [9] **M. KIOUS, R. SERRA, A. OUAHABI, W. RMILI**, Suivi de l'usure des outils coupant en fraisage horizontale agrande vitesse par analyse des efforts de coupe. Conference Paper.Nantes, 5-6 juin 2008.
- [10] **E.-O. Ezugwu, Z.-M. Wang** ,Titanium alloys and their machinability – a review, J. Mater. Process. Tech. 68/1 (1997) 262-274.
- [11] **M. Nouari , M. Calamaz F. Girot** ,Mécanismes d'usure des outils coupants en usinage à sec de l'alliage de titane aéronautique Ti-6Al-4V, C. R. Mécanique 336 (2008) 772–781.
- [12] **GAUTIER LIST**, Étude des mécanismes d'endommagement des outils carbure Wc-Co par a caractérisation de l'interface outil-copeau application a l'usinage à sec de l'alliage d'aluminium aéronautique ; Thèse de doctorat ; 2004 ENSAM
- [13] **S. Lo Casto, E. Lo Valvo, E. Lucchini, S. Maschio, M. Piacentini, V.F. Ruisi**, Ceramic materials wear mechanisms when cutting nickel-based alloys, Wear Vol. 225–229 (1999), 227–233
- [14] **C.J.E.Andrewes,H.-Y. Feng, W.M. Lau**, Machining of an aluminum/SiC composite using diamond inserts, Journal of Materials Processing Technology Vol. 102 (2000),25-29.
- [15] **NABHAIN, F. 2001**, Wear mechanisms of ultra-hard cutting tools materials. Journal of Materials Processing Technology, 115(3) :402_412.
- [16] **CHE-HARON, C. 2001**, Tool life and Surface Integrity in Turning Titanium Alloy. Journal of Materials Processing Technology, 118 :231_237.

- [17] **Y. Naherheim, E.M. Trent**, Diffusion wear of cemented carbide tools when cutting steel at high speeds, *Metal Technology* (1977), 548-555.
- [18] **Geko_02 H.O. Gekonde, S.V. Subramanian**, Tribology of tool–chip interface and tool wear mechanisms, *Surface and Coatings Technology* Vol. 149 (2002), 151-160
- [19] **WIT GRESIK**, *Advanced Machining Processes of Metallic Materials*, ; ISBN: 978-0-08-044534-2©2008 Elsevier B.V, Pp 1- 446.
- [20] **MEHDI REMADNA**: Le comportement du système usinant en tournage dur. Application au cas d'un acier trempé usiné avec des plaquettes CBN (Nitrure de Bore Cubique) Thèse de Doctorat ; 2001 C.A.S.M de l'INSA de LYON.
- [21] **Gautier LIST**, Étude des mécanismes d'endommagement des outils carbure WC-Co par la caractérisation de l'interface outil-copeau application a l'usinage à sec de l'alliage d'aluminium aéronautique ; Thèse de doctorat ; 2004 ENSAM.
- [22] **Christian PAGÈS**, Comportement de revêtements céramiques sur outil en tournage a sec de finition. Thèse de doctorat ; 2003, École centrale de Lyon
- [23] **G D S GALOPPI ? M. S. FILHO And G .F . BATALHA**, Hard Turning of Tempered DIN 100Cr6 Steel with Coated and no Coated CBN Inserts. *Materials Processing Technology* Vol.179, Pp.146–153, 2006, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.03.067
- [24] **M.NALBANT, H. GOKAYA, I. TOKTAS and G.Sur** : The experimental investigation of the effects of uncoated, PVD- and CVD-coated cemented carbide inserts and cutting parameters on surface roughness in CNC turning and its prediction using artificial neural networks, *Robotics and Computer - Integrated Manufacturing* Vol.25, pp.211–223, 2009 doi: 10.1016/j.rcim.2007.11.004
- [25] **G. BOOTHROYDJ, M.EAGLEA.W, J.CHISHOLM** : Effect of Tool a k Wear on the Temperatures Generated During Metal Cutting. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* 1847-1982, Vols 1-196, 177, 789-810, 1963. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-003491-1.50040-X>.
- [26] **T. Kitagawa, A. Kubo, K. Maekawa**, Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of Inconel 718 and Ti-6Al-6V-2Sn, *Wear* 202 (1997) 142 – 148
- [27] **S . R . CARVALHO , S.M.M . LIMA E.SLIVA , A.R . MACHADO And G . GUIMARAES** : Temperature determination at the chip–tool interface using an inverse thermal model considering the tool and tool holder. *Materials Processing Technology* Vol.179, Pp.97–104, 2006, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.03.086.
- [28] **Rossetto S 1971**, An Investigation of Temperature Distribution on Tool Flank Surface *Annals of the C.I.R.P* XIV 291-293.
- [29] **S. Lo Casto, E. Lo Valvo, F. Micari**, Measurement of temperature distribution within tool in metal cutting experimental tests and Numerical. *Journal of mechanical working technology*. Vol. 20, pp. 35-46 (1989).

- [30] **Astakhov V. P.**, Tribology of metal cutting, Tribology and interface engineering series 52 (2006).
- [31] **Junzhan Hou, Ning Zhao & Shaoli Zhu (2011)** Influence of Cutting Speed on Flank Temperature during Face Milling of Magnesium Alloy, *Materials and Manufacturing Processes*, 26:8, 1059-1063, DOI: 10.1080/10426914.2010.536927.
- [32] **Ghafarizadeh S, Lebrun G (2016)** Experimental investigation of the cutting temperature and surface quality during milling unidirectional carbon fiber reinforced plastic. *J Compos Mater* 50 (8):1059–1071.
- [33] S. A. A. R. KRISHNA et P. R. REDDY : Temperature prediction in orthogonal machining of Al/SiCp Composites. *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.* 2012, 2, 223–229.
- [34] **K.J. Trigger** Progress report no. 1 on chip–tool interface temperatures. *Trans ASME. Vol. 70*, pp. 91-8 (1948).
- [35] **K.J. Trigger** Progress report no. 2 on chip-tool interface temperatures *Trans ASME. Vol. 71*, pp. 163-74 (1949).
- [36] **M. Habak M 2006** Etude de l'influence de la Microstructure Et des Paramètres de Coupe Sur le Comportement en Tournage Dur de l'Acier a Roulement 100Cr, Ph.D. thesis, Laboratoire Procédés-Matériaux-Instrumentations ENSAM, CER d'Angers
- [37] **Le Coz, G.** Usinage de l'Inconel 718: Intégrité de surface, mesure de température et modèle analytique du fraisage périphérique. Diss. Université de Lorraine, 2012.
- [38] Jehnming lin inverse of the tool – work interface température in milling *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 35, No. 5. pp. 751-7(dk 1995) Copyright © 1995 Elsevier Science Ltd
- [39]] ChenMing,SunFanghong,WangHaili,YuanRenwei,QuZhenghong,ZhangShuqiaob, Experimental research on the dynamic characteristics of the cutting temperature in the process of high-speed milling, *Journal of materials processing technology*, 138 (2003) 468-471
- [40] **T.UedaA.HosokawaK.OdaK.Yamada**, Temperature on flank face of cutting tool in high speed milling, *Annals of the CIRP.* 50 (2001) 37-40.
[https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62065-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62065-4)
- [41] **M.Satoa,T.Uedab,H.Tanaka** "An Experimental Technique for the Measurement of Temperature on CBN Tool Face in End Milling." *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 47(14). pp. 2071-2076. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.05.006>
- [42] **Ueda T** Development of infrared radiation pyrometer with optical fibers: two-color pyrometer with non-contact fiber coupler. 2008 *CIRP Ann* 57(1):69–72.
- [43] Dewes.R.C. Dewes, E. Ng, P.G. Newton, D.K. Aspinwall, Temperature measurement when high speed machining hardened mould/die steel, *J. of Mat. Process. Technology.* 92-93 (1999) 293-301.

- [44] **Toh .C.K.** Comparison of chip surface temperature between up and down milling orientations in high speed rough milling of hardened steel *Journal of Materials Processing Technology* 167 (2005) 110–118.
- [45] Pittal a et Monno A new approach to the prediction of temperature of the workpiece of face milling operations of Ti-6Al-4V ,2011.
- [46] Kim SW, Lee CM, Lee DW, Kim J S, Jung YH Evaluation of thermal characteristics in high-speed ball-end milling. *Journal of Material Processing Technology*113: 406-409 (2001).
- [47] Ng E.G. Ng, S.L. Soo, C. Sage, R.C. Dewes, R. Dewes, D.K. Aspinwall, High speed ball nose end milling of Inconel 718 with variable tool geometry, experimental and finite element analysis. In: Dudzinski, D., Molinari, A., Schulz, H. (Eds.), *Metal Cutting and High Speed Machining*. Kluwer Academic/Plenum Publishers (2002)191–200.
- [48]] N. Sugita, T. Osa, M. Mitsuishi, Analysis and estimation of cutting-temperature distribution during end milling in relation to orthopedic surgery, *Medical Engineering & Physics* 31 (2009) 101–107.
- [49] **Suprock .CA Suprock ,JS Nichols, RB Jerard, BK Fussell**, Calibration and implementation of a torque and temperature sensor integrated tooling system for end milling. CIRP conference on modeling of machining operations (2009) 403-409.
- [50] **S. Yuging , S. Jie , Jianfeng et X. Q ingchun** : An Experimental Investigation of the Influence of Cutting Parameters on Cutting Temperature in Milling Ti6Al4V by Applying Semi-Artificial Thermocouple. *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 2014, 70, 765–773.
DOI 10.1007/s00170-013-5294-1.
- [51] Bai WJ, Ke YL, Wu HB, Dong HY. Experimental Studies of Cutting Temperature during High-Speed Milling of Aerospace Aluminum. *KEM* 2008;392–394:719–23.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.392-394.719>.
- [52] **Y.S. Liao, H.M. Lin, J.H. Wang**, Behaviours of end milling Inconel 718 superalloy by cemented carbide tools *journal of materials processing technology* 201 (2008) 460–465
- [53] **Ruihu Zhou**.Analytical model of workpiece surface temperature prediction in 4-axis milling process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*2020
<https://doi.org/10.1007/s00170-020-06255-0>
- [54] **Le Coz, G., Dudzinski, D** : Temperature variation in the workpiece and in the cutting tool when dry milling Inconel 718. *Int J Adv Manuf Technol* 74, 1133–1139 (2014).
<https://doi.org/10.1007/s00170-014-6006-1>
- [55] U.Karaguzela,M.Bakkala,E.Budak : Modeling and measurement of cutting temperatures in milling *Procedia CIRP* 46 (2016) 173 – 176 <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.182>
- [56] A.Czan ,M. Sajgalik .j. Holubjak , L.Zauskova, T.Czanova, P.Martikan :Identification of Temperature in cutting Zone when Dry Machining of Nickel Alloy Inconel718.*Procedia Manufacturing* 14(2017)66-75.

- [57] **P. Kovac, M. Gostimirovic, D. Rodic, B. Savkovic** : Using the temperature method for the prediction of tool life in sustainable production, Measurement (2018), doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement>.
- [58] **Alexandre Il., Chatelain, JF., Lalonde, JF. M. Balazinski et X. Rimpau** : An experimental investigation of the influence of cutting parameters on workpiece internal temperature during Al2024-T3 milling. Int J Adv Manuf Technol 97, 413–426 (2018). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-003491-1.50040-X>.
- [59] **R.Joliet,A.Byfutb,P.Kersting,A.Schröderb.A.Zabela**:Validation of a heat input model for the prediction of thermomechanical deformations during NC milling, Procedia CIRP, vol. 8, pp. 403–408, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.124>
- [60] **D.J. Richardson*, M.A. Keavey, F. Dailami** : Modelling of cutting induced workpiece temperatures for dry milling 2005.
- [61] **W. Yousfi, O. Cahuc, R. Laheurte, P. Darnis et M. Calamaz** :3D milling modeling: mechanical actions, strains, strain rates and temperature calculations in the three cutting zones <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1351-5>.
- [62] **Ismail Lazoglu , Bircan Bugdayci** :Thermal modelling of end milling CIRP Annals - Manufacturing Technology journal homepage(2014): <http://ees.elsevier.com/cirp/default.asp>.
- [63] **M. Abdelkrim 1, , A. Belloufi1, G. Brabie2 T. Catalin2 & B. Chirita2** :Experimental Investigations to evaluate the effects of cutting parameters on cutting temperature and residual stresses during milling process of the AISI1045 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 227 (2017) 012001 doi:10.1088/1757-899X/227/1/012001.
- [64] **Sun, Y., Sun, J., Li, J. Q. Xiong**: An experimental investigation of the influence of cutting parameters on cutting temperature in milling Ti6Al4V by applying semi-artificial thermocouple. Int J Adv Manuf Technol 70, 765–773 (2014). <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5294-1>.
- [65] **Peng, Z., Li, J., Yan, P. et al** :Experimental and simulation research on micro-milling temperature and cutting deformation of heat-resistance stainless steel. Int J Adv Manuf Technol 95, 2495–2508 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1091-6>.
- [66] **Yong Yang ,Weiwei Zhu** : Study on cutting temperature during milling of Titanium alloy based on FEM and Experiment Int J Adv Manuf Technol (2014) 73:1511–1521 DOI 10.1007/s00170-014-5937-x.
- [67] **Nasri A, Tsoumarev O (2011)**:Numerical simulation of temperature distribution in a 3D ball end milling model. Int J Mach Mach 9(November 1998):209–222.
- [68] **M. SOORI,M. ASMAEL**:Cutting Temperatures in Milling Operations of difficult-to-cut Materials. Journal of New Technology and Materials Vol. 11, N°01 (2021)53-62.
- [69] **J. REH** : Influence of Cutting Tool Coatings on the Tribological Phenomena at the Tool. Chip Interface in Orthogonal dry Turning. Surface & Coatings Technology Vol.200, Pp.5132-5139, 2006, doi: 10.1016/j.surfcoat.2005.05.032.

- [70] **Y. Guétari**, Vers une meilleure compréhension de la coupe. Aspect rhéologique et simulation numérique par l'approche X-FEM. Thèse EC Nantes-Université de Nantes. N°ED 0367-217 (2005).
- [71] **Référence internet** <http://www.iron-foundry.com/AISI-1060-SAE-UNS-G10600-Carbon-Steel-Foundry.html>.
- [72] **A. Çalik**, Effect of Cooling Rate on Hardness and Microstructure of AISI 1020, AISI 1040 and AISI 1060 Steels, International Journal of Physical Sciences Vol. 4 (9), pp. 514-518, 2009.
- [73] **Société Sandvik** 490R-140412E-MM 2040 Plaquettes de Coupe Plaquettes en Carbone Insert pour fraisage.
- [74] **Référence internet**: www.flir.com.
- [75] **Zadeh, L.A.**, Fuzzy sets, (1965), Information and Control, 8(3), 338-353.
- [76] **Dernoncourt, F.**, (2013), Introduction to fuzzy logic, Massachusetts Institute of Technology, 1-19, available at file:///C:/Users/CCC/Downloads/fuzzy_logic1.pdf
- [77] **Sivasakthivel, P. S., & Sudhakaran, R.** (2012). Optimization of machining parameters on temperature rise in end milling of Al 6063 using response surface methodology and genetic algorithm. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 67(9-12), 2313-2323. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4652-8>
- [78] **Chawale, S.-B., Bhojar, V.-V., Ghawade, P.-S., & Kathoke, T.-B.** (2013). Effect of machining parameters on temperature at cutter-work piece interface in milling. International Journal of Engineering and Innovative Technology, 2(12), 85-88. https://www.ijeit.com/vol%202/Issue%2012/IJEIT1412201306_16.pdf
- [79] **al Hazza, M. H. F., Adesta, E. Y. T., Superianto, M. Y., & Riza, M.** (2012). Cutting temperature and surface roughness optimization in cnc end milling using multi objective genetic algorithm. International Conference on Advanced Computer Science Applications and Technologies (ACSAT), 2012, 275-278. <https://doi.org/10.1109/ACSAT.2012.39>.
- [80] **Kovac, P., Rodic, D., Pucovsky, V., Savkovic, B., & Gostimirovic, M.** (2014). Multi-output fuzzy inference system for modeling cutting temperature and tool life in face milling. Journal of Mechanical Science and Technology, 28(10), 4247-4256. <https://doi.org/10.1007/s12206-014-0938-0>
- [81] **Patel, B., Nayak, H., Araniya, K., & Champaneri, G.** (2014). Parametric optimization of temperature during CNC end milling of mild steel using RSM. International Journal of Engineering Research & Technology, 3(1), 69-73. <https://www.ijert.org/research/parametric-optimization-of-temperature-during-cnc-end-milling-of-mild-steel-using-rsm-IJERTV3IS10064.pdf>

- [82] Sun, Y., Sun, J., Li, J., & Xiong, Q. (2013). An experimental investigation of the influence of cutting parameters on cutting temperature in milling Ti6Al4V by applying semi-artificial thermocouple. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(5-8), 765-773. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5294-1>
- [83] Tamilarasan, A., & Marimuthu, K. (2014). Multi-response optimisation of hard milling process parameters based on integrated Box-Behnken design with desirability function approach. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 15(3/4), 300. <https://doi.org/10.1504/ijmmm.2014.060555>
- [84] Santhanakrishnan, M., Sivasakthivel, P. S., & Sudhakaran, R. (2015). Modeling of geometrical and machining parameters on temperature rise while machining Al 6351 using response surface methodology and genetic algorithm. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39(2), 487-496. <https://doi.org/10.1007/s40430-015-0378-5>
- [85] Tamilarasan, A., Marimuthu, K., & Renugambal, A. (2016). Investigations and optimization for hard milling process parameters using hybrid method of RSM and NSGA-II. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*, 39(1), 41-54.
- [86] Pabst, R., Fleischer, J., & Michna, J. (2010). Modelling of the heat input for face-milling processes. *CIRP Annals*, 59(1), 121-124. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.062>
- [87] Kumar, D., Chandna, P., & Pal, M. (2018). Efficient optimization of process parameters in 2.5 D end milling using neural network and genetic algorithm. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 9(5), 1198-1205. <https://doi.org/10.1007/s13198-018-0737-6>
- [88] Zhu, Z., Buck, D., Cao, P., Guo, X., & Wang, J. (2020). Assessment of Cutting Forces and Temperature in Tapered Milling of Stone-Plastic Composite Using Response Surface Methodology. *JOM*, 72(11), 3917-3925. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04368-1>
- [89] Ji, J., Yang, Q., Chen, P., Lu, K., & Wu, Y. (2021). An Improved Mathematical Model of Cutting Temperature in End Milling Al7050 Based on the Influence of Tool Geometry Parameters and Milling Parameters. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2021/5705091>
- [90] Kumar, S., Chandna, P., & Bhushan, G. (2022). Minimization of work piece temperature under the constraints of SR and MRR during 2.5 D milling process of Inconel 625 using GEMG-fuzzy and GA. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*. <https://doi.org/10.1007/s41939-021-00110-9>

Résumé : L'augmentation de la température de coupe présente l'un des aspects importants pendant les opérations de fraisage, car elle influe directement sur les contraintes résiduelles, les dimensions des pièces usinées et la durée de vie des outils de coupe. Les paramètres de coupe, le matériau et la forme géométrique de l'outil représentent les facteurs importants qui affectent la température de coupe. Dans notre étude, une caméra infrarouge intelligente est utilisée pour mesurer la température dans la zone de coupe en fonction du temps.

L'objectif est la prédiction des effets des paramètres de coupe sur la température à l'interface outil-pièce pendant l'opération de fraisage de l'acier AISI 1060 avec des outils en carbure. Une comparaison entre deux méthodes expérimentales et l'intelligence artificielle a été effectuée.

Les résultats ont montré que la température de coupe augmente lorsque les valeurs de la profondeur de passe, la vitesse de coupe, et le temps de coupe augmentent. L'avance par dent a moins d'influence, sauf pour les valeurs maximales de vitesse de coupe.

Les valeurs prédites, avec ce modèle flou, sont en bon accord avec les valeurs expérimentales, avec un pourcentage d'erreur moyen de 2,242%, ce qui correspond à une précision de 97,757%,

la technique de modélisation floue pourrait être une méthode efficace et économique pour la prédiction de la température de coupe durant les opérations de fraisage.

Mots clés: Fraisage, Température de coupe, Caméra infrarouge, Logique floue, Paramètres de coupe, Prédiction.

Abstract: The increase in cutting temperature presents one of the important aspects during milling operations, because it directly influences the residual stresses, the dimensions of the machined parts and the life of the cutting tools. The cutting parameters, the material and the geometric shape of the tool are the important factors that affect the cutting temperature. In our study, an intelligent infrared camera is used to measure the temperature in the cutting area as a function of time.

The objective is the prediction of the effects of the cutting parameters on the temperature at the tool-part interface during the milling operation of AISI 1060 steel with carbide tools; A comparison between two experimental methods and artificial intelligence was made.

The results showed that the cutting temperature increases when the values of depth of cut, cutting speed, and cutting time increase; the remaining feed per tooth is less influenced except for the maximum cutting speed values.

The predicted values, with this fuzzy model, are in good agreement with the experimental values, with an average error percentage of 2.242%, which corresponds to an accuracy of 97.757%,

The fuzzy modeling technique could be an effective and economical method for the prediction of cutting temperature during milling operations.

Key words: milling, Temperature, infrared camera, fuzzy logic, Cutting parameters, prediction.

ملخص : ان ارتفاع درجة حرارة القطع تعتبر من أحد الجوانب المهمة أثناء عمليات الطحن لأنها تؤثر بشكل مباشر على الضغوط المتبقية، وأبعاد الأجزاء المصنعة ومدة حياة أدوات القطع. تعد شروط القطع والمواد والشكل الهندسي للأداة من العوامل المهمة التي تؤثر على درجة حرارة القطع. في دراستنا تم استخدام كاميرا ذكية تعمل بالأشعة تحت الحمراء لقياس درجة الحرارة في منطقة القطع بدلالة الزمن.

الهدف هو التنبؤ بتأثيرات شروط القطع على درجة الحرارة عند واجهة جزء الاداة- والقطعة أثناء عملية طحن الفولاذ AISI 1060 بأدوات كربيد؛ تم إجراء مقارنة بين طريقتين تجريبية والذكاء الاصطناعي. أظهرت النتائج أن درجة حرارة القطع تزداد مع زيادة قيم كل من عمق القطع، سرعة القطع و وقت القطع اما التغذية فهي اقل تأثيراً باستثناء قيم سرعة القطع القصوى. تتوافق القيم المتوقعة بهذا النموذج الغامض الى حد كبير مع القيم التجريبية بنسبة خطأ متوسط قدره 2.242% وهو ما يتوافق مع دقة القياس بنسبة قدرها 97.757%.

يمكن أن تكون تقنية النمذجة الضبابية طريقة فعالة واقتصادية للتنبؤ بدرجة حرارة القطع أثناء عمليات الطحن.

كلمات مفتاحية: التفريز، درجة الحرارة، آلة التصوير الحرارية، المنطق الضبابي الغامض، شروط القطع، التنبؤ.