

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du **grade de doctorat en sciences**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Technologies Mécanique avancées (Fabrication et Productique)

Par : BENHADJI SERRADJ Nasr-eddine

Sujet

**Contribution à l'évaluation du champ thermique à l'interface
outil-pièce pour l'optimisation des conditions d'usinage**

Soutenue publiquement, le 11/07/2022, devant le jury composé de :

Mr BENACHOUR Mustapha	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mr GHERNAOUT Mohamed El Amine	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de thèse
Mr MERGHACHE Sidi Mohammed	MCA	Univ. Tissemsilt	Examineur 1
Mr RAHOU Mohamed	Professeur	ESSA. Tlemcen	Examineur 2
Mr SEBAA Fethi	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur 3
Mr. KARA ALI Abdelillah Djamal	MCB	Univ. Tlemcen	Invité 1

Année Universitaire : 2021-2022

Remerciements

Avant tout je remercie Allah le tout puissant, de m'avoir guidé toutes ces années et m'avoir donné la volonté, la patience et le courage pour terminer mon manuscrit.

*J'adresse un grand remerciement à mon encadreur Monsieur **GHERNAOUT Mohamed El Amine** Professeur à l'université de Tlemcen, que je remercie vivement pour ses conseils précieux, son excellent encadrement, ses conseils, sa motivation et sa disponibilité.*

*Je tiens à remercier Monsieur **KARA-ALI Djamel Abdelillah** Maître de conférences, à l'Université de Tlemcen d'avoir Co-encadré ce travail. Je lui témoigne toute ma gratitude et mes sincères remerciements.*

*Mes vifs remerciements vont aussi, à Monsieur Mr **BENACHOUR Mustapha**, Professeur à l'Université de Tlemcen, qui m'a fait l'honneur de bien vouloir présider le jury et pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail.*

*Que Messieurs, **MERGHACHE Sidi Mohammed** Maître de conférences à l'Université de Tissemsilt, **RAHOU Mohamed** Professeur à l'Ecole Supérieure en Sciences Appliquées-Tlemcen, **SEBAA Fethi**, Professeur à l'Université de Tlemcen, soient remerciés pour avoir accepté d'examiner ce travail, et le temps qu'ils ont consacré à la lecture du manuscrit.*

Mes sincères remerciements vont à tous mes collègues de travail pour leur soutien, les phrases d'encouragements et leur aide désintéressée.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tout ma famille Je remercie tous mes amis.

Enfin mes derniers mots vont vers ma femme et mes enfants

Dédicaces

A mes parents, que Dieu ait leur âme

A ma petite famille

A ma grande famille

A tous mes amis

A tous mes collègues

N. BENHADJI SERRADJ

ملخص

تنتج الحرارة القصوى في واجهة جزء الأداة-قطعة أثناء التصنيع. في الواقع، تؤثر الزيادة المفرطة في درجة الحرارة هذه اعتمادًا على شروط القطع بشكل كبير على عمر الأداة وجودة القطعة المصنوعة، وبالتالي تؤثر بشكل مباشر على الإنتاج. في هذا العمل، ننفذ منهجية تجريبية لقياس درجة الحرارة توفر بيانات متسقة أثناء عملية خراطة طولية لي صلب متوسطة الصلابة S 235 باستخدام أداة قطع من الكريبيد SNMG. تتيح لنا هذه المساهمة التحكم بشكل أفضل في تفاعلات الظواهر التي تؤثر على القطع في واجهة جزء الأداة، وتوجيه خياراتنا في تطوير نموذج الارتباط لتحليل العلاقات بين المعلمات والتنبؤ بها. درجة حرارة القطع. يعتمد إجراء القياس المنفذ لتقدير درجة الحرارة على استخدام كاميرا FLIR بالأشعة تحت الحمراء مثبتة ومحمية بجهاز على الآلة خراطة. تم اختيار طريقة Taguchi لإيجاد العلاقات بين عوامل الإدخال (سرعة القطع (Vc)، و التغذية (a)، وعمق (p)) وعامل الإخراج (درجة الحرارة (T)).

الكلمات المفتاحية: التشغيل الآلي ، شروط القطع ، التصوير الحراري ، قياس درجة الحرارة
، Taguchi.

Abstract

Maximum heat occurs at the tool-part interface during machining. In fact, the excessive increase in this temperature depending on the cutting parameters considerably affects the life of the tool and the quality of the workpiece, therefore directly on production.

In this work, we implement an experimental temperature measurement methodology that provides consistent data during a soft steel **S 235** turning operation using an SNMG carbide insert. This contribution allows us to better understand the interactions of phenomena influencing the cutting at the tool-part interface, and to guide our choices in the development of a correlation model for the analysis and prediction of relationships between machining parameters by measuring cutting temperature. The measurement procedure implemented for the temperature estimate is based on the use of a FLIR infrared camera mounted and protected by a device on the machine tool. The Taguchi method was chosen to find the relationships between the input factors (the cutting speed (V_c), the feed rate (a), the depth of cut (p)) and the output factor (the temperature (T)).

Keywords: machining, cutting conditions, thermography, temperature measurement, Taguchi.

Résumé

La chaleur maximale se produit à l'interface outil-pièce pendant l'usinage. En effet l'augmentation excessive de cette température en fonction des paramètres de coupe affecte considérablement la durée de vie de l'outil et la qualité de la pièce usinée, donc directement sur la production.

Dans ce travail, nous mettons en œuvre une méthodologie de mesure expérimentale de température qui permet d'obtenir des données cohérentes lors d'une opération de tournage de l'acier **S 235** en utilisant une plaquette en carbure SNMG. Cette contribution nous permet de mieux maîtriser les interactions des phénomènes influant de la coupe à l'interface outil-pièce, et de guider nos choix à l'élaboration d'un modèle de corrélation pour l'analyse et la prédiction des relations entre les paramètres d'usinage par la mesure de la température de coupe. La procédure de mesure mise en œuvre pour l'estimation de la température est basée sur l'utilisation d'une caméra infrarouge FLIR montée et protégée par un dispositif sur la machine-outil. La méthode de Taguchi a été choisie pour trouver les relations entre les facteurs d'entrée (la vitesse de coupe (V_c), la vitesse d'avance (a), la profondeur de passe (p)) et le facteur de sortie (la température (T)).

Mots clés : usinage, conditions de coupe, thermographie, mesure de la température, Taguchi.

Table des matières

Table des matières.....	I
Liste des figures.....	V
Liste des tableaux.. ..	IX
Liste des abreviations.....	X
INTRODUCTION GENERALE	-1-

Chapitre I : Généralités sur l’usinage

I. Présentation de la problématique	- 3 -
I.1 Présentation du tournage	- 4 -
I.2 Paramètres de coupe	- 4 -
I.3 Géométrie d’outil	- 5 -
I.3.1 Plans références d’outil en main	- 6 -
I.3.2 Angles de coupe de l’outil en main	- 6 -
I.4 Configuration géométrique de la coupe	- 8 -
I.5 Enlèvement de matière en tournage	- 9 -
I.6 Formation du copeau	- 10 -
I.7 Phénomène thermique	- 13 -
I.8 Conclusions	- 13 -

Chapitre II : Etat de l'art de la mesure de température

II. Introduction	- 14 -
II.1 Différentes approches de la mesure de température	- 14 -
II.2 Approche proposée	- 17 -
II.3 Conclusions	- 18 -

Chapitre III : Méthodes de mesure

III. Introduction	- 19 -
III.1 Transfert thermique	- 19 -
III.1.1 Conduction thermique	- 19 -

III.1.2 Convection thermique	- 20 -
III.1.3 Rayonnement	- 21 -
III.2 Méthodes de mesure de la température	- 23 -
III.2.1 Mesure par Conduction	- 25 -
III.2.1.1 Mesure directe par conduction	- 25 -
III.2.1.2 Mesure indirecte par conduction	- 28 -
III.2.2 Mesure par rayonnement infrarouge	- 30 -
III.2.3 Évaluation des techniques pour la mesure de la température	- 32 -
III.3 Thermographie	- 34 -
III.3.1 Nature du rayonnement infrarouge	- 34 -
III.3.2 Spectre infrarouge	- 35 -
III.3.3 Corps Noir	- 36 -
III.3.4 Facteur d'émission ou émissivité ϵ	- 36 -
III.3.5 Chaîne de mesure	- 37 -
III.3.6 Distance de mesure de la température	- 39 -
III.4 Conclusion	- 40 -

Chapitre IV : Etude expérimentale

IV. Introduction	- 42 -
IV.1 Etude expérimentale	- 42 -
IV.1.1 Présentation du matériel d'expériences	- 42 -
➤ Machine-outil	- 42 -
➤ Eprouvette	- 44 -
➤ Caractérisation de la matière de l'éprouvette	- 45 -
➤ Outil de coupe	- 49 -
IV.1.1.1 Mesure de la température	- 50 -
IV.1.1.1 Utilisation du logiciel de la caméra infrarouge	- 51 -
IV.1.1.2 Présentation de l'interface du logiciel	- 52 -
IV.1.1.3 Montage de la caméra infrarouge	- 55 -
IV.1.1.4 Chaîne d'acquisition	- 56 -
IV.1.1.5 Etalonnage de la caméra	- 57 -
IV.1.2 Essais préliminaires	- 59 -
IV.1.3 Essais de référence	- 61 -
IV.2 Conclusions	- 64 -

Chapitre V : Résultats et discussions

V. Introduction	- 65 -
V.1 Résultats des essais préliminaires	- 65 -
V.2 Résultats des essais de référence.....	- 66 -
V.2.1 Modèle de prédiction de la température	- 68 -
V.2.1.1 Précision et l'erreur entre température expérimentale et prédite	- 69 -
V.2.1.2 Analyse des effets des conditions de coupe	- 71 -
V.2.1.3 Droite de normalité de la distribution des résidus.....	- 72 -
V.2.1.4 Analyse de variance.....	- 72 -
V.2.2 Analyse des courbes et thermogrammes de température	- 73 -
V.2.2.1 Effets de la vitesse de coupe sur la température.....	- 73 -
V.2.2.2 Effets de l'avance sur la température	- 75 -
V.2.2.3 Effets de la profondeur de passe sur la température.....	- 76 -
V.2.3 Modèle de prédiction de la température par le polynôme du second degré	- 78 -
V.2.3.1 Coefficients de l'équation de régression	- 78 -
V.2.3.2 Analyse des interactions des conditions de coupe.....	- 80 -
V.2.3.3 Isothermes et surfaces de réponses.....	- 82 -
V.3 Optimisation des conditions de coupe	- 88 -
V.4 Conclusion	- 90 -

Conclusions générale et perspectives

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	
---	--

Bibliographie

Bibliographie	-93-
---------------------	------

Annexes

“A Contribution to the Thermal Field Evaluation at the Tool-Part Interface for the Optimization of Machining Conditions”. Engineering, Technology & Applied Science Research. Vol. 11, No. 6, 2021, 7750-7756	-97-
---	------

“Qualification and Validation of an in-situ Measurement Method of the Machining Temperature”. © Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2019..... -105-

Communications internationals..... -106-

- “Measurement of Cutting Temperature during Machining”. 5th international conference on advances in mechanical engineering istanbul 2019
ISTANBUL 2019, 17-19 DECEMBER 2019
- “Experimental technique for the in-situ measurement of temperature fields for the orthogonal cutting”. 5th international conference on advances in mechanical engineering istanbul 2018, 19-21 December, 2018. Yildiz Technical University, Istanbul, Turkey.
- “Approche thermique à l’interface outil-pièce Influence de la vitesse de coupe sur la température de l’outil”. CIMOSM2017 05 – 06 Décembre 2017 (FST-Fès, MAROC).

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur l'usinage

Figure I.1 : Procédé d'usinage.	- 3 -
Figure I.2 : Opération de chariotage.	- 4 -
Figure I.3 : Outil de tournage.	- 5 -
Figure I.4 Plans de l'outil en main ..	- 6 -
Figure I.5 : Angle de l'outil de coupe en main.	- 7 -
Figure I.6 : Coupe orthogonale.	- 8 -
Figure I.7 : Coupe oblique.	- 9 -
Figure I.8: Zone d'interaction outil-pièce.	- 9 -
Figure I.9 : Zones de déformations lors de la formation du copeau.	- 11 -
Figure I.10 : Copeau arraché.	- 11 -
Figure I.11 : Copeau continu.	- 12 -
Figure I.12 : Copeau continu adhérent.	- 12 -
Figure I.13 : Représentation des différents flux thermiques et sources de chaleur.	- 13 -

Chapitre III : Méthodes de mesure

Figure III. 1: Transfert par conduction.	- 20 -
Figure III. 2: Transfert par convection.	- 20 -
Figure III. 3: Transfert par rayonnement.	- 21 -
Figure III. 4 : Illustration des modes de transferts thermiques.....	- 22 -
Figure III. 5: Corrélation entre les conditions de coupe et la température.	- 23 -
Figure III. 6 : Méthodes de mesure de la température.	- 24 -
Figure III. 7: Thermocouple pièce-outil.	- 25 -
Figure III. 8: Thermocouple transversal.	- 26 -
Figure III. 9: Thermocouple incorporé.	- 27 -
Figure III. 10: Thermocouple à fil.	- 27 -
Figure III. 11: Isothermes de l'outil de coupe (P20), acier AISI 1040	- 28 -
Figure III. 12: Contours de la distribution de la température sur la face de l'outil.	- 29 -
Figure III. 13: Pyromètre.	- 31 -
Figure III. 14: Mesure par thermocouple à fibre optique.	- 32 -

Figure III. 15: Mesure par caméra infrarouge.	- 32 -
Figure III. 16: Spectre électromagnétique.	- 36 -
Figure III. 17: Variation de l'émissivité ε avec l'angle d'observation φ	- 36 -
Figure III. 18: Chaîne de mesure en thermographie infrarouge.	- 38 -
Figure III. 19 : Représentation de l' <i>IFOV</i>	- 39 -
Figure III. 20 : Nombre de pixel pour la mesure moyenne de température.	- 40 -

Chapitre IV : Etude expérimentale

Figure IV. 1: Photographie de la machine-outil utilisée.	- 42 -
Figure IV. 2: Eprouvette.	- 44 -
Figure IV. 3 : Machines des essais (<i>a</i> et <i>b</i>).	- 45 -
Figure IV. 4 : (<i>a</i>) Machine Charpy, (<i>b</i>) Ohmmètre (MT-1705).	- 46 -
Figure IV. 5 : Etincelages et interface des résultats du spectromètre.....	- 47 -
Figure IV. 6: Traces des étincelles sur l'échantillon.	- 48 -
Figure IV. 7: Photographie de porte-outil utilisé.	- 49 -
Figure IV. 8: Photographie des plaquettes utilisées.	- 49 -
Figure IV. 9: caméra infrarouge FLIR A305sc.	- 50 -
Figure IV. 10: Interface du logiciel de la caméra FLIR 305 sc.	- 52 -
Figure IV. 11: Interface d'enregistrement.	- 54 -
Figure IV. 12: Thermogramme d'usinage.	- 55 -
Figure IV. 13: Schéma du montage de la caméra infrarouge (SW).	- 55 -
Figure IV. 14: Photographie du montage de la caméra.	- 56 -
Figure IV. 15: Chaîne d'acquisition et de traitement des données thermiques.	- 56 -
Figure IV. 16: Zones du thermosignal.	- 57 -
Figure IV. 17: Représentation de température du même thermogramme.	- 58 -
Figure IV. 18: Courbe d'étalonnage de la caméra FLIR SC305	- 59 -
Figure IV. 19: Montage de la caméra.	- 60 -
Figure IV. 20: Thermogrammes.	- 60 -
Figure IV. 21: Photographie de l'usinage.	- 61 -

Chapitre V : Résultats et discussions

Figure V.1: Courbes de température (outil, pièce, copeau).....	- 65 -
Figure V.2: Variations des températures.	- 66 -
Figure V.3 : Interface du logiciel (thermogramme).	- 67 -
Figure V.4 : Interface du logiciel et les zones de la courbe étudiée.	- 68 -
Figure V.5: Courbe expérimentale et prédite.	- 71 -
Figure V.6: Effets des conditions de coupe sur la température.	- 71 -
Figure V.7 : Droite de normalité de la distribution des résidus.	- 72 -
Figure V.8: Température en fonction de la vitesse de coupe.	- 73 -
Figure V.9: Thermogramme point (A).	- 74 -
Figure V.10: Thermogramme point (B).	- 74 -
Figure V.11: Température en fonction de l'avance.	- 75 -
Figure V.12: Thermogramme point (C).	- 75 -
Figure V.13: Thermogramme point (D).	- 76 -
Figure V.14: Température en fonction de la profondeur de passe.	- 76 -
Figure V.15: Thermogramme point (E).	- 77 -
Figure V.16: Thermogramme point (F).	- 77 -
Figure V.17 : Courbes expérimentale et prédite.	- 80 -
Figure V.18 : Interaction des conditions de coupe.	- 80 -
Figure V.19 : Isotherme de la température en fonction de la vitesse de coupe et l'avance.	- 82 -
Figure V.20 : Isotherme en fonction de la vitesse de coupe et la profondeur de passe.....	- 82 -
Figure V.21 : Isotherme en fonction de l'avance et la profondeur de passe.	- 83 -
Figure V.22 : Surface de réponse de la température en fonction de V_c et a	- 83 -
Figure V.23 : Thermogramme pour $V_c=78$ m/min, $a=0.08$ mm/tr et $p=0.25$ mm.	- 84 -
Figure V.24 : Surface de réponse de de la température en fonction de V_c et p	- 84 -
Figure V.25 : Thermogramme pour $V_c=157$ m/min, $a=0.08$ mm/tr et $p=0.75$ mm.	- 85 -
Figure V.26 : Surface de réponse de de la température en fonction de a et p	- 85 -
Figure V.27 : Thermogramme pour $V_c =112$ m/min, $a=0.14$ mm/tr et $p=1$ mm.	- 86 -
Figure V.28 : Courbes de tendance.	- 87 -
Figure V.29 : Incidence des conditions de coupe.	- 89 -

Liste des Tableaux

Chapitre III : Méthodes de mesure

Tableau III. 1: poudres fines de du silicate de sodium.	- 30 -
Tableau III. 2 : Revêtement en PVD.	- 30 -
Tableau III. 3 : Évaluation des techniques pour la mesure de la température.	- 33 -

Chapitre IV : Etude expérimentale

Tableau IV. 1: Caractéristiques du tour.	- 43 -
Tableau IV. 2: Tableau des vitesses de rotation.	- 43 -
Tableau IV. 3: Tableau des avances.	- 44 -
Tableau IV. 4: Caractéristiques physiques et chimiques.	- 48 -
Tableau IV. 5: Spécifications de la caméra infrarouge FLIR A305sc.	- 51 -
Tableau IV. 6: Conditions de coupe.	- 59 -
Tableau IV. 7: Résultats des expériences préliminaires.	- 60 -
Tableau IV. 8: Facteurs et niveaux (conditions de coupe).	- 62 -
Tableau IV. 9: Résultats des essais.	- 63 -

Chapitre V : Résultats et discussions

Tableau V.1: Coefficients de l'équation de régression.	- 69 -
Tableau V.2 : Comparaison des réponses.	- 70 -
Tableau V.3 : Analyse de la variance.	- 73 -
Tableau V.4 : Coefficients de l'équation de régression.	- 78 -
Tableau V.5 : Tableau des valeurs expérimentales(T° exp) et prédites(T° préd).	- 79 -
Tableau V.6 : Analyse de la variance.	- 81 -
Tableau V.7 : Température en usinage et dégagement.	- 87 -

Symboles et abréviations

ϕ : Angle de cisaillement ($^{\circ}$)

γ : Angle de coupe en ($^{\circ}$)

α : Angle de dépouille en ($^{\circ}$)

β : Angle du bec en ($^{\circ}$)

ε : Émissivité

φ : Flux thermique (Watts)

λ : Longueur d'onde en (μm)

a : Avance en (mm/tr)

ANOVA: Analyse de la variance

TCMS : Système de surveillance de l'état des outils

CNMG : Désignation de la pastille (outil de coupe)

COMSOL Multiphysic : logiciel de simulation numérique

HDPE : Polyéthylène à haute densité

IFOV : Angle de vision momentané en (radian)

IR : Radiation infrarouge

K : Température (en Kelvin)

L : Luminance ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)

MLP : Spectromètre à émission optique (MetalLab Plus)

MSR : Méthodologie de surface de réponse

NUC : Correction de non uniformité

p : Profondeur de passe (en mm)

PVD : Le dépôt physique en phase vapeur

S 235 : Acier doux non allié

S : Section (surface) en (m^2)

Sp : Spot

Sw : SolidWorks

T $^{\circ}$: Température en ($^{\circ}\text{C}$)

Vc : Vitesse de coupe en (m/min)

ZCP : Zone de cisaillement primaire

ZCS : Zone de cisaillement secondaire

ZCT : Zone de cisaillement tertiaire

Φ : Flux (Watts)

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

L'usinage par enlèvement de copeaux est un des procédés les plus utilisés dans la fabrication de pièces mécaniques. Durant l'usinage, les paramètres de coupe telle que la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de passe influent sur la structure métallographique de la surface usinée et les contraintes résiduelles. En effet une augmentation excessive de la température en fonction des paramètres de coupe affecte considérablement la durée de vie de l'outil et la qualité de la pièce usinée, donc directement sur la production.

Au cœur du procédé, deux phénomènes principaux se trouvent en interaction, une très forte déformation plastique dans les zones de cisaillement et le frottement du copeau sur la face de coupe de l'outil. On peut également ajouter le frottement de la face de dépouille sur la surface nouvellement usinée. L'énergie générée est alors en grande partie transformée en un flux thermique important qui modifie et détériore la surface usinée et l'outil de coupe représenté par la figure 1 : qui suit.

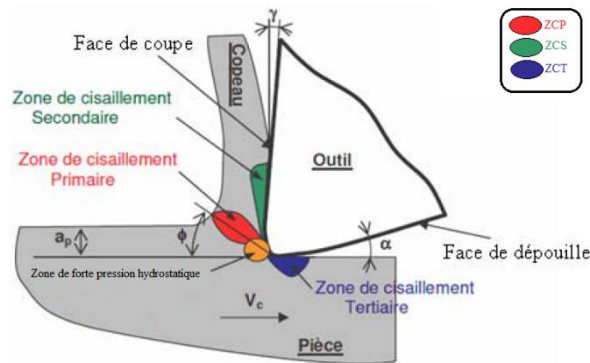


Figure 1 : Les principales zones du cisaillement.

Actuellement, le problème de mesure de température occupe une position déterminante dans les axes de recherche ou de nombreuses tentatives ont été faites en utilisant différents procédés et des modèles mathématiques ont été développés pour sa prévision. L'usinage des matières dures et le développement de nouveaux matériaux de l'outil, ainsi que l'avancée dans la technologie de fabrication nous oblige d'avoir une estimation et une prédiction de l'élévation de température à différents points de l'interface outil- pièce, de sorte que divers paramètres peuvent être ajustés de façon optimale au préalable pour améliorer l'usinabilité. La recherche accrue et sans relâche sur le rôle des températures de coupe sur

l'interface outil-pièce prend une percée essentielle et peut mener à des opérations d'usinage améliorées. Plusieurs méthodes sont développées et testées pour la mesure de la température, mais aucune ne s'est avérée parfaite. Certaines sont mieux à des situations, mais ne parviennent pas à d'autres. La technique appropriée pour un problème donné dépend de la situation de l'étude, comme la facilité d'accès, la dynamique de la situation, la précision souhaitée.

L'objectif principal de ce projet est de contribuer et d'apporter des informations destinées à clarifier sur la mesure et la prévision précise de la température qui demeure un défi dû à la complexité des phénomènes de contact à partir de la coupe orthogonale en tournage.

La rédaction de la thèse traite cette problématique et est organisée en cinq chapitres.

Le premier chapitre présente brièvement l'usinage. Il traite le phénomène de la coupe, En premier nous abordons la géométrie de l'outil en montrant les plans caractéristiques et les angles de coupe. Par la suite nous entamons le phénomène de la formation du copeau qui montre les différentes zones de cisaillement.

Le second chapitre est consacré à l'état de l'art des travaux de recherche sur la mesure des champs de température générés lors des procédés d'usinage et des simulations pour la comparaison des résultats.

Le troisième chapitre traite en première partie les différents transferts thermiques utilisés pour le calcul la distribution de la chaleur à l'interface outil pièce puis les méthodes de mesure de la température, par conduction et par rayonnement lors des procédés d'usinage et en dernière partie la thermographie infrarouge.

Le quatrième chapitre comprend l'étude expérimentale en présentant le matériel utilisé pour l'usinage et la mesure de la température ainsi que la démarche adoptée. Nous avons réalisé deux campagnes d'essais d'usinage en filmant la scène du flux thermique à l'aide de la caméra infrarouge.

Le dernier chapitre présente les résultats et discussions de l'effet de la température sur les paramètres de coupe pris en considération. A partir de nos résultats, nous avons caractérisé la température de l'usinage, ce qui nous a permis de proposer un modèle mathématique global en fonction des paramètres de coupe. Nous proposons à la fin, une optimisation avec comme contraintes les conditions de coupe.

Une conclusion générale et des perspectives de développement de cet axe clôturent notre travail.

Chapitre I
Généralités sur l'usinage

Chapitre I

Généralités sur l'usinage

I. Présentation de la problématique

L'usinage semble prendre aujourd'hui un nouveau tournant. La demande croissante d'une grande productivité et la mise au point de nouvelles machines sophistiquées ont conduit les industriels à adopter des paramètres de coupe plus sévères (augmentation des vitesses de coupe, des avances, etc. ...). Ils se trouvent alors confronter au phénomène de l'augmentation de la chaleur à l'interface outil-pièce qui reste un objectif important dans la recherche actuelle sur la coupe des métaux. Notre travail est orienté sur l'étude du flux de chaleur dans la zone de la coupe qui est représenté par la figure suivante :

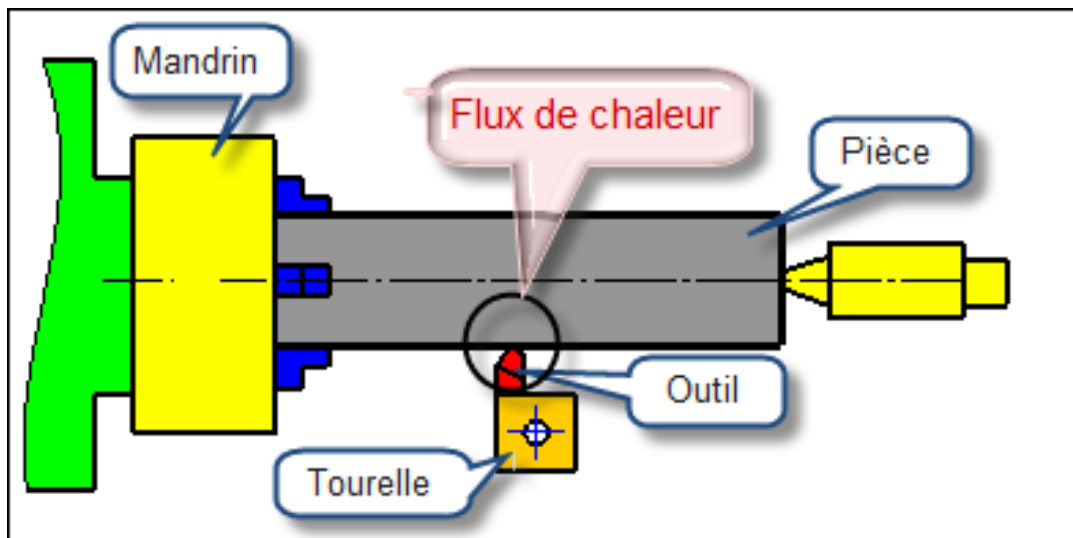


Figure I.1 : Procédé d'usinage.

Lors d'une opération de coupe, un outil déforme la matière à usiner jusqu'à ce qu'elle se détache sous forme de copeaux. Le processus de déformation génère la chaleur, la pression et des contraintes qui finissent par provoquer l'usure ou la défaillance de l'outil de coupe et la mauvaise qualité de l'usinage. La modélisation de la coupe a été et reste un des objectifs principaux de la recherche industrielle ainsi que les connaissances scientifiques liées aux phénomènes de la formation du copeau et leurs modélisations restent limitées.

I.1 Présentation du tournage

Le tournage est un procédé de mise en forme par enlèvement de matière. Il fait intervenir un outil de coupe à arête unique. La matière enlevée est évacuée sous forme de copeaux (figure I.2). Les procédés d'usinages restent toujours en constante évolution par l'utilisation de plus en plus étendue de la commande numérique, de la programmation automatique des machines-outils, l'usinage à grande vitesse et des conditions de coupe sévères. L'emploi de matériaux très durs ou réfractaires d'usinabilité difficile, qui demandent des matériaux à outils très résistants. Parallèlement, ces progrès font apparaître de nouveaux matériaux susceptibles d'être utilisés pour réaliser des outils coupants répondant à ces exigences.

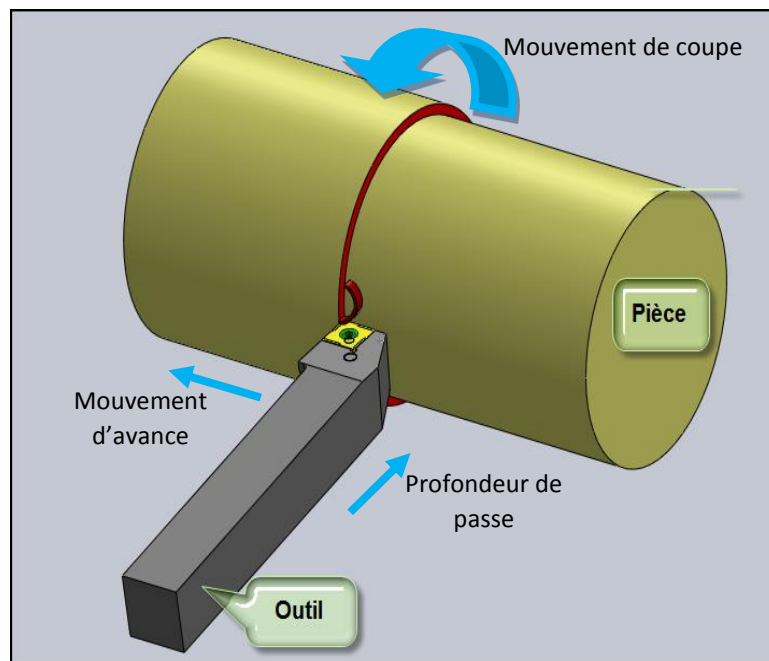


Figure I.2 : Opération de chariotage.

I.2 Paramètres de coupe

Les paramètres de coupe sont les grandeurs que l'on peut régler lors d'une opération de d'usinage. Ils conditionnent les phénomènes mécaniques mis en jeu au cours de la coupe et sont à l'origine des puissances mécaniques et thermiques dissipées. Les principaux paramètres de coupe sont :

✓ Vitesse de coupe

La vitesse de coupe est un paramètre fondamental pour la formation du copeau. Elle est la vitesse relative entre l'arête de coupe de l'outil et la matière enlevée et dépend de la configuration d'usinage, du procédé et du couple outil/matière.

✓ Avance

L'avance correspond au mouvement axial de l'outil au cours de l'usinage. C'est la valeur de laquelle se déplace axialement l'outil à chaque tour.

✓ Profondeur de passe

La profondeur de passe correspond à la longueur de l'arête de coupe engagée dans la matière. La profondeur de passe et l'avance vont influencer sur la formation du copeau car elles modifient la section du copeau et donc l'énergie nécessaire au cisaillement de la matière.

I.3 Géométrie d'outil

L'outil de coupe est formé d'un corps de section variable pour sa fixation sur le porte-outil et une partie active constituée de la face de coupe et la face de dépouille qui interviennent dans le processus de la coupe (figure I.3).

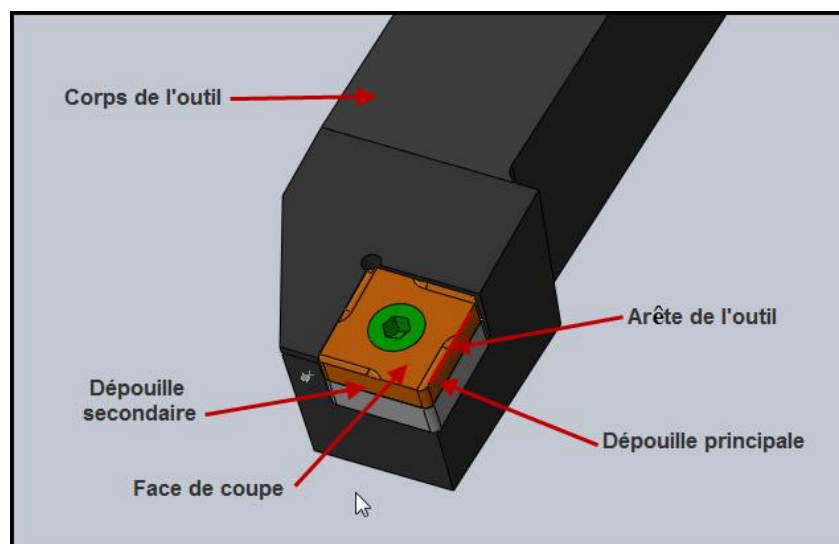


Figure I.3 : Outil de tournage.

I.3.1 Plans références d'outil en main

Les plans établis pour observer les différentes sections orthogonales de la partie active de l'outil sont les suivantes (figure.I.4) :

- P_r : plan parallèle à la face d'appui de l'outil.
- P_s : plan tangent à l'arête et perpendiculaire à P_r .
- P_o : plan contenant la vitesse de coupe théorique V_c au point de l'arête et perpendiculaire à P_r et perpendiculaire à P_s (P_o est incliné par rapport à V_c).
- P_n : plan perpendiculaire à P_o et perpendiculaire à l'arête.
- P_f : plan perpendiculaire à P_r et parallèle à la vitesse d'avance a .

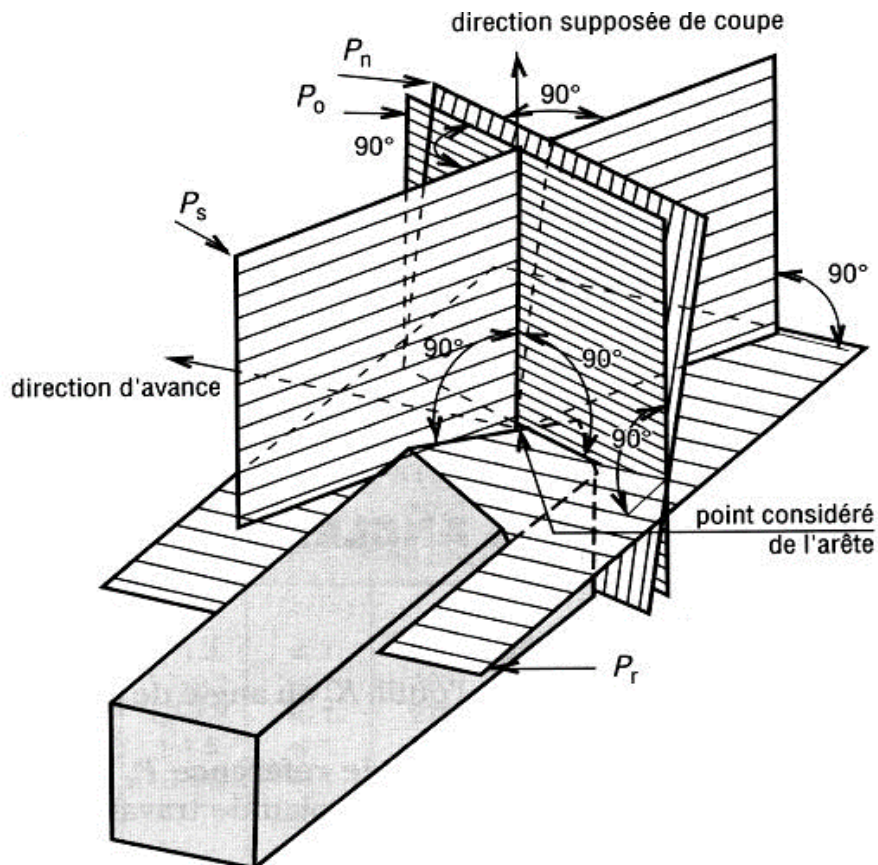


Figure I.4 Plans de l'outil en main d'après la norme NF E 66-503[28].

I.3.2 Angles de coupe de l'outil en main

À partir de ses plans on peut définir des systèmes d'angles selon chaque section voulue en notant toujours les désignations d'angles suivants :

- α : angle de dépouille principal.
- β : angle de taillant.
- γ : angle de coupe.
- ψ : angle de direction complémentaire de l'arête.

Pour distinguer les angles de coupe d'un plan à l'autre, on attribue l'indice du plan choisi pour chaque angle observé dans sa section. Exemple : Sur le plan P_f , les angles observés sont : α_f , β_f et γ_f (figure.I.5). Le choix de ces paramètres dépend directement de la forme de l'outil de coupe et sa nuance, de la matière de la pièce à usiner, du type de machine outil et de l'opération à exécuter et des contraintes de finition du produit exigé.

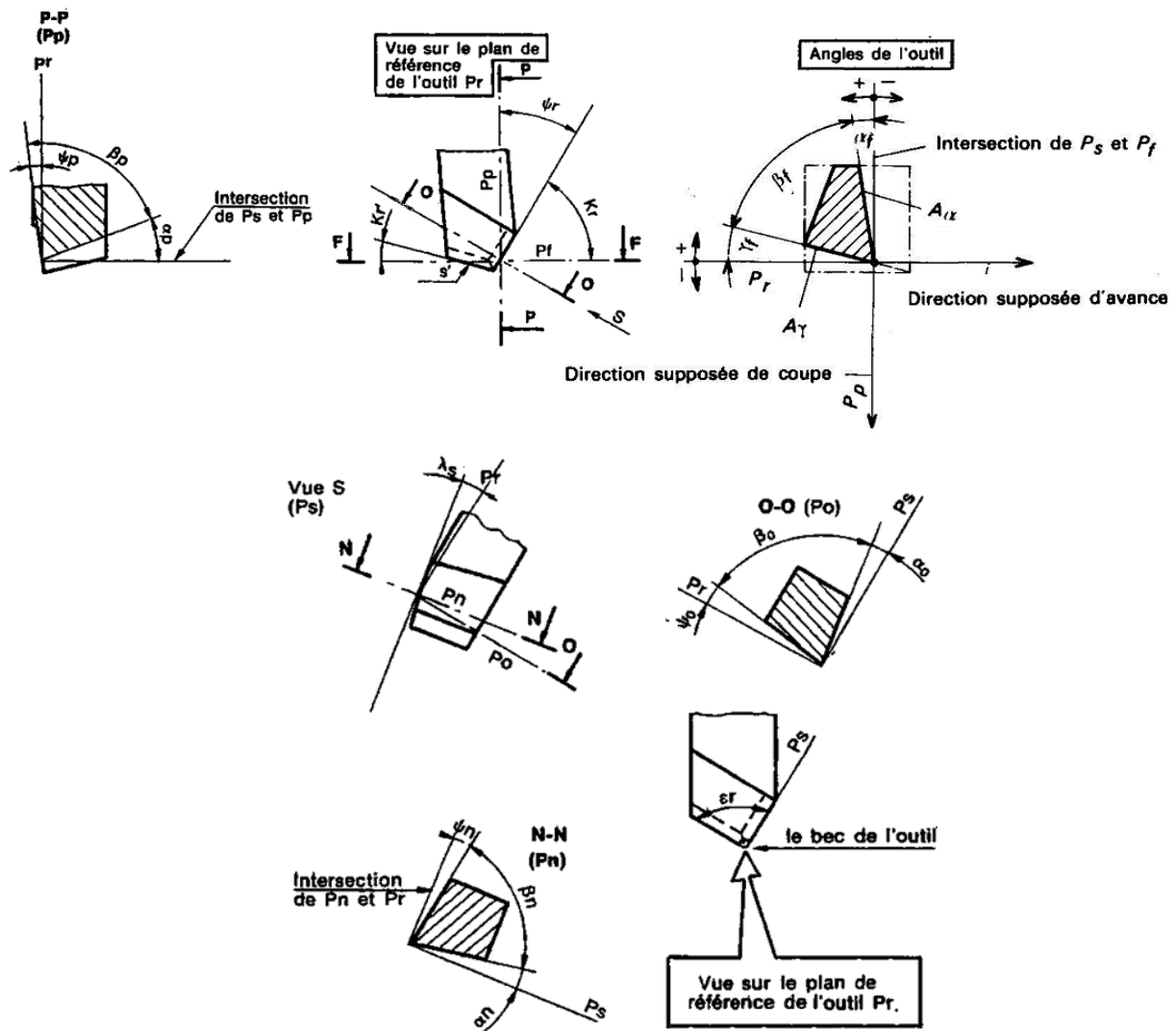


Figure I.5 : Angle de l'outil de coupe en main [28].

La géométrie de la partie active de l'outil influe sur la variation de la température. La modification de l'angle de coupe (γ) intervient sur la pression du copeau sur la face de coupe de l'outil, le frottement augmente avec un angle négatif de (γ).

I.4 Configuration géométrique de la coupe

Selon la géométrie de l'arête de coupe, on peut considérer deux cas :

➤ Coupe orthogonale

La coupe orthogonale est la configuration la plus simple pour usiner une pièce. L'angle de direction κ est orthogonal. Cette configuration est peut employer dans le monde industriel. En effet, dans la pratique, seuls quelques procédés classiques permettent d'obtenir ces conditions comme par exemple le rabotage, le tournage de tube en bout et l'usinage de palier. (figure I.6)

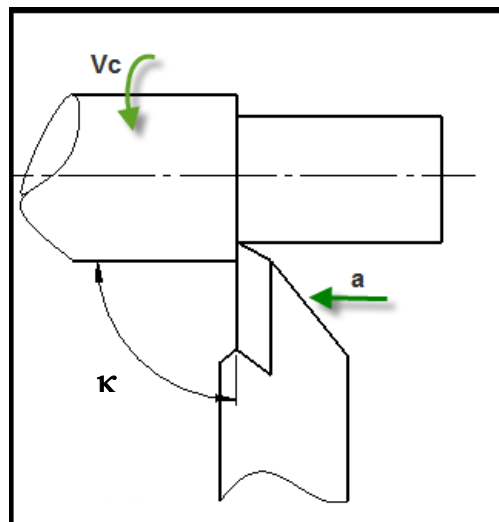


Figure I.6 : Coupe orthogonale.

➤ Coupe oblique

Une deuxième représentation schématique de la formation du copeau où l'angle de direction κ est oblique est dans la plupart des procédés d'usinage sur machine-outil, (Figure I.7).

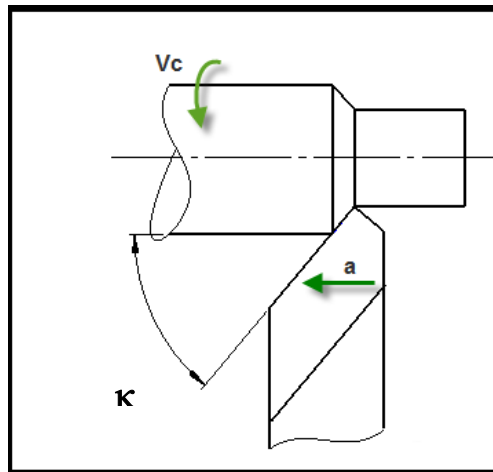


Figure I.7 : Coupe oblique.

I.5 Enlèvement de matière en tournage

Dans l'usinage des métaux, l'outil exerce des forces mécaniques sur la pièce, ce qui entraîne la formation de copeau qui est caractérisée par l'apparition des quatre zones (Figure I.8).

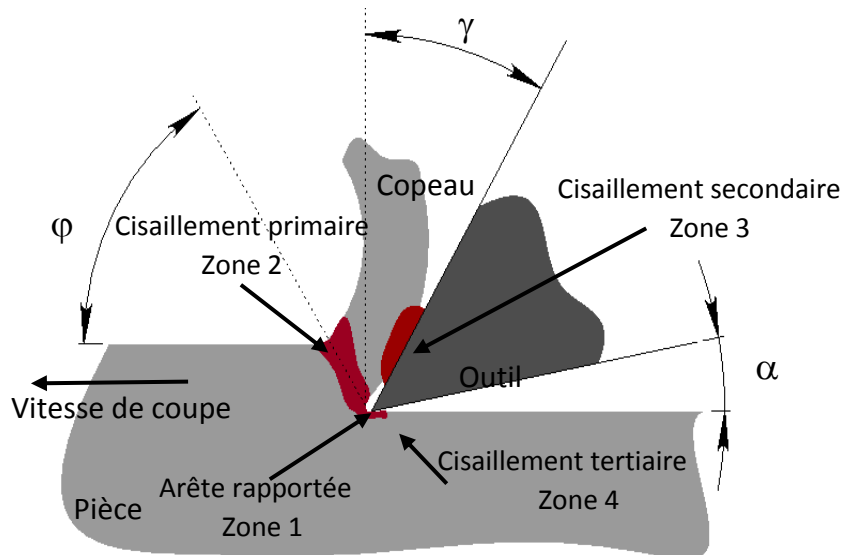


Figure I.8: Zone d'interaction outil-pièce.

Zone 1 : C'est la zone de la séparation de la pièce à usiner en deux sous l'action de l'outil de coupe (arête de coupe). Elle est caractérisée par une déformation intense de la matière. Ces

déformations sont parmi les causes de la genèse des contraintes résiduelles en surface. Une arête rapportée se forme par soudure de la matière de la pièce sur l'outil dans cette zone.

En effet le copeau atteint une température permettant de le rendre (collant) mais, à ce stade, il refroidit suffisamment vite pour s'adhérer à la plaquette.

Zone 2 : Elle provient du changement de direction d'écoulement de la matière ; cette zone est le siège de cisaillement et de taux de cisaillement intenses engendrant une forte élévation thermique due à la dissipation.

Zone 3 : Le copeau s'écoule avec une vitesse entre $1/3$ et $1/2$ de la vitesse de coupe. Cette diminution de la vitesse est expliquée par le fait que l'épaisseur du copeau déformé est différente de celle non déformé, en plus les phénomènes d'adhésion ralentissent d'avantage l'écoulement de la matière ce qui donne lieu à un cisaillement plastique de la matière. Cette zone de cisaillement présente les déformations supplémentaires de la matière usinée au-delà de la zone de cisaillement primaire. Dans ce contexte, cette zone est dénommée zone de cisaillement secondaire (ZCS), caractérisée par des frottements de glissement intenses, qui entraîne une augmentation de la température. Cette température élevée active le phénomène d'usure par diffusion des atomes du copeau vers l'outil. L'existence des particules dures à l'interface outil copeau, dans cette zone, déclenche aussi l'usure par abrasion ce qui se traduit par une usure en cratère [1].

Zone 4 : Il est également nécessaire de présenter la zone limitée par le rayon de l'arête de l'outil et la face de dépouille de l'outil, où les frottements de glissement se produisent. Les phénomènes produits dans cette zone, zone de cisaillement tertiaire, sont responsables de l'obtention de l'état de la surface usinée et ont pour conséquence l'usure en dépouille.

I.6 Formation du copeau

Lors d'un usinage par enlèvement de matière l'arête de l'outil pénètre dans la pièce et arrache le copeau, qui est le résultat de plusieurs actions mécaniques complexes. Au cœur du procédé, deux phénomènes principaux se trouvent en interaction : une très forte déformation plastique dans les zones de cisaillement et le frottement du copeau sur la face de coupe de l'outil. On peut également ajouter le frottement de la face de dépouille sur la surface nouvellement générée.

L'étude de l'intégrité de surface de la pièce (rugosité, contraintes résiduelles, écrouissage...), du copeau (morphologie, transformations microstructurales...) et l'outil (usure, dépôt métallique...) donne des indications supplémentaires sur la formation du copeau (figure I.9).

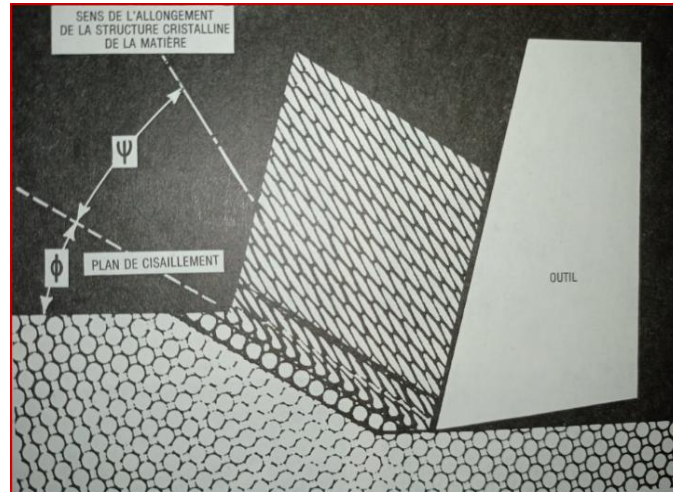


Figure I.9 : Zones de déformations lors de la formation du copeau [2].

L'usinage au tour produit des copeaux qui se classent en trois catégories fondamentales :

➤ Copeau arraché

Des copeaux arrachés (figure I.10) sont produits par certaines conditions de coupe, de métaux cassants tels la fonte et le bronze dur, ou certaines métaux ductiles [2].



Figure I.10 : Copeau arraché [2].

➤ Copeau continu

Consiste en un ruban ininterrompu qui provient de l'écoulement du métal à proximité de la face de l'outil, lorsque cet enroulement n'est pas entravé par l'adhérence et le frottement à hauteur de l'interface copeau-outil. Le copeau continu caractérise une coupe idéale en conséquence il entraîne une réduction de durée de vie d'arête : échauffement excessif, écaillage, arête rapportée, risque de rupture (figure I.11).

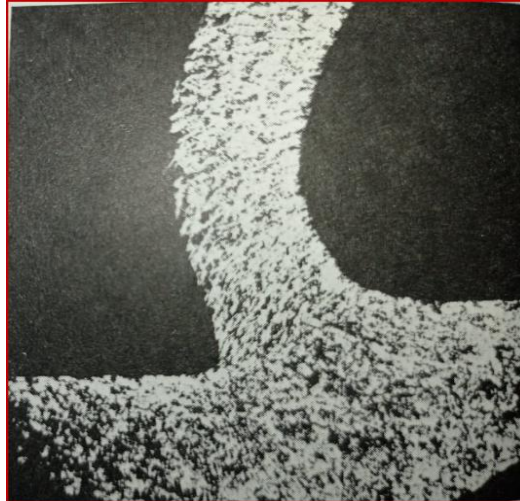


Figure I.11 : Copeau continu [2].

➤ Copeau continu adhérent

L'acier d'usinage à base teneur en carbone donne généralement un copeau continu adhérent pour des outils en acier rapide sans lubrification. A mesure que l'usinage se poursuit, les particules qui adhèrent s'accumulent et entrave la coupe (figure I.12).

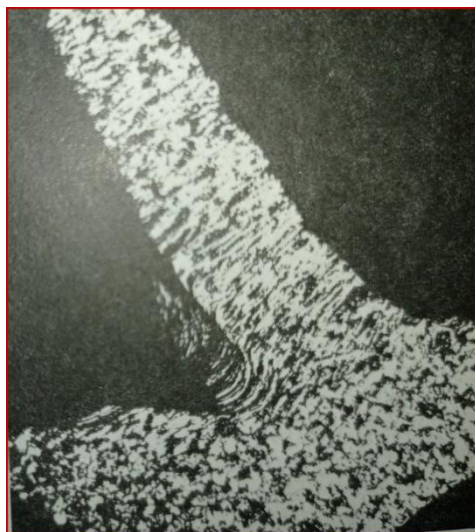


Figure I.12 : Copeau continu adhérent [2].

I.7 Phénomène thermique

La chaleur générée pendant l'usinage, son évacuation et ses conséquences sur la durée de vie des outils sont des problèmes importants. Le travail de formation du copeau est dégradé dans sa quasi-totalité sous forme de chaleur. Il en résulte une forte élévation de la température dans la zone de formation du copeau (figure I.13).

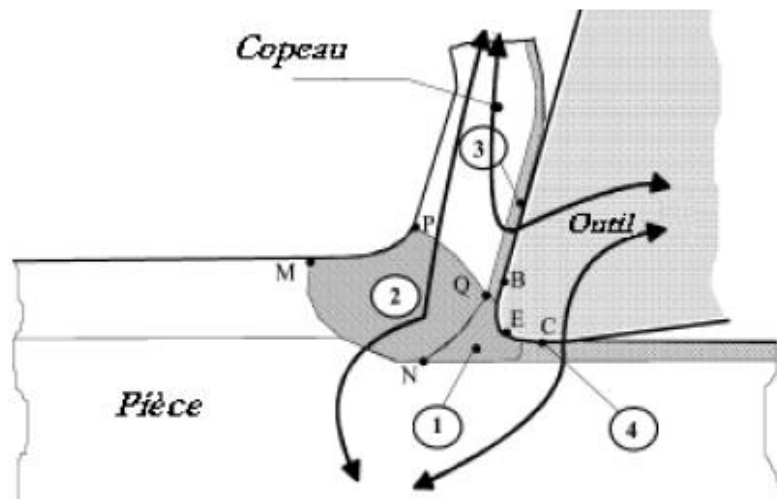


Figure I.13 : Représentation des différents flux thermiques et sources de chaleur [3].

L'étude de la zone de génération du copeau est la plus intéressante thermiquement, car elle est le siège des plus grands échauffements. Les mécanismes de génération de chaleur sont liés aux déformations plastiques engendrées dans les zones de cisaillement. L'ensemble des déformations et contraintes dépend également de la température.

I.8 Conclusions

La coupe reste un centre d'intérêt pour les chercheurs vu les interactions outil-pièce et leur influence sur l'usinage (la température, les efforts de coupe, la durée de vie et la qualité de finie de la pièce). L'interface outil – copeau crée un flux thermique qui sera le centre de notre travail.

Chapitre II
Etat de l'art de la mesure
de température

Chapitre II

Etat de l'art de la mesure de température

II. Introduction

Ce chapitre introductif cite un échantillon de travaux effectués sur la mesure de champ de température généré lors des opérations d'usinage et l'étude des interactions pièce-outil-copeau ou plusieurs méthodes ont été développées pour contribuer à la compréhension de ce phénomène. La majorité des travaux ont été réalisés sur les aciers, alliages d'aluminium et les supers alliages (alliage de titane, alliage de vanadium...).

II.1 Différentes approches de la mesure de température

Rossetto S. al. [4] ont mesuré la température de coupe à l'aide d'un vernis thermosensible. Ce dernier est déposé sur l'outil de coupe et change de couleur à partir d'une valeur de température bien définie. La frontière entre les deux couleurs présente l'isotherme (figureIII.11).

Inspiré par cette méthode, Lo Casto S. & al. [5] utilisent une méthode qui consiste à introduire une poudre, dont on connaît le point de fusion, entre deux parties d'une plaquette. Lorsque la température de fusion de la poudre est atteinte, l'essai est arrêté. Les points où la poudre a atteint son point de fusion matérialisent l'isotherme.

Les travaux de Wright P.K. & al. [6] ont pu déterminer la température par observation des changements microstructuraux de l'outil après usinage, en mesurant les changements de dureté à l'aide d'un test de microdureté avec une précision de plus ou moins 25°C. Les gradients de température très importants soulignent l'importance de la connaissance de la distribution de la température pour traiter les problèmes de durée de vie de l'outil (figure.III.12).

L'étude expérimentale menée par Bouzid W. [7] sur l'interaction outil-copeau a permis d'analyser l'intégrité de surface par l'étude des contraintes résiduelles et de l'érouissage du matériau par diffraction des rayons X ainsi que par l'observation métallographique de la pièce. Quelques micrographies du copeau ont permis de définir la géométrie du modèle de

la coupe orthogonale. La mesure de la température pendant cet usinage est faite par thermocouple et caméra infrarouge. Les températures influent fortement sur la durée de vie de l'outil. La modélisation des phénomènes thermomécaniques est faite par la méthode des éléments finis.

Stephenson D. A. [8] ont réalisé des essais de mesure de la température pendant l'usinage par un thermocouple outil-pièce et ils concluent que, pour les températures engendrées par les vitesses de coupe et profondeurs de passe élevées, le thermocouple outil-pièce est déconseillé, mais recommandé pour les vitesses et profondeurs de passe modérées (figure.III.7).

Pour la modélisation du procédé de coupe, Pantale O. & al. [9] utilisent les premières applications de l'approche mathématique (ALE) en trois dimensions en régime permanent sur un acier 42 CD 4. Deux applications sont ensuite présentées. La première concerne le modèle tridimensionnel du processus de coupe orthogonal et la seconde traite le modèle oblique. Des comparaisons avec des résultats expérimentaux sont également données et ont montré un niveau d'accord raisonnable.

L'article proposé par Abukhshim N.A. & al. [10] montre des exigences de modélisation pour la simulation du processus de l'usinage à grande vitesse (UGV) réalisé sur un acier AISI 4140. Pour l'expérimentation, ils ont utilisé une caméra infrarouge ayant une plage de mesure entre -20 et 2000 °C avec une précision de ± 2 °C. La gamme de vitesse de coupe est comprise entre 750 et 925 m/min avec des avances entre 0,1 mm et 0,15 mm.

Tandis que les travaux de recherche d'Abhang L.B. & al. [11] consistent à mesurer la température à l'interface outil-pièce en utilisant la technique du thermocouple outil-pièce, pendant le tournage de l'acier EN-31(100Cr6) avec une plaquette en carbure de tungstène. Les résultats obtenus sont analysés statistiquement et graphiquement et ils déduisent que les trois paramètres (vitesse de coupe, vitesse d'avance, profondeur de coupe) influent sur la température ainsi que le rayon de bec de l'outil. La technique du thermocouple outil-pièce s'avère une bonne méthode pour mesurer la température moyenne à l'interface pièce-outil et l'avantage de son utilisation est sa facilité de mise en œuvre et son faible coût par rapport aux autres thermocouples cités au chapitre 3 (figure.III.7).

Les travaux de Conradie P.J.T. & al. [12] montrent un aperçu sur l'étude et l'évaluation des techniques de mesure de la température pendant l'usinage. Ils déduisent que le temps de

réponse des méthodes de contact s'est avéré relativement lent alors que les méthodes optiques d'infrarouge ont l'avantage de la réponse rapide, permettant la capture de la génération de chaleur intermittente selon les besoins. Les expériences sont faites lors de l'usinage en fraisage et perçage d'un alliage de titane (Ti6 Al4V) utilisé dans le secteur aérospatial. En raison de sa faible conductivité thermique, la chaleur est concentrée dans une petite zone autour de l'arête tranchante. La température de coupe maximale augmente avec une augmentation de la vitesse de coupe. L'effet combiné de cette température à la formation de copeaux dentelés, cause l'usure de l'outil rapidement.

Atlati S. [13] a présenté une étude expérimentale sur l'usinage à sec des alliages d'aluminium utilisés dans la construction des avions civils (Airbus A320, A340, A380, etc.), et plus particulièrement l'alliage AA2024-T351. Les problèmes de collage et d'adhésion à l'interface outil-copeau, provoquant ainsi une usure prématurée des arêtes de coupe, l'usinage à sec de cet alliage reste encore mal maîtrisé. Son travail se focalise sur deux phénomènes, l'influence de la température et le frottement du copeau sur l'arête de coupe de l'outil. Les résultats numériques obtenus pour les flux thermiques avec cette nouvelle procédure d'identification hybride (analytique/numérique) sont en très bon accord avec les mesures expérimentales (approche inverse) pour le couple outil-matière considéré.

Pour estimer le flux de chaleur et le champ de température sur un outil de coupe de tournage en régime transitoire, Brito R.F. & al [14] proposent l'utilisation de la technique du problème non linéaire inverse avec le logiciel de simulation **COMSOL**. Le principe est d'obtenir la valeur d'une variable par la mesure d'une autre variable mesurée directement en utilisant souvent des techniques d'optimisation afin de réduire au minimum l'erreur entre la valeur calculée et la valeur réelle. Cette technique permet l'utilisation des données expérimentales. Une fois le flux de chaleur connu, le logiciel **COMSOL** est à nouveau utilisé pour obtenir le champ de température sur l'outil. La validation de la méthodologie se fait par comparaison de la mesure de la température des résultats numériques et expérimentaux.

La température de l'interface outil-pièce dans les travaux d'Abdil K., & al [15] ont été estimés par la mesure simultanée en utilisant un thermocouple de type (k) et le rayonnement d'un pyromètre infrarouge (IR). Un modèle de simulation par les éléments finis à trois dimensions a été également développé pour la reproduction de la température au contact d'outil-pièce. Un modèle FEM de distribution de chaleur a été construit avec précision ainsi que l'analyse était indispensable pour vérifier les résultats des tests.

La comparaison a montré une bonne concordance entre les valeurs de la température obtenue par simulation et les résultats expérimentaux.

Pour la mesure de l'évolution de la température de coupe de l'outil en fonction du temps, Abdelkrim M. [16] a mené des essais sur l'acier C45 en tournage par la méthode des thermocouples. Une étude comparative est faite entre les résultats obtenus par l'expérimentation et le modèle thermique 3D, développé par le logiciel **COMSOL**. L'analyse des résultats a montré que la température augmente lorsque les paramètres de coupe augmentent.

Hamlaoui N. & al. [17] se sont intéressés à l'usinabilité de la matière des tubes en HDPE obtenue par extrusion en vue de la préparation d'éprouvettes normalisées pour le contrôle de qualité de la matière. Ils étudient l'influence des paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) sur la température pendant l'usinage. Un modèle de second ordre est développé pour prédire la température de coupe en utilisant la méthodologie de surfaces de réponse (RSM). Les résultats obtenus indiquent que la température de coupe du HDPE est considérablement influencée par la vitesse de coupe.

Pour la première fois dans la littérature, Kuntoglu M. & al. [18] ont réalisé une étude expérimentale en intégrant cinq capteurs sur un tour pour l'usinage d'un acier AISI 5140. Un processus complet d'acquisition de données a été mené afin de collecter cinq données sensorielles à savoir la force de coupe, l'émission acoustique, la température du bec de l'outil, les vibrations de l'outil et le courant du moteur, en plus de la rugosité de la surface usinée (R_a) et de l'usure de l'outil (VB). Par l'acquisition de ces données en ligne, une analyse statistique et une approche d'optimisation basée sur la RSM a été appliquée. Les données des capteurs les plus fiables sont ceux de la force de coupe (97,8 %), suivi des capteurs l'émission acoustique (95,7 %) puis les capteurs de température (92,9 %) ensuite ceux des vibrations (81,3 %) et enfin ceux du courant (74,6 %). Pour l'obtention de meilleurs résultats de VB et R_a , cette approche a fourni les conditions de coupe optimales ($V_c=150$ m/min, $a=0,09$ mm/tr, $p=1$ mm).

II.2 Approche proposée

Les travaux de cette thèse proposent une étude expérimentale sur l'évolution de la chaleur à l'interface outil pièce durant une opération de chariotage en mesurant les séquences thermiques par une caméra infrarouge (**FLIR A305sc**) montée sur le chariot supérieur de la machine-outil utilisée.

II.3 Conclusions

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents travaux de la mesure de température pendant l'usinage. Les contraintes appliquées par l'outil sur le matériau usiné entraînent une élévation de température de ces deux derniers. Les méthodes expérimentales et les modèles analytiques sont les plus couramment cités pour les différents procédés d'usinage. Pour la mesure, les techniques les plus couramment utilisées sont le montage de thermocouples ou une combinaison thermocouple et caméra infrarouge. Celle-ci utilisée toute seule n'apparaît sur aucun travail de recherche. Notre objectif est de mesurer cette température pendant la coupe en utilisant une caméra infrarouge seule qui reste un défi pour son montage, réglage et sa protection des copeaux et bien sûr d'exploiter et analyser les résultats obtenus.

Chapitre III
Méthodes de mesure

Chapitre III

Méthodes de mesure

III. Introduction

Ce chapitre résume en premier lieu les principes de transferts thermiques suivi des différentes méthodes de mesure de la température pendant l'usinage trouvé dans la littérature, ainsi que de la technique d'imagerie thermique de mesure de température.

III.1 Transfert thermique

Dans cette partie nous rappelons les modes de transfert de chaleur ainsi que les facteurs d'influence s'exprimant lors de cette méthode de mesure. Ces quelques éléments ont pour but d'aider à la compréhension des phénomènes intervenant lors des mesures. Ainsi, les bonnes pratiques qui en découlent seront plus faciles à comprendre.

Les mesures de températures de surface mettent en œuvre trois modes de transfert de chaleur :

- Par conduction.
- Par convection.
- Par rayonnement.

III.1.1 Conduction thermique

La conduction est un processus physique de transmission de la chaleur qui s'appuie sur le milieu matériel, sans mouvement de matière, et qui fait passer la chaleur des zones chaudes aux zones froides à l'aide de mécanismes à l'échelle microscopique (vibrations moléculaires, diffusion électronique). La conduction est le seul mécanisme qui permet à la chaleur de se transmettre au sein d'un solide (figure III.1) [19].

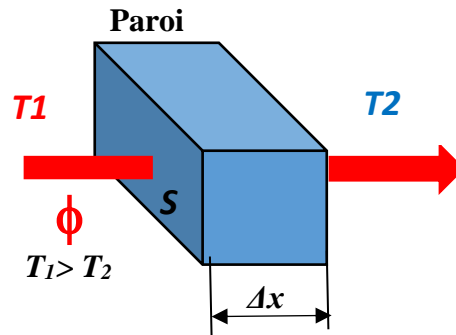


Figure III. 1: Transfert par conduction.

Ce mécanisme de transfert est décrit par la loi de Fourier rappelée ci-après [19] :

$$\Phi = \frac{\lambda S(T_1 - T_2)}{\Delta x} \quad (I.2)$$

Φ : Flux (watts).

λ : Conductivité thermique du matériau ($\text{w.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

S : Surface considérée (m^2).

$T_1 - T_2$: L'écart de température entre les deux faces de la paroi (K).

Δx : Epaisseur de la paroi (m).

III.1.2 Convection thermique

Si le milieu de transmission permet des mouvements naturels ou forcés de matière, ceux-ci peuvent favoriser l'échange thermique par transport cinématique et mélange des molécules "chaudes" avec les molécules "froides" (figure III.2) [19].

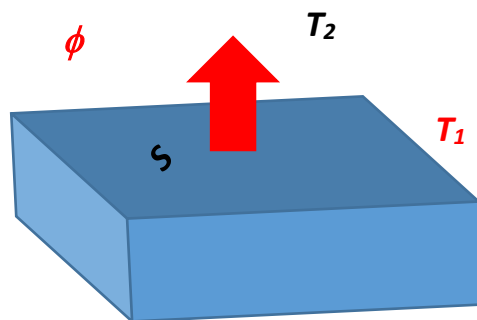


Figure III. 2: Transfert par convection.

Le flux de chaleur transmis par convection, entre une paroi à température T_1 et un fluide à la température T_2 , peut s'écrire sous la forme de la Loi de Newton :

$$\Phi = h \cdot S \cdot (T_1 - T_2) \quad (\text{I.3})$$

Φ : Flux (Watts).

h : Constante de Planck ($= 6.63 \times 10^{-34}$ J s).

S : Surface considérée (m^2).

T_1 : Température de la face de la paroi (K).

T_2 : Température du fluide (K).

III.1.3 Rayonnement

Les corps émettent de l'énergie par leur surface, sous forme d'un rayonnement d'ondes électromagnétiques, et ce d'autant plus que leur température est élevée. Inversement, soumis à un rayonnement, ils en absorbent une partie qui se transforme en chaleur. Ainsi, entre deux corps, l'un chaud, l'autre froid, mis en vis-à-vis (même séparés par du vide), une transmission de chaleur s'effectue par rayonnement du corps chaud vers le corps froid (figure III.3) [19].

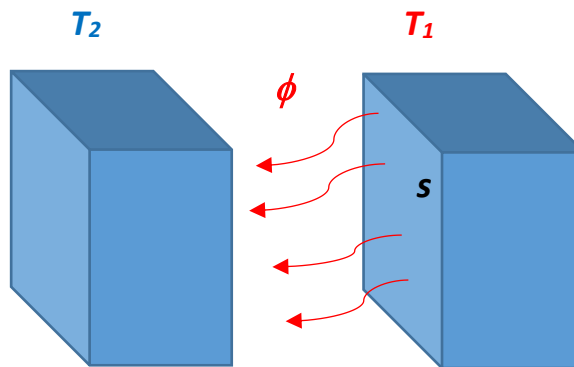


Figure III. 3: Transfert par rayonnement.

Ce mécanisme de transfert est décrit par la loi de Stefan exprimée ici sous forme de flux [19] :

$$\Phi = \sigma \cdot S \cdot \varepsilon_p \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (I.4)$$

σ : Constante de Stefan - Boltzmann ($=5,675 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2 \text{ K}^4$).

Φ : Flux (Watts).

S : Surface considérée (m^2).

T_1 : Température corps chaud (K).

T_2 : Température corps froid (K).

ε_p : Emissivité de la surface.

Le schéma suivant regroupe les trois modes de transfert de chaleur.

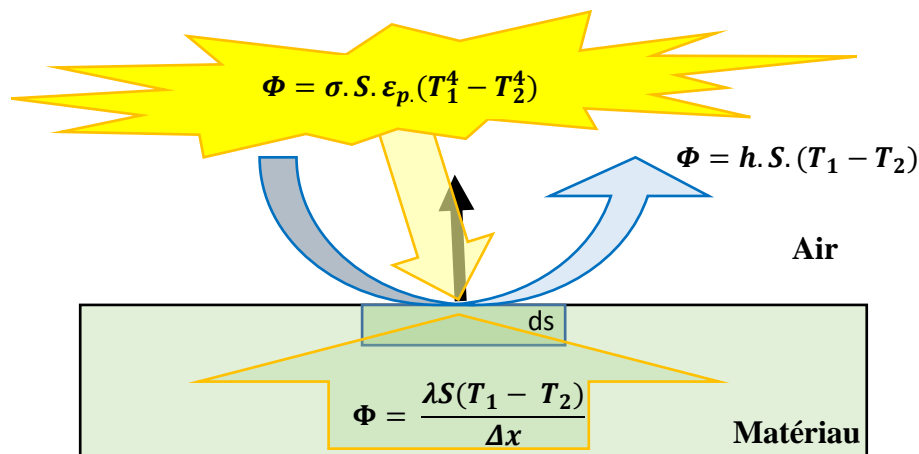


Figure III. 4 : Illustration des modes de transferts thermiques.

Le travail de formation du copeau est dégradé dans sa quasi-totalité sous forme de chaleur. Il en résulte une forte élévation de la température dans la zone de formation du copeau.

La corrélation entre les conditions de coupe et la température apparaît sur l'organigramme représenté par la figure III.5, notamment en ce qui concerne l'influence primordiale du facteur vitesse de coupe.

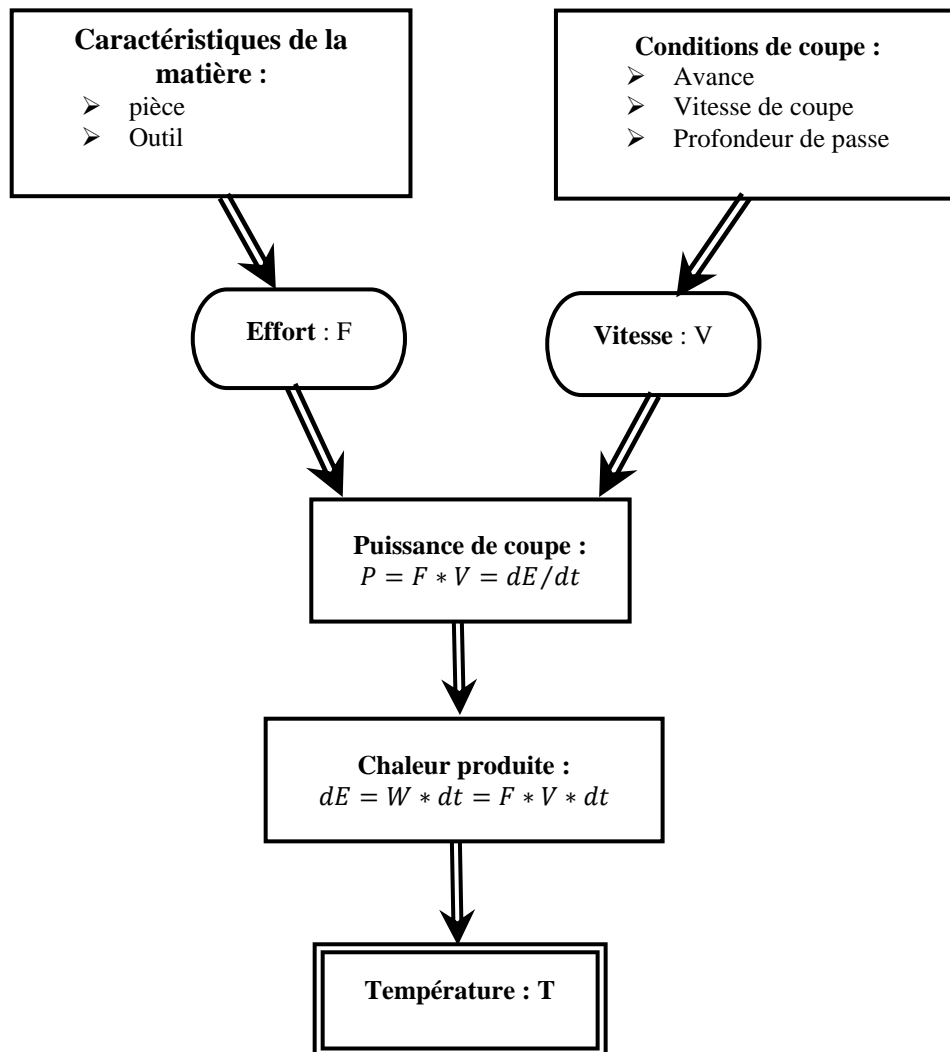


Figure III. 5: Corrélation entre les conditions de coupe et la température [20].

III.2 Méthodes de mesure de la température

On peut les classer en deux catégories suivant la figure III.6 :

- par conduction.
- par rayonnement thermique.

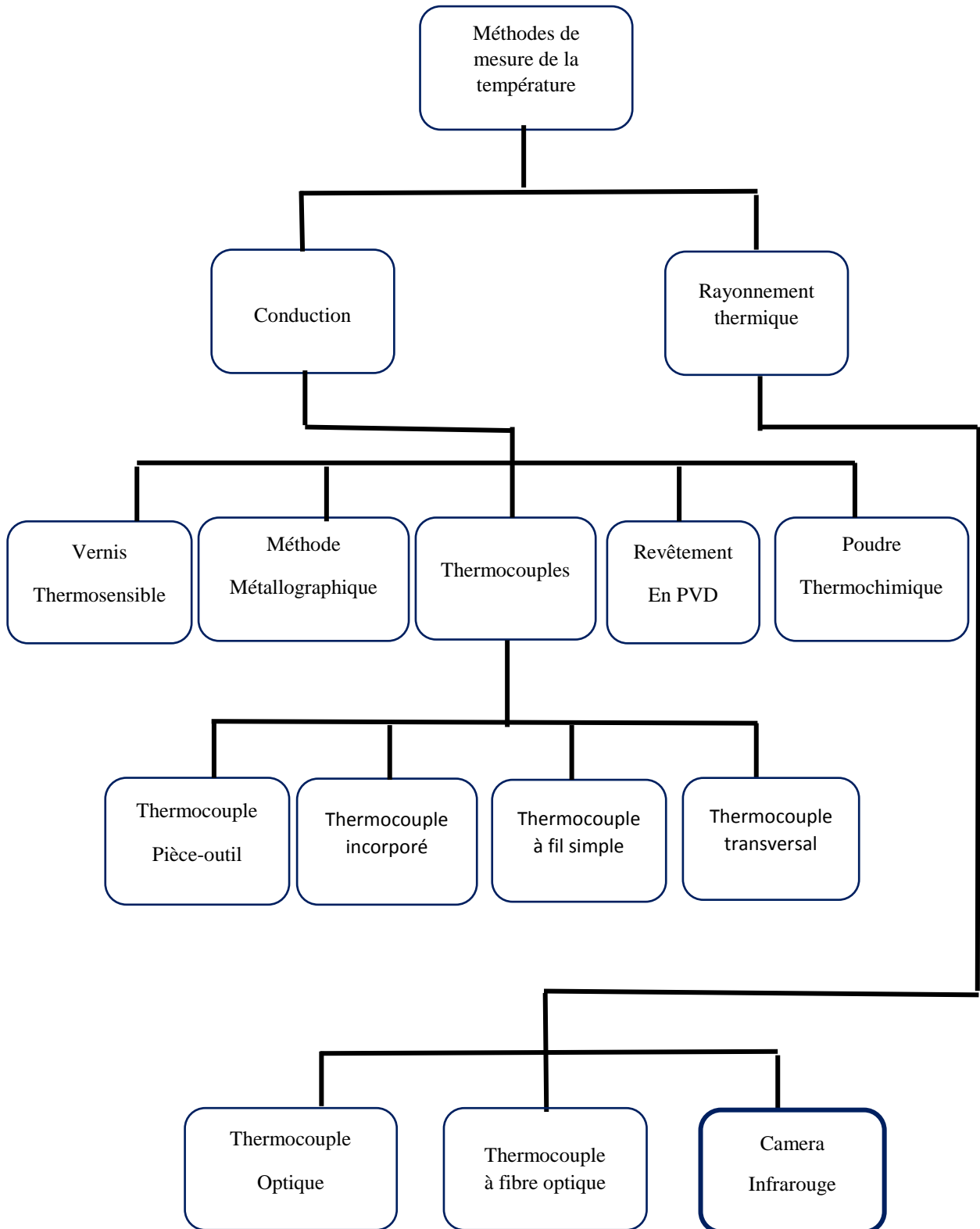


Figure III. 6 : Méthodes de mesure de la température.

III.2.1 Mesure par Conduction

La conduction thermique est un mode de transfert thermique provoqué par une différence de température entre deux régions d'un même milieu, ou entre deux milieux en contact, et se réalisant sans déplacement global de matière. Elle peut être directe ou indirecte.

III.2.1.1 Mesure directe par conduction

La mesure directe de la température par conduction utilise un thermocouple se basant sur le principe suivant : si deux métaux sont soudés à leurs extrémités et si une de ces soudures est portée à une température bien déterminée, l'autre étant maintenue à une température différente, on observera alors une force électromotrice entre les deux jonctions. L'évaluation de cette force, qui dépend des matériaux utilisés, symbolise la température mesurée.

➤ Thermocouple pièce-outil

Ce type de thermocouple est généralement utilisé en tribologie. Le principe est de prendre deux corps en mouvement relatif comme deux éléments d'un thermocouple. Cette technique est utilisée pour estimer la température à l'interface outil-pièce pendant l'usinage. L'outil et la pièce sont utilisés comme élément du thermocouple. A l'interface entre ces deux éléments, il y a formation d'une jonction qui par la suite jouera le rôle d'un thermocouple (figure III. 7).

[21-22] ont largement étudié et utilisé ces méthodes dans plusieurs opérations d'usinage (tournage, fraisage).

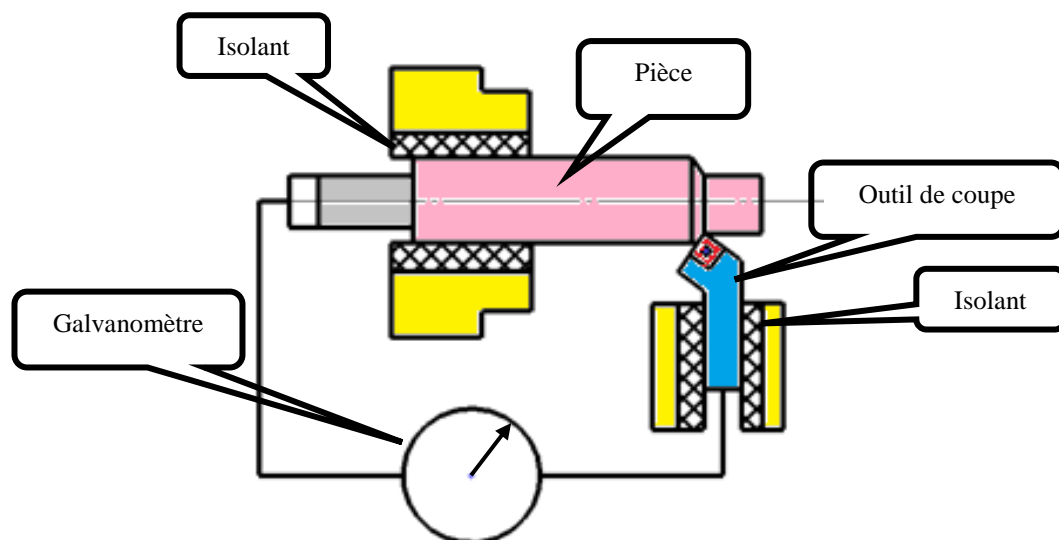


Figure III. 7: Thermocouple pièce-outil [22].

➤ **Thermocouple transversal**

Cette technique est utilisée pour mesurer la température moyenne à l'interface outil-pièce des différents points et faces de l'outil. La technique du thermocouple transversal a été développée par [23]. Elle est capable de notifier la température en différents points de l'outil à l'aide d'une sonde se déplaçant comme indiqué sur la figure III.8. Une grande vitesse de coupe de l'outil en acier et d'une sonde en carbure cémentée sont utilisés (ou vice versa).

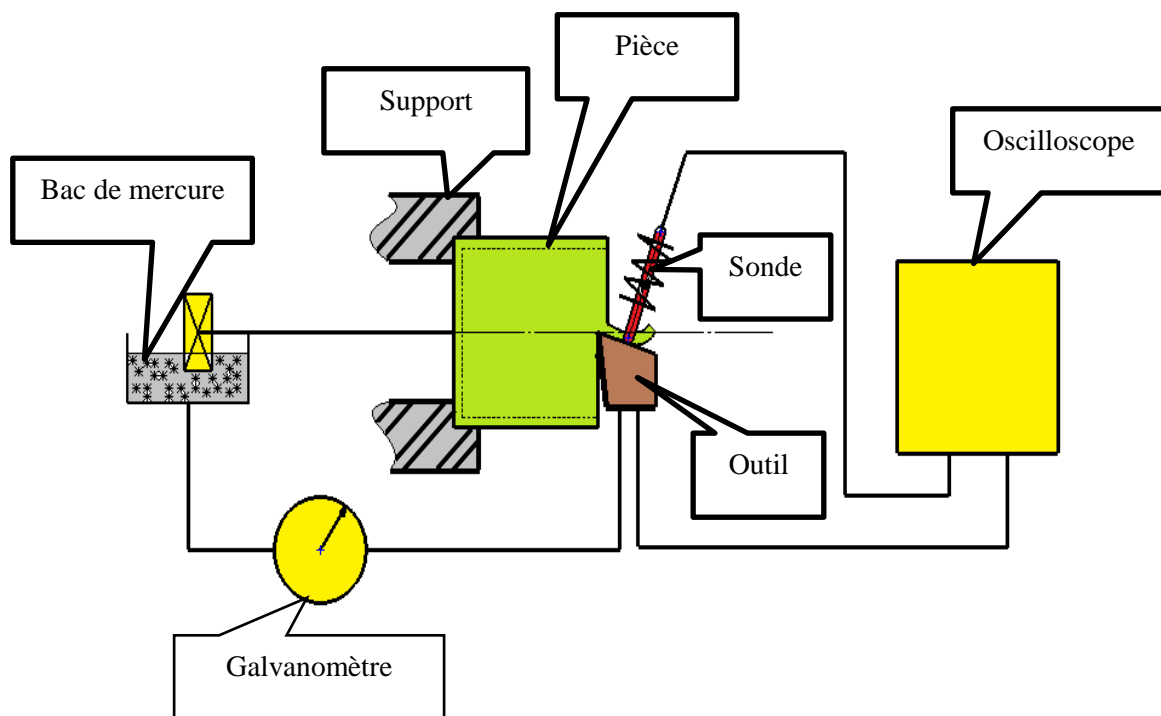


Figure III. 8: Thermocouple transversal [23].

➤ **Thermocouple incorporé**

Ce sont les plus utilisés pour l'évaluation de la température. En usinage, l'utilisation de ces thermocouples (figure III.9) nécessite des perçages de trous dans lesquels ils sont insérés pour estimer la température dans la zone de coupe et d'établir la cartographie thermique.

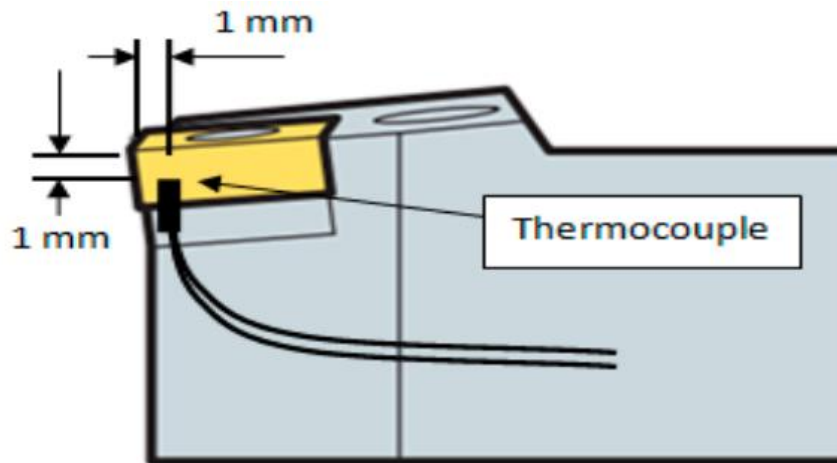


Figure III. 9: Thermocouple incorporé [12].

➤ **Thermocouple à fil simple**

Cette technique emploie un thermocouple à fil introduit dans la pièce passant par la ligne de coupe. Pendant l'usinage l'outil coupe le fil du thermocouple, Le signal est produit pendant une très courte période pendant que l'outil de coupe établit le contact avec le fil (figure III.10). La mesure de la température est enregistrée pour un intervalle très court utilisant un taux d'échantillonnage très élevé [12]. Une température instantanée est enregistrée.

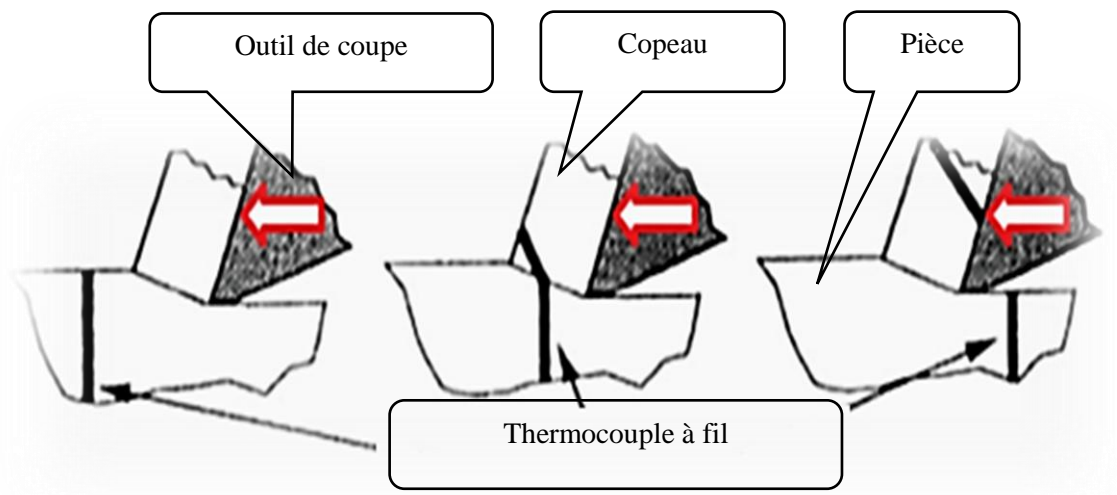


Figure III. 10: Thermocouple à fil [12].

III.2.1.2 Mesure indirecte par conduction

➤ Vernis thermosensible

La mesure de la température de coupe se fait à l'aide d'un vernis thermosensible (figure III.11). Ce dernier est déposé sur la partie coupante de l'outil et change de couleur à partir d'une valeur de température bien définie. C'est l'une des techniques les plus simples et les plus économiques utilisées pour la mesure en différents points de l'outil. La technique a été utilisée par [6- 23]. Les résultats obtenus avec cette technique sont généralement considérés comme approximatifs et la confirmation des résultats de d'autre technique est recommandée.

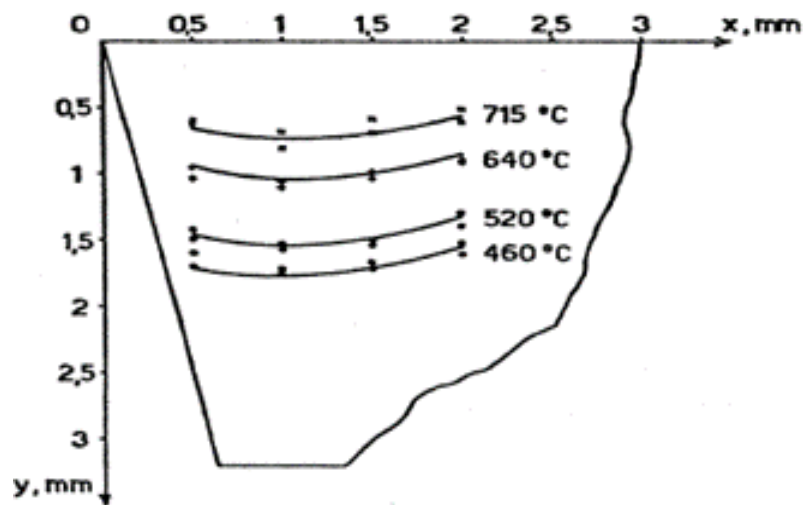


Figure III. 11: Isothermes de l'outil de coupe (P20), acier AISI 1040

avec $V_c = 3.33$ m/min, $a = 0.428$ mm/tr, $p = 2$ mm [14].

➤ Méthodes métallographiques

Il est possible de remonter à la distribution de température dans l'outil de coupe à partir d'analyses métallographiques effectuées sur l'outil après usinage, La méthode s'appuie sur la relation qui existe entre la dureté, la microstructure et la température qui a été atteinte dans les différents endroits de l'outil (figure III. 12). Cette méthode permet de mesurer des températures avec une précision de ± 25 °C, mais elle est difficile et longue à mettre en œuvre et n'est employée que pour des outils en acier rapide. [14] ont développé la technique pour déterminer la distribution de la température sur la face de coupe d'un outil en acier rapide (HSS).

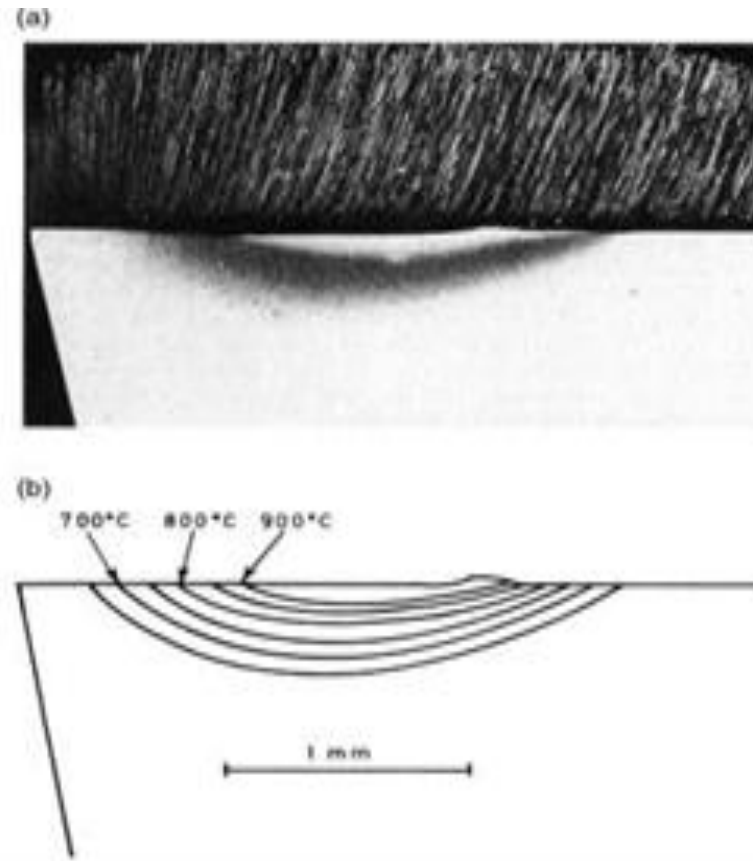


Figure III. 12: Contours de la distribution de la température sur la face de l'outil [9].

➤ **Poudre thermochimique**

Cette technique a été développée par [7] pour déterminer la distribution de la température à de divers points sur la surface de l'outil utilisant des poudres fines à point de fusion constant. Les points de fusion des poudres utilisées dans cette technique sont énumérés dans le tableau III.1. Pour l'adhérence appropriée de la poudre sur l'outil, le soluté du silicate de sodium peut être employé. Il n'y a aucun besoin de calibrage puisque toutes les poudres utilisées ont les points de fusion constants. La réponse thermique avec le revêtement de PVD (tableau III.2) donne de meilleurs résultats que celui des poudres.

Tableau III. 1: poudres fines de du silicate de sodium.

Film en PVD	Symbole	Température de fusion	Pureté en %
Germanium	Ge	1211	99.999
Tellurium	Te	723	99.999
Plomb	Pb	601	99.999
Bismuth	Bi	545	99.999
Indium	In	429	99.999

Tableau III. 2 : Revêtement en PVD.

Composition chimique	Point de fusion C°	Composition chimique	Point de fusion C°
1) NaCl	2) 800°	3) Zn	4) 419°
5) KCl	6) 776°	7) KNO ₃	8) 339°
9) CdCl	10) 568°	11) Pb	12) 327.4°
13) PbCl ₂	14) 501°	15) SnCl ₂	16) 246.8°
17) AgCl	18) 455°	19) Sn	20) 231.9°

III.2.2 Mesure par rayonnement infrarouge

L'évaluation de température repose sur l'utilisation du rayonnement propre émis par les corps. Le corps émetteur est fréquemment idéalisé et assimilé à un "corps noir". Le rayonnement émis ne dépend que de la température. Son spectre est donné par la longueur d'onde correspondant au maximum d'émission.

➤ Thermocouple optique (pyromètre)

Le pyromètre est une technique basée sur l'émission d'onde électromagnétique. Le principe consiste à comparer deux énergies (dans la même bande de longueur d'onde) : celle émise par le corps chauffé à celle émise par une source étalon. L'étalonnage se fait à l'aide d'un corps noir. Cette technique est plus appropriée pour le tournage ou les températures élevées peuvent être capturées, puisque il n'y a aucun contact avec l'interface pièce-outil (figure III.13).

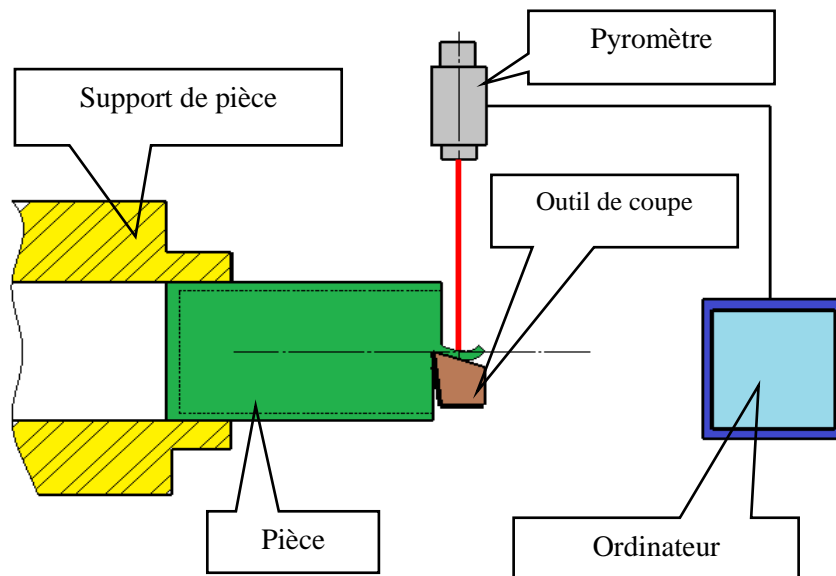


Figure III. 13: Pyromètre [15].

➤ Thermocouple à fibre optique

L'équipement n'est pas simple d'utilisation et nécessite une préparation et une calibration de la surface. Le pyromètre a donc beaucoup évolué par rapport à son principe initial, et l'utilisation de la fibre optique apporte une souplesse et le déport de l'instrumentation en zone contrôlée, ainsi qu'éventuellement le multiplexage des zones de mesure. Vue sa flexibilité, le thermocouple à fibre optique est utilisé pour la mesure de la température pendant des opérations de fraisage (figure III.14).

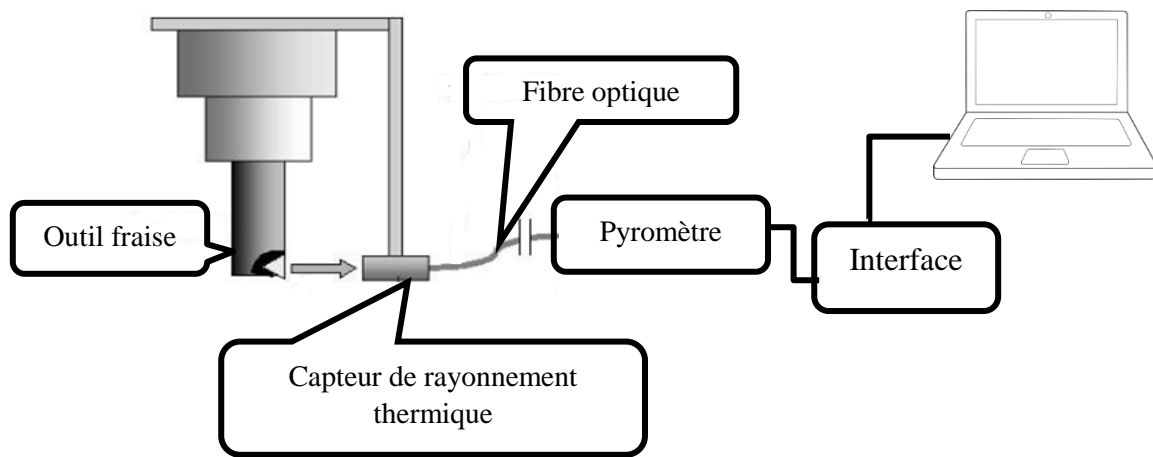


Figure III. 14: Mesure par thermocouple à fibre optique [27].

➤ **Caméra infrarouge**

Une caméra infrarouge (ou caméra thermique) est un appareil qui enregistre les différents rayonnements infrarouges (ondes de chaleurs) émis par le corps et qui varient en fonction de leurs température (figure III.15).

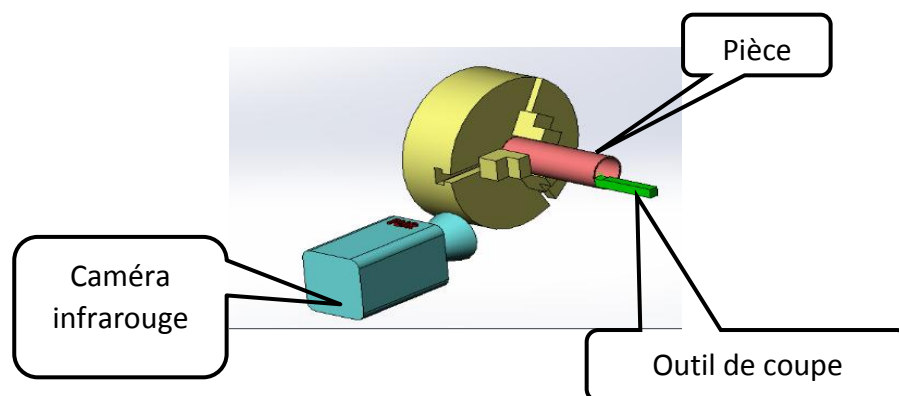


Figure III. 15: Mesure par caméra infrarouge.

III.2.3 Évaluation des techniques pour la mesure de la température

Le tableau suivant (III.3) récapitule les différentes techniques de mesure de la température utilisées lors de l'usinage. Une évaluation est faite montrant les points forts des méthodes ainsi que les points faibles ou contraintes faites par [10].

Tableau III. 3 : Évaluation des techniques pour la mesure de la température [10].

Moyens de mesure	Points forts	Contraintes
Vernis thermosensible	Cout bas Utilisation facile Facile à calibrer	Pas compatible avec lubrification Mauvaise précision
Méthodes métallographiques	Bonne précision Facile à calibrer Compatible pour la lubrification	Calibration difficile Spécifique que pour l'acier rapide
Thermocouple pièce-outil	Utilisation facile	Calibration difficile Pas compatible avec lubrification Mauvaise transition de réponse
Thermocouple à fil simple	Cout bas Facile à calibrer Utilisation facile	Pas compatible avec lubrification Mauvaise transition de réponse
Thermocouple transversal	Bonne précision	Pas compatible avec lubrification Mauvaise transition de réponse
Thermocouple incorporé	Bonne précision Compatible pour la lubrification Cout bas	Mauvaise transition de réponse
Poudre thermochimique	Bonne précision Utilisation facile Facile à calibrer	Pas compatible avec lubrification
Thermocouple (pyromètre)	Bonne précision Utilisation facile Mesure pour pièce fixe et mobile	Pas compatible avec lubrification Calibration difficile
Caméra infrarouge	Bonne précision Utilisation facile Mesure pour pièce fixe et mobile Thermogramme avec différents matériaux	Pas compatible avec lubrification
Thermocouple à fibre optique	Bonne précision Utilisation facile Mesure pour pièce fixe et mobile	Pas compatible avec lubrification Calibration difficile

Pour notre travail, le choix est porté sur la caméra infrarouge pour les avantages cités ci-dessus.

III.3 Thermographie

➤ Historique

Les origines de la thermographie infrarouge remontent à 1800 avec l'astrophysicien W. HERSCHEL, qui a découvert l'existence d'un rayonnement thermique en dehors du spectre de la lumière visible. En étudiant le spectre solaire, il découvrit l'existence du rayonnement infrarouge qu'il appela la chaleur radiative. W. HERSCHEL utilisa un prisme de verre pour diffracter la lumière du soleil et plaça trois thermomètres sur une table sur laquelle se projeta le spectre solaire. Deux de ces trois thermomètres furent utilisés comme étalons pour mesurer les variations de la température ambiante. Il déplaça le troisième thermomètre pour mesurer l'élévation de température associée à chacune des couleurs prismatiques. Il s'aperçut alors que la température continua à augmenter alors que le thermomètre eut déjà dépassé le spectre visible du côté de la couleur rouge. W. HERSCHEL venait de détecter pour la première fois le rayonnement infrarouge émis par le soleil [22]. En 1830 apparaissent les premiers détecteurs basés sur le rayonnement, appelés thermopiles. Puis en 1880, avec l'apparition de matériaux photorésistants, apparaît le bolomètre. De 1870 à 1920, les progrès de la technologie permettent le développement des premiers détecteurs quantiques. Ces détecteurs photoconducteurs ou photovoltaïques ont un temps de réponses beaucoup plus courts et une sensibilité augmentée. La thermographie infrarouge s'est réellement développée à partir des années 50, notamment dans le domaine de la défense où la plus grande avancée a été de visualiser des images non plus seulement dans le visible mais aussi dans le domaine de l'infrarouge lointain (bande spectrale de 8 à 14 microns). Les premiers détecteurs au sulfure de plomb (PbS) sont apparus entre 1930 et 1944, et ils étaient sensibles dans la bande de 1,5 à 3 microns. Puis entre 1940 et 1950, les détecteurs à l'antimoniure d'indium (InSb) ont permis de couvrir le domaine - 18 - spectral des infrarouges moyens (3 à 5 microns). En 1960, les détecteurs au tellure de cadmium mercure (HgTeCd) ont permis l'exploration des infrarouges lointains.

Avec le développement des caméras thermiques, de nombreuses applications basées sur la visualisation de cibles de jour comme de nuit ou par mauvaise visibilité ont vu le jour.

III.3.1 Nature du rayonnement infrarouge

L'observation des effets thermiques de surface d'une cible permet d'obtenir des informations sur sa structure interne. Ainsi, par exemple, des inhomogénéités de structure internes peuvent être mises en évidence. Ce contrôle de température peut également s'appliquer aux procédés de fabrication pour suivre l'élaboration d'un produit.

La matière émet et absorbe en permanence du rayonnement électromagnétique. Le processus d'émission est lié à l'agitation moléculaire interne de cette dernière, génératrice de transitions radiatives pour les particules élémentaires porteuses de charges électriques. Si la charge électrique subit une accélération, la relation de Maxwell montre qu'il apparaît une énergie sous la forme de rayonnement électromagnétique. Une élévation de température accroît l'agitation moléculaire au sein de la matière et favorise ainsi l'accélération des particules porteuses de charges électriques, génératrice de rayonnement.

L'énergie libérée E , sous forme radiative conditionne la longueur d'onde λ d'émission de la matière [22] :

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (I.5)$$

h : Constante de Planck (= 6.63×10^{-34} J s).

λ : Longueur d'onde (μm).

c : Célérité de la lumière dans le vide (= $2,998 \times 10^8$ m/s).

III.3.2 Spectre infrarouge

La thermographie infrarouge est une technique d'imagerie thermique de mesure des luminances et des températures. Par abus de langage, on pourrait dire que la thermographie s'applique à tout le spectre électromagnétique via la thermographie infrarouge, la thermographie optique (ou pyrométrie) et la thermographie micro-ondes. Plus particulièrement, le spectre infrarouge correspond au domaine d'émission de la matière soumise aux températures terrestre. Il est à noter qu'à ces températures dites « ordinaires », tous les corps rayonnent. Le spectre infrarouge est divisé en trois domaines décelables par différents types de détecteurs :

- L'infrarouge proche est décelé par des émulsions photographiques spécialisées (jusqu'à 1 μm), par des cellules photoémisives et par des détecteurs photoconducteurs et photovoltaïques.
- L'infrarouge moyen est décelé par des détecteurs thermiques, photoconducteurs et photovoltaïques.
- L'infrarouge lointain relève du domaine des détecteurs thermiques.

La figure III.16 donne une interprétation des bandes spectrales en thermographie et thermographie infrarouge.

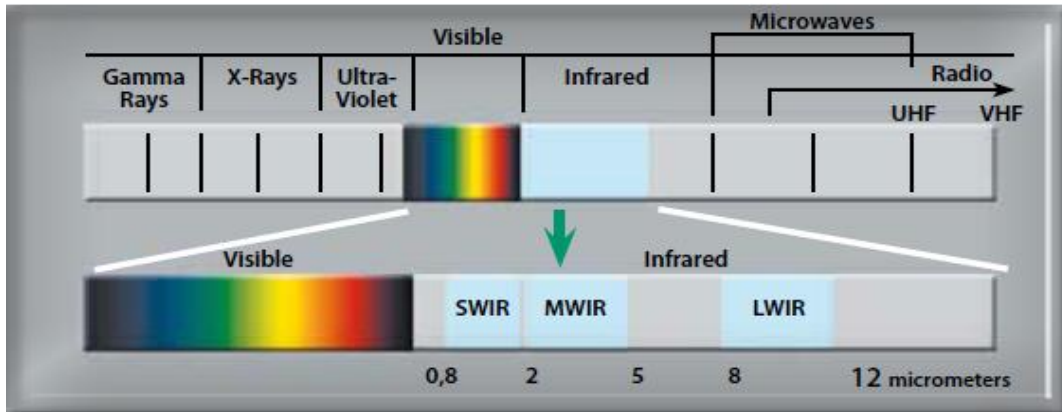


Figure III. 16: Spectre électromagnétique.

III.3.3 Corps Noir

Le corps noir est le corps de référence dans la théorie du rayonnement infrarouge : celui-ci est capable d'absorber tout rayonnement incident quel que soit sa longueur d'onde et d'émettre à son tour des radiations à toutes les longueurs d'ondes. Ce corps référentiel cède à l'environnement l'énergie captée jusqu'à l'établissement d'un équilibre thermodynamique.

III.3.4 Facteur d'émission ou émissivité ϵ

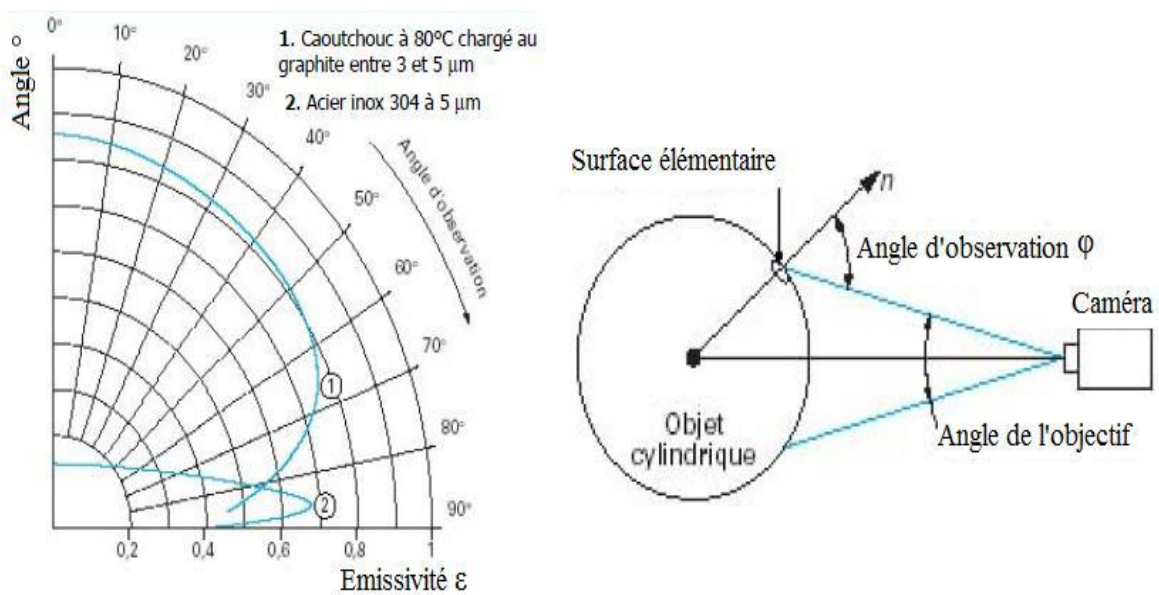


Figure III. 17: Variation de l'émissivité ϵ avec l'angle d'observation ϕ [23].

L'émissivité d'un corps représente l'aptitude de ce corps à émettre un rayonnement infrarouge. C'est le rapport entre le flux de puissance émis à une longueur d'onde par un corps réel à une température T et le flux de puissance qui serait émis à la longueur d'onde par un corps noir porté à la température T . La figure III.17 montre l'influence de l'angle d'observation sur l'émissivité.

L'émissivité \mathcal{E} est le rapport entre l'émission du corps réel et celle du corps idéal, appelé corps noir, porté à la même température T :

$$\mathcal{E} = \frac{L_{\text{corps réel}}(T)}{L_{\text{corps noir}}(T)} \quad (\text{I.6})$$

$L_{\text{corps réel}}$: Luminance du corps réel (W.m^{-2}).

$L_{\text{corps noir}}$: Luminance du corps noir (W.m^{-2}).

\mathcal{E} : Emissivité du matériau.

Avec, L la luminance du corps réel et du corps noir en fonction de la longueur d'onde λ du rayonnement émis et de la température T . La loi de Planck donne la luminance monochromatique (λ) du corps noir à une température T :

$$L_{\lambda}^0 = \frac{2 h c^2 \lambda^{-5}}{\exp\left[\frac{h c}{k \lambda T}\right] - 1} \quad (\text{I.7})$$

h : constante de Planck ($= 6,63 \times 10^{-34}$ J s).

c : Célérité de la lumière ($= 2,998 \times 10^8$ m/s).

λ : longueur d'onde d'émission du corps noir (μm).

k : Constante de Boltzmann ($= 1,3805 \times 10^{-23}$ J K⁻¹).

III.3.5 Chaîne de mesure

La thermographie infrarouge est une technique de mesure non intrusive qui permet d'analyser instantanément tout type de matériau et ceci dans une large gamme de température. Le système de mesure (NF X 07-001) de la thermographie est un ensemble d'équipements assemblés pour exécuter des mesurages de flux thermiques ou de températures [24].

La chaîne de mesure se compose de :

- Un émetteur, qui est la plupart du temps l'objet rayonnant à contrôler.
- Un environnement de mesure (atmosphère autour de l'objet, rayonnement, etc.).
- Une optique.
- Un dispositif de discrimination spatiale.
- Un ou plusieurs filtres spectraux.
- Un détecteur.
- Un système de traitement du signal (PC).
- Une visualisation.

La figure III.18 montre le nombre des maillons de la chaîne de mesure qui se regroupent en un unique système embarqué [24].

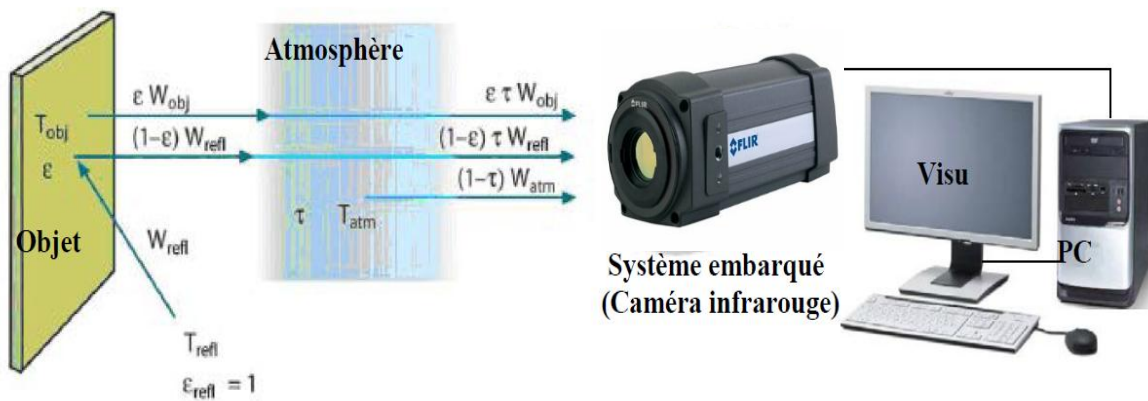


Figure III. 18: Chaîne de mesure en thermographie infrarouge.

L'instrumentation thermographique la plus courante est la caméra infrarouge. Cette caméra a pour fonction de transcrire les rayonnements infrarouges émis par un objet ou système, en températures exploitables par un système de traitement qui affichera les scènes thermiques sous forme de thermogrammes. L'instrumentation est composée d'un détecteur qui absorbe et convertit l'énergie du rayonnement incident.

III.3.6 Distance de mesure de la température

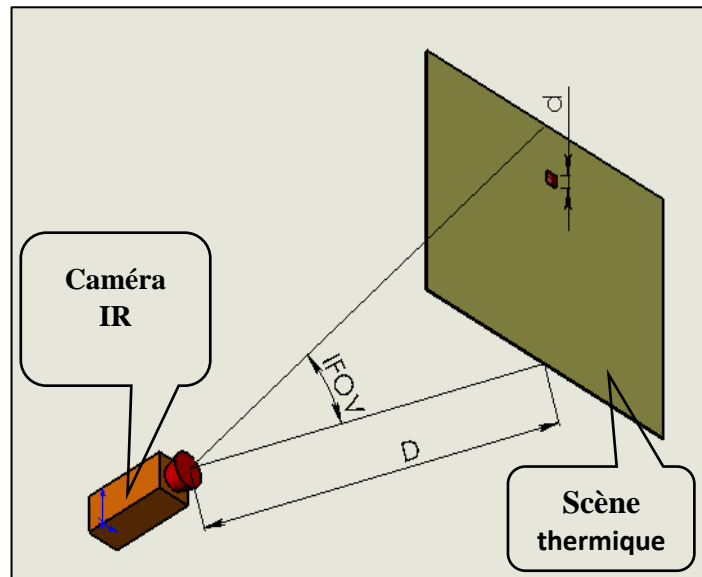


Figure III. 19 : Représentation de l'IFOV.

L'IFOV est défini comme le champ de vision d'un seul élément détecteur du réseau de la caméra (figure III.19).

Théoriquement, l'IFOV détermine directement le rapport de taille de spot d'une caméra thermique. Le rayonnement infrarouge émis par la cible traverse l'optique et il est projeté sur le détecteur. Il doit couvrir complètement au moins un élément détecteur, ce qui correspond à un pixel dans l'image thermique. Ainsi, en théorie, couvrir un pixel dans l'image thermique devrait être suffisant pour assurer des mesures de température correctes. L'IFOV est habituellement donné et exprimé en milliradians.

La caméra utilisée dans notre expérimentation est de type « FLIR SC305 ».

Son IFOV est de 1.36 mrad. Résolution 320×240.

Nombre de pixel : $320 \times 240 = 76800$ pixels.

Dimensions du cadre : largeur : 80 mm, hauteur : 66 mm

Surface $80 \times 66 = 5280 \text{ mm}^2$.

Surface élémentaire de mesure $5280 / 76800 = 0.068 \text{ mm}^2$.

Surface d'un pixel = 0.068 mm^2 .

Pour une précision de mesure il faut au moins 9 pixels.

La surface élémentaire de l'objet $9 \times 0.068 = 0.612 \text{ mm}^2$.

La distance minimale entre l'objet et la camera :

$$D = \frac{d}{IFOV} \quad (I.8)$$

D : distance entre l'objet et la caméra (mm).

d : diamètre de 9 pixels (mm).

Il semblerait logique que la distance influe sur la précision de la thermographie. Plus on est près, plus la mesure est précise et pour avoir une mesure acceptable de la température moyenne d'une surface, il faut au minimum 9 pixels sur celle-ci et ne tenir en compte que du pixel central (figure III.20).

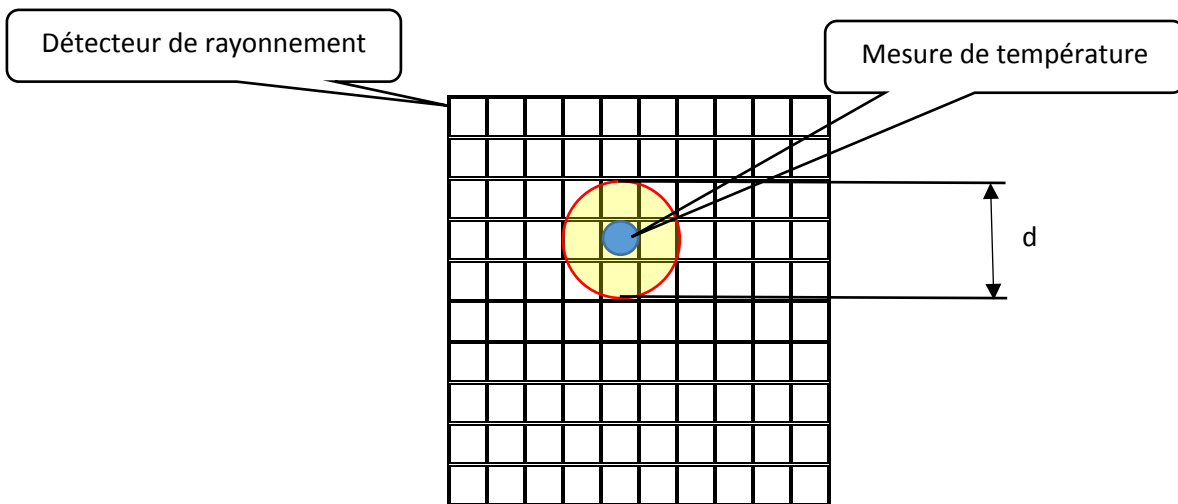


Figure III. 20 : Nombre de pixel pour la mesure moyenne de température.

III.4 Conclusion

Nous avons résumé succinctement les trois parties utilisées dans notre travail expérimental de thèse. Concernant la coupe qui reste un centre d'intérêt pour les chercheurs vu les interactions outil-pièce et leur influence sur l'usinage (la température, les efforts de coupe,

la durée de vie et la qualité de finie de la pièce). Les transferts thermiques à l'interface outil-pièce montrent la distribution de la température pendant une opération d'usinage. La thermographie infrarouge est donc une méthode de cartographie des températures en temps réel, permettant l'évaluation dans le temps des phénomènes thermiques de surface.

La qualité des pièces produites dépend largement des conditions de coupe, et cette qualité est un paramètre important lors de la production des pièces mécaniques. Le fluide de coupe aussi est un paramètre important puisqu'il permet de limiter l'élévation de la température dans les zones de coupe et d'établir la présence d'un film fluide entre les différentes surfaces. Cependant, dans le souci de protection de l'environnement et de la santé du personnel, la tendance actuelle est de limiter et même de supprimer l'utilisation des fluides de coupe.

Chapitre IV
Etude expérimentale

Chapitre IV

Etude expérimentale

IV. Introduction

L'ensemble des essais expérimentaux sont réalisés au sein de l'atelier d'usinage du département de Génie-Mécanique, Faculté de Technologie de l'Université Abou-Bekr Belkaïd de Tlemcen. Ils sont en phase de tournage avec exclusivement des opérations de chariotage réalisées sur une barre d'acier et utilisant une machine-outil installé sur un fondement approprié élastique conçu pour absorber les vibrations produites par les forces dynamiques générées lors de la coupe. La plaquette utilisée est en carbure de tungstène de forme carrée SNMG avec un angle de bec de 0° . Nos essais consistent à créer une base de données à partir de laquelle seront vérifiées et étudiées les aspects liés à la température. Une expérimentation préliminaire a été faite pour le choix des conditions de coupe parce qu'on est limité par la plage de mesure de la température de la caméra infrarouge utilisée.

IV.1 Etude expérimentale

IV.1.1 Présentation du matériel d'expériences

➤ **Machine-outil**



Figure IV. 1: Photographie de la machine-outil utilisée.

Les usinages ont été réalisés sur un tour parallèle conventionnel de marque **TOS TRENCIN**. C'est une machine rigide, puissante, précise et bien scellée. La figure (IV.1) montre une photographie de la machine-outil utilisée.

Le tableau IV.1 montre les principales caractéristiques du tour utilisé.

Tableau IV. 1: Caractéristiques du tour.

Caractéristiques		
- Diamètre admis au-dessus du banc	400	mm
- Diamètre admis au-dessus du chariot	220	mm
- Diamètre maximum à charioter	600	mm
- Largeur du plateau de serrage	230	mm
- Hauteur des pointes au-dessus du banc	200	mm
- Distance entre pointes	1060	mm
- Longueur de tournage	1000	mm
- Couple de torsion permis	1200	N.m
- Poids maximale de la pièce à usiner	300	Kg

Les tableaux (IV.2) et (IV.3) présentent les rapports de vitesse de rotation et de vitesse d'avance.

Tableau IV. 2: Tableau des vitesses de rotation.

Série des vitesses de rotation (tr/min)	
45	355
63	500
90	710
125	1000
180	1400
250	2000

Tableau IV. 3: Tableau des avances.

Valeurs des avances autorisées (mm/tr)							
8 :1	B	0.08	0.09	0.11	0.12	0.14	0.20
	C	0.16	0.18	0.22	0.24	0.29	0.40
	A	0.32	0.36	0.44	0.48	0.56	0.80
1 :1	B	0.64	0.72	0.88	0.96	1.12	1.60
	C	1.28	1.44	1.76	1.92	2.24	3.20
	A	2.56	2.88	3.52	3.84	4.48	6.40

Le moteur principal de la machine est de type asynchrone c'est à dire que c'est un moteur électrique à courant alternatif et dont la vitesse dépend de la charge. L'intensité électrique est de 18 A pour le mandrin, 1,8 A pour les avances, 0,6 A pour la pompe de lubrification. La puissance de la machine est : 6,8 KW.

➤ **Eprouvette**

Les éprouvettes utilisées sont obtenues à partir d'une barre cylindrique laminée de diamètre 80 mm (figure IV.2). Les éprouvettes sont fixées en montage mixte composé d'un mandrin à 3 mors durs et d'une pointe mobile. Au total, une cinquantaine d'éprouvettes étaient nécessaires pour le déroulement de nos essais. (L=80mm ; ϕ =50 mm ; Poids =1.6 Kg). Des opérations d'ébauche (chariotage, dressage d'une face et centrage) sont faites au préalable.



Figure IV. 2: Eprouvette.

➤ **Caractérisation de la matière de l'éprouvette**

Nous n'avons trouvé aucune information indiquant les caractéristiques physiques et chimiques des barres de matière première existant au niveau des ateliers de Génie Mécanique. Pour caractériser notre matière nous avons usiné des éprouvettes pour les essais de traction, dureté et de résilience. Les essais ont été réalisés au « Laboratoire de structure » de la Faculté. Pour la composition chimique, nous avons réalisé les essais au laboratoire de l'usine (ALFON, Oran).

(a) Analyses physiques

▪ **Essai de traction**

L'essai de traction est le moyen le plus couramment employé pour caractériser le comportement mécanique d'un matériau sous une sollicitation progressive à vitesse de chargement faible ou modérée (figure IV.3 (a)). Nous avons déterminé la résistance élastique R_e en (N/mm^2), la résistance à la rupture R_m en (N/mm^2) et l'allongement A en (%).



(a) : Machine pour essai de traction.



(b) : Machine de l'essai de dureté.

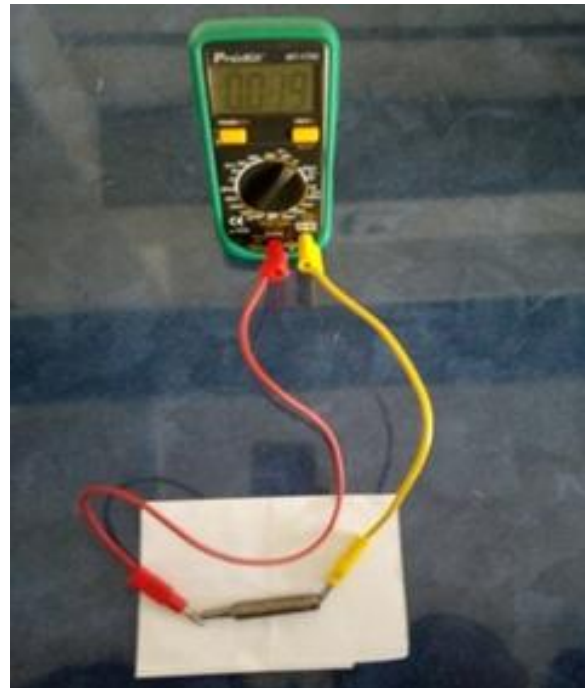
Figure IV. 3 : Machines des essais (a et b).

▪ Analyse de la dureté

La dureté est la mesure de la résistance d'un matériau à la pénétration (figure IV.3 (b)). Cette dernière est fonction de plusieurs facteurs dont les principaux sont : la déformation élastique et plastique, la géométrie du pénétrateur, ses propriétés mécaniques et la charge qui y est impliquée. La dureté déterminée est HRC (dureté Rockwell).

▪ Analyse de la résilience

Le principe de l'essai consiste à rompre par choc une éprouvette entaillée reposant sur deux appuis (figure IV.4 (b)). On détermine l'énergie absorbée caractérisant la résistance aux chocs du matériau métallique essayé, donc l'énergie nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette notée KCU en (J/cm²).



(a) : Machine universelle d'essai de Charpy. (b) : Montage utilisé (Ohmmètre (MT-1705))

Figure IV. 4 : (a) Machine Charpy, (b) Ohmmètre (MT-1705).

▪ **Conductibilité électrique**

La conductivité électrique caractérise l'aptitude d'un matériau à laisser les charges électriques se déplacer librement et donc permettre le passage d'un courant électrique. On peut vérifier la conductivité électrique du métal on mesurant sa résistance par la méthode directe en utilisant un ohmmètre (figure IV.4 (a)) notée $R (\Omega)$.

(b) Analyses chimiques

Pour ces analyses, nous avons eu recours à l'utilisation d'un spectromètre à émission optique (MLP). La surface de l'éprouvette nécessite au préalable un polissage (miroir). Les figures suivantes montrent l'analyse et l'interface des résultats.

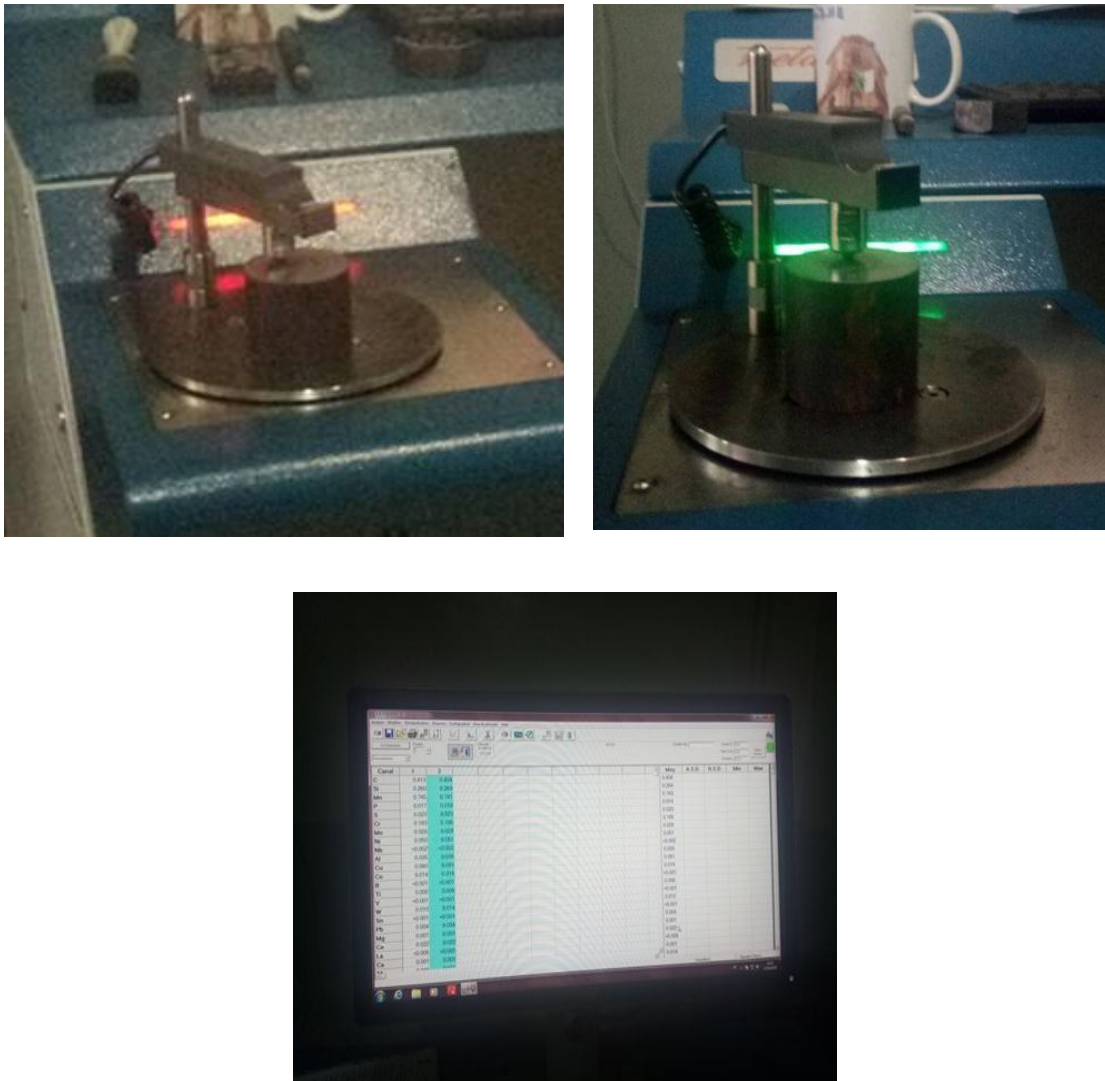


Figure IV. 5 : Etincelages et interface des résultats du spectromètre.

L'éprouvette a été testée à quatre reprises. Après démontage on voit nettement les traces d'étincelles qui facilitent la détection de la composition chimique de l'échantillon.



Figure IV. 6: Traces des étincelles sur l'échantillon.

Les tableaux IV.4 représentent les caractéristiques physiques et chimiques obtenues du matériau et ceci pour permettre un choix judicieux des plages de vitesse de coupe, avance et profondeur de passe.

Tableau IV. 4: Caractéristiques physiques et chimiques.

Caractéristiques physiques								
R_e N/mm ²	R_m N/mm ²	A %	KCU J/cm ²	HRC	R Ω	ρ Kg/dm ³		
177,66	486,96	25,3	204.04	75	0.5	8.17		
Caractéristiques chimiques								
Composition	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Pourcentage	0,139	0,204	1,062	0,013	0,011	0,190	0,030	0,036

A partir de ces résultats et vérification avec les catalogues des aciers, on a conclu que le matériau étudié est un acier doux non allié. Sa désignation normalisée est **S 235** par la norme AFNOR. C'est un acier de construction d'usage général, non destiné aux traitements thermiques. Il présente une bonne soudabilité. On peut l'utiliser par exemple comme axe, arbre de transmission, bâti de machine, éléments de fixation.

➤ Outil de coupe

En ce qui concerne l'outil, il est à plaquette rapportée. Le porte-outil est une barre de section rectangulaire de type PCLNR 25 x 25 M 12 (figure IV.7).



Figure IV. 7: Photographie de porte-outil utilisé.

La plaquette utilisée est en carbure de tungstène de forme carrée SNMG avec un angle de bec de 0°. La figure (IV.8) montre une photographie des plaquettes utilisées.

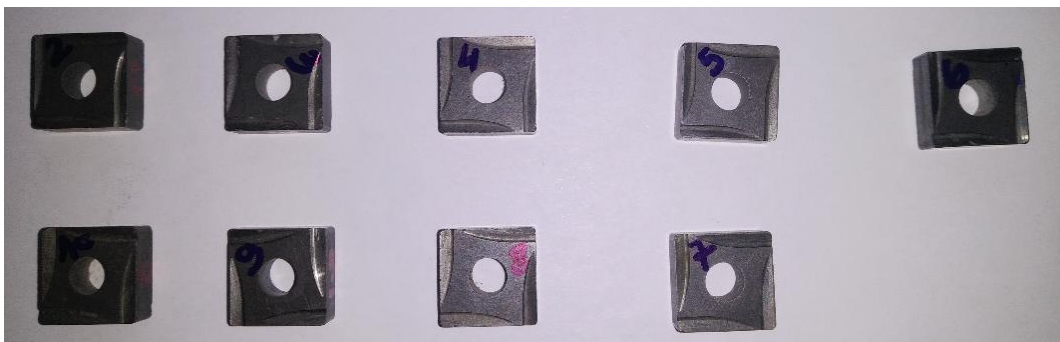


Figure IV. 8: Photographie des plaquettes utilisées.

IV.1.1.1 Mesure de la température

Pour mesurer la température pendant l'usinage, on utilise une **caméra infrarouge FLIR** de type **A305sc** (figure IV.9), présentant une gamme spectrale de 7.5 à 13,0 μm , avec une plage de température de 0 à +350°C et une précision $\pm 2\%$ ou 2°C. Elle utilise un système d'analyse micro bolomètre non refroidi et sans entretien. Le tableau IV.5 montre ses spécifications.



Figure IV. 9: caméra infrarouge FLIR A305sc.

Le logiciel de la caméra infrarouge est **FLIR Quick Plot** (Version 1.2.10173.1002). Il offre la possibilité de transfert et de gestion des fichiers en tout confort à partir de la caméra infrarouge ainsi que la possibilité d'analyse ultérieure offerte par les données radiométriques disponibles dans les images infrarouges. Les informations relatives à la température peuvent être affichées dans chaque point d'image individuel. L'affectation ultérieure d'autres palettes de couleurs ainsi que le réglage de l'échelle de couleurs permettent d'adapter les données aux exigences respectives de l'analyse.

Tableau IV. 5: Spécifications de la caméra infrarouge FLIR A305sc.

Détecteur	
Type de détecteur	Microbolomètre non refroidi
Gamme spectrale	7,5 à 13,0 μm
Résolution	320 x 240
Pas du détecteur	25 μm
Sensibilité thermique (NETD)	<50 mK
Électronique/imagerie	
Fréquence d'images	60 Hz
Plage dynamique	>14 bits
Flux de données numériques	Gigabit Ethernet (60 Hz)
Commande et contrôle	Gigabit Ethernet
Mesures	
Plage de température standard	-20 °C à 120 °C (-4 °F à 248 °F) 0 °C à 350 °C (32 °F à 662 °F)
Plage de températures optionnelle	Jusqu'à 2 000 °C (3 632 °F)
Précision	± 2 °C ou ± 2 % de la valeur affichée

IV.1.1.1 Utilisation du logiciel de la caméra infrarouge

Une unité de traitement des données est branchée à la caméra par un câble internet haut débit.

Le logiciel est utilisé en deux étapes :

- ✓ La première étape est l'enregistrement des séquences de tournage longitudinal.
- ✓ La deuxième étape est dédiée à l'exploitation des scènes enregistrées.

IV.1.1.2 Présentation de l'interface du logiciel

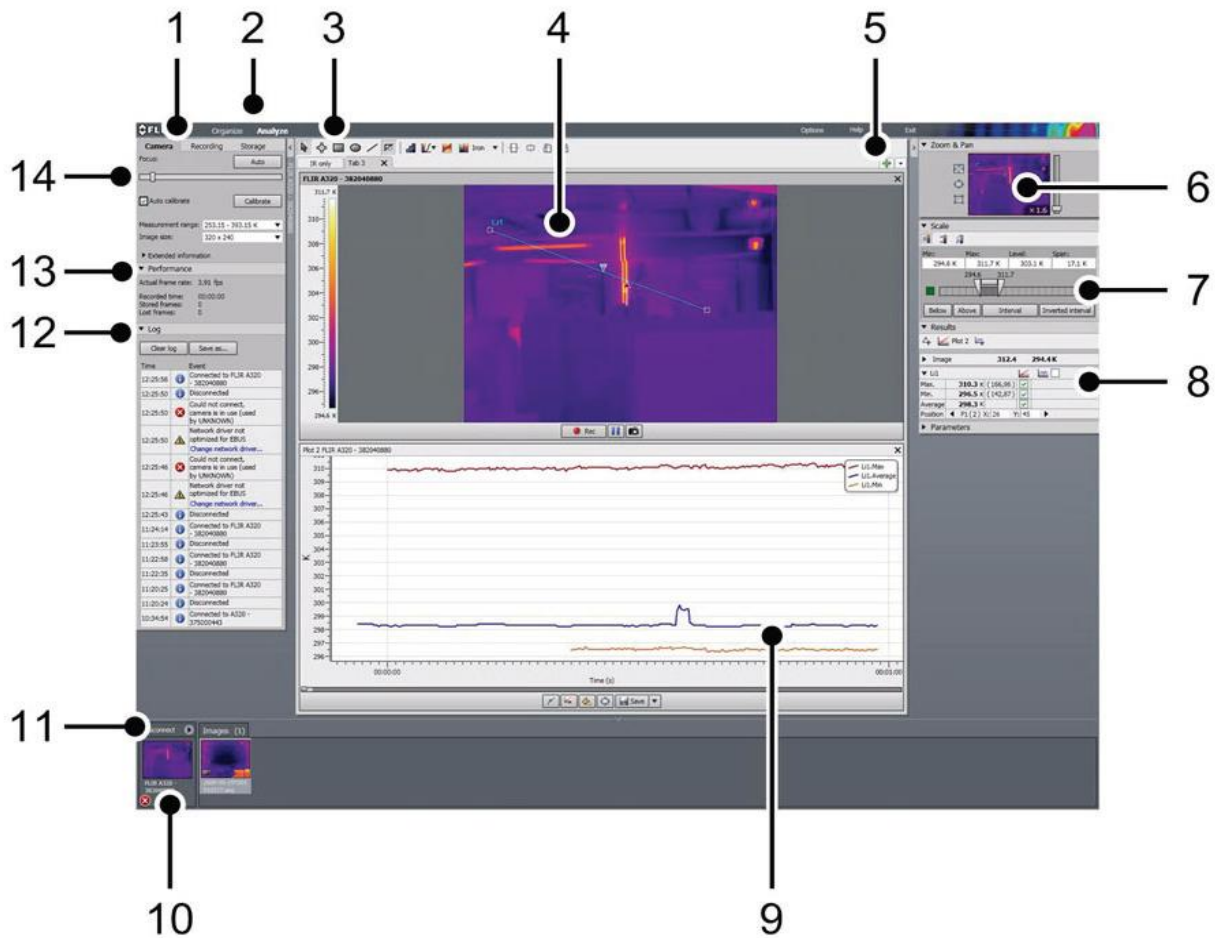


Figure IV. 10: Interface du logiciel de la caméra FLIR 305 sc.

Nous présentons sommairement les différents points :

1. **Sous-onglets** : appareil photo, enregistrement, espace de rangement.
2. **Barre d'onglets principale** : organiser, analyser.
3. **Barre d'outils** : on utilise cette barre pour ajouter des outils de mesure à l'image, tels que des points, des zones, des isothermes, etc.
4. **Fenêtre image** : cette fenêtre est l'endroit où l'image de la caméra est connectée, un fichier image sur l'ordinateur ou réseau, est affiché.
5. **Fenêtre ajout** : boutons pour ajouter d'autres onglets de fenêtre d'image et pour sélectionner les différents onglets.
6. **Volet zoom et panoramique** : on l'utilise pour modifier le facteur de zoom et pour effectuer un panoramique sur les images.

7. **Volet échelle** : elle est utilisée pour effectuer divers réglages sur l'image. On peut choisir entre plusieurs méthodes de réglage et également attribuer une couleur pour afficher les parties de l'image qui se situent au-dessus ou en dessous d'un niveau de température défini ou à l'intérieur d'un intervalle de température défini.
8. **Volet résultat** : affiche les résultats de tous les outils de mesure qui sont disposés dans l'image. Il affiche également la position de chaque outil de mesure et contrôle la manière dont on souhaite tracer les températures.
9. **Fenêtre de tracé** : affiche l'évolution de la température au fil du temps dans un fichier de séquence enregistré. Dans cette zone, on peut définir diverses options, telles que la couleur d'arrière-plan et de premier plan, etc...
10. **Contrôle de la source en direct** : (également visible dans l'onglet Organiser), le contrôle de la source en direct affiche une vignette de l'image de la caméra actuellement connectée, ainsi que le nom de la caméra.
11. **Bouton connecter/déconnecter** : (également visible sur l'onglet Analyser), on l'utilise pour connecter ou déconnecter les caméras de l'application. Pour voir toutes les caméras du réseau, on clique sur le bouton dans le coin inférieur gauche.
12. **Zone journal** : affiche tous les événements qui se produisent pendant que la caméra est connectée. On peut effacer, exporter, les données du journal sous forme de fichier HTML ou XML.
13. **Zone performance** : elle affiche les performances de la caméra connectée. Ici, on peut consulter la fréquence d'images, la durée d'enregistrement, le nombre d'images stockées et perdues, etc...
14. **Zone paramètre** : affiche les paramètres tels que la mise au point, l'étalonnage, la plage de mesure, la taille de l'image, etc...

➤ Enregistrement des séquences d'usage

Pour l'enregistrement les films d'usinage thermique ont doit suivre la démarche suivante :

1. Choisir l'emplacement des enregistrements.
2. Définir l'intervalle du temps d'enregistrement.
3. Déterminer le nombre d'image par seconde.
4. Régler l'intervalle de température pour la scène thermique.
5. Activé le (NUC), une action pour réduire les perturbations thermiques (bruits).

6. Réglage de la netteté de l'image thermique.
7. Enregistrement.
8. Usinage de la pièce.
9. Fin d'usinage.
10. Arrêt de l'enregistrement.
11. La sauvegarde de la séquence.

La figure IV. 11 désigne l'interface du logiciel QuickPlot pour l'enregistrement des séquences d'usinage.

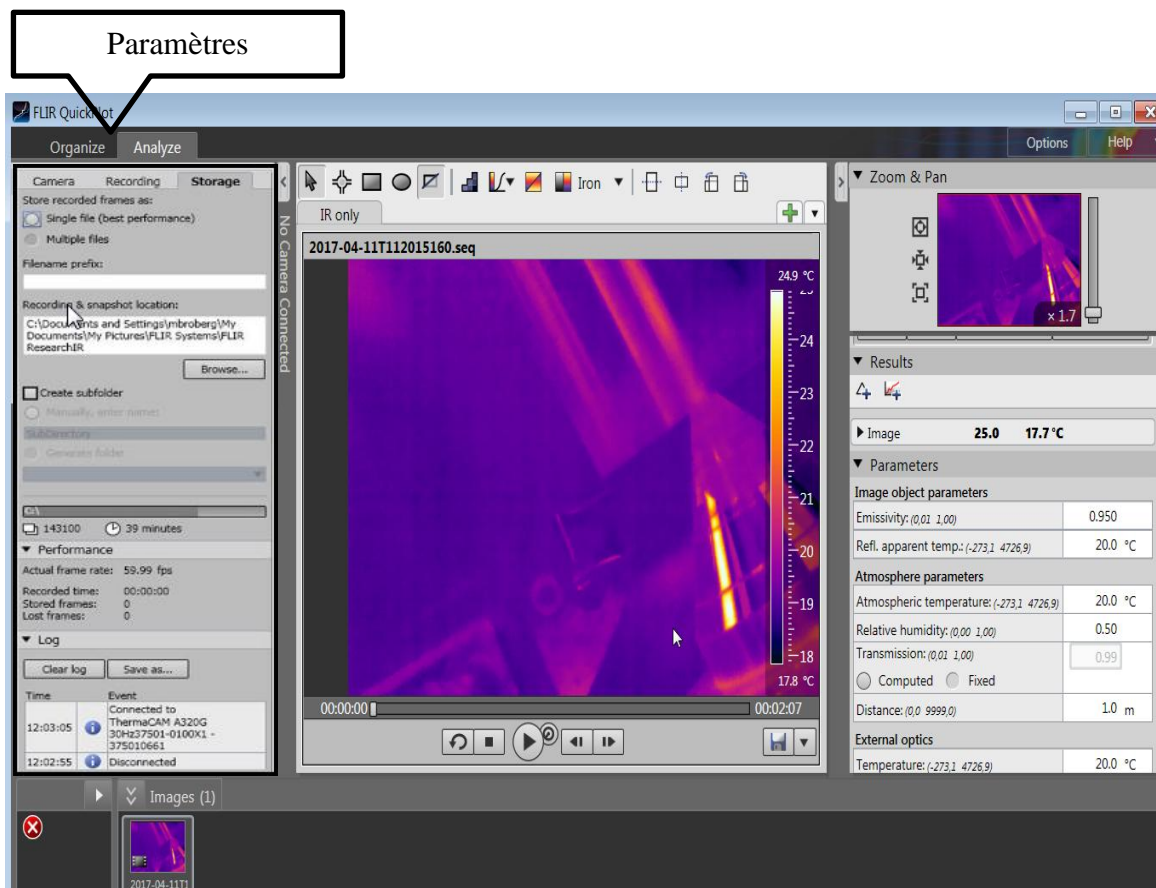


Figure IV. 11: Interface d'enregistrement.

La figure IV.12 nous montre une prise d'image d'une séquence d'usinage.

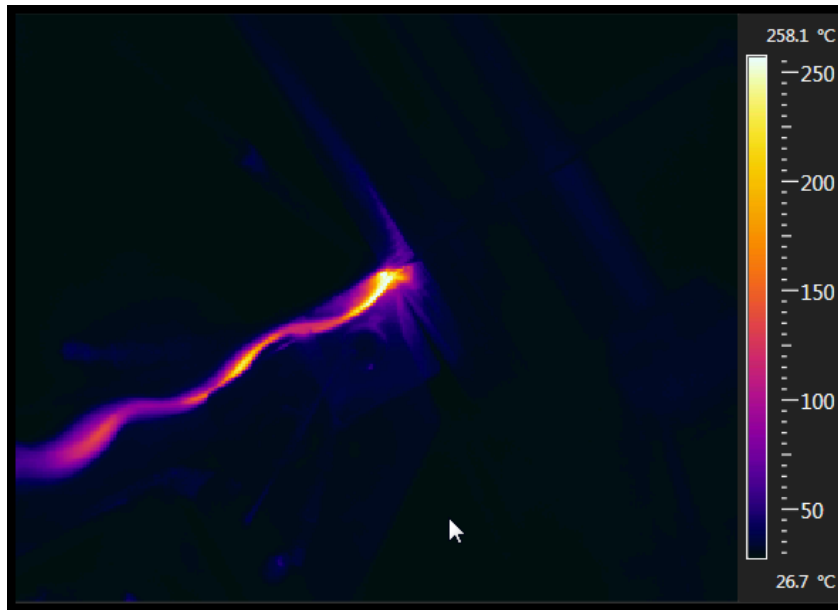


Figure IV. 12: Thermogramme d'usinage.

IV.1.1.3 Montage de la caméra infrarouge

La caméra IR est montée sur un support réalisé au hall de technologie. Il est monté sur la tourelle avec une protection contre l'éjection des copeaux. La figure (IV.13) montre le support que nous avons réalisé pour le montage de la caméra sur la tourelle de la machine. Le support est réglable pour donner une distance de 30 cm à l'interaction pièce-outil (figure IV.14).

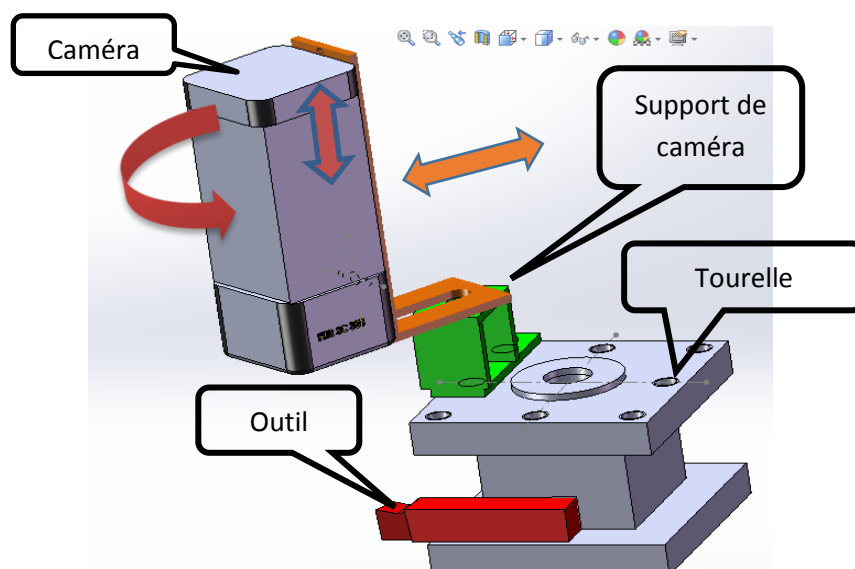


Figure IV. 13: Schéma du montage de la caméra infrarouge (SW).

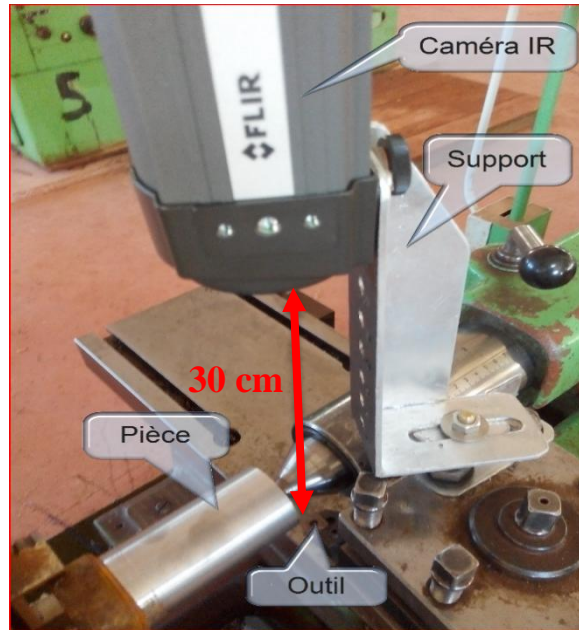


Figure IV. 14: Photographie du montage de la caméra.

IV.1.1.4 Chaîne d'acquisition

La caméra est couplée à un logiciel de mesure FLIR Research IR Max, pour un maximum d'intuitivité dans l'affichage, l'enregistrement et le traitement avancé des données thermiques (figure IV.15).

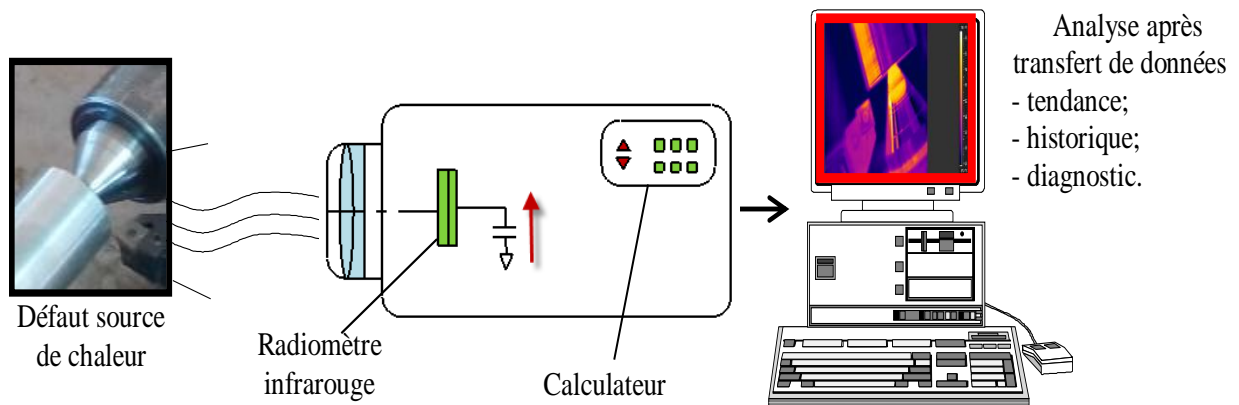


Figure IV. 15: Chaîne d'acquisition et de traitement des données thermiques.

IV.1.1.5 Etalonnage de la caméra

Avant son utilisation dans l'expérimentation, il faut étalonner la caméra.

L'étalonnage de la caméra utilise un corps noir de laboratoire dont on modifie la température d'émission de manière à lui associer le thermosignal donné par la caméra. Le thermosignal est l'image analogique du flux thermique par conversion photoélectrique ou bolométrique, il résulte de l'accumulation du thermosignal pendant le temps d'intégration. Par calibration, un assembleur de caméra thermique cherche à linéarité du thermosignal avec le flux, comme le montre la figure IV.16. Les limites inférieure et supérieure de linéarité sont dues respectivement à une insensibilité aux flux bas.

Zone 1 : thermosignal limité par le bruit temporel et les signaux d'obscurité.

Zone 2 : thermosignal limité à une saturation au flux ou au temps d'intégration important. Ces limites établies, on évalue la dynamique de mesure par le maximum de calibre en niveau sur lequel la thermo-réponse est l'image du flux incident. Il est généralement limité environ entre 30%-70% des niveaux numériques disponibles afin de pouvoir appliquer une correction de non uniformité (NUC).

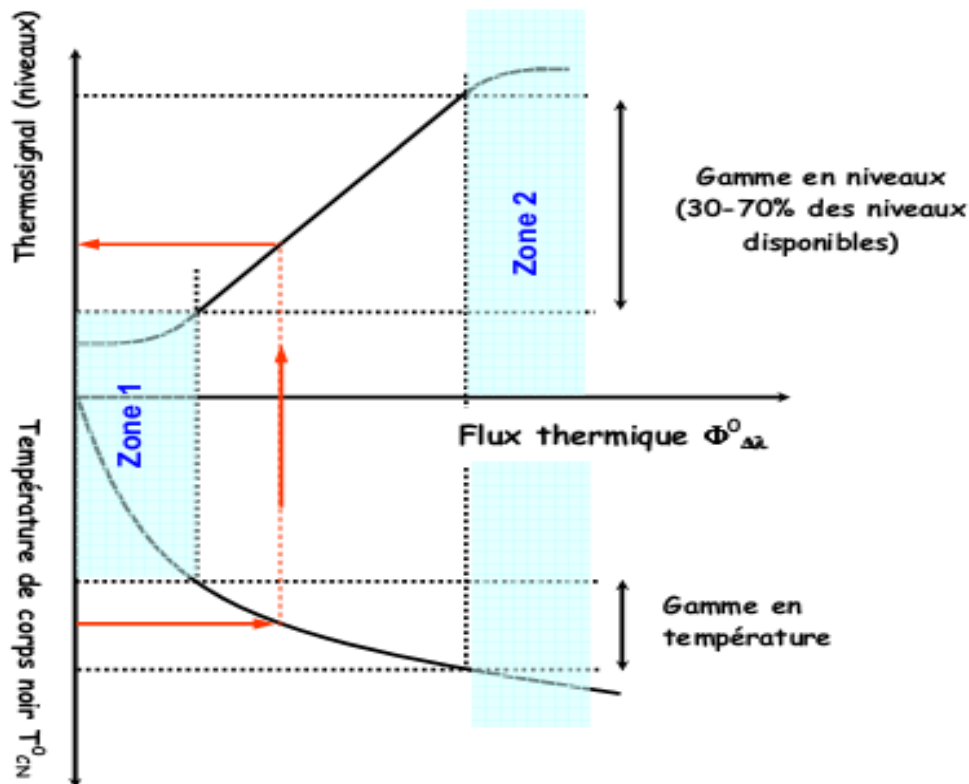
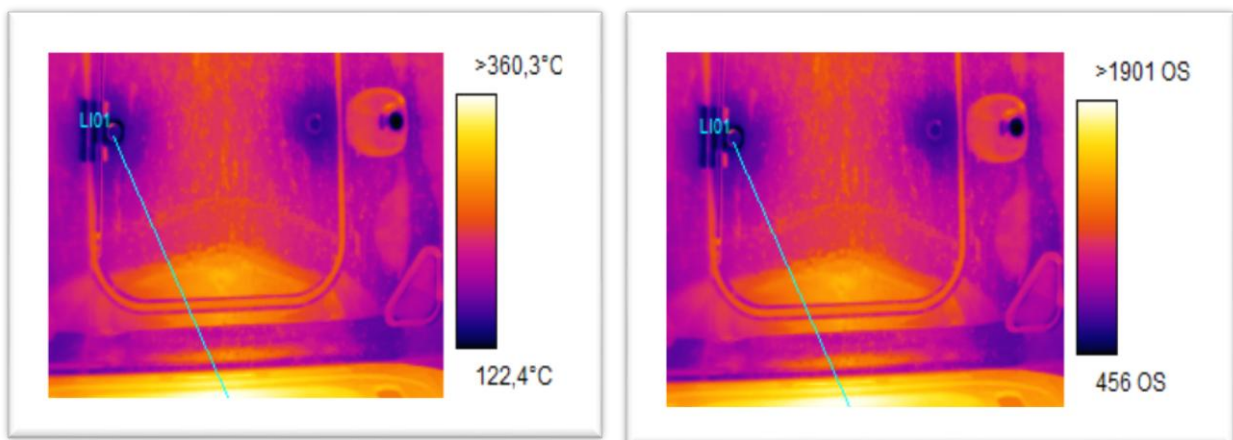


Figure IV. 16: Zones du thermosignal [25].

Par exemple, en conversion 14 bits, on dispose 16 384 niveaux et on affecte seulement les niveaux compris entre 5000 et 11 500. La sensibilité du détecteur (en niveau/°C) permet enfin d'évaluer la gamme en température. Ces choix sont essentiels car ils déterminent les gammes de mesure disponibles et la résolution thermique des caméras.

Un exemple de courbe d'étalonnage est donné sur la figure IV.18. La transcription thermosignal-température est une fonction test appliquée aux points d'étalonnage [26]. Les coefficients sont mémorisés dans la caméra pour une transcription automatique des thermosignaux fournis. En post-traitement logiciel, choisir une ligne qui coupe l'ensemble de ces températures comme le montre la figure IV.17.



Thermogramme du four en (°C)

Thermogramme du four en thermosignal (OS)

Figure IV. 17: Représentation de température du même thermogramme.

Pour l'étalonnage, nous avons développé les étapes suivantes:

1. Régler le facteur d'émissivité à 1 sur l'ensemble du thermogramme,
2. Copier la distribution de température de la ligne puis coller cette distribution dans une colonne d'un tableur,
3. Modifier la représentation de température à niveau (unité OS). Copier la nouvelle distribution puis coller la dans la colonne voisine à la première,
4. Tracer la correspondance des deux colonnes : la courbe obtenue est **la courbe d'étalonnage** de la caméra en **niveau/température** comme on le montre sur la figure IV.18.

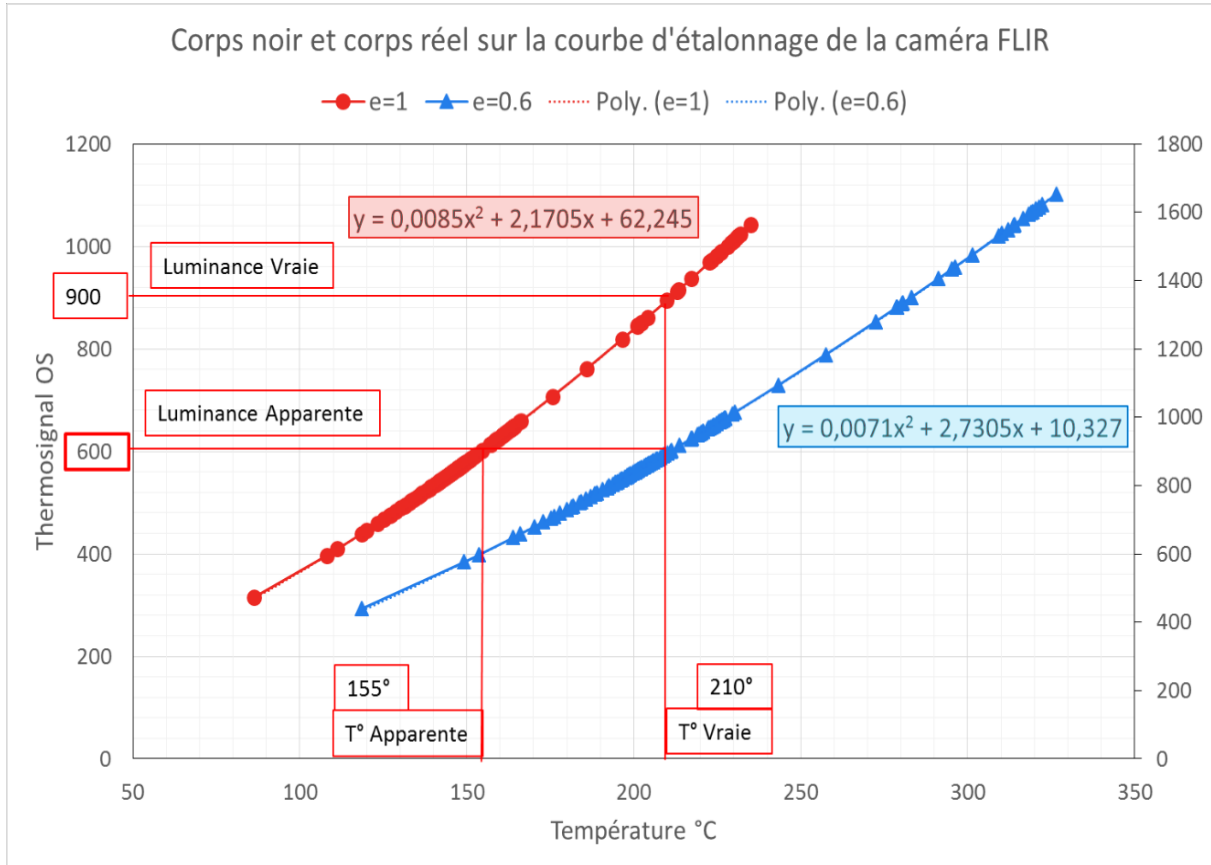


Figure IV. 18: Courbe d'étalonnage de la caméra FLIR SC305
(Carrés bleus : points d'étalonnage, ligne : fonction test).

IV.1.2 Essais préliminaires [20]

Pour la qualification et validation de la méthode de mesure, on a fait des essais préliminaires qui consistent en un chariotage sur une éprouvette de diamètre de 35 mm et une longueur de 260 mm, montée en montage mixte sur la machine-outil. La plaquette utilisée est en carbure de tungstène de forme carrée SNMG avec un angle de bec de 0 °. Le tableau IV.6 représente les conditions de coupe.

Tableau IV. 6: Conditions de coupe.

Vitesse de coupe	Avance	profondeur de passe	Longueur de chariotage
75 m/min	0.11 mm/tr	0.75 mm	260mm

Pour mesurer la température, la caméra est fixée sur le support réglable que nous avons réalisé et ceci pour le réglage de la distance de 30 cm de l'interaction pièce-outil (figure IV.19).



Figure IV. 19: Montage de la caméra.

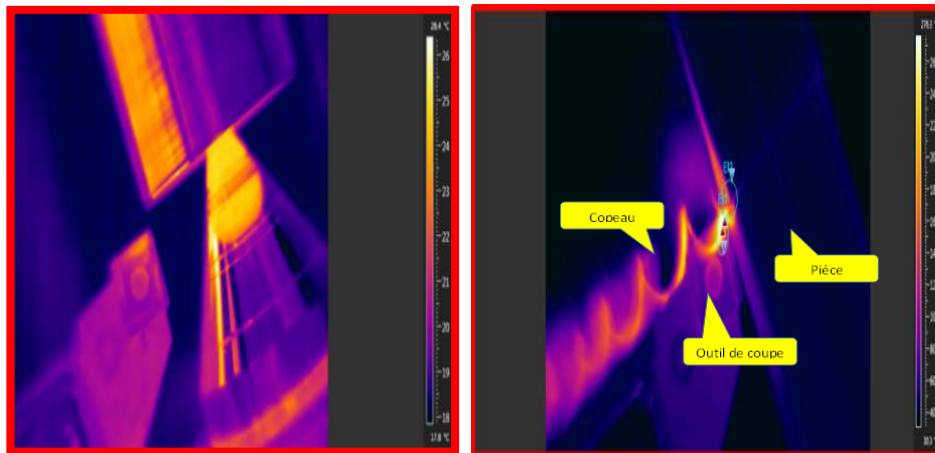


Figure IV. 20: Thermogrammes.

Tableau IV. 7: Résultats des expériences préliminaires.

Position	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Moy	% (T°)
SP1 (Pièce)	114,6	117,6	117,5	114,9	117,6	122	118	120,1	113,3	113,4	116,90	23,09
SP2 (Outil)	79,2	89,02	93,3	95,5	96,2	96,3	97	97,3	99,9	98,6	94,23	18,61
SP3 (Copeau)	300,7	298,7	299,5	302	295,5	288,3	299,3	288	291,3	289,2	295,25	58,31
Σ	495,5	494,5	505,32	510,3	512,4	509,3	506,6	514,3	505,4	504,5	501,2	506,38

Le tableau IV.7 regroupe les résultats de l'expérimentation préliminaire pour la qualification et validation de la méthode de mesure.

Sur la longueur chariotée, nous avons choisi 10 positions pour le relevé de la température, en utilisant le logiciel de la caméra. Ces points sont pris sur la période de stabilisation de l'usinage.

- La première ligne du tableau présente les positions, à intervalle égal, des relevés des températures appartenant à la période de stabilisation.
- La deuxième ligne (SP1) présente les différentes températures de la surface usinée de la pièce.
- La troisième ligne (SP2) présente les différentes températures du bec de l'outil.
- La quatrième ligne (SP3) présente les températures du copeau.
- Enfin la dernière colonne présente la moyenne des températures évacuées chacune des trois parties.

Les discussions et interprétations sur ces résultats sont faites dans le chapitre V.

IV.1.3 Essais de référence

Plusieurs séries d'expériences ont été faites. L'éprouvette est montée en montage mixte sur le tour. Après réglage des paramètres de coupe une opération de chariotage est faite en utilisant un déplacement automatique longitudinal sans lubrification. La séquence d'usinage est filmée et enregistrée automatiquement par le logiciel fourni par la caméra. La photographie suivante montre le montage de l'outil, l'éprouvette ainsi que la caméra.



Figure IV. 21: Photographie de l'usinage.

Comme il existe un grand nombre de variables contrôlant le processus, certains modèles mathématiques sont requis pour représenter le processus. Les modèles développés utilisent uniquement les paramètres significatifs influençant le processus. Pour cela, les statistiques de l'analyse des résultats expérimentaux sont faites par le logiciel Minitab qui permet d'estimer les contributions relatives de chacun des facteurs de contrôle à la réponse globale mesurée. Dans le présent travail, seuls les paramètres significatifs sont utilisés pour développer le modèle mathématique.

La relation suivante est couramment utilisée pour représenter les modèles mathématiques :

$$\mathbf{T} = f(\mathbf{v}, \mathbf{a}, \mathbf{p}) \quad (\text{IV.1})$$

Où \mathbf{T} est la réponse (température de coupe), f est la fonction de réponse et $\mathbf{v}, \mathbf{a}, \mathbf{p}$ sont les facteurs d'entrée (vitesse de coupe, avance, et profondeur de passe).

L'élaboration d'un plan d'expériences sera donc du type \mathbf{N}^3 (tableau IV. 1). Dans une expérience de type 4^3 chaque paramètre comprend quatre niveaux ce qui nous donnent 64 expériences (plan complet). Nous avons réalisé 64 usinages avec à chaque fois on utilisait une arête tranchante neuve.

Tableau IV. 8: Facteurs et niveaux (conditions de coupe).

Paramètres	Symbole	Niveaux			
		1	2	3	4
Vitesse de coupe V_c (m/min)	X₁	78	112	157	220
Avance a (mm/tr)	X₂	0.08	0.11	0.14	0.20
Pénétration p (mm)	X₃	0.25	0.5	0.75	1
Conditions des opérations de tournage	Usinage sans lubrification				

A cause des interactions de faible influence, il y a possibilité de réduire le nombre d'expériences. Nous avons ensuite défini nos conditions d'essais pour réaliser un plan d'expériences selon la méthode **TAGUCHI** réduite à 16 expériences. Cette méthodologie de

plans d'expériences a conduit à l'identification des paramètres influant lors de l'opération de tournage.

Les résultats expérimentaux présentés dans le tableau IV.8 correspondent à la température de coupe obtenue suite aux différentes combinaisons des éléments du régime de coupe pendant l'usinage. Les valeurs obtenues de la température sont dans l'intervalle de 38.5° – 146.56 °C pour l'arête de l'outil pour l'usinage et l'intervalle de 40.3° – 153° pour le dégagement.

Tableau IV. 9: Résultats des essais.

N°	Conditions de coupe			T°-Usinage *			T°-Dégagement
	Vc (m/min)	a (mm/tr)	P (mm)	T (°C)-O	T (°C)-P	T (°C)-C	T (°C)-O
1	78	0,08	0,25	38,5	39,08	157,89	40,4
2	78	0,11	0,5	54,1	71,5	235,1	88,78
3	78	0,14	0,75	90,07	84,6	245,3	77
4	78	0,2	1	146,56	103,36	254,15	137
5	112	0,08	0,5	81	85,5	252,6	129
6	112	0,11	0,25	68,52	86,4	266,1	101
7	112	0,14	1	94,5	104,1	276,71	97
8	112	0,2	0,75	94	87,93	290,78	113
9	157	0,08	0,75	100,24	109,89	271,99	107
10	157	0,11	1	94	107,26	267,15	139
11	157	0,14	0,25	56,07	80,49	230,73	81,4
12	157	0,2	0,5	72,1	82,28	282,81	106,1
13	220	0,08	1	125,07	112,63	275,1	100
14	220	0,11	0,75	88,41	108	350,9	155
15	220	0,14	0,5	76,61	92,63	239,48	113
16	220	0,2	0,25	74,26	107,22	248,42	103
* T (°C)-O : température outil ; T (°C)-P : température pièce ; T (°C)-C : température copeau							

Les résultats expérimentaux sont utilisés pour construire un modèle de premier ordre :

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + \dots + a_k X_k \quad (\text{IV.2})$$

Les constantes sont déterminés par la méthode des moindres carrés.

Le modèle linéaire, développé à partir de l'équation, est représenté comme suit :

$$T = y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 \quad (\text{IV.3})$$

Où $T = y$ est la réponse estimée basée sur l'équation du premier ordre (température de coupe mesurée).

X_1, X_2, X_3 représentent les facteurs de contrôle (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe), les valeurs (b_0, b_1, b_2, b_3) sont les coefficients de facteurs connexes.

Pour mieux ajuster les valeurs obtenues, un modèle de second ordre pour l'équation de prédiction est proposé. Les résultats sont discutés dans le prochain chapitre.

IV.2 Conclusions

En cours d'usinage, les contraintes appliquées par l'outil sur le matériau usiné entraînent une élévation de température à l'interface outil-pièce. Pour le choix de la matière des éprouvettes, nous avons procédé à des analyses physiques et chimiques pour l'identification de la matière.

La thermographie infrarouge présente de nombreux avantages comme une prise de mesure sans contact, une mesure sans ou avec très peu de perturbation entre la surface de l'objet étudié et son milieu environnant, une capacité de mesure en temps réel, une large gamme de température d'utilisation et une capacité d'adaptation à tout type de matériaux.

L'essai préliminaire nous ont permis de faire le bon choix des conditions de coupe.

Le plan d'expérience de TAGUCHI (Table L16) nous a permis de déterminer l'équation de prédiction de la température et l'effet des conditions de coupe.

L'expérimentation nous a permis de déterminer les températures de la surface usinée de la pièce ainsi que celle de l'arête de coupe.

Chapitre V
Résultats & Discussions

Chapitre V

Résultats & discussions

V. Introduction

Ce chapitre regroupe les résultats obtenus des essais préliminaires suivi des essais de référence. Nous avons effectué deux mesures de température :

Une mesure pendant l'usinage,

Une mesure juste après le dégagement de l'outil.

Les courbes de températures ainsi que les modèles de prédiction obtenus en fonction des conditions de coupe, (vitesse de coupe, avance et profondeur de passe) sont commentés.

V.1 Résultats des essais préliminaires

Les résultats expérimentaux des essais préliminaires illustrés ci-dessous (figure V.1) montrent les variations de températures en régime permanent pour des paramètres de coupe invariants.

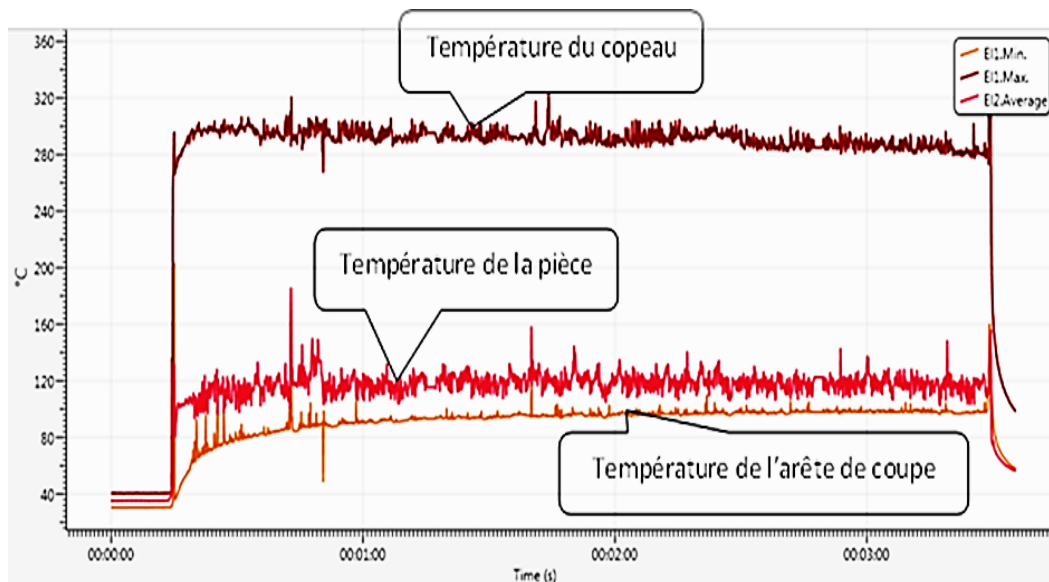


Figure V.1: Courbes de température (outil, pièce, copeau).

En utilisant les données des thermogrammes, nous avons tracé les courbes représentant les températures du copeau, de la surface usinée et de l'arête de coupe de l'outil (figure V.2).

Deux courbes (outil et pièce) ont pratiquement la même allure et à des seuils de températures très proches (au voisinage de 100°C). Par contre, la courbe de température du copeau, montre une nette augmentation de température (au voisinage de 300°C), ce qui confirme les résultats théoriques qui précisent que le copeau évacue le flux de température le plus important.

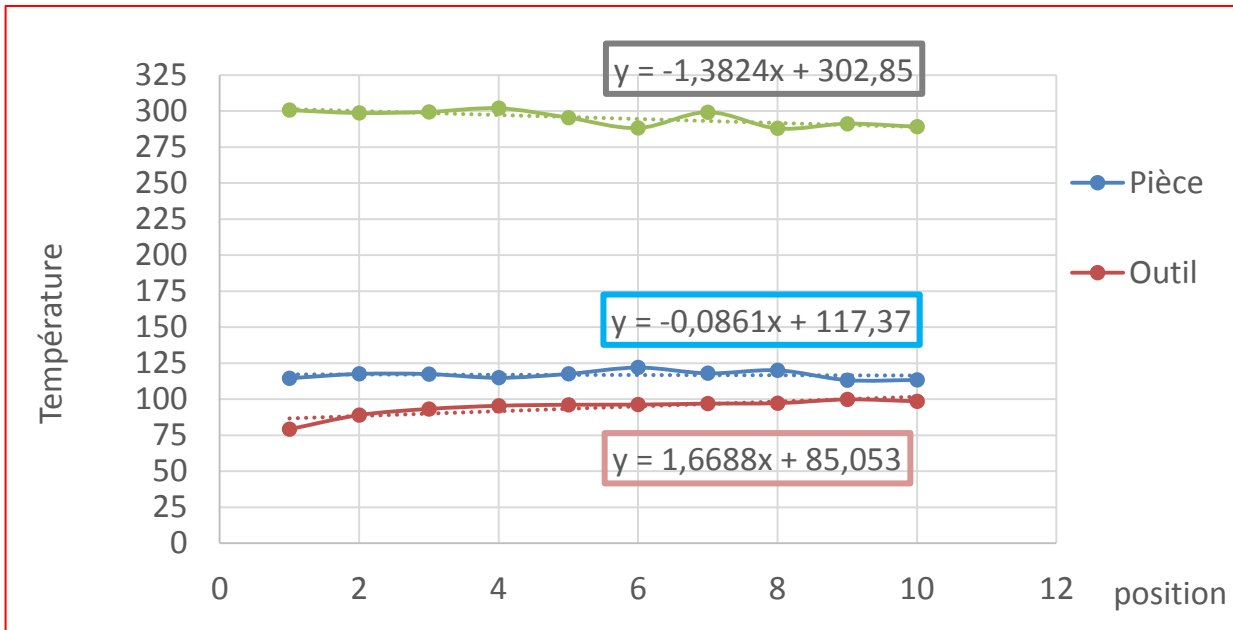


Figure V.2: Variations des températures.

Ces essais préliminaires nous ont permis de déterminer les températures de la surface usinée de la pièce ainsi que celle de l'arête de coupe. Ils nous confirment que la température du copeau est toujours nettement supérieure à celle de l'arête de coupe et de la pièce. On conclue que le flux calorifique généré lors de l'usinage est en grande partie évacué par le copeau.

V.2 Résultats des essais de référence

Avant l'exploitation des résultats, nous avons récupéré les datas à partir du logiciel de la caméra (FLIR Quick Plot), pour visionner les séquences d'usinage (voir figure V.3). Nous avons effectué les opérations suivantes :

1. Importation de la séquence d'usinage (essai).
2. Délimiter la zone de mesure.

3. Introduction des paramètres de la scène thermique (émissivité, distance, température atmosphérique, réflexion...).
4. Choisir une échelle pour un bon visionnage de la séquence.
5. Définir la palette des couleurs.
6. Visionnage de la séquence.
7. Traçage de la courbe de température en fonction du temps.
8. Récupérer les températures de la zone sélectionnée sur un tableur pour l'exploitation.

La figure V.3 représente l'interface pour l'étude du thermogramme de la séquence.

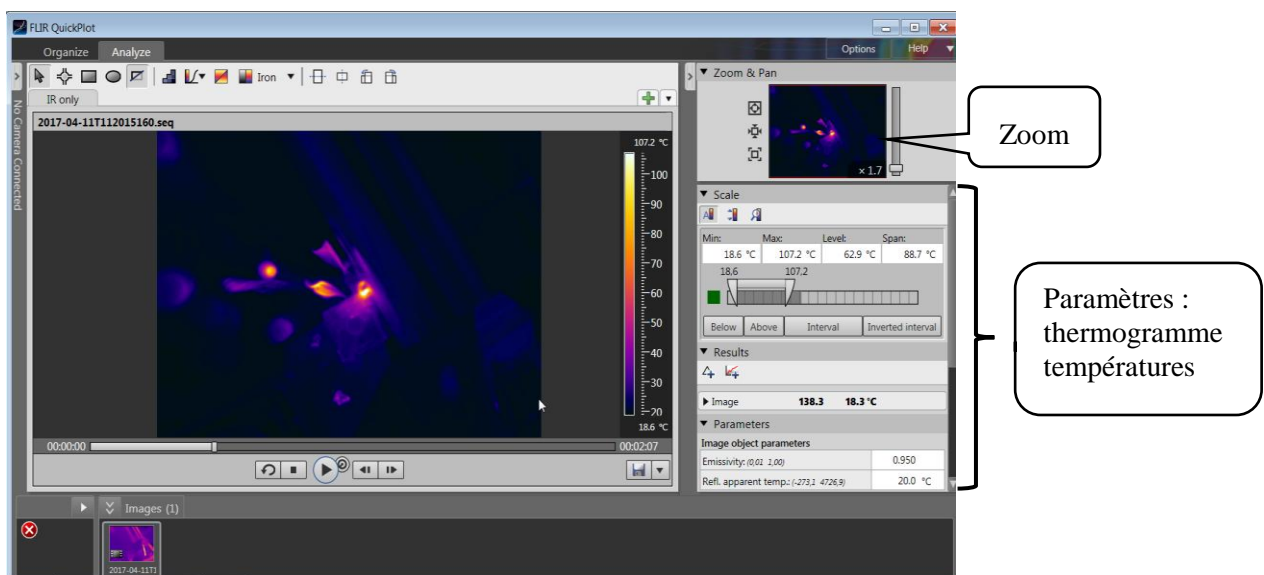


Figure V.3 : Interface du logiciel (thermogramme).

La récupération des températures est faite après le traçage de la courbe représentée par la figure V.4. La courbe est divisée par trois zones :

La zone 1 représente l'amorçage de l'usinage,

La zone 2 détermine la partie de stabilisation de la coupe, de cette dernière on récupère les températures pour l'étude et l'analyse,

La zone 3 représente le dégagement de l'outil et la fin de l'opération de tournage.

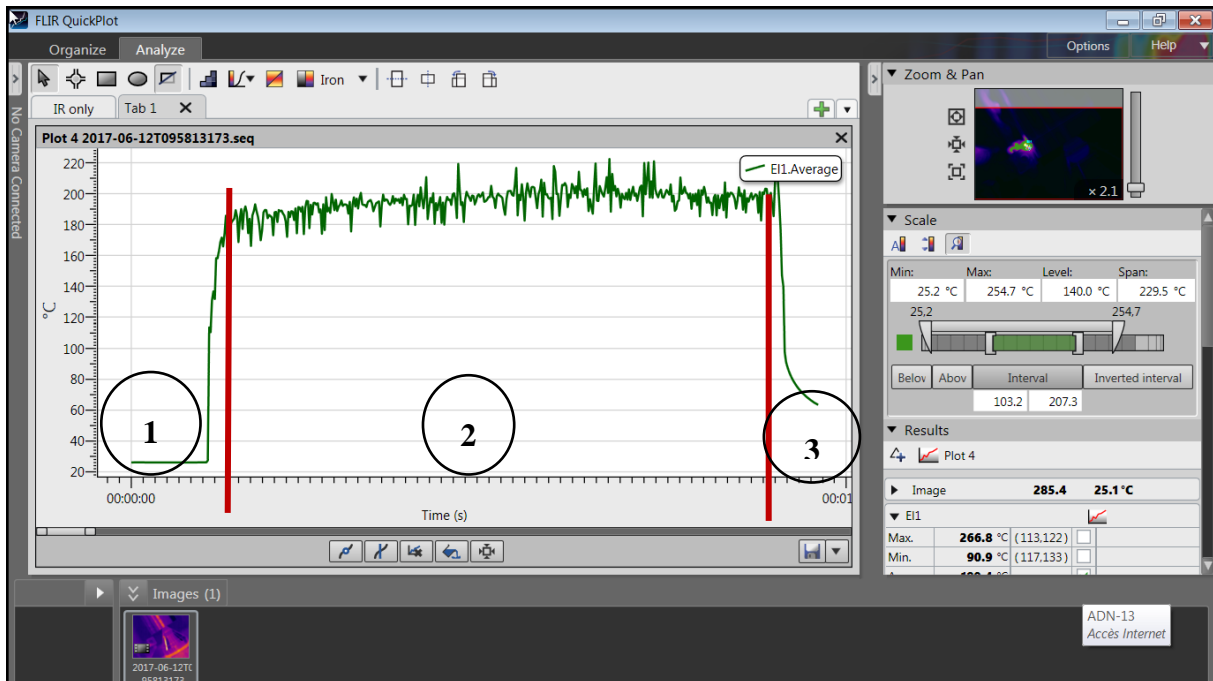


Figure V.4 : Interface du logiciel et les zones de la courbe étudiée.

Les résultats des essais de référence sont répartis suivant la méthode de mesure :

- La première méthode de mesure est faite pendant l'usinage (**zone 2**).
- La deuxième est faite juste après le dégagement de l'outil (**zone 3**).

Nous présentons ci-dessous les résultats de la première méthode.

V.2.1 Modèle de prédiction de la température

Les expériences réalisées sont basées sur le tableau orthogonal de TAGUCHI (L16). L'analyse de variance (ANOVA) ainsi que l'analyse de régression sont utilisées en vue d'analyser l'effet des paramètres de coupe sur la température. Nous avons utilisé aussi Minitab V17 qui est un outil de statistiques et de plans d'expériences pour l'exploitation des résultats expérimentaux et prédites ainsi que l'analyse des effets des conditions de coupe sur la température. Dans notre travail, nous avons utilisé une équation de premier ordre pour la prédiction et l'optimisation de la température en fonction des conditions de coupe. L'utilisation de ce modèle mathématique peut remarquablement optimiser les conditions de coupe.

La relation entre les entrées (vitesse de coupe, avance, pénétration) et la sortie (température de coupe) a été modélisée par l'équation (V. 1), le tableau V.1 donne les coefficients des facteurs de l'équation de régression.

Tableau V.1: Coefficients de l'équation de régression.

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	9,7	10,3	0,94	0,350	
Vc (m/min)	0,0877	0,0412	2,13	0,037	1,00
a (mm/ tr)	139,7	49,3	2,83	0,006	1,00
p (mm)	74,96	7,83	9,57	0,000	1,00

L'équation de prédiction peut s'écrire de la sorte :

$$T = 9,7 + 0,0877 \times Vc + 139,7 \times a + 74,96 \times p \quad (V.1)$$

V.2.1.1 Précision et l'erreur entre température expérimentale et prédite

Pour calculer le pourcentage d'erreur des 16 essais, on utilise la formule suivante :

$$e_i = \left[\frac{|T_{exp} - T_{pré}|}{T_{exp}} \right] \times 100 \quad (V.2)$$

T_{exp} : température expérimentale.

$T_{pré}$: température prédite.

e_i : taux d'erreur.

Pour le calcul du pourcentage de la précision, la formulation suivante est utilisée :

$$A = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^n \left[1 - \frac{|T_{exp} - T_{pré}|}{T_{exp}} \right] \times 100 \quad (V.3)$$

N : nombre d'essais =16.

A : précision.

Le tableau V-2 montre l'erreur et la précision de chaque essai lorsqu'on compare les températures mesurées expérimentales et prédites.

Tableau V.2 : Comparaison des réponses.

N°	T° Expérimentale	T° Prédite	Erreur %	Précision%
1	38,5	58,61	52,23	47,77
2	54,1	60,25	11,38	88,62
3	90,07	85,56	5,01	94,99
4	146,56	124,81	14,84	85,16
5	81	72,40	10,62	89,38
6	68,52	50,86	25,77	74,23
7	94,5	109,61	15,99	84,01
8	94	105,15	11,86	88,14
9	100,24	90,72	9,50	90,50
10	94	102,63	9,18	90,82
11	56,07	49,99	10,85	89,15
12	72	78,97	9,68	90,32
13	125,07	123,08	1,59	98,41
14	88,41	91,29	3,25	96,75
15	76,61	72,09	5,90	94,10
16	74,26	77,89	4,89	95,11

L'analyse du tableau V.2 montre que la précision de l'équation de prédiction du premier ordre nous donne une précision de 87,34 %. La figure V.5 montre les courbes de la température expérimentale et prédite. Il y a concordance entre les deux courbes, une discussion sur des points litigieux est faite sur les figures V.8 - V.16.

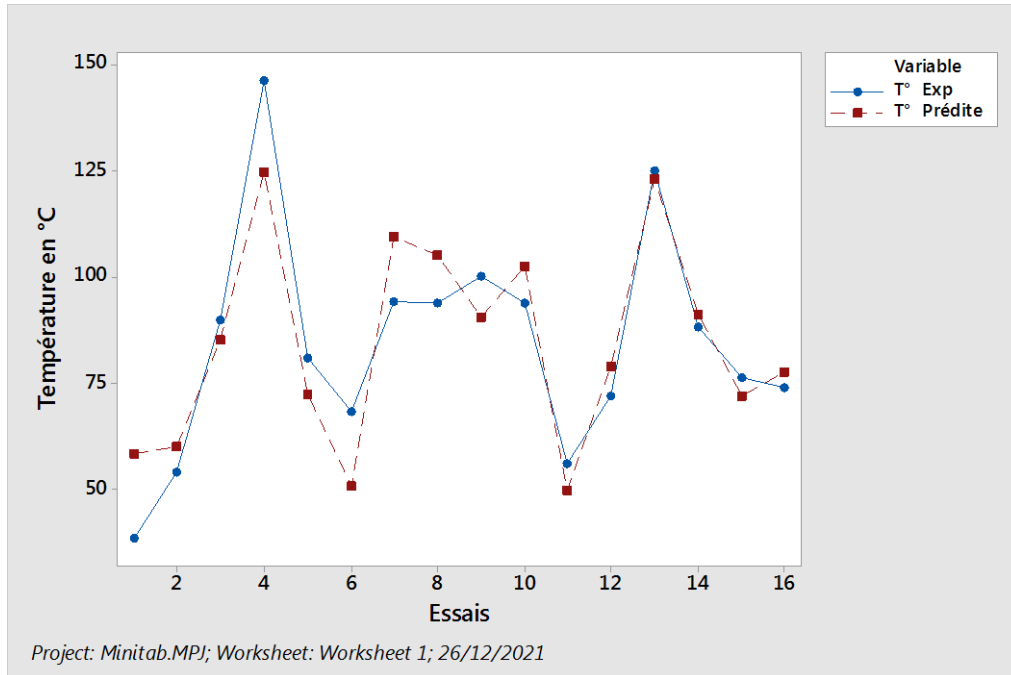


Figure V.5: Courbe expérimentale et prédite.

V.2.1.2 Analyse des effets des conditions de coupe

La figure V.6 représente les effets des conditions de coupe à savoir la vitesse de coupe, l’avance et la pénétration sur la variation de la température.

On voit que la vitesse de coupe et la pénétration influent nettement sur l’augmentation de la température par contre l’avance montre une faible influence sur la température.

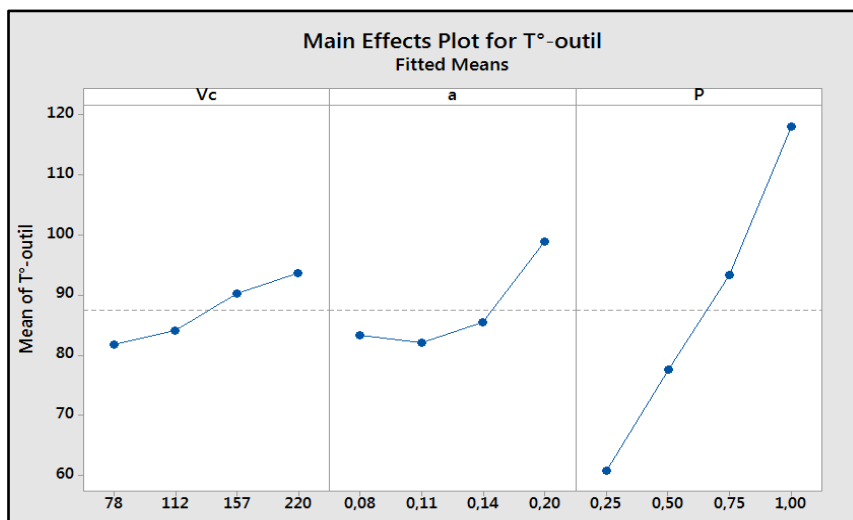


Figure V.6: Effets des conditions de coupe sur la température.

V.2.1.3 Droite de normalité de la distribution des résidus

L'analyse de la distribution des résidus est basée sur un test puissant pour la détection de la non-normalité. Le tracé de probabilité normale est présenté dans la Figure V.7, il est clair que les résidus se trouvent proches de la ligne de référence, ce qui implique que les erreurs sont distribuées normalement.

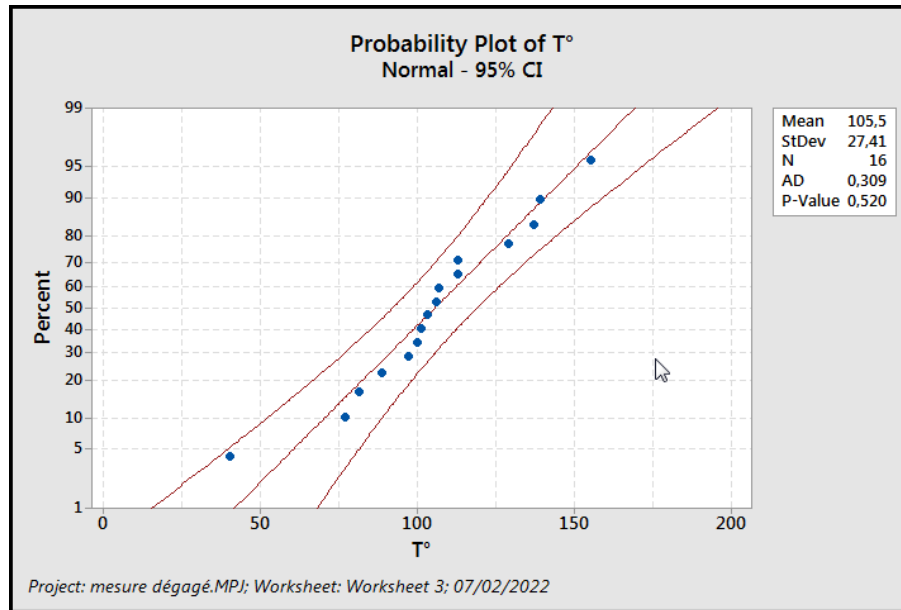


Figure V.7 : Droite de normalité de la distribution des résidus.

V.2.1.4 Analyse de variance

La méthode des moindres carrés est employée pour l'analyse de la variance (ANOVA) à l'aide du logiciel Minitab V17. Les résultats de cette technique statistique sont présentés dans le tableau V.3. Le tableau de l'analyse est généralement effectué sur les paramètres mesurés en vue d'évaluer les effets principaux des facteurs sur les réponses étudiées.

Le "P-valor" du modèle est calculé à partir de la moyenne de la somme des carrés du modèle divisé par la moyenne de la somme des carrés des résidus. En outre, si "P-valor" est très petit (inférieur à 0,05) alors les limites dans le modèle a un effet significatif sur la réponse.

Tableau V.3 : Analyse de la variance.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	31943	10647,6	34,73	0,000
Vc	1	1393	1392,7	4,54	0,037
a	1	2458	2458,3	8,02	0,006
p	1	28092	28091,8	91,63	0,000
Error	12	18394	306,6		
Total	15	50337			

L'analyse présentée dans le Tableau V.3 montre que la vitesse de coupe (Vc) et l'avance (a) ont des effets significatifs sur la température de coupe, alors que la profondeur de passe (p) à un effet imposant sur la température pour un niveau de confiance de 95%.

V.2.2 Analyse des courbes et thermogrammes de température

V.2.2.1 Effets de la vitesse de coupe sur la température

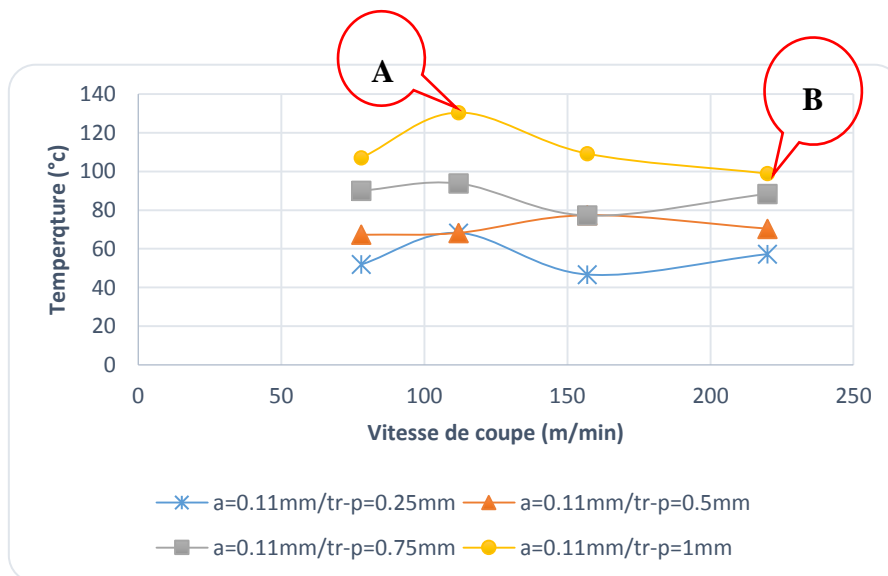


Figure V.8: Température en fonction de la vitesse de coupe.

On constate sur la figure V.8, les différents niveaux des courbes de température en fonction de la vitesse de coupe. Elles augmentent avec l'évolution de la profondeur de passe. A la vitesse de coupe 112 m/mn (point A) on remarque un pic de température qui peut être expliqué par des conditions de coupes défavorables, générant un enchevêtrement du copeau autour de l'arête de coupe, comme le montre le thermogramme de la figure V.9.

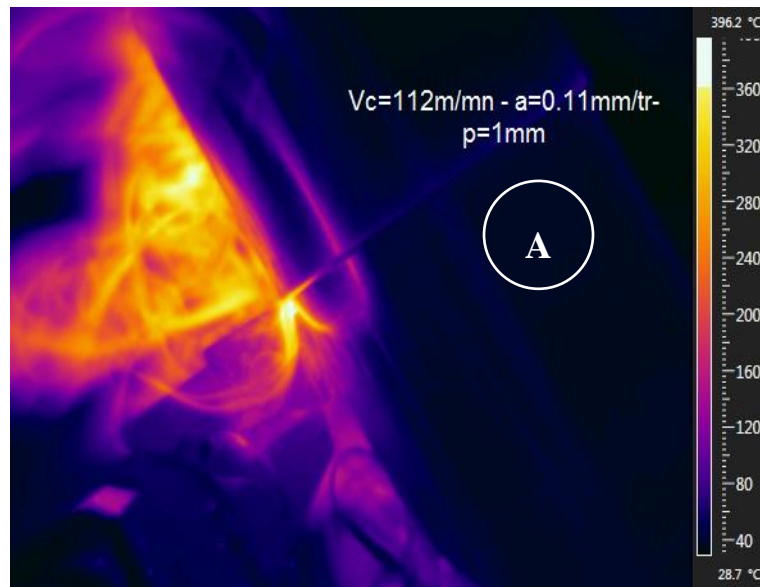


Figure V.9: Thermogramme point (A).

A vitesse de coupe élevée (point B), l'écoulement du copeau est rétabli, la température de coupe chute (thermogramme figure V.10).

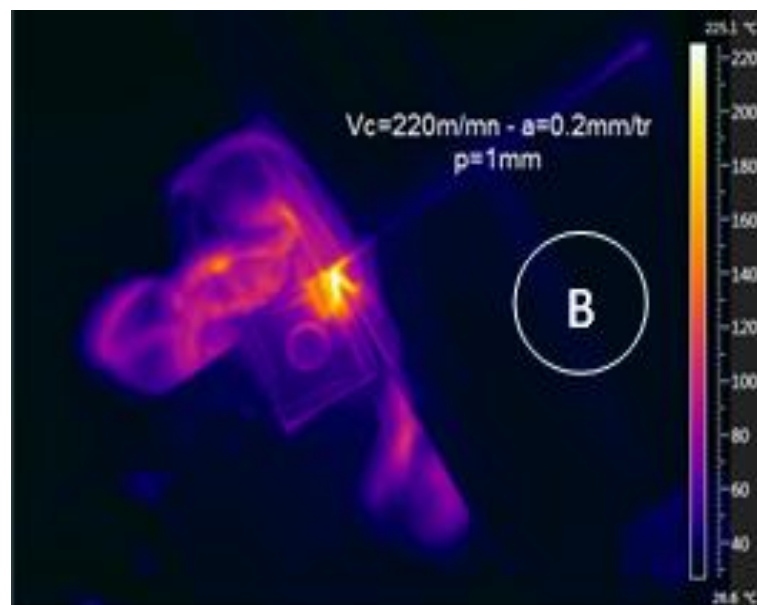


Figure V.10: Thermogramme point (B).

V.2.2.2 Effets de l'avance sur la température

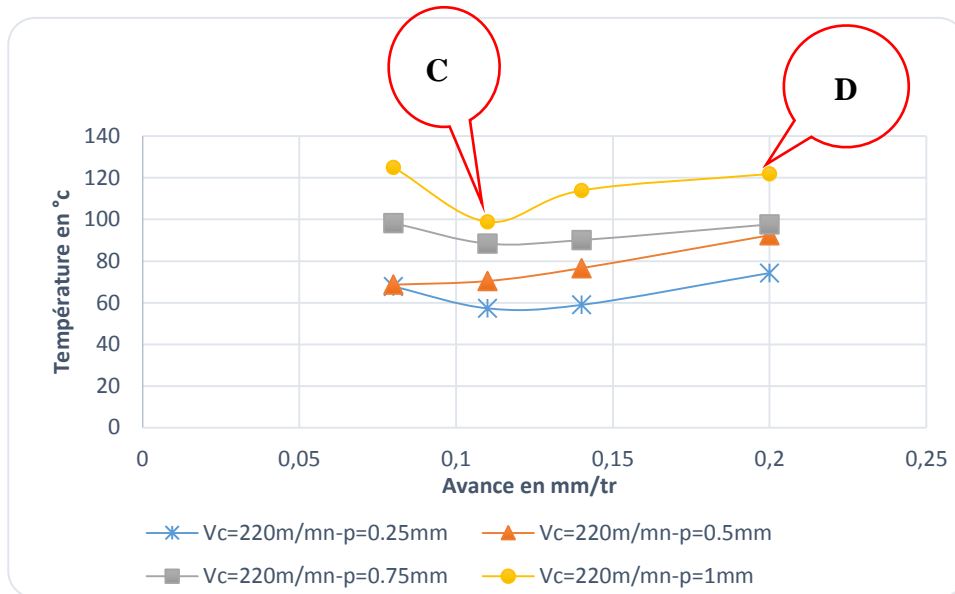


Figure V.11: Température en fonction de l'avance.

On constate sur la figure V.11, les différents niveaux des courbes de température en fonction de l'avance. Elles augmentent avec l'évolution de la profondeur de passe. A la vitesse d'avance de 0.11 tr/mn (point C) on remarque une température plus faible qui peut être expliqué par des conditions de coupe favorisant l'écoulement du copeau autour de l'arête de coupe, comme le montre le thermogramme de la figure V.12.

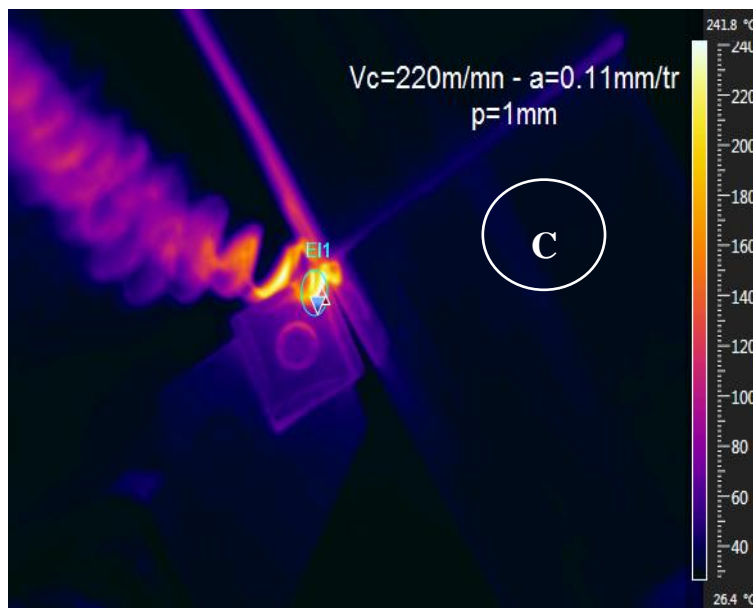


Figure V.12: Thermogramme point (C).

A vitesse de coupe élevée (point D), le copeau reste au niveau de l'arête de coupe, ce qui génère une augmentation de la température (thermogramme figure V.13).

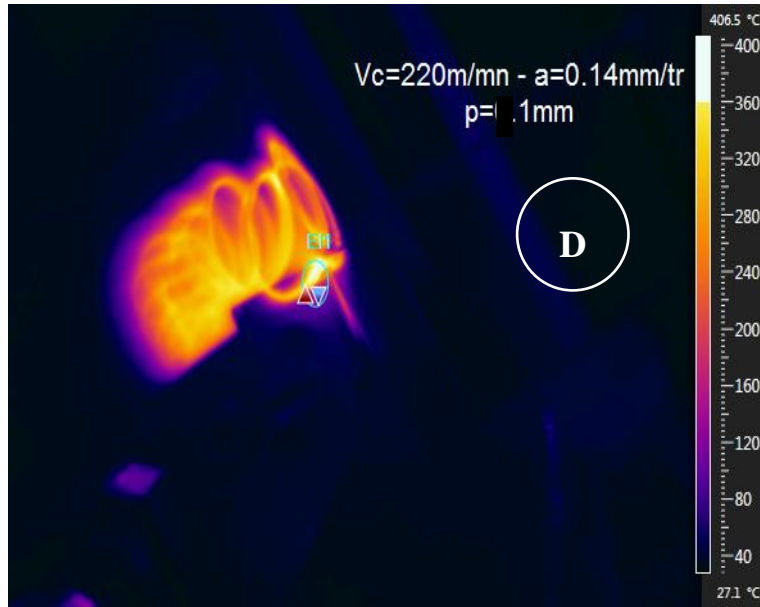


Figure V.13: Thermogramme point (D).

V.2.2.3 Effets de la profondeur de passe sur la température

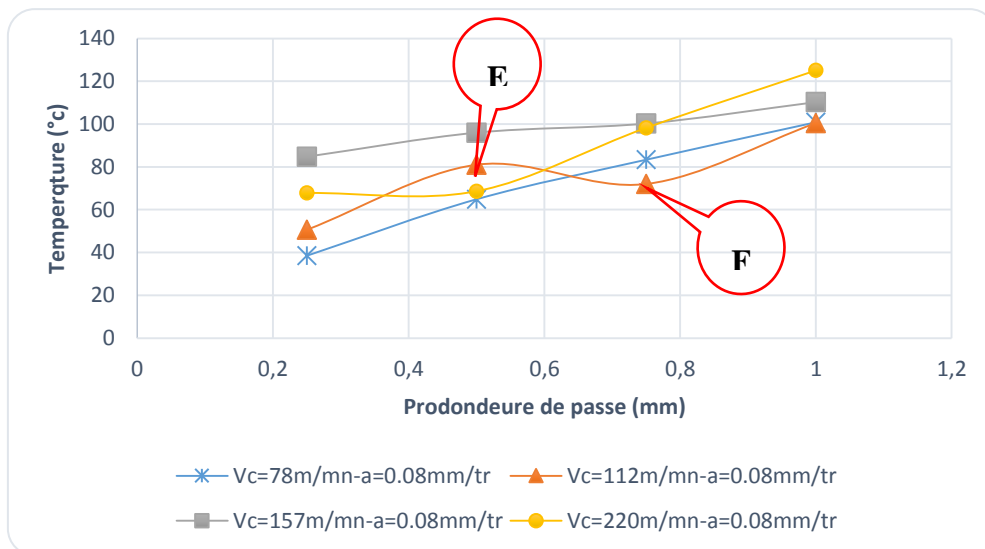


Figure V.14: Température en fonction de la profondeur de passe.

La figure V-14 montre les différents niveaux des courbes de température en fonction de la profondeur de passe. Elles augmentent avec l'évolution de la vitesse de coupe.

A la profondeur de passe de 0,5mm (point E) on remarque un pic de température qui peut être expliqué par des conditions de coupes favorisant l'écoulement du copeau autour de l'arête de coupe, comme le montre le thermogramme de la figure V.15.

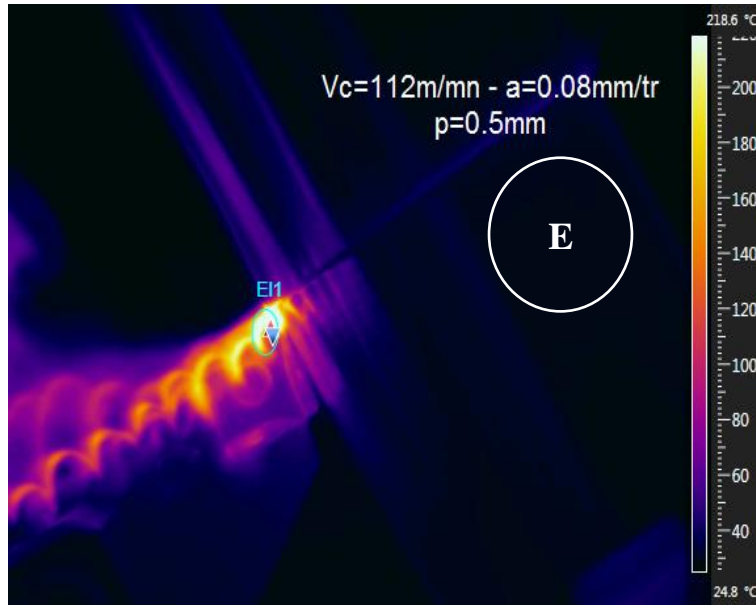


Figure V.15: Thermogramme point (E).

A profondeur de passe de 0,75 mm (point F), le copeau est évacué plus facilement, ce qui génère une diminution de la température (thermogramme figure V.16).

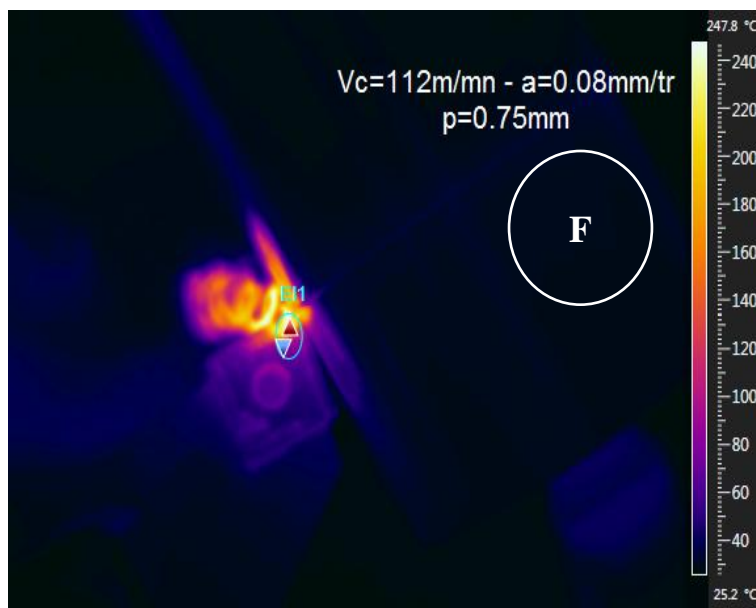


Figure V.16: Thermogramme point (F).

Nous présentons maintenant les résultats obtenus de la deuxième méthode de mesure de la température qui est faite juste après le dégagement de l'outil.

V.2.3 Modèle de prédiction de la température par le polynôme du second degré

V.2.3.1 Coefficients de l'équation de régression

Tableau V.4 : Coefficients de l'équation de régression.

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-3	132	-0,03	0,981	
Vc	1,19	1,10	1,08	0,323	109,36
a	-616	1395	-0,44	0,674	122,46
p	129	179	0,72	0,498	80,42
Vc×Vc	-0,00141	0,00261	-0,54	0,608	56,86
a×a	2402	3669	0,65	0,537	69,55
p×p	-7,6	89,6	-0,09	0,935	32,32
Vc×a	-1,56	4,62	-0,34	0,747	64,75
Vc×p	-0,694	0,669	-1,04	0,339	41,35
a×p	232	833	0,28	0,790	50,93

L'équation de régression du deuxième ordre peut s'écrire de la sorte :

$$T^{\circ} = -3 + 1,19 Vc - 616 a + 129 p - 0,00141 Vc^2 + 2402 a^2 - 7,6 p^2 - 1,56 Vc \times a - 0,694 Vc \times p + 232 a \times p \quad (V.4)$$

Tableau V.5 : Tableau des valeurs expérimentales(T° exp) et prédites(T° préd).

Vc	a	p	T° exp	T° préd	Erreur %	Précision%
78	0,08	0,25	40,4	50,39	24,72	75,28
78	0,11	0,5	88,78	105,00	18,27	81,73
78	0,14	0,75	77	79,94	3,81	96,19
78	0,2	1	137	107,86	21,27	78,73
112	0,08	0,5	129	102,36	20,65	79,35
112	0,11	0,25	101	101,44	0,43	99,57
112	0,14	1	97	109,39	12,77	87,23
112	0,2	0,75	113	126,82	12,23	87,77
157	0,08	0,75	107	104,52	2,32	97,68
157	0,11	1	139	136,61	1,72	98,28
157	0,14	0,25	81,4	70,97	12,82	87,18
157	0,2	0,5	106,1	121,41	14,43	85,57
220	0,08	1	100	119,14	19,14	80,86
220	0,11	0,75	155	140,74	9,20	90,80
220	0,14	0,5	113	108,11	4,33	95,67
220	0,2	0,25	103	103,02	0,01	99,99
* T° exp = Température expérimentale ; T° préd = Température prédite						

La comparaison, entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites du tableau V.5 pour les modèles obtenus de la température, est représentée graphiquement sur la figure V.17. Cette dernière montre que les valeurs expérimentales et les valeurs estimées sont proches avec une précision de 88.87 %. En effet, ces résultats prouvent la précision du modèle. De plus, les résultats confirment que le modèle peut être efficacement utilisé pour prédire la température pour l'usinage avec un intervalle de confiance de 95 %.

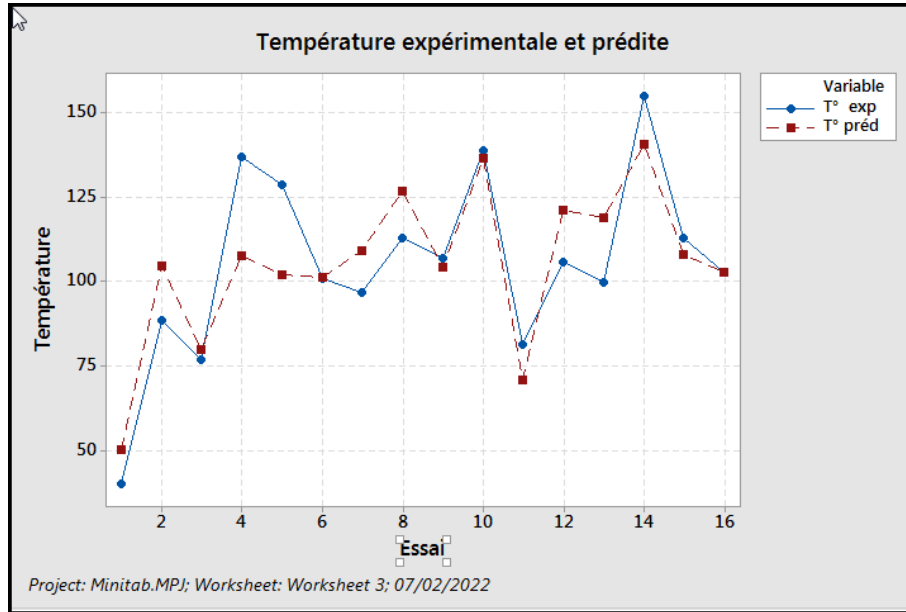


Figure V.17 : Courbes expérimentale et prédite.

V.2.3.2 Analyse des interactions des conditions de coupe

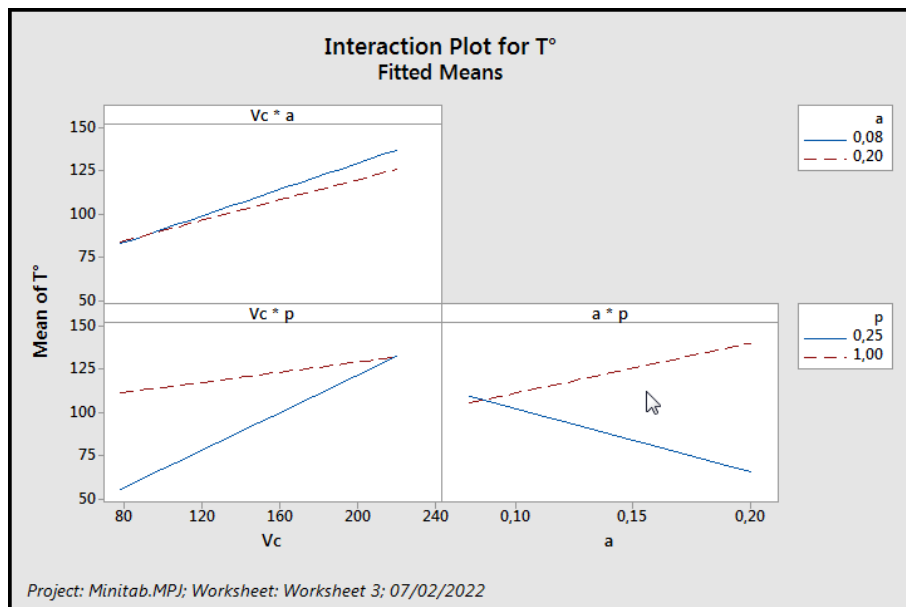


Figure V.18 : Interaction des conditions de coupe.

L'analyse de la figure V.18 nous montre les différentes interactions :

- L'interaction **Vc×p** (entre la vitesse de coupe et la profondeur de passe) à un effet imposant.
- L'interaction **a×p** (entre l'avance et la profondeur de passe) ainsi que l'interaction **Vc×a** (entre la vitesse de coupe et l'avance) sont moins significantes.

La plus grande partie de l'énergie libérée est dépensée à la fois pour couper et déformer plastiquement les copeaux. Une partie de cette énergie est transformée en chaleur par frottement aux deux interfaces (outil-copeau et outil-pièce). La génération de chaleur pendant l'usinage entraîne une augmentation de la température dans la zone de processus et il s'avère que la vitesse de coupe est le facteur imposant sur la température de coupe.

- **Analyse de variance**

Nous constatons que le « P-Value » de la vitesse de coupe Vc est le plus proche de 0.05, donc on déduit que son effet est important par rapport aux autres. Le tableau suivant regroupe les valeurs obtenues.

Tableau V.6 : Analyse de la variance.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	9	6859,50	762,166	1,52	0,314
Vc	1	581,18	581,182	1,16	0,323
a	1	97,74	97,742	0,20	0,674
p	1	260,30	260,303	0,52	0,498
Vc×Vc	1	146,65	146,648	0,29	0,608
a×a	1	214,58	214,578	0,43	0,537
p×p	1	3,62	3,621	0,01	0,935
Vc×a	1	57,30	57,301	0,11	0,747
Vc×p	1	539,69	539,694	1,08	0,339
a×p	1	38,66	38,663	0,08	0,790
Error	6	3004,09	500,682		
Total	15	9863,59			

V.2.3.3 Isothermes et surfaces de réponses

Nous allons présenter en ce qui suit, les isothermes puis suivi des surfaces de réponses.

L'isotherme de la figure V.19 montre que la température de coupe augmente avec l'avance sur l'intervalle de 0.08 mm/tr et 0.14 mm/tr, avec une baisse de température sur l'intervalle 0.14 mm/tr et 0.2 mm/tr.

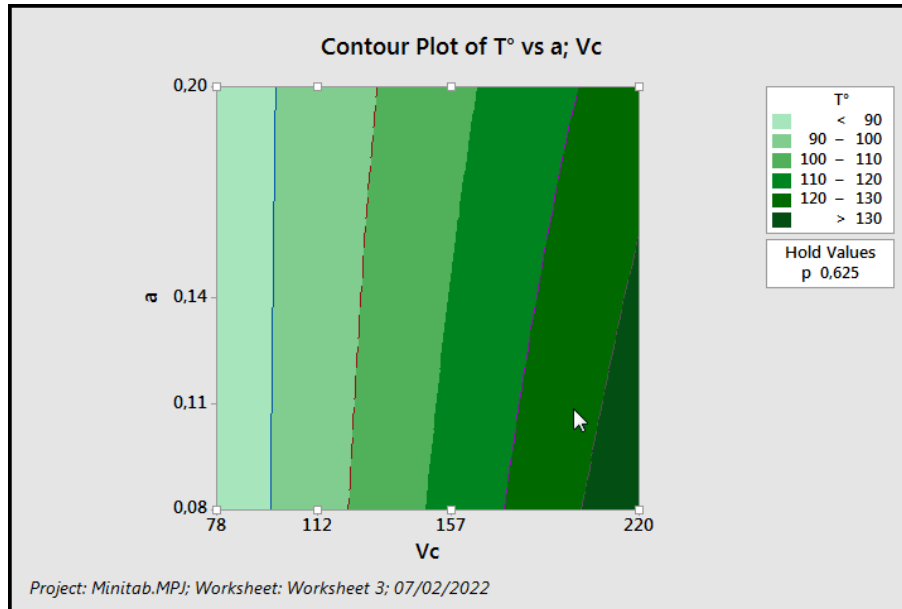


Figure V.19 : Isotherme de la température en fonction de la vitesse de coupe et l'avance.

L'isotherme de la figure V.20 montre que la température de coupe augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe et la profondeur de passe.

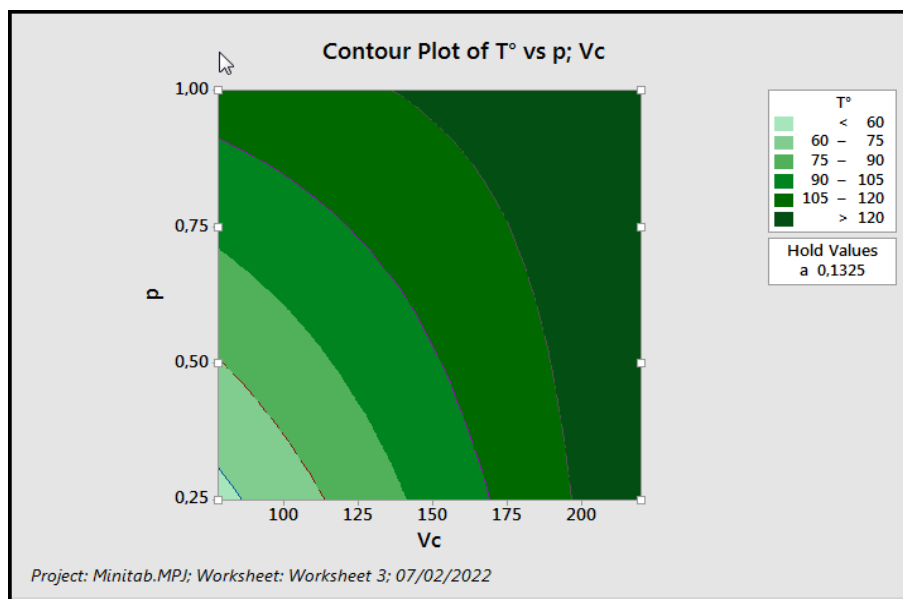


Figure V.20 : Isotherme en fonction de la vitesse de coupe et la profondeur de passe.

L'isotherme de la figure V.21 montre que la température augmente pour l'intervalle de l'avance (0.14 mm/tr-0.2 mm/tr) et la profondeur de passe, (0.75 mm-1 mm) et elle reste modéré pour les intervalle inférieur, Comme on peut voir pour une profondeur de passe de 0.25 mm la température diminue.

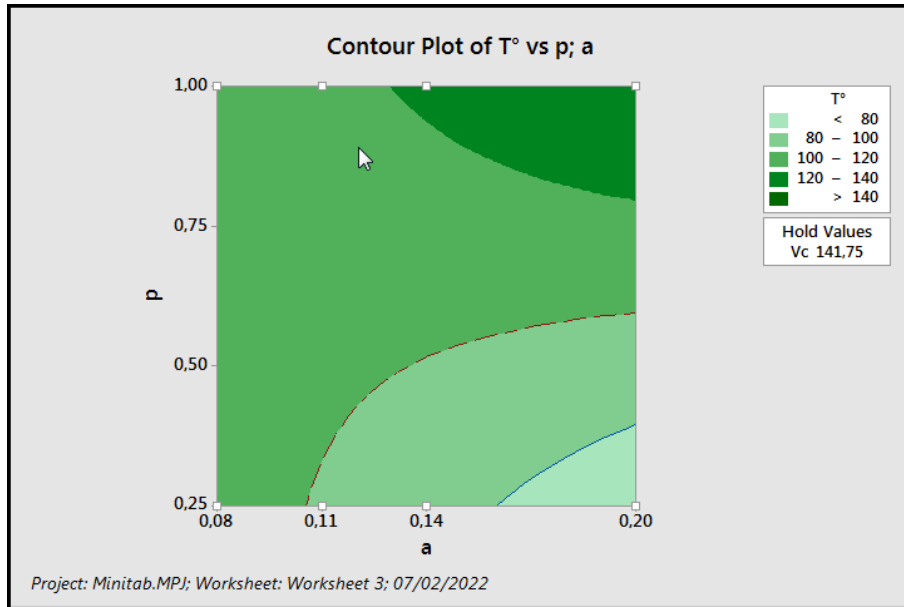


Figure V.21 : Isotherme en fonction de l'avance et la profondeur de passe.

Pour visualiser l'influence des paramètres de coupe sur la température (T°), les surfaces de réponse (3D) sont présentées dans la Figure V.22, V.24 et V.26. L'évolution de la température est présentée en fonction de la vitesse de coupe, la profondeur de passe et l'avance.

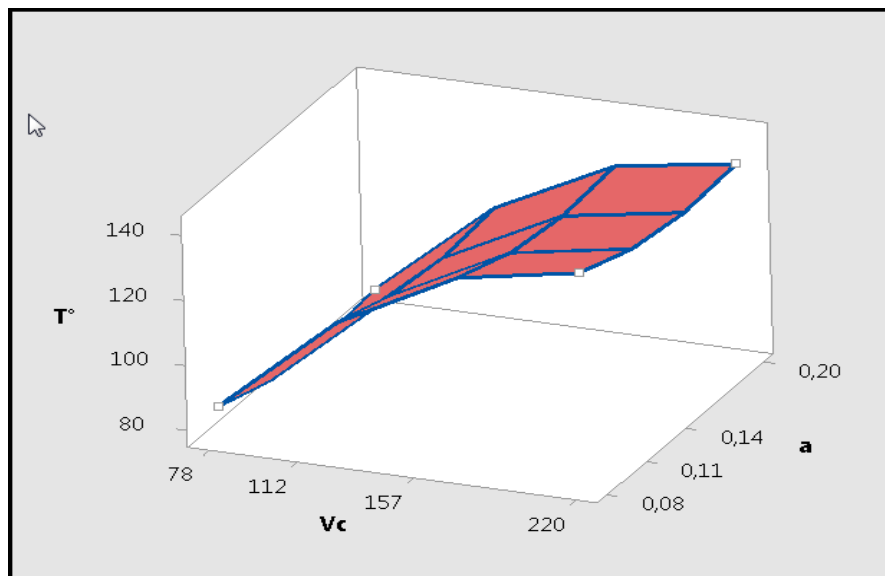


Figure V.22 : Surface de réponse de la température en fonction de Vc et a.

La variation de température (T°) avec l'avance et la vitesse de coupe sont montrée dans la figure V.22. L'analyse de la courbe montre que la température augmente avec la vitesse de coupe et reste modérer avec l'avance.

Le thermogramme figure V.23 montre la concentration de chaleur sur le bec de l'outil et des fragments de copeau.

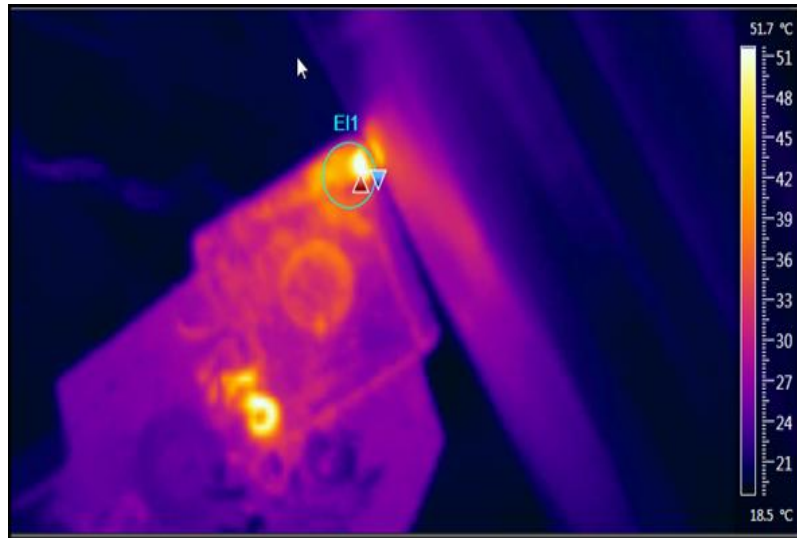


Figure V.23 : Thermogramme pour $V_c=78$ m/min, $a=0.08$ mm/tr et $p=0.25$ mm.

La courbe de réponse figure V.24 montre que la température augmente avec la profondeur de passe pour la vitesse de coupe de 78 m/min et une variation légère de la température avec l'augmentation de la vitesse de coupe.

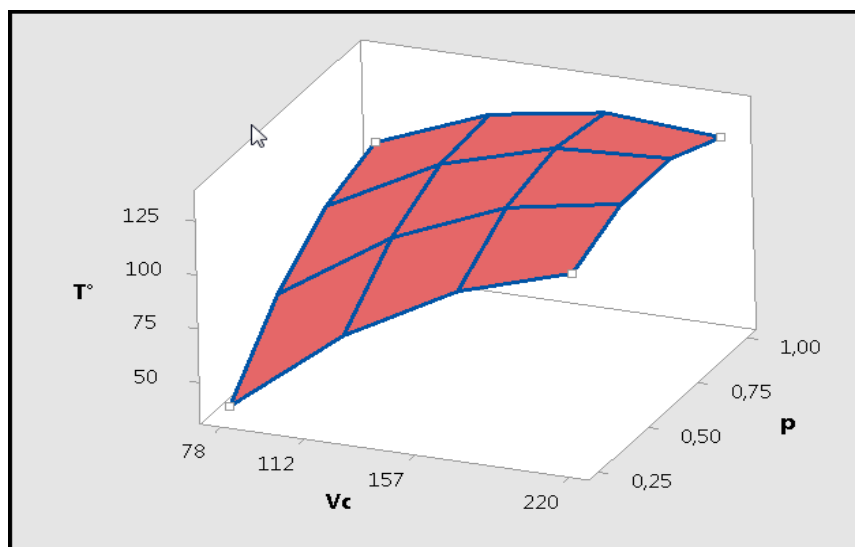


Figure V.24 : Surface de réponse de de la température en fonction de V_c et p .

Le thermogramme suivant montre la distribution de chaleur sur la face de coupe.

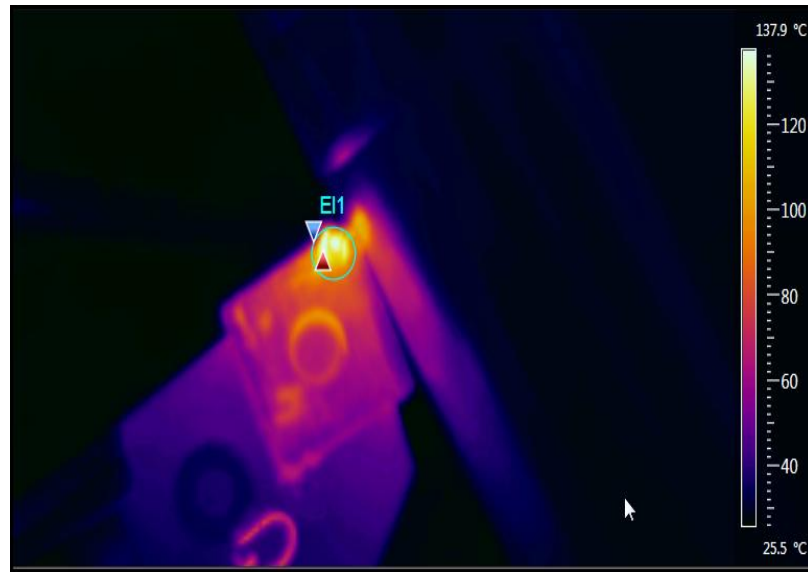


Figure V.25 : Thermogramme pour $V_c=157$ m/min, $a=0.08$ mm/tr et $p=0.75$ mm.

La courbe de réponse figure V.26 montre que la température augmente inversement proportionnelle à l'avance pour des profondeurs de passe entre 0.25 mm et 0.5 mm.

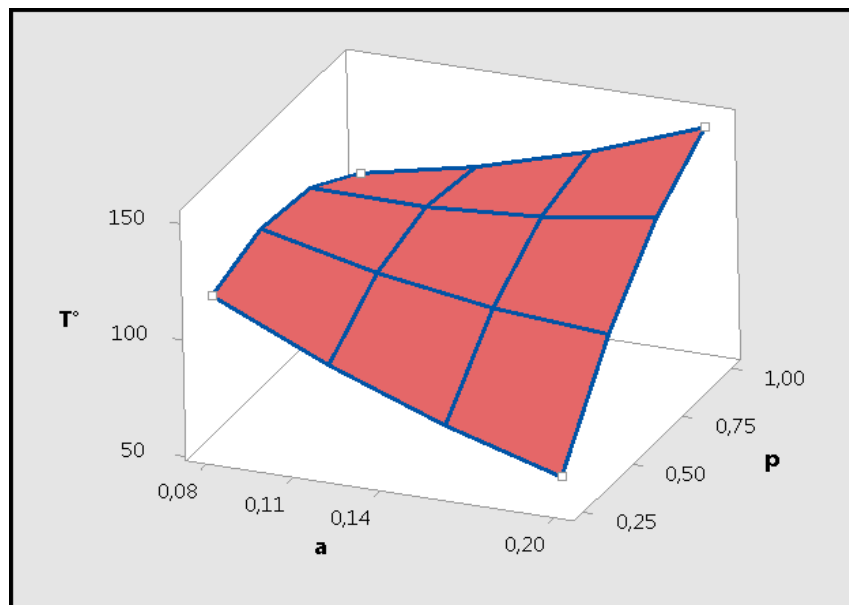


Figure V.26 : Surface de réponse de de la température en fonction de a et p .

Le thermogramme figure V.28 montre la concentration de chaleur sur le bec de l'outil.



Figure V.27 : Thermogramme pour $V_c = 112$ m/min, $a = 0.14$ mm/tr et $p = 1$ mm.

Comparaison entre la mesure pendant l'usinage et la mesure au dégagement de l'outil

Pour fructifier le travail, nous avons réalisé une comparaison entre deux courbes de tendance. La première courbe est la mesure de la température de coupe pendant l'usinage et la deuxième est mesure de la température juste au dégagement de l'outil de coupe. Le tableau V. 7 illustre les résultats.

La figure V. 28 nous montre que les deux courbes ont la même tendance ce qui explique la fiabilité des deux mesures. Les températures de la courbe de mesure au dégagement montrent des températures élevées par rapport à la mesure pendant l'usinage qui peut être expliqué par l'accumulation de chaleur en fin d'usinage.

Tableau V.7 : Température en usinage et dégagement.

Essai	T° (pendant l'usinage)	T° (Pendant le dégagement)
1	38,50	40,40
2	54,10	88,78
3	90,07	77,00
4	146,56	137,00
5	81,00	129,00
6	68,52	101,00
7	94,50	97,00
8	94,00	113,00
9	100,24	107,00
10	94,00	139,00
11	56,07	81,40
12	72,00	106,10
13	125,07	100,00
14	88,41	155,00
15	76,61	113,00
16	74,26	103,00

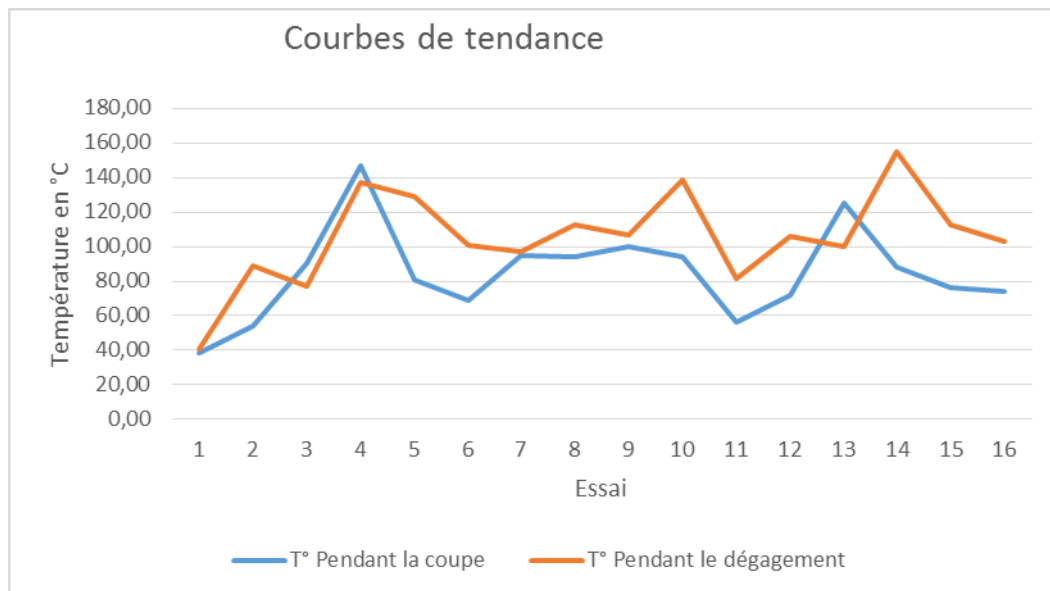


Figure V.28 : Courbes de tendance.

Après cette étude détaillée sur la température mesurée lors d'une opération de chariotage en tournage et connaissant l'optique actuelle de la production qui est de chercher à obtenir une pièce à un cout minimum, nous entamons maintenant une étude d'optimisation.

V.3 Optimisation des conditions de coupe

Ce but peut être atteint en intervenant sur les différents stades de l'élaboration de la pièce :

- ✓ Conception de l'ensemble à fabriquer.
- ✓ Définition de la pièce.
- ✓ Choix de la gamme de fabrication.
- ✓ Choix des conditions de coupe.

L'optimisation des conditions de coupe peut se faire en fixant une température de coupe obtenue lors de l'expérimentation. Elle peut être donnée par le fabricant en fonction des caractéristiques techniques de la pastille. On propose une méthode permettant de chercher les conditions de coupe optimales (vitesse de coupe, avance, pénétration). Ce choix des conditions de coupe intervient directement sur le temps d'usinage de la pièce donc sur le prix de revient de l'usinage, donc une amélioration de la productivité.

Le tracé d'optimisation nous permet de modifier de manière interactive les paramètres de coupe des variables d'entrée pour effectuer des analyses de sensibilité et éventuellement améliorer la solution initiale.

On applique la technique d'optimisation du logiciel utilisé dans nos travaux, pour la mesure juste après le dégagement de l'outil et sous les contraintes d'usinage suivantes :

$$78 \leq V_c \leq 220; \quad 0,08 \leq a \leq 0,2; \quad 025 \leq p \leq 1$$

En choisissant une température de 100° nous avons obtenu les résultats des variables d'entrée optimisées regroupés sur le tableau suivant.

Tableau V.7 Conditions optimisées.

T°					
Solution	Vc	a	p	Fit	Desirability
1	149	0,14	0,348485	99,967	0,999446
2	220	0,185560	0,256348	100,148	0,997301
3	78	0,150854	0,991703	103,348	0,939131

Pour l'indice de désirabilité égale à 0.999446, les conditions optimales sont les suivantes :

$$V_c=149 \text{ m/min}, a=0.14 \text{ mm/tr}, p=0.34 \text{ mm}$$

Le diagramme d'optimisation indique l'incidence des conditions de coupe avec la température de coupe fixée figure V.29.

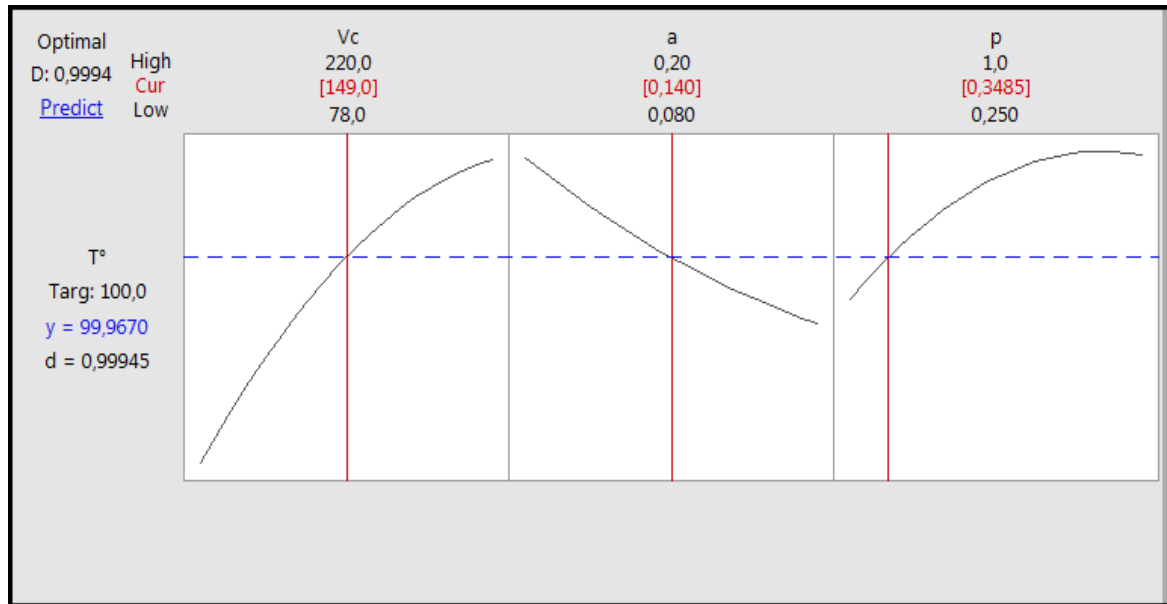


Figure V.29 : Incidence des conditions de coupe.

Pour les conditions : 220m/min, a=0.18 mm/tr, p=0.25 mm

Ces paramètres peuvent être affichés correctement sur le tour conventionnel utilisé puisque ces valeurs existent sur les gammes de la machine.

Pour les conditions : $V_c=149 \text{ m/min}$, $a=0.14 \text{ mm/tr}$, $p=0.34 \text{ mm}$

Ces paramètres peuvent être fixés sur un tour à commande numérique.

V.4 Conclusion

Ce travail démontre qu'une technique de thermographie est une procédure utile pour établir une méthodologie expérimentale permettant d'évaluer la température de coupe pendant les opérations d'usinage.

Aucun travail antérieur de recherche n'a utilisé la caméra infrarouge seule à notre connaissance. La difficulté majeure de la prise de séquence d'usinage par la caméra est l'enroulement du copeau d'où la nécessité de bien choisir les conditions de coupe et d'avoir une bonne protection et fixation.

Les résultats expérimentaux illustrés par les figures permettent de conclure d'une part, que les variations des températures sont très faibles en régimes permanents pour des paramètres de coupes invariants. D'autre part, les contraintes appliquées par l'outil sur le matériau usiné entraînent une élévation de température ainsi que le flux calorifique généré lors de l'usinage est en grande partie évacué par le copeau.

L'expérimentation nous a permis de déterminer les températures de la surface usinée de la pièce ainsi que celle de l'arête de coupe pour les différents paramètres de coupe. L'adéquation du modèle a été vérifiée et jugée adéquate à un niveau de précision de 87,34% pour les mesure de température pendant l'usinage et de 88,87% pour la mesure de la température juste après le dégagement de l'outil et , cela démontre que le modèle peut être utilisé pour prédire la température de coupe.

La technique pourrait être une méthode économique et efficace pour la prédiction de la température et l'optimisation des paramètres de coupe.

***Conclusion générale
& perspectives***

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

En cours d'usinage, les contraintes appliquées par l'outil sur le matériau usiné entraînent une élévation de température de ces deux derniers ce qui nous a poussé à travailler sur cette problématique et essayer de donner des explications à ce phénomène en utilisant une technique de mesure par caméra infrarouge.

Nous avons présenté dans un premier temps une recherche sur les différents travaux de la mesure de température pendant l'usinage. Les méthodes expérimentales et les modèles analytiques sont les plus couramment cités pour les différents procédés d'usinage.

Après avoir examiné les techniques expérimentales pour la mesure de la température dans l'interface outil-pièce, il est devenu clair qu'aucune est parfaite et produit des résultats précis dans toutes les situations.

La thermographie infrarouge présente de nombreux avantages comme une prise de mesure sans contact, une mesure sans ou avec très peu de perturbation entre la surface de l'objet étudié et son milieu environnant, une capacité de mesure en temps réel, une large gamme de température d'utilisation et une capacité d'adaptation à tout type de matériaux. C'est un contrôle non destructif très utile en maintenance préventive et prédictive.

Pour l'identification de la matière des éprouvettes, une caractérisation était nécessaire par des analyses physiques et chimiques.

Les essais préliminaires nous ont permis affirmer d'une part, que les variations des températures sont très faibles en régimes permanents pour des paramètres de coupes invariants. D'autre part, Ils nous confirment que la température du copeau est toujours nettement supérieure à celle de l'arête de coupe et de la pièce. Le flux calorifique généré lors de l'usinage est en grande partie évacué par le copeau.

Pour l'optimisation et le choix des conditions de coupe, un plan d'expérience de TAGUCHI (Table L16) est utilisé pour déterminer l'équation de prédiction de la température et l'effet des conditions de coupe. Le polynôme du premier ordre nous a donné une précision de 87.34 % de l'équation de prédiction pour une mesure de températures pendant l'usinage, un deuxième polynôme nous a donné une précision de 88.87 % par une mesure juste au dégagement de l'outil qui nous a poussé à tracer les deux courbes et nous avons constaté

qu'elles ont la même allure ce qui nous amène à conclure que le flux de chaleur varie avec les conditions de coupe durant l'usinage.

La plus grande partie de l'énergie libérée est dépensée à la fois pour couper et déformer plastiquement les copeaux. Une partie de cette énergie est transformée en chaleur par frottement aux deux interfaces (outil-copeau et outil-pièce). La génération de chaleur pendant l'usinage entraîne une augmentation de la température dans la zone de processus et il s'avère que la profondeur de passe joue un rôle important dans l'usinage.

L'étude effectuée dans cette thèse montre que le facteur le plus influant sur la température de coupe est la profondeur de passe. La comparaison et la validation des résultats de Taguchi avec les résultats des essais ont confirmé la précision du modèle.

La difficulté majeure de la prise de séquence d'usinage par la caméra est l'enroulement du copeau d'où la nécessité de bien choisir les conditions de coupe et d'avoir une bonne protection et fixation de la caméra.

Nous notons qu'elle présente quelques inconvénients liés au matériel mis en œuvre. L'équipement reste très fragile et coûteux qui nécessite un personnel qualifié, l'instrumentation ne fournit qu'une mesure de rayonnement et l'instrumentation nécessite un étalonnage du récepteur.

Comme perspective, le travail sera axé sur une corrélation entre la température et l'usure de l'outil pendant l'usinage ainsi que le développement de nouveaux modèles de prédiction avec une adaptation des conditions de coupe en temps réel et aussi l'utilisation de caméra à haute performance sur des machines-outils à commande numérique et à grande vitesse (UGV).

Bibliographies

Bibliographie

- [1] M. H. Benabdelali. “Caractérisation et modélisation des mécanismes tribologiques aux interfaces outils-pièces-copeaux en usinage à sec de l’acier C45”, Thèse Doctorat, Université de Lyon, France (2001).
- [2] S. F. Krar, and al. “Machine tool operations”. McGraw-Hill Science, Engineering & Mathematics, New York, USA (1983).
- [3] M. Habak. “Etude de l’influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l’acier a roulement 100Cr6”, Thèse Doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, France (2006).
- [4]S. Rossetto. “An Investigation of Temperature Distribution on Tool Flank Surface”, Annals of the C.I.R.P, Vol XXIV, p. 291-293, 1971.
- [5] 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).
- [6] P.K., Wright Trent E.M. “Metallographic methods of determining temperatures gradients in cutting tools.” *Journal of the iron and steel institute*, vol.221. pp 364-368, 1973.
- [7] W.Bouzid. “Etude expérimentale et numérique de la coupe orthogonale ”, Master’s thesis, ENSAM Paris, France,1993.
- [8] D. A. Stephenson, “Tool-work thermocouple temperature measurements theory and implementation issues”, *Journal of Engineering for industry*, vol 115, pp 432-437, 1993.
- [9] O. Pantale, and al. “A three-dimensional numerical model of orthogonal and oblique metal cutting processes” , *Proceeding of Engineering Systems Design and Analysis*, ASME ,vol 3, pp 199-206,1996.
- [10] N.A. Abukhshim, and al. “Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46,PP. 782-800, 2005.

- [11] L.B.Abhang, and al. “Chip-Tool Interface Temperature Prediction Model for Turning Process”, *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 2(4), 2010, 382-393.
- [12] P.J.T. ConradieI, and al. “Overview of work piece temperature measurement techniques for machining of Ti6Al4V”, *South African Journal of Industrial Engineering*. vol.23 n.2, *Online version* ISSN 1012-277X, Pretoria Jan. 2012.
- [13] S. Atlati. “Développement d’une nouvelle approche hybride pour la Modélisation des échanges thermiques à l’interface outil-copeau des échanges thermiques à l’interface outil-copeau : Application à l’usinage de l’alliage d’aluminium aéronautique Aa2024-t351“
Thèse, Université de lorraine 2012 France.
- [14] R. F. Brito, and al. “Experimental investigation of thermal aspects in a cutting tool using comsol and inverse problem”, *Applied Thermal Engineering*, 86, pp. 60-68, (2015).
- [15] K. Abdil, and al. “Thermocouple and Infrared Sensor-Based Measurement of Temperature Distribution in Metal Cutting” *sensors*, 2015, 15, 1274-1291, ISSN 1424-8220, doi:10.3390/s150101274.
- [16] M. Abdelkrim. “Détermination de la densité de chaleur à l’interface pièce outil : Application au tournage” *Universite de Batna 2, génie mécanique*, 2017, Batna, Algérie.
- [17] N.Hamlaoui, and al. (2019, August). “Optimisation des paramètres de coupe pour minimiser la température de coupe lors de l’usinage des tubes HDPE-100”. In *24ème Congrès Français de Mécanique*.
- [18] M. Kunto ğlu, and al. “Optimization and Analysis of Surface Roughness, Flank Wear and 5 Different Sensorial Data via Tool Condition Monitoring System in Turning of AISI 5140” *Sensors* 2020, 20, 4377 pp 20-25; doi:10.3390/s20164377.
- [19] Jean-Luc Battaglia, Andrzej Kusiak, Jean-Rodolphe Puiggali . *Introduction aux transferts thermiques*. Dunod. Paris, France. 2010 ISBN 978-2-10-054828-6.
- [20] D. A. Kara, N. Benhadji Serradj, M.E.A. Ghernaout, “Qualification and Validation of an in-situ Measurement Method of the Machining Temperature, In Mechanism”, *Machine, Robotics and Mechatronics Sciences*. Springer, Cham, pp. 15-27, (2019).

- [21] M. H. Benabdelali. “Caractérisation et modélisation des mécanismes tribologiques aux interfaces outils-pièces-copeaux en usinage à sec de l’acier C45”, Thèse Doctorat, Université de Lyon, France (2001).
- [22] G. Gaussorgues. “ La thermographie infrarouge (Principes, Technologies, Applications) ”, 4ème édition, Ed. Technique et documentation, 1999.
- [23] G. Arndt, and al. (1967). “On the temperature distribution in orthogonal machining”. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 7(1), 39-53.
- [24] D.Pajani, and al. “Thermographie : Technologies et applications ”, Techniques de l’Ingénieur, traité Mesures et Contrôle R 2 741, p1-29, 2001.
- [25] O.Riou, and al. “Quantitative study of the temperature dependence of normal LWIR apparent emissivity”. *Infrared Physics & Technology*. Volume 60. 2013. Pp 244–250.
- [26] M. Berteleau-Hennart. “une méthode originale et rapide d’étalonnage d’une caméra thermique pour des applications en électronique”. Journées d’études de thermographie instrumentale et industrielle. Sénart, 27 et 28 novembre 2003.
- [27] M. A. Kiprawi, and al. (2017). “Study of cutting edge temperature and cutting force of end mill tool in high speed machining”. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 87, p. 02030). EDP Sciences.
- [28] G. Germain, “Contribution a l’optimisation du procédé d’usinage assiste laser” Thèse doctorat de l’école Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, décembre 2006, P 175 France

Annexes

Manuscript ID : 00001-13070

Engineering, Technology & Applied Science Research

Volume 11, Issue 6, December 2021, Pages 7750-7756, Page Count - 7



Source ID : 00000342

A Contribution to the Thermal Field Evaluation at the Tool-Part Interface for the Optimization of Machining Conditions

Nasreddine Benhadji Serradj ⁽¹⁾ Abdelillah Djamal Kara Ali ⁽²⁾ Mohamed El Amine Ghernaout ⁽³⁾

⁽¹⁾ Department of Mechanical Engineering, University of Tlemcen, Tlemcen, Algeria.

⁽²⁾ Department of Mechanical Engineering, University of Tlemcen, Tlemcen, Algeria.

⁽³⁾ Department of Mechanical Engineering, University of Tlemcen, Tlemcen, Algeria.

Abstract

In this study, an experimental measurement methodology is implemented that allows obtaining consistent temperature data during the turning operation of semi-hard C20 steel using SNMG carbide insert, allowing us to have better control at the tool-part interface. The interactions of the phenomena influencing the cut led our choices on the development of a correlation model for the analysis and prediction of the relationships between the machining parameters by measurement of the temperature. The measurement procedure implemented for the temperature estimate is based on the use of an FLIR A325sc type infrared camera mounted and protected by a device on the machine tool. The Taguchi method was chosen to find the relationships between the input factors (cutting speed (V_c), feed rate (a), depth of cut (p)), and the output factor (temperature (T)). In the future, we will develop a numerical validation model to simulate the machining process in order to predict temperatures

Author Keywords

machining conditions; temperature measurement; infrared camera; thermal transfer; Taguchi plan; emissivity

ISSN Print: 2241-4487

Source Type: Journals

Publication Language: English

Abbreviated Journal Title: ETASR

Publisher Name: D.G. Pylarinos

Major Subject: Physical Sciences

Subject area: Mechanical Engineering

ISSN Online: 1792-8036

Document Type: Journal Article

DOI: <https://doi.org/10.48084/etasr.4235>

Access Type: Open Access

Resource Licence: CC BY-NC

Subject Area classification: Engineering and Technology

Source: SCOPEDATABASE

A Contribution to the Thermal Field Evaluation at the Tool-Part Interface for the Optimization of Machining Conditions

Nasreddine Benhadji Serradj
Department of Mechanical Engineering
University of Tlemcen
Tlemcen, Algeria
kawther4499@yahoo.fr

Abdelillah Djamal Kara Ali
Department of Mechanical Engineering
University of Tlemcen
Tlemcen, Algeria
dj_kara_ali@yahoo.fr

Mohamed El Amine Ghernaout
Department of Mechanical Engineering
University of Tlemcen
Tlemcen, Algeria
e_amine2001@yahoo.fr

Abstract—In this study, an experimental measurement methodology is implemented that allows obtaining consistent temperature data during the turning operation of semi-hard C20 steel using SNMG carbide insert, allowing us to have better control at the tool-part interface. The interactions of the phenomena influencing the cut led our choices on the development of a correlation model for the analysis and prediction of the relationships between the machining parameters by measurement of the temperature. The measurement procedure implemented for the temperature estimate is based on the use of an FLIR A325sc type infrared camera mounted and protected by a device on the machine tool. The Taguchi method was chosen to find the relationships between the input factors (cutting speed (V_c), feed rate (a), depth of cut (p)), and the output factor (temperature (T)). In the future, we will develop a numerical validation model to simulate the machining process in order to predict temperatures.

Keywords—machining conditions; temperature measurement; infrared camera; thermal transfer; Taguchi plan; emissivity

I. INTRODUCTION

During machining, maximum heat occurs at the tool-part interface. It affects, among others, tool life, surface finish, and cutting forces. At the heart of the process, two main phenomena interact: a very strong plastic deformation in the shear zones and the friction of the chip on the cutting face of the tool. We can also add the friction of the draft face on the newly generated surface (Figure 1). Since the first experimental work of Taylor (1905-1907) on the influence of temperature in machining, significant progress has been made in improving knowledge about metal cutting. The bibliographic research carried out in [1] on the different thermal aspects during machining shows the difficulties of direct measurement.

Authors in [2] showed that several methods are possible for measuring temperatures during the cutting process:

- Measurement by metallurgical analysis of the cutting insert after machining. Authors in [3] showed that it is possible to determine the temperature map in the cutting tool as a function of the phase transformations detected during a metallographic analysis of a high speed steel tool. This is an a posteriori measurement method.
- Measurement by thermocouples implanted in the cutting insert. In [4], it was shown that for this type of thermal measurement, the temperature mapping is carried out from point readings obtained by thermocouples implanted in the insert of the cutting tool.
- Temperature evaluation by thermocouples directly in contact with the tool-part pair. In this particular case, only an average value of the temperature can be obtained. Authors in [5] proposed the use of the tool-part contact as a hot junction for the thermocouple. The two preceding methods present major hazards relating to the installation of thermocouples.

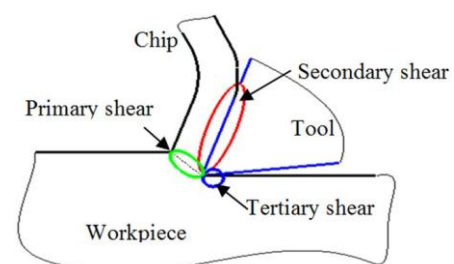


Fig. 1. Sources of heat generation in machining.

Corresponding author: Mohamed El Amine Ghernaout

Our job focused on taking the temperature with an infrared camera without contact. The response time is fast, thus allowing the capture of the intermittent heat generation. This capture can allow us to regulate the cutting parameters if there is a sudden increase in temperature. The camera is mounted and protected by a device on the machine tool.

II. THERMAL FLOWS

Almost all of the chip formation work is degraded in the form of heat. This results in a high temperature rise in the chip formation zone. The correlation between cutting conditions and temperature is shown in Figure 2, with regard particular to the primary influence of the cutting speed factor.

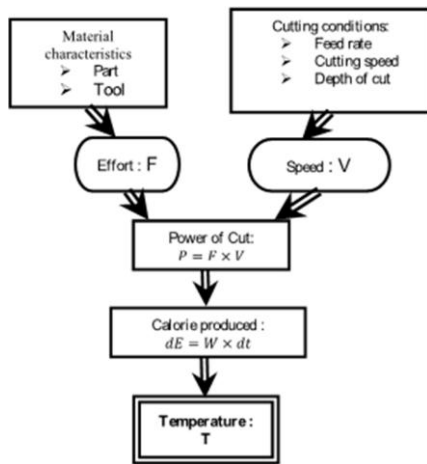


Fig. 2. Correlation between cutting conditions and temperature.

In this section, we will recall the modes of heat transfer and the influence factors expressed in this method of measurement. Surface temperature measurements implement three heat transfer modes that we briefly recall below along with the relationships of the listed laws.

- Conduction: corresponds to the transfer of heat within an opaque medium, without displacement of matter, under the influence of a temperature difference. Fourier's law (1) describes this transfer mechanism [9-10]:

$$\varnothing = \lambda \cdot S \cdot \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \quad (1)$$

- Convection: corresponds to the transfer of heat between a solid and a moving fluid (liquid or gas). Newton's law (2) describes this transfer mechanism [9-10]:

$$\varnothing = h \cdot S(T_p - T_a) \quad (2)$$

- Radiation: corresponds to the transfer of heat in the form of an electromagnetic wave, emitted by a surface. Stefan's law (3) describes this transfer mechanism [9-10]:

$$\varnothing = \sigma \cdot S \cdot G_p \cdot (T_p^4 - T_a^4) \quad (3)$$

To obtain consistent temperature data at the tool-part interface, an experimental measurement methodology is proposed using acquisition instrumentation, equipped with an infrared camera and a unit for processing the measured values.

III. MEASUREMENT BY INFRARED RADIATION

The large amount of heat released in the chip formation zone and the difficulties of evacuation of this generated energy, result in very high and localized temperatures. These in turn have a significant impact on the dimensional and geometric precision of the produced surfaces and the lifetime of the cutting tools. The knowledge of the thermal field is therefore an essential element in the analysis and control of these phenomena.

A. Infrared Thermography

Thermal imaging is a contactless technology that converts infrared waves into a temperature image. Figure 3 shows schematically the overall principle of this method.

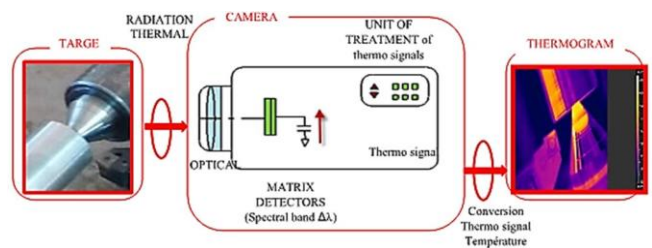


Fig. 3. Radiometric chain of the camera.

B. Theoretical Elements

Increase in temperature due to machining causes electromagnetic radiation described by Planck's law. This law, for a black body, is the basis of temperature measurement by radiation analysis. It has a spectral distribution, which depends on the material. Its intensity or its luminance can be measured and its analysis allows finding the temperature [6].

$$L_h = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\lambda T} - 1)} \quad (4)$$

where C_1 and C_2 are constants: $C_1 = 1.191 \times 10^{-16} \text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$ and $C_2 = 1.438 \times 10^{-2} \text{m} \cdot \text{K}$, h is the Planck constant, k the Boltzmann constant, c the speed of light, T the absolute temperature in Kelvin degrees, and λ the wavelength in m [9-10].

Emissivity ϵ is a property of surfaces depending on the nature of the material, its surface quality, the wavelength and the angle of observation. Its prior evaluation is essential to determine the absolute value of the temperature from the light flux signal [7].

$$s = \frac{L_a}{L_b} \quad (5)$$

where L_a is the luminance of the measured object and L_b the luminance of the black body [9-10].

IV. EXPERIMENTAL PROCEDURE

Although the undertaken studies so far in the area of cutting (mechanism of chip formation, behavior of tools, thermal appearance, and damage of the cutting edges) have made significant progress in the understanding of the process, it is necessary to update and continue them, in order to meet the

new conditions of the industrial context. The complexity and interactions of the many factors involved in the cutting phenomena require specific experiments for each material, in order to define the best choice of tools and corresponding optimal cutting conditions, based on the analysis of their wear behaviors.

A. Means of Realization

In order to take into account the dominant elements of machining, the current analysis was restricted to steel and conventional machining processes.

- Machine tool used: The machining was carried out on a conventional parallel lathe made by TOS TRENCIN (Figure 4). It is a rigid, powerful, precise and well-sealed machine. The main motor of the machine is asynchronous type.
- Machined material: The material used for these tests is the C20 non-alloy steel for heat treatments frequently used in industry. The chemical composition and physic properties are presented in Tables I and II.



Fig. 4. Radiometric chain of the camera.

TABLE I. CHEMICAL COMPOSITION

Element	C	Fe	Mn	P	S
%	0.138	98.11	1.062	0.013	0.011

TABLE II. PHYSICAL PROPERTIES

Property	Value	Units
Elastic modulus	2.049999984e+011	N/m ²
Mass density	7850	Kg/m ³
Thermal conductivity	52	W/(m*K)
Specific heat	486	J/(kg*K)

- Insert and tool holders: The insert used in our tests were chosen according to the machining conditions and a small beak radius ($r = 0,8$ mm). The reference selected is SNMG 12-04-08 (Figure 5). The choice of the tool holder was oriented on a PCLN R 20-20 K12. The properties of the insert are shown in Table III.
- Measurement process used: The objective of this contribution is to measure temperatures in the chip formation zone in order to collect thermal data from the cutting mechanism. The quality of the information sought

requires that it be captured as close as possible to the chip creation area. Temperatures were recorded using the FLIR A325sc thermal camera (Figure 6). The camera is coupled with FLIR Research IR Max measuring software for maximum intuitiveness in display, recording and advanced thermal data processing (Figure 7) [8].

TABLE III. INSERT PROPERTIES

Wafer shape	SNMG
Insert size	120408
Matter	Carbide
Insert thickness (mm)	4.76
Edge length (mm)	12
Insert radius (mm)	0.8
Draft angle (°)	0
Number of cutting edges	8

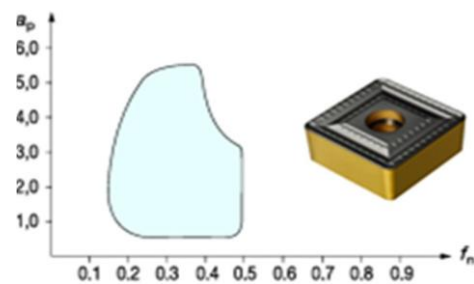


Fig. 5. Pad and its diagram of the range of applications.

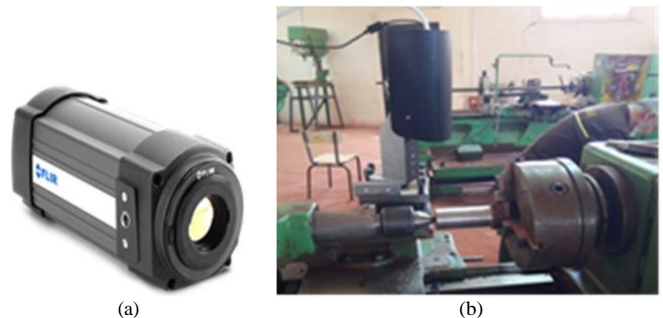


Fig. 6. (a) Thermal camera FLIR A325sc, (b) the experimental device.

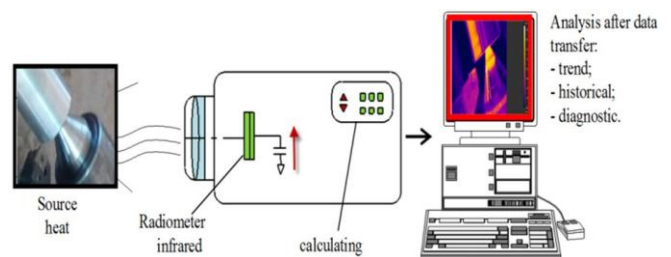


Fig. 7. Chain of acquisition and processing of the thermal data.

- Calibration of the camera: The camera is calibrated in the factory to make accurate measurements and thermal images. However, knowledge of the calibration curve (Figure 8) is essential for advanced control of radiometric measurement.

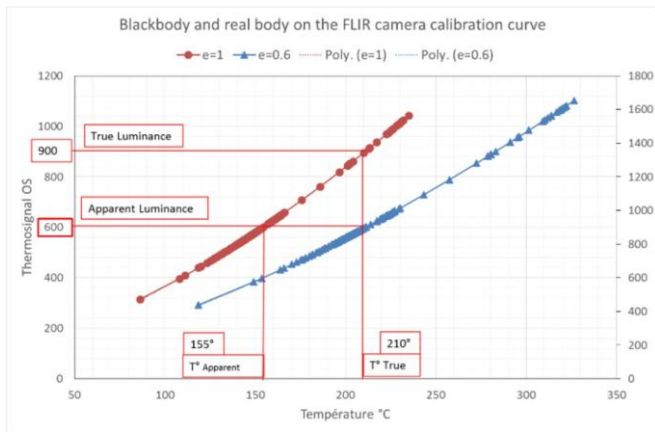


Fig. 8. Calibration curves for the FLIR A325sc.

- Influence of emissivity: When making an infrared measurement, we record the energy \$ emitted by the studied body and refer to Stefan’s law of radiation of the black body:

$$\varnothing = \sigma T^4 \quad (6)$$

where σ is the Boltzmann constant and T the temperature of the studied body, identified with an ideal black body [9-10].

In addition, the measurement requires knowledge of the emissivity coefficient of the studied body. For this, we put the tool (insert) in an oven whose temperature is known thanks to a standard thermometer. After reaching thermal equilibrium, in situ measurements were taken with the camera. Knowing the temperature in the oven, the temperature measured during machining, and the emissivity coefficient displayed on the camera, the actual coefficient of emissivity of the tool is deduced during machining using (6) [9]. We have taken the same approach to determine the emissivity of the machined material.

B. Preliminary Tests

In order to verify the possibility of recording the influence and the variability of the thermal fluctuations during the machining, a first series of tests was conducted to control the sensitivity and the capacity of our measuring system to capture and analyze the thermograms (Figure 9). These preliminary tests were carried out under the variability conditions summarized in Table IV, in which the results of the experiment for the qualification and validation of the measurement method are grouped. Over the length of the machining, we chose 10 positions for the temperature reading, using the camera software. These points are taken during the machining stabilization period. The experimental results illustrated in Figure 10 allow us to conclude that the temperature variations are very small in the steady state for invariant cutting parameters. On the other hand, the heat flux generated during machining is largely evacuated by the chip.

In Figure 11, the curves represent the temperatures of the chip, the machined surface and the cutting edge of the tool. Two curves (tool-part) have practically the same shape and very close temperature thresholds (near 100°C). On the other

hand, the chip temperature curve shows a marked increase in temperature (around 300°C), which confirms the theoretical results which state that the chip evacuates the most important temperature flow.

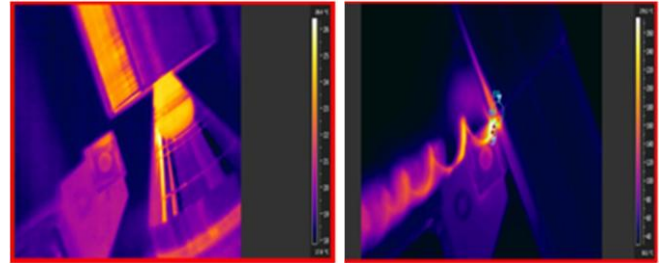


Fig. 9. Thermograms: tool-part.

TABLE IV. EXPERIMENTAL RESULTS

Position	Part	Tool	Chip
1	114.6	79.2	300.7
2	117.6	89.02	298.7
3	117.5	93.3	299.5
4	114.9	95.5	302
5	117.6	96.2	295.5
6	122	96.3	288.3
7	118	97	299.3
8	120.1	97.3	288
9	113.3	99.9	291.3
10	113.4	98.6	289.2
Average	116.90	94.23	295.25

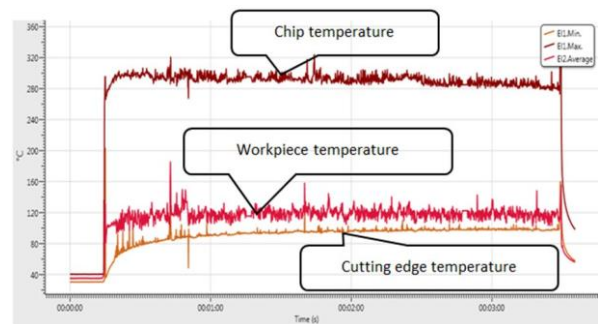


Fig. 10. Temperature variations (quickplot).

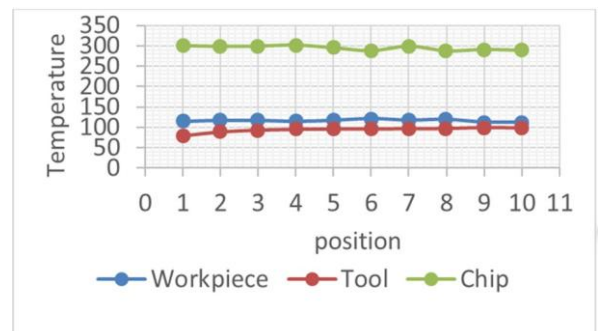


Fig. 11. Temperature variations.

V. REFERENCE TESTS

The large number of variables controlling the manufacturing process requires mathematical models to represent this process. These models should be developed using only the most significant parameters. Tests are used to build first and second order models by multiple regression methods. The aim of developing mathematical models is to understand the combined effect of the parameters involved and to facilitate the optimization of the machining process. During the carried out tests, various machining parameters such as cutting speed, feed rate, and depth of cut, vary according to the design of experiments as independent variables in order to be linked to the response, namely the cutting temperature [T = f (v, f, p)], by prediction equations of the type:

$$T = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 \quad (7)$$

The choice of cutting conditions was conditioned by the range of rotational speeds of the machine and the temperature measurement range of the infrared camera. Table V summarizes the results of the experiments. Figure 12 shows the effect of cutting conditions on temperature variation. Changing the depth of cut has a very high effect on the cutting temperature while the cutting speed and feed rate have a moderate effect on the cutting temperature.

TABLE V. CUTTING PARAMETERS

Parameter	Code	Levels			
		1	2	3	4
Cutting speed Vc (m/min)	X ₁	78	112	157	220
Feed rate a (mm/rev)	X ₂	0.08	0.11	0.14	0.20
Depth of cut P (mm)	X ₃	0.25	0.5	0.75	1
Turning conditions	Machining without lubrication				

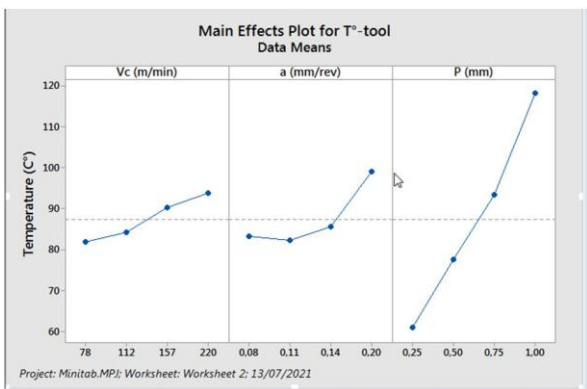


Fig. 12. The effects of cutting conditions on temperature.

After treatment and elimination upstream of the insignificant terms of the model, we obtain the following prediction equation that relates the input and output parameters:

$$T_{\text{tool}} = 9.7 + 0.0877 Vc + 139.7 a + 74.96 P \quad (8)$$

A. Effects of Cutting Speed on Temperature

We can see the different levels of the temperature curves according to the cutting speed in Figure 13. They increase with the evolution of the depth of cut. At 112m/min cutting speed (point A) a temperature peak can be observed which can be

explained by unfavorable cutting conditions, generating entanglement of the chip around the cutting edge, as shown by the thermogram of Figure 14. At high cutting speed (point B), the chip flow is restored, the cutting temperature drops shown by the thermogram (Figure 15).

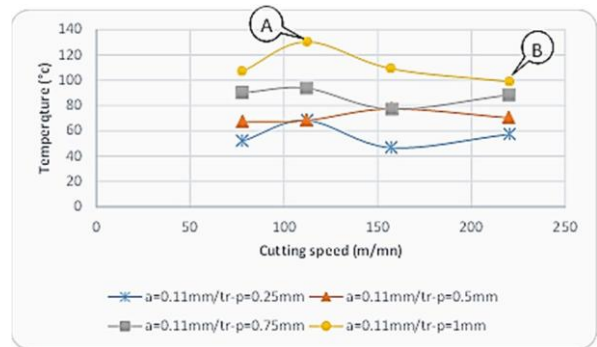


Fig. 13. Temperature according to cutting speed.

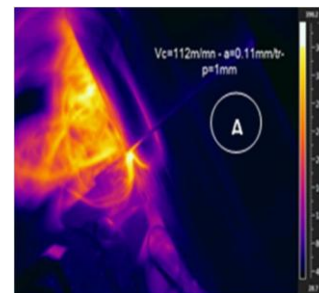


Fig. 14. Thermogram at point A.

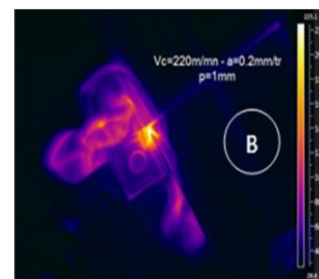


Fig. 15. Thermogram at point B.

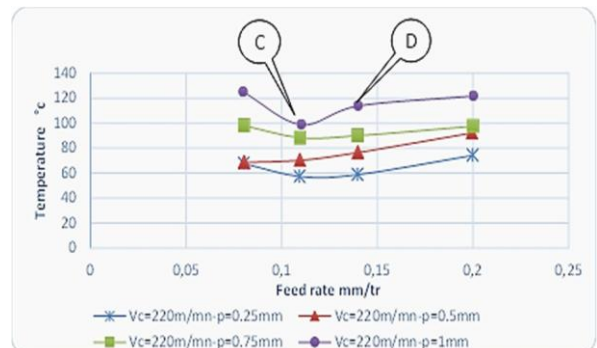


Fig. 16. Temperature according to the feed rate.

B. Effects of Feed Rate on Temperature

Figure 16 shows the different levels of the temperature curves depending on the feed rate. They increase with increasing depth of cut. At the feed rate of 0.11tr/min (Point C) a lower temperature can be observed which can be explained by cutting conditions which favor the flow of the chip around the cutting edge, as shown in the thermogram in Figure 18. At high cutting speed (Point D), the chip remains at the cutting edge, which generates an increase in temperature shown by the thermograms in Figures 17 and 18.

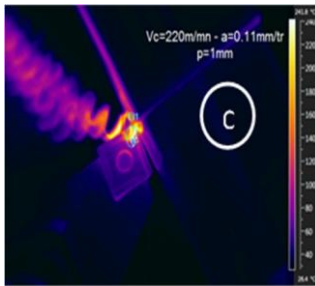


Fig. 17. Thermogram at point C.

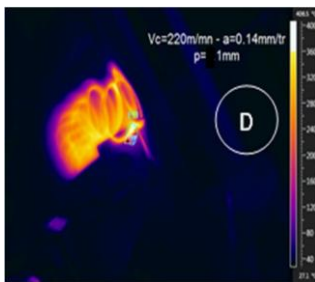


Fig. 18. Thermogram at point D.

C. Effects of Depth of Cut on Temperature

The different levels of the temperature curves according to the depth of cut are exhibited in Figure 19. They increase with the evolution of the cuttingspeed.

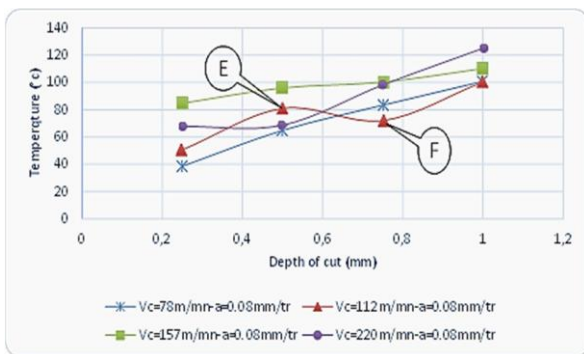


Fig. 19. Temperature as a function of depth of cut.

At the 0.5mm depth of cut (point E) a temperature peak can be observed which can be explained by cutting conditions favoring the flow of the chip around the cutting edge, as shown

by the thermogram of Figure 20. With a depth of 0.75mm (point F), the chip is evacuated more easily, which generates a decrease in temperature (thermogram Figure 21).

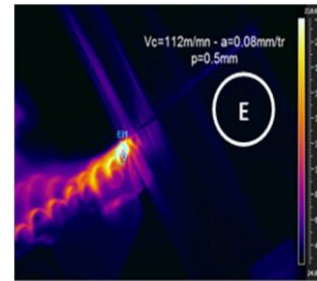


Fig. 20. Thermogram at point E.

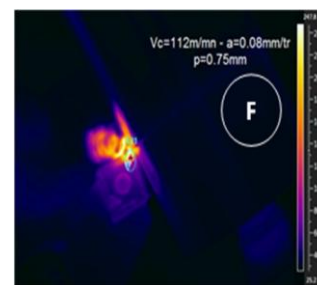


Fig. 21. Thermogram at point F.

VI. CONCLUSIONS

Knowledge of the distribution of the temperature flow between the cutting tool, the chip and the workpiece provides useful information for optimizing manufacturing conditions. Therefore, it is essential to determine the relationship between the cutting parameters and the temperature distribution. The current paper focuses on the infrared thermography procedure for establishing an experimental methodology, which allows the evaluation of the cutting temperature during the machining operations for different cutting parameters. The experimentation allowed us to evaluate the distribution of the temperature flow on the machined surface of the part, the chip, and the cutting edge. For a large cutting penetration, the friction increases for both the tool and the chip and generates an increase in temperature, so we took (from thermograms) the maximum temperatures of the tool and the chip which were 112.63°C and 275.1°C. The optimal conditions for the good quality of the part are moderate temperatures for high cutting speeds and small depths of cut. The chosen infrared camera used in the experiments has many advantages such as the ability to take measurements without contact with a very little disturbance between the surface of the studied object and its surrounding environment, its measurement capacity in real time, a wide range of operating temperatures, and the ability to adapt to all types of materials. The obtained results during our tests allowed concluding on one hand that the temperature variations are very weak in permanent regimes for invariant cutting parameters and on the other that the heat flux generated during machining is largely evacuated by the chip. The major difficulty in taking the machining sequence by the camera is the winding of the chip, hence the need to choose good cutting

conditions and to have good protection and fixation of the camera.

In the future, our work will be extended to other materials. We will also try to define a correlation between the cutting temperature and the wear of the tool during machining. We are encouraged by the results of this work to extend to higher speeds (UGV) and to use a more efficient infrared camera for larger measurement range.

REFERENCES

- [1] R. F. Brito, S. R. Carvalho, and S. M. M. Lima E Silva, "Experimental investigation of thermal aspects in a cutting tool using comsol and inverse problem," *Applied Thermal Engineering*, vol. 86, pp. 60–68, Jul. 2015, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.083>.
- [2] O. Pantalé, R. Rakotomalala, and M. Touratier, "An ALE three-dimensional model of orthogonal, oblique metal cutting processes," *International Journal of Forming Processes*, vol. vol.1, pp. 371–388, Sep. 1998.
- [3] P. K. Wright and E. M. Trent, "Metallographic methods of determining temperatures gradients in cutting tools," 1973.
- [4] W. Bouzid, "Etude expérimentale et numérique de la coupe orthogonale," Ph.D. dissertation, Arts et Métiers ParisTech, Paris, France, 1993.
- [5] D. A. Stephenson, "Tool-Work Thermocouple Temperature Measurements—Theory and Implementation Issues," *Journal of Engineering for Industry*, vol. 115, no. 4, pp. 432–437, Nov. 1993, <https://doi.org/10.1115/1.2901786>.
- [6] I. Bonnet and J. Gabelli, "Probing Planck's law at home," *European Journal of Physics*, vol. 31, no. 6, pp. 1463–1471, 2010, <https://doi.org/10.1088/0143-0807/31/6/012>.
- [7] N. M. Ravindra, S. Rajyalaxmi Marthi, and A. Bañobre, "Introduction to radiative properties," in *Radiative Properties of Semiconductors*, Morgan & Claypool Publishers, 2017, <http://doi.org/10.1088/978-1-6817-4112-3ch1>.
- [8] FLIR, "FLIR SC325 Datasheet." FLIR, 2010.
- [9] D. Kara Ali, N. Benhadji Serradj, and M. E. A. Ghernaout, "Qualification and Validation of an in-situ Measurement Method of the Machining Temperature," in *Mechanism, Machine, Robotics and Mechatronics Sciences*, vol. 58, R. Rizk and M. Awad, Eds. Cham, Switzerland: Springer, 2019, pp. 15–27, https://doi.org/10.1007/978-3-319-89911-4_2.
- [10] J.-L. Battaglia, A. Kusiak, and C. Pradere, *Introduction aux transferts thermiques: cours et exercices corrigés*. Paris, France: Dunod, 2020.
- [11] M. H. El-Axir, M. M. Elkhabeery, and M. M. Okasha, "Modeling and Parameter Optimization for Surface Roughness and Residual Stress in Dry Turning Process," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 7, no. 5, pp. 2047–2055, Oct. 2017, <https://doi.org/10.48084/etasr.1560>.
- [12] N. M. M. Reddy and P. K. Chaganti, "Investigating Optimum SiO₂ Nanolubrication During Turning of AISI 420 SS," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 9, no. 1, pp. 3822–3825, Feb. 2019, <https://doi.org/10.48084/etasr.2537>.
- [13] M. PradeepKumar, K. Amarnath, and M. SunilKumar, "A Review on Heat Generation in Metal Cutting," *International Journal of Engineering and Management Research*, vol. 5, no. 4, pp. 193–197, Aug. 2015.
- [14] G. Sidebotham, "Heat Transfer Modes: Conduction, Convection, and Radiation," in *Heat Transfer Modeling: An Inductive Approach*, G. Sidebotham, Ed. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2015, pp. 61–93, https://doi.org/10.1007/978-3-319-14514-3_3.
- [15] D. Pajani and L. Audaire, "Thermographie - Technologies et applications : Thermographie et utilisation des caméras thermiques," *Techniques de l'Ingénieur*, Mar. 2013, Accessed: Oct. 06, 2021. [Online]. Available: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/genie-industriel-th6/mise-en-uvre-de-la-maintenance-42136210/thermographie-r2741/thermographie-et-utilisation-des-cameras-thermiques-r2741v2niv10002.html>.
- [16] O. Riou, P.-O. Logerais, and J.-F. Durastanti, "Quantitative study of the temperature dependence of normal LWIR apparent emissivity," *Infrared Physics & Technology*, vol. 60, pp. 244–250, Sep. 2013, <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2013.05.012>.
- [17] J. Goupy and L. Creighton, *Introduction aux plans d'expériences*, 3rd ed. Paris, France: Dunod, 2006.
- [18] S. Atlati, "Développement d'une nouvelle approche hybride pour la modélisation des échanges thermiques à l'interface outil-copeau : application à l'usinage de l'alliage d'aluminium aéronautique AA2024-T351," Ph.D. dissertation, Université de Lorraine, Lorraine, France, 2012.



Scope Database
Journal Indexing & Citation Analysis

Scope Database

(Journal Indexing and Citation Analysis)

(www.scopedatabase.com)



ceo@scopedatabase.com
info@scopedatabase.com
contact@scopedatabase.com

Date: 15-Dec-2021

Certificate of Article Indexed

Manuscript ID :00001-13070 Source ID : 00000342

Authors Name: Nasreddine Benhadji Serradj, Abdelillah Djamal Kara Ali, Mohamed El Amine Ghermaout

Title of the Paper: A Contribution to the Thermal Field Evaluation at the Tool-Part Interface for the Optimization of Machining Conditions

Title of the Journal: Engineering, Technology & Applied Science Research(ETASR)

Volume, Issue, Year, Page No.: 11,6, 2021, 7750-7756 DOI: <https://doi.org/10.48084/etasr.4235>

Scope Database Article Link: <https://scopedatabase.com/documents/00000342/00001-13070.pdf>

Publisher Article Link: <https://etasr.com/index.php/ETASR/article/view/4235/2605>

This is to certify that the above-mentioned Article has been indexed in Scope Database based on the recommendation of the Content Selection Committee (CSC) after reviewing the content submitted by the publisher.

Prof. Dr. Anbu Ranjith Kumar, B.E, MBA, Ph. D.
(Chief Executive Officer)

Dr. V. Antony Joe Raja B.E, MBA, Ph. D.
(Director - Indexing)

Door No: 188, Kapaleeswarar Nagar, 1st Main Road, Neelankarai, Chennai-600115.

Tamilnadu, India. Email: info@scopedatabase.com



[Titre du document]

Mechanisms and Machine Science 58

Rany Rizk · Mariette Awad *Editors*

Mechanism, Machine, Robotics and Mechatronics Science

 Springer

Qualification and Validation of an in-situ Measurement Method of the Machining Temperature



D. Kara Ali, N. Benhadji Serradj and M. E. A. Ghernaout

Abstract Metal cutting plays an important role in the industry, and as such, the mastery of machining processes has become an issue in the industrial sector. The understanding of the physical phenomena present during manufacture is an important factor in the optimization of a process of production by removal of material. The tool-part interface during a machining process is a place of complex interactions between mechanical, thermal and physicochemical phenomena. The temperature variable which changes according to the cutting parameters directly affects the quality of production. In our contribution, we propose an experimental measurement methodology, which makes it possible to obtain coherent temperature data at the tool-piece interface. This work will focus on two main activities:

- The installation of an instrumentation capable of following the thermal behavior during production. This experimental device is equipped with an infrared camera and an acquisition chain.
- The development of a new device that goes through a qualification stage in which a series of tests will establish the capability of the assembly.

Keywords Machining · Temperature · Infrared radiation

D. Kara Ali
Laboratoire IS2 M, Faculté Technologie, Université of Tlemcen, Tlemcen, Algérie

N. Benhadji Serradj
Laboratoire ETAP, Ecole Supérieure Sciences Appliquées, Tlemcen, Algérie

M. E. A. Ghernaout (✉)
Laboratoire ETAP, Faculté Technologie, Université of Tlemcen, Tlemcen, Algérie e-mail:
mea_ghernaout@mail.univ-tlemcen.dz

© Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2019 15
R. Rizk and M. Awad (eds.), *Mechanism, Machine, Robotics and Mechatronics Sciences*, Mechanisms and
Machine Science 58,
https://doi.org/10.1007/978-3-319-89911-4_2

Certificate of Attendance

POSTER PRESENTATION

Name & Surname BENHADJI SERRADJ NASREDDINE

Paper Title MEASUREMENT OF CUTTING TEMPERATURE DURING MACHINING

ICAME 2019

5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING
DECEMBER 17-19, 2019
ISTANBUL



Assoc. Prof. Dr. Orhan ÇAKIR
ICAME 2019 Conference Co-Chairman

Assoc. Prof. Dr. Orhan Ç
YILDIZ TECHNICAL UNIV.
Faculty of Mechanical Engin.
Vice Dean

Certificate of Attendance

POSTER PRESENTATION

Name & Surname

BENHADJI SERRADJ NASREDDINE

Paper Title

EXPERIMENTAL TECHNIQUE FOR THE IN-SITU MEASUREMENT OF TEMPERATURE FIELDS FOR THE
ORTHOGONAL CUTTING

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY, İSTANBUL-TURKEY
ICAME 2018

4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING İSTANBUL 2018
DECEMBER 19-21, 2018



ICAME 2018 Conference Co-Chairman

—Assoc. Prof. Dr. Orhan ÇAKIR

Yıldız Technical University
Mechanical Engineering Faculty Vice Dean
Doç. Dr. Orhan ÇAKIR
Dekan Yardımcısı



Congrès International de Modélisation et Optimisation des Systèmes Mécaniques

05-06 Décembre 2017, FST de Fès, Maroc



CIMOSM
Fès-2017

ATTESTATION

Le président du comité d'organisation de la 1^{ère} édition du **Congrès International de Modélisation et Optimisation des Systèmes Mécaniques (CIMOSM'2017)**, organisé à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès les **05 et 06 décembre 2017**, atteste par la présente que :

N. BENHADJI SERRADJ, D. KARA ALI ET M.E.A. GHERNAOUT

Ont présenté la communication orale dont l'intitulé est :

Contrôle de la qualité par une méthode de mesure in-situ de la température d'usinage

Président du Comité d'Organisation
Pr. A. EL BARKANY



ملخص

تنتج الحرارة القصوى في واجهة جزء الأداة-قطعة أثناء التصنيع. في الواقع، تؤثر الزيادة المفرطة في درجة الحرارة هذه اعتمادًا على شروط القطع بشكل كبير على عمر الأداة وجودة القطعة المصنوعة، وبالتالي تؤثر بشكل مباشر على الإنتاج. في هذا العمل، ننفذ منهجية تجريبية لقياس درجة الحرارة توفر بيانات متسقة أثناء عملية خراطة طولية لي صلب متوسط الصلابة S 235 باستخدام أداة قطع من الكربيد SNMG. نتيج لنا هذه المساهمة التحكم بشكل أفضل في تفاعلات الظواهر التي تؤثر على القطع في واجهة جزء الأداة، وتوجيه خياراتنا في تطوير نموذج الارتباط لتحليل العلاقات بين المعلمات والتنبؤ بها. درجة حرارة القطع. يعتمد إجراء القياس المنفذ لتقدير درجة الحرارة على استخدام كاميرا FLIR بالأشعة تحت الحمراء مثبتة ومحمية بجهاز على الآلة خراطة. تم اختيار طريقة Taguchi لإيجاد العلاقات بين عوامل الإدخال (سرعة القطع (Vc)، و التغذية (a)، وعمق (p)) وعامل الإخراج (درجة الحرارة (T)).

الكلمات المفتاحية: التشغيل الآلي ، شروط القطع ، التصوير الحراري ، قياس درجة الحرارة ، Taguchi.

Abstract

Maximum heat occurs at the tool-part interface during machining. In fact, the excessive increase in this temperature depending on the cutting parameters considerably affects the life of the tool and the quality of the workpiece, therefore directly on production.

In this work, we implement an experimental temperature measurement methodology that provides consistent data during a soft steel S 235 turning operation using an SNMG carbide insert. This contribution allows us to better understand the interactions of phenomena influencing the cutting at the tool-part interface, and to guide our choices in the development of a correlation model for the analysis and prediction of relationships between machining parameters by measuring cutting temperature. The measurement procedure implemented for the temperature estimate is based on the use of a FLIR infrared camera mounted and protected by a device on the machine tool. The Taguchi method was chosen to find the relationships between the input factors (the cutting speed (Vc), the feed rate (a), the depth of cut (p)) and the output factor (the temperature (T)).

Keywords: machining, cutting conditions, thermography, temperature measurement, Taguchi.

Résumé

La chaleur maximale se produit à l'interface outil-pièce pendant l'usinage. En effet l'augmentation excessive de cette température en fonction des paramètres de coupe affecte considérablement la durée de vie de l'outil et la qualité de la pièce usinée, donc directement sur la production.

Dans ce travail, nous mettons en œuvre une méthodologie de mesure expérimentale de température qui permet d'obtenir des données cohérentes lors d'une opération de tournage de l'acier S 235 en utilisant une plaquette en carbure SNMG. Cette contribution nous permet de mieux maîtriser les interactions des phénomènes influant de la coupe à l'interface outil-pièce, et de guider nos choix à l'élaboration d'un modèle de corrélation pour l'analyse et la prédiction des relations entre les paramètres d'usinage par la mesure de la température de coupe. La procédure de mesure mise en œuvre pour l'estimation de la température est basée sur l'utilisation d'une caméra infrarouge FLIR montée et protégée par un dispositif sur la machine-outil. La méthode de Taguchi a été choisie pour trouver les relations entre les facteurs d'entrée (la vitesse de coupe (Vc), la vitesse d'avance (a), la profondeur de passe (p)) et le facteur de sortie (la température (T)).

Mots clés : usinage, conditions de coupe, thermographie, mesure de la température, Taguchi.