



FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Analyse de l'état de surface et des efforts de coupe lors de l'usinage de l'acier C30 avec des outils (GC4015 et P35)

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Fabrication Mécanique et productique

Par

BEN DEKHIL SARA

DIRECTEUR DE MEMOIRE : BOUZIANE ABDERAHIM **MCB** Université de Annaba

DEVANT LE JURY

| | | | |
|-----------------------|---------------------------|------------|-----------------------------|
| Président : | LAGRED Ahmed | Pr | Université de Annaba |
| Encadreur : | BOUZIANE Abderahim | MCA | Université de Annaba |
| Examinateurs : | BENCHIHEUB Slimane | MCB | Université de Annaba |

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier ALLAH le Tout-Puissant de m'avoir accordé la santé, le courage et la volonté nécessaires pour mener à bien la préparation de ce mémoire.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Avant tout, j'adresse mes remerciements les plus sincères à mon directeur de recherche, Monsieur Bouziane Abderrahim, pour son encadrement de grande qualité, ses conseils avisés et sa disponibilité constante tout au long de ce projet. Son soutien a été essentiel à l'aboutissement de ce travail.

Je tiens également à remercier chaleureusement mon co-encadrant, Monsieur Mokas Nacer, pour ses orientations précieuses, notamment en ce qui concerne le choix du lieu de stage pratique. Mes remerciements vont également à Monsieur Lagred Ahmed pour ses encouragements infaillibles tout au long de mon parcours en master.

Je remercie par ailleurs les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire.

Enfin, je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à ma famille, pour son amour inconditionnel et son soutien indéfectible. Leur confiance en moi a été une source constante de motivation et de force tout au long de cette aventure académique.

Dédicaces

Avec tout mon amour et ma reconnaissance que :

Je dédie ce travail spécialement à mes parents qui sont les plus chers au monde.

Je rends également hommage à la mémoire de mon grand-père, **A. MOHAND**, en cette neuvième année de son départ. Que Dieu l'accueille dans Son éternel paradis et qu'il repose en paix.

À mes très chers frères, **ABD EL REZAK** et **LYES**, ainsi qu'à ma sœur bien-aimée, **MARIA**.

Sarah

الملخص

في هذه الدراسة، نقدم النتائج التجريبية لدراسة ديناميكية لعملية قطع المعادن، والتي تتعلق بقياس معايير الخشونة ومكونات جهود القطع أثناء تشغيل فولاذ C30 باستخدام أدوات مغلفة (GC4015) وأخرى غير مغلفة (P35).

تم تسلیط الضوء على دراسة تأثير سرعة القطع على قوى القطع وخشونة الأسطح المشغله، وذلك وفقاً لطريقة تخطيط التجارب أحديه العامل .

تشير تحليلات النتائج إلى أن تأثير سرعة القطع على قوى القطع يؤدي إلى انخفاض في مكونات جهود القطع (F_x , F_y و F_z)

بنسبة 26.61% ، 31.62% ، 73.16% لأداة P35 ، 4.84% ، 4.16% و 17.94% لأداة GC4015. كما تُظهر النتائج أن القوة المماسية (F_z) لها الغلبة مقارنة بالمكونين الآخرين F_x و F_y . وُتُّظہر القيم أن جهود القطع أثناء التشغيل باستخدام الأدوات المغلفة أقل من تلك المسجلة عند استخدام الأدوات غير المغلفة. وُتُّظہر النتائج أيضًا أن خشونة سطح فولاذ C30 تتخفض بشكل طفيف مع زيادة سرعة القطع، وتتحسن جودة السطح المشغل بشكل ملحوظ، خاصة عند السرعة $V_c = 250$ م/ دقيقة. ويعزى هذا التحسن إلى انخفاض جهود القطع عند السرعات العالية، مما يعكس جودة التماس في منطقة التداخل بين 'قطعة-أداة'، ونظام تشغيل أكثر استقراراً.

الكلمات المفتاحية: التشغيل، جهود القطع ، الخشونة، تماس 'قطعة-أداة'، الخراطة، كربيد معدني.

Abstract

In this study, we present the experimental results of a dynamic analysis of metal cutting, focusing on the measurement of roughness criteria (R_a , R_z , R_t) and the components of cutting force (F_x , F_y , and F_z) during the machining of C30 steel with coated (GC4015) and uncoated (P35) tools. The influence of cutting speed on cutting forces and surface roughness was highlighted. This study was conducted following the unifactorial experimental design method.

The analysis of the results shows that the effect of cutting speed on cutting forces leads to a reduction in the components (F_x , F_y , and F_z) by 26.61%, 31.62%, and 73.16% for P35, and 4.84%, 4.16%, and 17.94% for GC4015. The results also show that the tangential force (F_z) is predominant compared to the other two components (F_y and F_x). The cutting forces during machining with coated inserts are lower than those with uncoated inserts. Additionally, the roughness of C30 steel decreases slightly with the increase in cutting speed, and the surface quality improves notably, especially at a cutting speed of $V_c = 250$ m/min. This improvement can be attributed to the reduction in cutting forces at higher speeds, indicating good contact in the tool-workpiece interface area and a stable machining system.

Keywords: machining, cutting force, roughness, tool-workpiece contact, turning, carbide.

Résumé

Dans cette étude nous présentons les résultats expérimentaux d'une étude dynamique de la coupe des métaux concernant la mesure des critères de la rugosité (R_a , R_z , R_t) et les composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z) lors de l'usinage de l'acier C30 avec des outils revêtus (GC4015) et non revêtus (P35). L'étude de l'influence de la vitesse de coupe sur les efforts de coupe et la rugosité des surfaces usinées a été mise en évidence. Ceci conformément à la méthode unifactorielle de planification des expériences. .

L'analyse des résultats montrent que l'effet de la vitesse de coupe sur les efforts de coupe, conduit à une diminution des composantes (F_x , F_y et F_z) de 26.61%, 31.62% et 73.16% pour la P35 et 4.84%, 4.16% et 17.94% pour la GC4015. Les résultats montrent aussi que l'effort tangentiel (F_z) est prépondérant par rapport aux deux autres composantes (F_y et F_x). Les valeurs des efforts de coupe lors de l'usinage avec les plaquettes revêtues sont plus faibles que celles des pastilles non revêtues, les résultats montrent aussi que la rugosité de l'acier C30 diminue légèrement avec l'augmentation de la vitesse de coupe, la qualité de la surface usinée améliore d'une façon notable surtout pour la vitesse $V_c=250\text{m/min}$, cette amélioration s'explique à cause de la diminution des efforts de coupe aux grandes vitesses traduisant un bon contact dans la zone de l'interface outil-pièce et un système usinant stable.

Mots Clés : usinage, effort de coupe, rugosité, contact outil-pièce, tournage, carbure métallique.

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Schéma structural du processus de coupe.

Figure I.2: Profils de la température à l'interface "Outil-Copeau" pendant l'usinage d'un acier trempé, (a) Effet de la vitesse de coupe. (b) Effet de l'avance.

Figure I.3: Schéma d'un « outil coupé » permettant la mesure des distributions des contraintes à l'interface "Outil-Copeau".

Figure I.4 : principales étapes de réalisation du CBN par frittage.

figure I.5 : Défauts de surface.

Figure I.6: Les différents ordres d'échelle des défauts de l'état de surface (étude d'un profil 2D suivant une coupe perpendiculaire à la surface).

Figure I.7: profil de rugosité d'une surface au sol typique d'aluminium. La surface haute (a) et basse (b) montre les fréquences des perturbations.

Figure I.8: critères de rugosité.

Figure I.9: Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité.

Figure I.10: Exemple d'évolution de la rugosité totale en fonction de l'avance en chariotage (adapté de (Cordebois, 2008)).

Figure I.11: influence de l'usure de l'outil sur la rugosité.

Figure I.12: Variation de la température d'usinage en fraisage haute vitesse. (Schulz, 1999).

Figure I.13 : Topographie de surface obtenue en tournage et son profil théorique associé (adapté de (Grzesik et Zak, 2012)).

Figure I.14 :Exemple d'évolution de la rugosité totale en fonction du rayon du bec en chariotage (adapté de (Cordebois, 2008)).

Figure I.15 : Composantes de l'effort de coupe.

Figure II.1: Tour parallèle modèle SN40.

Figure II.2 : plaquettes de coupe utilisées.

Figure II.3: Carbure GC4015 à triple revêtement.

Figure II.4 : Porte-Outil utilisé.

Figure II.4: Mesure de topographie in situ avec le rugosimètre portable Mitutoyo.

Figure II.5 : Chaîne d'acquisition des efforts de coupe avec la table **Kistler**.

a) Dynamomètre Kistler, b) amplificateur Kistler et acquisition numérique, c) Montage du dynamomètre Kisler.

Figure II.6 : Eprouvette pour les essais de la rugosité et les efforts de coupe.

Figure II.7: schéma structural du processus de coupe.

Figure III.1: Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité obtenue par la P35

à $f=0,08 \text{ mm/tr}$ et $ap=0,25 \text{ mm}$.

Figure III.2: Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité obtenue par Le GC4015

à $f=0,08 \text{ mm/tr}$ et $ap=0,25 \text{ mm}$.

Figure III.3: Influence de la vitesse de coupe sur les critères de rugosité obtenus

avec la P35 et le GC4015 à $f=0,08 \text{ mm/tr}$ et $ap=0,25 \text{ mm}$.

Figure III.4: Evolution des composantes de l'effort de coupe en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier C30 avec l'outil P35.

Figure III.5: Evolution des composantes de l'effort de coupe en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier C30 avec l'outil GC4015.

Figure IV.1: Efforts moyens mesurés lors de l'usinage avec les matériaux à outils testés aux deux niveaux min et max de la vitesse de coupe.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1: Composition chimique de l'acier C30.

Tableau II.2: Descriptifs des plaquettes utilisées

Tableau II.3 : Caractéristiques géométriques du porte plaquette.

Tableau II.4 : caractéristiques du dynamomètre

Tableau II.5: conditions de coupe.

Tableau III.1: Rugosité de surface de l'acier C30 en fonction de la vitesse de coupe

Tableau III.2: Résultats de la rugosité de surface de l'acier C30 en fonction des différentes combinaisons du plan d'expérience.

Tableau III.3: Résultats de l'évolution des efforts de coupe lors de l'usinage de l'acier C30 en fonction de la vitesse de coupe

Tableau III.4: Résultats des efforts de coupe lors de l'usinage de l'acier C30 en fonction des différentes combinaisons du plan d'expérience.

Tableau IV.1: Modèles de la rugosité en fonction des éléments du régime de coupe.

Tableau IV.2: Effet de la vitesse sur les efforts de coupe de l'outil P35 à des avances et des profondeurs de passe constantes

Tableau IV.3: Effet de la vitesse sur les efforts de coupe de l'outil GC4015 à des avances et des profondeurs de passe constantes.

Tableau IV.4: Effet de l'avance sur les efforts de coupe de l'outil P35 à des vitesses et des profondeurs de passe constantes.

Tableau IV.5: Effet de l'avance sur les efforts de coupe de l'outil GC4015 à des vitesses et des profondeurs de passe constantes.

Tableau IV.6: Effet de la profondeur de passe sur les efforts de coupe de l'outil P35 à des avances et des vitesses de coupe constantes.

Tableau IV.7: Effet de la profondeur de passe sur les efforts de coupe de l'outil GC4015 à des avances et des vitesses de coupe constantes.

Tableau IV.8 : Modèles des composantes de l'effort de coupe en fonction des éléments du régime de coupe.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1: Composition chimique de l'acier C30.

Tableau II.2: Descriptifs des plaquettes utilisées

Tableau II.3 : Caractéristiques géométriques du porte plaquette.

Tableau II.4 : caractéristiques du dynamomètre

Tableau II.5: conditions de coupe.

Tableau III.1: Rugosité de surface de l'acier C30 en fonction de la vitesse de coupe

Tableau III.2: Résultats de la rugosité de surface de l'acier C30 en fonction des différentes combinaisons du plan d'expérience.

Tableau III.3: Résultats de l'évolution des efforts de coupe lors de l'usinage de l'acier C30 en fonction de la vitesse de coupe

Tableau III.4: Résultats des efforts de coupe lors de l'usinage de l'acier C30 en fonction des différentes combinaisons du plan d'expérience.

Tableau IV.1: Modèles de la rugosité en fonction des éléments du régime de coupe.

Tableau IV.2: Effet de la vitesse sur les efforts de coupe de l'outil P35 à des avances et des profondeurs de passe constantes

Tableau IV.3: Effet de la vitesse sur les efforts de coupe de l'outil GC4015 à des avances et des profondeurs de passe constantes.

Tableau IV.4: Effet de l'avance sur les efforts de coupe de l'outil P35 à des vitesses et des profondeurs de passe constantes.

Tableau IV.5: Effet de l'avance sur les efforts de coupe de l'outil GC4015 à des vitesses et des profondeurs de passe constantes.

Tableau IV.6: Effet de la profondeur de passe sur les efforts de coupe de l'outil P35 à des avances et des vitesses de coupe constantes.

Tableau IV.7: Effet de la profondeur de passe sur les efforts de coupe de l'outil GC4015 à des avances et des vitesses de coupe constantes.

Tableau IV.8 : Modèles des composantes de l'effort de coupe en fonction des éléments du régime de coupe.

NOMENCLATURE

| | |
|------------|---|
| a_p | profondeur de passe [mm] |
| COM | Couple outil matière |
| d_0, d_1 | constantes des modèles |
| f | Avance [mm/tr] |
| F_x | Effort axial [N] |
| F_y | Effort radial [N] |
| F_z | Effort tangentiel [N] |
| HB | Dureté brinell |
| HRC | Dureté Rockwell |
| KT | Usure en cratère [mm] |
| r | Rayon de bec de l'outil [mm] |
| R^2 | Coefficient de détermination |
| Ra | Rugosité moyenne arithmétique [μm] |
| Rt | Rugosité totale [μm] |
| Rz | Profondeur moyenne de la rugosité [μm] |
| T | Tenue de l'outil [mn] |
| V | Volume du copeau [cm^3] |
| [VB] | Usure en dépouille admissible [mm] |
| VB | Usure en dépouille [mm] |
| V_c | Vitesse de coupe [m/min] |
| α | Angle de dépouille [degré] |
| γ | Angle d'attaque [degré] |
| λ | Angle d'inclinaison d'arête [degré] |
| χ_r | Angle de direction principale [degré] |

Sommaire

| | |
|----------------------------|----|
| Remerciements..... | 01 |
| Dédicaces..... | 02 |
| Résumé..... | 03 |
| Abstract..... | 04 |
| ملخص..... | 05 |
| Sommaire..... | 06 |
| Liste des figures..... | 09 |
| Liste des tableaux..... | 11 |
| Introduction générale..... | 12 |

Chapitre I: Etude bibliographique

| | |
|---|----|
| I.1 Concept du couple outil matière..... | 15 |
| I.1.1 Contact à l'interface "Outil-Pièce"..... | 16 |
| I.1.2 Température à l'interface "Outil-Copeau"..... | 16 |
| I.1.3 Distributions des contraintes à l'interface "Outil-Pièce"..... | 16 |
| I.1.4 Coefficient de frottement..... | 17 |
| I.2 Evolution des matériaux des outils de coupe..... | 18 |
| I.2.1 Aciers au carbone ordinaire..... | 18 |
| I.2.2 Aciers rapides..... | 18 |
| I.2.3 Carbures métalliques..... | 19 |
| I.2.4 Carbures revêtus..... | 20 |
| I.2.5 Céramiques de coupe..... | 21 |
| I.2.6 Cermets..... | 21 |
| I.2.7 Nitrule de bore cubique (CBN) | 21 |
| I.2.8 Revêtements..... | 22 |
| I.3 Rugosité des surfaces usinées..... | 23 |
| I.3.1 Introduction..... | 23 |
| I.3.2 Définition des critères de rugosité (norme NF E 05-015) | 25 |
| I.3.3 Principaux paramètres influant sur la rugosité..... | 27 |
| I.3.3.1 Les éléments du régime de coupe..... | 27 |
| I.3.3.2 Usure de l'outil..... | 29 |
| I.3.3.3 Lubrification..... | 30 |
| I.3.3.4 Influence de la machine..... | 30 |
| I.3.3.5 Rayon de bec de l'outil..... | 30 |
| I.3.4 Évaluation de la rugosité de surface..... | 32 |
| I.4 Les efforts de coupe..... | 34 |
| I.4.1 Introduction | 34 |
| I.4.2 Influence des différents facteurs sur les efforts de coupe..... | 35 |
| I.4.2.1 Les éléments du régime de coupe..... | 35 |
| I.4.2.2 Matière à usiner..... | 35 |

| | |
|---|----|
| I.4.2.3 Liquide de lubrification et de refroidissement..... | 36 |
| I.4.3 Mesure des efforts de coupe..... | 36 |

Chapitre II: Equipements utilisés et procédure expérimentale

| | |
|---|----|
| II.1 Introduction..... | 38 |
| II.2 Equipements utilisés..... | 38 |
| II.2.1 Machine-outil..... | 38 |
| II.2.2 Matière à usiner..... | 38 |
| II.2.3 Plaquettes et porte-outil..... | 38 |
| II.2.3.1 Description des plaquettes | 38 |
| II.2.4 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité..... | 40 |
| II.2.5 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe..... | 40 |
| II.2.6 Modes de fixation des ébauches..... | 41 |
| II.3 Procédure expérimentale..... | 41 |
| II.3.1 Planification des expériences..... | 41 |
| II.3.2 Méthodes expérimentales..... | 42 |
| II.3.2.1 Méthode uni-factorielle..... | 42 |
| II.3.2.2 Méthode multifactorielle | 42 |
| II.4 Mode opératoire de réalisation et Conditions de coupe..... | 43 |
| II.4.1 Mode opératoire de réalisation..... | 43 |
| II.4.1.1 Effort de coupe et rugosité | 43 |
| II.4.2 Conditions de coupe..... | 43 |

Chapitre III: Résultats expérimentaux

| | |
|---|----|
| III.1 Introduction..... | 45 |
| III.2 Résultats des essais de la rugosité des surfaces usinées..... | 45 |
| III.2.2 Influence des conditions de coupe sur la rugosité des surfaces usinées..... | 45 |
| III.2.2.1 Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité (méthode uni-factorielle)..... | 45 |
| III.2.2.2 Influence des conditions de coupe sur la rugosité (méthode multifactorielle) | 46 |
| III.3 Résultats des essais des efforts de coupe..... | 47 |
| III.3.1 Influence de la vitesse de coupe sur les efforts de coupe (méthode uni-factorielle) | 47 |
| III.3.2 Influence des conditions de coupe sur les efforts de coupe (méthode multifactorielle) | |

Chapitre IV: Analyse et interprétation des résultats

| | |
|--|----|
| IV.1 introduction..... | 50 |
| IV.2 Analyses des résultats de la rugosité | 50 |
| IV.2.1 Analyse de l'influence des conditions de coupe sur la rugosité des surfaces usinées | 50 |
| IV.2.1.1 Analyse de l'influence de la vitesse de coupe sur la rugosité | 50 |
| IV.2.1.2 Analyse de l'influence de conditions de coupe sur la rugosité..... | 50 |
| IV.3 Analyses des résultats des efforts de coupe lors de l'usinage de l'acier C30..... | 52 |
| IV.3.1 Evolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe | 52 |
| IV.3.2 Influence des éléments du régime de coupe..... | 53 |
| IV.3.2.1 Effet de la vitesse de coupe sur les efforts de coupe..... | 54 |
| IV.3.2.2 Effet de l'avance sur les efforts de coupe..... | 55 |

| | |
|--|-----------|
| IV.3.2.3 Effet de la profondeur de passe sur les efforts de coupe..... | 56 |
| IV.3.3 Modèles de l'effort de coupe en fonction des éléments du régime de coupe..... | 57 |
| Conclusion générale..... | 59 |
| Annexe I..... | 62 |
| Références bibliographiques..... | 67 |

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

L'usinage des métaux par outil coupant est un processus de mise en forme par enlèvement de matière. C'est le processus le plus répandu dans le domaine de la fabrication mécanique. L'usinage a considérablement évolué au cours des dernières années, avec notamment le développement des procédés et des outils de coupe. Les conséquences en sont multiples ; sur le contact "Outil-Pièce", la fiabilité des outils, le choix optimal d'un procédé de coupe, l'outil coupant et les effets très variés sur l'intégrité des surfaces.

L'objectif de ce travail est l'étude de l'effet de la vitesse de coupe (V_c) sur les efforts de coupe et la rugosité de surface lors de l'usinage de l'acier C30 avec des outils (carbure revêtu à triple revêtement et carbure non revêtu). Des essais ont été réalisés en se basant sur la méthode unifactorielle (planification des expériences), cette mémoire s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre, traite l'étude bibliographique concernant les principaux mécanismes associés à la coupe des métaux. Nous verrons notamment les sollicitations thermiques et mécaniques qui existent à l'interface "Outil-Pièce".

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les équipements utilisés, la planification des expériences et les conditions de coupe.

Le troisième chapitre est consacré aux résultats obtenus lors des essais de rugosité et des efforts de coupe.

Le quatrième chapitre est réservé à l'analyse des résultats expérimentaux obtenus dans le chapitre précédent. Il concerne l'étude de l'effet de la vitesse de coupe sur la rugosité, les efforts de coupe et la morphologie du copeau.

En dernier lieu, une conclusion générale de cette mémoire est donnée, en mettant en exergue les principaux résultats trouvés dans cette étude.

CHAPITRE I

Etude bibliographique

I.1 Concept du Couple "Outil-Matière"

Dans le monde industriel actuel et au sein des laboratoires de recherche, afin d'atteindre des objectifs de rationalisation du nombre d'essais, de diminution des temps de mise en œuvre des expériences et donc des coûts, une des méthodologies utilisées est celle du Couple "Outil-Matière" usuellement appelée COM. Le COM fait aujourd'hui l'objet d'une norme Afnor E66520-1 à E66520-8. Les premières de ces normes datent de juin 1994. Dans sa présentation générale, la norme précise que le concept couple outil-matière définit un domaine de fonctionnement d'un outil coupant pour une application définie à travers trois types de paramètres [6] :

- les paramètres limites définissent le minimum et le maximum de tous les paramètres d'utilisation de l'outil en les considérant indépendamment les uns des autres;
- les paramètres de liaison (les paramètres de sortie) décrivent les interactions des paramètres limites, sachant qu'on ne peut utiliser tous les paramètres limites à leur maximum en même temps;
- les paramètres auxiliaires permettent, par voie de calcul, de définir les conditions de coupe en fonction des moyens de production

Ce concept suppose une définition précise de l'outil, de la matière et parfois de l'opération. Définir signifie ici désigner sans ambiguïté : il s'agit de l'outil Ź dont la géométrie, les dimensions, la nuance, le revêtement, la préparation d'arête... sont précisées [7].

Dans notre étude nous avons traité les paramètres de sortie indiqués sur le schéma suivant:

Paramètres d'entrée X_i

- ♦ Les éléments de régime de coupe (V_c , f , a_p)
- ♦ Matériau de l'outil (GC4015, P35)
- ♦ la géométrie de la partie active de l'outil
- ♦ Matière à usiner (acier C30)
- ♦ Sans lubrification



Paramètres de sortie Y_i

- ♦ **Paramètre influant sur la pièce :**
La rugosité.
- ♦ **Paramètre influant sur le couple "Outil-Pièce" :**
Les efforts de coupe.

Figure I.1: Schéma structural du processus de coupe

I.1.1 Contact à l'interface "Outil-Pièce"

L'interface "Outil-Pièce" dénote un système tribologique unique caractérisé par le frottement aux interfaces "Outil-Pièce" (face de dépouille) et "Copeau-Outil" (face d'attaque) d'un outil dans des conditions de très grande pression de contact et de température élevée [8].

I.1.2 Température à l'interface "Outil-Copeau"

La température générée à la face de coupe constitue le paramètre thermo-mécanique prépondérant dans les mécanismes d'usure de l'outil, en particulier par abrasion, adhésion et diffusion. Elle conditionne le régime de frottement à l'interface outil-copeau et altère significativement les propriétés physiques et mécaniques des matériaux constitutifs de l'outil. La principale complexité réside dans la très faible étendue de la zone de contact, où s'observent des gradients thermiques extrêmement élevés. Le profil de température dans cette zone est fortement dépendant des conditions de coupe (vitesse, avance, profondeur) ainsi que de la nature des matériaux usinés. Toutefois, les diverses méthodes expérimentales et numériques de mesure et de simulation convergent pour indiquer que le pic de température ne se situe pas à la pointe de l'outil, mais à une certaine distance de celle-ci.

M'Saoubi et Chandrasekaran. [M'Sa-2005] ont proposé de mesurer la distribution de la température pendant des opérations de coupe orthogonales à l'aide d'une caméra infrarouge. Des exemples de profils de la température à l'interface "Outil-Pièce" sont présentés sur la Figure I.2. Ils montrent logiquement que la température augmente avec la vitesse de coupe et l'avance et que ces paramètres ont un effet opposé sur la position de la température maximale. Cette dernière se rapproche de la pointe de l'outil quand la vitesse de coupe augmente (Figure I.2 (a)) et s'éloigne quand l'avance augmente (Figure I.2 (b)) [8].

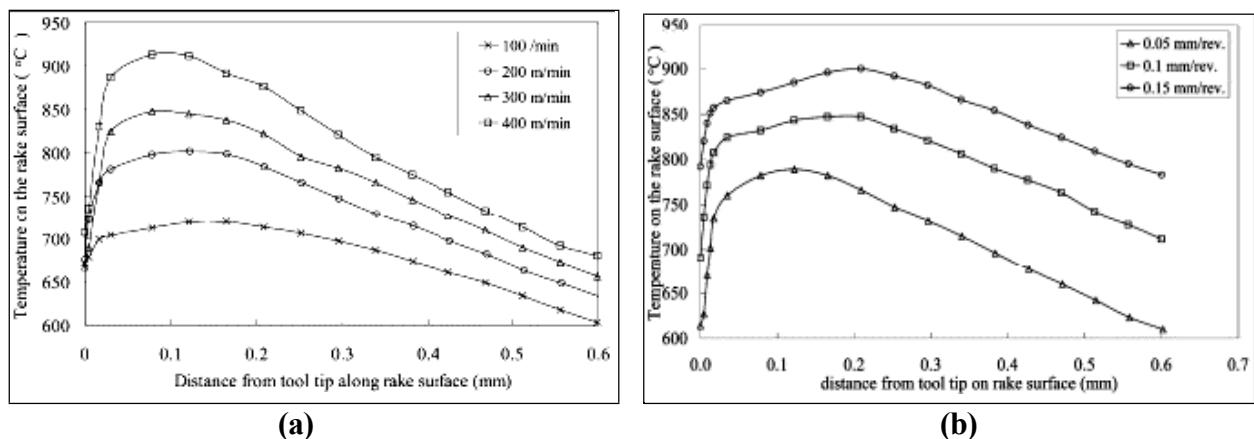


Figure I.2: Profils de la température à l'interface "Outil-Copeau" pendant l'usinage d'un acier trempé, (a) Effet de la vitesse de coupe. (b) Effet de l'avance.

I.1.3 Distributions des contraintes à l'interface "Outil-Pièce"

Les principales techniques expérimentales utilisées pour mesurer les contraintes à l'interface entre l'outil et la pièce sont la photoélasticité et l'emploi d'« outils coupés » (ou « split tool »). La première technique permet d'obtenir la répartition des contraintes en analysant les figures d'isochromes et d'isoclines générées dans un outil fabriqué en matériau photoélastique. Quant à

la seconde méthode, elle repose sur l'utilisation d'un outil constitué de deux segments séparés (Figure I.3).

On calcule les contraintes normales et tangentielles à partir des efforts normaux et tangentiels mesurés séparément sur les deux parties et en faisant varier la longueur L_1 de la partie frontale de l'outil [8].

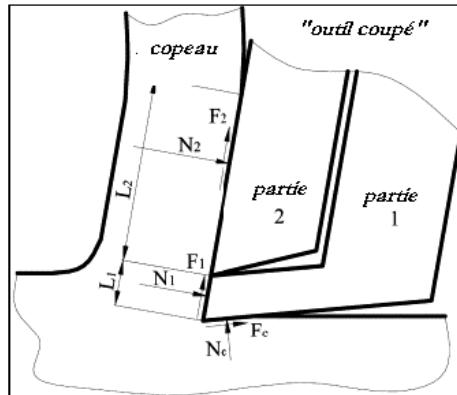


Figure I.3: Schéma d'un « outil coupé » permettant la mesure des distributions des contraintes à l'interface "Outil-Copeau".

I.1.4 Coefficient de frottement

Les conditions de contact et de frottement sont généralement modélisées à l'aide d'un coefficient de frottement. En usinage, le contact fut d'abord remarqué à travers le coefficient de frottement apparent (ou moyen) μ défini par le rapport entre la force tangentielle F_T et la force normale F_N (équation (I.1)). L'expérience montre que μ dépend à la fois de la vitesse de coupe, de l'avance et de la géométrie de l'outil. Pour s'affranchir de toutes ces dépendances, Moufki propose de représenter le coefficient de frottement apparent comme une fonction de la température moyenne à l'interface "Outil-Copeau" T_{int} (équation (I.2)):

$$\mu \uparrow \tan \Leftrightarrow \frac{F_T}{F_f} \uparrow \tan \Leftrightarrow \frac{\overline{F_c}}{\overline{F_N}} \uparrow \frac{\overline{F_c}}{\overline{F_f}} \tan \Leftrightarrow \quad (I.1)$$

$$\begin{matrix} \uparrow \downarrow & \uparrow \downarrow \\ 0 & 1 \end{matrix} \Leftrightarrow \frac{T_f - T_0}{T_f - T_0} \quad (I.2)$$

Où T_f est la température de fusion, T_0 et μ_0 sont des valeurs de référence. Le modèle représente bien la chute du coefficient de frottement avec la vitesse de coupe (qui fait augmenter la température), ce qui permet aux auteurs de retrouver à travers leur modèle de coupe la forte baisse des efforts dans le domaine des grandes vitesses de coupe. Le coefficient de frottement apparent est une notion très globale puisqu'il est défini à partir des efforts qui résultent non seulement des interactions à l'interface "Outil-Pièce" mais également des actions sur l'arrondi d'outil et des phénomènes de frottement entre la face de dépouille et la surface de la

pièce [8].

I.2 Evolution des matériaux des outils de coupe

I.2.1 Aciers au carbone ordinaire

Avant 1870, tous les outils de tournage étaient fabriqués à partir d'aciers au carbone simples, avec une composition typique de 1 % de carbone et 0,2 % de manganèse – le reste étant constitué de fer. Cette composition d'acier signifiait qu'il avait une faible résistance à chaud (c'est-à-dire sa capacité à conserver un tranchant à des températures élevées). Ainsi, le tranchant s'émuossait à des températures approchant les 250 °C, ce qui limitait effectivement la vitesse de coupe à environ 5 m·min⁻¹.

Ces premiers outils de coupe présentaient fréquemment des fissures de trempe, qui affaiblissaient considérablement le tranchant en raison du refroidissement brutal par l'eau lors de la trempe à des vitesses de plus de 1000 °C/seconde (nécessaire pour dépasser la vitesse critique de refroidissement et obtenir une trempe complète de l'acier).

En 1870, Mushet (au Royaume-Uni) introduisit une composition d'acier plus complexe, contenant : 2 % de carbone, 1,6 % de manganèse, 5,5 % de tungstène et 0,4 % de chrome, le reste étant du fer. L'avantage principal de cet acier nouvellement développé était sa capacité à être trempé à l'air, ce qui constituait une trempe bien moins sévère que celle à l'eau. L'acier de Mushet possédait une meilleure résistance à chaud et permettait d'atteindre des vitesses de coupe allant jusqu'à 8 m·min⁻¹. Cette composition d'outil de tournage fut conservée jusqu'aux alentours de 1900, bien que le taux de chrome ait progressivement remplacé celui de manganèse.

I.2.2 Aciers rapides

Au tournant du siècle, aux États-Unis, des travaux métallurgiques fondamentaux furent menés par F.W. Taylor et son associé M. White. En 1901, ces chercheurs améliorèrent considérablement la composition des aciers d'outils, en y introduisant une légère modification qui donna naissance à un matériau appelé acier rapide (*High-Speed Steel*), permettant des vitesses de coupe proches de 19 m·min⁻¹.

L'acier rapide n'était pas à proprement parler un nouveau matériau, mais plutôt le fruit d'une procédure innovante de traitement thermique. Sa composition métallurgique typique était : 1,9 % de carbone, 0,3 % de manganèse, 8 % de tungstène, 3,8 % de chrome, le reste étant du fer [29]. L'acier de Taylor et White différait principalement de celui de Mushet par une teneur plus élevée en tungstène et un remplacement accru du manganèse par le chrome.

En 1904, la teneur en carbone fut réduite, ce qui facilitait la forge de l'HSS. Un développement rapide de l'HSS eut lieu au cours des dix années suivantes, avec une augmentation de la teneur en tungstène pour améliorer la résistance à chaud. À la même période, Dr J.A. Matthews découvrit que l'ajout de vanadium augmentait la résistance à l'abrasion de l'alliage.

Dès 1910, l'HSS adopta une composition de 18 % de tungstène, 4 % de chrome et 1 % de vanadium, donnant ainsi naissance au célèbre HSS 18:4:1, dont la composition fut ensuite seulement légèrement modifiée durant les quarante années suivantes.

Parmi les modifications apportées à l'HSS durant cette période, il convient de noter qu'en 1923, le « super HSS » fut développé. Toutefois, cette variante ne devint commercialement viable qu'en 1939, lorsque Gill réduisit la teneur en tungstène pour en permettre l'utilisation industrielle.

Vers 1950, aux États-Unis, l'acier rapide M2 (HSS M2) fut introduit, remplaçant une partie du tungstène par du molybdène. Sa composition métallurgique approximative est la suivante : 0,8 % de carbone, 4 % de chrome, 2 % de vanadium, 6 % de tungstène et 5 % de molybdène — le reste étant du fer. Sous cette forme, le HSS M2 pouvait supporter des températures de coupe allant jusqu'à 650 °C (c'est-à-dire lorsque l'outil devient rouge sombre) tout en conservant son tranchant.

En 1970, la métallurgie des poudres (P/M), par pressage isostatique à chaud (HIP), fut introduite pour la production de HSS, avec un contrôle minutieux de la taille des particules élémentaires ; après frittage, le produit est forgé puis laminé à chaud. Ce traitement HIP permet d'obtenir une matrice élémentaire uniformément répartie, évitant la ségrégation et la structure non homogène généralement observée lors du forgeage à partir d'un lingot de HSS. Ces techniques de métallurgie des poudres permettent aux aciéries de "personnaliser" et de spécifier avec précision la composition métallurgique des éléments d'alliage, rendant possible la production de HSS fritté/forgé dont les performances s'approchent de celles des carbures métalliques en termes de résistance à l'usure, dureté et ténacité.

Un HSS fritté à grains fins typique d'aujourd'hui peut contenir : 13 % de tungstène, 10 % de cobalt, 6 % de vanadium, 4,75 % de chrome et 2,15 % de carbone — le fer constituant le reste. L'une des raisons de l'excellente tenue du tranchant du HSS à grains fins fritté est que, durant le traitement P/M, l'atomisation rapide des particules forme des carbures extrêmement fins (de 1 à 3 µm de diamètre), qui soutiennent pleinement le tranchant, alors que les carbures d'un HSS issu d'un lingot peuvent atteindre 40 µm.

Pour illustrer les avantages du HSS fritté à grains fins — même non revêtu — par rapport à son concurrent métallurgique, le carbure cémenté, on note que la résistance à la flexion (ou résistance universelle à la traction) du HSS varie entre 2 500 et 6 000 MPa selon la composition, alors que celle des carbures cémentés se situe entre 1 250 et 2 250 MPa. Ces progrès dans le traitement métallurgique des outils ont considérablement amélioré le HSS fritté à grains fins, permettant, par exemple, des opérations de perçage, d'alésage et de taraudage à haute performance.

Le revêtement par couches simples ou multiples a montré qu'il améliore significativement les performances de tout matériau d'outil, mais il s'agit d'un sujet complexe qui sera abordé plus loin.

I.2.3 carbures métalliques

Les carbures métalliques sont des alliages frittés à base de carbure de tungstène, de carbure de titane et de carbure de tantalum lié par le cobalt. Les carbures métalliques permettent une vitesse de coupe dans l'acier allant jusqu'à 300m/min. La dureté de ce matériau est aux alentours de 90 HRC. La symbolisation des carbures a fait l'objet de la recommandation NF E 66-304 (ISO 513) [10], les nuances y sont divisées en trois grandes catégories :

- **mono carbure (K)**: utilisés pour l'usinage des métaux ferreux à copeaux courts, ainsi que des métaux non ferreux et matières non métalliques.
- **bicarbures (P)**: destinés à l'usinage de métaux ferreux à copeaux longs.
- **tri carbures (M)**: destinés à l'usinage des métaux ferreux à copeaux longs et copeaux courts.

I.2.4 Carbures revêtus

Les progrès dans ce domaine ont été spectaculaires pendant les dernières années. Le carbure revêtu constitué par une plaquette en carbure métallique recouvert par un film mince (3 à 10 µm) d'un matériau plus dur.

Les couches les plus usuelles sont le carbure de titane, le nitride de titane, le carbonitrure de titane et l'alumine. Chacune de ces couches apporte à l'outil une amélioration dans un domaine particulier (résistance à l'usure, à l'oxydation, au frottement, etc.).

Cependant, ils sont à utiliser avec précaution dans la mesure où leurs performances sont très largement dépendantes du métal usiné, ce qui a conduit à la relation de couple outil/pièce.

I.2.5 Céramiques de coupe

Les céramiques, frittées à partir d'oxyde d'alumine, se distinguent par leur grande dureté et leur résistance à l'usure à haute température. L'apparition de ce matériau sur le marché remonte aux années 1960 [10]. Les céramiques ont été introduites en premier lieu pour l'usinage grande vitesse des fontes et pour l'application nécessitant des taux d'enlèvement de matière importants. Ces outils sont plus résistants à l'usure et plus stables chimiquement que les carbures cémentés. Grâce à leur exceptionnelle stabilité à haute température, les céramiques conviennent bien pour les usinages grande vitesse et l'usinage des alliages ferreux très durs jusqu'à 790 HV (63 HRC) [11].

I.2.6 Cermets

Un cermet est un matériau composite appartenant à la famille des composites à matrice métallique, composé d'un renfort en céramique (Cer) et d'une matrice métallique (Met). Il est conçu pour combiner les propriétés optimales des céramiques — comme la dureté, la résistance à l'abrasion, à la corrosion et aux hautes températures — avec celles des métaux, notamment la ductilité, la ténacité et le comportement élastoplastique [12, 13]. Les métaux les plus couramment utilisés sont le nickel, le molybdène et le cobalt, tandis que les céramiques les plus répandues sont les carbures, les borures et surtout les oxydes. Lorsqu'un cermet est obtenu par frittage d'un carbure métallique et d'un métal, on parle alors de carbure cémenté.

I.2.7 Nitrate de Bore Cubique (CBN)

Le nitrate de bore cubique (CBN), forme métastable analogue au diamant par sa structure cristalline cubique de type sphalérite, est obtenu à partir de nitrate de bore hexagonal traité sous haute pression et température. Utilisé depuis les années 1970 dans la fabrication d'outils de coupe, le CBN est intégré par frittage sur un substrat en carbure cémenté, formant un compact polycristallin à matrice céramique ou métallique. Ce procédé spécial crée une interface étendue entre les matériaux, où la couche de CBN à grains fins recouvre entièrement le substrat. Exposée à des températures élevées, elle permet la diffusion de cobalt à sa surface, générant un revêtement ultradur. La synthèse du CBN, comparable à celle du diamant, peut être facilitée par l'ajout de catalyseurs comme le lithium, le magnésium ou l'hydrazine, ou encore de B_2O_3 pour abaisser les seuils thermodynamiques. Des techniques industrielles telles que la croissance par gradient thermique, les ondes de choc explosives (produisant parfois des hétérodiamants), ou les dépôts physiques et chimiques en phase vapeur (PECVD, PVD, PLD, etc.) permettent également

d'obtenir des couches minces de CBN, malgré la difficulté constante d'éviter la formation de phases hexagonales — un défi atténué par l'ajout de BF_3 .

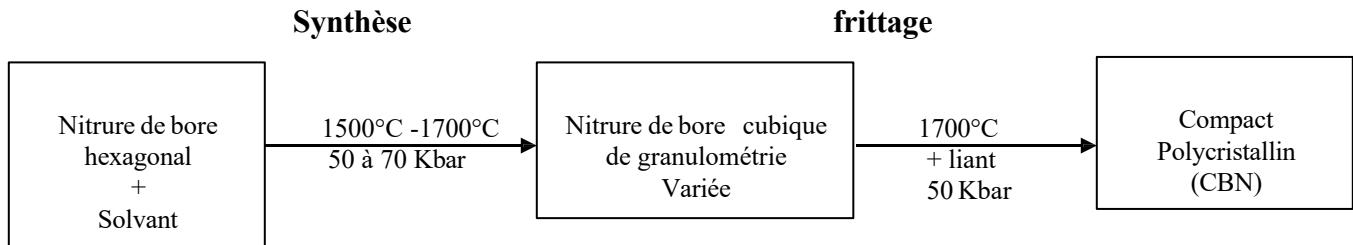


Figure I.4 : principales étapes de réalisation du CBN par frittage.

Après le diamant, le nitride de bore cubique (CBN) est reconnu comme le matériau le plus dur connu. Toutefois, contrairement au diamant qui s'oxyde rapidement sous l'effet des températures élevées générées lors de l'usinage des matériaux ferreux (environ 700 °C pour les aciers durs), le CBN peut être utilisé efficacement dans ce domaine. Il allie une dureté exceptionnelle à une bonne ténacité, ce qui le rend adapté à l'usinage des aciers traités. Malgré sa faible conductivité thermique, la majorité de la chaleur produite pendant la coupe — environ 90 % — est évacuée par le copeau, limitant ainsi l'échauffement de l'outil lui-même. Cette propriété contribue à prolonger considérablement la durée de vie des outils en CBN, notamment lors de l'usinage d'aciers durs avec peu ou pas de ferrite. Dans des cas comme l'usinage de l'acier de roulement 100Cr6, particulièrement difficile à travailler à cause de la dureté des lamelles de cémentite dans sa microstructure, le CBN permet d'obtenir des durées de vie pouvant être jusqu'à cent fois supérieures à celles offertes par les outils en carbure. En plus des matériaux ferreux, les plaquettes en CBN sont également efficaces pour le tournage et le fraisage de matériaux non métalliques et non ferreux très abrasifs. Cette capacité ouvre la voie au remplacement d'opérations de rectification par des procédés d'usinage direct dans l'état durci, avec un gain notable en productivité [10].

I.2.8 Revêtements

Depuis plusieurs années, les revêtements représentent un domaine de recherche en plein essor dans l'industrie, visant à optimiser les performances de coupe et à accroître la productivité. Leur utilisation s'est fortement généralisée dans le secteur de l'usinage, au point qu'en 2001, environ 90 % des outils en carbure produits étaient pourvus d'un revêtement.

Rôle présumé des revêtements:

L'objectif principal de l'application de revêtements sur les outils de coupe est de réduire leur usure pendant l'usinage. Étant donné que l'épaisseur des dépôts est généralement de l'ordre de quelques microns, on ne peut envisager que le revêtement:

- apporte des caractéristiques de résistances mécaniques.
- permette de « protéger » le substrat par une couche indestructible.

Un revêtement performant devrait idéalement répondre à plusieurs exigences fonctionnelles :

- ♦ Réduire l'adhérence des copeaux et le frottement à l'interface outil/pièce ;
- ♦ Limiter la transmission de chaleur vers l'outil pour préserver ses propriétés mécaniques ;

- ♦ Résister à l'abrasion ;
- ♦ Retarder les phénomènes d'oxydation ;
- ♦ Freiner la diffusion des éléments de l'outil vers la pièce usinée ;
- ♦ Limiter l'initiation et la propagation de fissures ;
- ♦ Favoriser un mode d'usure progressif et prévisible, en particulier en dépouille, pour une meilleure maîtrise du processus d'usinage.

Cependant, seules les propriétés liées à l'adhésion, au frottement et à l'isolation thermique influencent directement la formation des copeaux en agissant sur les conditions tribologiques et thermiques aux interfaces de contact. Les autres propriétés jouent davantage un rôle de soutien en ralentissant la dégradation de l'outil dans le temps, qu'elle soit d'origine mécanique ou chimique [14].

I.3 Rugosité des surfaces usinées

I.3.1 Introduction

Le terme "état de surface" englobe en général l'aspect géométrique et physico-chimique de la surface. Son étude sur le plan de l'usinage se limite généralement à l'aspect géométrique. Ce dernier est défini par l'écart de la surface réelle par rapport à la surface nominale, il est classé suivant 4 ordres (figure I.5) :

- Ordre 1 : écarts de forme et de profil (rectitude, planéité, cylindricité, circularité, profil, ...) [37], généralement mesurés sur l'étendue globale de la pièce inspectée.
- Ordre 2 : erreur d'ondulation (déformations macro-géométriques de grande longueur d'onde), généralement mesurée sur une longueur pré déterminée. Ils sont caractérisés par une ligne ondulée à un caractère périodique du essentiellement à des vibrations de basses fréquences de la pièce et de l'outil génératrice.
- Ordre 3 : les défauts de troisième ordre sont constitués de stries ou sillons périodiques ou pseudopériodiques.
- Ordre 4 : arrachement, marque de l'outil, fente, pique. Ce type de défaut a un caractère apériodique [15].

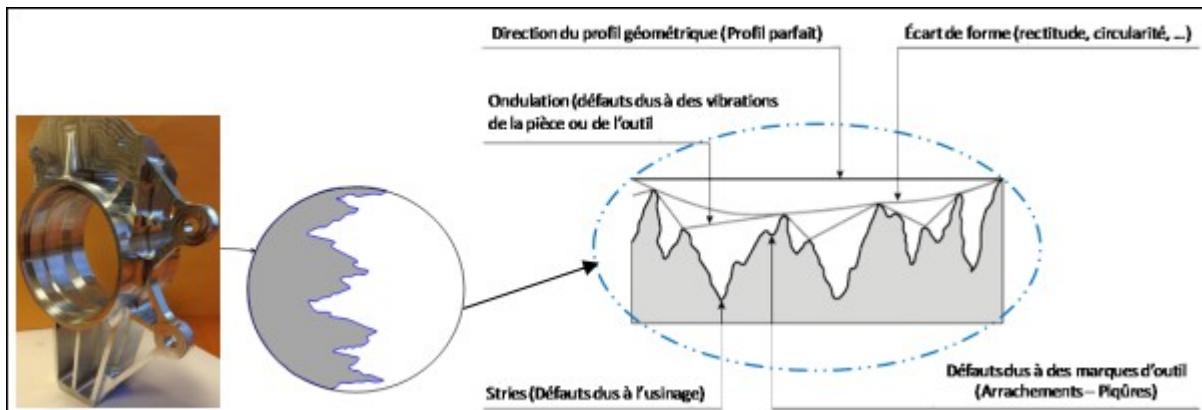


figure I.5 : Défauts de surface

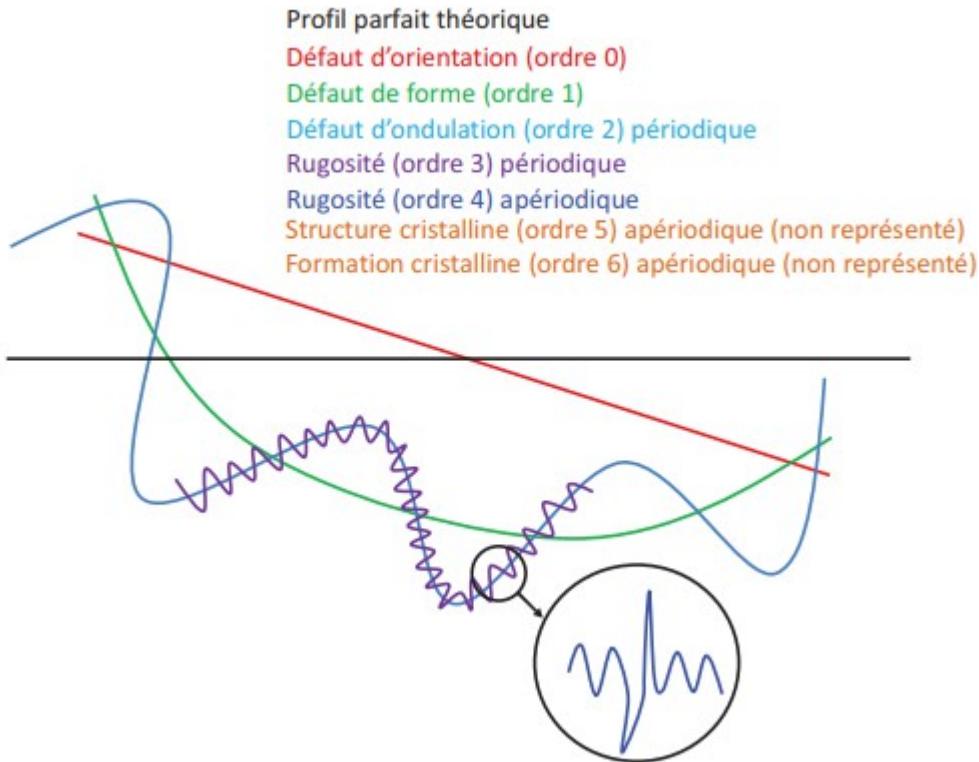


Figure I.6: Les différents ordres d'échelle des défauts de l'état de surface (étude d'un profil 2D suivant une coupe perpendiculaire à la surface)

La rugosité de surface constitue l'un des aspects fondamentaux de la caractérisation de ces états de surface. Elle désigne les irrégularités microscopiques présentes sur une surface réelle. Ces irrégularités, principalement dues aux procédés de fabrication (notamment l'usinage par enlèvement de matière), induisent des écarts par rapport à la géométrie théorique qui rendent impossible l'obtention de surfaces parfaitement lisses ou idéales [16].

Sur le plan fonctionnel, la rugosité influence de manière significative les performances des composants mécaniques. Elle intervient dans des phénomènes critiques tels que le frottement, l'usure, la fatigue, la corrosion, le matage, l'étanchéité ou encore l'adhésion. En tribologie, par exemple, une surface rugueuse tend à s'user plus rapidement et présente généralement un coefficient de frottement plus élevé qu'une surface lisse. Par ailleurs, la présence d'aspérités peut favoriser l'initiation de fissures ou de zones de corrosion, compromettant la durabilité des pièces. La mesure et le contrôle précis de la rugosité sont donc essentiels pour garantir la qualité fonctionnelle des surfaces, assurer l'interchangeabilité des pièces et optimiser les coûts de production. Cette nécessité a conduit au développement de méthodes métrologiques normalisées permettant de quantifier les irrégularités et défauts micro géométriques de surface à l'aide de descripteurs statistiques et géométriques [17], la figure I.7 a identifié et enregistré des profils de rugosité [18].

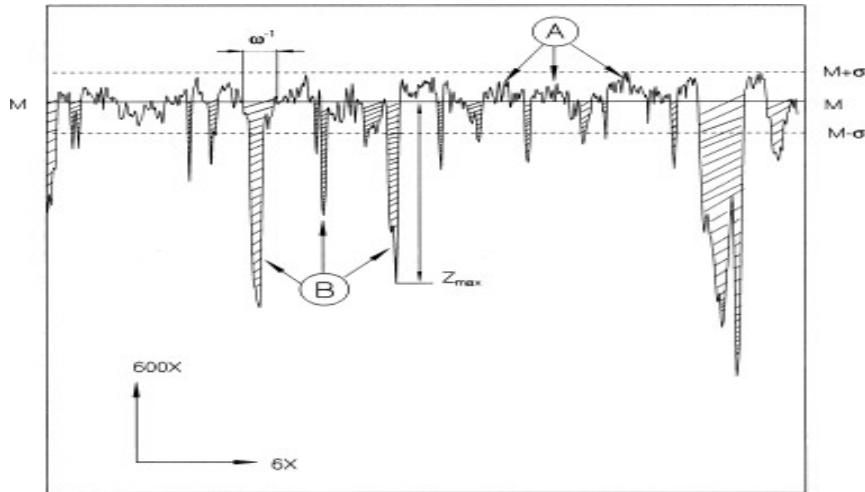


Figure I.7: profil de rugosité d'une surface au sol typique d'aluminium. La surface haute (a) et basse (b) montre les fréquences des perturbations [18].

Les mesures de rugosité sont généralement regroupées en quatre classes ou ensembles de paramètres [19, 20] :

- ➊ les paramètres d'amplitude incluant les différents moments statistiques (moyenne, écart-type, coefficients d'asymétrie et d'aplatissement),
- ➋ les paramètres spatiaux (densité des pics, rapport d'aspect ou directionnalité de la texture, . . .),
- ➌ les paramètres hybrides (pente quadratique moyenne de la surface, courbure moyenne arithmétique aux pics, surface développée),
- ➍ et les paramètres fonctionnels (indice de portance de la surface, hauteur correspondant à 5% de la surface portante, indice de rétention de fluides dans les vallées, . . .).

Chacun de ces paramètres met en avant certaines caractéristiques géométriques ou fonctionnelles de la surface, mais le plus souvent à une valeur de ces caractéristiques peuvent correspondre des géométries et des propriétés physiques très variées.

I.3.2 Définition des critères de rugosité (norme NF E 05-015)

Considérons une coupe locale de la surface usinée perpendiculairement aux sillons d'usinage (figure I.8) [21, 22]:

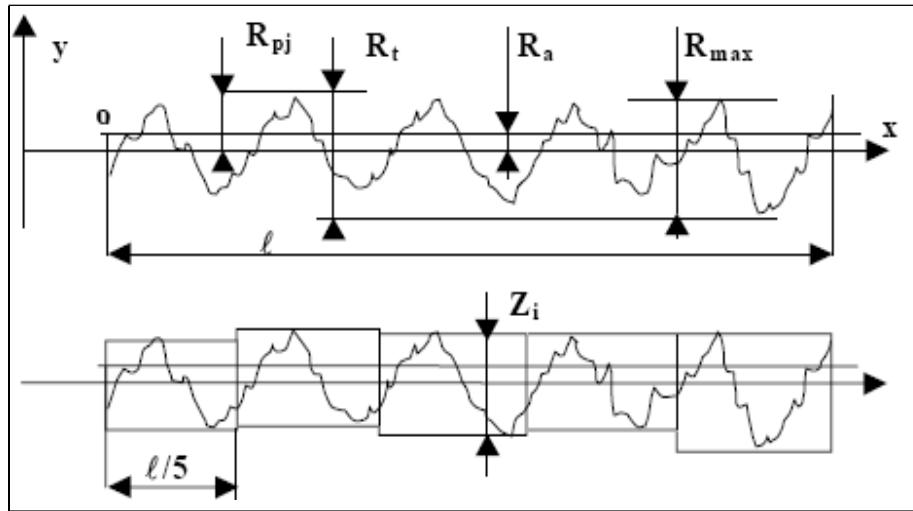


Figure I.8: critères de rugosité.

Soit OX la ligne moyenne telle que:

$$\int_0^l y dx = 0 \quad (I.3)$$

Les principaux critères de rugosité sont définis par rapport à cette ligne moyenne, soit:

- Rugosité moyenne arithmétique R_a dite C.L.A (Centre Line Average), R_a représente la moyenne arithmétique des écarts (en valeur absolue) par rapport à ox [15, 21, 22].

$$R_a \uparrow \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad (I.4)$$

- Rugosité moyenne quadratique R.M.S. (Root Mean Square). Ce critère (non normalisé en France) représente l'écart moyen quadratique par rapport à ox [21, 22].

$$RMS \uparrow \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^2 dx}^{1/2} \quad (I.5)$$

- Rugosité totale R_{max}: elle représente la hauteur maximale des irrégularités du profil de rugosité.
- Rugosité totale R_t : elle représente la distance entre la saillie et la crête de la rugosité [38].

$$R_t \uparrow \frac{f^2}{8r} \quad (I.6)$$

- Rugosité R_{pj} : elle représente la hauteur maximale de saillie de rugosité. R_{pj} est la distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne pour une longueur (L).
- Rugosité totale R_z: elle représente l'écart total entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil, relevé sur toute la longueur de palpage l [21, 22].

$$R_z \uparrow \frac{1}{5} \begin{smallmatrix} 5 \\ | \\ 1 \end{smallmatrix} Z_i \quad (I.7)$$

Dans les conditions de nos essais, le travail de la pointe de l'outil se passe toujours dans le rayon de bec de la plaquette. L'avance utilisée sera toujours inférieure à R_e .

On considérera les modèles théoriques suivants:

$$R_{\text{théorique}} \uparrow \frac{f^2}{8R} \quad \text{et} \quad Ra \uparrow \frac{f^2}{18\sqrt{3}R_d} \quad \text{quand } f \ll R_e \text{ d} \quad (\text{I.8})$$

I.3.3 Principaux paramètres influant sur la rugosité

Selon la revue de la littérature, les facteurs influençant la génération de la rugosité de surface peuvent être classés en trois grandes catégories : les facteurs liés à la préparation, les facteurs opérationnels et les facteurs de procédé [23].

Les facteurs liés à la préparation : correspondent aux éléments définis lors de la planification du processus. Ils peuvent avoir un impact significatif sur la rugosité de surface, bien qu'ils soient généralement maintenus constants pendant l'usinage. Ainsi, seule l'interaction entre ces facteurs et les phénomènes de coupe peut entraîner des variations de rugosité au cours de la production. Trois sous-catégories sont identifiées dans cette classe : les facteurs liés à l'outil de coupe, les facteurs liés à la machine, et les facteurs liés à la pièce.

Les facteurs opérationnels regroupent les paramètres au niveau de la machine-outil qui peuvent être modifiés en temps réel, soit en changeant les réglages, soit en modifiant le programme CN. Ils se divisent en deux sous-catégories : les paramètres de coupe (vitesse de coupe, avance, profondeur de passe, etc.) et les paramètres de procédé, qui concernent par exemple le fluide de coupe ou les stratégies d'usinage.

Les facteurs de procédé concernent les phénomènes spécifiques de coupe ayant une influence directe sur la génération de la rugosité de surface. Lorsqu'ils se manifestent, ces phénomènes ont une contribution claire à l'état final de la surface. Ils incluent l'usure de l'outil et les vibrations.

I.3.3.1 Les éléments du régime de coupe

a) Vitesse de coupe: En raison de la formation d'arêtes rapportées, la vitesse de coupe exerce une influence significative sur la rugosité de surface. L'arête rapportée correspond à une accumulation de matière au niveau du tranchant de l'outil, résultant d'un micro-soudage causé par un frottement intense. Ce dépôt se forme et se détache de manière cyclique, ce qui entraîne des fluctuations dans l'effort de coupe et engendre des irrégularités sur la surface usinée. L'augmentation de la vitesse de coupe, en élevant la température au point de contact, tend à éliminer l'arête rapportée et à améliorer ainsi l'état de surface. (figure.I.9) [24].

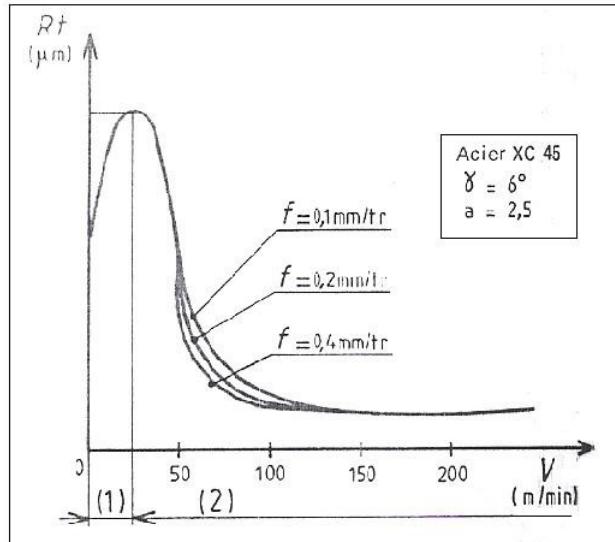


Figure I.9: Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité

Zone 1: écrouissage superficiel important et formation de l'arête rapportée.

Zone 2 : disparition de l'arête rapportée avec l'augmentation de la vitesse de coupe.

b) Avance: l'avance est le paramètre fondamental pour la rugosité des surfaces usinées, ceci est donnée par l'expression (I.12). La rugosité est proportionnelle à l'avance et augmente avec celle-ci [25]. Une analyse expérimentale a confirmé cette évidence géométrique (figure I.10) [26].

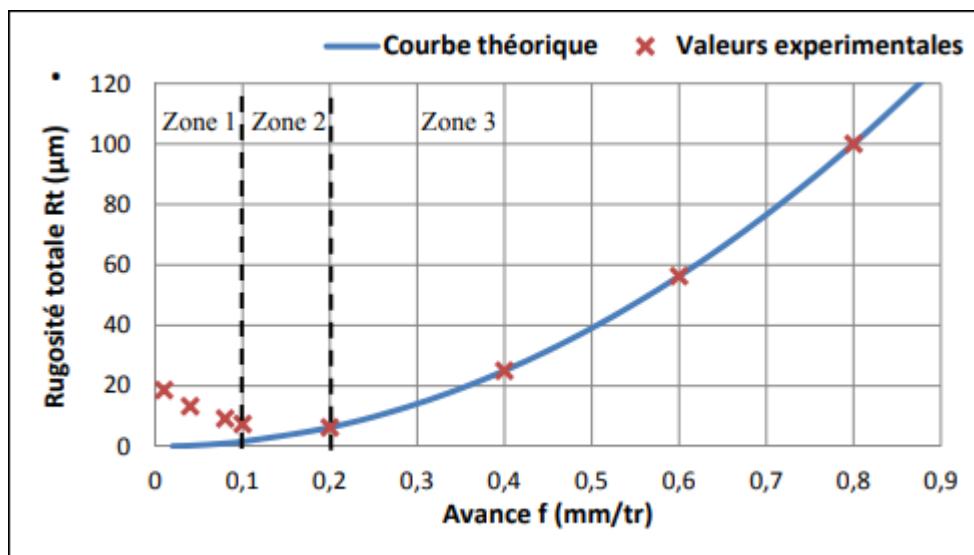


Figure I.10: Exemple d'évolution de la rugosité totale en fonction de l'avance en chariotage
(adapté de (Cordebois, 2008))

Zone 1 : des valeurs d'avance très faibles entraînent une augmentation de la rugosité (l'outil ne coupe plus mais arrache la matière). Les résultats expérimentaux sont éloignés de ceux du modèle. Si la vitesse de coupe augmente, on se rapproche du modèle. C'est l'un des avantages de

l'usinage à haute vitesse. En usinant très vite, on met en évidence les caractéristiques viscoplastiques du matériau. Les grandes vitesses de déformation induisent une rupture fragile conduisant à un état de surface plus lisse : c'est l'aspect intéressant de l'usinage à grande vitesse. Zone 2 : les résultats expérimentaux sont toujours supérieurs à ceux du modèle, mais deviennent comparables malgré l'influence des écarts de 4ème ordre qui causent cette différence.

Zone 3 : les résultats expérimentaux sont en accord avec ceux du modèle, la coupe se fait bien et l'état de surface des sillons est correct.

Il faudrait donner au modèle un domaine de validité mais la difficulté de prédire la limite de la zone 3 rend cela impossible. Seule une validation expérimentale permet de déterminer cette limite. Le profil de la surface étant fonction de l'avance ([voir figure I.10](#)), la texture de la surface usinée sera influencée par l'avance. L'avance sera donc un facteur important pour l'implémentation des techniques d'inspection du fini de surface au centre d'usinage basée sur le traitement de la texture.

c) Profondeur de passe: La profondeur de passe a un impact limité sur la formation de la rugosité de surface. Son influence s'exerce principalement sur la précision d'usinage, en raison des déformations qu'elle peut provoquer au niveau de la pièce ou du système de fixation [27].

I.3.3.2 Usure de l'outil: Pour un procédé d'usinage donné, la signature de texture de surface est une combinaison unique de différentes composantes de différentes longueurs d'onde et des amplitudes. L'usure de l'outil a une influence directe sur la qualité et la texture de la surface obtenue, les contraintes résiduelles, le respect des cotes dimensionnelles, la fragmentation du copeau, la tenue de l'outil dans le temps et la puissance de coupe nécessaire. La valeur de la rugosité augmente en fonction du temps effectif de coupe. Une valeur de rugosité peut être prise comme critère indirect d'usure des outils de coupe ([figure I.11](#)).

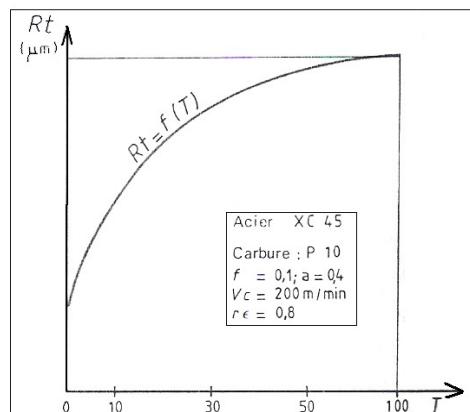


Figure I.11: influence de l'usure de l'outil sur la rugosité.

I.3.3.3 Lubrification: L'action de la lubrification n'est utile qu'aux très faibles vitesses de coupe, les propriétés de lubrification et les additives anti-soudures du fluide de coupe contribuent à diminuer l'apparition de l'arête rapportée (surtout dans le cas des matériaux ductiles), ce qui se traduit en finition par une amélioration de l'état de surface. Il permet aussi de diminuer le frottement copeau/outil et pièce/outil et par la suite la puissance absorbée par la coupe. Cette action est particulièrement efficace lors de l'usinage des alliages d'aluminium [28].

Aux très grandes vitesses de coupe, le fluide de coupe et surtout le refroidisseur n'est plus nécessaire car les températures d'usinage baissent ([figure I.12](#)).

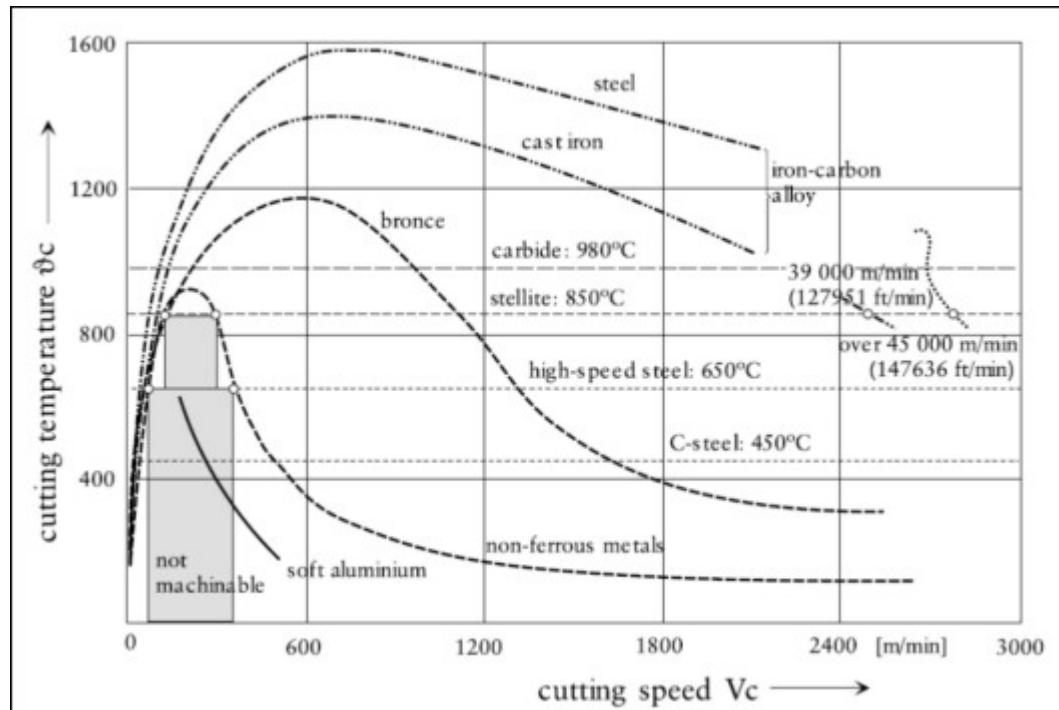


figure I.12: Variation de la température d'usinage en fraisage haute vitesse. (Schulz, 1999)

I.3.3.4 Influence de la machine: Une grande rigidité de la machine-outil est évidemment une condition indispensable pour l'obtention d'une qualité de surface des pièces satisfaisante. Les vibrations éventuelles et le broutage vont se traduire essentiellement par des défauts du second ordre (ondulations) [28].

I.3.3.5 Rayon du bec de l'outil : La modélisation du profil de rugosité en tournage se fait par une succession d'arcs de cercles ayant pour rayon le rayon de bec de l'outil et dont le pas correspond à l'avance par tour de l'outil ([figure I.13](#)). Ceci dit, la rugosité dépend principalement de l'avance et du rayon de bec de l'outil. Cela a amené à définir une relation entre ces facteurs et les paramètres de la rugosité.

Théoriquement, la rugosité diminue quand le rayon de bec de l'outil augmente. Une étude expérimentale montre l'influence du rayon de bec de l'outil sur la rugosité ([figure I.14](#)).

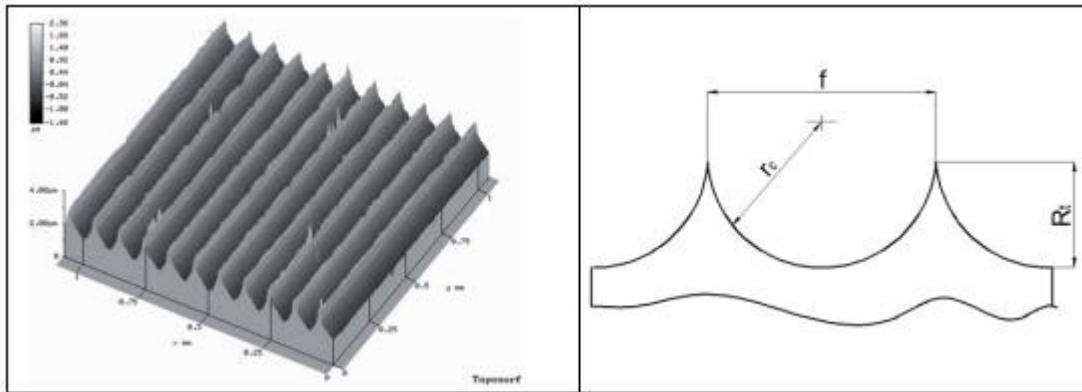


figure I.13 : Topographie de surface obtenue en tournage et son profil théorique associé (adapté de (Grzesik et Zak, 2012))

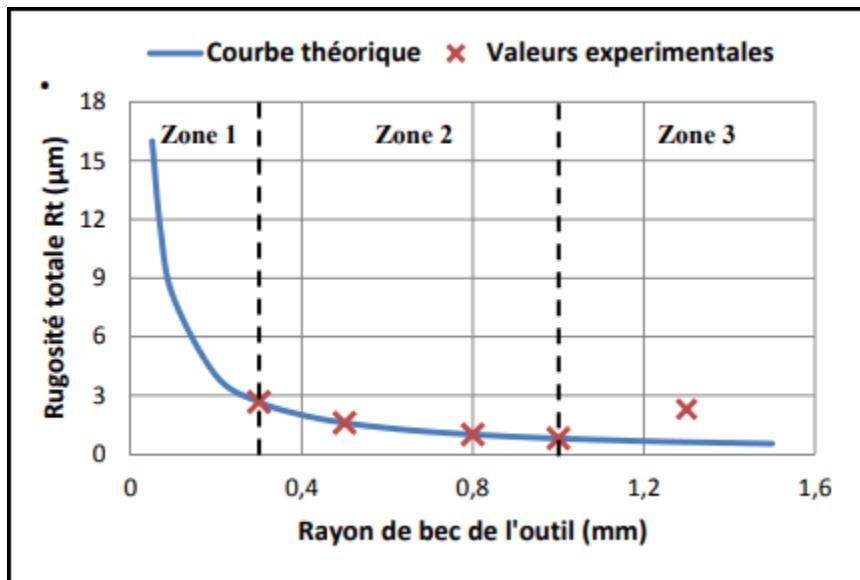


figure I.14 : Exemple d'évolution de la rugosité totale en fonction du rayon du bec en chariotage (adapté de (Cordebois, 2008))

Zone 1 : aucune conclusion n'a été tirée car il n'existe pratiquement pas d'outil avec le rayon aussi faible, le modèle théorique n'est là que pour information.

Zone 2 : les résultats expérimentaux se comportent comme le modèle géométrique.

Zone 3 : les résultats expérimentaux s'éloignent des valeurs données par le modèle (arrachement dû aux phénomènes de copeau mini). À avance constante, l'épaisseur locale du copeau diminue lorsque r_e augmente, l'écart du 4ème ordre augmente exagérément et l'hypothèse du modèle n'est plus vérifiée. C'est ainsi que l'étude est fonction de la qualité de l'acuité de l'arête principale de coupe, de son stade d'usure V_b , de la vitesse de coupe V_c et de l'avance f . Si l'on augmente la vitesse de coupe ou l'avance, la coupe se fait dans de bonnes conditions d'où l'augmentation de la rugosité.

I.3.4 Évaluation de la rugosité de surface

Un certain nombre de méthodes de mesure de rugosité de surface a été développé dans les dernières décennies. Comparer ces dispositifs nécessite de prendre en compte un certain nombre de paramètres :

- Fréquence de mesure;
- Distance de travail, capteur – surface;
- Résolution et plage de mesure;
- Propriétés optiques de la surface : réflexion spéculaire, réflexion diffuse.

Les instruments tactiles utilisent un stylet (diamant); ceux sans contact sont généralement optiques et opèrent en mesurant la distance entre une référence interne et les points de la surface. Parmi ces différentes méthodes, nous pouvons citer [29] :

a) Microscopie à champ proche

Les techniques de microscopie à champ proche sont de plus en plus utilisées dans le contrôle et la caractérisation des surfaces. Cela grâce à leur capacité à obtenir des images de la surface à caractériser de l'échelle microscopique à l'échelle nanométrique, permettant ainsi d'obtenir des informations supplémentaires de la surface.

Microscope à effet de tunnel (STM) : la dépendance du courant tunnel avec la distance entre deux métaux a été exploitée par G. Binnig et H. Rohrer (1982) au début des années 1980, en utilisant une pointe métallique très fine formant l'anode. Le courant tunnel sera ainsi localisé entre le bout de la pointe et la surface de l'échantillon qui forme la cathode. Il est ensuite possible de balayer la pointe au-dessus de la surface et de mesurer les variations du courant tunnel. L'interaction entre la pointe et la surface dépendant de la structure locale de l'échantillon, on dispose ainsi d'une sonde locale dans l'espace réel.

En enregistrant pour chaque position de la pointe le courant tunnel, on réalise une image topographique de la surface dont la résolution sera une fonction de la taille de la pointe sonde.

Microscopie à force atomique (AFM) : le microscope à effet tunnel ne permet d'imager, en général, que des surfaces métalliques ou semi-conductrices. Dans son principe même, il n'est pas possible d'imager des surfaces isolantes puisqu'un courant ne peut s'établir entre la pointe et l'isolant. En 1986, G. Binnig, C.F. Quate et C. Gerber inventèrent le microscope à force atomique. Son principe (mode contact) consiste à mesurer la force d'interaction entre l'atome du bout de la pointe et les atomes de la surface [(Cornet et Deville, 1998), (Binning, Rohrer et Gerber, 1982), (Coulon, 2000), (Bai, 2000), (Landolt, 1993)]. La microscopie AFM est une technique d'imagerie de surface très utilisée en raison de sa haute résolution et de la diversité des matériaux qu'elle peut cartographier (isolant, conducteur, biologique, etc.). Une sonde mécanique balaie la surface de l'échantillon pendant que son déplacement vertical est contrôlé, en général, par des techniques optiques (Figure 1.11). Le déplacement vertical de la sonde découle des forces d'attraction entre la surface et le bout de la sonde. En plus de renseigner sur la topographie de surface, l'AFM permet aussi de mesurer la rugosité.

b) Microscopie électronique à balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage (MEB) [(Cornet et Deville, 1998), (Martin et Georges, 1998), (Péré, 1994)] permet d'obtenir des images de surfaces de pratiquement tous les matériaux solides, à des échelles allant de celle de la loupe (x10) à celle du microscope électroniques en transmission (x500 ou plus). Elle permet d'analyser la morphologie de la surface et la composition chimique de la plupart des matériaux solides. Les images obtenues frappent en premier par le rendu très parlant du relief et une très grande profondeur de champ (plusieurs centaines de microns), et donnant des vues qualitatives des surfaces d'une grande utilité (Figure 1.12). En se limitant à l'aspect formation des images, on peut citer quelques exemples d'applications : la texture microscopique de matériaux, l'étude de l'état de surface de matériaux, l'étude de la corrosion et des réactions de surface de matériaux, l'étude et le contrôle de microcircuits électroniques, etc

c) Techniques optiques

Le microscope confocal à balayage laser : le microscope confocal dérive du microscope optique traditionnel, hormis que sa source lumineuse est un laser qui balaye point par point l'objet à analyser. Dans sa configuration « réflexion », il utilise un miroir semi-réfléchissant, qui réfléchit le rayon provenant de l'objet vers un détecteur. Ce dernier peut ainsi mesurer l'intensité lumineuse de chaque point et la stocker dans un ordinateur.

Dans la microscopie optique classique, l'image donne des informations dimensionnelles latérales (X et Y) mais pas axiales (Z). Le contraste de l'image provient en général des variations de la réflectivité de surface. En limitant la profondeur de champ d'un microscope optique avec un système d'éclairage et d'imagerie optimisé, la microscopie confocale permet d'obtenir des informations quantitatives sur l'axe optique (Z). Le principe du microscope confocal consiste à focaliser, par l'intermédiaire d'un objectif, un faisceau laser qui va éclairer un point de l'échantillon, puis à récupérer, sur un photomultiplicateur, le signal lumineux émis en ce point (Péré, 1994). La microscopie confocale est une technique optique non destructive permettant d'obtenir des coupes optiques “virtuelles” non seulement dans le plan (X,Y) mais également suivant un plan (X,Z) parallèle à l'axe optique qui peuvent faire l'objet de reconstructions tridimensionnelles (Roblin, 1999).

L'ellipsométrie spectroscopique : l'ellipsométrie spectroscopique est une technique optique d'analyse de surface permettant de caractériser les propriétés optiques des matériaux et/ou l'épaisseur des couches minces. Elle est fondée sur la mesure du changement de l'état de la polarisation d'un faisceau de lumière après réflexion sur une surface plane d'un échantillon (Figure 1.14) [(Cornet et Deville, 1998), (Bissuel, 1996), (Castellon, 2002)]. Le type d'information accessible par cette technique dépend de la configuration et du domaine de longueur d'onde utilisé.

La microscopie interférométrique : les techniques d'interférométrie microscopique modernes basées sur le principe de l'interférence lumineuse, présentent les avantages d'être non-destructives et rapides. Depuis l'arrivée de l'imagerie numérique, de nouvelles sources d'éclairage, de systèmes de balayage précis et de systèmes de traitement de signaux puissants pour automatiser la quantification des franges d'interférences et la mesure de relief de surfaces, on a noté une amélioration considérable de la vitesse d'analyse, de la quantité d'information traitée et de la résolution mesurée.

Le microscope interférométrique utilise une technique de détection de phase par interférométrie. La lumière blanche réfléchie par la surface à analyser est comparée à une surface de référence. Le phénomène d'interférences résultant est visualisé et enregistré par une camera CCD.

L'interférométrie est solidaire d'un translateur piézoélectrique donc le déplacement est contrôlé par un microcalculateur. Les franges d'interférences se déplacent avec le mouvement du translateur piézo et elles sont enregistrées pour des positions différentes de l'objectif. A chacune de ces positions correspondent des images dont on connaît l'intensité lumineuse en chaque point du plan (x, y) de la surface de l'échantillon.

I.4 Les efforts de coupe

1.4.1 Introduction

La connaissance des efforts de coupe est à la base de l'évaluation de la puissance nécessaire à la coupe. Quand on veut connaître le rendement mécanique d'une machine-outil, on a besoin de savoir quelle est la puissance prise à l'outil, et donc d'avoir des renseignements sur les efforts de coupe.

La valeur des efforts de coupe sert aussi à dimensionner les organes de machines et à prévoir les déformations de pièce. Elle intervient dans la précision d'usinage, dans les conditions d'apparition des vibrations, au broutage et indirectement dans la formation de l'état de surface. Enfin les efforts de coupe, étant en relation avec les propriétés mécaniques du métal dans le processus de formation de copeaux.

Les efforts de coupe sont à l'origine des déformations plastiques et donc des élévations de température qui se produisent au cours de la coupe [30]. Pour toutes autres conditions de coupe égales, l'augmentation de la vitesse de coupe ne s'accompagne pas d'une variation notable des efforts de coupe (10% de baisse environ), alors que l'augmentation de la vitesse d'avance entraîne une augmentation de la valeur de l'effort tangentiel (relation linéaire: l'effort double environ quand la vitesse d'avance double).

Le tournage longitudinal donne lieu à un effort de coupe dont la décomposition dans trois directions privilégiées peut servir de base à la définition des efforts de coupe pour toutes les opérations d'usinage (figure I.15). La résultante de coupe F est la somme de 3 composantes suivantes.

F_z : Composante dans le sens de la vitesse de coupe, appelée effort tangentiel ou effort principal de coupe, cette dernière est la plus grande en valeur absolue.

F_x : Composante dans le sens de l'avance, appelée effort d'avance ou effort axial en tournage, joue un rôle fondamental dans le processus de coupe.

F_y : Composante dans le sens perpendiculaire aux deux autres, appelée effort de refoulement ou effort radial, n'a qu'une importance secondaire et disparaît dans le cas de la coupe orthogonale [25].

La force résultante F_r est :

$$F_r = \sqrt{F_z^2 + F_x^2 + F_y^2} \quad (I.9)$$

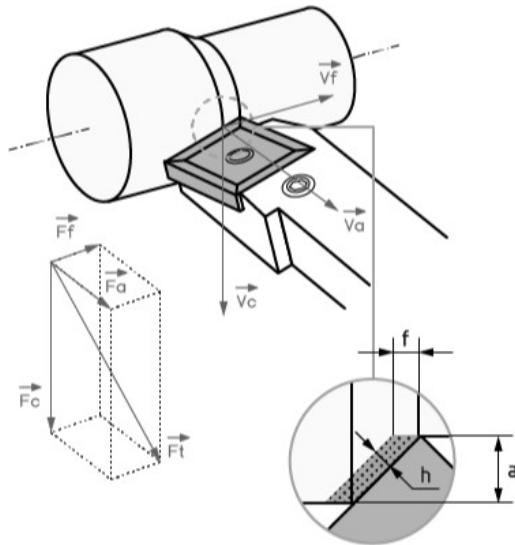


Figure I.15 : Composantes de l'effort de coupe.

I.4.2 Influence des différents facteurs sur les efforts de coupe

L'effort de coupe est étroitement lié aux paramètres suivants qui ont une influence plus ou moins importante.

I.4.2.1 Les éléments du régime de coupe

a) Vitesse de coupe

C'est le facteur le plus important dont l'influence est déterminante sur la valeur des efforts de coupe. Il y a d'abord une diminution de l'effort aux très basses vitesses due à une diminution du frottement copeau-outil, puis l'apparition de l'arête rapportée provoque une augmentation de l'effort jusqu'à un maximum. Ensuite l'effort décroît à cause de la disparition progressive de l'arête rapportée.

La décroissance aux grandes vitesses est due à la diminution du frottement copeau-outil, suite à l'augmentation d'une part de la température aux interfaces copeau-outil et outil-pièce et à la formation du cratère sur la surface d'attaque [25].

b) Avance et profondeur de passe

Avec l'augmentation de ces deux facteurs, la section droite du copeau s'accroît, de même que le volume du métal déformé, il en résulte que le métal résiste plus fort à la formation du copeau et la valeur des composantes F_v , F_a et F_p nécessaires pour assurer la coupe est plus importante. En chariotage, la profondeur de passe intervient d'une manière plus accentuée sur les efforts de coupe que l'avance.

I.4.2.2 Matière à usiner

Les propriétés mécaniques du métal à usiner influent fortement sur la force de coupe. Cette dernière augmente quand la résistance à la rupture augmente.

La valeur de réaction F_v , F_a , F_p est proportionnelle à la charge rupture à la traction R_t et à la dureté HB du métal à usiner.

- ♦ On a trouvé pour les aciers : $F_v = C_1 R t^{0.35}$ (Kgf)
- ♦ Pour les fontes grises travaillées avec les outils en carbures : $F_v = C_2 H B^{0.4}$ (Kgf)
Où -----C1, C2 sont des constantes.

I.4.2.3 Liquide de lubrification et de refroidissement

Son utilisation en processus de coupe permet de diminuer non seulement l'échauffement de l'outil et la pièce mais aussi le coefficient de frottement, il permet aussi d'empêcher la formation d'arête rapportée et d'améliorer les états de surface. Toutes ces raisons font que la force diminue considérablement sous l'action des lubrifiants (jusqu'à 25%).

I.4.3 Mesure des efforts de coupe

De nombreuses techniques expérimentales ont été exploitées pour examiner la force de coupe. La mesure des efforts de coupe est basée sur diverses méthodes exploitant des dynamomètres. Pour la plupart de ces dispositifs, la déformation élastique d'un élément de rigidité contrôlée du système dynamométrique est mesurée. Actuellement les dynamomètres piézo-électriques sont des outils indispensables dans la recherche expérimentale en usinage. On les utilise également comme appareils de surveillance des outils de coupe lors de l'usinage industriel. La plupart des systèmes ont été réalisés pour la mesure simultanée de plusieurs composantes.

Pour conclure sur ce point concernant les efforts de coupe, on peut dire d'une manière générale, que la tendance est de minimiser les efforts de coupe lors de l'usinage des pièces. Ceci conduit à :

- ♦ un faible fléchissement de la pièce, ce qui augmente la précision géométrique.
- ♦ A une consommation moindre de la puissance développée par la machine outil.
- ♦ Des faibles déformations statiques et dynamiques du système usinant MODOP.
- ♦ Améliore l'état de surface des pièces usinées.

CHAPITRE II

EQUIPEMENTS UTILISÉS ET PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons l'ensemble des outils mis en oeuvre pour une approche expérimentale méthodique afin de caractériser le comportement des matériaux de coupe (carbure revêtu et non revêtu) lors de l'usinage du matériau à usiner C30. Ce chapitre va consister en une présentation du matériel qui sert à l'étude de la formation du copeau, des efforts de coupe et de la rugosité des surfaces usinées à différentes conditions d'usinage.

II.2 Equipements utilisés

II.2.1 Machine outil

La machine outil utilisée pour effectuer nos essais est un tour universel de la société tchèque TOS TRENCIN modèle SN40 ([figure II.1](#)), ayant un poids de 1720 kg, un moteur électrique avec une puissance de 6.6 KW, une gamme de vitesses de 22.4 à 2000 tr/min et d'avances de 0.08 à 6.4 mm/tr. Ce tour se caractérise par une distance entre pointes de 1500 mm. La contre coupée de ce tour comporte un fourreau de 120 mm de longueur et de 70 mm de diamètre.



Figure II.1: Tour parallèle modèle SN40

II.2.2 Matière à usiner

Les essais que nous comptons réaliser seront effectués sur des éprouvettes en acier au carbone de nuance C30. La composition chimique de ce dernier est donnée dans le [tableau II.1](#).

Tableau II.1: Composition chimique de l'acier C30.

| Désignation du matériau | Composition Chimique (% en masse) | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-----------------------------------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| | C | Mo | V | Mn | Si | Cr | Ni | Cu | AL | Sn | P | S |
| C30 | 0.32 | 1.62 | 0.41 | 0.37 | 0.32 | 0.30 | 0.166 | 0.08 | 0.026 | 0.021 | 0.019 | 0.015 |

II.2.3 Plaquettes et porte-outil

II.2.3.1 Description des plaquettes

Les plaquettes ([figure II.2](#)) choisies sont réversibles, de marque sandvik et widia comportant 8 arêtes de coupe par plaquette. Leurs caractéristiques sont répertoriées dans le [tableau II.2](#).

**Figure II.2 :** plaquettes de coupe utilisées

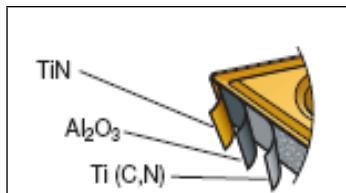
La plaque grise est sans revêtement et l'autre revêtue avec un triple revêtement.

Tableau II.2: Descriptifs des plaquettes utilisées

| Matériaux de coupe | Désignation | | Géométrie | Marque | Composition |
|-----------------------|-------------|-----|------------------|------------------|--|
| | Firme | ISO | | | |
| Carbure non revêtu | TTR | P35 | SNMA 12.04.08 | Widia | 85%WC+5%TiC+10%Co |
| Carbure revêtu | GC4015 | P15 | SNMG 12.04.08 | Sandvik coramant | WC avec un triple revêtement TiN+ Al ₂ O ₃ + TiCN |

P35 (TTR): Métal dur tenace pour l'usinage d'ébauche des pièces en aciers, aciers moulés et aciers inoxydables.

GC4015 (P15, K15): C'est une nuance à épais revêtement 14 µm CVD de TiCN, Al₂O₃ et TiN ([figure II.3](#)), extrêmement résistant à l'usure, de couleur dorée pour faciliter la détection de l'usure. Sous le revêtement, un substrat dur, à gradient près de la surface, grâce auquel la nuance peut supporter des températures de coupe élevées et conserver une bonne sécurité d'arête. GC4015 est une nuance ultra-performante, idéale pour des vitesses de coupe élevées et l'usinage à sec dans le champ P15. Excellent choix aussi pour l'usinage des fontes grises et nodulaires [31].

**Figure II.3:** Carbure GC4015 à triple revêtement.

II.2.3.2 Porte plaque

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un porte plaque de type sandvik, les plaquettes fixées mécaniquement par trou central ([figure II.4](#)). La géométrie du porte plaque est donnée dans le [tableau II.3](#).

Tableau II.3 : Caractéristiques géométriques du porte plaque.

| Porte plaque | Section mm ² | χ° | α° | γ° | λ° |
|--------------|-------------------------|----------------|------------------|------------------|-------------------|
| PSBNR2525M12 | 25×25 | 75 | 6 | -6 | -6 |



Figure II.4 : Porte-Outil utilisé.

II.2.4 Rugosimètre pour la mesure de la rugosité

La caractérisation de la topographie de surface de la pièce usinée est effectuée avec un rugosimètre portable de marque Mitutoyo ([figure II.5.a](#)), dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Résolution : 0,1 µm
- Filtre utilisé : 0,8
- Avance utilisée : 2.5x5



Figure II.5: Mesure de topographie in situ avec le rugosimètre portable Mitutoyo.

La mesure de la rugosité est réalisée directement sur la même machine et sans démontage de la pièce ([figure II.5.b](#)).

II.2.5 Dynamomètre pour la mesure des efforts de coupe

Les essais des efforts de coupe ont été réalisés au laboratoire LMS de l'université de Guelma. Pour la mesure des trois composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z) on a utilisé un dynamomètre (plate forme Kistler) à trois composantes de type 9257B F_x , F_y , $F_z \pm 5$ KN ([figure II.6](#)).

Tableau II.4 : caractéristiques du dynamomètre

| Type | Gamme de mesure | Sensibilité | Fréquence propre | Température d'utilisation | Lo | La | H | Poids |
|----------|-----------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|-----|-----|----|-------|
| Etalonné | kN | pC/N | kHz | °C | mm | mm | mm | kg |
| 9257B | F_x , F_y , $F_z \pm 5$ | F_x , $F_y = -7,5$ $F_z = -3,7$ | $f_n(x,y) = 2,3$ $f_n(z) = 3,5$ | 0...70 | 170 | 100 | 60 | 7,3 |

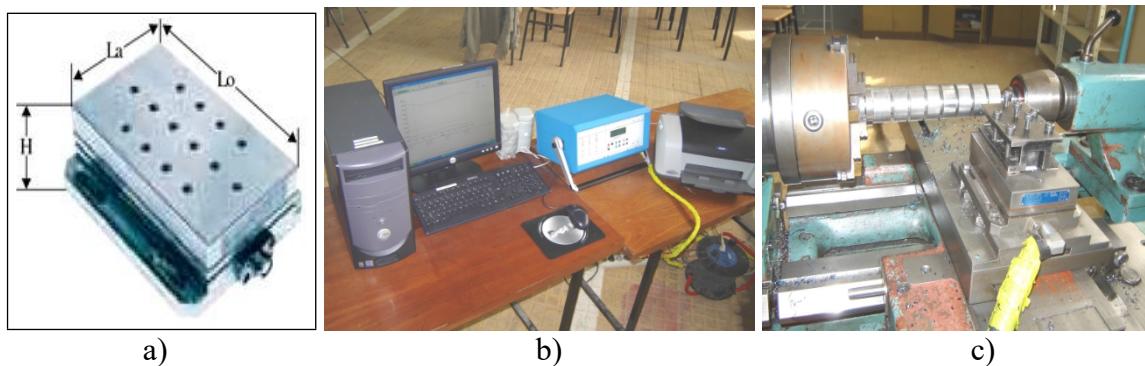


Figure II.6 : Chaîne d'acquisition des efforts de coupe avec la table **Kistler**

a) Dynamomètre Kistler, b) amplificateur Kistler et acquisition numérique, c) Montage du dynamomètre Kisler.

II.2.6 Microscope pour la micrographie du copeau

Caractéristiques Principales:

- Type de microscope binoculaire ;
- Mono / Stereo Mono / Compound ;
- Grossissement 10x avec oculaire ;
- Objectif agrandissement 4x, 10x, 40x, 100x .



Figure II.7 : Microscope pour la micrographie du copeau.

II.2.6 Modes de fixation des ébauches

L'éprouvette utilisée (montage mixte) pour la réalisation des essais de rugosité et des efforts de coupe est représentée sur la [figure \(II.8\)](#).

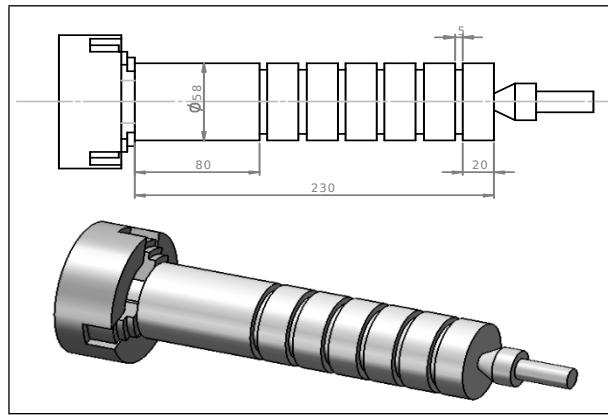


Figure II.8 : Eprouvette pour les essais de la rugosité et les efforts de coupe.

II.3 Procédure expérimentale

II.3.1 Planification des expériences

Parmi le grand nombre de facteurs qui influent sur le couple "Outil-Pièce" on peut citer, les éléments du régime de coupe (V, f, ap), la géométrie de la partie active de l'outil ($r, \alpha, \beta, \gamma, \varepsilon$, ...etc.), ainsi que les conditions de travail (rigidité de la machine, lubrification). Tous ces facteurs jouent le rôle des paramètres d'entrée du couple "Outil-Pièce". La tenue, les efforts, la rugosité, la température de coupe et la morphologie de copeaux présentent les paramètres de sortie (figure II.9) [32].

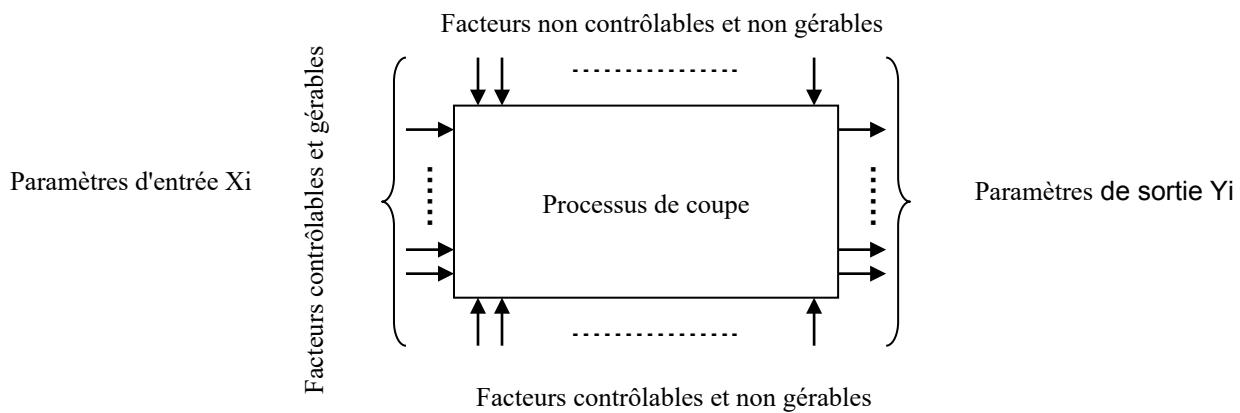


Figure II.9: schéma structural du processus de coupe

Dans notre étude nous avons traité les points suivants:

- ◆ Evolution de la rugosité en fonction des paramètres (V, f, ap).
- ◆ Evolution des efforts de coupe en fonction des paramètres (V, f, ap).
- ◆ Evolution de la forme du copeau en fonction de la vitesse de coupe.

Notons $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ comme paramètres d'entrée et $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$ comme paramètres de sortie.

Les méthodes expérimentales utilisées pour étudier l'action d'un ou de plusieurs facteurs ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$) sur un paramètre Y sont: la méthode unifactorielle pour la détermination de l'influence de la vitesse de coupe sur la rugosité et les efforts de coupe. La méthode est utilisée dans plusieurs références [15, 33, 25, 22].

II.3.2 Méthodes expérimentales

II.3.2.1 Méthode unifactorielle

Pour déterminer les constantes du modèle mathématique ayant la forme suivante:

$$Y = C \cdot X^b \quad (\text{II.1})$$

nous avons utilisé un programme en matlab ([annexe I](#)) qui donne directement les valeurs des constantes du modèle ainsi que le coefficient de corrélation R^2 .

II.4 Mode opératoire de réalisation et Conditions de coupe

II.4.1 Mode opératoire de réalisation

Nous avons tout d'abord préparé l'éprouvette ([figure II.8](#)), puis réalisé des usinages de type chariotage.

II.4.1.1 Effort de coupe et rugosité

Le contrôle des efforts de coupe a été réalisé en utilisant des portées de 20 mm indiquées à la [figure II.8](#) au moyen d'un dynamomètre. Les valeurs des efforts de coupe ont été enregistrées au cours d'une seule acquisition. Chaque graphe représente une passe de chariotage. La mesure de la rugosité est réalisée directement sur la même machine et sans démontage de la pièce après chaque essai de l'effort de coupe.

II.4.2 Conditions de coupe

La pièce est maintenue en montage mixte. L'usinage a été effectué à sec (sans lubrification) et dans les conditions de coupe suivantes ([tableau II.5](#)):

Tableau II.5: conditions de coupe.

| Conditions de coupe | Vitesse de coupe (m/min) | Avance (mm/tr) | Profondeur de passe (mm) |
|---------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|
| Uni-factorielle | 120-150-180-250 | 0.08 | 0.25 |

CHAPITRE III

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de l'impact des conditions de coupe sur les paramètres de sortie (la rugosité et les efforts de coupe), qui influent directement sur le couple "Outil-Pièce" lors de l'usinage de l'acier C30 avec des outils carbure revêtu (GC4015) et carbure non revêtu (P35) à titre de référence,

III.2 Résultats des essais de la rugosité des surfaces usinées

Dans cette partie, nous présenterons les résultats de l'impact des conditions de coupe sur la rugosité des surfaces lors de l'usinage de l'acier C30 par la P35 et la GC4015. Des modèles mathématiques de la rugosité en fonction des éléments du régime de coupe seront également proposés.

III.2.1 Influence des conditions de coupe sur la rugosité des surfaces usinées (méthode unifactorielle)

Le suivi a été réalisé en utilisant des éprouvettes ayant des portées de 20 mm ([figure II.8](#)).

Les essais relatifs à l'étude de l'influence de la vitesse de coupe sur la rugosité de surface de l'acier C30, ont permis l'obtention des résultats reportés sur le [tableau III.1](#). L'influence de la vitesse de coupe sur les différents critères de la rugosité (Ra, Rz et Rt) obtenus lors de l'usinage de cet acier par les deux matériaux à outil testés (P35 et GC4015) est illustrée graphiquement sur les [figures III.1, III.2 et III.3](#).

Tableau III.1: Rugosité de surface de l'acier C30 en fonction de la vitesse de coupe

| Nº Essai | Paramètres d'entrée | | | Paramètres de sortie Rugosité (μm) | | | | | |
|-------------|---------------------|--------------|------------|---|--------|-------|--------|-------|--------|
| | Vc (m/mn) | f (mm/tr) | ap (mm) | Ra | | Rz | | Rt | |
| | | | | P35 | GC4015 | P35 | GC4015 | P35 | GC4015 |
| 1 | 120 | 0.08 | 0.25 | 3,36 | 2,60 | 20,98 | 15,44 | 23,65 | 20,18 |
| 2 | | | | 3,21 | 2,45 | 18,03 | 14,22 | 21,74 | 18,68 |
| 3 | | | | 3,09 | 2,24 | 17,84 | 14,16 | 21,36 | 18,55 |
| 4 | | | | 1,54 | 1,38 | 9,43 | 9,88 | 10,55 | 12,34 |

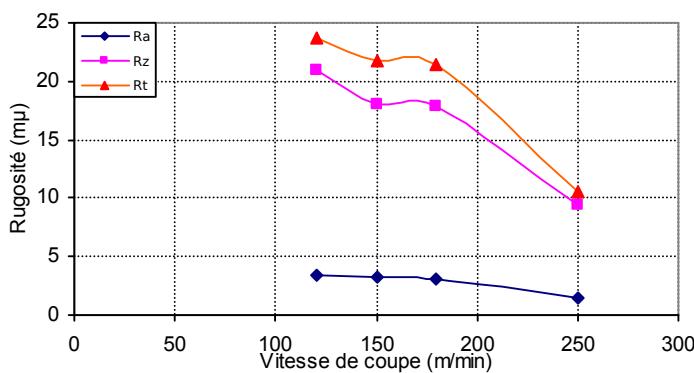


Figure III.1: Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité obtenue par la P35 à $f=0,08 \text{ mm/tr}$ et $ap=0,25 \text{ mm}$.

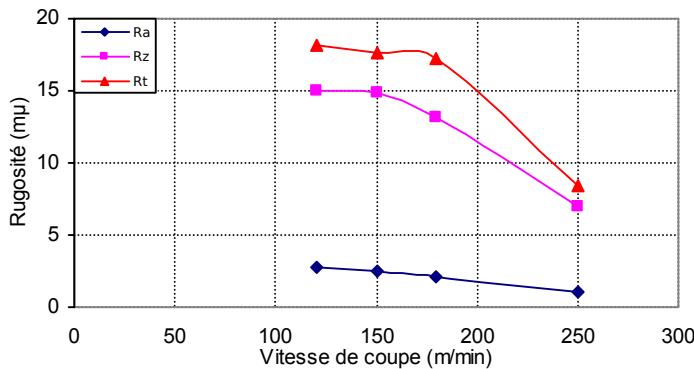


Figure III.2: Influence de la vitesse de coupe sur la rugosité obtenue par Le GC4015 à $f=0,08 \text{ mm/tr}$ et $ap=0,25 \text{ mm}$.

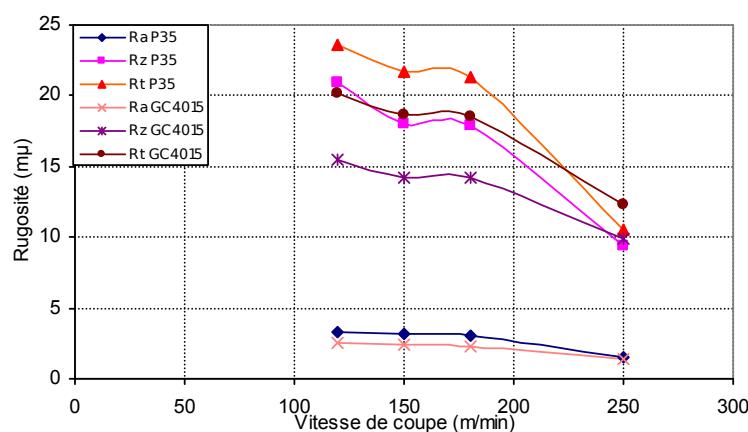


Figure III.3: Influence de la vitesse de coupe sur les critères de rugosité obtenus avec la P35 et le GC4015 à $f=0,08 \text{ mm/tr}$ et $ap=0,25 \text{ mm}$.

III.3 Résultats des essais des efforts de coupe

Les expériences de la variation des composantes des efforts et de la pression spécifique de coupe en fonction des conditions de travail ont été effectuées avec les deux matériaux de coupe GC4015 et P35. Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes ([figure II.8](#)) conformément à la méthode unifactorielle (planification des expériences).

III.3.1 Influence de la vitesse de coupe sur les efforts de coupe (méthode unifactorielle)

Les résultats de la variation des composantes des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe sont représentés sur le [tableau III.2](#). Les [figures \(III.4 et III.5\)](#) illustrent les tendances de ces composantes en fonction du facteur variable.

Tableau III.2: Résultats de l'évolution des efforts de coupe lors de l'usinage de l'acier C30 en fonction de la vitesse de coupe.

| N° Essai | Paramètres d'entrée Régime de coupe | | | | Paramètres de sortie Efforts de coupe | | | | | |
|----------|--|-----------|-----------|---------|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | | | P35 | | | GC4015 | | |
| | N° Essai | Vc (m/mn) | f (mm/tr) | ap (mm) | Fx (N) | Fy (N) | Fz (N) | Fx (N) | Fy (N) | Fz (N) |
| 1 | 120 | 0.08 | 0.25 | | 59.63 | 135.64 | 137.66 | 40.25 | 92.13 | 119.56 |
| 2 | 150 | 0.08 | 0.25 | | 26.92 | 82.38 | 110.16 | 39.67 | 90.85 | 107.59 |

| | | | | | | | | | |
|---|-----|------|------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|
| 5 | 180 | 0.08 | 0.25 | 45.23 | 93.67 | 106.32 | 33.48 | 105.02 | 134.16 |
| 4 | 250 | 0.08 | 0.25 | 43.76 | 92.74 | 100.72 | 38.30 | 88.29 | 98.11 |

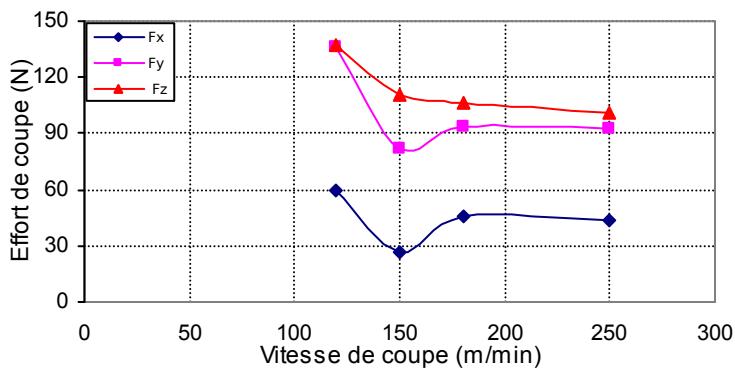


Figure III.4: Evolution des composantes de l'effort de coupe en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier C30 avec l'outil P35.

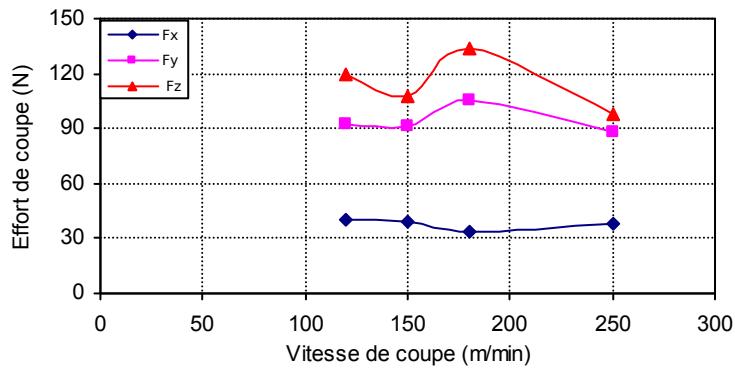


Figure III.5: Evolution des composantes de l'effort de coupe en fonction de la vitesse de coupe lors de l'usinage de l'acier C30 avec l'outil GC4015.

III.3.1 Influence de temps sur les efforts de coupe (méthode unifactorielle)

Les résultats de la variation des composantes de l'effort de coupe (Fx, Fy et Fz) des plaquettes (P35 et GC4015) en fonction du temps pour différentes vitesses de coupe sont représentés graphiquement par les figures (III.6 et III.7). Ces courbes sont obtenues par logiciel Dyno Ware du dynamomètre.

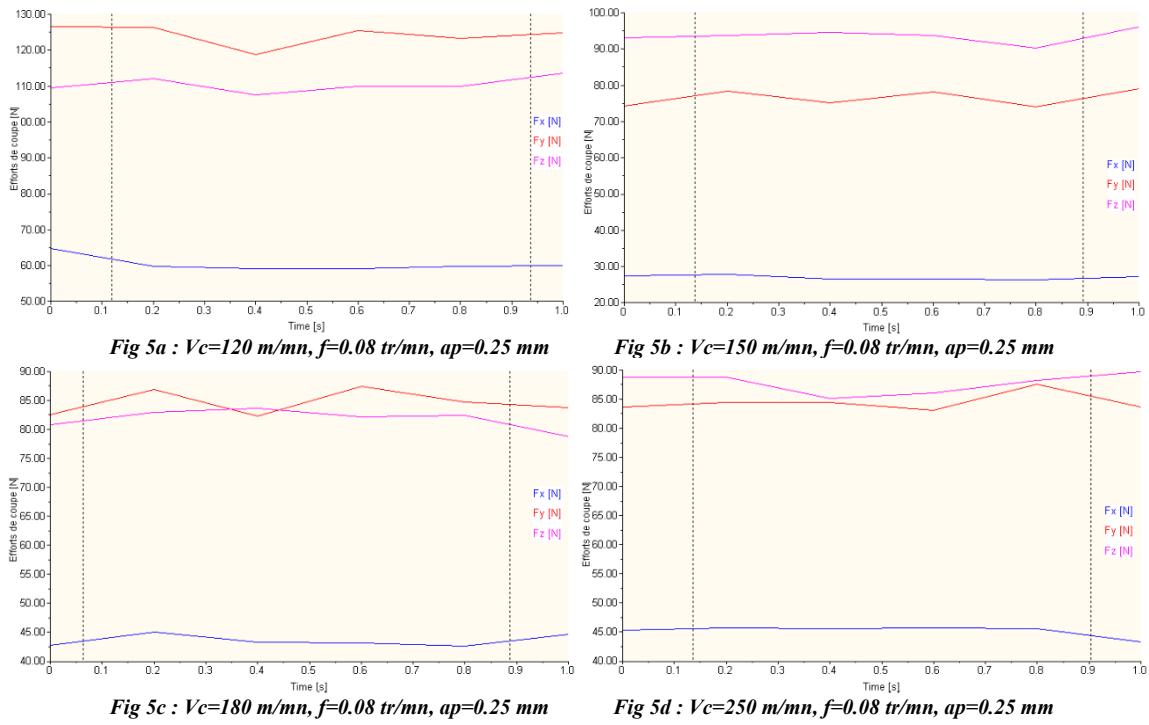


Figure III.6 : Evolution des efforts de coupe de l'outil P35 en fonction du temps lors de l'usinage de l'acier C30 pour différentes vitesses de coupe.

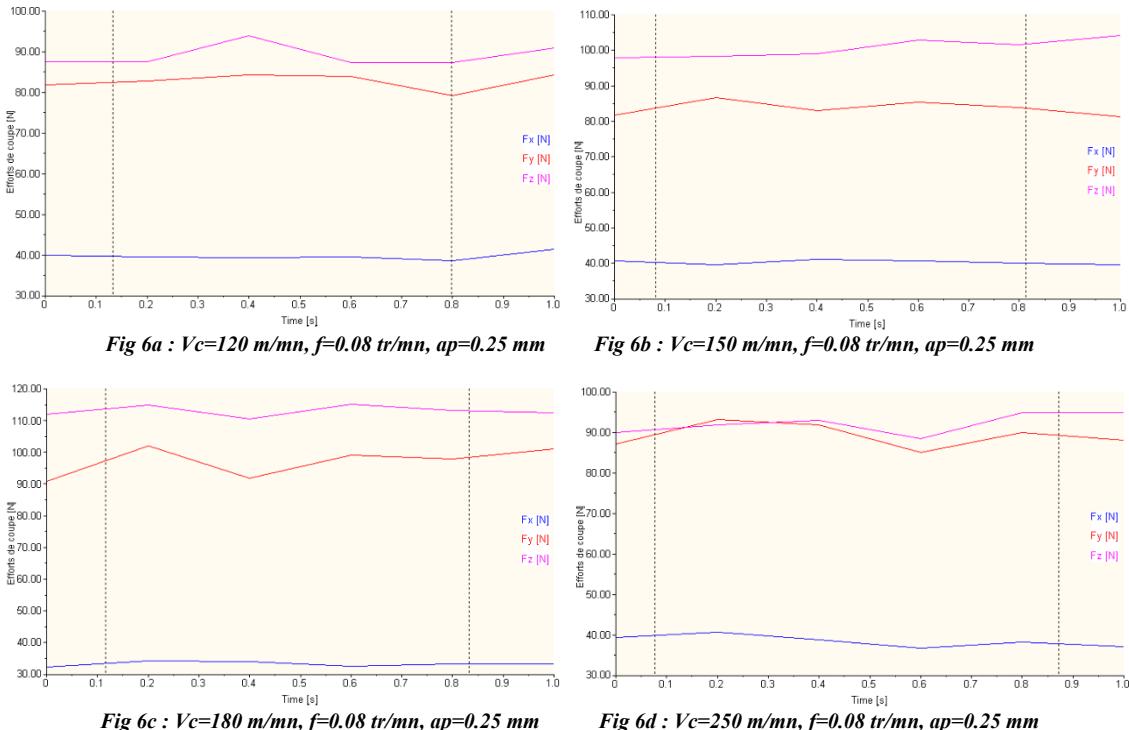


Figure III.7: Evolution des efforts de coupe de l'outil GC4015 en fonction du temps lors de l'usinage de l'acier C30 pour différentes vitesses de coupe.

L'analyse et l'interprétation des résultats présentés dans ce chapitre seront exposées dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV

ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS

IV.1 introduction

Ce chapitre est dédié à l'analyse et à l'interprétation des données issues du chapitre III. Il concerne l'étude du contact "Outil-Pièce" pour deux types de plaquettes (GC4015 et P35) lors de l'usinage de l'acier C30. L'analyse de ce contact a été faite à travers des plans d'expériences, suivant l'évolution des paramètres de sortie (rugosité et efforts de coupe) en fonction des paramètres d'entrée (V_c , f , et a_p).

IV.2 Analyses des résultats de la rugosité

IV.2.1 Analyse de l'influence de la vitesse de coupe sur la rugosité des surfaces usinées

Les résultats de la variation des critères de rugosité (R_a , R_z , R_t) en fonction de la vitesse de coupe, pour les deux matériaux à outil testés sont illustrés dans le [tableau III.1](#) et les [figures III.1 et III.2](#). Les états de surface ainsi obtenus caractérisent des plages de R_a allant de 1,38 à 2,60 μm pour la plaquette GC4015, et de 1,54 à 3,36 μm pour la P35. L'examen approfondi de ces résultats permet de mettre en évidence qu'au cours des opérations d'usinage de l'acier C30 avec les plaquettes employées, la rugosité de surface présente une légère diminution progressive en fonction de l'accroissement de la vitesse de coupe. Cette observation suggère une corrélation inverse entre ces deux paramètres opérationnels dans la plage étudiée. Il est de surcroît important de noter qu'une amélioration significative de la qualité de la surface usinée se manifeste de manière particulièrement prononcée à la vitesse de coupe de $V_c=250 \text{ m/min}$. Cette amélioration est due à la diminution des efforts de coupe aux grandes vitesses, ce qui permet un travail dans un système usinant plus stable.

Si on fait une comparaison entre les rugosités générées par les deux matériaux à outil testés on observe que les valeurs de la rugosité données par la GC4015 sont systématiquement plus faibles que celles produites par la P35.

La [figure III.3](#) illustre une comparaison des résultats de la rugosité obtenus par le GC4015 et la P35 lors de l'usinage de l'acier C30. On remarque clairement que les valeurs des critères de la rugosité (R_a , R_z , R_t) données par la GC4015 en fonction de la vitesse de coupe sont nettement meilleures que celles générées par le carbure non revêtu P35. La supériorité du GC4015 réside dans le fait qu'il possède une grande résistance à l'usure, ce qui lui confère des efforts de coupe moindres et par conséquent le couple "Outil-Pièce" travaille dans des conditions plus stables.

IV.3 Analyses des résultats des efforts de coupe lors de l'usinage de l'acier C30

L'effort de coupe représente un facteur dont l'influence sur le couple "Outil-Pièce" est significative. L'étude de ces efforts est à la base de l'évaluation de la puissance de coupe nécessaire à l'exécution de l'opération d'usinage. Elle est également indispensable pour le dimensionnement des organes de la machine ainsi que pour la prévision des déformations de la pièce durant le processus d'usinage. Plusieurs chercheurs [\[34, 35\]](#) considèrent également les efforts de coupe comme critère d'évaluation de l'usinabilité des matériaux.

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail où sont présentés les résultats expérimentaux d'une étude des efforts de coupe, lors de l'usinage de l'acier C30 avec deux plaquettes (GC4015 et P35). Cette étude a permis de mettre en évidence l'influence des conditions de coupe sur les différentes composantes de l'effort de coupe. Pour y parvenir, des essais ont été réalisés en se basant sur les méthodes uni-factorielle et multifactorielle (planification des expériences), où les paramètres variables sont : la vitesse de coupe, l'avance par tour et la profondeur de passe.

IV.3.1 Evolution des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe

Les résultats présentés sur les [figures III.4 et III.5](#) illustrent l'évolution des efforts de coupe en fonction des paramètres d'usinage (V_c , f , a_p). Les figures montrent qu'une augmentation de la vitesse de coupe entraîne une diminution des composantes de l'effort de coupe. Ce phénomène s'explique par l'élévation de la température à l'interface "Outil-Pièce", ce qui rend le matériau travaillé plus plastique et, par conséquent, réduit l'effort nécessaire à l'opération de coupe. Il est également important de noter que les vitesses de coupe utilisées n'ont pas favorisé l'apparition d'une arête rapportée, un point également mentionné dans la référence [36].

L'analyse des efforts de coupe en fonction de la vitesse de coupe pour les deux niveaux min et max de la vitesse, conduit à une diminution des efforts de coupe (F_x , F_y , F_z) successivement de (26.61% ; 31.62% ; 73.16%) pour la P35 et (4.84% ; 4.16% ; 17.94%) pour le GC4015. Les résultats montrent aussi que l'effort tangentiel (F_z) est prépondérant par rapport aux deux autres efforts (F_y et F_x).

Les résultats de la variation des composantes de l'effort de coupe (F_x , F_y et F_z) des plaquettes (P35 et GC4015) en fonction du temps pour différentes vitesses de coupe sont représentés graphiquement par les [figures III.6 et III.7](#). L'analyse de ces courbes montre que l'effort le plus important est celui sur l'axe Z, c'est à dire dans la direction du mouvement de coupe, appelé effort tangentiel ou effort principal de coupe. En général, Ce dernier est plus grand en valeur absolue par rapport aux deux autres composantes F_y et F_x .

Conformément au protocole d'essais, les efforts d'usinage pour les deux plaquettes ont été enregistrés. Le graphique ci-dessous ([figure IV.1](#)) rend compte des efforts moyens mesurés au cours des premières secondes d'usinage des plaquettes testées pour les deux niveaux min et max de la vitesse, ($f = 0.08 \text{ mm/tr}$ et $a_p = 0.25 \text{ mm}$).

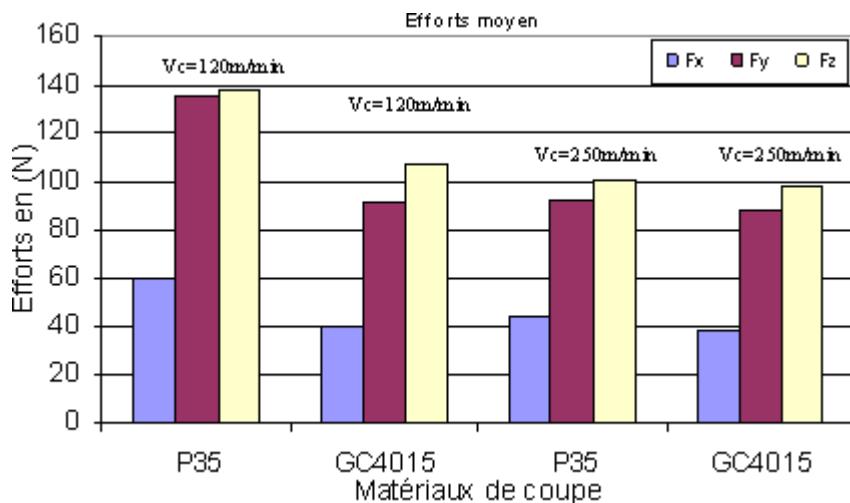


Figure IV.1: Efforts moyens mesurés lors de l'usinage avec les matériaux à outils testés aux deux niveaux min et max de la vitesse de coupe.

Il est essentiel de souligner d'emblée que l'effort le plus significatif se manifeste selon l'axe Z, ce qui correspond à la direction même du mouvement de coupe. Nous observons clairement que les valeurs des efforts de coupe sont inférieures pour la plaque

revêtue comparativement à la plaquette non revêtue. Cette constatation nous amène naturellement à porter une attention particulière au contact "Outil-Pièce", dont les caractéristiques sont intrinsèquement liées à la nature du matériau de coupe.

En effet, au cours de l'usinage, le contact "Outil-Pièce" se matérialise principalement par un frottement entre l'outil et la pièce. Ce frottement est fondamentalement modifié par la présence du revêtement. Bien qu'il ait été observé que les revêtements tendaient à disparaître relativement rapidement dans la zone de contact "Outil-Pièce" – spécifiquement là où les pressions sont maximales – il demeure impératif de reconnaître que l'influence bénéfique de ce revêtement perdure durablement.

IV.4 Analyse de la formation du copeau

Le copeau est la conséquence de l'usinage. Mais si nous faisons le raisonnement inverse, comme tend à le faire la démarche du couple "Outil-Matière" (COM), le copeau donne des informations sur les conditions de coupe. On peut penser qu'une connaissance précise des mécanismes de formation du copeau peut mener à l'optimisation des conditions de coupe. C'est la raison de l'intérêt que le COM a accordé au copeau [14].

Nous avons procédé à la récupération des copeaux durant les différentes passes des essais. L'analyse de la forme des copeaux et de son évolution constitue une variable de sortie d'intérêt comparable aux autres paramètres déjà étudiés, même si elle est d'une nature moins propice aux mesures précises. En effet, elle est directement liée au mécanisme de formation du copeau et révèle la complexité de ce mécanisme à travers la variabilité des copeaux obtenus suivant les différentes conditions de coupe. La micrographie de la morphologie du copeau cette méthodes (unifactorielle) présentée sur les [figures II.C1](#). Une présentation plus détaillée de la morphologie des copeaux obtenus lors de cette étude est donnée dans [l'annexe II](#)

Influence de la vitesse de coupe sur la formation du copeau

Le mécanisme de formation du copeau est nettement influencé par la vitesse de coupe. Plusieurs études effectuées analysent l'influence de la vitesse de coupe sur le mécanisme de formation du copeau et sur la température. Il est vrai que tous les matériaux ne se comportent pas de la même manière sous l'effet de l'accroissement de la vitesse de coupe, néanmoins, il existe une certaine similitude dans le processus de formation du copeau, et de son évolution avec la vitesse coupe. Les observations microstructurales des copeaux obtenus avec plusieurs vitesses de coupe variant de 120 m/min à 250 m/min, ont pour but d'analyser les déformations et d'identifier les variables permettant de déterminer la géométrie du copeau et de comprendre le phénomène de coupe ([figure II.C1](#)) voir [annexe II](#).

Les [figures IV.2 et IV.3](#), montrent bien l'évolution de la forme du copeau en fonction de la vitesse de coupe V_c . Deux types de copeau ont été observés, Copeau discontinu pour les faibles vitesses et Copeau hélicoïdal en rondelle (long et enchevêtré) pour les grandes vitesses pour la plaquette P35. Cette forme en hélice est la conséquence des conditions d'usinage (contrainte résiduelle, plastification, température, usure). Par contre pour la plaquette GC4015 la forme du copeau reste presque la même (copeau continu). Ceci explique le rôle de revêtement, qui lui confère des températures, des efforts de coupe et des usures moindres et par conséquent un bon contact à l'interface "Outil-Pièce".

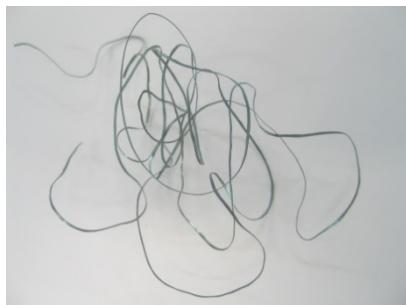
a) $V_c=120\text{m/min}$ b) $V_c=150\text{m/min}$ c) $V_c=180\text{m/min}$ d) $V_c=250\text{m/min}$

Figure IV.2: Evolution de la forme du copeau en fonction de la vitesse de coupe pour la P35 lors de l'usinage de l'acier C30.

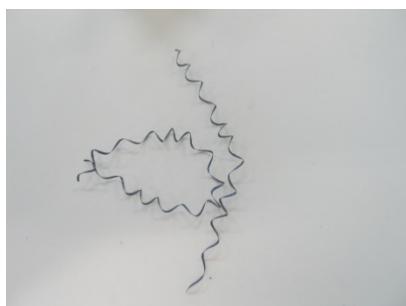
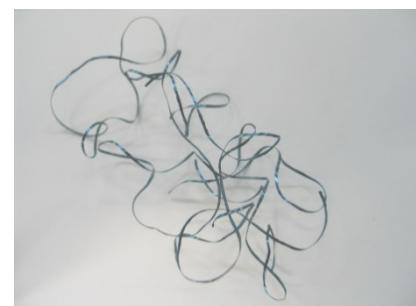
a) $V_c=120\text{m/min}$ b) $V_c=150\text{m/min}$ c) $V_c=180\text{m/min}$ d) $V_c=250\text{m/min}$

Figure IV.3: Evolution de la forme du copeau en fonction de l'usure et de la vitesse de coupe pour le GC4015 lors de l'usinage de l'acier C30.

En résumé, les essais réalisés et les études développées sur le sujet nous permettent de conclure que les conditions d'usinage ont un effet incontournable sur le comportement du couple "Outil-Pièce". Néanmoins la maîtrise de ce processus complexe peut faciliter l'optimisation de ses fonctions objectives (durée de vie, efforts de coupe, température, coût de production, qualité du produit etc ...).

CONCLUSION GENERALE

Les travaux d'usinage de l'acier C30, menés avec les matériaux d'outil GC4015 et P35 sous différentes conditions opératoires, ont fait l'objet d'une analyse et d'une interprétation méthodiques, dont il ressort les principales conclusions qui suivent :

- Les résultats des rugosités générées par les deux matériaux de coupe, qu'il s'agisse de la méthode uni-factorielle, montrent clairement que les performances du carbure revêtu (GC4015) surpassent de loin celles du carbure non revêtu (P35). Ceci est valable pour toutes les conditions de coupe testées, cette performance s'explique par la composition chimique et de la structure de l'outil (GC4015), qui donne des efforts plus faibles que l'outil (P35), traduisant un bon contact dans la zone de l'interface "Outil-Pièce".
- La qualité de la surface usinée s'améliore avec l'accroissement de la vitesse de coupe. Cette amélioration est attribuée à la diminution des efforts de coupe à haute vitesse, ce qui indique la stabilité du système d'usinage.
- L'effort tangentiel, correspondant à la direction du mouvement de coupe représente l'effort le plus important. On observe que les valeurs des efforts de coupe sont plus faibles pour la plaque revêtue (GC4015) que pour la plaque non revêtue (P35). Ceci conduit à la conclusion que l'interface "outil-pièce" est tributaire des caractéristiques intrinsèques du matériau de coupe.
- L'effort tangentiel (F_z) est prépondérant par rapport aux deux autres composantes (F_y et F_x). On observe que les valeurs des efforts de coupe sont plus faibles pour la GC4015 que pour la P35. Ceci est dû naturellement à la nature du contact aux interfaces "outil-pièce". En effet le contact outil-pièce se concrétise, au cours de l'usinage, par un frottement de l'outil sur la pièce et ce dernier serait modifié par le revêtement.
- L'analyse des résultats montrent que l'effet de la vitesse de coupe sur les efforts de coupe, conduit à une diminution des composantes (F_x , F_y et F_z) de 26.61%, 31.62% et 73.16% pour la P35 et 4.84%, 4.16% et 17.94% pour la GC4015. Les résultats montrent aussi que l'effort tangentiel (F_z) est prépondérant par rapport aux deux autres composantes (F_y et F_x).
- Avec l'augmentation de la vitesse de coupe, les températures dans la zone de formation du copeau sont relativement grandes. Elles rendent généralement le matériau usiné plus plastique, ce qui fait diminuer les efforts nécessaires à la déformation du copeau d'une part et elles améliorent les conditions de frottement aux interfaces "Outil-Pièce" et "Outil-Copeau".

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Badek D.K, Kim H.S**, Optimization of Feed Rate in a Face Milling operation Using a Surface Roughness Made, *International Journal of Machine Tools Manufacture. 41:451-462, 2001.*
- [2] **Ginta T.L, Amin A.K.M.N, Karim A.N.M, Patwari A.U, Lajis M.A**, Modeling and Optimization of Tool Life and Surface Roughness for End Milling Titanium Alloy Ti-6Al-4V Using Uncoated WC-Co Inserts, *CUTSE International Conference 2008, 24-27 November 2008, Miri, Sarawak, Malaysia.*
- [3] **Qehaja N, Jakupi K, Bunjaku A, Bruci M, Osman H**, Effect of Machining Parameters and Machining Time on Surface Roughness in Dry Turning Process, *University of Pristina, FME, 10000 Pristina, Kosovo*
- [4] **Onwubolu G.C**, A note on Surface Roughness Prediction Model in Machining of Carbon Steel by PVD Coated cutting Tool, *American Journal of Applied Sciences 2 (6): 1109-1112, 2005, ISSN 15469239*
- [5] **Bouziane A.** Etude de l'effet des conditions d'usinage sur le couple "Outil-Pièce" en tournage, Mémoire de magister, Université Annaba, 2009.
- [6] Usinage : LMBA et CGtech maîtrisent le couple outil-matière
- [7] **Bissey S**, Développement d'un modèle d'efforts de coupe applicable à des familles d'outils : cas du fraisage des aciers traités thermiquement, *thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Cluny, 2005.*
- [8] **Gautier L**, Eude des mécanismes d'endommagement des outils carbure
- [9] **Smith G**, Cutting Tool Technology Industrial Handbook
- [10] **Gladel G, Gourdet D, Tous J.L**, Matériaux pour outils de coupe, *Technique de l'ingénieur, BT1 B 7 080, pp2-16, 1984.*
- [11] **Poulachon G**, Usinabilité des matériaux difficiles, Application aux aciers durcis, *Technique de l'ingénieur, BT1 B 7 048, pp2-18, 1984.*
- [12] cermet, Wikipédia.
- [13] ISO 20507:2014 : Céramiques techniques — Vocabulaire » [archive], *Organisation internationale de normalisation, novembre 2014.*
- WC-CO par la caractérisation de l'interface Outil-Copeau application à l'usinage à sec de l'alliage d'aluminium aéronautique AA2024 T351, *Thèse de doctorat, Bordeaux, 2004.*
- [14] **Pagès C**, Comportement de revêtements céramiques sur outil en tournage à sec de finition, *Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lyon, 2003.*
- [15] **Yallese M.A.**, Etude de comportement à l'usure des matériaux de coupe modernes en tournage dur, *Thèse de doctorat, Université de Annaba 2005*
- [16] **Enache S**, la qualité des surfaces usinées, *Dunod, Paris 1972.*

- [17] Benamar A, Inglebert G, Boumahrat M, Durée de vie d'un carbure P20 pour le chariotage d'un acier C38 à rugosité contrôlée, *AFM, EDP Sciences 2006, Mécanique & Industries 6, 635–640 (2006)*.
- [18] Venkatesh K, Bobji M.S, Biswas S.K, Roughness due to workpiece wear generated in surface grinding of metals, *Tribology International Vol. 31, No. 12, pp. 771–778, 1998.*
- [19] BLUNT L, JIANG X: Advanced techniques for assessment surface topography: development of a basis for 3D surface texture standards" surfstand". *Elsevier, 2003. 2*
- [20] Poull C, Janbein M, Druoton L, Roudet C, Lanquetin.S, et al, La rugosité des surfaces et ses applications. *Journées Françaises d'Informatique Graphique (JFIG 2022), Nov 2022, Bordeaux, France. ffhal-03892076f.*
- [21] Remadna M, Le comportement du système usinant en tournage dur, application au cas d'un acier trempé usiné avec des plaquettes CBN, *Thèse de doctorat, INSA-LYON 2001.*
- [22] Benchiheub S, Etude de l'usure et de la rugosité lors de l'usinage de l'acier 100Cr6 avec les plaquettes CBN et Céramiques, *Mémoire de magister, Université Annaba, 2005.*
- [23] Abellán-Nebot J, Pastor C, Siller H, A Review of the Factors Influencing Surface Roughness in Machining and Their Impact on Sustainability.
- [24] Dietrich R, Garsaud D, Gentillon S, Nicolas M, Précis méthodes d'usinage (méthodologie, production et normalisation), *5^e édition, Nathan 1981.*
- [25] Mahfoudi F, Etude de l'influence de la machine-outil sur les paramètres technologiques, *Mémoire de magister, Université d'Annaba, 1997.*
- [26] Passeron A, Tournage, *Technique de l'ingénieur, BT1 B 7 086, pp1-22, 1998.*
- [27] Weill R, Techniques d'usinage, *Dunod, Paris 1971.*
- [28] Rech J, Contribution à la compréhension des modes d'actions tribologiques et thermiques des revêtements en usinage –Application au cas du taillage de dentures à la fraise-mère à grande vitesse, *Thèse de doctorat Ensam de Cluny 2002.*
- [29] KAMGUEM R, INSPECTION AUTOMATIQUE ET SANS CONTACT DE LA RUGOSITÉ DES PIÈCES USINÉES, *ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC.*
- [30] Selaimia M, Etude des efforts de coupe et de la rugosité lors de l'usinage du PE80, *Université 08 Mai 1945 Guelma - Algérie - Licence C.F.A.O 2008.*
- [31] Catalogue Sandvik 2005.
- [32] Yallese M, Boulanouar L, Chaoui K, Usinage de l'acier 100Cr6 trempé par un outil en nitrure de bore cubique, *Revue Mécanique & Industries, Volume 5, N°4, 2004, pp 355-368.*
- [33] Talhi F, Etude de l'influence du système MoDOP sur le comportement a l'usure des outils de coupe. *Mémoire de magister, Université d'Annaba, 2003.*
- [34] Amri B, Contribution à l'étude du comportement des matériaux modernes pour outils coupants, *Thèse, INSA Lyon, p.43-44, 1987.*
- [35] Nabahani F, Wear mechanisms of ultra-hard cutting tools materials, *J. Mater. Process. Technol., V (115), (2001), p.1388-1394.*
- [36] Yallese M A, Boulanouar L, Zeghib N, Belhadi S, Rigal J F, Etude des efforts et de la température de coupe lors de tournage dur de l'acier AISI 52100 par un outil CBN. *Revue synthèse, N°16, juin 2007, pp 75-87.*

- [37] Barlier C, Girardin L, Mémotech productique matériaux et usinage, *Edition Casteilla*, 1999.
- [38] Ledoux Y, Modélisation et étude expérimentale du comportement géométrique de l'ensemble: « Machine ~ Outil ~ Matière » appliqué à un tour, *Mémoire de diplôme d'étude approfondies « Mécanique»*, université de Savoie, 2002.

ANNEXE I

Programme de calcul des constantes des modèles mathématiques

Annexe I : Programme de calcul des constantes des modèles mathématiques**Programme 1 calculs des constantes des modèles mathématiques (Méthode unifactorielle)**

```

clear all,clc
%N = 4; % Nombre de mesures
N = input('Entrez le nombre de mesures = ');
% la tenue
%T = [24.17 20.3 18.3 8.36]; % Y
%T = [214.32 198 104.45 63]
disp('Saisie de la tenue');
for k=1:N
    msg = sprintf('T(%d) = ',k);
    T(k) = input(msg);
end
% La vitesse de coupe
%V = [120 150 180 250]; % X
disp('Saisie de la vitesse de coupe');
for k=1:N
    msg = sprintf('V(%d) = ',k);
    V(k) = input(msg);
end

% Calcul de la constante "b"
b = (N*sum(T.*V)-sum(T)*sum(V))/(N*sum(V.^2)-(sum(V)^2));

% Calcul de la constante "C"
C = (1/N)*(sum(T)-b*sum(V));

% Calcul de Coeficient de correlation
v = log(V);
t = log(T);
Sv = sqrt((1/N)*sum((v-mean(v)).^2));
St = sqrt((1/N)*sum((t-mean(t)).^2));
r = ((1/N)*sum(v.*t)-(mean(v)*mean(t)))/(Sv*St);

% Affichage
msg = sprintf('La valeur de la constante "b" : %f\n',b);
disp(msg);

msg = sprintf('La valeur de la constante "C" : %f\n',C);
disp(msg);

msg = sprintf('La valeur de la correlation au carrée : %f\n',r^2);
disp(msg);

```

II Planification des expériences

II.1 Méthode unifactorielle.

Les expériences réalisées selon cette méthode donnent des résultats qui seront exprimé par la relation du type $Y=f(X)$, ayant la forme:

$$Y=C.X^b \quad (I.1)$$

Où :

C: Constante qui tient compte de conditions de travail.

b: Exposant qui indique le degré d'influence de X sur Y.

Pour réaliser une expérience selon cette méthode on donne une série de valeurs discrètes au facteur examiné X, $X_i \in [X_{\min} \dots X_{\max}]$, tout en maintenant les autres facteurs constants.

Les valeurs des facteurs principaux maintenus constants et les conditions de travail sont portées sur le [tableau II.1](#) qui contient les valeurs de (X et Y). Pour chaque $X=X_i$, on réalise un essai et on mesure la valeur correspondante de Y_i ($i \in \{1 \dots N\}$). Les résultats de ces essais sont portés sur le [tableau II.1](#).

La répétition des essais dans les mêmes conditions augmente la précision de ces derniers. Ces essais sont appelés parallèles. Par exemple, en répétant un essai cinq fois ($n=5$) la probabilité de confiance dans ce cas peut être estimée à $\gamma = 0.90$. En technologie de construction mécanique, la valeur recommandée et la plus utilisée est $\gamma = 0.95$.

Cette probabilité de confiance ne peut être obtenu que si le nombre d'observations (n) soit égal à 7. Mais parfois, pour des raisons techniques ou économique, la réalisation des expériences devient difficile, dans ces conditions on peut se contenter d'un nombre d'essai parallèle $n=3$.

Tableau II.1: Succession de réalisation des essais d'après la méthode unifactorielle.

| Valeurs des facteurs maintenus constants | | | | | | | | |
|--|--------------------------|--------------------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|--------------------|
| Régime de travail.....machine outil..... | | | | | | | | |
| Outil de coupe.....matière à usiner..... | | | | | | | | |
| N°= | Paramètres d'entrée X | Facteurs de sortie | | | | | | Y moyen |
| | | Y _{i1} | Y _{i2} | ..... | Y _{ig} | ..... | Y _{in} | |
| 1 | X ₁ | Y ₁₁ | Y ₂₁ | ..... | Y _{1g} | ..... | Y _{1n} | Y _{moy 1} |
| 2 | X ₂ | Y ₂₁ | Y ₂₂ | ..... | Y _{1g} | ..... | Y _{2n} | Y _{moy 2} |
| i | X _i | Y _{i2} | Y _{i2} | ..... | Y _{ig} | ..... | Y _{in} | Y _{moy i} |
| N | X _N | Y _{N1} | Y _{N2} | ..... | Y _{Ng} | ..... | Y _{Nn} | Y _{moyN} |

Habituellement on recommande $N= (5 \div 15)$. Ce nombre d'essais est choisi en fonction du mode de la recherche et des conditions de travail. Le nombre global des essais sera égal à $N \cdot n$ [\[13\]](#).

Annexe II

[13] **Talhi F**, Etude de l'influence du système MoDOP sur le comportement a l'usure des outils de coupe. *Mémoire de magister, Université de Annaba, 2003.*

Annexe III : Morphologie du copeau

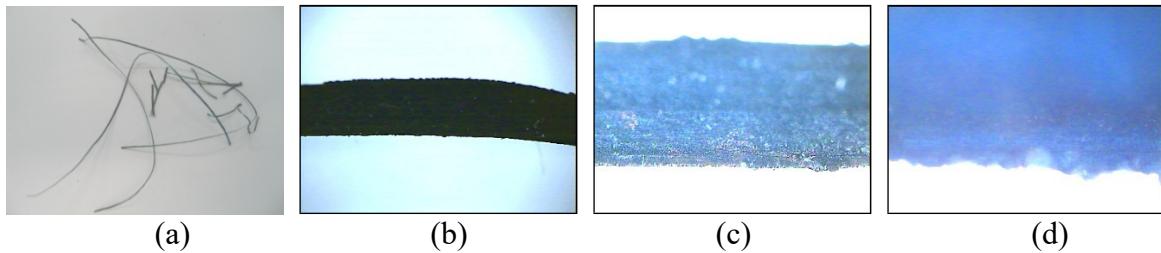


Figure III.C.1. (a) : $V_c = 120 \text{ m/min}$; $f = 0.08 \text{ mm/tr}$; $ap = 0.25\text{mm}$.

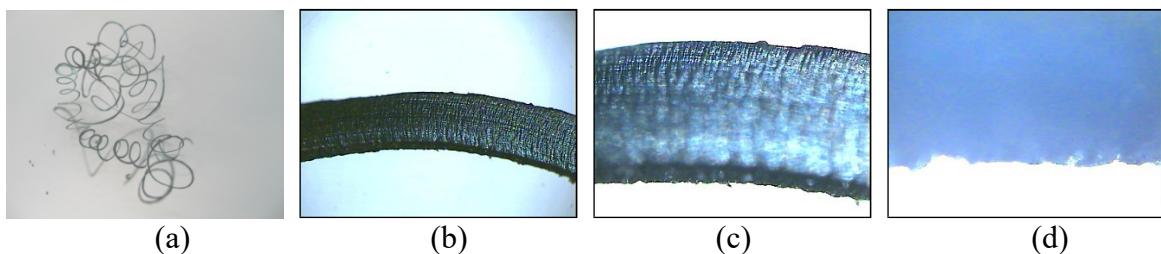


Figure III.C.1. (b) : $V_c = 150 \text{ m/min}$; $f = 0.08 \text{ mm/tr}$; $ap = 0.25\text{mm}$.

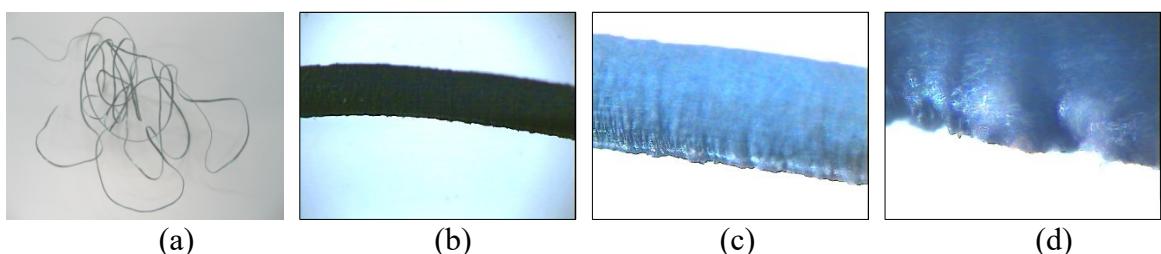


Figure III.C.1. (c) : $V_c = 180 \text{ m/min}$; $f = 0.08 \text{ mm/tr}$; $ap = 0.25\text{mm}$.

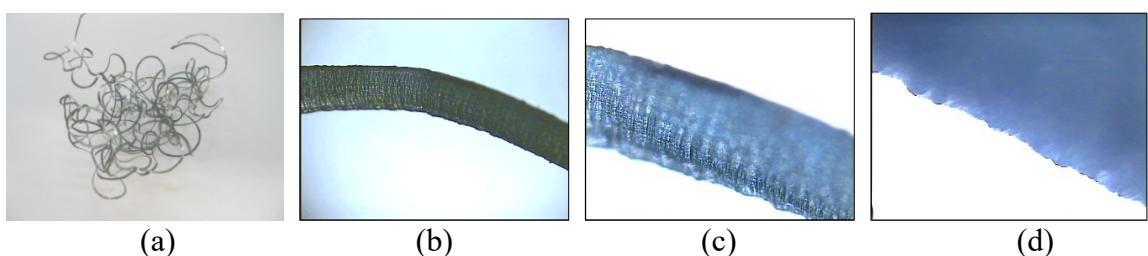


Figure III.C.1. (d) : $V_c = 250 \text{ m/min}$; $f = 0.08 \text{ mm/tr}$; $ap = 0.25\text{mm}$.

Figure III.C.1: Evolution de la forme du copeau en fonction de la vitesse de coupe de l'outil P35 lors de l'usinage de l'acier C32; **a)** vue global du copeau; **b)** G \times 4 ; **c)** G \times 10; **d)** G \times 40.

Annexe III

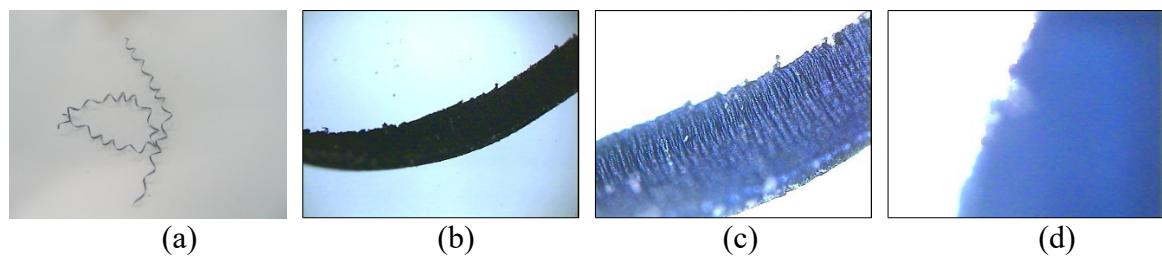


Figure III.C.2. (a) : $V_c = 120 \text{ m/min}$; $f = 0.08 \text{ mm/tr}$; $ap = 0.25\text{mm}$.

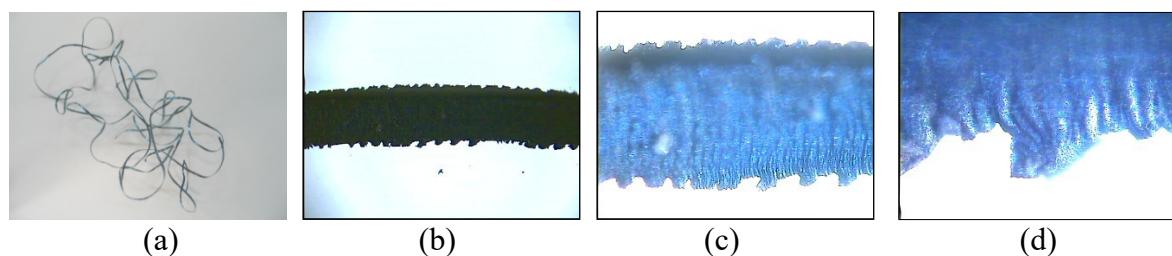


Figure III.C.2. (b) : $V_c = 150 \text{ m/min}$; $f = 0.08 \text{ mm/tr}$; $ap = 0.25\text{mm}$.

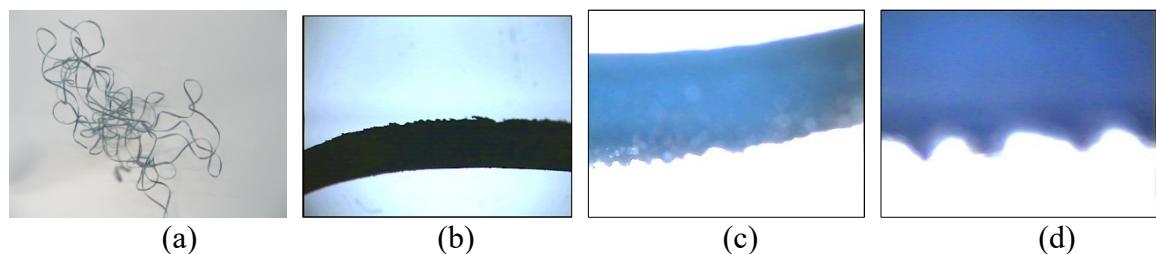


Figure III.C.2. (c) : $V_c = 180 \text{ m/min}$; $f = 0.08 \text{ mm/tr}$; $ap = 0.25\text{mm}$.

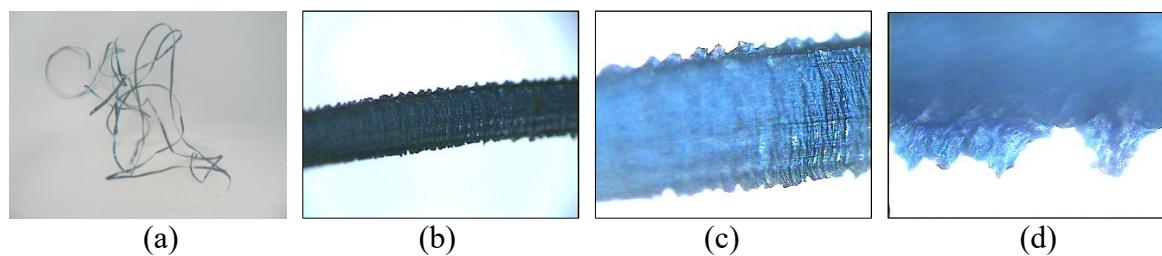


Figure III.C.2. (d) : $V_c = 250 \text{ m/min}$; $f = 0.08 \text{ mm/tr}$; $ap = 0.25\text{mm}$

Figure III.C.2: Evolution de la forme du copeau en fonction de la vitesse de coupe du GC4015 lors de l'usinage de l'acier C32; **a)** vue global du copeau; **b)** $G \times 4$; **c)** $G \times 10$; **d)** $G \times 40$